Національна академія наук України

Інститут сцинтиляційних матеріалів
НАН України

МИКОЛА ЗАХАРОВИЧ ГАЛУНОВ

Харків - 2022

Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України

МИКОЛА ЗАХАРОВИЧ ГАЛУНОВ

Життєдіяльність, спогади, наукові праці

Упорядники:
канд. техн. наук П.О. СТАДНИК,
канд. фіз.-мат. наук Ж.В. СЛЬОЗОВА,

Друкується за рішенням ученої ради Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України (протокол від 20 грудня 2021 р. № 15)

Меморіальний збірник присвячено відомому вченому в галузі радіолюмінесценції органічних конденсованих середовищ, професору Миколі Захаровичу Галунову (1951 – 2021рр.). Автори спогадів – його колеги та учні. До книги увійшли опис життєдіяльності М.З.Галунова, вибрані наукові статті і повна бібліографія праць ученого.

Для широкого кола наукових працівників, аспірантів і студентів, що цікавляться історією та розвитком вітчизняної науки.

«З НАУКОЮ У ЖИТТІ» ТВОРЧИЙ ШЛЯХ Миколи Захаровича ГАЛУНОВА

Галунов Микола Захарович народився 18 грудня 1951 року у м. Харкові. Закінчив Харківську загальноосвітню школу № 6 із золотою медаллю. Навчався на кафедрі фізичної оптики фізичного факультету Харківського державного університету ім. О. М. Горького, який закінчив у 1973 році. Свою трудову діяльність Микола Захарович Галунов розпочав на початку 1974 року у Всесоюзному науково-дослідному Інституті монокристалів, сцинтиляційних матеріалів і особливо чистих хімічних речовин Міністерства хімічної промисловості СРСР з посади інженера.

Завдяки відмінній теоретичній підготовці, творчим здібностям і активній життєвій позиції керівництво Інституту досить швидко переводить Галунова М. З. з інженерних напрямків робіт на наукову діяльність, спочатку на посаду молодшого наукового співробітника, а потім наукового і старшого наукового співробітника.

У 1984 році Галунов М. З. захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук. Кандидатська дисертація Галунова М. З. присвячена вивченню теорії явищ, що обумовлюють кінетику формування сцинтиляційного спалаху в швидкодіючих органічних сцинтиляторах. Ним було доведено, що відмінність між кінетиками швидкого компоненту імпульсів радіо- та фотолюмінесценції зникала для рідин із малою в’язкістю, спостерігалась для в’язких розчинів та була принциповою для

органічних монокристалів. Незшиті (не сітчасті) полімерні структури займали проміжний стан. Тобто, вже тоді Галунов М. З. показав, що специфіка збудження органічної речовини іонізуючим випромінюванням може чітко проявлятись у параметрах сцинтиляційного імпульсу, але, водночас, цей вплив суттєво залежить від структурної досконалості об'єкту.

У 1988 році Галунов М. З. займає посаду начальника сектору, а з 1992 року стає завідувачем відділу молекулярної електроніки органічних кристалів Інституту монокристалів, який на той час, після розпаду Радянського Союзу, було переведено в підпорядкування Національної академії наук України (НАН України).

У своїй подальшій науковій діяльності Микола Захарович зосередив свої творчі зусилля на розв'язанні низки актуальних задач органічного матеріалознавства, зокрема на: розвитку та побудові теорії радіолюмінесценції органічних конденсованих середовищ; теорії фізичних процесів, що відбуваються при кристалізації органічних і біологічних органічних речовин; процесів у органічних конденсованих люмінесцентних середовищах. Він стає висококваліфікованим фахівцем у сучасних питаннях радіоекології, радіобіології та радіомедицини, новатором у розробці нових радіаційностійких гетероструктурованих люмінесцентних матеріалів та вивченні фізичних процесів у них.

У 1994 році Галунов М. З. захищає дисертацію на наукову ступінь доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.05 – «оптика». У докторській дисертації ним розроблено системний підхід, що базується на порівнянні результатів експериментального вивчення як швидкого, так і сповільненого компонентів сцинтиляційного спалаху, з результатами аналізу кінетичних рівнянь. Ці рівняння описують формування сцинтиляційного спалаху з врахуванням затримки моментів збудження молекул внаслідок рекомбінації зарядових станів, які виникають безпосередньо внаслідок взаємодії первинного збудження із органічною речовиною. Вибраний

підхід враховував, що зарядові стани можуть локалізуватись або не локалізуватись на пастках як структурного, так і динамічного походження. Було доведено, що криза 70–80-х років теорії радіолюмінесценції органічних конденсованих середовищ була пов'язана з нехтуванням специфікою вкрай важливих етапів генерації та розміну енергії зарядових станів, що виникають у цих системах під дією іонізуючих випромінювань. Важливим фактором є наявність чи відсутність інтенсивної матеріальної дифузії у цих об'єктах, що призводить до різного розвитку сцинтиляційного процесу у полімерах та кристалах з одного боку та рідинах із малою в'язкістю з іншого. Для твердих тіл при формуванні швидкого компоненту сцинтиляційного спалаху вирішальним фактором стає структурна досконалість.

Галуновим М. З. було виконано фундаментальні дослідження з вивчення швидкоплинних процесів розміну енергії іонізуючого випромінювання в органічній речовині. В результаті таких досліджень було сформульовано та доведено існування нового напрямку щодо вивчення первинних процесів розміну енергії іонізуючих випромінювань у органічних конденсованих середовищах. Галунов М. З. вперше отримав експериментальні результати та запропонував фізичний механізм, який базувався на зовсім іншому поясненні фізичних процесів у треках іонізуючих частинок ніж це припускалося у класичних теоріях Біркса, Вольца, Кінга, Лостре та інших науковців. На базі цих новітніх результатів стало можливим розуміння кризи сцинтиляційної тематики 80-х років та причини абсолютної невідповідності між розрахунками, які було зроблено на базі даних із теорії радіолюмінесценції органічних сцинтиляторів, та переконливими експериментальними даними для органічних трекових детекторів. Галунов М. З. провів низку досліджень, метою яких було вивчення впливу процесів, що відбуваються при розміні енергії первинної частинки та формуванні зон високої густини активації. Для розуміння та кількісного аналізу цих процесів і процесів ос-

тигання треку необхідно було розділити їх внесок та внесок структурних особливостей сцинтиляційної системи.

Галуновим М. З. розвинуто люмінесцентний підхід щодо вивчення фізичних процесів у треках іонізуючих частинок і визначено природу явища «специфічного гасіння» для органічних молекулярних систем. Було виявлено, що механізм гасіння радіаційного збудження носить бімолекулярний характер (із великою вірогідністю анігіляції великої кількості первинних збуджень на початку процесу). Тобто цей механізм є вкрай ефективним при великих питомих енергетичних втратах іонізуючого випромінювання, що і спостерігалося експериментально. Було виявлено межі застосування «дифузійного» наближення при описі формування сповільненого компоненту імпульсу радіолюмінесценції. Цей процес також виявляв характерну специфіку органічних кристалів, пластмасових сцинтиляторів та рідин. Таким чином, процеси формування імпульсу радіолюмінесценції можна розділити на такі, що обумовлені специфікою взаємодії іонізуючого випромінювання високої енергії з органічною речовиною, та ті, що обумовлені процесами розміну цієї енергії і залежать від структурної досконалості об'єкту. Перша група причин дозволяє розповсюджувати отримані результати щодо формування треків іонізуючих частинок на біологічні системи, а друга вказує на те, що керування характеристиками об'єктів, що розробляються, можливо лише на етапі формування їх майбутніх властивостей, які визначають умови переносу зарядових станів та енергії електронного збудження.

Галуновим М. З. було виконано серію робіт, щодо вивчення впливу процесів, які відбуваються при переході від розплаву чи розчину до твердої фази (кристалу) через шар, що росте. Тобто мова йде про вивчення процесів у «м'якій речовині», що вже не є рідиною, але ще не є твердим тілом. В результаті було створено новий напрямок у вирощуванні молекулярних кристалів – отримання кристалів з керованою структурною досконалістю. За цей цикл робіт Галунова М.З. у

співавторстві було нагороджено премією ім. І. М. Францевича НАН України за 1992 рік. Проведені дослідження дозволили отримати низку нових фундаментальних результатів.

Внаслідок введення електронноакцепторних мікродомішок до розплаву молекулярних речовин виникають комплекси із переносом заряду, які орієнтують молекулярне оточення в розплаві, і тому змінюють умови формування шару м'якої структури, яка знаходиться між розплавом та кристалом, уже вирощеним. Із збільшенням концентрації таких домішок структурна досконалість кристалу спочатку стає кращою, а починаючи із 0,1 мол.% погіршується. Цей ефект (при великих концентраціях електронноакцепторних домішок) обумовлюється конкуренцією центрів, що потрапляють до одного й того ж молекулярного шару такої м'якої речовини. В діапазоні малих концентрацій такі центри ініціюють кристалізацію у своєму молекулярному шарі, конкуруючи із формуванням дефектів структури. Цей новий підхід до вирощування органічних кристалів дозволив довести середньоквадратичну розорієнтацію блоків мозаїки монокристалу до 6–30′ (для різних кристалів) замість величин у 60–80′, що були найкращими для стандартних методик. Внаслідок виникнення дефектів росту органічних кристалів не вдавалося налагодити промисловий випуск зразків сцинтиляційних монокристалів діаметром більше 65 мм. Використання вищезазначеного підходу не тільки надало можливість керувати структурною досконалістю об'єктів, які вирощувались, але й дозволило розпочати випуск зразків до 120 мм у діаметрі. Результати цих досліджень було підтверджено як теоретичними оцінками, так і результатами експериментів, де молекули шару м'якої речовини орієнтувалися атомарним полем відколів неорганічних кристалів, на яких відбувалося вирощування молекулярного кристалу. Завершенням цього циклу робіт стали експерименти із вирощування кристалів на краплі розплавленого металу, яка не може орієнтувати молекули розплаву. При введенні електронноакцепторних мікродомішок

кристал вирощувався, а при їх відсутності – ні.

Вищенаведений цикл досліджень став не лише основою робіт для подальшого вдосконалення характеристик кристалів, які вирощувалися під науковим керівництвом Галунова М. З., але й дозволив довести можливість реалізації ще одного нового наукового напрямку – отримання молекулярних сцинтиляційних матеріалів із теоретично необмеженими розмірами поперечного перерізу. Цей напрямок базується на отриманні сцинтиляторів методом пресування. В основі ідеї цих робіт лежать практичні результати, які дозволили Галунову М. З. із співробітниками виявити, що під час росту молекулярного кристала (системи із надслабкими міжмолекулярними взаємодіями) можна виділити три зони. Це рідина (розплав), наношар «м'якої речовини», яка вже не є рідиною, але ще не стала твердим тілом, та тверде тіло (кристал який виріс). В'язкість першого шару (розплаву) занадто мала для фіксації молекул між собою. У третьому шарі позиції молекул вже жорстко фіксовані. Тобто формування кристала відбувається у другому шарі при температурах трохи нижчих за температуру розплаву. Якщо молекули зорієнтовані так, що можуть ефективно формувати центри кристалізації у м'якій речовині, то цих умов достатньо для росту кристала високої якості. Запропонований метод полягає у розповсюджені стану м'якої речовини на весь об'єм майбутнього кристала. Стадіями такого процесу є: вирощування структурно досконалого кристала (малого діаметра), дроблення цього кристала на задані фракції, та пресування при температурах трохи нижчих температури формування розплаву. На теперішній час реалізовано можливість отримання полікристалів до 250 мм у діаметрі із сцинтиляційними характеристиками подібними до монокристала. Існуючі обмеження пов'язані лише із характеристиками обладнання та мікротвердістю зразків, які отримуються (розтріскування під дією власної ваги). Для забезпечення цих досліджень під керівництвом Галунова М.З. було проведено дослідження зі створення спо-

собів очищення сировини, вдосконалення та автоматизації процесів росту кристалів, метрологічного забезпечення вимірювань їхніх характеристик, теоретичних оцінок параметрів процесів, що вивчаються.

Багато зусиль Галунов М. З. прикладав до реалізації теоретичних здобутків. Крім практичного використання вищенаведених робіт із кристалами з високою структурною досконалістю треба відзначити створення рідких та пластмасових сцинтиляторів із субнаносекундною швидкодією, створення сцинтиляторів для роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу на основі в'язких рідин, зшитих (сітчастих) полімерів, сцинтиляторів нового типу – «дискретних» сцинтиляторів, флуоресцентних відмітників та зондів для медико-біологічних досліджень і клінічної діагностики, люмінесцентних дефектоскопічних матеріалів.

Галунов М. З. завжди активно залучав творчу молодь до наукових досліджень. Починаючи з 1986 року він керував групою наукових працівників, у якій повсякчасно виконувалися студентські курсові і дипломні роботи з вирішення актуальних проблем матеріалознавства. Галунов М. З. приймав активну участь в атестації науково-педагогічних кадрів. Багаторазово залучався до роботи комісій з прийому кандидатських іспитів у аспірантів та пошукувачів Інституту монокристалів НАН України. Завдяки високій науковій кваліфікації і науковому авторитету Галунов М. З. з 1995 року був членом спеціалізованої вченої Ради з захисту докторських дисертацій при Інституті монокристалів НАН України. У 1997 році його було запрошено на посаду професора кафедри функціональних матеріалів хімічного факультету Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Багатий досвід та високий професіоналізм дозволили йому розробити за короткий час програми двох нових навчальних дисциплін, які він викладав на кафедрі, починаючи з 1997 року. Рішенням Міжнародної науково-освітньої програми

фонду Джорджа Сороса для вчених та викладачів у 1998 році Галунову М. З. було присуджено індивідуальний грант за значні успіхи, досягнуті в науковій та освітній діяльності.

У 2001 році Галунову М. З. присвоєно вчене звання професора зі спеціальності 01.04.10 – «фізика напівпровідників і діелектриків».

В Інституті монокристалів НАН України М.З. Галунов був керівником низки наукових тем НАН України, зокрема: "Дослідження впливу центрів гасіння різного структурного походження на механізм радіолюмінесценції органічних молекулярних кристалів та рідинних сцинтиляторів" (1994–1995 рр.); "Вплив будови та складу органічних кристалів на їх надмолекулярні та молекулярні властивості" (1996 –1999 рр.); "Надмолекулярні та молекулярні властивості органічних сцинтиляційних конденсованих середовищ: структура, процеси транспорту зарядів та збуджень" (2000–2003 рр.).

Неодноразово Галунов М. З. здійснював наукове керівництво виконанням грантів Українського науково-технологічного центру. Він підтримував творчі зв'язки із вченими Нідерландів, США, Греції, Німеччини, Російської Федерації, Фінляндії, Республіки Корея, приймав активну участь у роботі міжнародних конференцій як член організаційних, програмних комітетів та як запрошений доповідач. Він брав активну участь у роботі міжнародних наукових товариств. З 1995 року він був членом секції «Органические люминофоры» наукової ради з люмінесценції РАН, з 2000 року – членом Міжнародної асоціації IEEE, членом Американського оптичного товариства (OSA). На знак визнання його наукових здобутків Рада директорів Американського бібліографічного інституту опублікувала його біографічні дані у книзі «500 Leaders of Science», що була видана бібліотекою Сенату США у 2004 році.

Наприкінці 2002 року Президія НАН України, зважаючи на важливість досліджень в галузі матеріалознавства середовищ, придатних для виявлення і реєстрації іонізуючого

випромінювання різних спектрів, з урахуванням високого рівня наукового доробку відділів Інституту монокристалів НАН України, які займалися проблемами сцинтиляційної техніки, прийняла рішення про створення окремого Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України (ІСМА НАН України) на базі цих відділів. Директор новоствореного інституту Гриньов Б. В. запропонував Миколі Захаровичу очолити відділ молекулярних і гетероструктурованих матеріалів ІСМА НАН України. Запрошення було з вдячністю прийнято і у новій установі Галунов М. З. продовжив розвивати свої теоретичні та прикладні дослідження за проєктами актуальної тематики державного замовлення, програмно-цільової та відомчої тематики НАН України, спільними роботами з науковими установами інших країн.

Під його науковим керівництвом і за безпосередньою участю в ІСМА НАН України було успішно виконано більше двох десятків наукових і науково-технічних проєктів з актуальних проблем сцинтиляційного матеріалознавства. За тематикою НАН України було, зокрема, виконано проєкти: «Структурна впорядкованість органічних молекулярних систем та її вплив на сцинтиляційні властивості об'єкту» (2004–2006 рр.); «Впорядкованість надмолекулярної структури органічних сцинтиляційних систем – детекторів нейтронного випромінювання та специфіка сцинтиляційного процесу в них» (2007–2009 рр.); «Розробка промислових методів отримання та організація дослідного виробництва сцинтиляторів на основі стильбену і п-терфенілу для митного та екологічного моніторингу» (2008 р.); «Первинні втрати енергії збудження та нелінійність сцинтиляційного відгуку органічних молекулярних систем із різною впорядкованістю надмолекулярної структури» (2010–2012 рр.); «Органічні молекулярні сцинтиляційні системи з різною впорядкованістю надмолекулярної структури та особливості розміну енергії іонізуючого випромінювання в них» (2013–2015 рр.); «Пористі органічні сцинтилятори та їх аналоги; особливості процесів

збору світла в гетерогенних системах» (2016 р.); «Органічні полікристалічні сцинтилятори для задач виявлення альфа- і бета- радіонуклідних джерел радіації у природних водах» (2016–2018 рр.); «Радіаційно-стійкі композиційні сцинтилятори та процеси, які визначають їх радіаційну стійкість» (2017–2019 рр.); «Розробка радіаційно-стійких сцинтиляторів для фізики високих енергій» (2017–2018 рр.); «Особливості детектування швидких нейтронів сцинтиляційними матеріалами із великими масовими числами» (2020–2022 рр.).

За державною програмою фундаментальних і прикладних досліджень з проблем використання ядерних матеріалів та ядерних і радіаційних технологій у сфері розвитку галузей економіки Галунов М. З. керував проєктами: «Розробка детекторів великої площини для реєстрації та спектрометрії швидких нейтронів» (2007–2008 рр.); «Комбіновані детектори для реєстрації швидких та теплових нейтронів» (2009–2010 рр.); «Композиційні органічні сцинтилятори для реєстрації швидких нейтронів поділу» (2011 р.) та іншими.

У сфері міжнародного наукового співробітництва під керівництвом професора Галунова М. З. виконувались проєкти: «Проведення наукових досліджень з розробки й удосконалення характеристик органічних сцинтиляторів великої площі на основі стильбену і п-терфенілу, отриманих методом пресування, а також композиційних сцинтиляторів для спектрометрії швидких нейтронів» (2007–2008 рр., спільно з Інноваційним технологічним центром радіаційної безпеки Сеульского державного університету, Республіка Корея); «Розробка промислового способу отримання та організація дослідного виробництва сцинтиляторів на базі кристалів стильбену та п-терфенілу для митного та екологічного моніторингу» (2008 р., спільно з фірмою SCINTIMAX, США).

На замовлення Державного фонду фундаментальних досліджень України та Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України Галунов М. З. здійснював наукове керівництво проєктами: «Механізми впливу

високих доз іонізуючих випромінювань на сцинтиляційні і оптичні властивості нових типів органічних детекторів» (2013–2014 рр.); «Вплив триплет-триплетної анігіляції на здатність нових типів органічних гетерогенних сцинтиляторів до роздільної реєстрації іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу» (2017–2018 рр.); «Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу для задач радіоекології» (2020–2021 рр.) та іншими.

У 2014 році Галунова М. З. було запрошено на посаду професора кафедри фізичної оптики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, а з 2015 року він уже виконував обов'язки завідувача цієї кафедри. Він розробив низку курсів лекцій і читав їх для здобувачів освітньо-кваліфікаційного ступеня «магістр» і аспірантів, зокрема: «Сучасні аспекти теорії та використання люмінесценції», «Люмінесценція і не рівноважні процеси у твердих тілах» – для магістрантів 1-го курсу фізичного факультету; «Люмінесценція і фотопровідність у напівпровідниках» – для магістрантів 2-го курсу кафедри фізичної оптики; «Вибрані розділи сучасної оптики і лазерної фізики» – для аспірантів 2-го року навчання.

На кафедрі фізичної оптики під керівництвом Галунова М. З. виконувалися наукові дослідження за проєктами Міністерства освіти і науки України, зокрема: «Розробка наукових засад створення світловодів на основі нових радіаційно-стійких гетероструктурованих матеріалів для задач фізики високих енергій» (2014–2016 рр.), «Нелінійні оптичні властивості, спектроскопія фоточутливих, радіолюмінесцентних і комплексних діелектричних тонкоплівкових систем, оптоелектронні та структурні дослідження» (2017–2019 рр.). Галунов М. З. був членом спеціалізованої вченої Ради при ХНУ ім. В. Н. Каразіна із захисту дисертацій на здобуття наукових ступенів кандидата/доктора фізико-математичних

наук, приймав активну участь в роботі приймальних комісій абітурієнтів фізичного факультету та Державних екзаменаційних комісій з захистів дипломних робіт на здобуття освітньо-кваліфікаційних рівнів «бакалавр» і «магістр».

Галунов М. З. був палким популяризатором науки, постійно шукав нові шляхи для залучення талановитої молоді у світ досліджень незнаних явищ природи і використання їх на благо людини. Для пропагування наукового напрямку своєї кафедри він написав науково-популярну книгу про природу світла («О природе света»), яку широко використовував для стимулювання у абітурієнтів підвищеного інтересу до фізичної науки в цілому і фізичної оптики зокрема. Книга розрахована на тих учнів старших класів середньої школи, абітурієнтів, студентів молодших курсів вишів, які хочуть зрозуміти фізику, займатися фізикою і вивчати природу, спираючись на фізичні закони. Книга не є формальним підручником, автор постарався уникнути складного математичного апарату, що перешкоджає розумінню матеріалу читачами з шкільним рівнем математики, а зосередився на демонстрації загальної фізичної картини, загальних базових уявлень.

Галунов М. З. у складі співавторів є лауреатом Державної премії України в галузі науки і техніки за 2016 рік за роботу «Розробка пластмасових сцинтиляторів багатофункціонального призначення». У 2018 році Національна академія наук України нагородила Галунова М. З. почесною відзнакою «За підготовку наукової зміни». У загальному доробку Галунова М. З. понад 300 наукових праць, в яких в повній мірі відбивається сучасний рівень досліджень з теорії і використання радіолюмінесценції органічних конденсованих середовищ.

Галунов М. З. був науковим консультантом двох докторських дисертацій, під його науковим керівництвом було захищено 8 кандидатських дисертацій.

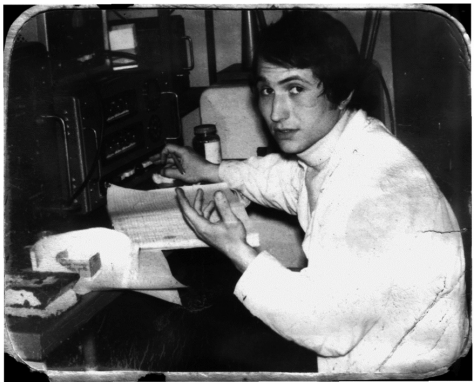
Галунов Микола Захарович був одружений, зарекомендував себе зразковим сім’янином, виховав дві доньки та онуків.

Майбутній фізик–професор вчиться керувати (1950-і роки)

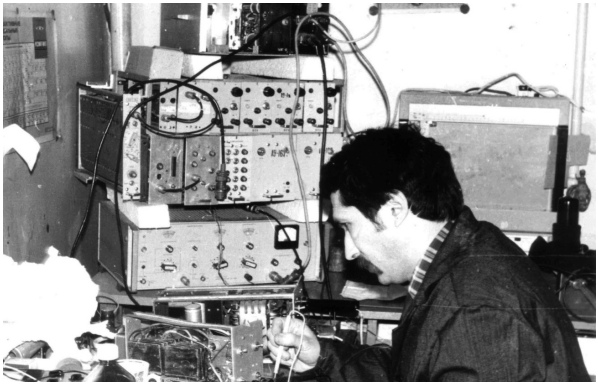
Кандидат в майстри спорту з фехтування (1970-і роки)

Дипломники-оптики фізичного факультету ХДУ ім. М. Горького (Микола Галунов в верхньому ряду третій зліва, 1973)

У військовому таборі після 4-курсу (1972)



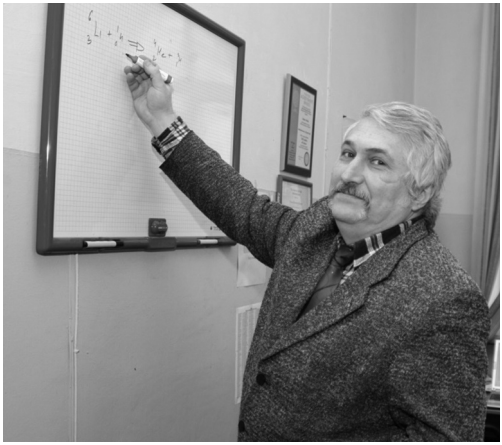
М.З.Галунов проводить вимірювання параметрів сцинтиляторів (1975)



М.З.Галунов за налагодженням вимірювальної апаратури (1980-і роки)

У читальному залі ВНДІ монокристалів (1980-і роки)

На засіданні вченої ради Інституту монокристалів НАН України (1990-і роки)



На семінарі у відділі (2010-і роки)

Вручення нагороди на честь 50-річчя ІМК (2005 р.)

Учні

Тарасенко
Олег
Анатолійович,
д.ф.-м.н.

Бояринцев
Андрій
Юрійович,
д.т.н.

Яричкін
Володимир
Володимирович,
к.ф.-м.н.

Горбачова
Тетяна Євгеніївна,
к.ф.-м.н.

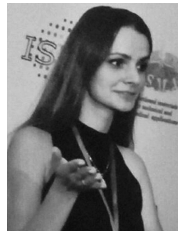
Мартиненко Євгенія
Вікторівна,
к.ф.-м.н.

Караваєва Наталія
Леонідівна,
к.ф.-м.н.

Лазарєв Ігор
Вікторович,
к.ф.-м.н.

Креч Антон
Владиславович,
к.ф.-м.н.

Будаковський Сергій
Валентинович,
к.т.н.



Полупан Ярослава
Ігорівна, аспірантка

Хромюк Ілларіон
Федорович,
аспірант

Лауреати держпремії України з президентом НАН України Б.Є. Патоном (2017)

На робочому місці

Спогади колег, учнів

«Даю правильну відповідь...»

Коли я прийшов до ВНДІ монокристалів у 1978 р., Микола Захарович Галунов уже кілька років працював інженером у лабораторії №19, яку очолював Юрій Аронович Цирлін. В лабораторії проводились дослідження оптичних і сцинтиляційних характеристик усіх видів сцинтиляторів, що розроблялись у ВНДІ монокристалів і випускались у НВО «Монокристалреактив».

М.З. Галунов працював у групі Н.М. Науменко, де вивчались характеристики сцинтиляторів, зокрема кінетичні (час наростання, спаду, тривалість сцинтиляційного імпульсу).

Для досліджень використовувалось декілька методик, однією з яких була на той час традиційною – осцилографічна. Основним приладом для цієї методики був величезний за розмірами осцилограф на електронних лампах, який забезпечував наносекундну роздільну здатність. Він використовувався в основному для досліджень лужно-галоїдних сцинтиляторів. Інша методика (затриманих збігань Болінджера – Томаса або старт стопова методика) почала розвиватися в ВНДІ монокристалів для дослідження більш швидких органічних сцинтиляторів. Цим напрямком займалася Л.Є. Грудська, яка уже захистила кандидатську дисертацію, пов'язану з кінетикою сцинтиляцій рідких кристалів та можливістю розділення за їх допомогою імпульсів від електронів і нейтронів. Для вимірювань за цією методикою використовували саморобну установку, яку передали інституту з МІФІ на початку 70-х років, де на той час плідно працювала група по дослідженню сцинтиляторів під керівництвом В.К. Ляпидевського. На цій установці і розпочав свої дослідження органічних сцинтиляторів молодий спеціаліст Микола Галу-

нов. Через рік у нього у співавторстві уже з'явилася перша публікація в «Приборах и технике эксперимента» – «Про методику вимірювання параметрів затухання сцинтиляцій в органічних сцинтиляторах». Незабаром стало потрібним удосконалення установки. І це стало програмою його роботи на декілька років. Вивчення літератури, контакти з більш досвідченими колегами-дослідниками, розробка електронних схем, підбір і «діставання» необхідних комплектувальних для швидкодіючої електроніки, проектування і виготовлення плат, розробка конструкцій і виготовлення таких важливих елементів установки, як світловий затвор та черенковський радіатор – все це робилось за його особистою ініціативою і повністю самостійно.

Часу катастрофічно не вистачало. І тоді з'явилися добре відомі в лабораторії №19 «нічні вахти Галунова». Вночі ніхто не заважав, не було стрибків напруги і наведень в електромережі, які згубно впливали на польові транзистори. Скільки їх «загинуло» під час монтажних робіт важко порахувати. Завдяки цим вахтам збірку і налагодження установки невдовзі було завершено. У ВНДІ монокристалів з'явилася можливість вимірювати кінетику сцинтиляцій у нано- і субнаносекундному діапазонах.

За досить короткий термін було досліджено параметри затухання сцинтиляцій в деяких пластмасових і рідких сцинтиляторах, а також в сцинтиляторах на основі органічних монокристалів.

Для аналізу отриманих результатів прийшлось зануритися в тонкості сцинтиляційного процесу. Вивчення літератури, варіанти інтерпретацій результатів поступово привели до певної цілісної картини, яку можна було відобразити у дисертаційній роботі.

Перша спроба захистити кандидатську дисертацію для Миколи Захаровича виявилась невдалою. Рукопис попав до відомого спеціаліста в галузі дослідження сцинтиляційного процесу в органічних сцинтиляторах І.М. Розману із

Сухумського фізико-технічного інституту, де вже існувала своя школа дослідників, в якій притримувались певних канонів. Основна роль у процесі сцинтиляції органічних матеріалів відводилась взаємодії збуджених молекул однієї з іншою. Якраз бімолекулярна гіпотеза тушіння і скорочення сцинтиляційного імпульсу була розвинута І.М. Розманом зі співробітниками. У своєму рукописі Микола Захарович не приділив належної уваги до такого підходу, за що і отримав негативний відгук.

Невдача не зупинила молодого вченого. Перероблений варіант дисертації з'явився уже через півтора року. До нього він включив нові отримані результати і запропонував свою модель сцинтиляційного процесу у швидкодіючих органічних сцинтиляторів. Було отримано залежності форми імпульсів, у тому числі для зростаючої субнаносекундної ділянки сцинтиляції, для низки органічних монокристалічних, пластмасових та рідких сцинтиляторів від їхнього хімічного складу, розмірів і виду віддзеркалюючого покриття. Це дозволило дослідити вплив процесів світло збирання та реабсорбції на форму сцинтиляційного імпульсу. Було отримано низку інших нових результатів, у тому числі сформульовані рекомендації, які пізніше дозволили розробити у ВНДІ монокристалів перші субнаносекундні рідкі сцинтилятори.

На той час робота над дисертацією здійснювалась в умовах активного життя лабораторії – виконання поточних вимірювань для інших підрозділів інституту, різноманітні громадські роботи (кагати, будівництво, сінокіс, збирання буряків та ін.), політичні семінари та інформації, і, звичайно, наукові семінари.

Наукові семінари в лабораторії №19 проходили вельми жваво, і тон дискусії часто задавав М.З. Галунов. Якраз від нього ми узнавали про нові для нас імена у сцинтиляційній науці. Наприклад, розповідаючи на семінарах про свою методику і результати кінетичних досліджень, він часто згадував сполучення прізвищ Бенстон і Можинський, яку добре

запам'ятали співробітники лабораторії. Через багато років Марек Можинський став зіркою першої величини серед «сцинтиляційників», а Микола Захарович постійно підтримував з ним творчі контакти.

Він був завзятим сперечальником у дискусіях і досить оригінально формулював свої докази. Співробітникам лабораторії запам'ятався епізод, коли на семінарі він заявив Е.Л. Винограду, який задав йому запитання за темою семінару: «На невірно сформульоване питання даю цілком правильну відповідь!»

Після захисту кандидатської дисертації М.З. Галунов продовжив дослідження різних видів органічних сцинтиляторів. Значну увагу приділялось рідким сцинтиляторам. В цьому напрямку плідною була співпраця з співробітницями відділу №5 (на той час відділ очолював Б.М. Красовицький) Л.Ш. Афанасіаді та І.В. Лисовою. Досліджувались можливості створення рідких сцинтиляторів з підвищеним світловим виходом та швидкодією, з покращеними параметрами розділення сигналів від електронів і нейтронів, сцинтиляторів із згущувачами і сумісних з водними розчинами сцинтиляторів. Практично у всіх випадках були необхідними дослідження кінетики сцинтиляцій. Це вимагало розширення можливостей вимірювальних установок, їхнього постійного удосконалення. У Миколи Захаровича з'явились помічники та учні – М. Шищов, В. Яричкін, О. Тарасенко, які з часом захистили дисертації.

Час від часу традиційні напрямки робіт по створенню і дослідженню сцинтиляторів коригувались непередбачуваними подіями. У 1986 році трапилася аварія на Чорнобильській АЕС. Практично весь інститут зайнявся рішенням задач радіаційного контролю. Ряд наукових підрозділів інституту виконував роботи безпосередньо за завданнями Мінчорнобиля України. М.З. Галунов підключився до цього напрямку робіт пізніше, після того як очолив відповідний сектор у відділі №19. У його секторі було розроблено схемотехніку для

низки приладів системи радіаційного контролю з урахуванням особливостей і можливостей сцинтиляторів.

Ще одним напрямком не традиційної тематики в інституті став «холодний термояд». На початку 1989 року весь науковий світ збурила звістка про те, що якісь хіміки із США при електролізі важкої води з електродами із паладію отримали перевищення енергії, що виділяється, над тією, що була витрачена і при цьому реєстрували нейтрони. Це означало, що при цьому електрохімічному процесі відбувається ядерна реакція. Весь світ – і фахівці, і не дуже, кинулись перевіряти цей ефект експериментально. Підключився до цих перегонів і ВНДІ монокристалів. Важка вода знайшлася швидко. Замість паладію використали губчастий титан. Незабаром з'явився і паладій – електроліз пішов. Але головним було – зареєструвати при електролізі нейтрони. Для їхнього виявлення було використано різноманітні детектори нейтронів – і повільних, і швидких. Що цікаво, нейтрони реєструвались всіма детекторами. Найбільш чітко вони визначались детекторами на основі кристалів стильбену і паратерфенілу, з використанням методики виділення сигналів нейтронів від фонового гамма-випромінювання за формою імпульсу. Ця методика уже була реалізована у секторі М.З. Галунова для перевірок відокремлювальної здатності різноманітних органічних сцинтиляторів і прекрасно працювала. Роботи по «холодному термояду» продовжувались в інституті декілька місяців і очолював їх М.З. Галунов. Він вважався немовби директором «холодного термояду».

Але основний напрямок досліджень – сцинтиляційний процес в органічних сцинтиляторах залишався для Миколи Захаровича незмінним. Велика увага при цьому приділялася органічним молекулярним кристалам. Кристали антрацену, стильбену і паратерфенілу вирощувались у групі С.В. Будаковського. Для розширення їхньої можливості при реєстрації короткопробіжного випромінювання і нейтронів необхідно було розібратися, як впливають властивості кристалів на

їхні функціональні можливості та знайти шляхи для їхнього покращення. Цікаві результати було отримано для кристалів паратерфенілу. Виявилось, що введення в розплав невеликої кількості дифінілбутадієну (ДФБ) значно підвищує (приблизно у півтора рази) світловий вихід кристалів. При цьому у вирощених кристалах ДФБ практично був відсутній.

Копіткі дослідження привели до висновку, що при вирощуванні ДФБ певним чином орієнтує молекули паратерфенілу на границі розплаву і сприяє формуванню більш досконалого кристала паратерфенілу. Виконаний цикл робіт за цією тематикою було відзначено у 1992 році премією НАН України імені І.М. Францевича. Її отримав М.З. Галунов у співавторстві з І.П. Крайновим та С.В. Будаковським.

Результати своїх численних робіт з дослідження процесів радіолюмінесценції в органічних конденсованих середовищах Микола Захарович узагальнив у своїй докторській дисертації, яку успішно захистив у 1994 році. На той час у нього з'явився ще один науковий інтерес, пов'язаний з дисперсними (гетерогенними) сцинтиляторами. Цей напрямок став швидко розвиватися у новому відділі, яким довірено керувати М.З. Галунову.

У цьому відділі отримано нові цікаві результати, нові типи сцинтиляторів, опубліковано численні статті, захищено кандидатські та докторські дисертації, написані монографії, виконано велику кількість наукових тем за тематикою НАН України, на замовлення МОН України та інших відомств, а також міжнародні проєкти.

Він завжди шукав і знаходив правильні відповіді.

В.О. Тарасов,
доктор техн. наук,
завідувач відділу ІСМА НАН України

Мирне співжиття і співпраця

Моє знайомство з Миколою Галуновим почалося у вересні 1958 року, коли ми розпочали навчання в першому класі (я – в 1-А, а Микола – в 1-Б) середньої школи № 6 м. Харкова. Школа на той час була досить визначною – вона поєднувала українську мову навчання з викладанням англійської мови з першого класу. До 1917 року вона була відома як Маріїнська жіноча гімназія, і в 1961 р. (в третьому класі) ми урочисто відзначали 100-річчя нашої школи. Одним з моментів цього святкування був виступ шкільного «хору хлопчиків» (в якому брали участь і ми з Миколою) на сцені Харківського оперного театру, який в той час розташовувався через кілька будинків від нас на вулиці Римарській. Зараз на будівлі школи можна побачити меморіальну дошку, яка вшановує Людмилу Гурченко – випускницю нашої школи початку 1950-х років. Кажуть, що в нашій школі навчалися і деякі колишні керівники нашого міста.

Цікавих людей в школі було багато, як серед вчителів, так і серед учнів. В одному класі зі мною навчався (до переїзду його батьків до Києва) Юрій Олексійович Ситенко, нині член-кореспондент НАН України. З Юрком пов'язаний епізод, який звів нас трьох десь в третій чверті п'ятого класу. За тодішньою програмою, в 4-му класі ми вивчали історію СРСР, а в 5-му – історію стародавнього світу. Пам'ятаю велику кількість плакатів з художніми зображеннями людей, будівель і подій з стародавнього Єгипту, Греції, Риму тощо. Ми з Юрком Ситенком на перервах вели палкі дискусії з приводу деталей і оцінок історичних подій, щодо яких ми читали багато додаткової літератури. Під час однієї з наших суперечок ми звернулися до Галунова (який, певна річ, теж

був відмінником), щоб він висловив свою думку. Микола Захарович свою думку висловив і при цьому підкреслив, що саме його думка є абсолютно вірною, бо він відвідує гурток при Харківському історичному музеї і там у нього є науковий керівник. Цю звичку Микола Захарович зберіг до останніх днів своєї роботи в нашому інституті. Всі добре пам'ятають його виступи і ремарки на вчених радах, коли він під час бурхливого обговорювання якогось питання видавав абсолютно чіткі відповіді і формулювання з посиланнями на енциклопедії та наукових авторитетів.

