

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 120-летию со дня рождения Сергея Ивановича Вавилова

Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 30 марта 2011 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201112h.1329

30 марта 2011 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН, посвящённая 120-летию со дня рождения академика Сергея Ивановича Вавилова.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.grad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Масалов А.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *С.И. Вавилов и нелинейная оптика.*

2. **Баснев Т.Т.** (Научный центр лазерных материалов и технологий, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Люминесцентная нанофотоника и мощные лазеры.*

3. **Витухновский А.Г.** (Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Прогресс в люминесцентных источниках света и дисплеях.*

4. **Александров Е.Б.** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург). *Сергей Иванович Вавилов и специальная теория относительности.*

5. **Болотовский Б.М.** (Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Эффект Вавилова – Черенкова.*

6. **Визгин В.П.** (Институт истории естествознания и техники РАН им. С.И. Вавилова, Москва). *Сергей Иванович Вавилов как историк науки.*

7. **Гинзбург А.С.** (Общество "Знание"). *Подвижник просвещения академик С.И. Вавилов — первый президент общества "Знание" СССР.*

Статьи, написанные на основе докладов 1–4 и 6, публикуются ниже. Основное содержание доклада 5 отражено в опубликованной ранее статье Б.М. Болотовского "Излучение Вавилова–Черенкова: открытие и применение" [*УФН* 179 1161 (2009)].

PACS numbers: 01.65.+g, 42.65–k, 78.55.–m
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201112i.1329

С.И. Вавилов и нелинейная оптика

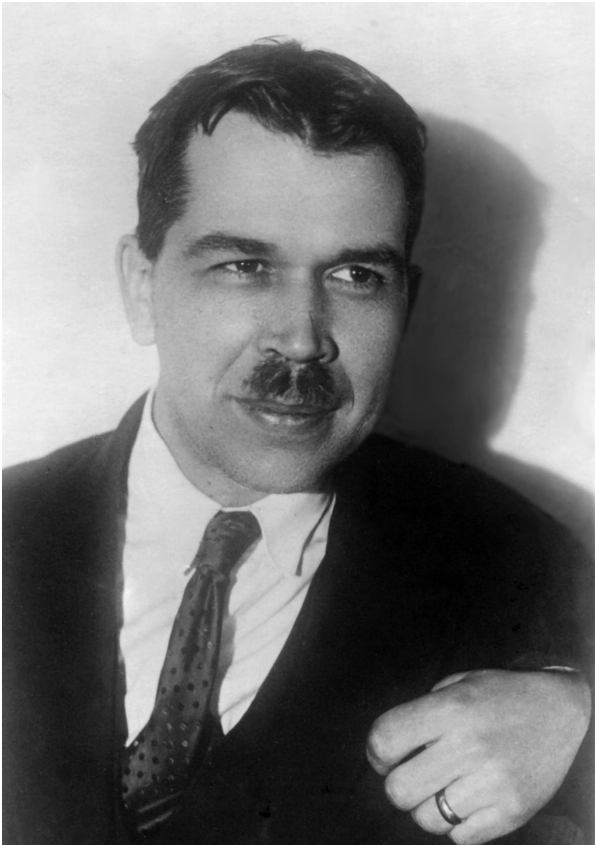
А.В. Масалов, З.А. Чижикова

Сергей Иванович Вавилов — великий русский физик, выдающийся организатор, замечательный педагог и просветитель. Именно он своей деятельностью способствовал возрождению и развитию физических исследований в нашей стране после разрухи 20-х годов XX столетия. Благодаря его усилиям и как учёного, и как организатора наша страна по уровню научных исследований стала мировой державой.

Если говорить о научном наследии С.И. Вавилова, то следует начать с того, что им создано учение о люминесценции сред. По меткому выражению И.М. Франка [1], Вавилов превратил знания о люминесценции из описания совокупности фактов в строгую науку. В частности, он дал более точное определение люминесценции веществ, ввёл понятие энергетического и квантового выходов люминесценции, установил, что квантовый выход не зависит от длины волны возбуждающего света (закон Вавилова), разработал методики измерения выхода люминесценции, изучил её поляризационные характеристики и связь с концентрацией люминесцирующих частиц. На основе этих знаний им вместе с коллегами был разработан люминесцентный метод анализа веществ. Этот метод, получивший распространение ещё при его жизни, актуален и сегодня, особенно для изучения свойств наночастиц.

О роли С.И. Вавилова в открытии эффекта Вавилова–Черенкова хорошо и много написано. А вот об истории создания люминесцентных ламп — ламп "дневного света" — написано явно недостаточно. Эта история начинается с того, что С.И. Вавилов ввёл понятие о выходе люминесценции и впервые прямыми измерениями показал, что квантовый выход люминесценции в ряде сред может приближаться к 100%. Именно высокий выход люминесценции обуславливает много-

А.В. Масалов, З.А. Чижикова. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ
E-mail: masalov@sci.lebedev.ru



С.И. Вавилов в 1925–1926 гг., когда было выполнено первое экспериментальное исследование по нелинейной оптике.

кратное энергетическое превосходство люминесцентных ламп над лампами накаливания. В наше время, когда научные исследования пытаются рассматривать с точки зрения финансовой выгоды, было бы интересно получить оценку той экономии, которую дало нашей стране люминесцентное освещение (т.е. исследования выхода люминесценции) за прошедшие десятилетия.

Факт существования сред с высоким квантовым выходом люминесценции способствовал появлению лазеров. Создатель первого рубинового лазера Т. Мейман в воспоминаниях [2] пишет, что его не устроили имевшиеся данные о низком квантовом выходе видимой люминесценции в рубине, так как естественным может быть высокий выход, а его понижение должно иметь особые причины. В программе создания лазеров в СССР [3] люминесцентные кристаллы стояли на первом месте в списке наиболее перспективных лазерных сред. Неудивительно также, что первые лазеры в нашей стране были созданы на кристаллах рубина в организациях-«детисах» С.И. Вавилова — в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАН) и в Государственном оптическом институте (ГОИ) [3].

