

Дмитрий Владимирович придавал очень большое значение пополнению библиотеки НИИЯФ необходимыми журналами и книгами. Д.В. Скобельцын по договоренности с руководством ПГУ (а затем Минсредмаша) организовал комплектацию иностранных журналов и книг для библиотеки института за счёт валютных средств этих организаций. Составление списков, необходимых для заказа журналов и книг, он поручил И.С. Шапиро и регулярно обсуждал все возникавшие вопросы.

Дмитрий Владимирович всегда считал, что вопросы организации научной работы и учебного процесса должны решаться с проявлением инициативы и напористости в достижении поставленной цели, а формальные вопросы должны также решаться хорошо, но без проявления излишней поспешности. Характерный пример. В 1957 г. НИФИ-2 был переименован в НИИЯФ. В связи с этим по инициативе партийного бюро (членом которого был С.Н. Вернов) С.Н. Верновым и одним из авторов настоящей статьи (Е.А. Романовским) был подготовлен проект нового положения об институте, одобренный юридическим отделом МГУ. Когда С.Н. Вернов предложил Дмитрию Владимировичу прочитать проект положения, тот ответил отказом. Он спросил, мешает ли отсутствие нового положения проведению научных исследований в институте. Сергей Николаевич ответил: "Нет, не мешает". — "И мне не мешает, — сказал Дмитрий Владимирович. — Положение об институте будем менять тогда, когда в МГУ возникнет необходимость в изменении положений". Положение о НИИЯФ МГУ было изменено лишь после получения МГУ автономии (1990 г.)

К сотрудникам института Дмитрий Владимирович относился с позиции мудрой доброжелательности. При возникновении каких-то спорных вопросов он находил справедливое решение, с которым все соглашались. Он не терпел и не допускал никаких склок в институте. Он говорил: "Там, где начинается склока, — кончается наука". Все вопросы в институте и в отделении ядерной физики Дмитрий Владимирович решал с позиции дела и высокой гражданской ответственности.

Г.Б. Христиансен писал, что все, кому довелось учиться у Д.В. Скобельцына или работать под его руководством, помнят "впечатления надёжности, прочности, мудрой доброжелательности, которые всегда возникали при общении с ним и которых так не хватает человеку в нашей современной, полной неожиданности жизни" [16].

Список литературы

1. Вавилов С И, Левшин В Л "Записка ФИАН СССР в Президиум АН "Об организации работ по исследованию атомного ядра при Академии наук СССР", в сб. *Атомный проект СССР. Документы и материалы* Т. 1 1938–1945 Ч. 1 (Под общ. ред. Л Д Рябева, Сост. Л И Кудинова) (М.: Физматлит, 1998) с. 36
2. *Записки архивариуса* Т. 1, Вып. 1 (М.: ФИАН, 1992) с. 29
3. "Постановление ГКО № 7572сс/ов от 21.2.1945 г. "О подготовке специалистов по физике атомного ядра", в сб. *Атомный проект СССР. Документы и материалы* Т. 1. 1938–1945 Ч. 2 (Под общ. ред. Л Д Рябева, Отв. сост. Л И Кудинова) (М.: Изд-во МФТИ, 2002) с. 223
4. Барит И Я, Подгорецкий М И (Сост.) "Радиоактивный распад и ядерные реакции. Конспект лекций, читанных академиком Скобельцыным Д.В. в 1945–1946 гг.", в сб. *Академик Д.В. Скобельцын и Московский университет* (Под ред. Б С Ишканова, М И Панасюка, Е А Романовского) (М.: УНЦ ДО, 2002) с. 27
5. Сталин И, Чадаев Я "Постановление СНК СССР № 225-96сс от 28.1.1946 г. "О подготовке инженеров-физиков и специалистов

- по физике атомного ядра и по радиохимии", в сб. *Атомный проект СССР. Документы и материалы* Т. 2 *Атомная бомба. 1945–1954* Кн. 2 (Под общ. ред. Л Д Рябева, Отв. сост. Г А Гончаров) (Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2000) с. 102
6. Вернов С Н "Д.В. Скобельцын как руководитель школы физиков и основатель НИИЯФ МГУ", в сб. *Воспоминания об академике Д.В. Скобельцыне и С.Н. Вернове* (Под ред. М И Панасюка, Е А Романовского) (М.: Изд-во МГУ, 1995) с. 42
 7. Рязжская О Г *УФН* **181** 187 (2011) [Ryazhskaya O G *Phys. Usp.* **54** 181 (2011)]
 8. Матвеев В А *УФН* **181** 188 (2011) [Matveev V A *Phys. Usp.* **54** 182 (2011)]
 9. Садовничий В А *УФН* **181** 191 (2011) [Sadovnichy V A *Phys. Usp.* **54** 185 (2011)]
 10. Трухин В И *УФН* **181** 195 (2011) [Trukhin V I *Phys. Usp.* **54** 189 (2011)]
 11. Панасюк М И *УФН* **181** 197 (2011) [Panasyuk M I *Phys. Usp.* **54** 190 (2011)]
 12. Дергачёв В А *УФН* **181** 210 (2011) [Dergachev V A *Phys. Usp.* **54** 202 (2011)]
 13. Стожков Ю И, Базилевская Г А *УФН* **181** 218 (2011) [Stozhkov Yu I, Bazilevskaya G A *Phys. Usp.* **54** 210 (2011)]
 14. Бережко Е Г, Крымский Г Ф *УФН* **181** 223 (2011) [Berezhko E G, Krymsky G F *Phys. Usp.* **54** 215 (2011)]
 15. Садовничий В А, Ильченко В И (Общ. ред.) *Академик Сергей Николаевич Вернов. К 100-летию со дня рождения* (М.: Изд-во МГУ, 2010)
 16. Христиансен Г Б "Ессе Номо", в сб. *Воспоминания об академике Д.В. Скобельцыне и С.Н. Вернове* (Под ред. М И Панасюка, Е А Романовского) (М.: Изд-во МГУ, 1995) с. 55