Так склалося, що Галунов почав працювати у Всесоюзному науково-дослідному Інституті монокристалів, сцинтиляційних матеріалів і особливо чистих хімічних речовин раніше від мене (він – з початку 1974 року, а я – тільки з другої половини 1974-го, бо в ХПІ, на відміну від Харківського державного університету (майбутнього Каразінського), навчання продовжувалось п'ять з половиною років). Тому Микола до деякої міри став «старшим», і, як уже досвідчений, ділився зі мною певними не завжди видимими ззовні моментами в житті інституту. Зразу згадуються деякі унікальні вислови, які я чув від Миколи Захаровича у приватному спілкуванні. Якось, коли ми обговорювали проблеми співробітництва та взаємодії між різними науковими групами з подібною чи взаємодоповняльною тематикою досліджень, Микола згадав фразу, яку нібито висловив його науковий керівник Юрій Аронович Цирлін: «Вчені – вони як кролики. Кожен сидить в своєму кутку і гризе свою морквинку». Коли Микола Захарович став членом партбюро інституту, він згадував формулювання, яке він нібито чув від якогось дуже відповідального партійного чи комсомольського керівника А саме – відповідь на питання, яка різниця між «суспільною роботою» та «суспільно-корисною працею»: «Суспільна робота – це комплекс заходів, спрямованих на залучення населення до суспільно-корисної праці». А коли Галунов став заступником голови спецради, він любив повторювати: «Дисертація – це не наука, а екзамен на чин».

Час ішов, на початку 1990-х ми обидва захистили докторські дисертації (тоді в нашому щойно організованому НТК докторів наук було ще небагато) і отримали певні «підвищення» - я отримав посаду завідувача лабораторії, а Микола Захарович – завідувача сектору. Тематики наших наукових робіт були досить далекими, спілкувались ми досить рідко і головним чином на рівні розмов старих знайомих при зустрічі. Аж ось прийшов 1996 рік, і наша Академія видала чергову вказівку. Було прийнято рішення, що структурними підрозділами можуть бути тільки відділи, і було встановлено вимоги щодо мінімальної загальної кількості співробітників у відділі і окремо - кількості співробітників з науковими ступенями. Оскільки обидва наші підрозділи цим вимогам не відповідали, перспективою було приєднання до чийогось відділу, що викликало певні побоювання. Зустрівшись в коридорі, ми глянули один на одного, і у обох промайнула одна і та ж думка. Цю думку ми якимось чином довели до керівництва, і з 1 травня 1996 р. почав існувати «відділ молекулярних і наноструктурованих матеріалів». Микола Захарович став завідувачем, а я повернувся на стару посаду провідного наукового співробітника. Далі наш відділ успішно опинився в Інституті сцинтиляційних матеріалів, і лише влітку 2017 р. мене з кількома співробітникими приєднали до відділу Юрія Вікторовича Малюкіна. Двадцять один рік мирного співжиття і співпраці, з невтручанням у справи одне одного, але із взаємною допомогою в різних ситуаціях. Залишились в цілому теплі спогади…

І наостанок – ще одне приватне висловлювання Миколи Захаровича, яке з часом, на жаль, набуло трагічного змісту. Десь навесні 2021 року ми в кабінеті Галунова на другому поверсі старого корпусу розмовляли про те, про се, і торкнулися політичних подій в Україні. Микола Захарович страшенно негативно висловлювався про діяльність українських владоможців, особливо підкреслюючи необхідність налагодження відносин з Росією. Мовляв, в Європі нас ніхто не

чекає, ми там нікому не потрібні. А в Росії дуже інтенсивно розвивається наука, технології і військово-промисловий комплекс. У Росії, окрім нафти і газу, є величезна кількість надсучасних ракет, ось нещодавно були повідомлення про успішні випробування нових «гіперзвукових» ракет, яких навіть у США немає, і НАТО цього страшенно боїться. А наші керівники, такі-сякі, цього не розуміють… На жаль (чи на щастя?), Микола Захарович не дожив до того часу, коли ці ракети почали вибухати над Харковом…

Л.М.Лисецький,
доктор фіз.-мат. наук, професор,
пров. наук. співр. ІСМА НАН України

На спогад про керівника

Згадувати про Миколу Захаровича і розуміти, що це вже в минулому дуже важко. Тепер, коли поступово приходить усвідомлення, що вже немає можливості послухати «лекцію» Миколи Захаровича, обговорити якусь нову статтю, а потім почути звичайне: «Приходьте до мене, обговоримо», стає сумно. Рідкісне поєднання розуму, величезного запасу знань у галузі оптики, фізики, матеріалознавства, історії та… всього не перелічиш – усе це, безперечно, виокремлювало та відрізняло Миколу Захаровича від інших. А за наявності піднесеного настрою Микола Захарович розповідав кумедні гуморески та байки, змушуючи посміхатися кожного.

Микола Захарович Галунов як педагог і вчений вражав високим рівнем професійної майстерності. Він був винахідливою, принциповою, відповідальною й дуже працелюбною людиною, але водночас доступною і товариською. Тому його цінували та поважали і учні, і студенти, і аспіранти, і колеги по роботі. Він підготував 2 докторів наук, 8 кандидатів наук, усі вони реалізувалися як особистості та професіонали у своїй галузі досліджень. Нам, учням Миколи Захаровича, подобалася в нього така риса: коли щось не виходило, він починав панікувати і звучала коронна фраза «Все пропало!», але не губився, а одразу починав шукати вихід із неприйнятного становища і завжди досягав успіху.

Микола Захарович завоював авторитет у науковій спільноті оптичного матеріалознавства. Був старшим членом Міжнародної наукової спільноти OSA (Optical Society of America) та Міжнародної асоціації IEEE (Nuclear and Plasma Sciences Society). Він розумів, що для наукової роботи життєво необхідно, щоб співробітники відділу та аспіранти активно пуб-

лікували результати своїх досліджень у наукових журналах та особисто брали участь у наукових конференціях, вважаючи, що без дискусій, які виникають на конференціях, вчений реалізуватися не може, і продовжував сам активно їх відвідувати навіть під час пандемії коронавірусу. Одна з таких поїздок і спричинила хворобу, через яку він пішов із життя передчасно і так раптово.

Варто зазначити, що Микола Захарович мав дуже велику бібліотеку, якою він із задоволенням ділився зі своїми учнями. Із багатьма авторами різних теорій і концепцій він був не просто знайомий, а особисто зустрічався на різних конференціях та активно дискутував, підтримуючи довготривалі дружні стосунки. На початку 90-х ученим не завжди були доступні всі необхідні для роботи статті та книги західних авторів, а Микола Захарович мав велику колекцію наукових праць, презентованих йому самими авторами. У бесідах з ним ми отримували не просто знання, а й життєві історії розвитку, становлення, досвіду.

Ідея становлення дослідників-початківців не обмежувалася лише публікаціями співробітників відділу в наукових журналах та їхньою участю в наукових конференціях, а вимагала згуртованості та цілеспрямованості команди для отримання науково обґрунтованих результатів у процесі досліджень. Слід зауважити, що функції керівника Микола Захарович виконував блискуче. Завдяки його зусиллям у відділі склався творчий науково-дослідний колектив із молодих енергійних аспірантів та поважних співробітників із неосяжним багажем знань, роботи яких не лише досягали цілей, намічених під керівництвом Миколи Захаровича, а й слугували основою для становлення поглибленого розуміння радіолюмінесценції в органічних сцинтиляційних матеріалах. На мою думку, такий ґрунтовний підхід до методичного забезпечення досліджень заслуговує найвищої оцінки діяльності Миколи Захаровича як вченого та наукового керівника.

Отримати такого керівника в аспірантурі як М.З. Галунов вважалося добрим знаком, оскільки він завжди забезпе-

чував стовідсотковий результат – захист дисертації. Наукове керівництво роботою аспіранта Микола Захарович здійснював дуже відповідально та скрупульозно. Складався план роботи, намічалися терміни здавання екзаменів, підготовки публікацій, обговорення глав дисертації тощо. Виконання плану жорстко контролювалося, а у разі зриву аспірант отримував від керівника неабияку прочуханку. Микола Захарович не терпів халтури.

Особливо слід відзначити роботу Миколи Захаровича над написанням статей. Публікації він уважно вичитував «від А до Я», тексти супроводжував коментарями, численними знаками питання, виправляв граматичні та стилістичні помилки. Оцінка аспірантського опусу здійснювалася в письмовій та усній формі. Тому дисертаційна робота, виконана під керівництвом М.З. Галунова, завжди відрізнялася високим науковим рівнем і під час захисту отримувала відмінну оцінку. Авторитет професора М.З. Галунова дозволяв залучати до захисту дисертацій шанованих та визнаних у науковому світі опонентів.

Слід зазначити, що у відносинах з аспірантами Микола Захарович завжди «тримав дистанцію». Ці відносини залишалися переважно діловими. За чотири роки моєї заочної аспірантури та 6 років постійного спілкування він лише три рази звернувся до мене неформально, що і відклалося у моїй пам'яті. Після захисту дисертації почути від Миколи Захаровича звернення до мене "Танюша", було дуже несподівано та приємно. Я не була однією з тих учнів Миколи Захаровича, на кого він покладав надії як на послідовника в науковому плані. Мабуть, я не була і духовно близькою до свого керівника. Та все ж Микола Захарович не просто був моїм науковим керівником, а зіграв величезну, мабуть, визначальну роль у загартуванні характеру та розстановці життєвих пріоритетів.

Микола Захарович справляв на нас дуже сильне враження винятковою точністю формулювань, особистою захопленістю проблем, які обговорюються, азартом, добре по-

будованими фразами, напрочуд грамотною мовою, як усною, так і письмовою, чудовим володінням матеріалом. Усе це досягалося величезною працею: поглибленим аналізом нових статей, книг, дисертацій. На підготовку до наукових доповідей Микола Захарович завжди звертав особливу увагу, вважаючи це за найважливіший компонент наукової діяльності. На доповідях Миколи Захаровича ми не лише навчалися, а й бачили, що перед нами вчений, який активно працює. Відчувалося, що багато результатів, обговорюваних на доповідях, є свіжими, отриманими буквально «днями». Почуття причетності до науки, що розвивається на наших очах, дуже важливе для молодих вчених. Мене завжди вражала фантастична ерудиція мого керівника та приголомшлива пам'ять.

На засіданнях Проблемної Ради, якими Микола Захарович керував, складалося враження, що він знає все. Кожен, хто виступав із науковою доповіддю, може засвідчити, що Микола Захарович був чудовим співрозмовником і завжди демонстрував повне розуміння проблем, що обговорюються. Власними знаннями Микола Захарович любив ділитися зі своїми учнями, колегами. Робив він це не просто охоче, а з неприхованою радістю. А ми були вдячними слухачами його імпровізованих лекцій.

Кожна стаття обговорювалася дуже детально, без обмеження часу. У кабінеті Миколи Захаровича доповідалися усі результати, час на обговорення не обмежувався. На нарадах Микола Захарович умів і слухати доповідачів, і ставити з відповідною тональністю питання, і захищати доповідача, часто роз'яснюючи саму суть доповіді. Микола Захарович був особливо «прискіпливий» до подачі матеріалів. Доповідь мала бути структурована таким чином, щоб її розумів кожен пересічний слухач наукового семінару. Часто сам міг, як то кажуть «на пальцях», роз'яснити будь-яку фізичну ідею. Слабких, недосвідчених доповідачів він намагався «витягувати», вселяючи тим самим в них упевненість у корисності своєї роботи та у здатність до наступних виступів. Запам'яталися

його запитання з зачином: «Якщо я правильно Вас зрозумів, то…» -і далі лунала відповідь на його запитання…

Слід відзначити ще одну якість Миколи Захаровича, про яку знали лише близькі люди та оточення: він зміг через роки пронести повагу та любов до своєї дружини Олександри Іванівни. Скільки разів своїм дзвінком, турбуючись через тривалу відсутність Миколи Захаровича вдома, вона рятувала нас від його наукової критики. А коли Микола Захарович запізно повертався з роботи, то, йдучи через ринок, купував своїй коханій дружині квіти. Уперше побачивши цю картину, неможливо було повірити: протягом 15 хвилин суворий, вимогливий, безкомпромісний керівник перетворювався на романтика, який цінує жінку, яка оберігає його від зайвих хвилювань, життєвих труднощів, негативних емоційних коливань.

У 2021 році Миколи Захаровича не стало. Нині виповнився рік, коли Миколи Захаровича немає з нами. За цей рік у світі відбулося багато складних, зовсім несподіваних подій, розмірковуючи про які, я запитую себе: «А яким чином Микола Захарович поводився б у цьому випадку? Де б він зараз працював: залишився б в Україні чи кудись поїхав?» Його образ як талановитого вченого, який любив науку і захоплював нею інших, завжди супроводжував його учнів по життю, а атмосфера творчого, принципового ставлення до наукових досліджень, що склалася під його впливом, стала традицією і є візитівкою у діяльності відділу.

Дуже шкода, що Микола Захарович не досяг висот за регаліями у науковому світі, зважаючи на те, що знання, ерудиція та його досвід завжди були на висоті.

Т.Є. Горбачова,
канд. фіз.-мат. наук,
ст. наук. співр. ІСМА НАН України

Про вчителя

18 жовтня 2021 р. на 70 році життя відійшов у вічність видатний науковець, доктор фізико-математичних наук, професор та мій шановний вчитель Микола Захарович Галунов. Не уявляю себе без Миколи Захаровича, настільки довго ми працювали разом, начебто завжди. Ввічливий, спокійний, усміхнений, інтелігентний, у світло-сірому костюмі та яскравій краватці. Постійно з кимось спілкується. Таким він мені запам'ятався.

З Миколою Захаровичем я познайомився наприкінці 1992 року. На той час я був студентом кафедри фізичної оптики Харківського державного університету ім. А.М. Горького, якою тоді керував професор Милославський В.К. Вже пізніше я дізнався, що Микола Захарович також був випускником цієї кафедри. Ось так за рекомендацією Володимира Костянтиновича я і зустрівся з моїм майбутнім наставником для виконання курсової роботи. Назавжди запам'ятав свою першу зустріч. То був грудень 1992 року. Чекав тоді Миколу Захаровича приблизно години 2 або більше, це було ще на старій прохідній Інституту монокристалів. Мобільних телефонів тоді ще не було! Як надалі виявилося, чекав недаремно, такої Людини на своєму життєвому шляху варто було чекати і набагато довше! Відразу мене привабила його нестандартна, неординарна поведінка, щирість та відкритість під час спілкування. Пізніше я звернув увагу на безмежну захопленість Миколи Захаровича фізикою, дослідженнями, його натхненням, знаннями, ерудицією та науковою інтуїцією взагалі. На той час він працював над докторською дисертацією. Відтоді розпочалася наша співпраця, яка тривала три десятиліття.

Існує таке висловлювання «робота – другий дім». На

мою думку, найяскравіше Миколу Захаровича характеризує те, що робота була для нього скоріше «першим домом». Він жив наукою, «хворів» наукою, був повністю занурений у науку та до кінця свого життя безмежно відданий їй. Для Миколи Захаровича ніколи не було ні святкових днів, ні вихідних. Він міг зателефонувати мені практично в будь-який час і невтомно розповідати про фізику, фізичні явища та процеси, ділитися своїми думками про чергову наукову статтю, про науковий проєкт, який треба терміново подати «терміном на позавчора», або про оформлення звіту, та й загалом про спільні плани на майбутнє.

Після захисту докторської дисертації Микола Захарович став керівником окремої лабораторії у складі відділу № 19 Інституту монокристалів НАН України, яким і досі керує Володимир Олексійович Тарасов, На початку лабораторія складалася з 5-6 науковців, потім лабораторію було розширено до рівня окремого відділу, спочатку відділу Інституту монокристалів НАН України, а потім відділу № 2314 Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України, створеного за рішенням Президії НАН України у кінці 2002 р. Під керівництвом Миколи Захаровича розроблялися усі існуючі на теперішній час типи органічних сцинтиляційних матеріалів: монокристали, полікристали, композиційні, пластмасові та рідкі сцинтилятори. Але найбільше за все Микола Захарович запам'ятається для усіх як фахівець світового рівня з вивчення механізмів фізичних процесів, що відбуваються в трекових ділянках іонізуючої частинки. У відділі, яким керував проф. Галунов М.З., у різні часи працювали такі видатні вчені, як проф. Красовицький Б.М., проф. Гундер О.О., проф. Паценкер Л.Д., проф. Лисецький Л.М.

Микола Захарович був творчою особистістю, можна сказати, науковцем з великої літери. Вчений. І теоретик, і практик. Дослідник. Його вражаюча працездатність та потужна творча енергетика ніколи не дозволяли зупинятися на досягнутому. Він завжди прагнув в першу чергу від себе

якісної роботи. Ще і ще раз перечитував, аналізував, ставив під сумнів, виправляв та покращував.

Таку любов та пристрасть до науки Микола Захарович завжди прагнув передати своїм співробітникам та учням. Він вмів пояснити складні фізичні явища та процеси за допомогою простих фраз і алегорій, щоб не відштовхнути вченого-початківця від такого складного предмета як фізика. Він завжди засмучувався, коли молоді вчені не зовсім старанно ставилися до вивчення фізики та виконання його завдань. Його улюбленим виразом у такому випадку був наступний: «На відміну від вас, я ще продовжую читати довідники та наукові журнали».

Активна, насичена професійна діяльність займала багато часу, що позначалося на особистому житті та здоров'ї Миколи Захаровича. І коли він допізна затримувався на роботі, завжди дзвонив до Олександри Іванівни і дуже вибачався. Він часто розповідав про своїх близьких, згадував історії своїх родичів, багато розповідав історій про свого домашнього улюбленця – рудого кота. Цікавився, був уважним, ставився із розумінням до особистого життя кожного свого співробітника. Ніколи не забуду хвилювання та співчуття Миколи Захаровича під час мого повторного захисту кандидатської дисертації у Києві на засіданні колегії ВАК України восени 1998 року. Мій науковий керівник спалив тоді нервових клітин, мабуть, більше, ніж я.

Микола Захарович був багатогранний, як органічний кристал, вирощуванню та дослідженню якого він присвятив усю свою наукову діяльність. Більшість співробітників відділу, яким пощастило спілкуватися з Миколою Захаровичем, відзначають його емоційність, суперечливість його висловлювань, і в цьому його унікальність і неповторність. Його настрій міг кардинально змінюватися від ранку понеділка, коли «все зникло», «нас усіх розженуть», «це потрібно було зробити терміном на позавчора» тощо, до вечора п'ятниці, коли Микола Захарович, у доброму настрої, виходячи за прохідну і читаючи вже не актуальні оголошення про вчені ради,

казав: «Фух! Відбулося». Усі ми пам'ятаємо його виступи на вчених радах та захистах дисертацій з плавними переходами від критичних висловлювань на кшталт «це повна маячня» або «це все нісенітниця» до позитивних висновків, формулювань, навідних запитань та подальших відповідей на них замість доповідача або здобувача. Микола Захарович завжди прагнув виглядати на людях оптимістичним, бадьорим та здоровим і завжди казав: «Якщо тебе побачать хворим, то одразу розтопчуть». Однак співробітники бачили його і іншим, трохи втомленим, засмученим і відчуженим, але завжди сильною і вольовою людиною.

Микола Захарович виховувався в інтелігентній родині, здобув гарну освіту в школі № 6 м. Харкова (разом із проф. Лисецьким Л.М.) із поглибленим вивченням української мови. Його улюбленими предметами, окрім фізики, була англійська мова та історія. Він також відвідував гурток радіоелектроніки та сам змайстрував радіоприймач. Микола Захарович назавжди запам'ятається для всіх як високоінтелектуальна, культурна, ввічлива та галантна людина. Аспірантки Миколи Захаровича згадують, що він під час особистих розмов з ними не міг усидіти в кріслі та найчастіше спілкувався з ними стоячи, незважаючи на те, що вони сиділи. Тут згадується кумедний випадок, який Микола Захарович розповів після повернення з м. Сеул (Республіка Південна Корея) десь років 10 тому. Він чекав на маршрутку, щоб поїхати на конференцію. Маршрутка приїхала, за Миколою Захаровичем у черзі стояла якась кореянка, яку він природно вирішив пропустити вперед, а вона ні в яку. У результаті утворився затор. За кореянкою стояв якийсь місцевий чоловік, який їй щось сказав. І вона таки потрапила до маршрутки перед Миколою Захаровичем. Коли він запитав у місцевого, що він сказав цій дамі, той ламаною англійською відповів приблизно таке: «Якщо мужик сказав залазь першою, от і давай залазь».

Добрий, балакучий, розумний, чуйний, уважний, турботливий. Активна, інтелектуальна, інтелігентна, світла

людина. Подумки він залишається зі мною. Начебто він у своєму кабінеті та може кожен день подзвонити. Його підтримки, його слів та мотивації для подальшого розвитку та самовдосконалення буде не вистачати. Микола Захарович назавжди залишиться в наших серцях!

О.А. Тарасенко,
доктор фіз.-мат. наук,
ст. наук. співр. ІСМА НАН України

Наставник

З Миколою Захаровичем я був знайомий 8,5 років. Наша з ним перша зустріч була влітку 2013 року, коли мені по закінченню НТУ «ХПІ» запропонували вступити в аспірантуру Інституту сцинтиляційних матеріалів. В той день Микола Захарович був дуже серйозним та, як мені здалося, вимогливим. Він одразу мене попередив, що буде дуже важко встигнути захистити кандидатську дисертацію в термін, особливо без досвіду в сцинтиляційному матеріалознавстві, сказав: «Вы же понимаете, что никто за Вас ничего делать не будет. Иногда придется и ночами писать, чтобы успеть в срок». Тоді це мені здалося дивним, що прийшовши влаштовуватись, мене наче відмовляли від цього. Проте, хочеться сказати, що, незважаючи на всі ці страхи, все було добре завдяки підтримці та навчанню Миколи Захаровича. Він вчив, наставляв, підказував та допомагав своїми знаннями, які не обмежувалися лише наукою. Можна сказати, він був скульптором, який ліпив із нас науковців, ділившись своїм багатим досвідом.

В мене залишилось дуже багато світлих добрих спогадів від спілкування зі своїм учителем і наставником М.З.Галуновим. Як він і казав, були часи, коли доводилось працювати та писати вночі. Було декілька цікавих випадків, коли дописавши чергову главу дисертації або статтю, увечері надсилав їх електронною поштою до Миколи Захаровича, а вже через годину від нього приходили зауваження. І от сиджу я далі виправляю все до третьої години ночі, потім надсилаю, думаючи, що вже пізня ніч і він із ранку подивиться, як знов через хвилин 30 приходить відповідь: «Уже лучше. Завтра обсудим». Саме в такі моменти розумієш, що

людина присвятила своє життя науці. Я дуже вдячний Миколі Захаровичу який охоче ділився знанням. Він не лише ділився ними, йому вдавалося донести ці знання, підібравши влучні приклади та аналоги, так, що зовсім не знаючи особливостей певної галузі починав розуміти. Також Микола Захарович вчив правильно писати статті, висловлювати наукову думку, за що я йому особисто вдячний! Він казав: «Вы должны сами выписаться. Я не буду жить вечно и с годами мы не молодеем, поэтому, как в школе Вы учились писать, так и тут Вы должны сами научиться писать, а я как учитель буду помогать, поправлять и направлять». Адже дійсно, він міг сісти та повністю сам написати статтю і це було б швидше, але він витрачав на нас час та іноді нерви, щоб навчити, щоб ми могли теж самостійно писати наукові праці. І знову ж таки, я дуже за це йому вдячний!

Знання Миколи Захаровича не обмежувались лише наукою. Під час нашого з ним спілкування я дізнався та підкреслив для себе багато цікавого і корисного, дізнався про його глибокі знання історії, про те що він грав у ВІА на ударних, займався футболом, боротьбою і фехтуванням, та багато іншого. На жаль тепер не вистачає цього спілкування.

Микола Захарович завжди підтримував. Ця підтримка відчувалась не лише в науці, але й за її межами. Особливо це було відчутно коли в житті були якісь негаразди, будь то хвороба або ще щось. І завжди подобалося, що щоб не трапилось, які б труднощі не були, завжди був час на анекдот від Миколи Захаровича, це розряджало будь-яку ситуацію. Були моменти під час телефонної розмови, а точніше після неї, коли договорили, поклали слухавку і згадуєш «а як же анекдот від Миколи Захаровича?», і в цей час він передзвонював і питав: «А хотите анекдот расскажу?».

За всі роки, що я працював з Миколою Захаровичем, не було жодного тижня, жодних вихідних, коли б він мені не зателефонував, навіть у відпустці або відряджені. Жодних вихідних окрім останніх.

На превеликий жаль Галунов Микола Захарович несподівано для всіх пішов з життя. Він багато чому нас навчив, але ще багато чого можна було в нього навчитись. Згадки про цю світлу людину назавжди залишиться в пам'яті рідних, близьких та знайомих. Вічна пам'ять!

А.В. Креч,
кандидат техн. наук,
зав. відділом ІСМА НАН України

Книги, монографії

Галунов Н.З., Семиноженко В.П. ***Теория и применение радиолюминесценции органических конденсированных сред*** // Киев: Наукова Думка, 1997 – 280 с. / Галунов Н.З., Семиноженко В.П. Радиолюминесценция органических конденсированных сред. Теория и применение // изд. второе, исправленное и дополненное. – Киев: Наукова думка, 2015. – 464 с. ISBN 978-966-00-1469-5.

У монографії узагальнено сучасні уявлення про теорію радіолюмінесценції органічних конденсованих середовищ, які було сформовано наприкінці XX – на початку XXI століття. Розглянуто основні аспекти теоретичних і експериментальних досліджень процесу радіолюмінесценції органічних конденсованих середовищ починаючи з 60-х років та причини, що призвели до кризи теорії у 70–90-х роках XX століття. Систематизовано основні сцинтиляційні характеристики більшості органічних сцинтиляторів, які вироблялись провідними фірмами.

У першій частині монографії, поряд із загальними питаннями теорії радіолюмінесценції, наведено відомості теорії взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною, питання фізики органічного твердого тіла, описані основні особливості будови органічних матеріалів, що розглядаються та їх найбільш важливі характеристики. У другій частині наведено експериментальні та теоретичні результати дослідження радіолюмінесценції органічних молекулярних кон-

денсованих середовищ, що дозволили наприкінці XX – на початку XXI століття сформулювати теорію радіолюмінесценції, яка була позбавлена недоліків, характерних для попередніх теорій. Розглянуто можливості нових застосувань результатів теорії радіолюмінесценції у суміжних галузях знань та техніці фізичного експерименту. Третя частина присвячена особливостям застосування тих чи інших органічних сцинтиляторів у різних завданнях реєстрації іонізуючих випромінювань.

У другому виданні монографії суттєво розширено матеріал, що стосується базових питань фізики взаємодії іонізуючих випромінювань із органічними матеріалами, дані щодо джерел іонізуючих випромінювань, фізики процесів переносу зарядових станів та енергії збудження в молекулярних матеріалах. Наведено відомості про нові сцинтиляційні матеріали: молекулярні полікристалічні й композиційні сцинтилятори. Результати досліджень становлять інтерес як і довідниковий матеріал при проектуванні систем реєстрації іонізуючих випромінювань. Для фізиків, радіобіологів, екологів, а також викладачів вузів та студентів.

Галунов Н.З., Тарасенко О.А. ***Формирование треков ионизирующих излучений в органических конденсированных средах*** // Харьков: ИСМА, 2011, 480 с. ISBN 966-02-2555-5, ISBN 978-966-02-6157-0.

У монографії узагальнені сучасні уявлення, що існують у радіаційній фізиці, радіаційній хімії, радіаційній біології, теорії трекових детекторів, теорії радіолюмінесценції органічних конденсованих середовищ, про формування трекових ділянок, які створюються іонізуючими випромінюваннями після проходження первинної іонізуючої частинки, а також про зміни, які відбуваються в цих ділянках. Проведено порівняльний аналіз результатів, отриманих для органічних

сцинтиляторів, з результатами інших досліджень (радіаційна хімія, трекові детектори, аналіз розподілу зарядових центрів методом електронного спінового відлуння і т.п.).

Представлені загальні положення теорії взаємодії іонізуючих випромінювань з речовиною, питання фізики органічного твердого тіла, які пов'язані з локалізацією та умовами переносу носіїв заряду в ароматичних вуглеводнях, описані основні особливості структури матеріалів, що розглядаються, та їх найважливіші характеристики. Детально викладено механізми формування областей високої та низької густини іонізації у легких речовинах (вода та вуглеводні), які виникають при проходженні іонізуючої частинки. Обговорюються сучасні описи процесів еволюції цих областей, зміни кількості та просторового розподілу іонізованих станів у них. Проведено порівняння цих уявлень з результатами експериментів, описаних у роботах з радіаційної хімії. Аналізуються результати експериментів та описи трекових областей, отримані при дослідженні змін властивостей речовини в областях проходження іонізуючої частинки. Наведено результати вивчення змін структури речовини в трекових твердотільних детекторах; дослідження розподілу радикалів, що є парамагнітними центрами, що утворюються вздовж траєкторії руху первинної частинки, у заморожених розчинах; визначення характеристик трекових областей за результатами радіолюмінесцентних досліджень органічних сцинтиляторів.

Галунов Н.З. ***О природе света*** // Харьков: ИСМА. – 2019. – 253 с. ISBN 978-966-02-89827-7.

Книгу розраховано на учнів старших класів середньої школи, абітурієнтів, учнів молодших курсів вузів, які хочуть зрозуміти фізику, займатися фізикою та вивчати природу, спираючись на фізичні закони. Викладений матеріал спрямований на розуміння загальної фізичної картини, базових

уявлень, хоча і охоплює, практично, всі основні положення оптичного вчення. Всі математичні викладки обмежені рамками знань шкільного курсу тригонометрії, зокрема рішень, пов'язаних із прямокутними трикутниками. Книга не є формальним підручником із фізики. Вона написана скоріше у вигляді наукової монографії та представляє додатковий науковий матеріал для позакласного читання.

Книга не вимагає заучування певних частин наукового матеріалу та розв'язання окремих задач, а відразу ж пропонує молодому читачеві починати думати та оцінювати фізичний зміст оптичних явищ і процесів, часом уникаючи деталей і намагань робити певні завчасні висновки. Визначення та пояснення, що містяться в тексті, свідомо містять реальну наукову термінологію, що дозволяє читачеві орієнтуватися у предметі, який викладається.

Перша частина книги охоплює поверхнево її подальший розгорнутий зміст. У ній описані основні поняття та фізичні процеси, які використовуються при розгляді оптичних явищ. У другій частині книги обговорюються основні поняття та вирази, які розглядаються у наближенні геометричної оптики (закони прямолінійного поширення світла, незалежності світлових променів, відбиття та заломлення світла), а в третій частині основні поняття та вирази, що розглядаються з позицій хвильової природи світла (інтерференція, дифракція, поляризація та дисперсія світла). Четверта частина книги присвячена розгляду основних положень корпускулярного уявлення про природу світла (випромінювання чорного тіла, фотоефект, ефект Комптону, квантові явища люмінесценції). П'ята частина має прикладний характер, в ній показано наскільки різноманітними є джерела світла, що створені як самою природою (сонце, люмінесцентні речовини), так і людським розумом (свічка, лампи розжарювання, люмінесцентні та світлодіодні лампи, лазери).

Вибрані наукові статті

УДК 539.1.074.3

ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАТУХАНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ В НЕКОТОРЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРАХ

Л. Е. ГРУДСКАЯ, Н. З. ГАЛУНОВ, В. Ф. ПОДУЖАЙЛО, С. А. ВЕРЕЗУБОВА, Ю. А. ЦИРЛИН

Измерялись вклад в интенсивность и значения постоянных затухания быстрого, среднего и медленного компонентов сцинтилляции для четырех различных жидких сцинтилляторов.

В последние годы были исследованы многие органические сцинтилляторы [1 ÷ 5], в том числе жидкие (ж.с.), однако временные характеристики ряда ж.с., выпускаемых промышленностью, неизвестны. В данной работе исследованы параметры спада сцинтилляций при облучении детекторов на основе стильбена, толуола, ксилола и α-метилнафталина источниками ^{60}Co и Pu + Be. Кюветы с жидкими сцинтилляторами для удаления растворенного O_2 продувались Ar, замораживались, откачивались форвакуумным насосом и отпаивались.

Для измерения кинетики свечения применялась установка, основанная на методе счета отдельных фотонов [6]. Характеристики установки приведены в работе [7]. Установка позволяла наблюдать форму сцинтилляции в двух временных интервалах от 0 до 150 нс и от 0 до 500 нс. Кривая аппаратурного разрешения установки, измеренная с помощью черенковского радиатора при возбуждении ^{90}Sr была близка к форме гауссовского распределения. Ширина полученной кривой на половине высоты ≈ 2 нс, постоянная спада 1,71 нс.

Результаты измерений при облучении источником ^{60}Co представлены на рис. 1. Затухание сцинтилляций аппроксимировалось суммой трех экспонент $I(t) = I_б e^{-t/\tau_б} + I_c e^{-t/\tau_c} + I_м e^{-t/\tau_м}$, где индексы «б», «с» и «м» относятся соответственно к быстрому, среднему и медленному компонентам. Двумя экспонентами удовлетворительно аппроксимировать затухание сцинтилляций не удавалось. Амплитуды и постоянные затухания различных компонент, полученные при обработке экспериментальных данных, приведены в табл. 1. При обработке вычитался фон случайных совпадений и вводилась поправка на аппаратурное разрешение установки. Значения параметров определены с точностью до 6% по методу наименьших квадратов.

Спад сцинтилляций при возбуждении Pu + + Be-источником аппроксимировался также суммой трех экспонент. Значения постоянных затухания получались такими же, как и при

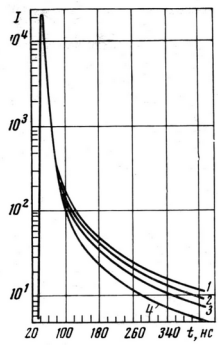


Рис. 1. Сцинтилляционные кривые при облучении источником ^{60}Co. *1* — стильбена; *2* — α-метилнафталина + + BPO; *3* — NE-213; *4* — толуола + PPO

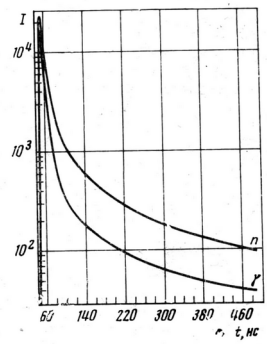


Рис. 2. Форма сцинтилляционных кривых при облучении ж.с. Pu + Be-источником и ^{60}Co

Таблица 1

Параметры сцинтилляторов, получаемые при облучении источником ^{60}Co

№№ пп	Сцинтиллятор	$I_б$	$\tau_б$	$I_с$	$\tau_с$	$I_м$	$\tau_м$
1	Стильбен	0,955	4,9	0,0416	34	0,0033	270
2	α-метилнафталин + + ВРО (5 г/л)	0,956	2,26	0,0416	34	0,0027	240
3	NE-213	0,962	2,26	0,0375	31,8	0,002	240
4	Толуол + + РРО (5 г/л)	0,977	2,26	0,021	30	0,00165	212

Таблица 2

Зависимость относительного вклада компонентов от предела интегрирования t_1

t_1, нс	10	20	30	40	50	60	70
K_1	2,17	5,9	8,5	10,7	12,4	14,2	15,8
K_2	1,58	3,1	4,0	4,8	5,55	6,3	6,92
q	1,37	1,91	2,12	2,23	2,23	2,25	2,28

Таблица 3

Зависимость относительного вклада компонентов от состава сцинтиллятора

№№ пп	Сцинтиллятор	K_1	K_2	q
1	Стильбен	12,4	5,55	2,23
2	α-метилнафталин + ВРО (5 г/л)	6,45	3,17	2,03
3	NE-213	6,52	3,34	1,95
4	Толуол + РРО (5 г/л)	9,4	5,07	1,85

облучении образцов источником ^{60}Co, однако вклад среднего и медленного компонентов при измерениях с Pu + Be-источником оказался больше (рис. 2). Для характеристики этого различия определялись величины заряда $Q_б$ и $Q_м$ в схеме измерения интенсивности вспышек, соответствующие быстрому и медленному компонентам. Значение $Q_б$ находилось как сумма отсчетов от момента максимальной интенсивности до некоторого момента t_1, а значение $Q_м$ как сумма отсчетов от момента t_1 до границы диапазона измерений [6]. Для разных значений величины t_1 по экспериментальным данным для стильбена были найдены относительный вклад компонентов $K_{1,2} = Q_б / Q_м$ (K_1 — соответствует измерениям в случае облучения сцинтиллятора источником ^{60}Co; K_2 — измерениям с Pu + Be-источником), и отношение $q = K_1 / K_2$ (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что значения K_1 и K_2 и, особенно, q при $t_1 \gtrsim 50$ нс, что составляет 10 $\tau_б$ для стильбена, изменяются мало. Поэтому при расчете характеристик сцинтилляторов выбрано, как и в [8], значение $t_1 = 10\ \tau_б$.

Величины K_1, K_2 и q для различных сцинтилляторов, определенные при выбранной, указанным выше способом величине t_1, приведены в табл. 3.

Сопоставление данных табл. 3 и рис. 1 показывает, что разделяющая способность сцинтилляторов q тем больше, чем больше вклад медленного компонента. Такой же вывод сделан в [5]. Вклад медленного компонента и значение q для ж.с. на основе α-метилнафталина получился больше, чем для NE-213. Значения постоянных затухания τ, полученные для сцинтилляторов №№ 1 и 3, близки к результатам работы [1], где применялась аппроксимация тремя экспонентами. Значение K_1 для стильбена при $t_1 = 20$ нс согласуется с данными [6], значения K_2 больше, чем в [6], что может быть связано с влиянием сопутствующего γ-излучения от Pu + Be-источника и меньшей границей диапазона времени.

Полученные результаты могут быть использованы в работах по оптимизации индентификаторов нейтронов по форме сигналов от сцинтилляционного детектора [9].

Авторы выражают благодарность С. Д. Чигирю и В. А. Прорвичу за изготовление, наладку установки и консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *F. T. Kuchnir, F. I. Lynch*, IEEE Trans, 1968, *NS-15*, № 3, 107.
2. *R. A. Winyard, G. E. Lutkin, G. W. McBeth*, Nucl. Instrum. and Methods, 1971, *95*, № 1, 141.
3. *H. Dupont, G. Pfeffer, G. Laustriat*, Nucl. Instrum. and Methods, 1967, *47*, № 1, 93.
4. *I. B. Czirr*, Nucl. Instrum. and Methods, 1970, *88*, № 1, 321.
5. *I. B. Berlman, O. I. Steingraber*, Nucl. Instrum. and Methods, 1973, *108*, 587.
6. *L. M. Bollinger, G. E. Thomas*, Rev. Scient. Instrum., 1961, № *9*, 1044.
7. *А. С. Абдувалиев, Н. Г. Волков, С. Д. Чигирь*, В сб. Монокристаллы, сцинтилляторы и органические люминофоры, 1972, вып. 6, ч. 1, 311, ВНИИ монокристаллов, Харьков.
8. *R. Voltz, G. Laustriat*, J. Phys., 1968, № *4*, 297.
9. Исследования возможностей широкодиапазонной идентификации нейтронов по форме сигналов от сцинтилляционного детектора. Сб. статей (под редакцией А. А. Курашова), 1973, ч. I, 11, Атомиздат.

ВНИИ монокристаллов, Харьков. Получено 20.I.1975

Журнал прикладной спектроскопии,
том XXXIX, выпуск 4, 1983

УДК 539.1.074:539.194

Н. З. Галунов

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ СВЕТА СЦИНТИЛЛЯЦИЙ В БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРАХ

В последнее время возросли требования, предъявляемые к быстродействию сцинтилляционных детекторов. Это связано с их применением в рентгеновской и гамма-астрономии, в задачах по диагностике термоядерного синтеза, с распределением изотопов в живом организме, с определением траектории частиц в ядерно-физических экспериментах и т. д. [1—3]. Целенаправленный поиск быстродействующих сцинтилляционных систем невозможен без понимания механизмов, ответственных за формирование их отклика на ионизирующее излучение,— импульсов света сцинтилляций, т. е. без изучения оптики сцинтилляторов — одного из основных разделов учения о люминесценции.

В формировании радиолюминесцентных импульсов в наиболее быстродействующих органических сцинтилляторах важную роль должны играть процессы, следующие за возбуждением, т. е. процессы дезактивации молекул из высших в низшие возбужденные состояния, перенос энергии электронного возбуждения к люминесцентным центрам и свечение последних. Однако степень влияния этих процессов изучена слабо ввиду наличия ограниченных по своему количеству и противоречивых экспериментальных данных.