История о первом экспериментальном исследовании С.И. Вавилова (совместно с В.И. Левшиным) по нелинейной оптике известна. Исследование выполнено в 1925 г., его результаты описаны в [4]. (Портрет С.И. Вавилова, представленный в настоящей статье, относится именно к тому периоду.) Однако о существовании эксперимента и его деталях известно мало. В этом сообщении описан ряд особенностей и деталей упомянутого первого эксперимента С.И. Вавилова и приведены сведения о работах по

нелинейной оптике М.Д. Галанина — ученика и последователя С.И. Вавилова, который много лет руководил лабораторией люминесценции, созданной С.И. Вавиловым в ФИАНе.

Публикацию С.И. Вавилова и В.И. Левшина [4] часто цитируют как первое наблюдение нелинейного оптического эффекта. Именно в этой работе идёт речь об уменьшении поглощения в среде при увеличении интенсивности света. Безусловно, это справедливо, с той оговоркой, что о возможных пределах выполнения закона «линейного» поглощения — закона Бугера–Ламберта–Бера — С.И. Вавилов размышлял и писал в своих записках ещё в 1919 г. Об этом можно прочитать в материалах Архива РАН. Статья «О соотношении между флюоресценцией и фосфоресценцией в твёрдых и жидких средах» [4] была направлена в печать в декабре 1925 г. В этой работе описаны различные эксперименты. Нарушению закона «линейного» поглощения света посвящён параграф 4 «О возможности уменьшения поглощения флуоресцирующих или фосфоресцирующих сред при облучении светом искры». Предваряя описание эксперимента, С.И. Вавилов и В.И. Левшин ясно формулируют механизм, отвечающий за ожидаемое уменьшение поглощательной способности веществ с возрастанием интенсивности падающего излучения. Это уменьшение должно происходить из-за уменьшения вследствие поглощения света числа поглощающих молекул в основном состоянии. Авторы статьи [4] приводят формулу для интенсивности излучения, прошедшего через среду, которая должна количественно описывать эффект: $J = J_0 \exp[-N(1-x)\alpha]$. Здесь x обозначает долю молекул, «выбывших из игры» вследствие поглощения, α и N — сечение поглощения молекул и их число в единице поперечного сечения образца (произведение концентрации молекул на толщину образца). Если бы мы описывали эффект современным языком, то привели бы точно такую же формулу (с точностью до обозначений). Дана также оценка доли x при непрерывном освещении в пределе слабого эффекта: $x = J_{\text{abs}}\tau/(Nh\nu)$, где J_{abs} — поглощённый световой поток, τ — время жизни возбуждённых молекул поглощающего вещества, $h\nu$ — энергия кванта излучения. При этом авторы [4], кроме случая непрерывного облучения, специально разбирают случай, в котором источник света излучает импульсы с длительностью, меньшей времени жизни молекул. В результате сделан вывод, что для увеличения эффекта необходимо выбрать среду с возможно большим временем жизни. Они выбирают урановое стекло (в современных наборах образцов цветного оптического стекла урановое стекло обозначается как ЖС19). Урановое стекло имеет весьма длительное время жизни возбуждённого состояния ($\sim 10^{-5}$ с). В качестве источника света была применена искра с длительностью свечения $< 10^{-6}$ с — по-видимому, самый мощный источник из имевшихся в то время. Для проверки роли времени жизни авторы приготовили второй образец — кювету с раствором флюоресцеина. Время жизни молекул в растворе флюоресцеина меньше длительности вспышки искры, и в этом случае следует ожидать линейного характера поглощения, т.е. отсутствия искомого эффекта. На основании данных об энергии света искры авторы оценили ожидаемый эффект снижения поглощающей способности уранового стекла в 2%. Установка для наблюдения поглощения в урановом стекле и флюоресценции была

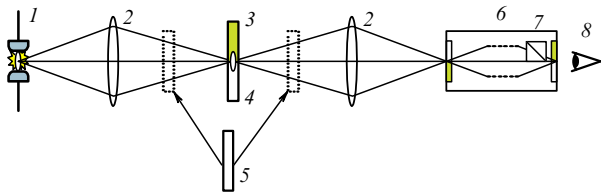


Рисунок. Схема установки для наблюдения поглощения в урановом стекле: 1 — искра, 2 — линзы, 3 — урановое стекло либо кювета с флюоресцеином, 4 — область, свободная от образца, 5 — фильтр-ослабитель, 6 — спектрофотометр, 7 — поляризатор, 8 — глаз наблюдателя.

построена по весьма примечательной схеме. Её рисунок в статье не приведён, но дано достаточно подробное описание.

На рисунке схема установки воспроизведена по описанию в статье [4]. Свет искры фокусировался на образец таким образом, что одна половина изображения искры проходила через исследуемую среду, а другая — мимо неё. Прошедший свет искры фокусировался на щель спектрофотометра так, чтобы на одну половину длины щели отображался свет, прошедший через образец, а на другую — свет, прошедший мимо образца. Спектрально разложенное излучение на выходе спектрофотометра анализировалась глазом. В спектрофотометре на пути света, прошедшего через образец, находился поляризатор, позволявший ослаблять этот свет до уровня интенсивности света, прошедшего мимо образца. Известно, что при сравнении глазом двух освещённых полей, наблюдаемых в одном поле зрения, можно заметить весьма небольшую разницу освещённостей и тем самым можно выровнять освещённости с точностью не хуже чем несколько десятых долей процента.