PACS numbers: **01.65.** + g, 41.60.Ap, 41.60.Cr
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201304i.0433

Синхротронное и ондуляторное излучения и их применение в спектроскопии

В.В. Михайлин

Синхротронное и ондуляторное излучения в настоящее время широко применяются во всех областях науки, где исследуется взаимодействие излучения с веществом. В теоретическом и экспериментальном исследовании синхротронного и ондуляторного излучений Московский университет изначально тесно взаимодействовал с Физическим институтом Академии наук. Открытие синхротронного излучения предсказали в 1944 г. Д.Д. Иваненко и И.Я. Померанчук. В статье, опубликованной в *Докладах АН СССР* [1] (и параллельно в *Physical Review* в США) Д.Д. Иваненко и И.Я. Померанчук высказали предположение, что причиной ограничения предельной энергии ускорения электронов в бетатроне (циклическом индукционном ускорителе) является магнитотормозное излучение, мощность которого пропорциональна четвертой степени энергии ускоренной частицы. Это излучение в видимой области было обнаружено в 1947 г. на американском синхротроне General Electric (энергия 80 МэВ) в Брукхейвенской национальной лаборатории. Отсюда

В.В. Михайлин. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ
E-mail: vvm@srd.sinp.msu.ru

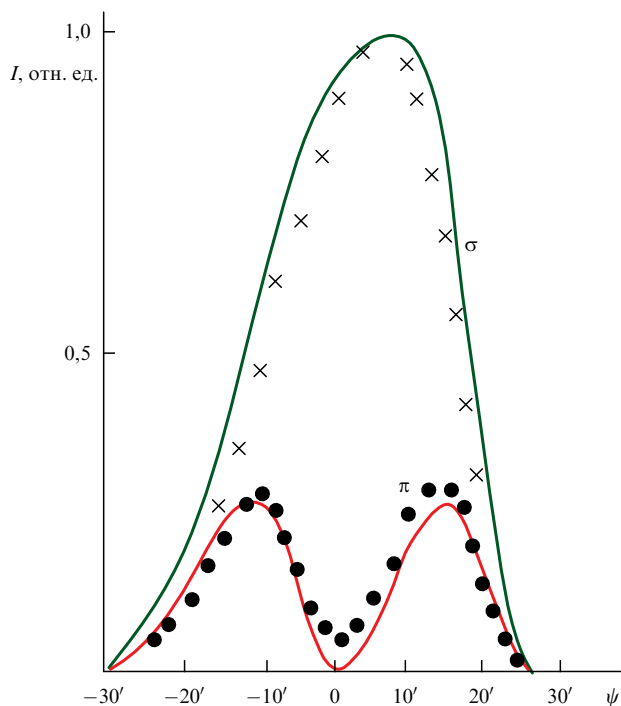


Рис. 1. Сравнение теоретических зависимостей (кривые) интенсивностей I σ - и π -компонент линейной поляризации от угла ψ с экспериментальными (кружки и кресты) (по данным О.Ф. Куликова) [10].

магнитотормозное излучение релятивистских электронов (имеющих скорость, близкую к скорости света) получило название синхротронного. В 1948 г. Д.Д. Иваненко и А.А. Соколов опубликовали также в *Докладах АН СССР* статью "К теории светящегося электрона" [2], в которой привели расчёты соответствующих угловых и спектральных характеристик этого излучения. Последующие работы наших теоретиков заложили основы научной школы синхротронного излучения Московского университета [3–8]. В итоге в библиографическом списке работ физиков МГУ по исследованию синхротронного и ондуляторного излучений и их применению сегодня насчитывается более 1200 публикаций, несколько десятков докторских и кандидатских диссертаций.

Первыми у нас в стране экспериментальными проверками "теории светящегося электрона" были работы 1956 года: работа Ю.М. Адо и П.А. Черенкова по распределению энергии в спектре некогерентного излучения электронов, движущихся в синхротроне, [9] и работа Ф.А. Королёва, Е.М. Акимова, В.С. Маркова, О.Ф. Куликова "Экспериментальные исследования углового распределения и поляризации оптического излучения в синхрофазотроне" [10] (рис. 1), вышедшая уже после публикации теоретической работы А.А. Соколова и И.М. Тернова о поляризационных эффектах в излучении светящегося электрона [11].

Далее экспериментальное исследование свойств синхротронного излучения физики МГУ (О.Ф. Куликов, А.С. Яров и др.) проводили совместно с лабораторией высоких энергий Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) (Ю.М. Александров, М.Н. Якименко и др.). Эти работы поддерживались директором ФИАНа академиком Д.В. Скобельцыным. Уже в 1967 г. при поддержке Д.В. Скобельцына был построен первый канал вакуумно-ультрафиолетовой (ВУФ) спектроскопии на синхротроне ФИАНа С-60 на энергию 680 МэВ.

В дальнейшем работы по спектроскопии твёрдого тела активно проводились и на других синхротронах и накопителях в СССР, в частности, в Институте ядерной физики СО АН СССР (ИЯФ) в Новосибирске и на накопителе "Сибирь-1" в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (ИАЭ).

Но вернёмся назад, в 1940-е. Интересно, что ещё в 1948 г. А.М. Прохоров занялся изучением синхротронного излучения с целью получения когерентного электромагнитного излучения в сантиметровой и миллиметровой областях спектра. Он проводит серию успешных экспериментов по изучению когерентных свойств излучения релятивистских электронов, движущихся в однородном магнитном поле. Прохоров доказал, что синхротронное излучение можно использовать в качестве источника когерентного излучения в сантиметровом диапазоне, определил характеристики и уровень мощности источника. Эти исследования составили тему докторской диссертации А.М. Прохорова, которую он успешно защитил в 1951 г. Но всё же напомним, что основная мощность излучения сосредоточена в более жёстких областях спектра — вакуумной ультрафиолетовой и рентгеновской — и в них развиваются основные применения синхротронного излучения.