Согласно описанию сцинтилляционного процесса в органических сцинтилляторах, предложенному Бирксом [1], длительностью процессов возбуждения молекул в низшие возбужденные состояния (10^{-12}—10^{-11} с) можно пренебречь. В этом случае форма «быстрого» компонента импульсов света сцинтилляций, т. е. форма сцинтилляционного импульса сцинтилляторов с пренебрежимо слабыми эксимерным свечением и задержанной флуоресценцией, должна иметь вид:

для однокомпонентных, не содержащих люминесцентных добавок сцинтилляторов

$$i(t) \sim \exp(-t/\tau), \tag{1}$$

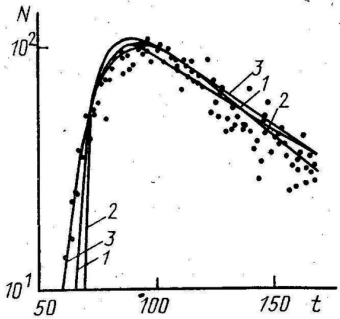
для двухкомпонентных жидких сцинтилляторов на основе невязких растворителей

$$i(t) \sim \exp(-t/\tau) - \exp(-t/\tau_1), \tag{2}$$

для двухкомпонентных пластмассовых сцинтилляторов

$$i(t) \sim \exp(-t/\tau) - \exp(-t/\tau_2 - 2\gamma\sqrt{t/\tau_2}), \quad (3)$$

где t — время после момента возбуждения; τ — постоянная времени свечения сцинтиллятора; τ_1— постоянная, характеризующая время переноса энергии электронного возбуждения к люминесцентным центрам; τ_2— постоянная времени свечения молекул полимерной основы в отсутствие тушения; γ — постоянная, зависящая от концентрации молекул люминесцентной добавки — молекул-акцепторов энергии электронного



Форма импульса света сцинтилляций пластмассового сцинтиллятора на основе поливинилксилола, содержащего 22 г/л PBD [4]. Точки — экспериментальные значения после вычитания аппаратурного фона; t — время, выраженное в каналах регистрирующего анализатора [7]; цена канала, т. е. расстояние между точками, $25 \cdot 10^{-12}$ с, N— число импульсов в канале

возбуждения. Форма импульса света сцинтилляций в виде (1) должна иметь мгновенное нарастание, а в виде (3) — быстрый начальный участок нарастания по сравнению с $i(t)$ в виде (2) (рисунок).

Исследования [2] формы импульсов света сцинтилляций пластмассовых сцинтилляторов на аппаратуре с субнаносекундным временным разрешением показали, что во фронте их нарастания наблюдается в действительности медленный начальный участок нарастания и для пластмассовых сцинтилляторов на основе поливинилтолуола, как содержащих люминесцентные либо тушащие добавки, так и не содержащих их:

$$i(t) \sim f_G(t) * \exp(-t/\tau) = \int_0^t f_G(t-x)\exp(-x/\tau)\,dx, \quad (4)$$

где

$$f_G(t) \sim \exp[-(t-3\sigma)^2/2\sigma^2], \quad (5)$$

x — переменная интегрирования; σ не зависит от концентрации молекул как люминесцентной добавки, так и молекул тушителей (ацетофен, бензофенон) и $\sigma=200$ пс. Авторы работы [2] объясняли полученный ими эффект гипотезой о возможности достаточно интенсивного свечения молекул поливинилтолуола как из высших, так и из низших возбужденных состояний. Это должно было приводить к задержке моментов высвечивания тех молекул, которые к моменту испускания фотона находятся уже в низших возбужденных состояниях относительно молекул, высвечивающих непосредственно из высших возбужденных состояний. Подобно процессу люминесценции должен происходить и процесс переноса энергии электронного возбуждения к молекулам люминесцентной добавки при их введении в сцинтиллятор. Тогда минимальная длительность импульса света сцинтилляций Δt, измеряемая как ширина на половине максимального значения $i(t)$, равна длительности, рассчитанной для $f_G(t)$, т. е. при $\sigma=200$ пс составляет 480 пс. Авторами работы [3] при возбуждении рентгеновским излучением, рожденным в плазменном взаимодействии, плотность которого превышала плотность возбуждения в [2] на 8—10 порядков, было получено, что Δt может достигать значе-

ния 220 пс у тех же сцинтилляторов, что и в [2]. Объяснение полученных результатов отсутствует.

С целью выяснения механизмов сцинтилляционного процесса в быстродействующих органических сцинтилляторах в [4—6] были проведены исследования формы импульсов света сцинтилляции монокристаллических, пластмассовых и жидких органических сцинтилляторов на установке, описанной в [7]. Применявшаяся методика измерений и машинной обработки полученных результатов позволила восстанавливать форму импульсов света сцинтилляций $i(t)$ с более высокой степенью точности, чем в [8]. Константы, входящие в $i(t)$, определялись с точностью до $2\cdot10^{-11}$ с. Было получено, что для монокристаллических и пластмассовых органических сцинтилляторов $i(t)$ имеет вид (4). На рисунке показаны результаты измерений (точки) и аппроксимации $i(t)$ в виде (2), (3) и (4) (кривые *1, 2* и *3* соответственно) для поливинилксилольного образца, содержащего 22 г/л (0,074 моль/л) 2-фенил-5(4-бифенилил)-оксадиазола-1,3,4 (PBD). Параметр σ в $f_G(t)$ (5) был постоянен для образцов с одной и той же полимерной основой и менялся лишь при ее замене. Так, для полистирола и поливинилксилола $\sigma=260$ и 200 пс соответственно. Для монокристаллов стильбена σ возрастала от 180 до 210 пс при уменьшении среднеквадратичной разориентации блоков мозаики монокристалла от 160′ до 26′. Для неактивированных монокристаллов паратерфенила $\sigma=360$ пс. При введении молекул дифенилбутадиена как добавки в кристаллическую решетку паратерфенила $\sigma=240$—180 пс для концентраций дифенилбутадиена 0,043—0,43 мол.% соответственно.

Анализ спектров люминесценции, полученных при возбуждении сцинтилляторов, не содержащих люминесцентных добавок, в первое синглетное состояние и спектров радиолюминесценции при возбуждении радиоизотопным бета-источником ($^{90}Y+^{90}Sr$), полученных на флуоресцентном спектрофотометре Хитачи 650-10 S, показал полную идентичность этих спектров.

Было установлено, что для жидких органических сцинтилляторов на основе толуола $i(t)$ наилучшим образом аппроксимировалось (2). Значение τ_1, как и следовало ожидать, в этом случае уменьшалось с увеличением концентрации добавки. Минимальное значение $\tau_1=80$ пс было получено для сцинтиллятора, содержащего 10 г/л (0,034 моль/л) PBD и 5,2 г/л (0,048 моль/л) ацетофенона. Для подавления свечения медленного компонента импульса света сцинтилляций сцинтилляторы продувались кислородом.

Анализ перечисленных выше результатов приводит к следующему.

1. Значения параметра σ не зависят от концентрации молекул люминесцентной добавки, являющихся акцепторами энергии электронного возбуждения макромолекул полимера, т. е. не зависят от условий переноса. Следовательно, $f_G(t)$ характеризует процессы, предшествующие переносу энергии электронного возбуждения. Величина $\sigma=200$ пс, полученная для близких по своей структуре поливинилтолуола при гамма-возбуждении (^{60}Co) [2] и поливинилксилола при бета-возбуждении [4], свидетельствует о том, что процесс передачи энергии ионизирующего возбуждения молекулами сцинтиллятора не оказывает решающего значения на $f_G(t)$ (5). Результаты исследований спектров люминесценции и радиолюминесценции показывают, что молекулы полимеров излучают фотоны света, находясь в первом возбужденном синглетном состоянии. Таким образом, σ характеризует длительность их перехода из высших в низшее возбужденное состояние. Проведенные в [4] исследования формы импульсов света сцинтилляций показали, что для образцов с малой концентрацией добавки ($8{,}7\cdot10^{-3}$ моль/л) паратерфенила в поливинилксилоле $i(t)$ аппроксимируется в виде (2) с $\tau_1\sim0{,}72$ нс. В этом случае $\tau_1<\sigma$ и средняя длительность переноса превышает разброс моментов

излучения отдельных молекул, связанных с их переходом из состояний, в которых они будут возбуждены вначале, в низшее возбужденное состояние.

2. Согласно [9], перенос энергии электронного возбуждения в молекулярных кристаллах связан с образованием в них под воздействием возбуждающего излучения молекулярных экситонов. Наличие молекул примеси, энергия возбуждения которых лежит ниже первой экситонной зоны кристалла, оказывает на экситон «привязывающее» действие — он локализуется на молекуле примеси. Теория молекулярных экситонов применима не только для молекулярных кристаллов; в частности, автор работы [10] показал, что основные ее положения реализуются для возбуждения σ-связей основной цепи макромолекул предельных углеводородов. Основная цепь макромолекул полистирола и поливинилксилола та же, что и у предельных углеводородов; они отличаются от последних наличием ароматических групп в боковых звеньях с энергией возбуждения более низкой, чем энергия возбуждения электронов в основной цепи. Согласно [10], нижний край первой экситонной зоны длинных макромолекул предельных углеводородов соответствует миграции энергии по СС связям на расстоянии $\sim 10^3$ элементарных звеньев цепи. Таким образом, если, например, рассматривать макромолекулу полистирола, то по аналогии с результатами [10] можно предположить, что при переходе макромолекул в высшие возбужденные состояния (возбуждение σ-связей) будут возникать молекулярные экситоны. Энергия возбуждения будет мигрировать по СС связям основной цепи макромолекулы вплоть до момента ее локализации на одном из бензольных колец. Подобное предположение и подтверждается полученными результатами. Действительно, форма $i(t)$ имеет одинаковый вид для монокристаллических и пластмассовых органических сцинтилляторов (исключая двухкомпонентные пластмассовые сцинтилляторы с малой концентрацией добавки). Значение σ, описывающее в этом случае время жизни экситона, зависит от совершенства кристаллической решетки монокристалла либо от строения макромолекулы полимера, т. е. от условий миграции энергии возбуждения. Концентрация молекул добавки, перенос энергии электронного возбуждения на которые происходит из низших возбужденных состояний, не влияет поэтому на форму $f_G(t)$ (5).

Описание $i(t)$ в виде (4) несправедливо для жидких сцинтилляторов, энергия взаимодействия между молекулами которых недостаточна для образования экситона при их возбуждении.

3. Описание $i(t)$ в виде (2) получено из предположения, что длительность процессов перехода возбуждения молекул доноров энергии электронного возбуждения в низшее возбужденное состояние бесконечно мала по сравнению с длительностью переноса энергии к молекулам ее акцепторов (τ_1). Из решения (2) для $\tau_1 = 8 \cdot 10^{-11}$ с следует, что длительность процессов перехода в низшее возбужденное состояние молекул толуола $< 10^{-11}$ с, что совпадает с теоретическими оценками для изолированных молекул $\sim 10^{-12}$—10^{-11} с.

4. Если изложенные выше рассуждения верны, то при увеличении плотности возбуждения должно уменьшаться значение σ. Действительно, при возбуждении ионизирующим излучением высоких энергий (быстрые заряженные частицы, вакуумный ультрафиолет и т. д.) возможно возбуждение любой из молекул вещества с любой энергией: от энергии низшего возбужденного состояния до энергий, превышающих низший потенциал ионизации молекул вещества [11]. Такой разброс начальных энергий возбуждения приведет к большему разбросу промежутков времени между моментом возбуждения и моментами излучения. При увеличении плотности возбуждения разброс значений начальных энергий возбуждения уменьшается, так как меньше становится молекул, возбужденных ионизирующим излучением в низшие энергетические со-

стояния, что приводит к увеличению средней задержки моментов высвечивания и к уменьшению их временного разброса, т. е. к уменьшению σ. Именно такой экспериментальный результат — сокращение длительности импульсов света сцинтилляций при увеличении плотности возбуждения на 8—10 порядков — получили авторы работ [3]. Этот результат не удавалось объяснить с позиций, отличных от излагаемых в настоящей работе.

Таким образом, миграция энергии возбуждения в органических монокристаллических и пластмассовых сцинтилляторах накладывает ограничение на их предельное быстродействие, т. е. на длительность их импульсов света сцинтилляций. Временный разброс моментов высвечивания отдельных молекул, связанный с этим процессом, описывается функцией $f_G(t)$ (5). Подобное ограничение в жидких сцинтилляторах отсутствует.

Summary

The study of the shapes of light pulses has shown a slow initial rise of these in organic single crystals and plastics. The comparison of light-pulse shape data, radioluminescence and luminescence spectra allows a conclusion that the process of excitation energy generation in organic single crystals and plastics imposes a limitation on the improvement of their response and causes the appearance of a slow initial rise. The study of the light-pulse shape of liquid scintillators indicates the absence of this limitation in the latter. In this case the process of energy transfer between the molecules takes a longer time than their deexcitation from the higher to lower excited states.

Литература

1. **Birks J. B.**— J. of Phys. B, 1968, v. 1, ser. 2, p. 946—957.
2. **Bengston B., Moszynski M.**— Nucl. Instrum. and Meth., 1978, v. 155, N 1, p. 221—231.
3. **Tirsell K. G., Trip G. R., Lent E. M.** e. a.— IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1977, v. NS-24, N 1, p. 250—254.
4. **Галунов Н. З., Копина И. В., Цирлин Ю. А.**— В сб.: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции «Органические люминофоры и их применение в народном хозяйстве».— Харьков, ВНИИМонокристаллов, 1980, с. 18.
5. **Будаковский С. В., Галунов Н. З., Кришталь Е. Е.** и др.— В сб.: Монокристаллы, их получение и свойства.— Харьков, ВНИИМонокристаллов, 1982, № 8, с. 103—106.
6. **Галунов Н. З., Кришталь Е. Е., Лысова И. В., Афанасиади Л. Ш.**— В сб.: Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции «Состояние и перспективы разработки применения сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в XI пятилетке». — Харьков, ВНИИМонокристаллов, 1981, т. 28.
7. **Галунов Н. З.**— В сб.: Методы получения и исследования монокристаллов и сцинтилляторов.— Харьков, ВНИИМонокристаллов, 1980, № 5, с. 104—110.
8. **Галунов Н. З., Грудская Л. Е., Рогожин А. А.** и др.— ЖПС, 1978, т. 29, № 1, с. 148—152.
9. **Давыдов А. С.** Теория молекулярных экситонов.— М.: Наука, 1968.— 296 с.
10. **Partridge R. H.**— J. of Chem. Phys., 1970, v. 52, N 5, p. 2485—2510.
11. **Platzman R. L.**— Radiation reserch, 1962, v. 17, N 3, p. 419—425.

Поступило в редакцию 05.07.83.

Cryst. Res. Technol.	24	1989	2	193–197

I. P. Krainov, N. Z. Galunov, S. V. Budakovsky

All-Union Scientific Research Institute for Single Crystals, Kharkov, USSR

The Influence of Controlled Electron-Seeking Addition Agents of the Melt on Stilbene Single Crystal Structure and Radioluminescence Properties

The study of certain radioluminescence characteristics of stilbene single crystals is performed. Doping the stilbene melt with electron-seeking (ES) addition agents of benzol and benzophenone halogen derivatives allowed to control the structure perfection of the crystal grown. The root-mean-square random orientation of single crystal mosaic structure, and concentration of the deep traps of charge carriers and excitons were minimum for the single crystals grown from the melt containing 0.1 mol% ES addition agent. Doping the melt with ES addition agents did not cause the appearance of additional luminescence impurity centres or quench luminescence centres in the single crystals grown.

Проведено исследование радиолюминесцентных характеристик монокристаллов стильбена. Введение в расплав электроноакцепторных (ЭА) примесей галогенопроизводных бензола и бензохинона позволило влиять на структурное совершенство выращиваемых монокристаллов. Для кристаллов, выращенных из расплава, содержащего 0,1 моль% ЭА примеси были минимальными среднеквадратичная разориентация блоков мозаики монокристалла, а также концентрация глубоких ловушек носителей заряда и синглетных экситонов. Наличие ЭА примесей в расплаве не приводило к появлению дополнительных приместных центров люминесценции в выращенных кристаллах, либо к появлению центров тушения их люминесценции.

1. Introduction

Doping the melt with addition agent of a high electron affinity does not only influence the melt properties but also the properties of the grown crystal (Naumowicz; Budakovsky et al.). Earlier (Budakovsky et al.) we studied the influence of the electron-seeking (ES) addition agents of benzol and benzophenone halogen derivatives on the radioluminescence of stilbene single crystals. It was discovered that the addition of ES agent to melt allowed to influence the perfection of the grown stilbene single crystals which manifests in the change of the root-mean-square random orientation σ_c of the single crystal mosaic structure. Doping the melt with the ES addition agent influenced the radioluminescence of the single crystals just in as much as it influenced the σ_c change.

The same structural defects of the molecular crystal can form local trapping centres both for excitons and charge carriers, i.e. these defects can influence the process of radioluminescence pulse formation both at the stage of energy exchange of charge states and at the following stages resulting in the emission of the radioluminescence photons (Silinsh; Galunov). The available estimations (Silinsh) of the ratio between value of the fluorescence band shift (ΔE_s) of organic crystals, that caused by trapping of the singlet excitions on the traps formed in the imperfection regions of the com-

pressed crystal, and the value of the mean pressure produced in these regions permits calculation of the depths (E_t) of the charge carrier traps which can be caused by the imperfections of this type; that, in certain cases, allows to identify the nature of these imperfections. Thus using the results of the radioluminescence study of the organic single crystals of various structure perfections (BUDAKOVSKY et al.) one can estimate what can cause the improvement of the structure perfection of the organic single crystal and the concentration of which traps is decreased in it by adding ES agent to the melt. An attempt is made in this paper to study the energy spectrum of only those traps on which localization of charge states and excitons can influence the luminescence characteristics of the stilbene single crystals grown from the melt containing ES addition agents.

2. Experimental results

The Table 1 shows the results of the radioluminescence study of the stilbene single crystals grown from the melt which contained the ES addition agents. The radioluminescence was excited by electrons from an $^{90}Y + {}^{90}Sr$ radionuclide source. The experimental techniques were described in previous papers (GALUNOV et al. 1982, 1983; GALUNOV; BUDAKOVSKY et al.).

The radio- and photoluminescence spectra of the crystals studied were identical. Two bands with the peak wavelengths of $\lambda_1 = 380$ nm and $\lambda_2 = 410$ nm, respectively, were observed. The value I_2/I_1 presented in the table is the ratio between the luminescence intensity for λ_2 and λ_1 wavelengths, respectively. The short-wave band ($\lambda_1 = 380$ nm) was observed for all the crystals. The long-wave band ($\lambda_2 = 410$ nm) was observed distinctly only for crystals with $\sigma_c > 45'$ irrespective of the ES addition agents being added or not added to the melt.

The radioluminescence light yield is obtained from

$$J = j/j_0 , \tag{1}$$

where j and j_0 are the currents in the photomultiplier anode circuit which arise while detecting the signals from the crystal studied and the one grown from the melt containing 0.1 mol.% of ES addition agent, respectively.

Study of radioluminescence light-pulse shape (in the time range of 0—20 ns after the radiation excitation) was performed using the single photon method. Processing the pulse shape measurement results in EC-1033 computer in consideration of the final time resolution of the setup shows that the radioluminescence light pulse shape is best approximated in the following form:

$$i(t) \sim f_G(t) * \exp(-t/\tau) = \int_0^t f_G(t-x) \exp(-x/\tau)\, dx , \tag{2}$$

$$f_G(t) = (\sqrt{2\pi}\,\sigma)^{-1} \exp\{-(t - m\sigma)^2/2\sigma^2\} , \tag{3}$$

where t is the time after excitation, τ is decay time constant of radioluminescence pulse fast component.

3. Discussion

The spectral study results allow to make the following estimations. The presence of the crystal structure imperfection, accompanied by the σ_c increase, causes the growth of the radioluminescence photon proportion in the long-wave band ($\lambda_2 = 410$ nm),

with its energy differing from that of the main band ($\lambda_1 = 380$ nm), by $\Delta E_S \sim 0.24$ eV. It is known (SILINSH) that the structure defects which cause formation of the singlet exciton traps with the depth of $\Delta E_S \sim 0.2-0.25$ eV generate charge carrier traps of $E_t \sim 0.2-1.4$ eV in depth. The traps with such ΔE_S and E_t values are formed in dislocation aggregations or ensembles of single crystals grown from the melt. The presence of such charge carrier deep traps ($E_t \gtrsim 1.0$ eV) of a structural origin has been verified on a number of single crystals by techniques of thermally stimulated and photostimulated conductivity and by the technique of isothermal decay currents, and proved by the temperature dependence of space-charge-limited currents (SILINSH). If such explanations are correct for the stilbene single crystals studied, and the band with $\lambda_2 = 410$ nm is due to structural defects, which generate the deep traps of singlet excitions and charge carriers, then the time during which the captured charge carrier stays on the trap is long. In this case, the charge carrier recombination process, capable of causing the molecular excitation which results in luminescence, is determined by the duration of the opposite charge carrier transport to these traps. So a slow process cannot result in a radioluminescence light yield growth nor can it cause the increase of the fast component time constant of the radioluminescence pulse. In this case the opposite effect should be observed: the capture of a portion of charge carriers by the deep traps should cause a certain decrease of both the radioluminescence light yield and the fast component decay time constant of the radioluminescence pulse. It should be a result of the decrease of the recombination number of the charge carriers, located on shallow traps, and, consequently, by the decrease of the number of the singlet excitons, generated in the process of such recombinations during the time comparable to the decay time of the radioluminescence pulse fast component. The latter agrees with the experimental data (see Tab. 1), i.e. the τ and I values decrease with σ_c increasing.

The results of the study of the radioluminescence light-pulse fast component shape allow to estimate the E_t value for the system of shallow traps. The location of charge carriers on these traps causes the additional delay of the emission moments of the radioluminescence photons. This delay which is described by $f_G(t)$ (3) determines the radioluminescence pulse rise time (GALUNOV; BUDAKOVSKY et al.). The charge carrier will have a location time τ_t, if it is captured by a trap with the depth of

$$E_t = kT \ln (\tau_t \nu) , \tag{4}$$

where k is the Boltzmann constant, T the temperature, ν the attempt-to-escape frequency. Substituting $kT = 0.026$ eV, $\nu \gtrsim 10^{12}\ s^{-1}$ (SIMMONS et al.; SILINSH), and $\tau_t = 3\sigma$ (3) into equation (4) for the room temperature yields $E_t \leqq 0.17$ eV. Such shallow traps are usually associated to the local trapping centres of a polarization

Table 1
The radioluminescence pulse characteristics of stilbene single crystals

ES addition agents concentration in stilbene melt, mol%	σ_c minutes of arc	I_2/I_1 rel. units	σ ns	τ ns	J rel. units
No doping	61	0.7	0.18	3.54	0.95
0.05	49	0.4	0.18	3.58	0.97
0.10	26	I_2 is negligible and peaks are not separated	0.21	3.75	1.00
0.53	160	0.6	0.18	3.41	0.90

origin which are formed in the regions of the local compression and tension of individual edge dislocations of the organic crystal, or in the regions of compression of its medium-angle grain boundaries (SILINSH).

The weak dependence of σ (3) on concentration of ES addition agents in the melt, as well as the weak $\sigma - \sigma_c$ dependence, apparently, indicates that doping the stilbene melt with ES addition agents does not lead to formation of the crystal fluorescence quenching centres, nor does it influence essentially the concentration of the charge carrier shallow traps ($E_t \lessapprox 0.17$ eV).

It should be noted that the stress fields of single dislocations, or those of the angle grain boundaries cannot be responsible for deep trap formation. Such powerful stress fluctuations, however, can well appear in pileup of dislocations. For example, in anthracene crystals with the pileup of $n = 10$ dislocations the system of traps with $E_t = 0.2$ eV may be formed, whereas for case of $n = 100$ the system with $E_t = 0.85$ eV (SILINSH; SWORAKOWSKY). Unfortunately, the data necessary for such calculations for stilbene single crystals have not been described anywhere. Using the fact that the available data on correlation between the values of the molecular crystal uniform compression and the depth of the traps generated during the compressing do not show violent differences for various organic single crystals (SILINSH), one can estimate the order of magnitude of n for the studied stilbene single crystals by the analogy with other organic single crystals. Then for the system of shallow traps ($E_t < 0.2$ eV) the $n \sim 10^0 - 10^1$, and for the system of deep traps ($E_t \sim 1.2 - 1.4$ eV) the $n \gtrapprox 10^2$.

4. Conclusions

Doping the stilbene melt with ES addition agents influences, substantially, the properties of the crystal grown. Adding 0.1 mol% of ES addition agents to the melt causes the best structural perfection of the grown crystal, which manifests in minimization of the root-mean-square random orientation of a single crystal mosaic structure, and also in the decrease of concentration of deep traps of charge carriers ($E_t \sim 1.2 - 1.4$ eV) and singlet excitons ($\Delta E_S \sim 0.24$ eV), the presence of which in organic crystals may usually be explained by the generation of the aggregation and ensembles of the dislocations in the process of crystal growth.

Doping the stilbene melt with ES addition agents does not cause the appearance of additional luminescence impurity centres or quench luminescence centres in the single crystals grown. The charge carrier migration and localization on the system of the shallow traps ($E_t \lessapprox 0.17$ eV) causes the charge carrier recombination process which results in generation of the singlet excitons, foregoing the emission of the radioluminescence photons. Such traps in organic single crystals are usually due to the existence of local trapping centres of a polarization origin. Doping the stilbene melt with ES addition agents does not influence essentially this type of the trapping centres in grown single crystal.

References

BUDAKOVSKY, S. V., GALUNOV, N. Z., KRAINOV, I. P., MNATSAKANOVA, T. R.: Zh. Prikl. Spektr. (USSR) 44 (1986) 1012

GALUNOV, N. Z.: Zh. Prikl. Spektr. (USSR) 39 (1983) 659

GALUNOV, N. Z., GEN, N. S., KRISHTAL, E. E., TSIRLIN, Yu. A.: Prib. i Tekh. Eksp. (USSR), No. 3 (1983) 49

GALUNOV, N. Z., GUNDER, O. A., KOPINA, I. V., TSIRLIN, Yu. A.: Prib. i Tekh. Eksp. (USSR), No. 6 (1982) 38
NAUMOWICZ, P.: Kristall und Technik **15** (1980) 973
SILINSH, E. A.: Elektronnyie sostoyaniya organicheskikh molekulyarnykh kristallov. (USSR), Riga 1978
SIMMONS, J. G., TAYLOR, G. W., TAM, M. C.: Phys. Rev. B. 7 (1973) 3714
SWORAKOWSKI, J.: Mol. Cryst. Liq. Cryst. **33** (1976) 83

(Received August 11, 1988
accepted August 18, 1988)

Authors' address:

Dr. I. P. KRAINOV, Dr. N. Z. GALUNOV, S. V. BUDAKOVSKY
All-Union Scientific Research Institute for Single Crystals
Lenin Prospect 60
Kharkov, 310141
USSR

Письма в ЖЭТФ, том 57, вып.9, стр.553 - 556 ©1993 г. 10 мая

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

Н.З.Галунов

Институт монокристаллов АН Украины

310001 Харьков, Украина

Поступила в редакцию 25 марта 1993 г.

Предложено описание механизма формирования быстрого компонента импульса радиолюминесценции в органических молекулярных средах, учитывающее специфику размена энергии зарядовых состояний в объектах, находящихся в различных агрегатных состояниях. В отличие от существующей теории радиолюминесценции, не учитывающей специфику процесса размена зарядовых состояний, данное описание позволяет преодолеть кризис теории, возникший в конце 70-х годов после проведения прецизионных измерений формы фронта наростания импульса радиолюминесценции винилароматических пластмасс.

Органические вещества, используемые в сцинтилляционной технике (органические монокристаллы - ОМ, пластмассы - ПС и жидкости - ЖС), по структурной сложности занимают широкую промежуточную область между неорганическими кристаллами и молекулярными биосистемами. Это позволяет при исследовании процесса радиолюминесценции изучать не только его особенности, но и отрабатывать на подобных системах, как на модельных, приемы и методы для изучения более сложных структур.

Теория радиолюминесценции органических конденсированных сред, разработанная в работах Биркса [1], Волтса [2] и ряда других авторов (см. обзор работ [3] по этому вопросу), пренебрегала влиянием процессов размена зарядовых состояний на формирование импульса радиолюминесценции. Тогда форма световой вспышки (исключая ее медленный компонент [4]) должна иметь одинаковое аналитическое описание при радио- и фотовозбуждении, а фронт нарастания импульса радиолюминесценции для органического твердого тела - иметь начальный быстрый участок нарастания с последующим уменьшением его крутизны. Для жидкостей форма быстрого компонента импульса должна описываться формулой

$$i(t) \sim \exp(t/\tau_1) * \exp(t/\tau) \equiv \int_0^t \exp(-(t-\theta)/\tau_1)\exp(-\theta/\tau)d\theta, \qquad (1)$$

где $*$ - обозначение свертки, t - время после момента возбуждения, τ_1 и τ - постоянные времени фронта нарастания и затухания вспышки.

Первые же работы по исследованию формы фронта нарастания ПС [5-8], проведенные на аппаратуре с субнаносекундным временным разрешением, привели к результатам, противоположным предсказаниям теории [1]: наблюдался медленный участок с последующим увеличением крутизны фронта нарастания кривой кинетики радиолюминесценции. Импульс описывался выражением

$$i(t) \sim f_G(t) * \exp(-t/\tau), \qquad (2)$$

где

$$f_G(t) \sim \exp(-(t-3\sigma)^2/2\sigma^2), \qquad (3)$$

σ – постоянная размерности времени, остальные обозначения те же, что и в (1). Аналогичный эффект наблюдался и для ОМ, а контролируемое изменение их структурного совершенства (достигавшееся за счет специальных методик роста [9]), влияющее на концентрацию глубоких ловушек носителей заряда и экситонов, крайне слабо влияло на значение σ (3) [10]. Для ЖС форма вспышки описывалась формулой (1) [11]. Ситуация иллюстрируется рис.1 и рис.2 на примере ЖС (0,034 моль/л 2-фенил-5(4-бифенилил)-1,3,4-оксадиазола (PBD) в толуоле), ПС (3,46% PBD в поливинилксилоле) и ОМ (0,042% дифенилбутадиена в п-терфениле). Для кинетики, описываемой кривой *3* (рис.2), характерно запаздывание моментов возбуждения макромолекул основы, а следовательно, и молекул люминесцентной добавки относительно ситуации, описываемой кривой *2*. Времена свечения τ для данных ЖС и ПС практически одинаковы (0,94 нс и 0,90 нс) поэтому задержка $\sim 10^{-10}$ с, наблюдаемая для кривой *2* (рис.1) относительно кривой *1*, может быть обусловлена лишь процессами, предшествующими переносу энергии электронного возбуждения к молекулам люминесцентной добавки. В рамках существовавшей теории подобные результаты объяснить невозможно [6,8]. Проанализируем ситуацию с целью выяснения противоречий теории [1] и экспериментов.

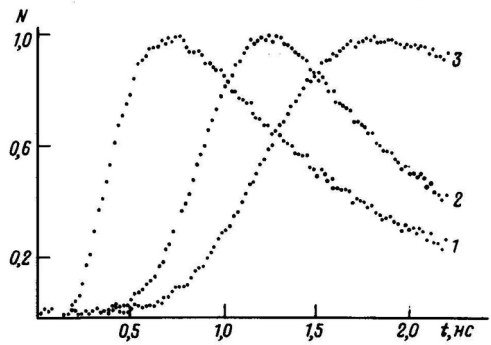


Рис.1. Кривые кинетики радиолюминесценции для двухкомпонентных ЖС (кривая *1*), ПС (кривая *2*) и ОМ (кривая *3*)

Полученные значения σ [5-9] для различных объектов были $\sim 10^{-10}$ с, что существенно превышает рассчетные времена переноса энергии электронного возбуждения ($\leq 10^{11}$ с) для них [7,8]. Вполне логично предположить, что описываемая выражением (3) дополнительная задержка моментов излучения фотонов радиолюминесценции обусловлена процессом локализации носителей заряда на мелких структурных ловушках, который предшествует их рекомбинации, порождающей возбужденные состояния и предшествующей люминесценции вещества. Согласно (3), наиболее вероятное время локализации носителей заряда $\tau_t = 3\sigma$. Тогда соответствующая глубина ловушки

$$E_t = kT\ln(\tau_t \nu), \tag{4}$$

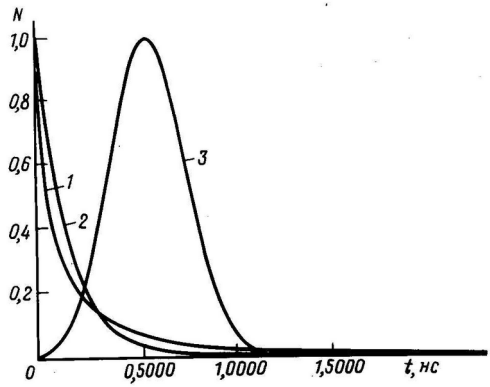


Рис.2. Функции плотности вероятности возбуждения молекул люминесцентной добавки в процессе тушения ими возбуждения молекул основы для ЖС (кривая *1*) и ПС(кривая *2* – рассчитана согласно [1], кривая *3* – по данным эксперимента)

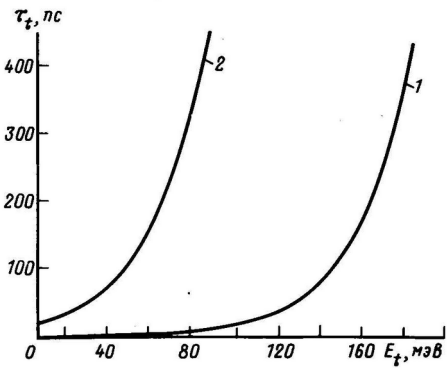


Рис.3. Расчетная зависимость τ_t от E_t (4) без учета (кривая *1*) и с учетом (кривая *2*) эффекта поляризации

где k – постоянная Больцмана, T – температура, ν – частотный фактор. С учетом того, что эксперименты [5-11] проводились при комнатной температуре, для ОМ и ПС $E_t \leq 0,17$ эВ [10]. Ловушки с такими E_t (рис.3, кривая *1*) могут быть связаны с мало- и среднеугловыми границами решеток ОМ, либо пространственными неоднородностями макромолекул ПС [10,12]. Вместе с тем, чем объяснить слабое отличие в значениях σ для разных ОМ и ПС? Ответ на этот вопрос может основываться на следующем. В твердотельных органических молекулярных системах носитель заряда, попав на ловушку, поляризует окружающие его молекулы ОМ (либо фрагменты макромолекул ПС). Результат взаимодействия заряда с индуцированными на соседних молекулах диполями, можно представить в виде углубления ловушки на величину δE_t. Она слабо отличается для широкого класса органических соединений, используемых в сцинтилляционной технике для выращивания ОМ, а ее характерное значение – $\delta E_t \sim 0,1$ эВ [12]. Оценочная глубина исходной структурной ловушки (рис.3,

кривая 2) равна $E_t - \delta E_t \leq 0,07$ эВ или $\sim 2kT$ для комнатной температуры. Таким образом, наличие очень мелких ловушек носителей заряда, большинство из которых может быть создано за счет температурно-активируемых колебаний решетки ОМ или фрагментов макромолекул ПС, вполне объясняет возникновение дополнительной задержки моментов излучения фотонов радиолюминесценции, описываемой выражением (3), а теория радиолюминесценции должна базироваться на учете образования молекулярных поляронов в органических твердых телах. в результате их возбуждения ионизирующим излучением. Последнее утверждение объясняет экспериментально обнаруженное соответствие описанию (1) формы сцинтилляционной вспышки для ЖС, где, как не трудно получить, вследствие эффективных диффузионных процессов возникновение устойчивого поляризационного окружения иона возможно лишь на расстояниях $\lesssim 10\,\AA$ [10,11], то есть сравнимых с размером молекулы, и , следовательно, длительность процесса рекомбинации будет определяться характерной частотой столкновений молекул ($\sim 10^{12}\,c^{-1}$) [10]. Оно также указывает на новое применение результатов исследований радиолюминесценции органических твердых тел. Изучение кинетики их свечения позволяет исследовать ловушки поляризационного происхождения, формирующиеся при образовании носителей заряда в веществе после возбуждения его ионизирующим излучением.

---

1. J.B.Birks, The theory and practice of scintillation counting, 1964, London.
2. T.A.King and R.Voltz, Proc. of the Royal Soc. **A289**, 424 (1966).
3. F.D.Brooks, Nucl. Instr. and Meth. **162**, 477 (1979).
4. Н.З.Галунов, Л.П.Коваль, В.М.Соломонов, Н.И.Шишов, Изв. АН СССР, сер. физ. **54**, 485 (1990),
5. M.Moszynski and B.Bengston, Nucl. Instr. and Meth. **142**, 417 (1977).
6. B.Bengston and M.Moszynski, Nucl. Instr. and Meth. **155**, 221 (1978).
7. F.Galligaris et al. Nucl. Instr. and Meth. **171**, 617 (1981).
8. Н.З.Галунов, ЖПС **39**, 659 (1983).
9. С.В.Будаковский, А.З.Галунов, И.П.Крайнов, В.П.Семиноженко, Докл. АН УССР, сер. А. физ.-мат. и техн. наук **1**, 46 (1989).
10. S.V.Budakovski, N.Z.Galunov and I.P.Krainov, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **186**, 151 (1990).
11. Л.Ш.Афанасиади, Н.З.Галунов, В.П.Зволинский, Н.И.Шишов, Сцинтилляционный процесс и свойства жидких сцинтилляторов. 1992. М.: Наука
12. В.А.Андреев, М.В.Курик, С.Нешпурек и др., Электронные процессы в органических молекулярных кристаллах: Перенос, захват, спиновые эффекты, Рига, 1992.

Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1993, Vol. 236, pp. 121–126
Reprints available directly from the publisher
Photocopying permitted by license only
© 1993 Gordon and Breach Science Publishers S.A.
Printed in the United States of America

THE RADIOLUMINESCENCE STUDY AS A METHOD FOR INVESTIGATION OF STRUCTURE FEATURES OF ORGANIC MOLECULAR SOLIDS

NIKOLAI GALUNOV
Institute for Single Crystals, Kharkov, Ukraine

Abstract The correlation between radioluminescence and structure characteristics of organic molecular systems is analyzed. It was shown, that using the results of investigation of scintillation characteristics one can study not only the properties of organic molecular solids but their structure features as well.

INTRODUCTION

For organic molecular systems the radioluminescence is caused by luminescence of molecules excited in the recombination process of charge carriers generated by ionizing radiation. In such systems the energy of intermolecular interaction and intramolecular one is about 10^{-3} eV and 10^{0} eV respectively. The generation of charge states causes the rise of an intermolecular interaction energy up to 10^{-1} eV [1], thereby upsets the balance of forces near such centers, and hence changes the nature of excitation energy transfer. Structure unperfections of an organic solid influence on localization of charge states and excited ones. Thus having investigated the radioluminescence of an organic molecular solid, one can study it structure features as well.