Таким образом, при повторяющихся вспышках искры задача наблюдателя состояла в выравнивании полей света, прошедшего через образец и мимо него, посредством поворота поляризатора. Эта процедура повторялась для каждого образца в двух сериях по 50 измерений. В одной серии в пучок света перед образцом устанавливался фильтр-ослабитель, который снижал интенсивность света на образцах, и по оценкам следовало ожидать, что нелинейный эффект отсутствует. Во второй серии тот же фильтр-ослабитель устанавливался после образца, свет проходил через него с максимальной возможной интенсивностью. В этом случае следовало ожидать проявления нелинейности поглощения уранового стекла, т.е. нарушения баланса освещённости наблюдаемых полей. Наблюдатель восстанавливал баланс освещённости поворотом поляризатора и производил отсчёт его нового положения. Разница показаний углового положения поляризатора в двух сериях пересчитывалась в изменение поглощения. Точность воспроизведения величины поглощения в таких измерениях была оценена авторами в $\pm 0,3\%$ (это было сделано по результатам измерений с флюоресцеином; скорее всего, точность ограничивалась нестабильностью искры). Перестановка фильтра-ослабителя привела к падению поглощательной способности уранового стекла на $1,5\%$ при возрастании интенсивности света. Знак эффекта, так же как и его величина в сравнении с оценкой (2% , см. выше), свидетельствуют в пользу достоверности результата. Поражает также, насколько целесообразно и опти-

мально были организованы измерения: использован объект сравнения, реализованы измерения интенсивности методом выравнивания освещённостей, применён приём перестановки фильтра-ослабителя. В результате экспериментальные наблюдения оказались успешными, несмотря на отсутствие фотоэлектрических регистраторов. В современной нелинейной оптике приём с перестановкой фильтра-ослабителя стал общепринятым.

В полной мере значение этого исследования С.И. Вавилов описал в книге *Микроструктура света* [5], вышедшей из печати в конце 1950 г. Сигнальный экземпляр книги он увидел незадолго до своей кончины. В книге [5] дана весьма яркая и полная картина того, как свойства отдельных излучателей — атомов и молекул вещества — формируют характеристики испускаемого света. В этой книге С.И. Вавилов вновь обращается к механизму падения поглощения среды с возрастанием интенсивности света; сейчас мы называем этот механизм насыщением населённостей поглощающих молекул, а соответствующее его проявление — просветлением среды. Здесь же Вавиловым вводится термин "нелинейная оптика". Он пишет: «Чем большее число молекул находится в возбуждённом состоянии при распространении света в среде, т.е. чем больше световая мощность, тем заметнее должна уменьшаться доля поглощаемой энергии, так как возбуждённые молекулы до своего возвращения в нормальное состояние перестают поглощать свет прежним образом. Поглощение должно, таким образом, зависеть от мощности светового потока... "Нелинейность" в поглощающей среде должна наблюдаться не только в отношении абсорбции. Последняя связана с дисперсией, поэтому скорость распространения света в среде, вообще говоря, также должна зависеть от световой мощности. По той же причине в общем случае должна наблюдаться зависимость от световой мощности, т.е. нарушение суперпозиции, и в других оптических свойствах среды — в двойном преломлении, дихроизме, вращательной способности и т.д.». Здесь С.И. Вавилов обобщает проявления нелинейности и предсказывает другие нелинейные явления. Намного позднее, с появлением лазеров, эти явления были обнаружены и изучены в разных средах в процессе их просветления излучением (о сопутствующих нелинейностях в растворах красителей см., например, [6]).

Примечательно, что в рассуждениях о нелинейно-оптических явлениях С.И. Вавилов однозначно связывает "нелинейность" с нарушением принципа суперпозиции: воздействие на среду нескольких световых волн в режиме нелинейного взаимодействия не сводится к сумме воздействий каждой из волн отдельно. В этом рассуждении С.И. Вавилов угадывает основу будущего математического описания нелинейно-оптических явлений. Действительно, когда в 1960-х годах благодаря появлению лазеров были обнаружены разнообразные нелинейно-оптические явления и создание адекватного математического аппарата для их описания стало необходимым, первым и, по-видимому, наиболее важным шагом теоретической нелинейной оптики стала формулировка нелинейной связи между поляризацией среды и вызвавшим её полем световой волны. Именно к этой связи в полной мере применимо рассуждение С.И. Вавилова о нарушении принципа суперпозиции.

Необходимо отметить, что, разбирая вопрос о применимости закона линейного поглощения света — закона Бугера – Ламберта – Бера — при высоких интенсивно-

стях излучения, С.И. Вавилов анализировал и противоположный предел слабых световых потоков. Здесь он пользовался квантовой трактовкой излучения и рассматривал свет как поток редких одиночных фотонов [7].

Датой рождения новой области физики — нелинейной оптики — можно считать либо 1925 г., когда была выполнена первая экспериментальная работа [4], либо 1950 г., когда вышла из печати книга *Микроструктура света*, в которой был введён термин "нелинейная оптика" и сделаны важные обобщения. Отметим, что в 1950 г. физика и, в первую очередь, оптика находились накануне революционных изменений: до возникновения квантовой электроники оставалось четыре года, а до создания лазеров — десять лет. Так случилось, что прорыв в создании источников когерентного излучения оптического диапазона, т.е. лазеров, был осуществлён с помощью люминесцентных кристаллов. К тому времени сведения о люминесценции веществ представляли собой сформировавшуюся область знания с большим количеством опытных данных; в ФИАНе и других исследовательских организациях работали коллективы опытных "люминесцентщиков" — учеников и последователей школы С.И. Вавилова. Можно утверждать, что успех в реализации первых лазеров в нашей стране был обеспечен не только прозорливостью создателей квантовой электроники Н.Г. Басова и А.М. Прохорова и их организационной деятельностью, но и достижениями школы С.И. Вавилова в области люминесценции.