Синхротронное излучение (СИ) и ондуляторное излучение (ОИ) имеют общую природу, связанную с эффектом испускания электромагнитных волн ускоренными релятивистскими зарядами [3, 4]. Сегодня СИ — это мощный универсальный инструмент для исследований в различных отраслях науки [5–7]. Технический прогресс и развитие науки в последние десятилетия определили повышенный интерес к исследованиям по вынужденному излучению релятивистских электронов (индуцированное СИ) (см., например, [8, 12–16]). Особенности вынужденного СИ при движении электронов по спирали рассмотрены в [17], а вынужденное СИ в фокусирующем магнитном поле циклических ускорителей подробно изучено в [18]. Развитие техники во второй половине XX в. позволило создать новые источники СИ — лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), имеющие в своём составе ондуляторы. Существенным отличием ОИ от СИ является его высокая монохроматичность и большая спектральная плотность. Излучение ондуляторов с различными конфигурациями поля хорошо описано в литературе (см., например, [3–8, 12–19]). Простейшая схема плоского ондулятора показана на рис. 2. Первые наблюдения излучения из ондулятора, встроенного в камеру циклического ускорителя, были проведены в нашей стране. В 1977 г. группа физиков ФИАНа (под руководством П.А. Черенкова) и физического факультета МГУ наблюдала ондуляторное излучение на синхротроне ФИАНа "Пахра", ускоряющем электроны до энергии 1,2 ГэВ [20]. Группе удалось получить первые фотографии этого нового типа излучения, исследовать его спектральные и угловые характеристики, эффект квази-монохроматичности [21].

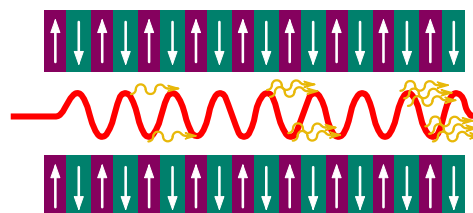


Рис. 2. Простейшая схема плоского ондулятора.

Созданные на основе источников ОИ ЛСЭ имеют существенное отличие от обычных лазеров — частота ЛСЭ не связана с переходами на низшие энергетические уровни в рабочей среде, в отличие от частоты обычных лазеров. Рабочей средой для ЛСЭ фактически служит пучок электронов, движущихся в сильном периодическом магнитном поле ондулятора, а длина волны может непрерывно регулироваться. Последняя зависит от параметров ондулятора и энергии электронов пучка. Простейший вариант ЛСЭ — это ондулятор, помещённый между двумя зеркалами, одно из которых является полупрозрачным. Таким образом, ондулятор, дающий некогерентное излучение в узком диапазоне частот близки частоты основной гармоники (или высших гармоник), помещён в резонатор, где лазерное излучение формируется при его многократном прохождении через ондулятор.

Новое поколение источников СИ — ЛСЭ, работающие в рентгеновском диапазоне [22], — требует новых технических решений, например ЛСЭ с самоусилением спонтанного излучения (Self Amplified Spontaneous Emission — SASE). Схема SASE, предполагающая формирование когерентного лазерного излучения за один проход ондулятора, основана на том, что электроны движутся с запаздыванием по отношению к испущенному ими СИ, которое может догнать движущиеся перед ним электроны и взаимодействовать с ними. Так электромагнитная волна группирует электроны в отдельные сгустки, разделённые пространственным периодом, равным периоду ондулятора. В результате несколько электронов начинают излучать почти синфазно. Этот эффект усиливается по длине ондулятора, приводя к формированию более плотных групп электронов и когерентному излучению импульсного характера.

В последние годы техника ОИ была значительно улучшена не только с точки зрения ондуляторных магнитов, но и с точки зрения концепций их конфигураций. Новые разработки теории ОИ [23, 24] показали, как схемы ондуляторов со сложной конфигурацией магнитного поля способны усиливать или ослаблять излучение отдельных гармоник. Подавление жёсткой компоненты ОИ позволяет уменьшить её негативное влияние на зеркала ЛСЭ, а усиление определённых гармоник может применяться в схемах ЛСЭ с SASE и в устройствах с генерацией гармоник затравочного излучения (High Gain Harmonic Generation — HGHG), где используется последовательность ондуляторов, каждый из которых настроен на частоту высшей гармоники предыдущего (см., например, [25]). В связи с этим особенно жёсткие требования предъявляются к качеству электронного пучка и конструкции ондулятора. Всё это требует строгого и математически выверенного описания свойств СИ и ОИ с учётом особенностей источников излучения и условий их работы; искажение траектории движения частиц может негативно влиять на работу всей установки. Развитие теории ОИ с использованием обобщённых форм специальных функций позволило получить аналитические выражения для интенсивности и спектра ОИ с учётом постоянной компоненты магнитного поля [26–28], в частности магнитного поля Земли. Таким образом, развитие теории ОИ позволяет получить устройства с заданными характеристиками, выделенными гармониками и высоким качеством для использования в современных схемах генерации высокочастотного когерентного излучения на ЛСЭ с самоусилением (SASE), генерацией гармоник (HGHC) и др.

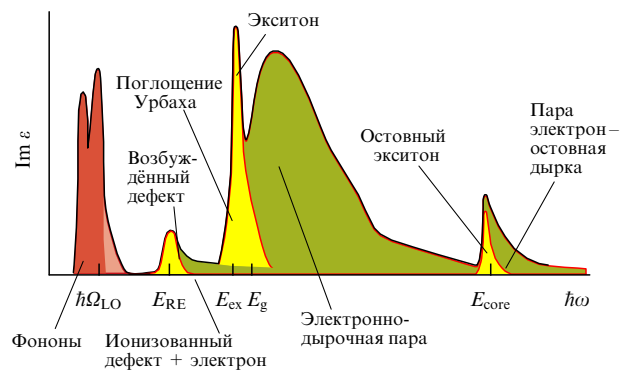


Рис. 3. Мнимая часть диэлектрической проницаемости ϵ в широкой области энергий фотонов и различные процессы, исследуемые при возбуждении люминесценции твёрдых тел синхротронным излучением. Ω_{LO} — частота продольного оптического фотона, E_{RE} — энергия перехода в редкоземельном активаторе, E_{ex} — энергия экситона, E_g — ширина запрещённой зоны, E_{core} — энергия остова уровня.