THEORY

The relaxation times needed for electronic (10^{-16}- 10^{-15} s) and vibronic (10^{-14} - 10^{-13} s) polarization of organic

molecules does not exceed the time of charge carrier localization (10^{-12} - 10^{-11} s).[1,2] Therefore, it may be argued that the polarization surroundings of charge carrier should be formed during it moving in the substance. For nonviscous liquids, equating the thermal energy to polarization one at a distance R from charge carrier we obtain that the dimension of stable polarization zone is

$$R = \sqrt[4]{e^2\alpha / 2kT} \sim 10\ \text{Å}$$

where e is electronic charge, α is the mean molecular polarizability ($\alpha \sim 20$ Å [2,3]), k is Boltzmann constant, T is the temperature. Thus, the generation of excited molecules and therefore the radioluminescence of liquids are practically due to recombination which takes place between geminate molecules. In contrast with liquids the local polarization of a crystal lattice or polymer macromolecule occurs even though the charge carrier is captured by a trap with the depth of $E_t' \sim (1 - 2)kT$. The appearance of such polarization results in deeping the potential well by the value of $\delta E_t \sim 0.1$ eV.[2] Thus, for the room temperature its depth is $E_t = E_t' + \delta E_t \sim 0.12 - 0.17$ eV. Hence the charge carrier location time is

$$\tau_t = \nu^{-1} \exp(E_t / kT) \sim 10^{-10} s \qquad (1)$$

where $\nu \sim 10^{12} s^{-1}$ is the attempt-to-escape frequency.[2,4] The analysis of the situation discussed has shown [4,5] that in the case of high concentration of such shallow traps, and when the τ_t value exceeds characteristic time values of an excitation energy transfer, the shape of radioluminescence pulse fast component for such a system should be described by the function:

$$i(t) \sim f(t) * \exp(-t/\tau) \equiv \int_0^t f(t-\beta) \exp(-\beta/\tau)\, d\beta \qquad (2)$$

where

$$f(t) \sim \exp(-(t-n\sigma)^2 / 2\sigma^2) \qquad (3)$$

In Eqs.(2) and (3) t is the time after excitation, τ is decay time constant, σ is the time constant determined by additional delay of the times of a radioluminescence photon emission. This delay is caused by the statistic nature of molecular excitation which is due to recombination of charge states localized on the shallow trap system. If correlation between the process resulting in a charge carrier energy exchange in organic solids and their molecular luminescence is negligible then in Eq.(2) function f(t) is not the Gaussian one (3), and the addition delay of the moments of photon emission doesn't have to appear.

Losses of ionizing energy in organic molecular systems result in generation of secondary electrons both of high and low energies. Low energy electrons create the regions of a high activation density in which the probability of a triplet excited molecule generation is high due to the process of a charge carrier recombination which is specific to these regions.[1,3,6] In exchange interaction of two closed with each other triplet excitations the singlet one may be generated with probability 0.4. The luminescence delayed on a time needed for triplet excitations to meet each other appears, and hence radioluminescence pulse slow component is formed. It shape (for times t > 50 ns after excitation [6]) is described by function

$$I(t) \sim (1 + t/ t_D)^{-k} \qquad (4)$$

where $t_D = r_0^2 / 4D$, D is the diffusion coefficient of triplet excitation, r_0 is the mean value of a cross - section radius of high activation density regions. The symmetry of these regions defines the k - value in Eq.(4).[6] For radiations with a high ($\geq 10^1$ MeV/ cm) and a low ($\leq 10^{-1}$ MeV/cm) specific energy loss k = 1.0 (cylindrical

symmetry) and k = 1.5 (spherical one) respectively. Formation of radioluminescence pulse slow component is a diffusion-controlled process with $t_D \sim 10^{-7}$s. Thus, only a presence of deep traps with a high location time (> 10^{-8}s) for charge carriers and excitations has an effect on it.

EXPERIMENT

The previous paper [5] has reviewed the experimental data for the radioluminescence pulse fast component study. For organic molecular crystals and vinylaromatic plastics the addition delay of the moments of photon emission was observed, and the pulse shape was described by Eq.(2) with f(t) in the form (3), n = 3, and $\sigma \sim$ 0.1 - 0.4 ns. The σ-value was defined by the type of the crystal or plastic, weakly increased with a decrease of root-mean-square random orientation of single crystal mosaic structure, and for plastics didn't depend on a type and concentration of added agents. For liquids function f(t) in Eq.(2) was not Gaussian one, and the addition delay of the moments of a photon emission was not detected.

The study [2,3,6] of radioluminescence pulse slow component has shown the following. The delay radioluminescence was observed for organic molecular single crystals and liquids as well as for plastics based on cross - linked copolymers. For all the cases the shape of the radioluminescence pulse slow component was well described by Eq.(4). For liquids the process of a delay radioluminescence pulse formation was defined by diffusion of triplet excited molecules, but for crystals and plastics it was defined by features of triplet exciton migration within the limits of the crystal lattice or cross - linked areas of plastic. The shape and intensity of delay radioluminescence was defined by the structure perfection of those parts of the organic solid along which the track of ionizing particle was orientated. With improvement of

structure perfection t_D-values in Eq.(4) decreased, but their anisotropy increased. It was shown [4,6] that those structural unperfections of an organic crystals which affected the kinetics of a radioluminescence pulse slow component formed the traps ≥ 1.0 eV and ≥ 0.2 eV in depth for charge carriers and excitons respectively.

DISCUSSION

The additional delay (Eq.(3)) of a radioluminescence photon emission was detected only for organic molecular solids. Therefore, for such objects the correspondence between the shape of the radioluminescence pulse fast component and the structural features of molecular solid exist. The validity of this statement can be verified by the following analysis. If ΔE is the difference in the depth between the traps with location times τ_t (Eq.(1)) and $\tau_t + \Delta\tau$, then using Eq.(1) for $\Delta E/kT < 1$ it is not difficult to obtain that

$$\Delta E = \Delta\tau\,(kT/\tau_t) \qquad (5)$$

Hence both the energy and the location time distributions (Eq.(3)) for such traps should be described by the functions of the same type, i.e. Gaussian functions. That is just what has been obtained during the study of the energy distribution of trapping centers of polarization origin, which are formed in regions of the local compression and tension of individual edge dislocations of organic crystals.[2] It allows us to estimate mean trap depth E_t (Eq.(1)). Using values of $\sigma \sim 0.1 - 0.4$ ns, $\tau = n\sigma = 3\sigma$, we have obtained $E_t \leq 0.2$ eV, that is in a good agreement with values of $E_t \sim 0.12 - 0.17$ eV which have been estimated above.

The presence of deep traps ($E_t > 1.0$ eV) influences the shape of radioluminescence pulse. Nevertheless, the type and concentration of deep traps has the main effect on

the t_D- value (Eq.(4)) and its anisotropy.

CONCLUSIONS

Up to now, the radioluminescence phenomenon was studied only as an aim of scientific or technical (certification of scintillation detector, for example) investigation. The material discussed allows not only to enunciate the radioluminescence theory of organic molecular systems, which takes account of charge carrier energy exchange process in them, but to consider the radioluminescence study as a method for investigation of structure features of organic molecular solids as well.

REFERENCES

1. Pope M., Swenberg C.E. Electronic processes in organic crystals.(Clarendon Press.: Oxford, N.-Y. 1982.)
2. Silinsh E.A., Kurik M.V., Capek V. Elektronie protsesi v organitcheskhih moleckuljarnikh kristallakh. Riga: Zinatne. 1988. 329 P.
3. Gutmann F., Lyons L.E. Organic semiconductors. (John Wiley and Sons, Inc. New York - London - Sydney. 1967. P.868).
4. Krainov I.P., Galunov N.Z., Budakovsky S.V. Cryst. Res.Technol., 24, 193 (1989).
5. Budakovsky S.V., Galunov N.Z., Krainov I.P. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 186, 151 (1990).
6. Galunov N.Z., Koval L.P., Solomonov V.M., Shishov N.I. Izvestia Academii Nauk SSSR (Proceeding of the Academy of Science of the USSR) Ser. Fizicheskaya, 54, 485 (1990).

Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®
ELSEVIER
Journal of Luminescence 102–103 (2003) 464–468
JOURNAL OF LUMINESCENCE
www.elsevier.com/locate/jlumin

Organic polycrystals as the new luminescent systems for scintillation and ecology techniques

N.Z. Galunov[a,*], J.H. Baker[b], S.V. Budakovsky[a], O.A. Tarasenko[a], A.Yu. Rybalko[a], V.V. Yarychkin[a]

[a] *Institute for Single Crystals, National Academy of Sciences of Ukraine, 60 Lenin Ave., Kharkov 61001, Ukraine*
[b] *SELOR eeig, Saffierstraat 101C, 1074 GP, Amsterdam, The Netherlands*

Abstract

A new type of organic luminescent material, namely, organic scintillation polycrystals is proposed. We have obtained *p*-terphenyl and stilbene polycrystals by the pressing technique of our design. The analysis of the dependence between structural features of organic polycrystals and their radioluminescence pulse characteristics is based on the results of spectra and pulse shape measurements.
© 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: Organic polycrystals; Ionizing radiation; Radioluminescence

1. Introduction

An extensive application of organic luminescent materials and detectors on their base for detection of ionizing radiations constantly stimulate a great interest in this problem. Organic scintillators are usually used as activated and pure single crystals, or as objects with amorphous structure (i.e. plastics and liquid scintillators). Radiation sensitive organic luminescent materials have to be fast and highly transparent for their own fluorescence. As a result of small atomic effective number organic molecular systems get the advantage over inorganic ones by registration of the short-range charged particles (α- and β-particles). Organic scintillation materials have the ever-growing use in nuclear physics, radioecology, radiobiology, geology, etc. [1].

Organic polycrystals are very attractive systems for creation of detectors with large diameters used for detection the most dangerous for human organism types of ionizing particles. The modern technologies of organic single crystal growth do not permit to create systems with large diametrical sizes (more than 100 mm) and high degree of structure perfection. Besides, an investigation of scintillation and spectral characteristics of organic polycrystals is very important not only for designing and creating new effective detectors but for understanding the dependence between structural features of crystalline systems and their radioluminescence properties.

*Corresponding author. Tel.: +380-572-30-70-52; fax: +380-572-320-273.
E-mail address: galunov@isc.kharkov.com (N.Z. Galunov).

0022-2313/03/$ - see front matter © 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved.
doi:10.1016/S0022-2313(02)00579-3

2. Theory

The radioluminescence of organic molecular systems is the luminescence of molecules excited in the recombination process of charge states arising under the action of ionizing radiation. In such systems intermolecular and intramolecular energies have orders of magnitude 10^{-3} and 10^{0} eV, respectively. A charge states generation results in an increase of intermolecular interaction energy up to 10^{-1} eV. That, in turn, causes a redistribution of Coulombian forces in a vicinity of such a centre and changes conditions of the excitation energy transfer in the system. Therewith, dynamical traps formation becomes possible due to the medium polarization by a charge carrier and its "self-localization" caused by its interaction with polarization environment [2].

In our previous papers [3,4], it has been shown that in contrast to the photoluminescence process features of generation, migration and recombination of dynamic charge states of polarization origin cause the radioluminescence process [1]. For description of a scintillation pulse shape of organic systems it is necessary to take into account duration of the processes preceding an excitation of the lowest singlet excited states S_1. An influence of these processes causes the additional delay of the moments of radioluminescence photon emission for organic molecular solids. It has been shown that the Gaussian form of function describing this delay is due to a plurality of acts of generation and recombination of charge states, i.e. the processes result in excitation of organic solids molecules [5].

So, in contrast with the photoluminescence process of organic solids where a pulse shape is described by Forster–Galanin kinetics (for the case of δ-excitation) [6] a form of a radioluminescence pulse fast component for solid scintillators is described as

$$i(t) = f_G(t) * \exp(-t/\tau) \equiv \int_0^t f_G(t-x)\exp(-x/\tau)\,dx. \quad (1)$$

In Eq. (1)

$$f_G(t) = \{\text{const}/\sqrt{2\pi}\sigma\}\{\exp[-(t-\Delta)^2/2\sigma^2]\}, \quad (2)$$

where t is the time after an excitation τ is a decay time constant σ is a time constant, $\Delta \cong 3\sigma$. Function $f_G(t)$ (Eq. (2)) describes the additional delay of the times radioluminescence photon emission.

3. Experimental

In this part we give short information about our technique of organic polycrystals creation and the main methods used for investigation of their luminescent characteristics.

The pressing technique of our design was used to obtain organic polycrystals [7]. We have obtained initial fine-grained powders by cryogenic grinding of single crystals grown from a melt. Then we have realized single-axial pressing (100–800 MPa) these powders in a not deformed mould at the room temperature. Number of polycrystals we have recrystallized by an annealing at the melting temperature and hydrostatic compression of 10–20 MPa. Using this technology we obtained *p*-terphenyl polycrystals with 1,4-diphenylbutadiene molecules as luminescent addition agents, stilbene polycrystals.

We have used the delayed coincidence method, recently often referred as the single-photon technique [1] to investigate a form of the radioluminescence pulse fast component. The measurements were carried out on the set-up with subnanosecond resolution. The main principles of an application of the single-photon counting technique for precise studying of radioluminescence pulse of organic systems have been considered in the previous papers (see Ref. [8], for example). To assure the time reference in the start channel we used the Cherenkov radiator (CR). Variously shaped radiators are used depending on light collection geometry, but in all cases the limiting calculated difference in optical paths of Cherenkov emission photons recorded in the start channel does not exceed 4 mm, corresponding to the delay no more than 20 ps. For these measurements the radionuclide source $^{90}Sr + ^{90}Y$ (electrons with the limiting energy 2.2 MeV) and photomultiplier tubes (PMT) FEU-36 with were used. To investigate thin samples (1–2 mm) of *p*-terphenyl polycrystals we

have used the set-up with a special construction of it optical part [8]. Fig. 1 shows the block diagram of the optical scheme of the set-up for measurement of radioluminescence kinetics parameters of thin scintillators. Start signal is generated when a particle losses a part of energy in the CR. Stop signal is formed when the scintillation pulse from a sample Sm is registered. The diaphragm D is used to attenuate scintillation pulse intensity down to the conditions of the single photon detection. In this construction, the sample thickness is to be chosen so that the energy of particles passed through it would be sufficient to excite the Cherenkov emission in the CR. The latter has a shape of a cylinder where one of butts goes into a polished truncated cone shaped light guide. The cylindrical part of the CR is matted and provided with a light absorbing coating (black paint).

For spectral measurements of thin *p*-terphenyl single and polycrystals we have used PMT FEU-18 with maximum spectral response in the wavelength range 510–530 nm. Excitation wavelength is 365 nm.

For the method of light yield measurements we used radionuclide sources ^{241}Am (α-particles with the energy $E_\alpha = 5.486$ MeV) and ^{137}Cs (conversion electrons with the energy $E_\beta = 0.622$ MeV). Two types of PMT were used to detect the scintillation pulses, i.e. 9208 (Electron Tubes Inc., England) and FEU-173-1 (plant "Electron", St. Petersburg, Russia).

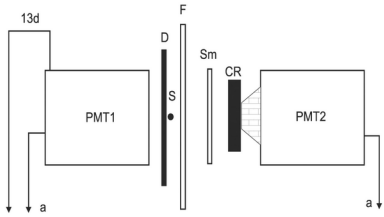


Fig. 1. The block diagram of the optical scheme of the set-up for measurement of radioluminescence kinetics parameters of thin scintillators: Sm is a sample; S is the source of radiation (^{90}Y + ^{90}Sr); CR is the Cherenkov radiator; F is an optical filter; D is a diaphragm; PMT1 and PMT2 are photomultiplier tubes in "stop" and "start" channels of the set-up, correspondingly; a is an anode output of photomultiplier tubes; 13d is a signal from the 13th dynode of PMT1 (only for FEU-36 (Russia)).

4. Results and discussion

We investigated scintillation characteristics for detectors on a base of organic polycrystals of *p*-terphenyl and stilbene. Table 1 shows the values of light yield J for the organic detectors on a base of *p*-terphenyl organic single crystal and *p*-terphenyl polycrystal which contain 0.1% of diphenylbutadiene molecules as luminescent addition agents, as well as for the detector on a base of stilbene polycrystal. Measurements were carried both for the case of α-excitation (J_α-values) and for excitation by conversion electrons (J_β-values). We used the detector on a base *p*-terphenyl organic single crystal as the reference one. To compare the experimental data the values J_α and J_β obtained for this single crystal were taken as a unit. According to Table 1, the values J_α and J_β are very close for the detector on a base of *p*-terphenyl single crystal and for the detector on a base of *p*-terphenyl polycrystal.

Fig. 2 demonstrates the radioluminescence pulse shape for stilbene polycrystal (∅40 × 3 mm) irradiated by β-particles from the radionuclide source ^{90}Sr + ^{90}Y. The additional delay of the moments of photon emission is observed. The form of radioluminescence pulse fast component is described well in the form (1) with $f_G(t)$ (Eq. (2)). Evaluated values for decay time constant τ (Eq. (1))—3.3 ns, time constant σ (Eq. (2))—0.4 ns.

Luminescent characteristics of thin (∼ 1 mm) *p*-terphenyl organic polycrystals containing diphenylbutadiene molecules as the guest ones were as

Table 1
Values of light yield J for detectors on a base of organic polycrystals for the cases of α-excitation (J_α) and excitation by conversion electrons (J_β)

Scintillation base	Detector sizes (mm)	J_α (a.u.)	J_β (a.u.)
p-terphenyl single crystal	∅40 × 14	1.00	1.00
p-terphenyl polycrystal	∅40 × 3	1.00	0.96
Stilbene polycrystal	∅40 × 3	0.33	0.54

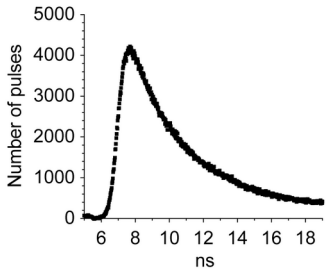


Fig. 2. The radioluminescence pulse shape of stilbene polycrystal irradiated by β-particles from the $^{90}Sr+^{90}Y$ source. Evaluated values are the following: for decay time constant τ—3.3 ns, time constant σ—0.4 ns.

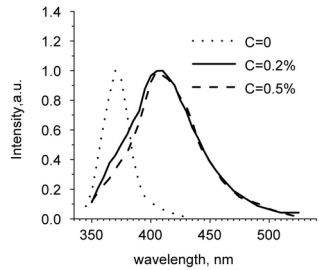


Fig. 3. The luminescence spectra of thin *p*-terphenyl polycrystals. Excitation wavelength is 365 nm.

Table 2
The values λ_{max}, J_α, J_β, and τ for thin *p*-terphenyl organic polycrystals for different concentrations *C* of the diphenylbutadiene molecules

C (%)	λ_{max} (nm)	J_α (a.u.)	J_β (a.u.)	τ (ns)
0	370	0.68	1.14	2.10
0.014	395	0.74	1.15	1.60
0.07	405	0.62	1.14	1.82
0.085	405	0.80	1.20	1.84
0.1	405	0.94	1.28	2.15
0.2	410	0.80	1.21	2.42
0.3	410	0.92	1.24	2.51
0.4	410	0.74	1.20	2.09
0.5	405	0.59	1.09	2.01

well studied. The concentration *C* of diphenylbutadiene molecules in samples was varied from 0 (pure polycrystal) to 0.5% (see Table 2). As the reference scintillator we used thin (1 mm) *p*-terphenyl organic single crystal with the concentration of diphenylbutadiene molecules $C = 0.1\%$.

Fig. 3 presents the photoluminescence spectra for several thin *p*-terphenyl polycrystals excited by light with wavelength $\lambda = 365$ nm. The values of λ_{max} corresponding to maximum intensities of spectra are in Table 2. According to Table 2 the largest values of λ_{max} is observed for the concentrations *C* of diphenylbutadiene molecules in range of 0.2–0.3%. Further increasing of the concentration *C* did not result in increase of λ_{max}. So, this range of diphenylbutadiene concentration corresponds to the most effective electron excitation energy transfer from the host molecules (*p*-terphenyl) to the guest ones (diphenylbutadiene).

To confirm the above-mentioned result we carried out the radioluminescent measurements for these series of thin *p*-terphenyl polycrystals. It should be noted that the comparison of the results of spectral measurements with the results of radioluminescence ones is physically grounded, because the photoluminescence as well as radioluminescence results in the emission of photons of S_1-excited molecules [1].

We carried out the measurements of amplitude spectra selected *p*-terphenyl organic polycrystals both for α-excitation (radionuclide ^{241}Am) and for excitation by conversion electrons (radionuclide ^{137}Cs). Using the results of the measurements we calculated the values of relative light yield *J*. Table 2 as well presents the values of relative light yield J_α and J_β for the cases of α-excitation and excitation by conversion electrons, correspondingly. The highest values of a relative light yield correspond to the range of diphenylbutadiene concentration 0.1–0.3%. For low concentrations ($<0.1\%$) of the guest molecules inefficient electron excitation energy transfer from the host molecules (*p*-terphenyl) to the guest ones (diphenylbutadiene) takes place, and for high concentrations ($>0.3\%$) of the guest molecules a concentration quenching of a luminescence is observed. The

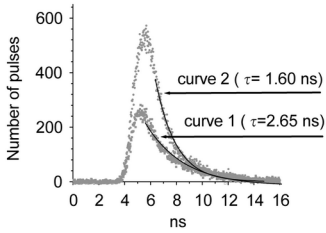


Fig. 4. The radioluminescence pulse shapes and their decay exponential approximations for the reference scintillator (curve 1) and for thin *p*-terphenyl polycrystal containing 0.014% of diphenylbutadiene molecules (curve 2) irradiated by β-particles from the source $^{90}Sr+^{90}Y$.

influence of a transparency of scintillators on results of measurements explains lower relative light yield J for α-excitation, than for β-excitation ($J_\alpha < J_\beta$).

For all thin polycrystals we investigated a form of the radioluminescence pulse shape fast component. Fig. 4 shows as an example the radioluminescence kinetics curves for the reference crystal (curve 1) and for thin *p*-terphenyl polycrystal containing 0.014% of diphenylbutadiene (see Table 2). For all thin organic polycrystals the additional delay of the moments of photon emission was observed and its radioluminescence pulse shape was described in the form (1) with $f_G(t)$ (Eq. (2)). Table 2 shows the τ-values for polycrystals, which are obtained by experimental data processing. The value τ for the reference scintillator is equal to 2.65 ns. The dependence between decay time constant τ and the concentration C of the guest molecules in *p*-terphenyl polycrystals correlates with experimental data of light yield measurements (see Table 2). A small reduction of decay time constant τ for polycrystals in comparison with single crystals can be explained by an increase of number of deep traps for charge carriers and excitons, which have arisen on boundaries of mosaic blocks of polycrystals.

5. Conclusion

Results of spectral and scintillation measurements of new class of organic objects—organic polycrystals obtained by the pressing technique have been discussed. They testify to an availability of an application of these systems in modern scintillation engineering, ecology and medicine.

The analysis of spectral data and radioluminescence pulse shape parameters for thin organic polycrystals of *p*-terphenyl shows that the structural features of organic donor-acceptor system determine electron excitation energy transfer efficiency, and therefore, luminescent properties of the systems discussed. The fact that scintillation parameters of polycrystals are close to single crystals ones testifies that our technology allows creating samples of polycrystals with small concentration of grain boundaries.

Acknowledgements

The Science and Technology Centre in Ukraine supported this work by grant No. 1733.

References

[1] N.Z. Galunov, V.P. Seminozhenko, Theory and Practice of the Radioluminescence of Organic Condensed Media, Naukova Dumka, Kiev, 1997, 280pp (in Russian).
[2] E.A. Silinsh, V. Capek, Organic Molecular Crystals. Interaction, Localization and Transport Phenomena, American Institute of Physics, New York, 1994, 402pp.
[3] S.V. Budakovsky, B.V. Grinev, O.A. Tarasenko, D.V. Vasil'ev, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 324 (1998) 145.
[4] S.V. Budakovsky, N.Z. Galunov, A.M. Stepanenko, O.A. Tarasenko, Funct. Mater. 6 (1999) 772.
[5] A. Stepanenko, O. Tarasenko, N. Galunova, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 361 (2001) 299.
[6] V.M. Agranovich, M.D. Galanin, Excitation Energy Transfer in Condensed Media, North-Holland, Amsterdam, 1982, pp. 6–13.
[7] S.V. Budakovsky, N.Z. Galunov, V.P. Seminozhenko, in: Book of Lecture Notes of the First International School on Crystal Growth Technology, Beatenberg, Switzerland, 1998, p. 777.
[8] N.Z. Galunov, O.A. Tarasenko, V.V. Yarychkin, D.V. Vasilyev, Funct. Mater. 5 (1998) 117.

New Effective Organic Scintillators for Fast Neutron and Short-Range Radiation Detection

Sergey V. Budakovsky, Nikolai Z. Galunov, *Member, IEEE*, Natalya L. Karavaeva, Jong Kyung Kim, Yong Kyun Kim, Oleg A. Tarasenko, and Eugenia V. Martynenko

***Abstract*—This paper describes the techniques used for making new organic scintillators and detectors based on these scintillators. Research has focused on designing large dimension organic scintillators to increase the efficiency of detecting ionizing radiation. The techniques described here have allowed us to produce 1) organic crystals of stilbene and p-terphenyl with diameters up to 120 mm and heights up to 100 mm; 2) p-terphenyl polycrystals doped with diphenylbutadiene molecules, as well stilbene polycrystals up to 250 mm in diameter and 5 mm in height; 3) the first prototypes of a composite scintillation material based on stilbene grains added to a silicone glue base, achieving a high efficiency of fast neutron detection.**

***Index Terms*—Alpha-particle detectors, beta-ray detectors, crystals, neutron detectors, scintillators.**

I. Introduction

ORGANIC scintillation materials find increasing application in nuclear physics, radioecology, radiobiology, geology, and other sciences. Organic materials are characterized by a negligible back scattering when detecting charged particles, due to their low effective atomic number. Hydrogen bearing materials give the best results in fast neutron spectroscopy. A fast neutron produces recoil protons in such organic materials with its highest energy equal to the energy of this neutron. Therefore, organic scintillators and detectors based on these scintillators are the most effective for detecting short-range (α- and β-particles) ionizing radiation, as well as for spectrometry of fast neutrons.

The value expressing the long-term risk (primarily cancer and leukaemia) of low-level chronic exposure is the radiation-weighting factor w_R. For photons of γ- radiation $w_R = 1$, but for fast neutrons with energies $E_n \leq 2\,\mathrm{MeV}$ as well as for alpha particle irradiation it rises to 20 [1]. Detectors based on organic scintillators are the most effective for detecting ionizing radiation which is the most hazardous to humans. The scintillation detector must allow the discrimination of signals from neutrons and background radiation, and has to have a high efficiency of detection of low-energy fast neutrons, similar to the detection of neutrons emitted by fission materials (where the main part of the spectrum is below 2 MeV). The main problem of such applications can be the very low flux of radiation detected. This means that such a detector can be thin, but must have a large diameter to increase the solid angle of detection.

From the 1950s onwards, organic single crystals, liquids, and plastics were investigated as scintillator materials due to their good luminescent characteristics [2], [3]. The theory of photoluminescence of organic condensed media was formulated in this period, and dozens of substances were identified as good organic luminescent materials [3]–[6]. Unary, binary, and ternary solutions (solid and liquid) of organic luminescent molecules were studied (see the review of data in [3]). While these molecular scintillation materials belong to different classes of organic substances, all of them are aromatic hydrocarbons consisting of condensed or bonded systems of benzene rings [2]. In the seventies and eighties it became clear that it was not sufficient just to have some solution with good photoluminescence characteristic in order to obtain a high quality scintillator. Research into the scintillation mechanism showed that in contrast to photoluminescence it was radioluminescence which characterized the first step of excitation. This step can be more important than the processes of electronic excitation energy transfer in the system [7]–[10]. In addition, for real practical applications, cheap scintillators of large volume were necessary which would allow the electronics to separate signals from detected and background radiation. Therefore the number of types of scintillators which have proven practical applications is not so large. A review of this situation and a comparison of the properties of all types of organic scintillators which have been officially produced in USA, Europe and former Soviet Union are found in [10]. In the context of this paper it should be stated that plastic scintillators do not allow pulse shape discrimination, while liquid scintillators are not always easy to use for field measurements. Organic single crystals have the best spectrometry characteristics and light yield in comparison with plastics and liquids, but they are more expensive and their diameters were not larger than 60–80 mm. Some types, such as anthracene, are strongly anisotropic. In the nineties it became clear that for practical applications, the only organic single crystals which could be produced and used as scintillators were stilbene and p-terphenyl activated by diphenylbutadiene [10]. Nevertheless even for these crystals, which show superior properties to other organic crystals, structural perfection as well as their diameter (which plays the role of "input window" for thin crystals) were still limited by the physical process of their growth [11]–[13].

Manuscript received November 14, 2006; revised August 3, 2007.

S. V. Budakovsky, N. Z. Galunov, N. L. Karavaeva, O. A. Tarasenko, and E. V. Martynenko are with the Institute for Scintillation Materials of National Academy of Science of Ukraine, 61001 Kharkiv, Ukraine (e-mail: budakovsky@isc.kharkov.com; galunov@isc.kharkov.com; pogorelova@isc.kharkov.com; tarasenko@isc.kharkov.com; evgenia_martynenko@isc.kharkov.com).

J. K. Kim and Y. K. Kim are with the Innovative Technology Center for Radiation Safety Hanyang University, 133-791 Seoul, Korea (e-mail: jkkim1@hanyang.ac.kr; ykkim4@hanyang.ac.kr).

Digital Object Identifier 10.1109/TNS.2007.910423

0018-9499/$25.00 © 2007 IEEE

Improvement of growing technologies has allowed us to produce organic single crystals with a controlled structural perfection, diameters up to 120 mm, and thickness of 100 mm; the light yields in these new crystals are 1.4 times that of similar organic crystals produced by standard technology [11], [12]. Nevertheless, crystalline organic scintillators with a greater detection area are still required for special applications. Therefore, we designed and produced the next generation of organic scintillation materials, i.e., organic polycrystals obtained from finely ground perfect single crystals by pressing. The main idea of this approach is the following. The size of grains obtained by grinding a single crystal must have dimensions large enough to detect short-range particles or recoil nuclei. A set of grading sieves allows the selection of the fraction of grains of necessary size L, which has to be comparable with, or be larger than, the range of the ionizing particle. Polycrystals obtained in this way must have a good light collection in order to obtain an appreciable scintillation signal. A solid state recrystallization can accompany this process [13].

We also have used this concept to design another novel type of large area, organic, fast neutron detector. They are made by grinding stilbene or p-terphenyl crystal to different grain size fractions. These fractions are added to an optically transparent polymer base. Such a composite scintillator was encapsulated in a housing made from organic glass to improve the light collection and to raise the efficiency of fast neutron detection. This detector can be used for the detection of fast neutrons in facilities for environmental radiation control, for security purposes (i.e., to prevent the forbidden entry of fission materials), for physical experiments, and in other branches of science and technology.

This work is not aimed at increasing the number of different organic scintillators. The main object of this paper is to present a new approach to the technology by which single crystals with controlled structural perfection are made, and which can form the basis for designing new types of organic scintillators.

II. New Process Technologies

A. Organic Single Crystals

The main differences between our technique and traditional ones are the following [13]. Organic single crystals are grown from a melt doped with electron-seeking addition agents (ESAA). This allows the production of the charge-transfer complex-like structures which consist of a melt molecule and a molecule of ESAA. The electrostatic field of such a complex initiates polarization of adjacent molecules, and forms orientated parts in the melt. These orientated parts promote the formation of crystallization centres in the growing crystal layer, which predetermines the process of crystal growth [12]. Doping the melt with different amounts of ESAA molecules allows us to control the structural perfection of the grown single crystals. It results in a change of root-mean-square random orientation σ of the single crystal mosaic structure, and therefore the concentration of deep traps for charge carriers and excitons [11]. The single crystal with the smallest value of σ is considered to be the most structurally perfect. Annealing increased the intensity of the radioluminescence by only 10%, while for structurally perfect single crystals it was 40–50% higher [10].

B. Organic Polycrystals

These are hot-pressed or cold-pressed polycrystals based on stilbene (or p- terphenyl) grains. These grains were obtained by grinding a single crystal with high structural perfection at a low temperature with subsequent steps of separation through sieves. In this work we chose three grain size ranges with the following L-values, L 0.5 to 1 mm, L 1 to 2 mm, and L more than 2 mm. Three standard, calibrated sieves were used, with holes 0.5 mm, 1 mm, and 2 mm in diameter. The grains separated in this way with different values of L were used to provide the test samples.

The cold-pressed polycrystals were obtained by single-axial pressing (100 to 800 MPa) of the single crystal powders in a rigid mould at the room temperature. The hot-pressed polycrystals were obtained by annealing recrystallization at the melting temperature and hydrostatic pressure of 10 to 20 MPa. So, in the latter case, solid state recrystallization is an additional step in the preparation of the crystal [12], [13].

C. Composite Organic Materials

To prepare a composite material to be used in a detector of fast neutrons it is firstly necessary to obtain crystal grains by grinding a single crystal. Then we have to prepare a silicone matrix (which is a glue composition) and to add selected grains of the crystal powder to the matrix. The final stage includes the introduction of the composite into a light-guiding housing, a vacuum treatment and hermetic sealing of the scintillation detector. The crystal grains in this composite are separated by glue and so the step of improving the structural perfection characteristics is not needed for the composite system. For composite scintillators it is important to choose the correct glue base and to understand the optimal concentration and dimensions of crystal grains inside this base.

To choose the best base for composite scintillators we studied optical and physical-chemical characteristics of a range of silicone composite materials including "silicone rubber for medical purposes" (SKTN-med, St. Petersburg, Russia), Sylgard-186, Sylgard-527 (Dow Corning Corporation, USA), optical thixotropic silicone lubricants, and optically transparent adhesives. Our results show that scintillation efficiency is the best for scintillators with a grain size fraction from 1 to 2 mm and Sylgard-527 (on the basis of silicone). Thus, the scintillators based on Sylgard-527 are the best in respect of their refractive index and scintillation efficiency [14].

III. Experimental Techniques

We used $^{252}\mathrm{Cf}$ and $^{239}\mathrm{Pu\text{-}Be}$ radionuclide sources for both fast neutrons and of photons of γ-radiation, a $^{239}\mathrm{Pu}$ source for α-particles and photons of γ-radiation, as well as $^{137}\mathrm{Cs}$, $^{22}\mathrm{Na}$, $^{60}\mathrm{Co}$, and $^{152}\mathrm{Eu}$ radionuclide sources of γ-radiation for light yield and amplitude spectra measurements.

We used a special set-up of our own design to separate the neutron and background γ-radiation scintillations [15]. It determines the difference in shape and intensity of slow components of scintillation pulses of organic crystals for the case of excitation with different specific energy loses dE/dx. With dE/dx growth the yield of the slow component of the scintillation pulse increases. The signal from the anode of the photo-

TABLE I
MAIN PROPERTIES OF DETECTORS BASED ON ORGANIC SINGLE CRYSTALS

Scintillation material	Scintillator dimensions, mm		Working temperature, K [16]	Light yield, photons/ MeV	Energy resolution, %
	Diameter	Height			
Doped *p*-terphenyl	10 to 120	1 to 100	160 to 385	$2.8 \cdot 10^4$	< 10
Stilbene	10 to 120	1 to 100	180 to 350	$1.4 \cdot 10^4$	< 10

multiplier is transmitted to the electronics that generates the digital control pulses on "neutron" or "gamma" output. A charge sensitive pre-amplifier and amplifier form the signal from the next-to-last dynode of a photomultiplier for amplitude analysis. This instrument may work in measurements with separation of combined spectra of α- and β-scintillations, or α- and γ-scintillations, using the same principle of the discrimination analysis. The shape of the scintillation pulses was studied by the delayed coincidence method (the single-photon technique). We used a set-up of our own design with sub-nanosecond time resolution [10].

IV. MAIN RESULTS AND DISCUSSION

A. Detection of Short-Range Radiations

Table I presents the main characteristics of organic single crystals obtained by the technology described above, and shows the averaged value of light yield and energy resolution. The spread in the values obtained for different samples was not higher than 10%. The results of measurements obtained in [16] allow us to extrapolate the average value of light yield obtained for room temperature to the temperature ranges given in Table I. Such an approach is based on the following.

In [16] the relative light output versus temperature was measured for some scintillators used in geological applications. The results obtained agreed with the concept of molecular-lattice polaron formation in organic crystals that had been previously proposed (see e.g., [17], [18]). It means that charge states whose recombination results in molecular excitation, followed by the irradiation of radioluminescent photons, can bear the marks of the lattice and molecular polaron at the same time. The mobility (and therefore the number of recombinations during a given interval of time) of molecular and lattice polarons with temperature growth decreases and increases, respectively, due to the different nature of their mobility in organic dielectrics [17]. Developments in the theory of molecular-lattice polaron in combination with computer simulations enabled Silinsh and colleagues to show that for the formation of molecular-lattice polarons in organic crystalline systems, mobility versus temperature dependence for molecular and lattice polarons can equalize each other across a given temperature interval. That was clearly proved using naphthalene crystals as an example. It means that for some temperature regions a weak dependence of light yield against temperature can be expected [18].

These measurements [16] showed that in contrast to other temperature ranges, an extremely week dependence of light yield against T was observed in the temperature ranges between

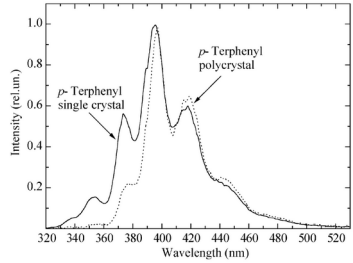


Fig. 1. Normalized luminescence spectra of a doped p-terphenyl single crystal and a doped cold-pressed polycrystal with fraction size $L \sim 0.5$ to 1 mm). Samples contain 0.1% of diphenylbutadiene. Excitation wavelength is 270 nm.

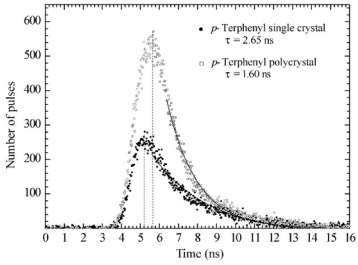


Fig. 2. Radioluminescence pulse shapes and their decay exponential approximations for p-terphenyl single crystal (decay time $\tau = 2.65$ ns) and for p-terphenyl polycrystal ($\tau = 1.60$ ns) irradiated by β-particles from a $^{90}\mathrm{Sr} + ^{90}\mathrm{Y}$ source. Samples contain 0.1% of diphenylbutadiene.

$-95°\mathrm{C}$ and $+75°\mathrm{C}$ for stilbene single crystals and between $-115°\mathrm{C}$ and $+110°\mathrm{C}$ for p-terphenyl single crystals. The slope of this dependence is about $10^{-4}\ °\mathrm{C}^{-1}$ which was comparable with the light yield measurement error [16].

Fig. 1 shows photoluminescence spectra for a reference single crystal and for a cold-pressed p-terphenyl polycrystal. A difference in luminescence spectra from the single crystal was observed compared to the cold-pressed polycrystal. Photoluminescence spectra for a reference single crystal and for a hot-pressed p-terphenyl polycrystal were practically the same. The spectra (see Fig. 1) show that cold-pressed polycrystals produce changes typical for imperfect structural systems [10], [11]. Radioluminescence and photoluminescence spectra for the same object were identical. Analogous results were obtained for stilbene based systems.

Fig. 2 shows the results of pulse shape measurements for a thin (about 1 mm thick) single crystal and polycrystal of p-terphenyl. One can see the typical effects of increasing the rise time of the pulse and of decreasing the decay time for the polycrystalline scintillator in comparison with reference single crystal.