С появлением лазеров исследования в области нелинейной оптики развернулись широким фронтом. Было обнаружено множество новых нелинейных эффектов с иными механизмами нелинейности, отличными от таковых в первом опыте С.И. Вавилова. В современной нелинейной оптике можно выделить два наиболее крупных класса нелинейных механизмов: механизмы с нелинейным электронным откликом и механизмы с откликом ядер атомов и молекул. Для электронных нелинейностей характерен негармонический отклик электронов вещества на воздействие гармонического светового поля. В этом классе электронных нелинейностей можно выделить группы резонансных и нерезонансных нелинейностей (по соотношению частоты светового поля и частот атомных переходов). Нерезонансная электронная нелинейность обуславливает генерацию второй гармоники, генерацию суммарных и разностных частот, многофотонное поглощение и ряд других нелинейных явлений. Резонансная электронная нелинейность обуславливает в первую очередь просветление среды, а также другие нелинейные явления. Опыт С.И. Вавилова и В.Л. Левшина [4] демонстрирует проявление как раз резонансной нелинейности молекул вещества. В нелинейных механизмах с откликом ядер атомов и молекул движение электронов вещества под действием поля остаётся гармоническим, но это движение становится причиной перемещения атомных остовов, что проявляется в изменении оптических свойств вещества. Среди этих механизмов следует назвать электрострикцию, ориентацию оптически анизотропных молекул, раскачку молекулярных колебаний и др. Эти механизмы обуславливают нелинейность показателя преломления сред, наведённое двулучепреломление, вынужденные рассеяния света и другие явления. Можно сказать, что первый опыт С.И. Вавилова оказался лишь окном в разнообразный мир нелинейных явлений в оптике.

После создания лазеров экспериментальные работы по нелинейной оптике посыпались как из рога изобилия. Было видно, что нелинейные механизмы по своему разнообразию выходят за рамки влияния света на населённости энергетических уровней вещества. Многие нелинейные явления происходили вообще в отсутствие поглощения (генерация второй оптической гармоники, нелинейный показатель преломления и др.). Прорыв в теоретическом описании оптических нелинейных явлений был осуществлён в нашей стране Р.В. Хохловым и С.А. Ахмановым с коллегами: было введено нелинейное материальное уравнение, связывающее отклик среды в виде поляризации с величиной напряжённости электрического поля световой волны: $P = P(E)$. Здесь принципиальным шагом в теории стал переход от интенсивности излучения (как у С.И. Вавилова) к электрическому полю световой волны и от населённостей — к поляризации среды. Это позволило создать последовательное теоретическое описание самых разнообразных нелинейных оптических явлений, в котором различия механизмов нелинейности "прятались" в форму материального уравнения $P = P(E)$. Были также разработаны методы решения уравнений Максвелла с тем или иным видом материального уравнения. Материальное уравнение позволило также по-новому сформулировать принцип суперпозиции, позволяющий разграничить линейные и нелинейные оптические явления. К нелинейным явлениям относятся те, в которых поляризация среды при воздействии суммы разных полей не равна сумме поляризаций, наведённых каждым полем в отдельности.

Заслуга С.И. Вавилова в становлении нелинейной оптики как нового направления в науке о взаимодействии света с веществом отмечена тем, что регулярная международная конференция по нелинейной оптике в Новосибирске носит имя Вавиловской.

С.И. Вавилов организовал в ФИАНе лабораторию люминесценции, которой руководил до последних дней своей жизни. С 1963 г. эту лабораторию возглавлял его ученик и последователь М.Д. Галанин (последний аспирант С.И. Вавилова). В середине 1961 г. в группе М.Д. Галанина заработал первый в Москве лазер — лазер на рубине [8]. После создания лазеров в период с 1963 г. по 1973 г. М.Д. Галанин вместе с З.А. Чижиковой и другими коллегами по лаборатории люминесценции принялись за "разработку вавиловской нелинейной оптики" и выполнили немало пионерских исследований с применением лазерного излучения. Они опубликовали более десяти работ по наблюдению новых нелинейных явлений. Ими было обнаружено двухфотонное поглощение и дихроизм в жидкостях, тушение люминесценции сильными световыми потоками, антистоксово комбинационное рассеяние света на электронных уровнях молекул красителей, исследована сверхлюминесценция в молекулярных кристаллах при лазерном облучении и люминесценция красителей со второго возбуждённого уровня, изучены особенности люминесценции при возбуждении пикосекундными световыми импульсами. Эти работы опубликованы в самых престижных научных журналах того времени, включая *Письма в ЖЭТФ* и др. [9]; многие из них годятся для цитирования в учебниках.

Ближайший коллега М.Д. Галанина, работавший вместе с ним над созданием рубинового лазера, — А.М. Леонтович — также выполнил ряд важных нелинейно-оптических работ, в частности, по резонансному

взаимодействию коротких световых импульсов с ионами рубина и неодима в кристаллических матрицах [10]. Ему вместе с коллегами удалось реализовать режим когерентного усиления светового импульса, в котором длительность импульса меньше времени фазовой памяти среды и для описания которого уже не годится язык населённости основного и возбуждённого состояний ионов.