Синхротронное и ондуляторное излучения широко используются в спектроскопии. Одно из важных направлений — спектроскопия возбуждения люминесценции твёрдых тел с помощью СИ. Уникальные спектральные характеристики и временная структура СИ позволяют использовать это излучение для исследования процессов электронной релаксации в диэлектриках с широкой запрещённой зоной. Объяснение этих процессов важно, например, для понимания сцинтилляционной эффективности кристаллов. Методика исследования спектров возбуждения люминесценции удобна для изучения переноса энергии в этих системах и исследования их электронной структуры.

В общем случае спектры возбуждения люминесценции могут быть подразделены на несколько спектральных диапазонов: прямое возбуждение нижних возбуждённых состояний дефектов, ионизация дефектов фотонами с энергией, меньшей ширины запрещённой зоны матрицы, возбуждение в урбаховском хвосте поглощения матрицей, возбуждение экситонов, создание разделённых электронно-дырочных пар с низкой энергией, создание высокоэнергетических электронно-дырочных пар с последующим ударным возбуждением/ионизацией матрицы и дефектов.

Каждая из этих областей характеризуется различной ролью каналов релаксации. При поглощении фотонов различной энергии в широкозонных диэлектриках возбуждаются разнообразные типы возбуждений в кристалле. Взаимосвязь возбуждений этих типов с оптическими функциями показана на рис. 3 на примере зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ от энергии поглощаемых фотонов, которая непосредственно отражает эффективность создания различных первичных возбуждений в кристаллах в зависимости от энергии поглощаемых фотонов.

В таблице приведены области энергий возбуждающих фотонов, соответствующие этим энергиям первичные процессы в твёрдом теле и те вторичные процессы релаксации электронных возбуждений, которые можно изучать с помощью возбуждения такими фотонами. Более подробно эти процессы будут рассмотрены ниже на конкретных примерах.

В качестве наглядного примера приведём результаты исследования спектров возбуждения люминесценции

Таблица 1. Процессы релаксации энергии при возбуждении кристаллов, которые могут исследоваться с помощью синхротронного излучения

	Область возбуждения	Типы электронных возбуждений	Процессы релаксации
Видимый свет	$h\nu \leq E_g$ $h\nu = 3-10$ эВ	Возбуждённые и ионизованные состояния дефектов и примесей. Автолокализованные экситоны	Свечение сцинтилляторов и фосфоров. Перенос энергии между центрами. Создание дефектов при аннигиляции экситонов. Внутривибрационное тушение
УФ-излучение			
ВУФ-излучение	$E_g \leq h\nu \leq (2-3)E_g$ $h\nu = 5-20$ эВ	Электронно-дырочные пары с энергией, меньшей пороговой энергии создания вторичных электронных возбуждений. Свободные экситоны	Электрон-фононное взаимодействие, приводящее к термализации и миграционному тушению за счёт разделения компонентов электронно-дырочных пар. Диффузия возбуждений. Захват возбуждений. Специфические типы внутривибрационной и межзонной релаксации (например, кроссломинесценция)
Ультра-мягкое и мягкое рентгеновское излучение	$(2-3)E_g \leq h\nu \leq (5-10)E_g$, $h\nu = 15-100$ эВ	Горячие возбуждения с энергией, превышающей энергетический порог создания вторичных электронных возбуждений. Возбуждения верхних остоновых уровней	Электрон-электронное неупругое рассеяние и оже-процессы, приводящие к каскадному размножению электронных возбуждений
	$h\nu \geq (5-10)E_g$, $h\nu > 50$ эВ	Остоновые возбуждения Возбуждённые области с несколькими десятками возбуждений. Треки ионизирующих частиц	Рентгеновская флюоресценция. Процессы Оже Взаимодействие большого числа возбуждений

двух типов в BaF_2 (рис. 4) в широкой области спектра (от 5 эВ до 1000 эВ) [29]. Этот пример интересен тем, что на одном веществе одним методом были исследованы процессы всех типов, перечисленных в таблице.

В BaF_2 наблюдаются два типа люминесценции — относительно медленная люминесценция автолокализованных экситонов (АЛЭ) (характерное время при комнатной температуре около 600 нс, сплошная кривая на рис. 4) и быстрая (со временем 0,9 нс) ультрафиолетовая кроссломинесценция (КЛ), связанная с заполнением верхней остоновой дырки электроном из валентной зоны (показана на рис. 4 кружками). В начальной области спектра хорошо видно, что порог возбуждения процес-

сов этих видов различен. Для люминесценции АЛЭ этот порог совпадает с порогом фундаментального поглощения (около 10 эВ), в то время как для остовно-валентных переходов он совпадает с порогом образования дырки в верхней остоновой зоне бария (17 эВ). Именно это различие порогов позволило в своё время физикам из ФИАНа однозначно установить природу быстрого ультрафиолетового свечения в BaF_2 [30]. В области более высоких энергий (от 25 до 90 эВ) наглядно проявляются особенности в спектрах возбуждения, связанные с приповерхностными потерями. По глубине провалов в спектре возбуждения можно установить коэффициент диффузии элементарных возбуждений в диэлектриках.