TABLE II
RELATIVE LIGHT YIELD C OF A SERIES OF Ø30 MM × 5 MM COLD-PRESSED AND HOT-PRESSED STILBENE POLYCRYSTALS

Type of pressing	L, mm	C, %	
		0.622 MeV conversion electrons	5.15 MeV α-particles
Cold	0.5 to 1	60	21.5
Cold	1 to 2	99	30.5
Cold	> 2	97	21
Hot	0.5 to 1	102	104
Hot	1 to 2	117	126
Hot	> 2	115	122

Using the results of amplitude spectra measurements we calculated values of relative light yield C for a series of Ø30 mm × 5 mm cold- and hot-pressed stilbene polycrystals. Table II summarizes the results of the measurements both for the case of irradiation by 0.622 MeV conversion electrons from $^{137}\mathrm{Cs}$, and for the case of 5.15 MeV α-particles from $^{239}\mathrm{Pu}$. In both cases values of the light yield of the reference Ø50 mm × 5 mm stilbene single crystal was taken as 100%. The light yield of the reference calibrated stilbene single crystal was low (1.2×10^4 photons per MeV), and therefore some values in Table II exceed 100%. For both hot-pressed and cold pressed polycrystals, the best results were obtained when the samples were made from grains with L values in the range 1 mm to 2 mm. The hot-pressed polycrystals have better parameters than cold-pressed polycrystals. Table II shows a big difference in C-values between hot-pressed and cold-pressed polycrystals for the case of α-excitation as well as for the case of β-excitation. The range of the 0.622 MeV electron paths can be estimated as 1.75 mm, and the length of alpha particle track as 0.03 mm only [10]. It means that the influence of scintillation light path through a scintillator is more important for the case of α-excitation than for β-excitation. Therefore the hot-pressed polycrystals must have an efficiency close to the single crystal and have to be more transparent for the emitted light. For cold-pressed polycrystals both of the characteristics mentioned above are worse.

The above results can be explained as follows. As is shown in [10], [18], [19], the properties of organic scintillators change when going from a single crystal to a polycrystal (i.e., with the degradation of structural perfection of a crystal caused by increasing the root-mean-square random orientation of the crystal mosaic structure σ [18]) in the following way. With the σ-value increase, the concentration of deep traps of singlet excitons and charge states grows. The same structural trap is always a trap, both for charge carriers and for excitons. The equivalent energies of such trap depths are different (about 1 eV and 0.24 eV for charge states and for singlet excitons respectively [11], [19]). These deep traps arise at grain boundaries where structural defects such as aggregations of dislocations and ensembles of dislocations are formed in an organic crystal [17]. The capture of some charge carriers (generated by a primary particle) by deep traps should cause a certain decrease both of the radioluminescence light yield and the fast component decay time constant. For organic molecular systems, deep traps of structural origin are usually accompanied by a system of shallow traps [17], [18]. It results in an increase in the rise time of the scintillation pulse (see Fig. 2). So, for a molecular crystal the σ-value increase results in changes in the radioluminescence spectrum, light yield values and time parameters of a pulse shape. To improve the characteristics of a scintillator it is necessary to improve its structural perfection. This can be done by solid recrystallization, which is achieved with hot-pressed polycrystals.

B. Detection of Fast Neutrons and Photons of Gamma-Radiation

Measurement of the characteristics of gamma scintillations is very important because no track forms and in contrast to the case of neutron or alpha excitation, there are no additional specific losses on quenching in track. The light yield is one of the main characteristics of scintillation detectors. One should differentiate the absolute light yield (scintillation efficiency) from the technical light yield (see review of measuring methods in [20]). Absolute light yield is the ratio of total energy of scintillation photons to energy deposited by ionizing radiation in the scintillator. Technical light yield is the ratio of total energy of scintillation photons passing through the window of the detector, to energy, deposited by ionizing radiation in the scintillator. Absolute light yield is characterized by the number of photons in scintillation per 1 MeV energy radiation absorbed by scintillator, while technical light yield by the number of photons passing through the window of the detector for the same energy. Standard practice usually includes measurement of light output based on the ratio of the amplitude of signals from tested and reference detectors. Detectors based on NaI(Tl), anthracene or stilbene are used as reference detectors [2], [10], [20]. In this work we used a reference single crystal of stilbene, whose absolute light yield was measured by a "method based on the measuring of intrinsic resolution of the photomultiplier" [20]. It is equal to 1.2×10^4 photons per MeV. The measurements of the relative light yield made for excitation from a $^{137}\mathrm{Cs}$ radionuclide source allows us obtain the value of absolute light yield for other scintillators. Calibration of the linearity of the set-up using real scintillators was done using the Compton edge energies of the gamma lines for the following radionuclide sources $^{137}\mathrm{Cs}$, $^{22}\mathrm{Na}$, $^{60}\mathrm{Co}$, $^{152}\mathrm{Eu}$, as well from the $^{12}\mathrm{C}(\mathrm{n},\gamma)$ reaction in a Pu-Be radionuclide source. The light output of the scintillators relative to gamma energy was linear within 5%.

These measurements mean it is possible to calibrate the energy scale of the measuring set-up in photons using a real scintillator. Previous measurements give the light yield for a measuring scintillator that was excited by $^{137}\mathrm{Cs}$. We also know the positions of Compton edges for the rest of the energies. The energy scale is linear. If we change nothing except the type of excitation then the signal in a given energy channel will appear only if the same number of photons will be irradiated by the scintillator, irrespective of the type of excitation. So, the calibration of the energy scale in terms of number of scintillation photons per channel obtained for gamma excitation is valid for neutron excitation if we do not change the mode of operation of the set-up, and do not change the scintillator.

In materials which contain high concentrations of hydrogen the energy spectrum of recoil protons must be like a set of

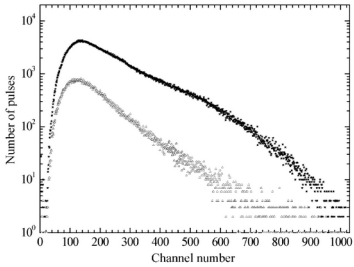


Fig. 3. Recoil proton spectra of ^{239}Pu-Be (stars) and ^{252}Cf (open triangles) sources for an Ø50 mm × 5 mm reference stilbene single crystal.

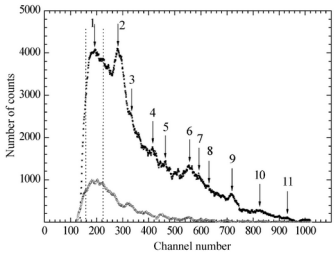


Fig. 4. Neutron spectra reconstructed from the recoil proton spectra (see Fig. 3 of ^{239}Pu-Be (stars) and ^{252}Cf (open triangles) sources for an Ø50 mm × 5 mm reference stilbene single crystal.

"steps", each of which forms by neutrons with energy E_n [2], [21], [22] due to the mechanism of recoil proton generation. During the neutron measurements the pulse shape discrimination electronics (which is described in [15]) selects neutron signals and prevents detection of gamma scintillations. Therefore the proton recoil spectrum is measured (see Fig. 3).

It can be shown [22], [23] that for such a "stepped" recoil proton spectrum of the energies $E_p \leq E_n$, numerical differentiation results in a neutron spectrum of energies E_n being obtained. It can be done using (1) or more complicated expressions.

$$\varphi(E_n) = -\frac{E_n}{\varepsilon(E_n)} \times \left.\frac{du(E_p)}{dE_p}\right|_{E_p=E_n}. \quad (1)$$

where $u(E_p)$ is a recoil proton spectrum (measured for $E_p \leq E_n$), and $\varepsilon(E_n)$ is the efficiency of detection for different energy neutrons.

Fig. 4 shows the results of a reconstruction of neutron spectra from recoil proton spectra (Fig. 3) using (1). In this approach (based on (1)) we have to use sources with known energies E_n in order to be able to identify the energy of peaks on reconstructed neutron spectra (see [23]). It means we can study the properties of a scintillator as a detector of fast neutrons without any additional assumptions about the mechanism of energy losses inside the proton track.

In practical applications it is necessary to define the energy spectra of unknown neutron sources, and therefore more complicated expressions than (1) are necessary [22]. To obtain such an expression it is necessary to introduce an additional function in (1) that takes into account the non-linearity of the processes in protons tracks. Unfortunately up to now there is no theory coincident with the experiment that explains the processes in particles tracks in organic scintillators. All empirical and semi-empirical expressions used in such formulas for reconstructing neutron spectra do not give satisfactory results. On the right side of (1) there is no term that takes into account the non-linearity of scintillation response to recoil protons and the value $\varphi(E_n)$ holds this information. An approach based on (1) and measurements with a neutron source of known energy spectrum may be the only realistic way of obtaining an experimental basis for testing a model of energy losses in proton tracks in organic scintillators. Using this approach, the expression can be obtained that takes into account the non-linearity of the processes in proton tracks.

For a linear measuring system, the channel number for neutron scintillation energy spectra is proportional to the number of scintillation photons, and therefore for the case under discussion it is not proportional to neutron energy E_n. It means that a source with a known spectrum allows one to identify the neutron energies E_n that correspond to peaks of the $\varphi(E_n)$ spectrum. Attempts to obtain this information for other neutron energies can be made only on the basis of knowledge of the law of such the non-linearity. If the $\varepsilon(E_n)$-value is taken as equal to one when a neutron spectrum is reconstructed according to (1), then the ratio of the number of counts in the peaks of spectra $\varphi(E_n)$ gives the relative efficiencies of a scintillator to detect neutrons of corresponding energies E_n [23].

Peaks 1 to 11 on Fig. 4 correspond to well-known energies of neutrons (0.85, 2.0, 3.1, 4.2, 4.9, 6.4, 6.7, 7.3, 7.9, 8.6 and 9.7 MeV respectively [21], [22], [24]) emitted by a ^{239}Pu-Be source. The lowest energy part in the spectrum is caused by fission of ^{239}Pu by neutrons moderated in a source [22]. To be sure that the energy threshold fits correctly and the measuring device does not cut the lowest energy part of a proton recoil spectrum, measurements with a ^{252}Cf radionuclide source (the source of fission-spectrum neutrons) always accompany experiments with a ^{239}Pu-Be source. In the case of new ^{252}Cf radionuclide source a spectrum of ^{252}Cf radionuclide source is the smooth continuum. Fission products are accumulated in such a source in time. Their spectra can overlay with the main spectrum of the source [22]. Fig. 4 shows the spectrum of ^{252}Cf radionuclide source that was made 30 years ago. In addition numerical differentiation (see (1)) of the scintillation spectra of recoil protons has to give additional statistical fluctuations [23].

For each type of scintillator the highest signal was obtained for L-values 1 to 2 mm. Fig. 5 shows the light yield versus E_n for these values of L, for the hot-pressed and cold-pressed polycrystals, the composite scintillator, and a single crystal. As was mentioned above, the calibration of energy scale in number of scintillation photons per channel obtained from gamma

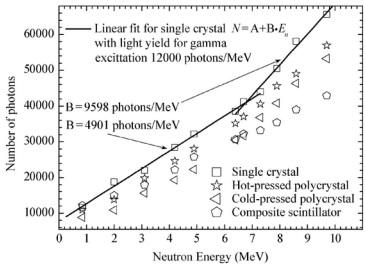


Fig. 5. Scintillation signals versus neutron energy for some organic scintillators. Stilbene fraction of a hot-pressed polycrystal, a cold-pressed polycrystal and a composite scintillator L is from 1 to 2 mm.

excitation is valid for neutron excitation. Using the results of gamma calibration and neutron measurements one can obtain the number of scintillation photons against neutron energy E_n.

Fig. 5 as well shows the formal linear relationship of light yield versus E_n for the stilbene single crystal, made for two different ranges of E_n taken arbitrarily for the range of low and high energy parts of the spectrum. Such a linear relationship only shows the average characteristics of the nonlinear relationship of scintillation signals versus E_n for a chosen energy regions. The difference in slope of these two lines shows the difference in energy losses along a path averaged for these two energy ranges. The non-linearity of the scintillation light yield versus E_n for different energy ranges takes place due to the higher influence of quenching in a track for a low-energy recoil protons than for high-energy ones [19]. These values are considerably lower then the value of light yield for gamma excitation (1.2×10^4 photons per MeV) due to additional energy losses in tracks of protons.

The following results were typical for all the scintillators investigated. The relative scintillation signal amplitudes for the low-energy part of the spectrum were higher for composite scintillators. In this region, the absolute values of scintillation signal were comparable for a composite scintillator with L from 1 to 2 mm and for a single crystal. For $E_n \leq 2$ MeV the highest scintillation amplitudes are from the single crystal. The hot-pressed polycrystals have the best signal after the single crystal and exceed the values for cold-pressed scintillators. For the high-energy part of spectrum the lowest scintillation amplitudes are from composite scintillators.

The results obtained are in good agreement with track formation data for organic scintillators [10], [23], in accordance with which, the scintillation signal in tracks of ionizing particles is mainly formed in the diffusion-controlled annihilation process of triplet exited molecules of a scintillator. For neutrons with high E_n the number of high-energy recoil protons will increase. For composite scintillators it means that the probability of a proton track dividing into separate parts, which are located in more than one scintillation grain in the glue, will grow. The triplet states generated in different scintillation grains will lose the possibility to move to each other through the glue and give a signal [10]. This clearly will lead to a decrease in the efficiency of the exchange mechanism between the molecules in triplet states and therefore a decrease of the scintillation signal. These are the results shown by our experiments (see Fig. 5).

V. Conclusion

New types of organic scintillators for the detection of fast neutrons, alpha-, and beta radiation have been made. The method of production of the polycrystals and composite scintillators means there is no physical limitation on their diameter, but in practise this will be determined by the conditions for scintillation light collection (including the size of a photodetection system), and requirements of use (mechanical load, temperature condition, etc.). These materials are not hygroscopic.

Future research will investigate polycrystal and composite scintillators with other grain size ranges L, as well as the process of track formation in them.

Acknowledgment

The authors would like to thank Mrs. Zelenskaya O.V. for calibrating the absolute light yield of the reference stilbene single crystal.

References

[1] 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP, 1991, vol. 21, Ann. ICRP, Publication 60.

[2] J. B. Birks, *The Theory and Practice of Scintillation Counting*. London, U.K.: Pergamon, 1967, p. 664.

[3] J. B. Birks, *Photophysics of Aromatic Molecules*. New York: Wiley Interscience, 1970, p. 704.

[4] S. I. Vavilov, "The theory of an influence of concentration on the fluorescence of solutions," *Zh.Eksp.Teor.Fiz. (Sov. J. Experiment. . Theoreti. Phys.)*, vol. 13, no. 1, pp. 13–32, 1943.

[5] T. Förster, "Zwischenmolekulare energiewanderung und fluoreszeng," *Ann. Phys.*, vol. 2, no. 2, pp. 55–75, 1948.

[6] M. D. Galanin, "Quenching of solution fluorescence by absorbing substances," *Zh.Eksp.Teor.Fiz. (Sov. J. Experiment. . Theoreti. Phys.)*, vol. 21, no. 2, pp. 126–132, 1951.

[7] T. A. King and R. Voltz, "The time dependence of scintillation intensity of aromatic materials," *Proc. Royal Soc.*, vol. A289, no. 1418, pp. 424–439, 1966.

[8] G. Laustriat, "The luminescence decay of organic scintillators," *Molec. Cryst.*, vol. 4, no. 1, pp. 127–145, 1968.

[9] B. Bengston and M. Moszynski, "Light pulse shapes from plastic scintillators," *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. 142, no. 3, pp. 417–434, 1977.

[10] N. Z. Galunov and V. P. Seminozhenko, *The Theory and Application of the Radioluminescence of Organic Condensed Media* (in Russian). Kiev, Russia: Naukova Dumka, 1997, p. 280.

[11] I. P. Krainov, N. Z. Galunov, and S. V. Budakovsky, "The influence of controlled electron seeking addition agents of the melt on stilbene single crystal structure and radioluminescence properties," *Cryst. Res. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 193–197, 1989.

[12] S. V. Budakovsky, N. Z. Galunov, and V. P. Seminozhenko, "Some new approaches to obtain the organic crystals with high quality," in *Book of Lecture Notes of First International School on Crystal Growth Technology*, Beatenberg, Switzerland, 1998, pp. 777–778.

[13] N. Z. Galunov, "New generation of highly effective organic scintillators and their process technologies," in *Proc. Abstracts Int. Technology Transfer Conf.*, Jun. 1998, pp. 124–125.

[14] M. Schatz, *Silikonový Kaučuk* (in Czech). Praha: SNTL-Nakladatelstvi Technické Literatury, 1975, p. 192.

[15] J. H. Baker, N. Z. Galunov, A. M. Stepanenko, and O. A. Tarasenko, "Some aspects of discrimination techniques for the measurement of neutrons and photons of gamma radiation in geological applications," *Radiat. Meas.*, vol. 38, pp. 817–820, 2004.

[16] J. H. Baker, S. V. Budakovsky, N. Z. Galunov, G. M. Onyshchenko, V. D. Ryzhikov, and O. A. Tarasenko, "A study of the temperature dependence on light yield for some typical scintillators," in *Dielectrics and Semiconductors in Detectors of Radiation*. Kharkov, Russia: Institute for Single Crystals, 2006, pp. 230–241.

[17] E. A. Silinsh and V. Capek, *Organic Molecular Crystals: Interaction, localization, and Transport Phenomena*. New York: American Institute of Physics, 1994, p. 402.

[18] N. Z. Galunov, V. P. Seminozhenko, and A. M. Stepanenko, "Radioluminescence mechanism and charge transport phenomena in organic solids," *Molec. Cryst. Liquid Cryst.*, vol. 355, pp. 479–490, 2001.

[19] S. V. Budakovsky, N. Z. Galunov, and I. P. Krainov, "The properties of molecular crystals growing from the melt containing electron-seeking addition agents," *Molec. Cryst. Liquid Cryst.*, vol. 236, pp. 127–132, 1993.

[20] E. P. Sysoeva, V. A. Tarasov, and O. V. Zelenskaya, "Comparison of the methods for determination of scintillation light yield," *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, vol. 486 A, pp. 67–73, 2002.

[21] M. E. Anderson and R. A. Neff, "Neutron energy spectra of different size $^{239}\mathrm{Pu\text{-}Be}(\alpha,\mathrm{n})$ sources," *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. 99, pp. 231–235, 1972.

[22] I. V. Goryachev, Y. I. Kovalevatov, and L. A. Trykov, *Integral Experiments in the Problem of the Transfer of Ionizing Radiations* (in Russian). Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1985, p. 272.

[23] N. Z. Galunov and E. V. Martynenko, "Ionizing radiation energy exchange in the regions of high activation density of organic scintillators," *Radiat. Meas*, vol. 42, pp. 715–718, 2007.

[24] K. W. Gieger and L. Van der Zwan, "Radioactive neutron source spectra from $^{9}\mathrm{Be}(\alpha,\mathrm{n})$ cross section data," *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. 131, pp. 315–321, 1975.

Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol. 606: pp. 176–188, 2015
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 1542-1406 print/1563-5287 online
DOI: 10.1080/15421406.2014.905051

Effect of Polarization on Recombination of Charge States in an Ionizing Particle Track in Organic Molecular Crystals

NIKOLAI Z. GALUNOV AND OLEG A. TARASENKO*

Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine

The effect of polarization on the energy exchange of charge states in molecular media is studied for the case when no external electric field exists. Measurements of the light yield of organic molecular crystals excited by ionizing radiations are used to verify theoretical hypotheses. This allows us to carry out experiments for a wide range of the initial density of charge states. The polarization process initiates the primary recombination of hot carriers those are generated in the particle track. This reduces the radioluminescence (RL) energy yield of organic molecular crystals with increasing the specific energy loss of an ionizing particle.

Keywords Charge state; energy yield; organic crystal; polarization; radioluminescence

Introduction

Organic molecular crystals, as organic molecular solids in general, have unique optical and electronic properties. Molecules in organic crystals are bonded by the van der Waals forces [1–6]. The energy of these interactions is 10^3 times less than the energy of covalent interactions between atoms in a molecule [2, 4]. Huge quantitative differences in the energies of the lattice interactions in organic molecular and inorganic covalent (ionic) crystals cause qualitative differences in the formation and transport of excess charge carriers. The energy structure of molecular crystals and electronic processes in them are defined both supramolecular and electronic structure of the molecules that make up a crystal. Delocalized and weakly bonded π-electrons of conjugation of the molecules of aromatic hydrocarbons and n-electrons of conjugated heterocyclic compounds are a potential source of the formation of charge carriers under the light, temperature, external field, or ionizing radiation [1–3].

Weak intermolecular forces are responsible for a strong localization of a charge carrier. It moves by incoherent hops in an organic molecular crystal [2]. At high temperatures, charge carriers due to their pronounced localization on individual molecules during their motion have time to interact strongly with the electronic and nuclear subsystems, and, in some cases, with the lattice subsystem of the environment. It causes formation of electronic, molecular, and lattice polarons, respectively. The electronic polaron formation results in

*Address correspondence to Oleg A. Tarasenko, Code: 61001, Institute for Scintillation Materials of NAS of Ukraine, 60 Lenin av., Kharkov, Ukraine. Tel.: +380 57 3410259; Fax: +380 57 3404474. E-mail: tarasenko@isma.kharkov.ua

increase of intermolecular energy to 10^{-1} eV. This energy is by a factor of 10^2 greater than the energy of the van der Waals interactions that hold molecules in a crystal [2, 4].

Organic molecular crystals due to the above-discussed features of their structure and specific electronic properties are widely used as semiconductors, light-emitting diodes, elements of nonlinear optics, and detectors of ionizing radiations [1–7]. Different applications have their own aspects. For example, a powerful external electric field is not used during experiments in the scintillation applications. In this case, the energy exchange of charge states is determined by the internal electric fields occurring between molecules with electron deficiency and excess. Note that the formation of particle tracks can be corresponded to the extreme case of extra-large initial concentrations of charge states. In itself, this is a very interesting scientific problem.

The organic single crystals used as efficient scintillators have a monoclinic structure with close values of parameters of the unit cell, with the densities close to 1.2 g/cm^3, and the similar values of the effective atomic number and effective nuclear charge [8]. The single crystals of anthracene, stilbene, and *p*-terphenyl [4, 7, 9–12] are the most applicable organic scintillation crystals. In the latter case, the single crystals with and without a dopant of 0.1% 1,4-diphenyl-1,3-butadiene in the melt are used [4, 10]. Organic molecular scintillation crystals are often used for detection of the ionizing radiations, which have high specific energy loss (dE/dx) [4, 7].

In this paper we analyze the energy exchange of charge states in the high activation density regions of the quasi-spherical (spurs) and quasi-cylindrical (tracks) symmetry on the hypothesis that the influence of the polarization interactions is of primary importance [13]. It is should be noted that the influence of polarization effects was earlier discussed in the context of the mechanisms of the fast component formation of the radioluminescence (RL) pulse in regions of the low activation density of organic molecular solids and liquids [9, 14–16]. Therefore, the discussion of this material is beyond the scope of this paper.

Theory

Aspects of Charge State Generation in an Organic Molecular Medium

Ionizing radiations generate excess charge carriers in an organic molecular crystal [1]. In this case, a quasi-free electron rapidly localizes on some other molecule and produces a negative quasi-ion M_-. The molecule, which has lost an electron, becomes a positive quasi-ion M_+. A displacement of π-orbitals and positively charged molecules occurs in different directions in the surrounding of the molecular quasi-ion. The polarization surrounding originates including about 10^3 molecules. The electronic polarons M_p^- and M_p^+ are formed around the quasi-ions M_- and M_-, respectively [2]. The energy of the electrostatic field of a quasi-ion E_{pol} that is necessary to create the polarization surrounding is about 1–1.5 eV. The polarization time of the electron orbitals of the molecules of an organic crystal is estimated as $\tau_e \approx 10^{-16}$–10^{-15} s. The electrostatic field of the quasi-ions disappears as the result of a pair recombination of M_+ and M_-. Directly after this, π-orbitals and positively charged skeletons of molecules, which had been polarized by the electrical field of the M_+ and M_- pair, return to equilibrium giving off the vibrational energy. This energy corresponds to the energy, which is spent for their initial displacement during the formation of the polarization surrounding [2, 4]. Besides, the formation of the molecular exciton localized at high temperatures on the molecule, which was a quasi-ion before the recombination, becomes possible. The relation between the probabilities of the

exciton decay with and without the emission of a light photon (the energy E_{ph} is about 3 eV [4]) determines the RL intensity. The ratio of the energy of the emitted light to the energy of an ionizing radiation accumulated in a crystal, determines the energy yield of the scintillation process. This yield can be different for different types of ionizing radiations.

If the distance d between the charge states $M_p{}^+$ and $M_p{}^-$ is less than the value of the radius of the stable polarization surrounding r_c (1), then a pair of molecular polarons forms [2, 4]. The value of r_c is defined as [2]:

$$r_c = \frac{e^2}{4\pi \ \langle\varepsilon\rangle \ \varepsilon_0 \, k \, T}, \tag{1}$$

where $\langle\varepsilon\rangle$ is an average relative permittivity of a crystal, k is the Boltzmann constant, T is a temperature, and ε_0 is the dielectric constant.

The value of the local field strength E_{loc} that created by a pair of charge states $M_p{}^+$ and $M_p{}^-$, localized on different lattice sites, will vary depending on the distance between $M_p{}^+$ and $M_p{}^-$. It is easy to obtain the following estimates using the data [17]. For example, for the single crystal of anthracene the values of E_{loc} created by such a pair are in the range from 1.8×10^6 to 3.2×10^7 V/cm when the distance d changes from r_c to the distance between the nearest neighbor molecules. These values exceed the breakdown voltage of organic crystals [1]. According to [2, 4] in such a case the charge carrier scattering time τ becomes a very small quantity that is less than 10^{-13} s. According to [18], the thermalization time of charge carriers in these systems is by an order of magnitude greater. The strong local electric fields inside such the pair have to increase the probability of the recombination of hot charge states, especially, when no an external electric field is applied [1]. The contribution to the total recombination process of the very fast initial recombination of the hot charge state pairs should increase with their concentration.

During the excitation by an ionizing particle in each a single event of interaction with a medium this particle mainly transmits such a portion of it energy, which exceeds the ionization potential of molecules. The ionizing radiations with low values of dE/dx ($<10^1$ MeV/cm), such as electrons with energies above 100 eV, photons of gamma radiation (that generate secondary electrons in an organic medium) create separate local regions of excitation (spurs). These regions do not overlap. The ionizing radiations with values of $dE/dx \geq 10^1$ MeV/cm (protons, alpha particles, heavy ions) generate the spurs those overlap and form a single region of high activation density, i.e. the particle track [4, 19]. Generation of charge states in the ionizing particle track proceeds through a rapid (10^{-16}–10^{-15} s [4]) initial stage of a decay of superexcited [20] and plasmon states [1, 4, 21–23]. Fano [23] considered organic molecular systems as the most obvious example of systems in which the generation of plasma oscillations was possible. According to the experimental data the average energy of plasmons in organic condensed media is estimated as $\langle E_{pl}\rangle \sim 20$ eV [1, 4, 13, 21, 22].

It is known that the probability of the nonradiative decay of a molecular exciton increases with increasing temperature, while the probability of luminescence decreases [24]. During the simultaneous recombination of j polaron pairs the vibration energy, which is comparable to or lower than the energy of the lowest singlet excited state S_1, should be released. It means that the probability of the nonradiative losses must increase with increasing dE/dx, i.e. with increasing j. As a result, the RL energy yield should decrease with an increase in the j-value. Such a change can be correctly examined by the measurements of the RL light yield.

The Model Representation of Tracks and Spurs as Volumes with the Cylindrical and Spherical Symmetry, Respectively

Despite of an evident disagreement between the real processes and the approach, which considers tracks (spurs) as the volumes of a cylindrical (spherical) symmetry with the "sharp" boundaries, this approach is successfully used since the time of the investigation of particle tracks in the cloud chamber [1, 4, 7, 19]. This approach allows us to introduce the definition of the initial radius r_0 of a cylindrical track or a spherical spur. It gives a possibility to carry out not only some estimations, but to make quantitative calculations as well. This approach means the following.

The Gaussian distribution of the initial concentration of charge pairs (in the plane perpendicular to a cylinder axis, or in the cross-section of a sphere passing through two of its diameter) is replaced by the truncated Gaussian distribution. This distribution ignores the presence of a small number of the pairs that are on the distances larger then a diameter of a cross-section of such the cylinder. In this case, the diffusion-controlled process of annihilation of triplet excitons (T-states) in the region of a track (or a spur) can lead to the generation of S_1-states, which results in a rise of the number of RL photons [1, 14–16]. A time t of such a photon appearance after excitation is additionally delayed on the time required for two triplet excitons to meet each other. The delayed RL forms the slow component of a scintillation pulse. Its shape can be described as [4, 16]:

$$I(t) \approx (1 + (t/t_D))^{-k}, \tag{2}$$

where Eq. (3) defines the time of a diffusion expansion of the track (spur) t_D in the medium with the diffusion coefficient D of T-states. The value k is equal to 1.0 or 1.5 for the high excitation density regions with the cylindrical or spherical symmetry, respectively:

$$t_D = r_0^2/4\,D. \tag{3}$$

Experimental checking the k-values for the wide class of organic scintillators (from liquids to single crystals) gives the following results for $t > 50$ ns. The condition $k = 1.0$ is satisfied with an accuracy no greater than 5–6% in the case of the excitations by alpha particles and fast neutrons (that create recoil protons). For the excitations by conversion electrons or photons of gamma radiation the condition $k = 1.5$ is satisfied with an accuracy of 7–8% [4]. It also means that in the first case the tracks are essentially formed, while in the second case the spurs are formed. These results explain why the application of the discussed approach in radiation chemistry, radiation physics, and scintillation technique is so successful [1, 4, 7, 19].

The second very important result of the discussed studies is the following. Equation (2) describes the diffusion-controlled process for $t > 50$ ns [4]. It means that the main energy losses in the scintillation process have to occur in the earlier times after an excitation.

The Semi-Empirical Description of the Energy Exchange Processes of Charge States in Organic Crystals for High Excitation Densities

Recently [25], we proposed the semi-empirical description of the primary energy exchange in the ionizing particle track with the cylindrical symmetry that takes into account the polarization interactions in organic molecular media. It was shown that the rates, which describe the probabilities of the primary fast recombination of hot charge state pairs in the track, and the rates, which describe the pair recombination of those charge states that in the

initial time are at a distance that exceeds r_c (1), appear in the final equation with the opposite signs. In the former case the hot charge states $M_p{}^+$ and $M_p{}^-$ are on very short distances. The probability of a simultaneous recombination of more than one the pair becomes high. In the latter case, the additional time is necessary to the charge states to approach each other within the distance less than r_c (1). They have a time to relax to the molecular polarons. The probability of a simultaneous recombination of more then one of such the pairs in a very small volume is negligible.

In [13, 26] the detailed analysis of this description was performed. In particular, it was obtained the following results. The influence of the type and structure perfection of a scintillator on losses in the light yield is not as important as the influence of the processes of the primary quenching inside the ionizing particle track. With increase of the initial concentration of charge states the quenching effect grows. It is the primary quenching that has to be the concentration-controlled process [13]. With an increase of the initial concentration of charge states, the fraction of polarons, which take part in the primary recombination, grows. This has to cause the increase of the quenching effect, i.e. the decrease of the number of RL photons [26].

The Recombination of Charge State Pairs for the Case of Excitation with High dE/dx

If the above-mentioned analysis is correct, then the probability of the primary recombination of hot charge states should depend on the relation between r_c (1) and the average initial distance d between charge states. This distance will be determined by dE/dx, and hence by the type of an excitation. Therefore, to revise the results of the analysis it is necessary to calculate the values of r_c and d for different types of crystals and irradiations. The calculations of r_c (1) for a number of organic single crystals were carried out in [27]. The r_c-values were in the range from 15.4 nm for the single crystal of stilbene to 19.5 nm for the single crystal of p-terphenyl. We calculated the d-values for the single crystals of anthracene, stilbene, and p-terphenyl excited by alpha particles, fast neutrons and electrons. The results obtained for different single crystals had no a qualitative difference. For alpha particles, it was obtained that $d < r_c$, for electrons and photons of gamma radiation of the medium energies the relation $d > r_c$ was correct. For the case of the excitation by fast neutrons of different energies, both cases could be observed. For $d > r_c$, in contrast to $d < r_c$, the polarization surroundings of neighbor pairs do not overlap. It means that in the case of the excitation by a fast neutron the influence of the polarization effects on the fast recombination of hot charge states should not be as strong as in the case of the excitation by an alpha particle.

The Experimental Studies of the Recombination Process of Charge State Pairs for a High Excitation Density

The data that were discussed in the section "Theory" are in a good agreement with the hypothesis that the fast initial quenching effect is caused by the primary recombination of hot charge states and increases with these states concentration. If this hypothesis is correct, then the energy yield of the scintillation process has to decrease with increasing the initial concentration of charge pairs, or with increasing dE/dx of a particle. In this formulation, the problem can be directly solved on a base of the measurements of the scintillation light yield for a wide range of dE/dx values.

Experimental

Radionuclide Sources

To obtain a wide range of dE/dx we used medium energy photons of gamma radiation with energies $E_\gamma \sim 10^5$–10^6 eV (^{22}Na, ^{60}Co, ^{137}Cs, and ^{152}Eu radionuclide sources), conversion electrons with the energy $E_e = 0.622$ MeV (the ^{137}Cs source), alpha particles in the energy range from 0.7 to 7.5 MeV, fast neutrons from a ^{239}Pu-Be source.

The alpha particles for such the energy range were obtained by attenuation of alpha particles from ^{239}Pu (5.15 MeV) and ^{226}Ra (7.68 MeV) isotopes in a layer of air. The actual energies of the alpha particles were estimated from their residual range [4].

To separate the spectrum of recoil protons generated by fast neutrons of a ^{239}Pu-Be radionuclide source in organic crystal, we used the method of discrimination of an ionizing radiation by a scintillation pulse shape. The set-up that provided such the selection we described earlier [4, 28]. The discrimination scheme allowed reducing the probability of detecting the gamma radiation photons of a ^{239}Pu-Be source in 10^4 times. The characteristics of a ^{239}Pu-Be source and the method of reconstruction of the neutron spectrum from the measured recoil proton spectrum was described in detail in previous papers [4, 10].

Experimental Samples

We investigated the light yield of single crystals of stilbene ($C_{14}H_{12}$, density $\rho = 1.22$ g/cm^3), anthracene ($C_{14}H_{10}$, $\rho = 1.25$ g/cm^3), and p-terphenyl ($C_{18}H_{14}$, $\rho = 1.23$ g/cm^3) [4]. The single crystals of the p-terphenyl containing 1,4-diphenyl-1,3-butadiene (0.1% in the melt) as an addition agent were studied as well. All samples had a thickness of 5 mm.

Comparison between Characteristics of the Photoluminescence and the Radioluminescence

Photofluorescence Quantum Yield. Fluorescence spectra were measured by a Varian Cary Eclipse spectrofluoremeter. Basing on these measurements the absolute photofluorescence quantum yield Φ_{ph} of the organic single crystals was calculated. It was obtained that $\Phi_{ph} = 0.65$ for stilbene, $\Phi_{ph} = 0.48$ for p-terphenyl, $\Phi_{ph} = 0.97$ for p-terphenyl that contains 1,4-diphenyl-1,3-butadiene, and $\Phi_{ph} = 0.55$ for anthracene.

Radioluminescence Light Yield. The light yield is the total number of photons, which are produced in a scintillator per 1 MeV of particle energy. The light output is that fraction of the light yield of a scintillator which is detected by a photodetector. It is experimentally measured value [4]. The ratio between these values is called the light collection coefficient. Let us denote it as τ_i for excitation of i-type. The light collection coefficientτ takes into account geometry of a sample and type of excitation [29].

The light output of organic single crystals we calculated by comparison with the value of the light output for the reference stilbene single crystal. It light yield C was equal to 14,700 photons per 1 MeV of gamma radiation. Table 1 shows the values of the light yield C for the organic single crystals, as well as the values of the light collection coefficients τ_γ, τ_e, and τ_α for the cases of excitation by photons of gamma radiation, conversion electrons and alpha particles, respectively. For the case of the excitation by fast neutrons we used the light collection coefficient identical to that for gamma radiation (τ_γ-value), because for

Table 1. Light yield C and light collection coefficients τ_γ, τ_e, and τ_α of organic molecular crystals

Organic crystal	C, photon/MeV	τ_γ	τ_e	τ_α
Stilbene	14,700	0.659	0.649	0.635
p-Terphenyl (undoped)	17,000	0.576	0.563	0.551
p-Terphenyl (0.1% 1,4-diphenyl-1,3-butadiene)	24,900	0.615	0.608	0.597
Anthracene	29,000	0.596	0.583	0.570

these types of excitation the secondary particle would originate actually in any point of a sample with equal probability.

Energy Yield of the Photo- and Radioluminescence. The photoluminescence energy yield Y_{ph} is defined as:

$$Y_{ph} = \Phi_{ph} \times \frac{\lambda_{ex}}{\lambda_{em}^{av}}, \tag{4}$$

where λ_{ex} and $\lambda^{av}{}_{em}$ are the excitation wavelength and the average wavelength of an emission spectrum, respectively; Φ_{ph} is the absolute photofluorescence quantum yield.

The average value of the RL energy yield for a particle with the initial energy E_0 crossing the maximum range in a scintillator is equal to:

$$\langle Y_r \rangle = \frac{1}{E_0} \int_0^{E_0} Y_r(E) dE = \frac{L}{E_0} \tag{5}$$

where L is the total energy of the RL photons.

Let us use the following notations: $E_{\text{ph}}(\lambda^{av}{}_{em})$ is the average energy of a luminescence photon, E_i is the excitation energy, P_i is the total number of photons in a scintillation pulse, and Y_i is the energy yield. The suffix i means the excitation of i type. Below by ph, γ, e, n, and α we denote the following types of excitation i: light photons, photons of gamma radiation, conversion electrons, neutrons and alpha particles, respectively The symbol of averaging will be omitted. Hence, it is necessary to measure the total number of photons in a scintillation pulse P_i to obtain the value of Y_i for i type of excitation with the energy E_i.

The Number of Scintillation Photons

The following procedure was used to obtain the total number of photons P_i in the RL pulse for i type of excitation. Firstly, we measured amplitude scintillation spectra of organic single crystals obtained for the excitation with the energy E_i. The amplitude scintillation spectra of the samples were measured by a multichannel amplitude analyzer AMA-03F. The analyzer scale was calibrated by the energy lines, which correspond to the edges of the Compton spectra obtained during the excitation by radionuclide sources ^{22}Na, ^{60}Co, ^{137}Cs, and ^{152}Eu. The light output of the scintillators was calculated by the comparison method [29] using the reference stilbene single crystal. After that we recalculated the light yield of the single crystals taking into account the light collection coefficientsτ_γ, τ_e, and τ_α

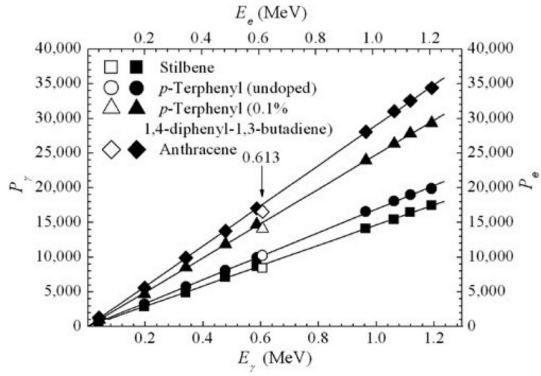


Figure 1. The total number of photons P_γ (closed symbols) and P_e (open symbols) in a scintillation pulse for organic single crystals. The solid lines are the calculated linear dependences of P_γ against E_γ. The arrow indicates the energy $E_e = 0.613$ MeV of the conversion electrons.

(see Table 1). This allowed us to calculate the number of scintillation photons P_i, which are generated in an organic single crystal by the energy E_i.

Figure 1 shows the results of such calculations for the ionizing radiations with low dE/dx. Within the discussed energy range the plot of P_γ as a function of E_γ yields a straight line. For conversion electrons the calculation was performed only for a specific value, which corresponded to the energy of the incident electron E_e. The energy $E_e = 0.613$ MeV corresponds to the experimental conditions. To calculate this value we take into account that before the electron with the initial energy $E_e = 0.622$ MeV strikes a sample it has to pass through a layer of air about 4 cm thick.