В организации исследований в лаборатории люминесценции ФИАНа С.И. Вавилов придавал особое значение работе научного семинара. Регулярные семинары лаборатории люминесценции, или, как они тогда назывались, коллоквиумы, совместно с заседаниями Комиссии по люминесценции АН СССР проводились с 1945 г. Сохранились записи об этих семинарах начиная с января 1947 г. Записи велись секретарями семинаров почти 65 лет, последние 24 года записи ведёт З.А. Чижикова. Подробнее о семинарах написано в [11]. Можно привести примеры некоторых научных сообщений из этих записей. Так, на семинаре 5 октября 1949 г. выступали С.И. Вавилов и М.Д. Галанин по теме "Излучение и поглощение света индуктивно связанных молекул". Эта работа была одной из первых в большом цикле исследований по миграции энергии возбуждения в средах. В июне 1949 г. состоялся семинар с пятью докладами о проблематике люминесцентных источников света; среди выступавших — В.А. Фабрикант с докладом "Работы ВЭИ по люминесцентным лампам"¹. Семинары собирались регулярно по средам в 10 часов утра. Очередной семинар С.И. Вавилов провёл в среду 24 января 1951 г. — накануне дня своей кончины. После смерти С.И. Вавилова семинары лаборатории люминесценции до наших дней по-прежнему собираются по средам. В октябре 2010 г. состоялся 1900-й семинар. Начиная с 1976 г. ежегодно в конце марта в честь дня рождения С.И. Вавилова проводятся Вавиловские чтения, на которых выступают ведущие учёные из ФИАНа и других институтов по актуальным темам современной оптики. В работе семинаров и Вавиловских чтений принимали участие Нобелевские лауреаты И.М. Франк, Н.Г. Басов, А.М. Прохоров, В.Л. Гинзбург и многие известные учёные из институтов Москвы и других городов нашей страны. В этом году прошли 35-е Вавиловские чтения. Семинар лаборатории люминесценции служит своеобразным памятником его основателю — С.И. Вавилову — и, безусловно, принадлежит к числу уникальных явлений ФИАНа.

Дать обзор достижений в нелинейной оптике за прошедшие годы в кратком сообщении невозможно. Укажем лишь ряд примеров, где "работает" нелинейная оптика.

1. Прежде всего это создание лазерной техники. Каждый раз, когда появляется новая лазерная среда либо конструируется лазер с особыми параметрами излучения, необходим расчёт режима их работы, который можно провести только применяя балансные уравнения, являющиеся не чем иным, как описанием резонансной нелинейности активной среды. Здесь нелинейно-оптическое описание выступает как инженерная наука.

2. Специальные нелинейные среды обеспечивают работу лазеров в уникальных режимах генерации. Так, в лазерах, генерирующих импульсы пикосекундной и фемтосекундной длительности, используют просветляю-

щие среды и среды с нелинейным показателем преломления. Для усиления коротких импульсов применяют параметрические кристаллы, действие которых обеспечивается механизмом нерезонансной электронной нелинейности. Измерение длительности пикосекундных и фемтосекундных лазерных импульсов осуществляется исключительно с помощью приборов, построенных на основе нелинейно-оптических явлений, поскольку методы прямого фотоприёма не обладают достаточным временным разрешением.

3. Нелинейные среды позволяют существенно расширить диапазон длин волн, в котором может быть получено когерентное излучение. Здесь широко применяются кристаллы, генерирующие вторую оптическую гармонику, и среды-преобразователи на основе вынужденного комбинационного рассеяния света. Для непрерывной перестройки длины волны лазерного излучения используют параметрические кристаллы с нерезонансной электронной нелинейностью.

4. Техника спектроскопии сверхузких атомных резонансов, используемая при создании оптических стандартов частоты и приборов точного времени, неразрывно связана с резонансными нелинейными явлениями. Вследствие узости атомных резонансов нелинейность взаимодействия со светом проявляется уже при милливаттной мощности излучения.

5. В современной технике генерации и детектирования излучения терагерцового диапазона частот находят применение лазеры и нелинейные среды, способные обеспечить оптическое выпрямление и генерацию разностных частот.

6. Нелинейные эффекты взаимодействия световых импульсов, передающих информацию в волоконных линиях связи, ограничивают технические возможности связи. Здесь даже слабая нелинейность показателя преломления материала световода оказывает неблагоприятное влияние из-за накопления эффекта её воздействия на большой длине распространения. Но в световодах находит применение и "полезная" нелинейность — усиление оптических импульсов за счёт вынужденного комбинационного рассеяния света в материале световода.

7. Разрабатываемые ячейки оптической памяти для квантовых компьютеров основаны исключительно на эффектах резонансной нелинейности различных сред.

8. Для генерации света в неклассических квантовых состояниях (субпуассоновском, сжатом и др.) пригодны только нелинейные процессы, обеспечивающие многофотонный характер элементарного акта взаимодействия со светом. Такой свет необходим в уникальных приборах, предназначенных для сверхчувствительных оптических измерений, в которых требуется преодолеть стандартный квантовый предел чувствительности.

9. Среди спектроскопических методов изучения вещества получил распространение, по-видимому, единственный нелинейно-оптический метод — метод когерентной спектроскопии комбинационного рассеяния света. Для его реализации требуются два лазерных источника, один из которых может плавно перестраиваться по длине волны.

10. Для регистрации слабого инфракрасного (ИК) излучения иногда применяют смешение ИК-волн с видимым излучением в нелинейной среде. В этом случае в процессе генерации суммарной (или разностной) частоты осуществляется перенос ИК-частоты в види-

¹ ВЭИ — Всесоюзный электротехнический институт.

мую область, где доступны средства чувствительной фоторегистрации.

Представленные примеры не исчерпывают тему о роли и месте нелинейной оптики в современной науке и технике.