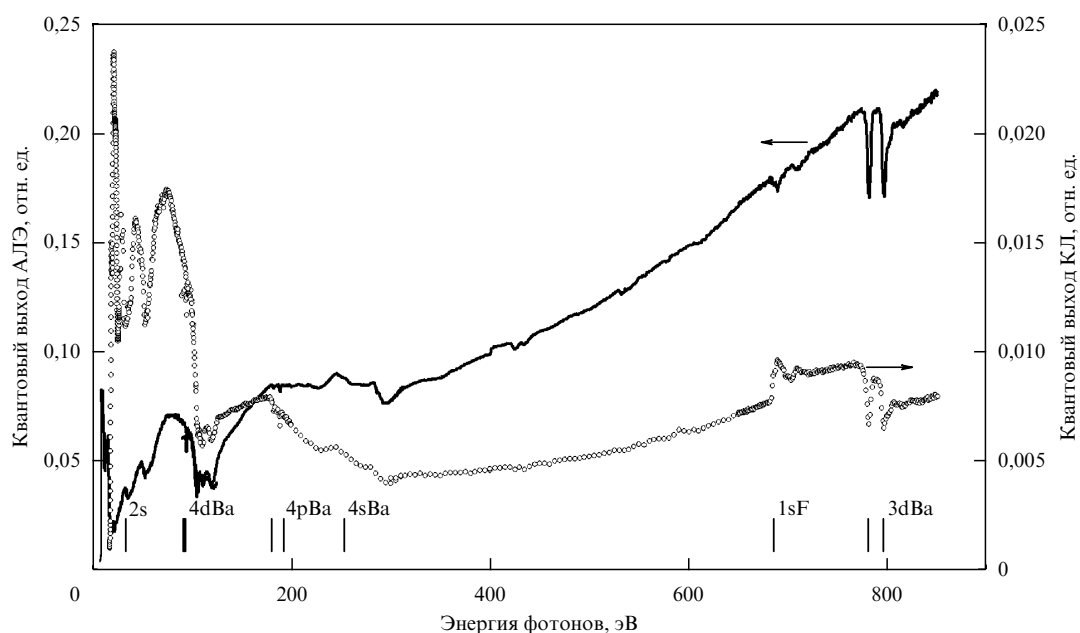


Рис. 4. Спектр возбуждения двух полос свечения BaF_2 : свечения автолокализованных экситонов (АЛЭ) (сплошная кривая) и кроссломинесценции (КЛ) (остоно-валентные переходы — кружки) [29].

Область энергий возбуждения в окрестности 100 эВ интересна тем, что в ней наглядно проявляются эффекты, связанные с созданием нескольких близко расположенных возбуждений одним фотоном за счёт либо неупругого электрон-электронного рассеяния (при энергии ниже 100 эВ), либо каскада оже-процессов после возбуждения 4d-остова бария (при энергии выше 100 эВ). Эти эффекты высокой локальной плотности электронных возбуждений проявляются как в снижении выхода люминесценции, так и в ускорении кинетики за счёт взаимного тушения возбуждений [31]. В широкой области энергий, от 280 до 680 эВ, в ВаF₂ нет резонансного взаимодействия с остоными уровнями. При этом можно было бы ожидать линейного возрастания квантового выхода с увеличением энергии фотона (число низкоэнергетичных электронно-дырочных пар, создаваемых в результате каскада неупругих процессов). Однако наблюдаются заметные отклонения от линейной формы. Эти отклонения связаны с привлекающей в последнее время внимание проблемой непропорциональности световых выходов сцинтилляторов [32]. Из-за этой непропорциональности существенно ограничивается предельно достижимое энергетическое разрешение сцинтилляторов. Непропорциональность связана в основном с плотностными эффектами, возникающими в треках ионизирующих частиц. Наконец, при исследовании относительно глубоких остовов наглядно проявляется, что релаксация энергии после образования остовных дырок на разных ионах идёт различными путями. Обычно в спектрах возбуждения наблюдаются провалы при прохождении энергии остовов (как это видно при низких энергиях). Однако в спектре возбуждения КЛ в области 1sF наблюдается скачок, который говорит о новом канале образования остовных 5p-дырок Ва в процессе оже-релаксации [29].

Рассмотрим теперь некоторые примеры проявления этих многообразных процессов в кислородсодержащих широкозонных диэлектриках. Такие кристаллы отличаются достаточно широкой валентной зоной.

При возбуждении фотонами с энергией порядка границы фундаментального поглощения возбуждаются и ионизируются дефектные состояния, затем при больших энергиях начинаются процессы в области урбаховского поглощения, после чего мы переходим в экситонную область спектра. В качестве первого примера рассмотрим содержащие иттербий оксиды иттрия, лютеция и скандия [33]. В этих кристаллах наблюдается люминесценция с переносом заряда, при которой возбуждённое состояние иттербиевого центра представляет собой дырку, перешедшую с иттербия на ближайшие ионы кислорода. На спектрах возбуждения этих систем видно чёткое разделение на следующие области: область урбаховского поглощения, в которой ионизируются дефекты; экситонную область с непосредственным возбуждением матрицы и область образования разделённых электронно-дырочных пар. В частности, из соотношения быстрой и медленной компонент свечения, возбуждаемого в области урбаховского поглощения, видно, что медленная компонента возрастает с увеличением делокализации дырки (чем ближе к краю фундаментального поглощения, тем более делокализованным является образующееся состояние).

Перейдём теперь к результатам по спектрам возбуждения сцинтиллятора, который в последние десять лет у всех на слуху, — вольфрамата свинца (PWO), поскольку применение этого сцинтиллятора сыграло большую роль в успешной реализации детекторов на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. Рассмотрим процессы в