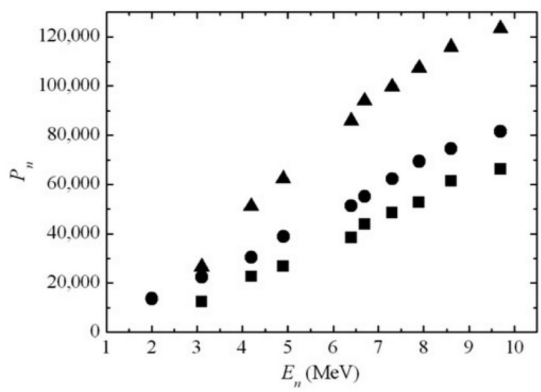


Figure 2. The total number of photons P_n in a scintillation pulse for organic single crystals excited by fast neutrons with the energy E_n. The symbols are the same as in Fig. 1.

Table 2. Values of $E_{ph}(\lambda^{av}{}_{em})$, Φ_{ph}, and Y_{ph} of organic molecular crystals

Organic crystal	$E_{ph}(\lambda^{av}{}_{em})$, eV	Φ_{ph}	Y_{ph}
Stilbene	3.08	0.65	0.55
p-Terphenyl (undoped)	3.13	0.48	0.41
p-Terphenyl (0.1% 1,4-diphenyl-1,3-butadiene)	2.88	0.97	0.77
Anthracene	2.71	0.55	0.50

Figures 2 and 3 demonstrate the calculated values of the total number of scintillation photons for molecular single crystals excited by fast neutrons of a ^{239}Pu-Be radionuclide source (values of P_n) and by alpha particles in the energy range from 0.7 to 7.5 MeV (values of P_α), respectively. These dependences obtained for the excitation by the ionizing radiations with high dE/dx values are non-linear.

Discussion

Low Values of dE/dx

Table 2 presents the values of $E_{ph}(\lambda^{av}{}_{em})$, Φ_{ph}, and Y_{ph} for the photoexcitation, while Table 3 presents the values of Y_γ and Y_e, obtained for the ionizing radiations with low dE/dx. The Y_γ-value, according to (5), is equal to the product of a slope of the curve (see Fig. 1) by $E_{ph}(\lambda^{av}{}_{em})$. The value Y_e is obtained as $P_e \times E_{ph}(\lambda^{av}{}_{em})/E_e$. In Fig. 1 the values of P_e, practically, are on the corresponding linear dependencies of P_γ against E_γ. Within the energy range of the measurements the interactions of gamma radiation photons with an organic medium are well fitted by Compton effect, which results in generation of secondary electrons [4]. It causes an extremely small difference in parameters Y_γ and Y_e (see Table 3).

The comparison of the data presented by Tables 2 and 3 shows a significant difference between the values of the corresponding parameters obtained for the photoexcitation and the

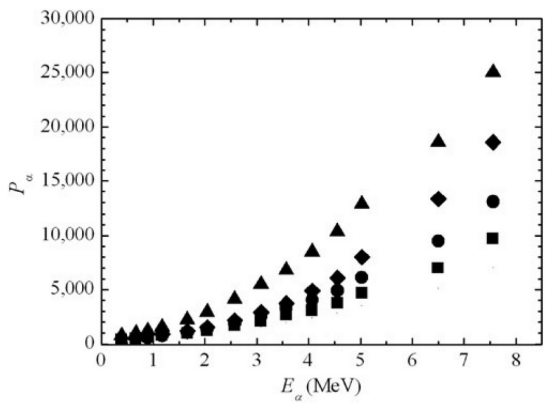


Figure 3. The total number of photons P_α in a scintillation pulse for organic single crystals excited by alpha particles versus the energy E_α. The symbols are the same as in Fig. 1.

Table 3. Values of Y_γ and Y_e of organic molecular crystals

Organic crystal	Y_γ	Y_e
Stilbene	0.045	0.042
p-Terphenyl (undoped)	0.053	0.052
p-Terphenyl (0.1% 1,4-diphenyl-1,3-butadiene)	0.072	0.066
Anthracene	0.079	0.073

excitation by the ionizing radiations with low values of dE/dx. In the case of the excitation by the ionizing radiations with low dE/dx the values of the RL energy yields (Y_γ and Y_e) are by an order of magnitude smaller than in the case of the excitation by light photons of the visible range (Y_{ph}). The question arises "Why?"

In contrast to photoexcitation the generation of molecular excitons in organic crystals by ionizing radiation has a many-stage nature [1, 4, 13, 20, 23]. The decay of a plasmon may lead to generation of a single charge pair. The average energy of a plasmon $\langle E_{\mathrm{pl}} \rangle$ is approximately equal to 20 eV [1, 4, 13, 21, 22]. This value determines the average energy required to generate a single pair of charge carriers. There are at least two other possible reasons those can cause the difference between Y_{ph} and Y_γ or Y_e.

Geminate recombination when an electron recombines with its parent ion results in generation of a singlet exciton [4, 22]. This situation is the most expectable for the spur with one pair. For spurs containing more than one pair the spins of the combining charge states are uncorrelated and random recombination dominates over geminate one [30]. In this case, according to the spin selection rule, S- and T-states occur in the ratio 1 to 3 [4, 7, 19, 30, 31]. Even if we take into account the probability of generation of S-states in the annihilation of T-states then it results in the yield of S-states equal to their yield in the process of geminate recombination taken with the factor ~ 0.4 [31]. Therefore the luminescence yield of the pair recombination decreases. The probability of generation of the spurs with the number of pairs $j > 2$ decreases with increasing j [19].

An escape of an electron from a spur may be the second reason for the energy losses. For the ionizing radiations with low dE/dx the distance between two neighbor spurs is much larger than the size of a single spur, and the possibility of an overlap of spurs is extremely small [4, 19]. Therefore, if an electron escapes from it spur then the probability this electron returns to the parent spur or reaches to a neighbor spur is also extremely small.

So, the RL energy yield for the ionizing radiations with low dE/dx will define by the features of generation and recombination of charge states in separate spurs. These spurs do not overlap. Increasing the particle energy only leads to an increase in the number of such spurs [4, 19]. This explains the linearity of P_γ as a function of E_γ, i.e. the constancy of the light yield as a function of E_γ for the ionizing radiation with low dE/dx (see Fig. 1).

High Values of dE/dx

For fast neutrons and alpha particles we calculated the values $Y_n = P_n \times E_{\mathrm{ph}}(\lambda^{av}{}_{em})/E_n$ and $Y_\alpha = P_\alpha \times E_{\mathrm{ph}}(\lambda^{av}{}_{em})/E_\alpha$, respectively, according to Eq. (5). The Y_n-values for the investigated range of energies E_n and samples of organic single crystals are in the range from 0.012 to 0.040, while in the case of alpha excitation the calculation gives the values of Y_α from 0.0012 to 0.0095. A spread of the values Y_n and Y_α is defined by both a type of

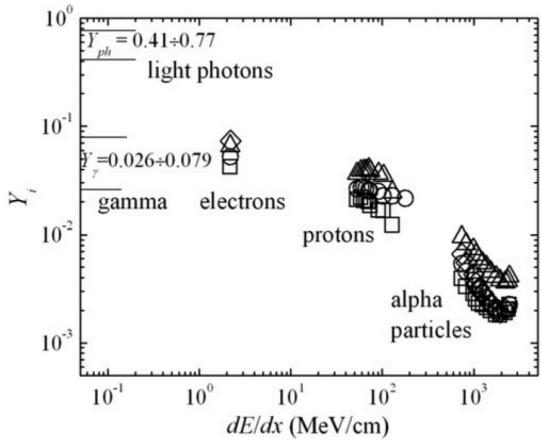


Figure 4. The RL energy yield Y_i of organic single crystals as a function of dE/dx of the ionizing radiation. The symbols are the same as in Fig. 1.

a crystal, and a non-linearity of the scintillation response for the ionizing radiations with high dE/dx.

Figure 4 summarizes the RL energy yields for organic single crystals excited by the ionizing radiations in a wide range of dE/dx. Values of dE/dx were calculated using the online programs ESTAR, PSTAR, and ASTAR of the National Institute of Standards and Technology (NIST) [32]. The range of the Y_{ph}-values (see Table 2), and the range of the Y_γ-values (see Table 3) is only indicated in Fig. 4 because the determination of the dE/dx-value is incorrect for these both cases. In the case of neutron excitation we calculated the values of dE/dx for the maximum energy of recoil protons, which were generated by the corresponding fast neutrons with a set of energies E_n.

The complicated dependence of Y_α versus dE/dx is caused by a nonlinearity of the light yield as a function dE/dx for high values of dE/dx. With decrease of the energy of an alpha particle, the dE/dx-value increases and reaches a maximum. After that in the end of an alpha particle path Y_α grows. The effect of an ion recharge can be the reason of this dependence [4, 33]. According to [33], this effect takes place for alpha particles with the energies about 1 MeV. The same result we have obtained in our measurements.

Figure 4 shows a precipitate drop in the RL energy yield for high dE/dx. For the case of alpha excitation, the Y_α-values are 15–30 times less than in the case of the excitations with low dE/dx (the values of Y_γ and Y_e). For the ionizing radiations with high dE/dx the overlapping spurs will create the single region of high activation density of the quasi-cylindrical symmetry. This will increase the density of charge state pairs $\mathrm{M_p}^+$ and $\mathrm{M_p}^-$ located at the distances smaller than the radius of the stable polarization surrounding r_c (1) of an excess charge carrier. Therefore, the polarization process will accelerate fast random recombination of hot charge states having an excess energy. The probability of a simultaneous recombination of several pairs of hot charge states becomes very high within the small local region of a medium, determined by the value of r_c. This will increase the probability of the above-discussed process of a local heating of the track region. The last process will promote an increase in the probability of a non-radiative deactivation

of excitation. Such the quenching mechanism, when the light intensity of a single crystal decreases with increasing it heating, is well known as the "temperature" quenching from the photoluminescence investigations [24]. For high dE/dx this effect is significantly stronger and can be a cause of the efficient primary quenching which results in decrease of the RL energy yield Y.

The "concentration" quenching in the particle track is also possible in addition to the "temperature" one. If the concentration of hot charge states drastically decreases during the initial recombination, but still remains high enough, than the secondary stage of quenching is possible. The concentration of S_1-states, which are the source of the fluorescence in the $S_1 \rightarrow S_0 + h\nu$ transition, could be reduced in the processes of the mutual S-S annihilation, S-T annihilation, singlet exciton fission, quenching by doublet states etc. [30].

Conclusion

In contrast to photoexcitation the generation of molecular excitons in organic crystals by ionizing radiations has a many-stage nature. It causes the additional energy losses even for the ionizing radiations with low dE/dx. The main reasons for these losses are caused by: i) random recombination of charge states in a separate spur, ii) an escape of electrons from a separate spur.

The energy losses significantly increase for the ionizing radiations with high dE/dx. Random recombination of hot charge states accelerated by the polarization interaction prevails at high excitation densities. The energy released in the local region, where several pairs of hot charge states recombine, may exceed significantly the energy of S_1-state. This should lead to the mechanism of a radiationless energy deactivation. An efficiency of such energy losses has to grow with increasing dE/dx. The secondary "concentration" quenching of singlet and triplet excitons may increase the quenching effect. Both the processes essentially depend on the concentration of the corresponding states. The secondary quenching takes place after the primary one when the concentration of the states becomes appreciably lower. Therefore the secondary quenching could not have the effect comparable with the effect of the primary quenching.

References

[1] Pope, M., & Swenberg, C. E. (1982). *Electronic Processes in Organic Crystals*, Clarendon Press, Oxford.
[2] Silinsh, E. A., & Capek, V. (1994). *Organic Molecular Crystals: Interaction, Localization and Transport Phenomena*, American Institute of Physics, New York.
[3] Schwoerer, M., & Wolf, H. C. (2007). *Organic Molecular Solids*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
[4] Galunov, N. Z., & Tarasenko, O. A. (2011). *Ionizing Radiation Track Formation in Organic Condensed Media*, ISMA, Kharkov [in Russian].
[5] Ortmann, F., Bechstedt, F., & Hannewald, K. (2011). *Phys. Status Solidi, Sect. B*, *248*, 511.
[6] Stehr, V., Pfister, J., Fink, R. F., Engels, B., & Deibel, C. (2011). *Phys. Rev., Sect. B*, *83*, 155208.
[7] Birks, J. B. (1967). *The Theory and Practice of Scintillation Counting*, Pergamon Press, London.
[8] Kitaigorodsky, A. I. (1973). *Molecular Crystals and Molecules. Ser.: Physical Chemistry*, 29, Academic Press, New York.
[9] Galunov, N. Z., Seminozhenko, V. P., & Stepanenko, A. M. (2001). *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, *355*, 479.
[10] Budakovsky, S. V., Galunov, N. Z., Karavaeva, N. L., Kim, J. K., Kim, Y. K., Tarasenko, O. A., & Martynenko, E. V. (2008). *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, *54*, 2734.

[11] Hull, G., Zaitseva, N. P., Cherepy, N. J., Newby, J. R., Stoeffl, W., & Payne, S. A. (2009). *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, *56*, 899.
[12] Kim, H. D., Cho, G. S., & Kim, H. J. (2013). *Radiat. Meas.*, *58*, 133.
[13] Galunov, N., & Tarasenko, O. (2010). *Radiat. Meas.*, *45*, 380.
[14] Galunov, N. Z. (1993). *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, *236*, 121.
[15] Galunov, N. Z. (1994). *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, *252*, 135.
[16] Galunov, N. Z., Jarichkin, V. V., & Tarasenko, O. A. (1995). *Mol. Mat.*, *5*, 189.
[17] Bounds, P. J., Siebrand, W., Eisenstein, I., Munn, R. W., & Petelenz, P. (1985). *Chem. Phys.*, *95*, 197.
[18] Silinsh, E. A., Jurgis, A. J., & Shlihta, G. A. (1987). *J. Mol. Electron.*, *3*, 123.
[19] Mozumder, A. (1999). *Fundamentals of Radiation Chemistry*, Academic Press, San Diego, London, Boston, New York, Sydney, Tokyo, Toronto.
[20] Platzman, R. L. (1962). *Radiat. Res.*, *17*, 419.
[21] Swanson, N., & Powell, C. J. (1963). *J. Chem. Phys.*, *39*, 630.
[22] Schott, M. (1969). *Mol. Cryst.*, *5*, 229.
[23] Fano, U. (1992). *Rev. Mod. Phys.*, *64*, 313.
[24] Kucherov, I. I., & Faidysh, A. N. (1958). *Izv. Akad. Nauk SSSR (Ser. fiz.)*, *22*, 29 [in Russian].
[25] Galunov, N. Z., & Martynenko, E. V. (2008). *Funct. Mater.*, *15*, 380.
[26] Galunov, N. Z., Seminozhenko, V. P., Martynenko, E. V., & Tarasenko, O. A. (2013). *Probl. Atom. Sci. Technol.*, *85*, 210.
[27] Tarasenko, O. A. (2012). *Funct. Mater.*, *19*, 415.
[28] Baker, J. H., Galunov, N. Z., Stepanenko, A. M., & Tarasenko, O. A. (2004). *Radiat. Meas.*, *38*, 817.
[29] Sysoeva, E., Tarasov, V., & Zelenskaya, O. (2002). *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, *486*, 67.
[30] Geacintov, N. E., Binder, M., Swenberg, C. E., & Pope, M. (1975). *Phys. Rev., Sect. B*, *12*, 4113.
[31] Helfrich, W., & Schneider, W. G. (1966). *J. Chem. Phys.*, *44*, 2902.
[32] NIST Standard Reference Database 124. Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm).
[33] Fano, U. (1963). *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, *13*, 1.

Хронологічний покажчик публікацій Галунова Миколи Захаровича

1975

1. Измерение параметров затухания сцинтилляции в некоторых органических сцинтилляторах / Грудская Л.Е., **Галунов Н.З.**, Подужайло В.Ф., Верезубова С.А., Цирлин Ю.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1975. – № 6. – С. 52–53.

1976

2. Исследование радиолюминесценции поли-2,4-диметилстирола / Гундер О.А., **Галунов Н.З.**, Грудская Л.Е., Куцина Л.М., Сенчишин В.Г. // Тезисы VII Всесоюзн. конф. “Перспективы развития технологии, методов контроля, производства сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в 10-й пятилетке”. – ч.1. – Харьков. – 1976. – С. 240–244. – Деп. в ОНИИТЭХИМ 12.09.77 г., №1175/77деп. – Реферат опубликован в РЖ ВИНИТИ “Физика”, 1977, реф. 8 В642.

3. Исследование тушения сцинтилляций в пластмассовых сцинтилляторах с металлоорганическими добавками / Волосюк Г.П., **Галунов Н.З.**, Грудская Л.Е., Гундер О.А., Петрова И.В. // Тезисы VII Всесоюзн. конф. “Перспективы развития технологии, методов контроля, производства сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в 10-й пятилетке”. – Ч.1. – Харьков.– 1976.– С. 258–265.– Деп. в ОНИИТЭХИМ 12.09.77 г., №1175/77деп. – Реферат опубликован в РЖ ВИНИТИ “Физика”, 1977, реф. 8В640.

4. Изучение кинетики высвечивания γ-сцинтилляций в

жидких сцинтилляторах с различными активаторами / Грудская Л.Е., **Галунов Н.З.**, Верезубова С.А., Лысова И.В., Подужайло В.Ф., Цирлин Ю.А., Скрипкина В.Г., Ивлева Л.П. // Тезисы VII Всесоюзн. конф. “Перспективы развития технологии, методов контроля, производства сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в 10-й пятилетке”. – Ч. 1. – Харьков. – 1976. – С. 266–271. – Деп. в ОНИИТЭХИМ 12.09.77 г., №1175/77 деп. – Реферат опубликован в РЖ ВИНИТИ “Физика”, 1977, реф. 8В639.

5. Некоторые свойства гетерогенных сцинтилляционных детекторов медленных нейтронов типа ДМН29-Б, ДМН30-Б / **Галунов Н.З.**, Сулыга В.А., Черников В.В. // Тезисы VII Всесоюзн. конф. “Перспективы развития технологии, методов контроля, производства сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в 10-й пятилетке”. – Ч. 1. – Харьков. – 1976. – С. 305–313. – Деп. в ОНИИТЭХИМ 12.09.77 г., №1175/77деп. – Реферат опубликован в РЖ ВИНИТИ “Физика”, 1977, реф. 8В632.

1977

6. Исследование кинетики γ- сцинтилляций в NaJ(Tl) в зависимости от концентрации активатора / **Галунов Н.З.**, Рогожин А.А., Грудская Л.Е., Цирлин Ю.А., Шамовский Л.М. // Закономерности распределения примесных центров в ионных кристаллах: Сб. науч. тр. – М.: ВИМС, 1977. – С. 21–28.

7. Исследование процессов возбуждения сцинтилляций в CaF2-Eu2+ / **Галунов Н.З.**, Рогожин А.А., Грудская Л.Е., Шамовский Л.М. // Закономерности распределения примесных центров в ионных кристаллах: Сб. науч. тр. – М.: ВИМС, 1977. – С. 40–49.

1978

8. Новые представления о механизме возбуждения сцин-

тилляций в NaJ(Tl) / **Галунов Н.З.**, Грудская Л.Е., Рогожин А.А., Цирлин Ю.А., Шамовский Л.М. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1978. – Т. 29, № 1. – С. 148–152.

1979

9. Формирователь сцинтилляционных импульсов в прямоугольнике / **Галунов Н.З.**, Сулыга В.А. // Монокристаллы и сцинтилляторы, их получение и свойства: Сб.науч.тр.– Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1979. – № 3. – С. 162–166.

10. Утяжеленный жидкий сцинтиллятор / Битеман В.В., Верезубова С.А., **Галунов Н.З.**, Куцина Л.М., Подужайло В.Ф. // А.с. 668338. Зареєстровано в Держ. реєстрі винаходів СРСР 22.02.79.

1980

11. К вопросу об измерениях параметров кинетики сцинтилляций в нано- и субнаносекундном диапазонах / **Галунов Н.З.** // Методы получения и исследования монокристаллов и сцинтилляторов: Сб. науч. тр.– Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1980. – № 5. – С. 104–110.

12. Радиолюминесценция 2-фенил-5-(4-бифенилил) - оксадиазола-1,3,4 и паратерфенила в поливинилксилоле / **Галунов Н.З.**, Копина И.В., Цирлин Ю.А. // Тезисы III Всесоюзн. конф. “Органические люминофоры и их применение в народном хозяйстве”. – Харьков: ВНИИ Монокристаллов, 1980. – С. 18.

13. Сцинтилляционный гамма-спектрометр с защитой на антисовпадениях / **Галунов Н.З.**, Тарасов В.А., Черников В.В., Сулыга В.А., Цирлин Ю.А. // Харьков: ВНИИ Монокристаллов, 1980. – 7 с. – Деп. в ОНИИТЭХИМ 1980, №248-XII-Д80. – Реферат опубликован в БУ ВИНИТИ “Депонированные рукописи”, 1980, № 6.– С. 83.

1981

14. Исследование параметров кинетики сцинтилляций методом счета отдельных фотонов монокристаллов стильбена с различной степенью структурного совершенства / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Кришталь Е.Е., Ткаченко В.Ф., Шевцов Н.И. // Тезисы VII Всесоюзн. конф. “Состояние и перспективы разработки, применения сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в XI пятилетке”. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1981. – С. 15.

15. Исследование временных характеристик сцинтилляторов на основе толуола с алкилзамещенными 2-фенил-5-(4-бифенилил)-оксадиазола-1,3,4 / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Кришталь Е.Е., Ткаченко В.Ф., Шевцов Н.И. // Тезисы VII Всесоюзн. конф. “Состояние и перспективы разработки, применения сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в XI пятилетке”. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1981. – С. 28.

16. Распространение сцинтилляционных импульсов в пластмассовых цилиндрических световодах / **Галунов Н.З.**, Копина И.В., Кришталь Е.Е., Мицай Л.И. // Тезисы VII Всесоюзн. конф. “Состояние и перспективы разработки, применения сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в XI пятилетке”. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1981. – С. 29.

17. Методика исследования параметров кинетики сцинтилляций тонких сцинтилляторов в нано- и субнаносекундном диапазонах / **Галунов Н.З.**, Цирлин Ю.А. // Харьков: ВНИИ Монокристаллов, 1980. – 10 с. – Деп. в ОНИИТЭХИМ 1981, №967–81. – Реферат опубликован в БУ ВИНИТИ “Депонированные рукописи”, 1981, № 6.

1982

18. Исследование параметров кинетики сцинтилляций методом счета отдельных фотонов монокристаллов стильбе-

на с различной степенью структурного совершенства /Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Кришталь Е.Е., Иванова Г.М., Шевцов Н.И. // Монокристаллы, их получение и свойства: Сб. науч. тр.– Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1982. – № 8. – С.103–106.

19. Исследование формы импульса сцинтилляций пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирола / **Галунов Н.З.**, Ген Н.С., Цирлин Ю.А. // Оптические и сцинтилляционные материалы: Сб. науч. тр.– Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1982. – № 9. – С. 156–158.

20. Исследование сцинтилляционных характеристик сцинтилляторов на основе толуола с алкилзамещенными 2-фенил-5-(4-бифенилил) оксадиазола-1,3,4 / **Галунов Н.З.**, Кришталь Е.Е., Лысова И.В., Афанасиади Л.Ш. // Оптические и сцинтилляционные материалы: Сб. науч. тр. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1982. – № 9. – С. 91–95.

21. Влияние на кристаллизацию и свойства монокристаллов стильбена электроноакцепторных примесей / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Крайнов И.П., Мнацаканова Т.Р. // Тезисы II Всесоюзн. конф. “Состояние и перспективы развития методов получения монокристаллов”. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1982. – С. 30.

22. Исследование формы импульсов света сцинтилляции быстрых пластмассовых сцинтилляторов на основе поливинилксилола / **Галунов Н.З.**, Гундер О.А., Копина И.В., Цирлин Ю.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1982. – № 6. – С. 38–40.

23. Влияние процесса дезактивации высших возбужденных состояний на форму импульса радиолюминесценции в органических молекулярных системах / **Галунов Н.З.**, Кришталь Е.Е., Цирлин Ю.А. // Тезисы Всесоюзн. совещ. по молекулярной люминесценции и ее применениям. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1982. – С. 61.

1983

24. Методика обработки экспериментальных данных, полученных однофотонным методом при исследовании сцинтилляционных импульсов быстрых органических сцинтилляторов / **Галунов Н.З.**, Кришталь Е.Е., Цирлин Ю.А. // Харьков: ВНИИ Монокристаллов, 1980. – 24 с. – Деп. в ОНИИТЭХИМ, №1024–XII–Д82. – Реферат опубликован в БУ ВИНИТИ “Депонированные рукописи”, 1983, № 2.

25. Некоторые сцинтилляционные характеристики пластмассовых сцинтилляторов на основе полистирола и поливинилксилола / **Галунов Н.З.**, Копина И.В., Корнеева О.Г., Цирлин Ю.А. // Физика и химия твердого тела: Сб. науч. тр. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1983. – № 10. – С. 65–69.

26. Исследование формы импульсов света сцинтилляций пластмассовых сцинтилляторов на основе сополимеров стирола с 4-винил-п-терфенилом / Волосюк Г.П., **Галунов Н.З.**, Гундер О.А., Петрова И.Б., Цирлин Ю.А. // Физика и химия твердого тела: Сб. науч. тр. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1983. – № 10. – С. 131–132.

27. Установка для исследований формы импульсов света сцинтилляции тонких сцинтилляторов методом счета отдельных фотонов / **Галунов Н.З.**, Ген Н.С., Кришталь Е.Е., Цирлин Ю.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 3. – С. 49–51.

28. Влияние диффузии света сцинтилляции на форму сцинтилляционного импульса в пластмассовых цилиндрических сцинтилляторах / **Галунов Н.З.**, Копина И.В., Мицай Л.И., Цирлин Ю.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 4. – С. 81–83.

29. Особенности механизма формирования импульсов света сцинтилляций в быстродействующих органических сцинтилляторах / **Галунов Н.З.** // Журнал прикладной спектроскопии. – 1983. – Т. 39, № 4. – С. 659–663.

30. Исследование формы сцинтилляционных импульсов

активированных монокристаллов паратерфенила методом счета отдельных фотонов / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Цирлин Ю.А., Кришталь Е.Е. // Монокристаллические материалы: Сб. науч. тр.– Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1983. – № 11. – С. 65–67.

1984

31. Параметры кинетики сцинтилляций ряда быстродействующих жидких сцинтилляторов / **Галунов Н.З.**, Красовицкий Б.М., Лысова И.В., Афанасиади Л.Ш., Цирлин Ю.А., Кришталь Е.Е. // Получение и исследование оптических и сцинтилляционных материалов: Сб. науч. тр.– Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1984. – № 12. – С. 75–78.

32. Влияние зарядовых состояний на форму быстрого компонента кривой радиолюминесценции в кристаллических и аморфных молекулярных сцинтилляционных системах / **Галунов Н.З.** // Выращивание монокристаллов и их свойства: Сб. науч. тр.– Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1984. – № 13. – С. 139–140.

1985

33. Влияние дефектов структуры и соотношения концентраций компонентов на сцинтилляционные характеристики смешанных монокристаллов на основе паратерфенила / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Нагорная Л.Л., Цирлин Ю.А. // Тезисы III Всесоюзн. конф. “Состояние и перспективы развития методов получения монокристаллов”. – Черкассы. – 1985. – С. 33–34.

34. Влияние спектральных характеристик радиолюминесценции на временное разрешение однофотонных установок / **Галунов Н.З.**, Цирлин Ю.А. // Выращивание, исследование и применение монокристаллов: Сб. науч. тр. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1985. – № 15. – С. 76–79.

1986

35. Влияние контролируемых электроноакцепторных примесей на радиолюминесценцию монокристаллов стильбена / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Крайнов И.П., Мнацаканова Т.Р. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1986. – Т. 44, № 6. – С. 1012–1015.

36. Некоторые особенности идентификации частиц по форме импульса в органических сцинтилляторах / **Галунов Н.З.**, Цирлин Ю.А. // Тезисы IX Всесоюзн. конф. “Состояние и перспективы разработки, применения сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в XII пятилетке”. – Черкассы. – 1986. – С. 62.

37. Исследование сцинтилляционных характеристик жидких и пластмассовых сцинтилляторов с алкилзамещенными 2-фенил-5-(4-бифенилил) оксадиазола-1,3,4 / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Копина И.В., Лысова И.В. // Тезисы IX Всесоюзн. конф. “Состояние и перспективы разработки, применения сцинтилляторов и сцинтилляционных детекторов в XII пятилетке”. – Черкассы. – 1986. – С. 63.

38. Определение коэффициентов диффузии триплетных экситонов в органических молекулярных кристаллах на основе исследования формы кривых радиолюминесценции методом счета отдельных фотонов / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Нагорная Л.Л., Цирлин Ю.А. // Триплетные возбуждения в молекулярных кристаллах: Сб. науч. тр. – Харьков: ФТИНТ АН УССР, 1986. – С. 124–142. – Деп. в ОНИИТЭХИМ 11.09.86, №6590/В86.

39. Влияние дефектов структуры и степени очистки на свойства сцинтилляционных монокристаллов паратерфенила / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Нагорная Л.Л., Цирлин Ю.А. // Органические полупроводниковые материалы: Сб. науч. тр. – Пермский гос. ун-т, 1986. – № 9. – С. 64–67.

40. Стабильность временных характеристик быстродействующих жидких сцинтилляторов / **Галунов Н.З.**, Лы-

сова И.В., Афанасиади Л.Ш. // Материалы для оптических устройств и сцинтилляторов: Сб. науч. тр.– Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1986. – № 18. – С. 143–145.

1987

41. Некоторые особенности процесса формирования импульсов радиолюминесценции в органических монокристаллах и химически чистых жидких сцинтилляционных растворах и их способность к раздельной регистрации ионизирующих излучений / **Галунов Н.З.**, Цирлин Ю.А. // М.: НИИТЭХИМ, 1987.

42. Некоторые аспекты использования органических люминофоров в жидких сцинтилляторах / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.** // Тезисы V Всесоюзн. конф. “Органические люминофоры и их применение в народном хозяйстве”. – Черкассы: ОНИИТЭХИМ, 1987. – С. 10.

43. Радиолюминесценция производных 2-фенил-5-(4-бифенилил) оксадиазола-1,3,4 в жидких сцинтилляторах / **Галунов Н.З.**, Лысова И.В., Цирлин Ю.А. // Тезисы V Всесоюзн. конф. “Органические люминофоры и их применение в народном хозяйстве”. – Черкассы: ОНИИТЭХИМ, 1987. – С. 33.

44. Исследование процесса миграции энергии триплетного возбуждения в смешанных монокристаллах на основе паратерфенила / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Тезисы II Межвуз. семинара по органическим полупроводникам. – Горький. – 1987. – С. 47.

45. Особенности кристаллизации, радиолюминесцентные и механические свойства органических молекулярных кристаллов, выращенных из расплава, содержащего электроноакцепторные примеси / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Крайнов И.П. // Тезисы II Межвуз. семинара по органическим полупроводникам. – Горький. – 1987. – С. 49.

46. Анизотропия диффузии триплетных экситонов в

монокристаллах стильбена и антрацена / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Тезисы II Межвуз. семинара по органическим полупроводникам. – Горький. – 1987. – С. 49–50.

47. Определение коэффициентов диффузии триплетного возбуждения в органических молекулярных системах на основе невязких растворителей / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Красовицкий Б.М., Лысова И.В., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Тезисы Всесоюзн. совещания “Люминесценция молекул и кристаллов”. – Таллин. – 1987. – С. 163.

48. Установка для исследования n-γ – разделяющей способности органических сцинтилляционных материалов / **Галунов Н.З.**, Расько М.А., Чичикалюк Ю.А., Шишов Н.И. // Сцинтилляционные материалы: Сб. науч. тр. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1987. – № 20. – С. 83–88.

49. Восстановление формы кривой импульса радиолюминесценции сцинтилляционных детекторов по результатам однофотонных измерений / **Галунов Н.З.**, Цыганко Т.А. // Сцинтилляционные материалы: Сб. науч. тр. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1987. – № 20. – С. 129.

50. Формирование импульсов радиолюминесценции в органических молекулярных сцинтилляторах и их способность к идентификации ионизирующего излучения / **Галунов Н.З.**, Шишов Н.И. // Сцинтилляционные материалы: Сб. науч. тр. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1987. – № 20. – С. 129–130.

1988

51. BaF2-детектор с конвертором спектра на основе жидкого сцинтиллятора / Афанасиади Л.Ш., Верезубова С.А., **Галунов Н.З.**, Кузниченко А.В., Лебедев В.Н., Лысова И.В. // Тезисы 8 совещания “Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра”. – Баку. – 1988. – С. 499.

52. Исследование процесса миграции энергии триплетного возбуждения в смешанных монокристаллах на основе

паратерфенила / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Органические полупроводниковые материалы: Межвуз. сб. науч. тр. – Пермь. – 1988. – С. 75–80.

53. Особенности кристаллизации, радиолюминесцентные и механические свойства органических молекулярных кристаллов, выращенных из расплава, содержащего электроноакцепторные примеси / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Крайнов И.П. // Органические полупроводниковые материалы: Межвуз. сб. науч. тр. – Пермь. – 1988. – С. 138–142.

54. Анизотропия диффузии триплетных экситонов в монокристаллах стильбена и антрацена / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Органические полупроводниковые материалы: Межвуз. сб. науч.тр. – Пермь. – 1988. – С. 143–147.

55. Радиационно-химический метод очистки п-терфенила / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Крайнов И.П., Крамаренко С.Ф., Мнацаканова Т.Р., Шишов Н.И. // Органические полупроводниковые материалы: Межвуз. сб. науч. тр. – Пермь. – 1988. – С. 33.

56. Исследование формы сцинтилляционных импульсов быстродействующих жидких сцинтилляторов / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Красовицкий Б.М., Лысова И.В., Цирлин Ю.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 5. – С. 62–64.

(Afanasiadi L.S., **Galunov N.Z.**, Krasovitskii B.M., Lysova I.V., Tsirlin Y.A. Shape of scintillation pulses of high-speed liquid scintillators // Instruments and Experimental Techniques. 1989. Vol. 31. No.5. –P. 1159–1162.)

57. Определение коэффициентов диффузии триплетного возбуждения в органических молекулярных системах на основе невязких растворителей / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Красовицкий Б.М., Лысова И.В., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1988. – Т. 49, № 6. – С.994–997.

(Afanasiadi L.Sh, **Galunov N.Z.**, Krasovitskii B.M., Lysova I.V., Tsirlin Yu.A., Shishov N.I. Determination of the diffusion coefficients of triplet excitation in organic molecular systems based on nonviscous solutions // Journal of Applied Spectroscopy – 1988. – Vol. 49, No. 6. – P. 1306–1308.)

1989

58. Жидкие сцинтилляторы с высокой n-γ – разделяющей способностью / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Лысова И.В., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 6. – С. 58–60.

(Afanasiadi L.S., **Galunov N.Z.**, Lysova I.V, TsilinY. A, Shishov N.I. Liquid scintillators with high n-γ separating power // Instruments and experimental techniques. – 1989. – Vol. 31, No.6. – P. 1432–1434. Pleiades Publishing, Ltd, ISSN: 0020-4412e ISSN: 1608-3180.)

59. Радиолюминесцентный метод исследования переноса энергии триплетного возбуждения в жидких молекулярных системах / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Лысова И.В., Шишов Н.И. // Тезисы II конф. научно-учебного центра физ.-хим. методов исслед. – М.: Российский ун-т дружбы народов, 1989. – С. 109.

60. Особливості структури та радіолюмінісцентних характеристик монокристалів стильбену, вирощених з розплаву, що має електроноакцепторні домішки / Будаковський С.В., **Галунов М.З.**, Крайнов І.П., Семіноженко В.П. // Доп. АН УРСР. Серія А. – 1989. – № 1. – С. 44–46.

61. The influence of controlled electron seeking addition agents of the melt on stilbene single crystal structure and radioluminescence properties / Krainov I.P., **Galunov N.Z.**, Budakovsky S.V. // Crystal Research and Technology. – 1989. – Vol. 24, N 2. – P. 193–197. https://doi.org/10.1002/crat.2170240213.

62. Быстродействующий жидкий сцинтиллятор – конвертор излучения BaF2 / Афанасиади Л.Ш., Валбис Я.А.,

Галунов Н.З., Лысова И.В., Цирлин Ю.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 1. – С. 77–79.

(Afanasiadi L.S., Valbis Y.A., **Galunov N.Z.**, Lysova I.V., Tsirlin Y.A. High-speed liquid scintillator converter of BaF2 radiation // Instruments and experimental techniques. – 1989. – Vol. 32, No.1. – pp. 86-88. Pleiades Publishing, Ltd, ISSN: 0020-4412 eISSN: 1608-3180.)

63. О нейтронных и масс-спектрометрических измерениях в экспериментах по электрохимическому внедрению дейтерия в палладий / Боровой И.А., Будников А.Т., Виноград Э.Л., Данилов П.А., **Галунов Н.З.**, Зубер В.М., Катрич Н.П., Крайнов И.П., Карамышев Г.А., Семиноженко В.П., Слюсарь С.П., Тарасов В.А., Шишов Н.И. // Препр. ИМК-89-5/ Харьков: ВНИИ Монокристаллов, 1989. – 16 с.

64. Жидкие синтилляторы и их использование для определения загрязненности природных жидких сред техногенными и природными радионуклидами / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Красовицкий Б.М., Лысова И.В. // Тезисы 3-го Всесоюзн. симпоз. “Изотопы в гидросфере”. – Каунас, 1989. – С. 34–35.

65. The radioluminescence of stilbene single crystals with high structural perfection / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Krainov I.P. // Abstr. International Conf. on the Chemistry of the Organic Solid State. IX. – Villa Olmo-Como (Italy). – 1989. – P. 58.

66. The influence of energy exchange process of charge states on radioluminescence pulse rise in organic solids / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Krainov I.P. // Abstr. International Conf. on the Chemistry of the Organic Solid State. IX. – Villa Olmo-Como (Italy). – 1989. – P. 59.

67. К вопросу о детектировании ионизирующих излучений во время и после электролиза тяжелой воды / Боровой И.А., Виноград Э.Л., **Галунов Н.З.**, Крайнов И.П., Перерва В.Ф., Семиноженко В.П., Слюсарь С.П., Тарасов В.А., Шишов Н.И. // Препр. ИМК-89-9/ Харьков: ВНИИ Монокрис-

таллов, 1989. – 13 с.

68. Определение анизотропии коэффициентов диффузии триплетных экситонов в смешанных монокристаллах на основе паратерфенила / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Мнацаканова Т.Р., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Динамика триплетных возбуждений в молекулярных кристаллах. – Киев: Наукова думка, 1989. – С. 83–87.

69. Некоторые особенности триплет-триплетной аннигиляции в жидких сцинтилляторах / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Красовицкий Б.М., Лысова И.В., Цирлин Ю.А., Шишов Н.И. // Динамика триплетных возбуждений в молекулярных кристаллах. – Киев: Наукова думка, 1989. – С. 105–109.

70. The kinetics of photo- and radioluminescence of liquid scintillators / Vitukhnovsky A.G., **Galunov N.Z.**, Sluch M.I. // Abstr. Annual EMLG Conf. “Statistical mechanics of chemically reacting liquids”. VII. – Novosibirsk – 1989. – P. 53.

71. К вопросу о миграции энергии триплетного возбуждения в органических молекулярных полупроводниках **Галунов Н.З.**, Коваль Л.П., Соломонов В.М., Шишов Н.И. // Тезисы 13-го Межвуз. семинара по органическим полупроводникам. – Горький. – 1989. – С. 12.

72. Особенности миграции энергии триплетного возбуждения в органических молекулярных системах, находящихся в различных агрегатных состояниях / **Галунов Н.З.**, Коваль Л.П., Соломонов В.М., Шишов Н.И. // Тезисы Всесоюзн. совещания по молекулярной люминесценции. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1989. – С. 188.