В период "лазерного бума", в 1960-е и 1970-е годы, ФИАН и ряд академических институтов расширились, принимая выпускников московских вузов, которые совершенствовали лазерную технику и открывали новые нелинейно-оптические эффекты. Заметную долю среди исследователей составляли выпускники Московского физико-технического института (МФТИ). Здесь нельзя не вспомнить малоизвестную страницу деятельности С.И. Вавилова — его участие в создании МФТИ. Как Президент АН СССР он поддержал идею П.Л. Капицы и его единомышленников о создании в стране учебного заведения высокого уровня, предназначенного для подготовки физиков-исследователей. В связи с этим в 1946 г. С.И. Вавилов возглавил правление Высшей физико-технической школы СССР (впоследствии МФТИ). Для организации обучения оптическим специальностям туда был направлен соратник С.И. Вавилова Г.С. Ландсберг. В период лазерного бума сотни выпускников МФТИ пришли в ФИАН, Институт спектроскопии и другие исследовательские центры Академии наук и обеспечили мировой уровень лазерных достижений.

В заключение можно сказать, что разработка С.И. Вавиловым и его преемниками учения о люминесценции веществ способствовала успешному развёртыванию лазерных исследований в нашей стране. Пионерские опыты С.И. Вавилова и В.Л. Левшина открыли окно в разнообразный мир нелинейных явлений в оптике. Благодаря применению лазерных источников света ученики и последователи С.И. Вавилова внесли весомый вклад в обнаружение и исследование новых нелинейно-оптических явлений. Традиции преданности науке, заложенные С.И. Вавиловым, его пример самоотверженной деятельности в невероятных трудных условиях до сих пор помогают сохранить высокий научный уровень исследований в нашей стране.

Список литературы

1. Франк И М (Ред.) *Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания* (М.: Наука, 1979)
2. Maiman T H *The Laser Odyssey* (Blaine, WA: Laser Press, 2000) [Мейман Т *Лазерная одиссея* (М.: Печатные Традиции, 2010)]
3. Отчёт по теме "Фотон": применение квантовых систем для генерации, усиления и индикации оптического излучения (М.: ФИАН, 1961)
4. Wawilow S J, Lewschin W L "Die Beziehungen zwischen Fluoreszenz und Phosphoreszenz in festen und flüssigen Medien" *Z. Phys.* **35** 920 (1926)
5. Вавилов С И *Микроструктура света. Исследования и очерки* (М.: Изд-во АН СССР, 1950) [Translated into German: Vavilov S I *Die Mikrostruktur des Lichtes. Untersuchungen und Grundgedanken* (Berlin: Akademie-Verlag, 1953)]
6. Vasil'eva M et al. "Amplitude and phase nonlinear response of bleachable dyes using picosecond excitation" *IEEE J. Quantum Electron.* **19** 724 (1983)
7. Вавилов С И "Замечания об эмпирической точности оптического принципа суперпозиции" *Журн. Русск. физ.-хим. о-ва. Ч. физ.* **60** 555 (1928); *Собрание сочинений* Т. 1 (М.: Изд-во АН СССР, 1954) с. 234
8. Леонтович А М, Чижикова З А "О создании первого лазера на рубине в Москве" *УФН* **181** 82 (2011) [Leontovich A M, Chizhikova Z A "On the creation of the first ruby laser in Moscow" *Phys. Usp.* **54** 77 (2011)]
9. Чижикова З А (Авт.-сост.) *Михаил Дмитриевич Галанин (К истории ФИАН. Сер. "Портреты", Вып. 3)* (М.: ФИАН, 2004)
10. Леонтович А М, Можаровский А М, Трифонов Е Д "Когерентное усиление, отражение и индуцированное сверхизлучение в активированных средах" *УФН* **150** 453 (1986) [Leontovich A M, Mozharovskii A M, Trifonov E D "Coherent amplification, reflection, and induced superradiance in activated media" *Sov. Phys. Usp.* **29** 1058 (1986)]
11. Чижикова З А "Записки архивариуса". Из истории Отдела люминесценции", в сб. *1800-й семинар Отдела люминесценции (К истории ФИАН. Сер. "Знаменательные события", Вып. 1)* (М.: ФИАН, 2003) с. 13

PACS numbers: **42.50.** – **p.** **42.70.** – **a.** **78.47.** – **p**
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201112j.1334

Люминесцентная нанопотоника, фторидная лазерная керамика и кристаллы

Т.Т. Басиев, И.Т. Басиева, М.Е. Дорошенко

Изучая отдельные научные публикации Сергея Ивановича Вавилова и его фундаментальный труд — книгу *Микроструктура света* [1], приходишь к мысли, что они заложили основу современной нанопотоники лазерных и люминесцирующих материалов.

Сергей Иванович указывал, что любой источник света может быть охарактеризован тремя признаками: энергией излучения, спектром и состоянием поляризации. При этом он подчёркивал, что в действительности это лишь средние макроскопические характеристики. За ними скрывается необычайно сложный мир микрооптики, благодаря которому и складываются такие средние характеристики. Для того чтобы исследовать природу света и раскрыть связь между свойствами света и свойствами элементарных излучателей, его порождающих, необходимо проникнуть в этот мир микрооптики (или нанопотоники, как сейчас принято называть).

К микрооптике (нанопотонике) С.И. Вавилов относил свойства очень малых излучателей, проявления длительности возбуждённых состояний молекул и, наконец, взаимодействия светящихся молекул с окружающей средой, особо подчёркивая, что соседние молекулы определяют начальное, основное, звено процесса перемещения (миграции) энергии оптического возбуждения в среде [1].