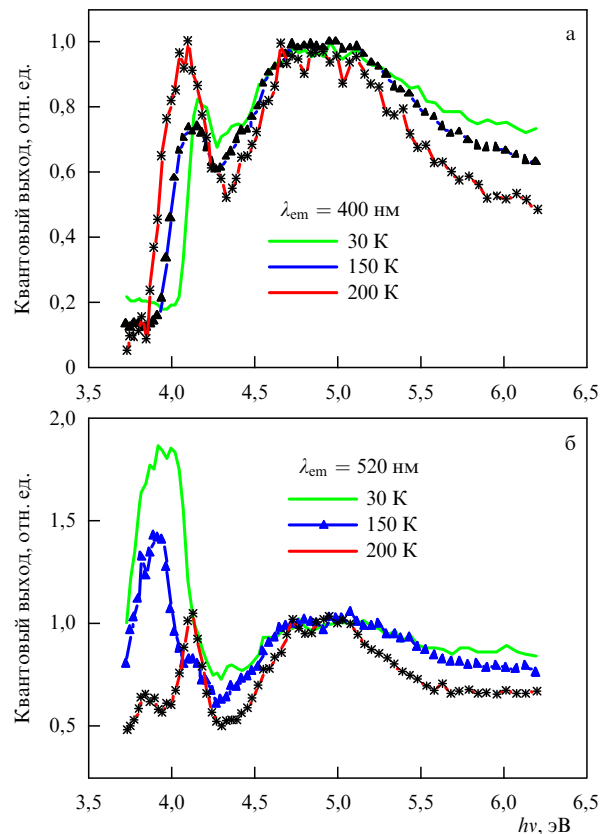


Рис. 5. Спектры возбуждения вольфрамата свинца для синей (а) и зелёной (б) полос свечения, показывающие экситонный характер быстрого (синего) свечения и рекомбинационный характер зелёного (более медленного) свечения этого сцинтиллятора [34]. (λ_{em} — длина волны люминесценции.)

области начала фундаментального поглощения (рис. 5) [34]. Специфическое поведение спектров возбуждения быстрого (синего) свечения вольфрамата свинца в зависимости от температуры непосредственно указывает на связь этого свечения с урбаховским краем поглощения свинцового экситона. Это обусловлено изменением при изменении температуры доли излучения, поглощённого основной матрицей кристалла, и говорит о собственном характере данного свечения. Мы ещё вернёмся к этим двум полосам свечения в PWO позднее. Обратим внимание на температурную зависимость спектров возбуждения синего свечения (см. рис. 5) в области создания разделённых электронно-дырочных пар — увеличение провала с возрастанием температуры. Указанный эффект связан со следующей областью спектра — областью создания разделённых электронно-дырочных пар. В зависимости от кинетической энергии первичной электронно-дырочной пары, образовавшейся при поглощении в области фундаментального поглощения, изменяется доля тех пар, которые или сразу связываются друг с другом в экситоноподобное состояние, или, наоборот, разлетаются, что впоследствии приводит к образованию медленных компонент люминесценции или к безызлучательной рекомбинации возбуждений [34]. Поскольку радиус рекомбинации (онсагеровский радиус) сильно зависит от температуры, можно проследить тенденцию изменения распределения по каналам с возрастанием температуры.

Это явление хорошо видно не только на спектрах возбуждения PWO, но и на многих других спектрах. В частности, можно сослаться на результаты для вольфра-

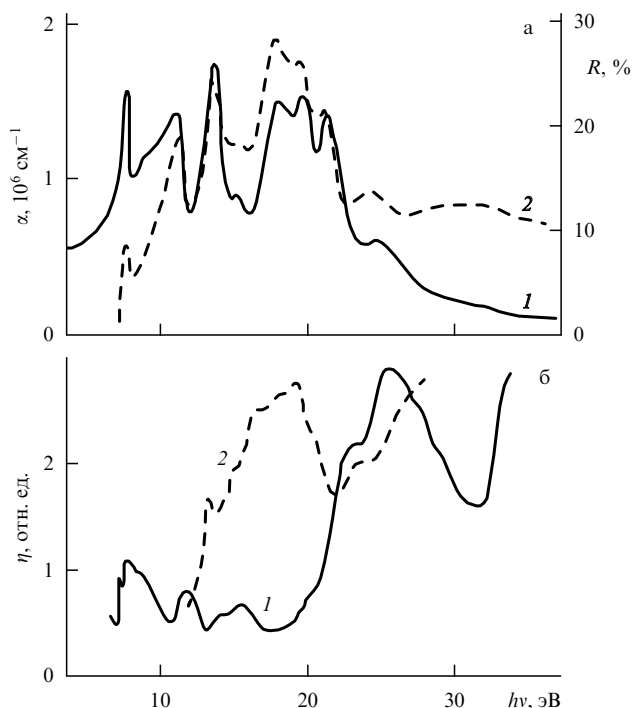


Рис. 6. (а) Спектры отражения (кривая 1) (R — коэффициент отражения) и поглощения (кривая 2) (α — коэффициент поглощения) монокристалла MgO-Al. (б) Спектры возбуждения люминесценции (кривая 1) и фотоэмиссии (кривая 2) (η — квантовый выход люминесценции или фотоэмиссии) монокристалла MgO-Al [35].

мата цинка [34]. В работе [34] показана спектральная зависимость отношения спектров возбуждения для двух различных температур. Такая методика анализа имеет ряд преимуществ, в частности уменьшает ошибки измерения нормировочных спектров. Здесь мы видим, что отношение комнатного спектра к низкотемпературному регулярно убывает при увеличении энергии вплоть до порога размножения электронных возбуждений (10 эВ). Выход указанного отношения на почти постоянный уровень при значении энергии 13 эВ означает, что все первичные возбуждения при этих и более высоких энергиях распадаются и в среднем энергия таких возбуждений оказывается порядка 6 эВ.

Рассмотрим более подробно область размножения электронных возбуждений. В этой области образуются электронно-дырочные пары с достаточно высокой энергией. Наиболее чётко порог размножения электронных возбуждений проявляется при совместном исследовании спектров возбуждения люминесценции и фотоэмиссии (см. пример исследований MgO [35] на рис. 6). В спектрах возбуждения резкий подъём люминесценции при энергии 19,5 эВ можно объяснить не только размножением, но и уменьшением коэффициентов поглощения и отражения, однако поведение спектра возбуждения фотоэмиссии указывает, что при этой энергии наблюдается именно порог размножения.