73. Временное и энергетическое разрешение сцинтиллятора BaF2 с конвертором излучения / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Кузнеченко А.В., Лебедев В.Н., Лысова И.В., Шишов Н.И. // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 5. – С. 85–86.

74. Некоторые аспекты использования органических люминофоров в органических сцинтилляторах / Афанаси-

ади Л.Ш., **Галунов Н.З.** // Органические люминесцентные материалы: Сб. науч. тр. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1989. – № 24. – С. 115–125.

1990

75. Some features of stilbene single crystal growth from melt containing electron-seeking addition agents / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Krainov I.P. // SGK Newsletter. – 1990. – No. 24. – P. 15–16.

76. Кинетика замедленной радиолюминесценции в органических молекулярных системах / **Галунов Н.З.**, Шишов Н.И. // Тезисы III конф. науч. - уч. центра “Применение физико-химических исследований в науке и технике”. – Ч.1. – М.: Ун-т Дружбы народов, 1990. – С. 57.

77. Влияние светосбора на быстродействие органических сцинтилляторов / **Галунов Н.З.**, Цыганко Т.А. // Приборы и техника эксперимента. – 1990. – № 1. – С. 97–100.

78. Особенности миграции энергии триплетного возбуждения в органических молекулярных системах, находящихся в различных агрегатных состояниях / **Галунов Н.З.**, Коваль Л.П., Соломонов В.М., Шишов Н.И. // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1990. – Т.54, № 1. – С. 485–488.

79. Органические монокристаллы с регулируемым структурным совершенством / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Крайнов И.П. // Препр. ИМК-90-8/ Харьков: ВНИИ Монокристаллов, 1990. – 31 с.

80. Быстродействующие органические синтилляторы / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Копина И.В. // Тезисы VI Всесоюзн. конф. “Люминофоры-90”. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1990. – С. 17.

81. Применение люминофоров, содержащих теофиловый цикл, в быстродействующих сцинтилляторах / **Галунов Н.З.**, Лысова И.В., Паценкер Л.Д. // Тезисы VI Всесоюзн. конф. “Люминофоры-90”. – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1990. – С. 50.

82. Некоторые особенности кинетики радио- и фотолюминесценции жидких органических молекулярных систем на основе невязких растворителей / Афанасиади Л.Ш., Витухновский А.Г., **Галунов Н.З.**, Лысова И.В., Случ М.И. // Краткие сообщения по физике. – 1990. – № 6. – С. 9–11.

83. The growth of stilbene single crystals with high structural perfection / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Krainov I.P. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1990. – Vol.186, No.1. – P. 159–166.

84. The influence of energy exchange process of charge states on radioluminescence pulse shape rise in organic solids / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Krainov I.P. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1990. – Vol. 186, No. 1. – P. 151–157.

1991

85. The study of the energy transfer of the triplet excitation in the organic solids with different structure / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Shishov N.I. // Abstr. International Conf. on the Chemistry of the Organic Solid State. X – Vancouver (Canada). – 1991. – P. 28.

86. The influence of melt centres having the charge-transfer complex-like structure on the molecular crystal growth / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Krainov I.P. // Abstr. International Conf. on the Chemistry of the Organic Solid State. X – Vancouver (Canada). – 1991. – P. 29.

87. Кинетика замедленной радиолюминесценции в органических молекулярных системах / **Галунов Н.З.**, Шишов Н.И. // М.: Ун-т Дружбы народов, 1991.

1992

88. Anisotropy organic systems as molecular materials for electronics / Krainov I.P., **Galunov N.Z.**, Tolmachev A.V., Lisetsky L.N. // Abstr. European Conf. on molecular electronics

(ECME92). – Padua (Italy). – 1992. – A. 39.

89. The radioluminescence study as a method for investigation of structure features of organic molecular solids / **Galunov N.Z.** // Abstr. European Conf. on molecular electronics (ECME92). – Padua (Italy). – 1992. – A. 17.

90. The properties of molecular crystals growing from the melt containing electron-seeking addition agents / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Krainov I.P. // Abstr. European Conf. on molecular electronics (ECME92). – Padua (Italy). – 1992. – A. 40.

91. Регистрация ионизирующих излучений и измерение тепла при электрохимическом внедрении дейтерия в палладий / **Галунов Н.З.**, Тарасов В.А. // Тезисы 1-го Международн. семинара “Металл-водород-92”. – Донецк. – 1992. – С. 16.

92. Сцинтилляционный процесс и свойства жидких сцинтилляторов / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Зволинский В.П., Шишов Н.И. // М.: Университет Дружбы народов, 1992.

1993

93. The influence of a structure and state of aggregation on delay radioluminescence kinetics for organic condense matter / **Galunov N.Z.**, Shishov N.I. // Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. – 1993. – Vol. 17A, No. 5. – P. 1762.

94. The new knowledge of the radioluminescence excitation mechanism for an organic condensed matter / **Galunov N.Z.** // Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. – 1993. – Vol.17A, No. 5. – P. 1801–1802.

95. К вопросу о механизме радиолюминесценции органических конденсированных сред / **Галунов Н.З.** // Письма в ЖЭТФ. – 1993. – Т 57, № 9. – С. 553–556.

96. The study of the properties of organic bulk materials based on the new knowledge of their radioluminescence mechanism / **Galunov N.Z.** // Abstr. Symp. on Unconventional Photoactive

Solids. – Leuven (Belgium). – 1993. – P. 87–88.

97. The radioluminescence excitation mechanism for organic bulk materials / **Galunov N.Z.**, Shishov N.I. // Abstr. Symp. on Unconventional Photoactive Solids. – Leuven (Belgiam). – 1993. – P. 89.

98. Кинетика светособирания в изотропных сцинтилляторах / **Галунов Н.З.**, Тарасенко О.А. // Тезисы Межгосуд. конф. “Сцинтилляторы-93”. – Ч.2. – Харьков: Институт монокристаллов АН Украины, 1993. – С. 74–75.

99. Особенности радиолюминесценции органических конденсированных сред / **Галунов Н.З.** // Тезисы Межгосуд. конф. “Сцинтилляторы-93”. – Ч. 2. – Харьков: Институт монокристаллов АН Украины, 1993. – С. 178–179.

100. Механизм замедленной радиолюминесценции в органических сцинтилляторах / **Галунов Н.З.**, Шишов Н.И. // Тезисы Межгосуд. конф. “Сцинтилляторы-93”. – Ч. 2. – Харьков: Институт монокристаллов АН Украины, 1993. – С. 184–185.

101. Жидкий сцинтиллятор / Красовицкий Б.М., **Галунов Н.З.**, Лысова И.В., Афанасиади Л.Ш., Цирлин Ю.А. // А.с. 1163625 СССР, МКИ С 09 К 11/06, G 01 T 1/204; Заявлено 22.02.85; Опубл. 1993 г., Бюл. № 43 – 44. – С. 190.

102. Пластмассовый сцинтиллятор / Копина И.В., **Галунов Н.З.**, Гундер О.А., Лысова И.В., Цирлин Ю.А., Афанасиади Л.Ш., Красовицкий Б.М. // А.с. 1508558 СССР, МКИ С 08 L 25/16, G 01 T 1/204; Заявлено 12.04.90; Опубл. 1993 г., Бюл. № 8. – С. 250.

103. Жидкие сцинтилляторы для идентификации ионизирующих излучений по форме сцинтилляционного импульса / Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.**, Лысова И.В., Прокуронов М.В., Шишов Н.И. // Приборы и техника эксперимента. – 1993. – № 3. – С. 70–73.

104. Комплексная измерительная система радиационного контроля СРК-90 / **Галунов Н.З.**, Крайнов И.П., Круглов Е.М., Перерва В.Ф., Тарасов В.А., Чичикалюк Ю.А. // Препр.

ИМК-92-26/ Харьков: Институт монокристаллов АН Украины, 1993. – 23 с.

105. Anisotropic organic systems as molecular materials for electronics / Krainov I., **Galunov N.**, Tolmachev A., Lisetsky L. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1993. – Vol. 236, No. 1. – P. 113–119.

106. The radioluminescence study as a method for investigation of structure features of organic molecular solids / **Galunov N.** // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1993. – Vol. 236, No. 1. – P. 121–126.

107. The properties of molecular crystals growing from the melt containing electron-seeking addition agents / Budakovsky S., **Galunov N.**, Krainov I. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1993. – Vol. 236, No. 1. – P. 127–132.

108. A study of the energy transfer of the triplet excitation in organic molecular materials / **Galunov N.Z.**, Shishov N.I. // Molecular Materials. – 1993. – Vol. 3, No. 2. – P. 141–146.

1994

109. The radioluminescence as a method for investigation a charge transport in molecular materials for electronics / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Abstr. European Conf. on molecular electronics. II. – Closter-Banz (Germany). – 1994. – P. 120–121.

110. Механизм радиолюминесценции органических молекулярных твердых тел и жидкостей / **Галунов Н.З.**, Тарасенко О.А. // Тезисы Международной конференции по люминесценции. – Т. 1. – М.: ФИАН, 1994. – С. 31.

111. The radioluminescence excitation mechanism for organic bulk materials / **Galunov N.Z.**, Shishov N.I. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1994. – Vol. 252, No. 1. – P. 125–134.

112. The study of the properties of organic bulk materials based on the new knowledge of their radioluminescence mechanism / **Galunov N.Z.** // Molecular Crystals and Liquid

Crystals. – 1994. – Vol. 252, No. 1. – P. 135–143.

1995

113. О влиянии структуры органических твердых тел на механизм их радиолюминесценции / **Галунов Н.З.**, Семиноженко В.П. // Доп. НАН України. – 1995. – № 4. – С. 53–55.

114. Radioluminescence as a method for investigation of electronic processes in organic materials / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A., Jarichkin V.V. // Proc. International school-conf. “Electronic processes in organic materials” – Kiev (Ukraine). – 1995. – P. 37.

115. Структура органических люминесцентных композиций и их радиолюминесцентные свойства / **Галунов Н.З.**, Семиноженко В.П. // Тезисы Международной конференции “Физика и химия органических люминофоров”. – Харьков: Институт монокристаллов НАН Украины, 1995. – С. 27.

116. Механизм специфического тушения радиолюминесценции органических молекулярных систем / **Галунов Н.З.**, Ярычкин В.В. // Тезисы Международной конференции “Физика и химия органических люминофоров”. – Харьков: Институт монокристаллов НАН Украины, 1995. – С. 28.

117. Тиофен- и фураносодержащие производные оксазола и 1,3,4-оксадиазола в качестве люминесцирующих добавок жидких и пластмассовых сцинтилляторов / Паценкер Л.Д., Лысова И.В., Афанасиади Л.Ш., Копина И.В., **Галунов Н.З.**, Гундер О.А. // Тезисы Международной конференции “Физика и химия органических люминофоров”. – Харьков: Институт монокристаллов НАН Украины, 1995. – С. 85.

118. The radioluminescence as a method for investigation of a charge transport in molecular materials / **Galunov N.Z.**, Jarichkin V.V, Tarasenko O.A. // Molecular Materials. – 1995. – Vol. 5, No. 3. – P. 189–193.

119. Механизм радиолюминесценции органических молекулярных твердых тел и жидкостей / **Галунов Н.З.**, Тарасенко О.А. // Журнал прикладной спектроскопии. – 1995. – Т.

62, № 3. – С. 84-86.

1996

120. Structure of organic luminescent compositions and their radioluminescence properties / **Galunov N.Z.**, Seminozhenko V.P. // Functional Materials. – 1996. – Vol. 3, No. 4. – P. 395–399.

121. Mechanism of specific radioluminescence quenching in organic crystals / **Galunov N.Z.**, Jarichkin V.V. // Functional Materials. – 1996. – Vol. 3, No. 4. – P. 408–411.

122. Thiophene and furan derivatives of oxazole and 1,3,4-oxadiazole as luminescent dopants for liquid and plastic scintillators / Patsenker L.D., Lysova I.V., Afanasiadi L.Sh., Kopina I.V., **Galunov N.Z.**, Gunder O.A. // Functional Materials. – 1996. – Vol. 3, No. 4. – P. 534–540.

1997

123. Luminescence kinetics of organic molecular materials for different types of excitation / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Functional Materials. – 1997. – Vol. 4, No. 2. – P. 272–279.

124. Теория и применение радиолюминесценции органических конденсированных сред / **Галунов Н.З.**, Семиноженко В.П. // Київ.: Наукова думка, 1997 – 279 с.

1998

125. Peculiarities of scintillation pulse time parameters measurement using the single-photon technique / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A., Jarichkin V.V., Vasilyiev D.V. // Functional Materials. – 1998. – Vol. 5, No. 1. – P. 117–121.

126. Electronic processes causing the radioluminescence of organic condense media / **Galunov N.Z.**, Seminozhenko V.P. // Abstr. Euro-physics Conf. on Electronic Processes in Organic Materials. II. – Kiev (Ukraine). – 1998. – Europhysics Conf.

Abstracts. – 1998. – Vol. 22B. – P. 125.

127. Migration of triplet excitons generated by ionising radiation in organic materials / **Galunov N.Z.**, Jarichkin V.V. // Abstr. Europhysics Conf. on Electronic Processes in Organic Materials. II.– Kiev (Ukraine). – 1998. – Europhysics Conf. Abstracts. – 1998. – Vol. 22B. – P. 126.

128. Thermo- and photostimulated currents in bioequivalent liquid crystalline structures / Lisetsky L.N., Malikov V.Ya., Sidletskiy O.Ts., **Galunov N.Z.** // Abstr. Europhysics Conf. on Electronic Processes in Organic Materials. II. – Kiev (Ukraine). – 1998. – Europhysics Conf. Abstracts. – 1998. – Vol. 22B. – P. 131.

129. Delayed radioluminescence study as the method to estimate a concentration of structural imperfection forming triplet excitation traps / **Galunov N.Z.**, Jarichkin V.V. // Functional Materials. – 1998 – Vol. 5, No. 2. – P. 256–258.

130. Some new approaches to obtain the organic crystals with high quality / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Seminozhenko V.P. // Book of Lecture Notes of First International School on Crystal Growth Technology. – Beatenberg (Switzerland). – 1998. – P. 777–778.

131. New generation of high effective organic scintillators and their process technology / **Galunov N.Z.** // Trans. of International Technology Transfer Conf. – Iowa State University (USA). – 1998. – P. 124–126.

132. Electronic processes causing the radioluminescence of organic condense media / Seminozhenko V.P., **Galunov N.Z.** // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1998. – Vol. 324, No. 1. – P. 153–159.

133. Migration of triplet excitons generated by ionising radiation in organic materials /**Galunov N.Z.**, Mudry A.I., Stepanenko A.M., Yarychkin V.V. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1998. – Vol. 324, No. 1. – P. 161–167.

1999

134. Детекторы на основе органических сцинтилляторов с улучшенными эксплуатационными характеристиками / Андрющенко Л.А., Будаковский С.В., Гагауз И.Б., **Галунов Н.З.**, Гершун А.С., Горилецкий В.И., Гринев Б.В., Пилипенко В.С., Тицкая В.Д. // Приборы и техника эксперимента. – 1999. – № 6. – С. 30–31.

(Andryushchenko L.A. Budakovsii S.V., Gagaus I.B., **Galunov N.Z.**, Gershun A.S., Goriletsky V.I., Grinev B.V., Pilipenko V.S., Titskaya V.D. Detectors based on organic scintillators with improved operational characteristics // Nuclear experimental techniques –1999 – Vol. 42 No. 6. – P. 30–36.)

135. Delayed radioluminescence of organic crystals of different structural perfection degree / **Galunov N.Z.**, Jarichkin V.V., Mudry A.I. // Functional Materials. –1999. – Vol. 6, No. 2. – P. 354–356.

136. The influence of supermolecular properties of organic molecular crystals on their radioluminescence mechanism / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Stepanenko A.M., Tarasenko O.A. // Functional materials. – 1999. – Vol. 6, No. 4. – P. 772–776.

2000

137. Electronic processes and radioluminescence in crystalline systems with different structure perfection / **Galunov N.Z.**, Seminozhenko V.P. // Abstr. International Conf. “Electronic Processes in Organic Materials”. III. – Kharkov (Ukraine). – 2000. – P. 199–200.

138. Combined detectors based on crystalline p-terphenyl for detection of UV-radiation / Andrushchenko L.A., Baker J.H., Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Titar V.P., Yermolenko I.G. // Abstr. International Conf. “Electronic Processes in Organic Materials”. III. – Kharkov (Ukraine). – 2000. – P. 202.

139. Пристрій для вимірювання електрофізичних влас-

тивостей рідкокристалічних матеріалів / Маліков В.Я., Стадник П.О., Сідлецький О.Ц., Лисецький Л.М., **Галунов М.З.** // Заявка на винахід №2000010237 від 17.01.2000.

2001

140. Radioluminescence mechanism and charge transport phenomena in organic solids / **Galunov N.Z.**, Seminozhenko V.P., Stepanenko A.M. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2001. – Vol. 355, No. 1. – P. 479–490.

141. Electronic processes and radioluminescence for crystalline systems with different structure perfection / **Galunov N.**, Seminozhenko V., Stepanenko A. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2001. – Vol. 361, No. 1. – P. 287–292.

142. Combined detectors based on crystalline p-terphenyl for detection of UV-radiation / Andrushchenko L., Baker J., Budakovsky S., **Galunov N.**, Titar V., Yermolenko I. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2001. – Vol. 361, No. 1. – P. 293–298.

143. Органические сцинтилляторы / Семиноженко В.П., **Галунов Н.З.**, Сенчишин В.Г. // Розділ в книзі “Функциональные материалы для науки и техники”. – Харків: Інститут монокристалів НАН України, 2001. – С. 111–131.

144. Особенности радиолюминесценции органических молекулярных систем / **Галунов Н.З.**, Красовицкий Б.М., Лысова И.В., Афанасиади Л.М. // Тезисы доклада на Международной конференции по люминесценции, посвященной 110-летию со дня рождения академика С.И. Вавилова, 17-19 октября 2001, Москва.

2002

145. Organic luminescent polycrystals as the novel materials for detecting ionizing radiations / Budakovsky S., **Galunov N.**, Rybalko A., Tarasenko O. // Abstracts of 4-th International Conference on Electronic Processes in Organic Materials, Lviv,

June 3-8, 2002.– P. 116–117.

146. Устройство для измерения диэлектрических характеристик жидкокристаллических материалов, твердых веществ и их расплавов / Маликов В.Я., Стадник П.Е., Сидлецкий О.Ц., Лисецкий Л.Н., Будаковский С.В., **Галунов Н.З.** // Приборы и техника эксперимента, 2002. – № 4 – С. 150–152.

147. Spectral properties and applications of the new 7H-benzo[de] pyrazolo[5,1-a] isoquinolin-7-ones / **Galunov N.Z.**, Krasovtskii B.M., Lyubenko O.N., Yermolenko I.G., Patsenker L.D. // In Abstracts of International Conference Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Metter. Budapest, Hungary, August 24 – 29, 2002. – P. 133.

148. Organic polycrystals as the new luminescent system for scintillation and ecology techniques / **Galunov N.Z.**, Budakovsky S.V., Tarasenko O.A., Rybalko A.Yu., Yarychkin V.V. // In Abstracts of International Conference n Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Metter. Budapest, Hungary, August 24 – 29, 2002. – P. 134.

149. Doped organic single crystals as solar energy converters / Baker J.H., Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Patsenker L.D., Fedyunyaeva I.A., Stepanenko A.M. // Functional Materials, 2002. – Vol. 9, No. 3. – P. 503-507.

150. Organic luminescent polycristals as novel materials for detecting ionizing radiation / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Rybalko A.Yu., Tarasenko O.A., Yarychkin V.V. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2002. – Vol. 385, No. 1. – P. 71 – 77.

151. New light shifters for solar energy converters / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Krasovitski B.M., Titar V.P., Patsenker L.D. // Functional Materials, 2002, V. 9, No. 4. – P. 727–731.

2003

152. Полікристалічний органічний сцинтилятор та спосіб його виготовлення / Андрущенко А.Ю., Бланк А.Б.,

Будаковський С.В., **Галунов М.З.**, Шевцов М.І., Тарасенко О.А. // Патент України на винахід № 57950 А, С04В35/00, від 15.07.2003, бюл. № 7.

153. Some aspects of discrimination techniques of neutrons and photons of gamma radiation measurements in geological applications / Baker J., **Galunov N.**, Stepanenko A., Tarasenko O., Yarychkin V. // In Book of Abstracts of 5th European Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation. – Prague, September 1-5, 2003. – P. 171.

154. Scintillation process in organic materials / **Galunov N.**, Tarasenko O. // In Book of Abstracts of 5th European Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation. – Prague, September 1-5, 2003. – P. 21.

155. Spectral properties and applications of the new 7H-benzo[de]pyrazolo[5,1-a]isoquinolin-7-ones / **Galunov N.Z.**, Krasovitskii B.M., Lyubenko O.N., Yermolenko I.G., Patsenker L.D., Doroshenko A.O. // Journal of Luminescence. – 2003. – Vol. 102–103. – P. 119–124.

156. Organic polycrystals as the new luminescent system for scintillation and ecology techniques / **Galunov N.Z.**, Baker J.H., Budakovsky S.V., Tarasenko O.A., Rybalko A.Yu., Yarychkin V.V. // Journal of Luminescence. – 2003. – Vol. 102–103. – P. 464–468. https://doi.org/10.1016/S0022-2313(02)00579-3.

157. Органические поликристаллические сцинтилляторы с улучшенными характеристиками / Андрющенко Л.А., Будаковский С.В., Гагауз И.Б., **Галунов Н.З.**, Гордиенко Л.С., Гринев Б.В., Зеленская О.В., Тарасенко О.А., Теплицкая Т.А. // Приборы и техника эксперимента, 2003, № 5, – С. 15–19.

(Andryushchenko L.A., Budakovskii S.V., Gagauz I.B., **Galunov N.Z.**, Gershun A.S., Gordiyenko L.S., Grinyov B.V., Zelenskaya O.V., Tarasenko O.A., Teplizkaya T.A, Detectors based on organic scintillators with improved operational characteristics // Instruments and Experimental Techniques. – 2003. – Vol. 46, No. 5. – P. 591–595.)

158. Scintillation material for determination of radionuclides

in water / Andryushchenko A.Yu., Blank A.B., Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Shevtsov N.I., Tarasenko O.A. // Nuclear instruments and Methods in physics research. 2003, Section A, Vol. A 511, Issue 3. – P. 425 – 430.

2004

159. Some aspects of discrimination techniques for the measurement of neutrons and photons of gamma radiation in geological applications / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Stepanenko A.M., Tarasenko O.A. // Radiation measurements. 2004. – Vol. 38, No. 4-6. – P. 817–820. http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.01.017

160. Some aspects of electron excitation energy exchange in organic scintillators / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A., Seminozhenko V.P. // Abstracts of 5-th International Conference on Electronic Processes in Organic Materials, Kiev, May 24-29, 2004.– P. 28–29.

161. Organic polycrystalline scintillation systems, obtained by cold-pressure technique / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Khomiakova I.G., Martynenko E.V., Tarasenko O.A. // Abstracts of 5-th International Conference on Electronic Processes in Organic Materials, Kiev, May 24-29, 2004. – P. 199–200.

162. Поликристаллические органические сцинтилляторы – новый вид эффективных детектирующих материалов для заряженных короткопробежных ионизирующих излучений / **Галунов Н.З.**, Хомякова И.Г., Мартыненко Е.В., Будаковский С.В., Тарасенко О.А. // Труды XVI Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – Алушта, Крым, 6-11 сентября 2004. – С. 345–346.

163. Особенности сцинтилляционного процесса в органических сцинтилляторах / **Галунов Н.З.**, Гринев Б.В., Тарасенко О.А. // Труды XVI Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – Алушта, Крым, 6-11 сентября 2004. – С.

347–348.

164. Some aspects of scintillation mechanism in organic molecular dielectrics / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Tarasenko O.A. // In abstract book of Joint KRS (Korean Radioactive Waste Society) – KARP (Korean Association for Radiation Protection) Seminar, Jeju, Korea, Nov.10-11, 2004.– P. 281 – 282.

2005

165. Methodical aspects of organic scintillators certification on their discrimination ability / **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V. // Abstracts book of the International Conference “CRYSTAL MATERIALS’2005” (ICCM’2005). Scientific & Technology Corporation “Institute for Single Crystals, Kharkov, Ukraine, May 30 – June, 2005. – P. 89.

166. Methodical aspects and measuring set-up for investigation the ability to selective detection of different ionizing radiations by organic scintillators / **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V., Tarasenko O.A. // Abstracts book of the International Conference “Functional Materials” ICFM’2005. – Partenit, Crimea, Ukraine, October 3-8, 2005. – P. 255.

167. Жидкие сцинтилляторы / Красовицкий Б.М., Афанасиади Л.Ш., **Галунов Н.З.** // Розділ в книзі “НТК “Институт монокристаллов”. Страницы истории 1955–2005”. – Харків: НТК “Інститут монокристалів” 2005. – С. 151–158.

168. Модернизация установки для исследования диэлектрической проницаемости сцинтилляционных прессованных органических кристаллов / **Галунов Н.З.**, Маликов В.Я., Стадник П.Е. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005, том 71, № 5. – С. 39–40.

169. Some aspects of scintillation mechanism in organic molecular dielectrics / **Galunov N.Z.**, Grinyev B.V., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. // Journal of Radiation Protection. – 2005. – Vol. 30, No 2. – P. 85–89.

170. Жидкий сцинтиллятор / Гринев Б.В., **Галунов Н.З.**, Красовицкий Б.М., Паценкер Л.Д., Лысова И.В., Хабусева

С.У. // Заявка на патент России № 2003137258. Решение о выдачи патента от 29.06.2005.

171. Особенности сцинтилляционного процесса в органических сцинтилляторах / **Галунов Н.З.**, Гринев Б.В., Тарасенко О.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (88), 2005. № 5. – С. 176–181.

2006

172. A technique for the selective detection of neutrons in geological applications / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Kostin V.G., Martynenko E.V, Tarasenko O.A. // IV Conference of high energy physics and accelerators. Kharkov, Ukraine, 27th of February – 3rd of March 2006. – P. 95–96.

173. Ionizing radiation energy exchange in the regions of high activation density of organic scintillators / **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V. // Abstracts book of the 6th European Conference on Luminescencent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation (LUMDETR 2006) June 19-23 Lviv, Ukraine. – P. 31.

174. A combined NaI(Tl)+LiI(Eu) detector for environmental and geological applications / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Seminozhenko V.P., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. // Ibidem – P. 240.

175. Stilbene crystalline powder in polymer base as the new fast neutron detector / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Kim J.K., Kim Y.K., Pogorelova N.V., Tarasenko O.A. // Ibidem – P. 80.

176. Methodical aspects and measuring set-up for investigation the ability to selective detection of different ionising radiations by organic scintillators / **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V., Tarasenko O.A. // Functional Materials, 2006. – Vol 13, No. 2. – P. 359 – 364.

177. Поликристаллические органические сцинтилляторы – новый вид эффективных детектирующих материалов

для заряженных короткопробежных ионизирующих излучений / **Галунов Н.З.**, Хомякова И.Г., Мартыненко Е.В., Будаковский С.В., Тарасенко О.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение – 2006. – № 4. – С. 214–220.

178. Study of ionising particle track formation based on scintillation pulse amplitude and shape measurements / **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V., Tarasenko O.A. // Труды XVII Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – Алушта, Крым, 4-9 сентября 2006. – С. 259-260.

179. Органічні моно- та полікристалічні сцинтилятори: технологія отримання та люмінесцентні властивості / Будаковський С.В., **Галунов М.З.**, Гриньов Б.В., Тарасенко О.А. // В сб. Диэлектрики и полупроводники в детекторах излучений. – Харьков: Институт монокристаллов, 2006. – С. 209–229.

180. A study of the temperature dependence on light yield for some typical scintillators / Baker J.H., Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Onyshchenko G.M., Ryzhikov V.D., Tarasenko O.A. // В сб. Диэлектрики и полупроводники в детекторах излучений. – Харьков: Институт монокристаллов, 2006. – С. 230–241.

181. Neutron-gamma logging as a technique for detection unexploded bombs in a soil / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Tarasenko O.A. // В сб. Диэлектрики и полупроводники в детекторах излучений. – Харьков: Институт монокристаллов, 2006. – С. 277–310.

182. New effective organic scintillators for fast neutron and short-range radiation detection / **Galunov N.Z.**, Budakovsky S.V., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. // Book of abstracts of Nuclear Science Symposium. – San-Diego CA, USA, October 29 – November 4, 2006. – P. 111.

183. New effective organic scintillators for fast neutron and short-range radiation detection / Budakovsky S.V., **Galunov**

N.Z., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. // Conference Record of Nuclear Science Symposium. – San-Diego CA, USA, October 29 – November 4, 2006. – P. 935–939.

2007

184. A technique for the selective detection of neutrons in geological applications / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Kostin V.G., Martynenko E.V., Tarasenko O.A. // Problems of atomic science and technology. – Series: Nuclear Physics Investigations. 2007, Vol. 48, No. 5. – P. 126–130.

185. Рідкий сцинтилятор / **Галунов М.З.**, Гриньов Б.В., Лисова І.В., Тарасенко О.А., Красовицький Б.М., Десенко С.М., Афанасіаді Л.М. // Заявка на винахід МПК7 GO1T 1/204, C09R 11/06.

186. Non-linearity of organic stilbene scintillators response on alpha – excitation / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Martynenko E.V. // Book of abstracts of International conference "Functional Material" Ukraine, Crimea, Partenit, October 1-6, 2007. – P. 352.

187. Stilbene crystalline powder in polymer base as the new fast neutron detector / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Pogorelova N.V., Tarasenko O.A. // Radiation Measurements, 2007, Vol. 42, Nos. 4-5. – P. 565–568. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.058

188. Ionizing radiation energy exchange in the regions of high activation density of organic scintillators / **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V. // Radiation Measurements, 2007, Vol. 42, Nos. 4-5. – P. 715-718. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.060

189. A combined NaI(Tl)+LiI(Eu) detector for environmental, geological and security applications / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Seminozhenko V.P., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. // Radiation Measurements, 2007, Vol. 42, Nos. 4-5. – P. 937-940. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.044

190. Luminescence and scintillation properties of barium and strontium iodides doped with rare-earth ions / Cherginets V.,

Grinyov B., **Galunov N.**, Ponomarenko T., Trefilova L., Tarasenko O., Zelenskaya O., Alekseev V., Kosinov N., Litichevsky A. // Abstracts of the IEEE 9 International Conference on Inorganic Scintillators and their Applications, June 4-8, 2007, Wake Forest University Winston-Salem, NC USA. – P. 77.

191. YCl3:Ce and YBr3:Ce crystals as scintillation detectors of X- and soft γ-radiation / Trefilova L., Grinyov B., Cherginets V., **Galunov N.**, Ponomarenko T., Tarasenko O., Zelenskaya O., Alekseev V., Kosinov N., Litichevsky A. // Abstracts of the IEEE 9 International Conference on Inorganic Scintillators and their Applications, June 4-8, 2007, Wake Forest University Winston-Salem, NC USA. – P. 167.

192. Some Features of Ionizing Radiation Energy Losses in Organic Polycrystalline and Composite Scintillators / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. Budakovsky S.V. // Abstracts of 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 28 – Nov. 3, 2007, Hawaii, USA. – P. 261.

193. Detectors for Envi-ronmental and Geo-logical Studies / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Abstracts of 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 28 – Nov. 3, 2007, Hawaii, USA.– P. 147.

194. Some Features of Ion-izing Radiation Energy Losses in Organic Polycrystal-line and Composite Scintillators / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. Budakovsky S.V. // Conference Record of 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 28 – Nov. 3, 2007, Hawaii, USA. – P. 2469–2475.

195. Neutron Scintillation Detectors for Environmental and Geological Studies / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Abstracts of 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 28 – Nov. 3, 2007, Hawaii, USA.– P. 105.

196. Novel Fast Neutron Detectors for Environmental and

Medical Applications / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A. // Abstracts of the 4-th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology, ISORD-4, July 18-20, 2007, Hanyang University, Seoul, Korea. – P. 124.

197. New Effective Organic Scintillators for Fast Neutron and Short-Range Radiation Detection / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2007, Vol. 54, No. 6. – P. 2734–2740. https://doi.org/10.1109/TNS.2007.910423

198. Органические поликристаллические сцинтилляторы на основе стильбена и п- терфенила / Будаковский С.В., **Галунов Н.З.**, Гордиенко Л.С., Тарасенко О.А. // В кн. “Сцинтилляционные материалы: получение, свойства, применение”. Харьков: Фолио, 2007. – С. 144–176.

2008

199. Some features of ionizing radiation energy losses in organic polycrystalline and composite scintillators / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. Budakovsky S.V. // Conference Record of 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 28 – Nov. 3, 2007, Hawaii, USA, 2008, N57-6. – P. 2469–2475.

200. Neutron scintillation detectors for environmental and geological studies / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Conference Record of 2007 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 28 – Nov. 3, 2007, Hawaii, USA, 2008, N24-174. –P. 1358–1364.

201. Semiempirical description of quenching process in track of ionizing particles for organic crystalline scintillators / **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V. // Functional materials. 2008, Vol. 15, No. 3.– P. 380–387.

202. Variation of Scintillation Light Yield of Organic

Crystalline Solids for Different Temperatures / Baker J.H., **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2008 Vol. 55, No. 5. – P. 2736–2738. https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2002146

203. Ionizing Radiation Energy Exchange in Organic Single-Crystalline and Composite Scintillators / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V., Budakovsky S.V. // Abstracts of 2008 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 19-25, Dresden, Germany, N69-1. – P. 328.

204. Novel fast neutron detectors for environmental and medical applications / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Karavaeva N.V., Budakovsky S.V. // Journal of Nuclear Science and Technology – Supplement 5. – 2008. – P. 367–370. https://doi.org/10.1080/00223131.2008.10875865

205. Нейтронные излучения и их детектирование, основанное на сцинтилляционном методе. История и перспективы / **Галунов Н.З.** // Тезисы доклада международной конференции “Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии”, 16-21 ноября 2008, Харьков, Украина. – С. 20.

206. Органические сцинтилляционные материалы нового поколения / **Галунов Н.З.**, Гринев Б.В., Ким Дж.К., Ким Й.К., Тарасенко О.А. // Тезисы доклада международной конференции “Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии”, 16-21 ноября 2008, Харьков, Украина. – С. 64.

207. Development of new composite scintillation materials based on organic crystalline grains / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. // Abstracts of 2008 Symposium on Radiation Measurements and Applications, June 2-5, 2008, Berkeley, California, USA, Wednesday AM1.– P. 2–3.

208. Ionizing Radiation Energy Exchange in Organic

Single-Crystalline and Com-posite Scintillators / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V., Budakovsky S.V. // Conference Record of 2007 IEEE Nuclear Sci-ence Symposium and Med-ical Image Conference, Oct. 28 – Nov. 3, 2007, Hawaii, USA, 2008, N24-174. – P. 1358–1364.

209. Сцинтилляционные и спектральные характеристики органических поликристаллических и композиционных сцинтилляторов / Мартыненко Е.В., **Галунов Н.З.** // Тезисы доклада международной конференции "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии", 16-21 ноября 2008, Харьков, Украина. – С. 78.

210. Спектрально-кинетические свойства сцинтилляционных кристаллов YCl3:Ce и YBr3:Ce / Трефилова Л.Н., Чергинец В.Л., **Галунов Н.З.**, Пономаренко Т.В., Тарасенко О.А. Зеленская О.В., Алексеев В.Д., Косинов Н.Н., Литичевский А.М. // Тезисы доклада международной конференции "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии", 16-21 ноября 2008, Харьков, Украина. – С. 85.

211. Ionizing Radiation Energy Exchange in Organic Single-Crystalline and Composite Scintillators / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V., Budakovsky S.V. // Conference Record of 2008 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 19-25, Dresden, Germany, N69–1.

212. Жидкий сцинтиллятор / Андрющенко Л.А., Бедрик О.А., **Галунов Н.З.**, Гриньов Б.В., Тарасенко О.А., Тарасов В.А., Шершуков В.М. // Получен приоритет по заявке № 200810334 от 12.08.08.

213. Спосіб виготовлення органічного сцинтилятору на основі стильбену для реєстрації швидких нейтронів / Караваєва Н.Л., Тарасенко О.А., **Галунов М.З.** // Рішення № 13558/1 від 16.09. 2008 р. (заявка № u200808206 від 17.06.2008р.) про видачу деклараційного патенту на корисну модель.

2009

214. Сцинтиляційний детектор на основі органічного сцинтилятору / Караваєва Н.Л., Будаковський С.В., **Галунов М.З.** // Пат. 86136 України, МПК51 G01T 1/20, G01T 3/00. № a200708433; заявл. 23.07.07; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

215. Primary energy losses of the radioluminescence of organic crystalline materials / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Kim J.-K., Kim Y.K., Tarasenko O.A. // Abstracts of the 10-th International Conference on Inorganic scintillators and their Applications, SCINT 2009, June 8-12, 2009, Lotte Hotel, Jeju, Korea. – P. 132.

216. New generation of organic scintillation materials / Budakovski S.V., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Kim J.-K., Kim Y.K., Tarasenko O.A. // Functional Materials. – 2009. – Vol.16, No. 1. – P. 86–91.

217. Development of new composite scintillation materials based on organic crystalline grains / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Kim J.K., Kim Y.K., Tarasenko O.A., Martynenko E.V. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2009. – Vol. 56, No. 3. – P. 904–910. https://doi.org/10.1109/TNS.2009.2015761

218. Розробка промислових методів отримання та організація дослідного виробництва сцинтиляторів на основі стильбену і п-терфенілу для митного та екологічного моніторингу / Будаковський С.В., **Галунов М.З.**, Гриньов Б.В., Тарасенко О.А. // Наука та інновації 2009, Т. 5, №5. – С. 25-33.

219. Gadolinium pyrosilicate single crystals for gamma ray and thermal neutron monitoring / Sidletskiy O., Baumer V., Bondar V., **Galunov N.**, Gerasymov I., Grinyov B., Katrunov K., Tarasenko O., Tarasov V., Voloshina O., Zelenskaya O. // Abstracts of the 7th International Conference on Luminescence Detectors and Transformers of Ionizing Radiation LUMDETR 2009 12 – 17 July 2009 AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland. – P. 57.

220. Primary quenching in a track of ionizing particle

for organic scintillation crystalline materials / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Tarasenko O.A. // Abstracts of the 7th International Conference on Luminescence Detectors and Transformers of Ionizing Radiation LUMDETR 2009 12 – 17 July 2009 AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland. – P. 63.

221. Molecular packing in organic anisotropic media: effects of piesothermal factors on optical transmission in polycrystalline samples / Minenko S.S., Tarasenko O.A., Budakovsky S.V., Lisetski L.N., **Galunov N.Z.** // Functional Materials. – 2009. – Vol.16, N 2. – P. 126-129.

222. Scintillation primary quenching in organic condensed media revisited / **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V., Seminozhenko V.P., Tarasenko O.A. // Functional Materials. – 2009. – Vol.16, N 2. – P. 117-121.

223. Composite Scintillators as Detectors for Fast Neutrons and Gamma-Radiation Detection / Iwanowska J., Moszynski M., Swiderski L., Szczesniak T., Syntfeld-Kazuch A., Sibczynski P., **Galunov N.**, Karavaeva N. // Abstracts of 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 25 – 31 2009, Orlando, Florida, USA. – N25–90. – P. 178.

224. Scintillation Properties of Large Area Composite Stilbene Crystal for Neutron Detection / Lee S.K., Kang B.H., Lee W.G., Kim J.K., Kim Y.K., **Galunov N.Z.**, Kim G.D. // Abstracts of 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 25 – 31 2009, Orlando, Florida, USA. – N25-116. – P. 185.

225. Gd-Bearing Composite Scintillators as the New Thermal Neutron Detectors / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Gerasymov Y.V., Sidletskiy O.T., Tarasenko O.A. // Abstracts of 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct. 25 – 31 2009, Orlando, Florida, USA. – N25-90. – P. 178.