Понимая, что увеличение концентрации приводит к уменьшению расстояния между оптически активными молекулами и соответственно к усилению взаимодействия между ними, С.И. Вавилов и его сотрудники детально это исследовали и обнаружили характерные "нетривиальные" зависимости от концентрации степени поляризации, длительности возбуждённого состояния и выхода люминесценции. Уже в 30-е годы XX века С.И. Вавилов и его сотрудники обнаружили различие между зависимостями времени жизни возбуждённого состояния и квантового выхода от концентрации, что

Т.Т. Басиев, И.Т. Басиева, М.Е. Дорошенко. Научный центр лазерных материалов и технологий, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ
E-mail: basiev@lst.gpi.ru, irina.basieva@lnu.se, dorosh@lst.gpi.ru

прямо указывало на неэкспоненциальность измеряемых ими кинетических кривых затухания люминесценции.

К сожалению, в те далёкие годы техника не позволяла мгновенно возбудить люминофор и прецизионно измерить кинетику затухания люминесценции, а также не существовало теории, количественно описывающей кинетику затухания ансамбля частиц с учётом микро-взаимодействий.

Первые выражения для кинетики затухания статистического ансамбля светящихся частиц (доноров) появились в работах Фёрстера [2] (1948 г.) и Галанина [3] (1955 г.) для диполь-дипольного двухчастичного тушащего взаимодействия и переноса энергии донор-акцептор в виде корневой зависимости,

$$I(t) \approx \exp(-\sqrt{Wt}), \tag{1}$$

где $I(t)$ — нормированная интенсивность люминесценции, W — скорость тушения.

Впоследствии этот закон был обобщён для более высоких степеней мультипольности взаимодействия. Общая формула имеет вид [4–6]

$$I(t) \approx \exp[-(Wt)^{d/S}], \tag{2}$$

где S — степень мультипольности; $S = 6, 8, 10$ для диполь-дипольного, диполь-квадрупольного и квадруполь-квадрупольного взаимодействий соответственно, d — геометрическая размерность пространства, $d = 1, 2, 3$.

Подчеркнём, что такой сложный вид кинетики затухания люминесценции является важным инструментом для выявления микроструктуры света, о которой говорил Вавилов, т.е. для определения микроэффективности (W_0) и мультипольности (S) доминирующего ион-ионного взаимодействия, концентрационной зависимости $W(c)$, а также степени упорядоченности частиц и размерности d ограниченных геометрий в сложных молекулярных системах нанометрового и атомарного масштаба.

В настоящее время кинетика переноса энергии позволяет выявить не только микрооптику взаимодействий в люминофоре и лазерной среде, но и особенности пространственного распределения наноразмерных молекулярных комплексов NdO_8 , PrO_8 и SmO_8 редкоземельных ионов в лазерных стёклах.

Одним из примеров является концентрационное тушение Nd-Nd в лазерных матрицах. Неодим может не только излучать энергию, но и два близко расположенных иона могут тушить друг друга в результате диполь-дипольного взаимодействия, переноса возбуждения на потушенные уровни. Кроме того, оптическое возбуждение может мигрировать от иона к иону, находясь на верхнем лазерном уровне.

Особенность заключается в том, что обычно донор-донорное взаимодействие C_{DD} является строго резонансным, и поэтому его эффективность всегда выше, чем эффективность тушащего взаимодействия донор-акцептор C_{DA} . Кинетика тушения в случае $C_{DD} \gg C_{DA}$ не только для неодима, но и для многих других ионов описывается простым выражением

$$I(t) = \exp(-Wt) \tag{3}$$

с одним параметром средней скорости. Казалось бы, это обеспечивает облегчение для исследователей, но на самом деле в указанный параметр входят четыре харак-

теристики: мультипольность взаимодействия, скорость элементарного переноса, расстояние минимального сближения и размерность пространства. Как определить эти четыре неизвестных микропараметра из одного макропараметра скорости, т.е. как проникнуть из макрооптики в микрооптику, было неизвестно. Один из путей — это использовать низкие температуры и "заморозить" миграцию [7, 8], а другой — взять в качестве зондирующего (модельного) иона ион самария, для которого миграционные взаимодействия сильно ослаблены, $C_{DD} \rightarrow 0$ [9–11].

Общая формула для трёхмерного случая статического тушения ($C_{DD} = 0$) имеет вид (см., например, [7, 9–11]):

$$I(t) = \begin{cases} \exp[-W_{in}t], & W_{in} = \frac{7c_A C_{DA}}{R_{min}^S}, \quad t < t_b, \\ \exp[-(W_F t)^{3/S}], & W_F = kc_A^{S/3} C_{DA}, \quad t > t_b, \end{cases} \tag{4a}$$

где W_{in} — скорость на начальной стадии, W_F — скорость на неупорядоченной стадии, описываемой фёрстеровским законом, t_b — граничное время смены этих стадий, R_{min} — расстояние минимального возможного сближения активных частиц, k — константа, c_A — концентрация акцепторов.

Мы уже отмечали, что этот более сложный, степенной, вид кинетики очень важен для выявления микроструктуры межмолекулярных взаимодействий, о которой говорил Вавилов, т.е. для определения мультипольности, микроэффективности и других микропараметров переноса.