Рассмотренный на примере люминесценции вольфраматов убывающий с возрастанием энергии фотона квантовый выход не является единственным типом спектров возбуждения. Если люминесценция связана с рекомбинацией на дефектах, то может наблюдаться и другой тип квантового выхода. Различные примеры спектров возбуждения такого типа приведены для возбуждения собственной люминесценции CaWO_4 [36] и CeF_3 [37] и активаторной люминесценции $\text{CaSO}_4 : \text{Sm}$ [38].

Несколько слов о роли остовных возбуждений. Выше говорилось об остовных возбуждениях в BaF_2 . Колобанов, Спасский и др. [39] обратили внимание на то, что исследование оптических функций в области остовных экситонов позволяет сделать вывод о характере нижних состояний в зоне проводимости. Наличие резкой структуры в области катионных экситонов говорит о том, что для свинца и бария в молибдатах катионные состояния вносят значительный вклад в дно зоны проводимости, а уровни стронция и бария в этом семействе лежат в глубине зоны проводимости.

Пример спектрально-кинетических исследований свечения церия в более сложных кристаллах приведён в докладе Васильева и Бельского на недавней конференции по люминесцентным приёмникам и преобразователям ионизирующего излучения LUMDETR-2012 [40]. В этих кинетиках затухания, селективно возбуждаемых при разных энергиях возбуждения, проявляются различные процессы: непосредственное возбуждение церия с моноэкспоненциальной кинетикой, ионизация церия, диполь-дипольный перенос с возбуждённых ионов лютетия на церий с последующей ионизацией церия, изменение кинетики при переносе с экситона ($\text{Lu} + \text{F}$), перенос с электронно-дырочных пар, перенос с тушением и ионизацией при возбуждении разделённых электронно-дырочных пар. Математическая обработка формы кривых кинетики позволяет определить важные параметры переноса энергии, в частности радиусы диполь-дипольного взаимодействия, радиусы разлёта компонентов электронно-дырочной пары при ионизации и др.

Перейдём теперь к описанию исследований другого практически важного эффекта — радиационной стойкости сцинтилляторов. Синхротронное излучение оказалось удобным и для исследования этой проблемы [41]. Рассмотрим основные эффекты, связанные с радиационными повреждениями. Эти эффекты подразделяются на обратимые и необратимые. Обратимые эффекты сводятся в основном к образованию короткоживущих дефектов (пар дефектов) или изменению зарядового состояния дефектов с глубокими уровнями. В основном нами будет рассматриваться именно последний случай. Необратимые повреждения состоят в основном в образовании стабильных пар элементарных дефектов и конгломератов дефектов. Уникальные спектральные свойства и временная структура СИ, а также его высокая интенсивность позволяют использовать этот вид возбуждения для исследования дефектов и процессов их образования в кристаллах с широкой запрещённой зоной, в частности сцинтилляторах.

Методика исследования процессов возбуждения люминесценции очень удобна для исследования переноса энергии в системах дефектов в разных матрицах, энергетической структуры и радиационной стойкости диэлектриков.

Рассмотрим, как радиационные эффекты могут проявляться при исследованиях методом люминесцентной спектроскопии. В основном это изменения спектров свечения с изменением дозы, чаще всего выражающиеся в появлении дополнительных полос возбуждения. Далее, это изменение кинетики затухания при увеличении дозы (радиационные эффекты проявляются в обострении начальной стадии затухания и появлении медленной компоненты свечения).

Изменения в процессе переноса энергии проявляются в основном в изменении соотношения вероятностей различных каналов релаксации в диэлектриках.

Чем же удобно СИ в ВУФ-области и рентгеновской области при исследовании радиационных повреждений? ВУФ-фотоны и рентгеновские фотоны создают те же самые электронные возбуждения (электронно-дырочные пары, экситоны, дырки на остовных уровнях, начальные стадии образования дефектов), что и высокоэнергетичные ионизирующие частицы (поскольку в процессе релаксации трека ионизирующей частицы возникают так называемые дельта-электроны с энергией 20–10000 эВ). Кроме того, коэффициент поглощения в этой области спектра настолько высок, что фотоны поглощаются в очень узком слое и накапливаемая в этом слое доза очень значительна при умеренных потоках фотонов.

В заключение отметим, что вакуумно-ультрафиолетовое и рентгеновское СИ позволяют не только исследовать фундаментальные механизмы электронной релаксации и переноса энергии в широкозонных кристаллах, но и моделировать и исследовать радиационную стойкость скинтилляторов.