226. Composite Scintillators as Detectors for Fast Neutrons and Gamma-Radiation Detection in the Border Monitoring

/ Iwanowska J., Moszynski M., Swiderski L., Szczesniak T., Syntfeld-Kazuch A., Sibczynski P., **Galunov N.**, Karavaeva N. // Conference Record of 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct.25 – 31 2009, Orlando, Florida, USA. – P. 1437–1440.

227. Scintillation properties of Large Area Composite Stilbene Scintillator for Neutron Detection / Lee K.S., Khang H.K., Lee W.G., Kim J.K., Kim Y.K., **Galunov N.Z.**, Kim D.G. // electronic journal Conference Record of 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct.25 – 31 2009, Orlando, Florida, USA. – P. 1509–1512.

228. Gd-Bearing Composite Scintillators as the New Thermal Neutron Detectors / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Gerasymov Y.V., Sidletskiy O.T., Tarasenko O.A. // Conference Record of 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Image Conference, Oct.25 – 31 2009, Orlando, Florida, USA. – P. 1983–1988.

2010

229. Primary quenching in a track of ionizing particle for organic scintillation crystalline materials / **Galunov N.**, Tarasenko O. // Radiation Measurements, 2010, Vol. 45, Nos. 3-6. – P. 380–382. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.01.044

230. Исследование сцинтилляционных и оптических свойств поликристаллического стильбена / Горбачева Т.Е., Лебединский А.М., Паникарская В.Д., Федоров А.Г., **Галунов Н.З.** // Тезисы докладов Международной конференции ИСМАРТ-2010, 14-16 нояб. 2010, Харьков, Украина. – С. 22.

231. Evaluation of a composite stilbene for the fast neutron detection / Kim Y.-K., Kang B.-H., Lee S.K., **Galunov N.Z.**, Kim G.D. // In: Abstract Book of 2010 IEEE NSS-MIC Conference, Oct. 31-Nov .6, Knoxville, Tennessee, USA, N07-6. – P. 19.

232. Combined composite scintillation detector for separate measurements of fast and thermal neutrons / **Galunov N.Z.**,

Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Martynenko E.V., Tarasenko O.A., Gerasymov Y.V., Sidletskiy O.Ts. // In: Abstract Book of 2010 IEEE NSS-MIC Conference, Oct. 31-Nov. 6, Knoxville, Tennessee, USA, N63-1. – P. 218.

233. Combined composite scintillation detector for separate measurements of fast and thermal neutrons / Karavaeva N.L., **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V., Kosinova A.V. // Functional Materials. – 2010. – Vol. 17, N 4. – P. 549 – 553.

2011

234. Evaluation of a Composite Stilbene for the Fast Neutron Detection / Byoung-Hwi Kang, Seung-Kyu Lee, Yong-Kyun Kim, **Galunov N.Z.**, Gi-Dong Kim // Conference Record of the 2010 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2011. – P. 125–127.

235. Combined composite scintillation detector for separate measurements of fast and thermal neutrons / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Martynenko E.V., Tarasenko O.A., Gerasymov Y.V., Sidletskiy O.Ts. // Conference Record of the 2010 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2011. – P. 1813–1818.

236. Gd-Bearing Composite Scintillators as the New Thermal Neutron Detectors / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Gerasymov Y.V., Sidletskiy O.Ts., Tarasenko O.A. // IEEE Transactions on Nuclear Science – 2011. – Vol. 58, No 1. – P. 339 – 346. https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2096516

237. Scintillation properties of composite stilbene crystal for neutron detection / Lee S.K., Cho Y.H., Kang B.H., Lee W.G., Kim J.K., Kim D.G., **Galunov N.Z.**, Kim Y.K. // Progress in Nuclear Scence and Technology – 2011. – Vol.1, No 1. – P. 292 – 295.

238. Crystal growth and scintillation performance of Ce-doped Gd2Si2O7 and related solid solutions / Gerasymov I., Sidletskiy O., Voloshina O., Neicheva S., **Galunov N.**, Starzhinsky N., Grinyov B. // Abstracts of the International Conference on

Materials on Advanced Technologies (ICMAT-2011), Section CGCT-5 - Functional Materials Crystallization, Characterization and Devices, Singapore, June 26 - July 1. – P. 63.

239. Neutron/gamma discrimination properties of composite scintillation detectors / Iwanowska J., Swiderski L., Moszynski M., Szczesniak T., Sibczynski P., **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L. // Journal of Instrumenttion – 2011. Vol. 6, Article number 07007 (10 pages). https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/07/P07007

240. Композиційний сцинтилятор / Караваєва Н.Л., Тарасенко О.А., **Галунов М.З.**, Герасимов Я.В. // Патент України 94678, МПК51 G01T 1/20. Опубліковано: 25.05.2011, Бюл. № 10.

241. Single-Layer and Multilayer Composite Scintillators Based on Organic Molecular Crystalline Grains / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Martynenko E.V., Panikarskaya V.D., Tarasenko O.A., Budakovsky S.V. // Abstract Book of 2011 NSS-MIC Conference, Valencia, Spain, October 23–29 2011. – N34-2. – P. 193–194.

242. Study of scintillation and optical properties of polycrystalline stilbene / Gorbacheva T.E., **Galunov N.Z.**, Panikarskaya V.D., Lazarev I.V. // Functional Materials. – 2011. – V. 18, No. 3. – P. 335–338.

243. Dependence of scintillation characteristics of the detectors on the base of polycrystalline stilbene on initial grain size / Gorbacheva T.E., Lazarev I.V., Panikarskaya V.D., **Galunov N.Z.** // In Abstracts of International Conference «Functional Materials» (ICFM), October 3-8, 2011, Partenit, Crimea, Ukraine. – P. 446.

244. Поликристаллический стильбен и его свойства / Горбачева Т.Е., Лазарев И.В., Паникарская В.Д., Косинов Н.Н., **Галунов Н.З.** // Международная молодежная научно-техническая конференция «Люминесцентные процессы в конденсированных средах» (ЛЮМКОС), 11-18 ноября 2011 г., Харьков, Украина. – С. 113.

245. Формирование треков ионизирующих излучений в

органических конденсированных средах / **Галунов Н.З.**, Тарасенко О.А. // Харьков: ИСМА, 2011, 480 с. ISBN 966-02-2555-5, ISBN 978-966-02-6157-0.

246. Features of 1,4-diphenyl-butadiene distribution in p-terphenyl crystal lattice / Budakovsky S.V., **Galunov N.Z.**, Lazarev I.V., Vashchenko V.V., Vashchenko E.V., Vlasenko A.S., Volkov V.L. // Functional Materials. – 2011. – Vol. 18, No.4. – P. 466–469.

247. Single-Layer and Multilayer Composite Scintillators Based on Organic Molecular Crystalline Grains / **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Martynenko E.V., Panikarskaya V.D., Tarasenko O.A., Budakovsky S.V. // Conference Record of 2011 NSS-MIC Conference, Valencia, Spain, October 23–29, 2011. – P. 1869–1872.

2012

248. Новые сцинтилляторы для детектирования быстрых и тепловых нейтронов / **Галунов Н.З.**, Семиноженко В.П. // Тезисы докладов X конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, Украина, 27 февраля – 2 марта 2012 г. – С. 98.

249. Органические кристаллические сцинтилляционные детекторы процессы тушения в треке частицы / **Галунов Н.З.**, Мартыненко Е.В., Семиноженко В.П., Тарасенко О.А. // Тезисы докладов X конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, Украина, 27 февраля – 2 марта 2012 г. – С. 100.

250. New scintillators for fast and thermal neutron detection / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Seminozhenko V.P. // Functional Materials. – 2012. – Vol. 19, No. 3. – P.394–403.

251. Luminescence energy yields of organic solid materials exited by photons of light or gamma-radiation / Tarasenko O.A., **Galunov N.Z.**, Panikarskaya V.D., Sanin E.V., Tarasov V.A., Volkov V.L. // Functional Materials. – 2012. – Vol. 19, No. 3. – P. 404–409.

252. Зависимость сцинтилляционных характеристик поликристаллов стильбена от условий их получения в процессе горячего прессования / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Лазарев И.В., Мартыненко Е.В., Паникарская В.Д. // Международная школа-семинар молодых ученых “Функциональные материалы для науки и техники”, 10-13 сентября 2012, Украина, Харьков. – С.21.

253. Особенности структуры поликристаллов стильбена и их сцинтилляционные свойства / Горбачева Т.Е., Лазарев И.В., Паникарская В.Д., Косинов Н.Н., **Галунов Н.З.** // Международная школа-семинар молодых ученых “Функциональные материалы для науки и техники”, 10-13 сентября 2012, Украина, Харьков. – С. 62.

254. Органические композиционные сцинтилляторы / **Галунов Н.З.**, Гринёв Б.В., Караваева Н.Л., Мартыненко Е.В., Тарасенко О.А. // В кн. Функциональные материалы для сцинтилляционной техники и биомедицины. – Харьков: ИСМА, 2012. – С. 167 – 193.

255. Сцинтилляторы из монокристаллических гранул / **Галунов Н.З.**, Гринёв Б.В. // Третья международная конференция “Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии”, 19 – 23 ноября 2012, Россия, Дубна. – С. 22 – 23.

256. Энергетический выход радиолюминесценции органических твердотельных сцинтилляторов, возбуждаемых ионизирующими излучениями с различными удельными энергетическими потерями / **Галунов Н.З.**, Тарасенко О.А., Тарасов В.А. // Третья международная конференция “Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии”, 19 – 23 ноября 2012, Россия, Дубна. – С. 30 – 31.

257. Зависимость сцитилляционных характеристик поликристаллов стильбена от условий их получения в процессе горячего прессования / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Лазарев И.В., Мартыненко Е.В., Паникарская В.Д. // Третья международная конференция “Инженерия сцинтилляцион-

ных материалов и радиационные технологии”, 19 – 23 ноября 2012, Россия, Дубна. – С. 58 – 59.

2013

258. Особенности структуры поликристаллов стильбена и их сцинтилляционные свойства / Горбачева Т.Е., Лазарев И.В., Паникарская В.Д., Косинов Н.Н., **Галунов Н.З.** // Тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів ІЕФ-2013. Ужгород, 20-23 травня 2013. – С. 247.

259. Особенности разделения молекул 1,4-дифенил-1,3-бутадиена в монокристаллах п-терфенила выращенных из расплава / **Галунов Н.З.**, Лазарев И.В., Мартыненко Е.В., Ващенко В.В., Ващенко Е.В. // Тезисы докладов школы-семинара “Сцинтилляционные процессы и материалы для регистрации ионизирующего излучения”, 15-18 сентября 2013, Харьков, ИСМА. – С. 23.

260. Features of an ionizing particle track formation and it influence on scintillation process in organic molecular media / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Abstract Book of International Conference Advanced Scintillation Materials (ASM 2013), September 23 - 27, 2013, Kharkov, Ukraine. – P. 28.

261. Scintillation characteristics of stilbene and p-terphenyl polycrystals obtained by hot pressure / Lazarev I.V., **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V., Panikarskaya V.D., Samokhin A.D. // International conference “Functional materials”, Sept. 29 – Oct. 5 2013, Ukraine, Crimea, Yalta, Gaspra. DB-8O/11. – P. 336.

262. Influence of stilbene and p-terphenyl material structure on their scintillation and optical properties / Gorbacheva T.E., Lazarev I.V., Panikarskaya V.D., **Galunov N.Z.** // International conference “Functional materials”, Sept. 29 – Oct. 5, 2013, Ukraine, Crimea, Yalta, Gaspra. EP1-8P/29. – P. 366.

263. Features of an ionizing particle track formation and it influence on scintillation process in organic molecular media / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Abstract Book of the 3rd International Scientific-Technical Conference of Young Scientists

(LUMCOS 2013), Nov. 18–22, 2013, Kharkov, Ukraine. – P. 17–18.

264. Quenching process in an ionizing particle track for organic crystalline scintillation detectors / **Galunov N.Z.**, Seminozhenko V.P., Martynenko E.V., Tarasenko O.A. // Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2013. – No. 3. – P. 210–219. ISSN 1562-6016

265. Зависимость сцинтилляционных характеристик поликристаллов стильбена от условий их получения в процессе горячего прессования / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Лазарев И.В., Мартыненко Е.В., Паникарская В.Д. // В кн.: Тенденции развития сцинтилляционной техники / под редакцией А.В. Гектина – Харьков: “ИСМА”, 2013. 264 с. – С. 240–249.

266. Энергетический выход радиолюминесценции органических твердотельных сцинтилляторов, возбуждаемых ионизирующими излучениями с различными энергетическими потерями / **Галунов Н.З.**, Тарасенко О.А., Тарасов В.А. // В кн.: Тенденции развития сцинтилляционной техники/ под редакцией А.В. Гектина – Харьков: “ИСМА”, 2013. 264 с. – С. 250–263.

267. Scintillation and optical properties of polycrystalline p-terphenyl / Gorbacheva T.E., **Galunov N.Z.**, Panikarskaya V.D., Lazarev I.V. // Functional Materials. – 2013. – Vol. 20, No.2. – P. 149–152.

268. Энергетический выход радиолюминесценции органических твердотельных сцинтилляторов, возбуждаемых различными ионизирующими излучениями / **Галунов Н.З.**, Тарасенко О.А., Тарасов В.А. // Журн. прикл. спектр. – 2013. – Т. 80, № 4. – С. 565–570.

(**Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A., Tarasov V.A. Radioluminescence energy yield of organic solid scintillators excited by ionizing radiations with different specific energy loss // Journal of Applied Spectroscopy. – 2013. – Vol.80, No. 4. –

P.550 – 555. DOI https://doi.org/10.1007/s10812-013-9803-7)

269. Determination of the light yield of organic scintillators / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A., Tarasov V.A. // Functional Materials. – 2013. – Vol. 20, No. 3. – P. 304–309. http://dx.doi.org/10.15407/fm20.03.304

270. Stilbene composite scintillators as detectors of fast neutrons emitted by a 252Cf source / Tarasenko O.A., **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Lazarev I.V., Panikarskaya V.D. // Radiation Measurements. 2013. Vol. 58. – P. 61 – 65. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.08.005

271. Органические композиционные сцинтилляторы – новый класс сцинтилляционных материалов для регистрации наиболее опасных для человеческого организма ионизирующих излучений / Семиноженко В.П., **Галунов Н.З.** // В кн.: Физико-технические проблемы современного материаловедения. В 2-х томах, Т. 2 – Киев: Академпериодика, 2013, 617 с. – С. 53–70.

272. Study of radiation-resistant gel bases for composite detectors / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Krech A.V., Lazarev I.V., Levchuk L.G., Nepokupnaya T.A., Panikarskaya V.D., Popov V.F., Sorokin P.V., Tarasenko O.A. // Functional Materials. – 2013. – Vol. 20, No. 4. – P. 471 – 476. http://dx.doi.org/10.15407/fm20.04.471

2014

273. Scintillator RadDam Studies at KIPT (Kharkov) / Levchuk L., Lukhanin A., Popov V., Sorokin P., Boyaryntsev A., Zhmurin P., **Galunov N.**, Golutvin I., Moisenz P. // International Workshop “CMS Upgrade Week”, Karlsruhe, Germany, 31 March – 4 April, 2014.

274. Сцинтилляционные свойства и особенности структуры поликристаллов стильбена, полученных методом горячего прессования / Горбачева Т.Е., **Галунов Н.З.**, Лазарев И.В., Косинов Н.Н., Вягин О.Г., Малюкин Ю.В. // Журн. прикл. спектр. – 2014. – Т. 81, № 1. – С. 165–168.

275. Development of large-area composite stilbene scintillator for fast neutron detection / Lee S.K., Son J.B., Jo K.H., Kang B.H., Kim G.D., Seo H., Park S.H., **Galunov N.Z.**, Kim Y.K. // Journal of Nuclear Science and Technology. 2014. – Vol. 51, No. 1. – P. 37–47. http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2014.845539

276. Спосіб виготовлення полікристалічного сцинтилятору на основі стильбену / **Галунов М.З.**, Лазарєв І.В., Самохін А.Д. // Патент України на винахід № 106026, МПК51 G01T 1/20. O10 25.07.2014, Бюл. № 10.

277. Композиционные сцинтилляторы как новый вид сцинтилляционного материала / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л. // Тезисы докладов XII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 17-21 марта 2014, Харьков, Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 97.

278. Перспективы создания радиационно-стойких композиционных сцинтилляторов / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Паникарская В.Д., Сорокин П.В., Левчук Л.Г., Попов В.Ф. // Тезисы докладов XII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 17-21 марта 2014, Харьков, Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 97– 98.

279. Создание спектросмещающих световодов на основе диэлектрических гель-композиций / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Креч А.В., Лазарев И.В., Тарасенко О.А., Паникарская В.Д., Сорокин П.В., Левчук Л.Г., Попов В.Ф., Хабусева С.У. // Тезисы докладов XII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 17-21 марта 2014, Харьков, Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 98.

280. Особенности размена энергии в треке ионизирую-

щей частицы для органических твердотельных детекторов / **Галунов Н.З.**, Тарасенко О.А. // Тезисы докладов XII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 17-21 марта 2014, Харьков, Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 99.

281. Композиционные и керамические органические сцинтилляторы новые материалы для регистрации ионизирующих излучений / **Галунов Н.З.**, Горбачева Т.Е., Караваева Н.Л., Лазарев И.В., Креч А.В., Тарасенко О.А. // Материаловедение. – 2014, – № 4. – С. 51–56.

282. Light guides on the base of dielectric gel compositions / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Khabuseva S.U., Krech A.V., Levchuk L.G., Popov V.F., Samokhin A.D., Sorokin P.V. // Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2014. – No. 5 – P. 76–82.

283. Some aspects of the energy exchange in an ionizing particle track for organic solid detectors / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2014. –No. 5 – P. 83–90.

2015

284. Радиационно – стойкие композиционные сцинтилляторы на основе GSO:Ce и GPS:Ce / Бояринцев А.Ю., **Галунов Н.З.**, Герасимов Я.В., Караваева Н.Л., Креч А.В., Левчук Л.Г., Попов В.Ф., Сидлецкий О.Ц., Сорокин П.В., Тарасенко О.А. // Тезисы докладов XIII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 16-20 марта 2015 года, Харьков/ Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 98.

285. Особенности радиационной прочности органических сцинтилляторов / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Креч А.В., Левчук Л.Г., Миненко С.С., Попов В.Ф., Сорокин П.В., Хабусева С.У. // Тезисы докладов XIII конференции по фи-

зике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 16-20 марта 2015 года, Харьков/ Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 99.

286. Радиационно-стойкие композиционные сцинтилляторы на основе тикоров (Al2O3:Ti) / **Галунов Н.З.**, Горбачева Т.Е., Караваева Н.Л., Коневский П.В., Креч А.В., Левчук Л.Г., Литвинов Л.А., Попов В.Ф., Сорокин П.В. // Тезисы докладов XIII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 16-20 марта 2015 года, Харьков/ Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 100.

287. Радиационно-стойкие спектросмещающие световоды на основе диэлектрических гель-композиций / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Креч А.В., Лазарев И.В., Левчук Л.Г., Михайленко В.О., Попов В.Ф., Сорокин П.В. // Тезисы докладов XIII конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 16-20 марта 2015 года, Харьков/ Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 100–101.

288. Effect of polarization on recombination of charge states in an ionizing particle track in organic molecular crystals / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2015. – Vol. 606, No. 1. – P. 176–188. https://doi.org/10.1080/15421406.2014.905051

289. Радіолюмінесценція органічних конденсованих середовищ: фундаментальні аспекти і застосування / **Галунов М.З.** // Вісник НАН України – 2015 – № 2 – С. 22–28.

290. Радиолюминесценция органических конденсированных сред. Теория и применение / **Галунов Н.З.**, Семиноженко В.П. // изд. второе, исправленное и дополненное. – Киев: Наукова думка, 2015. – 464 с. ISBN 978-966-00-1469-5.

291. Optical and scintillation properties of stilbene polycrystalline and composite materials / **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A., Tarasov V.A. // Functional Materials. – 2015. – Vol. 22, No.1. – P. 61 – 68. http://dx.doi.org/10.15407/fm22.01.061

292. Distribution coefficient of 1,4-diphenyl-1,3-butadiene in p-terphenyl single crystal and it influence on scintillation crystal light output / **Galunov N.Z.**, Lazarev I.V., Martynenko E.V, Vashchenko V.V., Vashchenko E.V. // Molecular Crystals and Liquid Crystals – 2015. – Vol. 616, No. 1. – P. 176–186. https://doi.org/10.1080/15421406.2014.991105

293. Light collection simulation when determining light yield of single crystals and polycrystalline organic scintillators / Gorbacheva.T.E., Tarasov V.A., **Galunov N.Z.** // Functional Materials. – 2015. – Vol. 22, No. 3. – P. 408 – 415. https://dx.doi.org/10.15407/fm22.03.408

294. The mechanical properties of p-terphenyl studied by indentation method / Milman Yu.V., **Galunov N.Z.**, Chugunova S.I., Lazarev I.V., Istomin B.V. // Abstract Book of the 5-th international conference HighMatTech: proceedings of the conference – Kiev, 2015. – P. 173.

2016

295. Радиационно- стойкие композиционные сцинтилляторы на основе неорганических гранул (GSO:Ce, GPS: Ce и Al2O3:Ti) / Бояринцев А.Ю., **Галунов Н.З.**, Герасимов Я.В., Горбачева Т.Е., Караваева Н.Л., Коневский П.В., Креч А.В., Левчук Л.Г., Литвинов Л.А., Попов В.Ф., Сидлецкий О.Ц., Сорокин П.В., Тарасенко О.А. // Тезисы докладов XIV конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 22-25 марта 2016 года, Харьков/ Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 25–26.

296. Материалы для создания радиационно-стойких

световодов на основе гель-композиций / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Креч А.В., Левчук Л.Г., Литвинов Л.А., Попов В.Ф., Сорокин П.В., Хабусева С.У. // Тезисы докладов XIV конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 22-25 марта 2016 года, Харьков/ Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 26.

297. Сцинтиляційний елемент та спосіб його виготовлення / Бояринцев А.Ю., Непокупна Т.А., Онуфрієв Ю.Д., Караваєва Н.Л., Креч А.В., **Галунов М.З.** // Патент України на винахід 111455, МПК G01T 1/20. № a201506128; заявл. 22.06.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.

298. Photoinduced diffraction grating in AgCl – Ag film on surface of silicone gel composition SYLGARD – 184 / Ageev L.A., **Galunov N.Z.**, Rieznikova V.M., Makovetsky E.D., Karavaeva N.L., Krech A.V. // Functional Materials. – 2016. – Vol. 23, No. 1. – P. 127 – 131. https://dx.doi.org/10.15407/fm23.01.127

299. Radiation-resistant composite scintillators for registration a large flux of ionizing radiation / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Grinev B.V., Gerasimov Ya.V., Gorbacheva N.E., Karavaeva N.L., Konevski P.V., Krech A.V., Levchuk L.G., Litvinov L.A., Popov V.F., Sidletskiy O. Ts., Sorokin P.V., Tarasenko O.A., Habuseva S.U. // Fifth International conference "Engineering of scintillation materials and radiation technologies ISMART 2016" Book of abstracts, 26 – 30 September 2016 – Minsk, Belarus. – P. 34.

300. Scintillators based on microcrystalline grains / **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Krech A.V., Lazarev I.V. // Fifth International conference "Engineering of scintillation materials and radiation technologies ISMART 2016" Book of abstracts, 26 – 30 September 2016 – Minsk, Belarus. – P. 43.

301. Radiation-resistant composite scintillators based on inorganic crystals (GSO:Ce, GPS:Ce and Al2O3:Ti) / Boyarintsev

A.Yu., **Galunov N.Z.**, Gerasymov Ia.V., Gorbacheva T.E., Karavaeva N.L., Krech A.V., Levchuk L.G., Litvinov L.A., Popov V.F., Sidletskiy O.Ts., Sorokin P.V., Tarasenko O.A. // Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2016. – No. 5 (105). – P. 59–65. ISSN 1562-6016

302. Изучение механических свойств кристаллических молекулярных сцинтилляторов n-терфенила методами индентирования / Мильман Ю.В., **Галунов Н.З.**, Чугунова С.И., Лазарев И.В., Истомин Б.В., Запорожец О.И., Гончарова И.В. // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2016. – т.14, № 3. – С. 461–476.

2017

303. Radiation-resistant composite scintillators based on GSO and GPS grains / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Gerasymov Ya.V., Gorbacheva T.E., Karavaeva N.L., Krech A.V., Levchuk L.G., Popov V.F., Sidletskiy O.Ts., Sorokin P.V., Tarasenko O. A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2017. – Vol. 841. – P. 124–129.

304. Композиционные сцинтилляторы на основе неорганических гранул (Y2SiO5:Ce и Y3Al5O12:Ce) / **Галунов Н.З.**, Герасимов Я.В., Горбачева Т.Е., Гринев Б.В., Караваева Н.Л., Креч А.В., Левчук Л.Г., Мартыненко Е.В., Попов В.Ф., Сидлецкий О.Ц., Сорокин П.В., Тарасенко О.А, Хабусева С.У. // Тезисы докладов XV конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 21–24 марта 2017 года, Харьков: Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 22– 23.

305. Radiation-resistant composite scintillators based on Al2O3:Ti grains and their properties after irradiation
Electronic / **Galunov N.Z.**, Gorbacheva T.E., Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Khabuseva S.U., Krech A.V., Levchuk L.G., Litvinov L.A., Popov V.F., Sorokin P.V. // Nuclear Instruments

and Methods in Physics Research – 2017. – Vol. A. 866 – P. 104–110.

306. Composite scintillators based on single crystal grains Y2SiO5:Ce (YSO) and Y3Al5O12:Ce (YAG) / **Galunov N.Z.**, Gerasymov Ya.V., Gorbacheva T.E., Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Khabuseva S.U., Krech A.V., Levchuk L.G., Martynenko E.V., Popov V.F., Sidletskiy O.Ts., Sorokin P.V., Tarasenko O.A. // Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2017. – No. 3 (109) – P. 35–39.

307. Композиційні сцинтилятори та особливості їх радіаційної стійкості / Креч А.В., **Галунов М.З.** // Український фізичний журнал. – 2017. – Т. 62, № 7. – С. 565–578.

308. Crystalline and composite scintillators for fast and thermal neutron detection /**Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Tarasenko O.A. // In book: Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies, ed by Mikhail Korzik and Alexander Gektin, Springer Proceedings in Physics, Vol 200, 2017, 345 p. – P. 199–212. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68465-9_12

2018

309. Радиационная стойкость композиционных сцинтилляторов / Бояринцев А.Ю., **Галунов Н.З.**, Герасимов Я.В., Горбачева Т.Е., Гринев Б.В., Караваева Н.Л., Креч А.В., Левчук Л.Г., Мартыненко Е.В., Попов В.Ф., Сидлецкий О.Ц., Тарасенко О.А, Хабусева С.У. // Тезисы докладов XVI конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 20-23 марта 2018 года, Харьков: Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Институт физики высоких энергий и ядерной физики. – С. 25.

310. Radiation resistance of composite scintillators containing grains of Y2SiO5:Ce or Y3Al5O12:Ce obtained by solid-phase synthesis / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Levchuk L.G., Martynenko E.V., Nepokupnaya T.A., Onufriyev Yu.D., Popov V.F., Voloshyna O.V. // Functional Materials 2018;

Vol. 25, No.1. – P. 6-12. https://doi.org/10.15407/fm25.01.006

311. Luminescence of new polycrystalline scintillators based on stilbene / Ostapenko N., Ilchenko M., Ostapenko Yu., Kerita O., Melnik. V., Klishevic E., **Galunov N.**, Lazarev I. // In book of abstracts of XI International conference "Electronic processes in organic materials" Ivano-Frankivsk, Ukraine, May 21-25 2018. – P. 183.

312. Radiation-resistant composite scintillators / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Gerasimov Ya.V., Gorbacheva T.E., Karavaeva N.L., Khabuseva S.U., Krech A.V., Levchuk L.G., Litvinov L.A., Popov V.F., Sidletskiy O.Ts., Tarasenko O.A. // Sixth International Conference «Engineering of scintillation materials and radiation technologies ISMART 2018» book of abstracts 9 – 12 October 2018 Minsk, Belarus. – P. 20–21.

313. Some Features of the Radiation Resistance of Composite Scintillators / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Krech A.V. // In abstract book of 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC) 10-17 November 2018, International Convention Centre, Sydney, Australia. N-07-311.

314. Спосіб виготовлення полікристалічного органічного сцинтилятору для визначення β-частинок у водних розчинах / **Галунов М.З.**, Лазарєв І.В., Полупан Я.І., Тарасенко О.А., Мартиненко Є.В., Андрющенко Г.Ю., Бєліков К.М. // Патент України UA117211C2; (a201710824); опубліковано 25.06.2018.

315. Некоторые особенности радиационной стойкости композиционных сцинтилляторов / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Креч А.В. // Workshop for young scientists "Functional materials for technical and biomedical applications", dedicated to 100 years of NASU, book of abstracts, 5 – 8 September 2018, Kharkiv, Ukraine. – P. 23.

316. Method of obtaining an organic polycrystalline scintillator for detecting beta-radionuclide sources in natural

waters / Andryushenko A.Yu., Belikov K.N., **Galunov N.Z.**, Martynenko E.V., Lazarev I.V., Polupan Ya.I., Tarasenko O.A. // Functional Materials 2018. – Vol. 25, No. 4. – P. 795-801. https://doi.org/10.15407/fm25.04.795

317. Photoluminescence of new polycrystalline scintillator based on stilbene / Ostapenko N., Ilchenko M., Ostapenko Yu., Kerita O., Melnik V., Klishevich E., **Galunov N.**, Lazarev I., Chursanova M. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2018. – Vol 671, No. 1. – P.104–112. 10.1080/15421406.2018.1542093

2019

318. Some Features of the Radiation Resistance of Composite Scintillators / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Krech A.V. // 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings (NSS/MIC). – P. 1 – 3. No. 8824735. Date Added to IEEE Xplore: 05 September 2019. https://doi.org/10.1109/nssmic.2018.8824735

319. Влияние среды облучения на свойства радиационно-стойких композиционных сцинтилляторов / Бояринцев А.Ю., **Галунов Н.З.**, Гринев Б.В., Караваева Н.Л., Креч А.В., Левчук Л.Г., Попов В.Ф. // Тезисы докладов XVII конференции по физике высоких энергий и ядерной физике 26 – 29 марта 2019. Харьков. – С. 24.

320. Development features of radiation-resistant materials for composite scintillators and wavelength shifting light guides / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Krech A.V. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2019. – Vol. 930. – P. 180–184. https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.100

321. Radiation resistance of composite scintillators / Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Gerasymov Ia.V., Gorbacheva T.E., Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Khabuseva S.U., Krech A.V., Levchuk L.G., Martynenko E.V., Popov V.F., Sidletskiy O.Ts., Tarasenko O.A. // Problems of Atomic Science and Technology,

Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2019. No. 3 (121) – P. 60–64. ISSN 1562-6016

322. О природе света / **Галунов Н.З.** // Харьков: ИСМА. – 2019. – 253 с. ISBN 978-966-02-89827-7

323. Cracking of composite scintillators after significant doses of irradiation / Cherginets V.L., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Krech A.V., Levchuk L.G., Popov V.F. // Functional Materials – 2019 – Vol. 26, No. 4. – P. 690–694. https://doi.org/10.15407/fm26.04.690

324. Separate detection of ionizing radiation with different specific energy losses by organic heterostructured scintillators / **Galunov N.**, Khromiuk I. // "Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна", серія "Фізика". – 2019. – Vol. 30. – P. 10–16.

2020

325. Radioactivity induced in radiation-resistant composite scintillators by irradiation with bremsstrahlung photons / Popov V.F., Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Grinyov B.V., Karavaeva N.L., Krech A.V., Levchuk L.G. // Functional Materials. – 2020. – Vol. 27, No. 1. – P. 18–23. https://doi.org/10.15407/fm27.01.18

326. Features of pulse shape discrimination capability of organic heterogeneous scintillators / **Galunov N.Z.**, Khromiuk I.F., Tarasenko O.A. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 2020. – Vol. A 949, No.1 Article number 162870 (7 pages). https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162870

327. Delayed radioluminescence of some heterostructured organic scintillators / **Galunov N.**, Gryn D., Karavaeva N., Khromiuk I., Lazarev I., Navozenko O., Naumenko A., Tarasenko O., Yashchuk V. // Journal of Luminescence 2020. – Vol. 226, paper number 117477 (12 pages). https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117477

328. Исследование радиационной стойкости композиционных сцинтилляторов на основе YAG:Ce / Попов В.Ф., Ковалёва Л.С., Левчук Л.Г., Споров Е.А., Бояринцев А.Ю.,

Галунов Н.З., Караваева Н.Л., Креч А.В. // Тезисы докладов XVIII конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 24–27 марта 2020 г., Харьков: ННЦ ХФТИ НАНУ. – С. 62.

329. Условия облучения, влияющие на растрескивание радиационно-стойких композиционных сцинтилляторов / **Галунов Н.З.**, Караваева Н.Л., Креч А.В., Левчук Л.Г., Попов В.Ф., Чергинец В.Л. // Тезисы докладов XVIII конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 24–27 марта 2020 г., Харьков: ННЦ ХФТИ НАНУ. – С. 63.

330. The effect of large doses of radiation of composite radiation-resistant scintillators cracking / Krech A.V., **Galunov N.Z.**, Gorbacheva T.E., Karavaeva N.L., Levchuk L.G., Popov V.F. // Тези доповідей міжнародної школи-семінар для молодих вчених «Функціональні матеріали для технічних та біомедичних застосувань», 7–10 вересня 2020р. – Харків: ІСМА НАНУ. – С. 49.

331. Features of separate registration of ionizing radiation with different specific energy losses by heterogeneous organic scintillators / Khromiuk I.F., **Galunov N.Z.**, Tarasenko O.A. // Тези доповідей міжнародної школи-семінар для молодих вчених «Функціональні матеріали для технічних та біомедичних застосувань», 7–10 вересня 2020р. –Харків: ІСМА НАНУ. – С. 27.

332. Organic polycrystalline scintillators for detecting beta-radionuclide radiation sources in natural waters / Polupan Ya.I., **Galunov N.Z.**, Krech A.V., Tarasenko O.A., Andryushchenko A.Yu. // Тези доповідей міжнародної школи-семінар для молодих вчених «Функціональні матеріали для технічних та біомедичних застосувань», 7–10 вересня 2020р. – Харків: ІСМА НАНУ. – С. 28.

333. Boyarintsev A.Ya., **Galunov N.Z.**, Gorbacheva T.E., Karavaeva N.L., Krech A.V., Levchuk L.G., Popov V.F. The effect of large doses of radiation on composite radiation-resistant scintillators cracking // Nuclear Inst. and Methods in Physics

Research A. – 2020. – Vol. 982, (1 December 2020) Article number 164583 (5 pages). https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164583

2021

334. Unusual temperature dependence of the fluorescence decay in heterostructured stilbene / Karpicz R., Ostapenko N., Ostapenko Y., Polupan Y., Lazarev I., **Galunov N.**, Macernis M., Abramavicius D., Valkunas L. // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2021. – Vol. 23, Issue 5. – P. 3447–3454. https://doi.org/10.1039/D0CP05436D

335. Гетероструктуровані органічні сцинтилятори із високою здатністю до розділення іонізуючих випромінювань за формою сцинтиляційного імпульсу / **Галунов М.З.**, Тарасенко О.А., Хромюк І.Ф. // Тези доповідей XIX конференції з фізики високих енергій та ядерної фізики, 23-26 березня 2021р., Харків: ННЦ ХФТІ НАНУ. – С. 55.

336. Вплив умов опромінення на розтріскування радіаційно-стійких композиційних сцинтиляторів / Бояринцев А.Ю., **Галунов М.З.**, Горбачова Т.Є., Караваєва Н.Л., Креч А.В., Непокупна Т.А., Левчук Л.Г., Попов В.П. // Тези доповідей XIX конференції з фізики високих енергій та ядерної фізики, 23-26 березня 2021 г., Харків: ННЦ ХФТІ НАНУ. – С. 60.

337. Heterostructured organic scintillators with a high pulse-shape discrimination capability for radioecology problems / Khromiuk I.F., **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Krech A.V., Polupan Ya.I., Tarasenko O.A. // Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2021, Vol. 133 No. 3– P. 56–60. https://doi.org/10.46813/2021-133-056

338. Investigation of the properties of polycrystalline scintillators obtained from grains grown from solution / Khromiuk I.F., **Galunov N.Z.**, Karavaeva N., L. Krech A.V., Polupan Ya.I., Tarasenko O.A. // International school-seminar for young scientists “Functional materials for technical and biomedical

applications”, 6-10 September 2021, Kharkiv, Ukraine. – P. 12.

339. Organic heterostructured scintillators with a high pulse shape discrimination capability / **Galunov N.**, Khromiuk I. , Karavaeva N., Krech A., Polupan Ya., Tarasenko O., Khabuseva S.// 11th International Conference on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation “Lumdetr 2021” Book of abstracts, 12-17 September 2021, Bydgoszcz, Poland. – P. 27.

340. Oxide Composite Scintillation Materials for High-Energy Radiation Detectors / **Galunov N.**, Gerasimov Ya., Karavaeva N., Krech A., Gorbacheva T., Khromiuk I., Kofanov D., Levchuk L., Popov V. // International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering – fabrication, properties and applications “OMEE-2021” Book of Abstracts, September 28 – October 2 2021, Lviv, Ukraine. – P. 91.

341. Influence of Irradiation Conditions on Cracking of Radiation-Resistant Composite Scintillators / Krech A.V., Boyarintsev A.Yu., **Galunov N.Z.**, Karavaeva N.L., Gorbacheva T.E., Khromiuk I.F., Levchuk L.G., Popov V.F. // Problems of Atomic Science and Technology, Ser.: Nuclear Physics Investigations. – 2021. – No. 6 (136) – P. 30–33. https://doi.org/10.46813/2021-136-030

2022

342. Radiation Resistance of Composite Scintillators Based on Grains of Oxide Single Crystals / Krech A., **Galunov N.**, Boyarintsev A., Gerasymov Ia., Karavaeva N., Gorbacheva T., Khromiuk I., Kofanov D., Levchuk L., Popov V. // Acta Physica Polonica A. – 2022. – No. 4, Vol. 141. – P. 426–435. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.141.426

343. Some peculiarities of triplet excitations dynamics in organic macromolecules and crystals / Yashchuk V.M., Galunov M.Z., Lebedyeva I.V., Tarasenko O.A., Navozenko O.M., Vashchilina E.V., Krech A.V., Losytskyy M.Yu., Dotsenko M.A. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2022. https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2066786

ЗМІСТ

З наукою у житті: творчий шлях М.З. Галунова 5

Спогади колег, учнів 22

В.О. Тарасов
«Даю правильну відповідь...» 23

Л.М. Лисецький
Мирне співжиття і співпраця 29

Т.Є. Горбачова
На спогад про керівника 33

О.А.Тарасенко
Про вчителя 38

А.В.Креч
Наставник 43

Книги, монографії 46

Вибрані наукові статті 50

Измерения параметров затухания сцинтилляций в некоторых органических сцинтилляторах 51

Особенности механизма формирования импульсов света сцинтилляций в быстродействующих органических сцинтилляторах 53

The Influence of Controlled Electron-Seeking Addition Agents of the Melt on Stilbene Single Crystal Structure and Radioluminescence Properties 58

К вопросу о механизме радиолюминесценции органических конденсированных сред. 63

The Radioluminescence Study as A Method for Investigation of Structure Features of Organic Molecular Solids 67

Organic polycrystals as the new luminescent systems for scintillation andecology techniques 73

New Effective Organic Scintillators for Fast Neutron and Short-Range Radiation Detection 78

Effect of Polarization on Recombination of Charge States in an Ionizing Particle Track in Organic Molecular Crystals 85

Хронологічний покажчик публікацій 98