Список литературы

- Иваненко Д Д, Померанчук И Я *ДАН СССР* **44** 343 (1944)
- Иваненко Д Д, Соколов А А *ДАН СССР* **59** 1551 (1948)
- Соколов А А, Тернов И М (Отв. ред.) *Синхротронное излучение* (М.: Наука, 1966) [Sokolov A A, Ternov I M (Eds) *Synchrotron Radiation* (Berlin: Akademie-Verlag, 1968)]
- Соколов А А, Тернов И М *Релятивистский электрон* (М.: Наука, 1983) [Sokolov A A, Ternov I M *Radiation from Relativistic Electrons* (New York: American Inst. of Physics, 1986)]
- Тернов И М, Михайлин В В, Халилов В Р *Синхротронное излучение и его применения* (М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980) [Ternov I M, Mikhailin V V, Khalilov V R *Synchrotron Radiation and Its Applications* (Chur: Harwood Acad., 1985)]
- Тернов И М, Михайлин В В *Синхротронное излучение. Теория и эксперимент* (М.: Энергоатомиздат, 1986)
- Михайлин В В *Синхротронное излучение в спектроскопии* (М.: Университетская книга, 2011)
- Соколов А А, Тернов И М *ДАН СССР* **166** 1332 (1966) [Sokolov A A, Ternov I M *Sov. Phys. Dokl.* **11** 156 (1966)]
- Адо Ю М, Черенков П А *ДАН СССР* **110** 35 (1956) [Ado Yu M, Cherenkov P A *Sov. Phys. Dokl.* **1** 517 (1957)]
- Королев Ф А и др. *ДАН СССР* **110** 542 (1956) [Korolev F A et al. *Sov. Phys. Dokl.* **1** 568 (1957)]
- Соколов А А, Тернов И М *ЖЭТФ* **31** 473 (1956) [Sokolov A A, Ternov I M *Sov. Phys. JETP* **4** 396 (1957)]
- Соколов А А, Тернов И М *Письма в ЖЭТФ* **4** 90 (1966) [Sokolov A A, Ternov I M *JETP Lett.* **4** 61 (1966)]
- Жуковский В Ч и др. *ЯФ* **7** 368 (1968)
- Жуковский В Ч *Изв. вузов. Физика* (2) 144 (1968) [Zhukovskii V Ch *Sov. Phys. J.* **11** 96 (1968)]
- Жуковский В Ч *Вестн. МГУ Сер. 3. Физ., Астрон.* (1) 112 (1968)
- Соколов А А, Гальцов, Жуковский В Ч *ЖТФ* **43** 682 (1973)
- Гальцов Д В, Жуковский В Ч *Изв. вузов. Сер. Радиофиз.* **11** 941 (1968) [Gal'tsov D V, Zhukovskii V Ch *Radiophys. Quantum Electron.* **11** 544 (1968)]
- Соколов А А, Жуковский В Ч, Коровин Ю А *ЖЭТФ* **51** 1829 (1966) [Sokolov A A, Zhukovskii V Ch, Korovin Yu A *Sov. Phys. JETP* **24** 1233 (1967)]
- Алферов Д Ф, Башмаков Ю А, Черенков П А *УФН* **157** 389 (1989) [Alferov D F, Bashmakov Yu A, Cherenkov P A *Sov. Phys. Usp.* **32** 200 (1989)]
- Алферов Д Ф и др. *Труды ФИАН* **80** 125 (1975)
- Алферов Д Ф и др. *Письма в ЖТФ* **4** 625 (1978) [Alferov D F et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **4** 251 (1978)]
- Feldhaus J, Sonntag B, in *Strong Field Laser Physics* (Springer Series in Optical Sciences, Vol. 134, Ed. T Brabec) (New York: Springer-Verlag, 2009) p. 91
- Жуковский К В, Михайлин В В *Вестн. МГУ Сер. 3. Физ., Астрон.* (2) 41 (2005)
- Dattoli G et al. *J. Appl. Phys.* **100** 084507 (2006)
- Yu L H et al. *Phys. Rev. Lett.* **91** 074801 (2003)
- Dattoli G, Mikhailin V V, Zhukovsky K J. *J. Appl. Phys.* **104** 124507 (2008)
- Dattoli G, Mikhailin V V, Zhukovsky K V *Вестн. МГУ Сер. 3. Физ., Астрон.* (5) 33 (2009) [Dattoli G, Mikhailin V V, Zhukovsky K V *Moscow Univ. Phys. Bull.* **64** 507 (2009)]
- Zhukovsky K, in *Synchrotron: Design, Properties, and Applications* (Eds D Ming C, H F Toh) (New York: Nova Science Publ., 2012) p. 39
- Belsky A et al., in *Proc. of 8th Intern. Conf. on Inorganic Scintillators and Their Use in Scientific and Industrial Applications (SCINT2005)* (Khar'kov, Ukraine, 2006) p. 22
- Александров Ю М и др. *ФТТ* **26** 2865 (1984) [Aleksandrov Yu M et al. *Sov. Phys. Solid State* **26** 1734 (1984)]
- Belsky A N et al. *J. Electron Spectrosc. Related Phenomena* **79** 147 (1996)
- Moses W W et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 2038 (2012)
- Kamenskikh I A et al. *Opt. Mater.* **24** 267 (2003)
- Mikhailin V V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **486** 367 (2002)
- Васильев А Н и др. *ФТТ* **27** 2696 (1985)
- Golovkova S I et al. *Phys. Status Solidi A* **77** 375 (1983)
- Pedrini C et al. *MRS Symp. Proc.* **348** 225 (1994)
- Kamenskikh I A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **282** 599 (1989)
- Spassky D A et al. *Radiation Measurements* **38** 607 (2004)
- Belsky A N, Vasil'ev A N, in *8th Intern. Conf. on Luminescent Detectors and Transformers of Ionizing Radiation LUMDETR-2012, Halle (Saale), Germany, 2012*
- Belsky A N et al. *Chem. Phys. Lett.* **277** 65 (1997)

PACS numbers: **01.60.+q**, **01.65.+g**, 98.70.Sa
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201304g.0439

О петербургском периоде жизни и научной деятельности Д.В. Скобельцына

И.Н. Топтыгин

Выдающимися учёными не рождаются — ими становятся в меру способностей исследователя и особенно его упорного труда. В успехе такого становления большая роль принадлежит основе, заложенной в человеке в первый период его жизни. Основа определяется как биологическими генами (от родителей), так и "генами социальными" — от семьи и окружающего общества, а также исторической эпохой. Предпосылки выдающихся достижений Д.В. Скобельцына трудно понять без учёта семейных традиций и многих решающих научных и социально-политических факторов, формировавших его как учёного, организатора научных исследований и патриота.

Дмитрий Владимирович принадлежал к древнему аристократическому роду Скобельцыных (А.М. Балдин [1] ссылается на упоминание в старинных энциклопедиях боярина Скобельцына, который был вторым воеводой в Новгороде при Иване III, т.е. в первой половине XVI в.). По знатности рода Скобельцыных напрашивается сравнение с ровесником Д.В. титулованным физиком князем Луи де Бройлем, итальянские предки которого де Бройля упоминаются в хрониках ещё XII в., но на французскую службу они переходят в середине XVII в. (см. [2]).

Отец Дмитрия Владимировича, Владимир Владимирович Скобельцын, родился в Курске, но всю сознательную жизнь прожил в Петербурге, окончил Первую

И.Н. Топтыгин. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ
E-mail: igor_topygin@mail.ru