Из наклона кривой кинетики затухания [7–11], спрямлённой в дважды логарифмической шкале интенсивности по отношению к логарифмической шкале времени, на

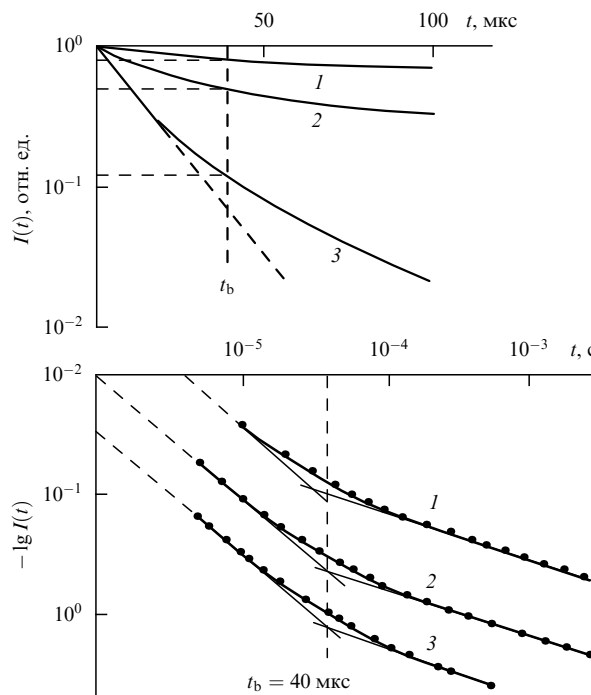


Рис. 1. Кинетика тушения Sm-Sm в литий-лантан-фосфатном стекле с различными концентрациями Sm : кривые 1 — концентрация Sm $2,5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, кривые 2 — $9,2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, кривые 3 — $23 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Таблица. Микропараметры тушения Sm–Sm и Nd–Nd в литий-лантан-фосфатном стекле и миграции Eu–Eu в натрий-боросиликатном стекле [7–11]

Ионы	S	C_{DA}	$t_b, \text{мс}$	$W(R_{\min}), \text{с}^{-1}$	$R_{\min}, \text{Å}$
Nd–Nd	6	$0,03 \text{ нм}^6 \text{ мс}^{-1}$	0,59	$1,7 \times 10^3$	5,1–5,4
Sm–Sm	8	$0,23 \text{ нм}^8 \text{ мс}^{-1}$	0,04	$2,5 \times 10^4$	5,6
Eu–Eu	10	$4 \times 10^{-3} \text{ нм}^{10} \text{ мс}^{-1}$	0,12	8×10^3	4,7

дальней стадии затухания, $t \gg t_b$ (рис. 1), мы находим степень неэкспоненциальности d/S (для переноса Sm–Sm $d/S = 0,375$), а значит при известной размерности пространства ($d = 3$) мультипольность $S(\text{Sm–Sm}) = 8$.

Из наклона этой же кинетической кривой, но в координатах $t^{d/S} - \ln(I)$ определяем среднюю скорость неэкспоненциального затухания $W_F \sim c_A^{S/3} C_{DA}$, а отсюда по известным S и концентрации акцепторов c_A находим микроэффективность переноса C_{DA} .

Интересно, что начальная стадия затухания, $t < t_b$, показывает упорядоченную экспоненциальную кинетику, что отражает дистанционную упорядоченность в расположении люминесцирующих частиц или запрещённый для сближения объём вокруг одной частицы. Подставив в формулу для скорости на начальном участке $W_{\text{in}} = 7c_A C_{DA}/R_{\text{min}}^S$ уже известные микропараметры S , C_{DA} и концентрацию c_A , находим последнюю микрохарактеристику, R_{min} , характеризующую степень ближнего порядка в ансамбле. Найденные микропараметры переноса энергии для ряда редкоземельных ионов в стеклах представлены в таблице.

Важно подчеркнуть, что R_{min} входит в выражение для W_{in} (описывающее также скорость тушения в массивном кристалле при наличии сверхбыстрой миграции) с большим показателем степени, что позволяет контролировать скорость тушения и квантовый выход выбором сред с различным R_{min} .

Другим интересным примером, в котором кинетика очень важна, является *кооперативный наноразмерный перенос энергии*.

До 1999 г. разработчики лазерных кристаллов считали, что ион Ce^{3+} , как и ионы La и Lu, оптически неактивен (поскольку он не имеет f–f-переходов в видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра) и что он может являться основным катионом, формирующим лазерную матрицу, не приводя к тушению активаторов. Однако оказалось, что это не так и тушение ионами Ce существует. Мы обнаружили, что, например, для ионов Nd^{3+} [12] (а позднее — и для ионов Ho^{3+} и Tm^{3+} [13]) тушение резко (квадратично) возрастает с увеличением концентрации ионов Ce^{3+} . Так, время жизни ионов Tm^{3+} в CeF_3 оказалось в 10 раз меньше, чем в LaF_3 . Мы детально исследовали это новое явление и обнаружили, что оно вызвано переносом энергии с одного иона донора, например Tm^{3+} , одновременно на два иона Ce^{3+} , выступающих как один двухчастичный акцептор. При этом энергия донорной одночастичной люминесценции должна быть резонансна удвоенной энергии поглощения ионов Ce.

Мы обнаружили явление кооперативного переноса энергии и в случае тушения $\text{Er} \rightarrow 3\text{Ce}$ в трифториде лантана-церия [12], и при переносе $\text{Tb} \rightarrow 2\text{Yb}$ в иттербиевом гранате [14], причём в первом случае роль одного

кооперативного акцептора играли три иона Ce, а концентрационная зависимость скорости тушения была кубической.

Отметим, что до наших работ [12–16] проводились эксперименты [17, 18] только по кооперативному переносу от двухчастичного донора к одночастичному акцептору (ап-конверсии $2\text{Yb} \rightarrow \text{Tb}$). Вероятность переноса была очень мала, скорость составляла около 2 с^{-1} , что много меньше скоростей излучательных переходов редкоземельных ионов, $10^2 - 10^5 \text{ с}^{-1}$, и поэтому её было невозможно измерить непосредственно.

Мы показали, что коренным отличием "процесса вниз" (т.е. даун-конверсии — кооперативного переноса от одночастичного донора к двухчастичным акцепторам) от ап-конверсии является включение суммирования по множеству вариантов парных акцепторов по всей катионной (цериевой) подрешётке кристалла, в результате чего суммарная вероятность переноса (даун-конверсии) резко возрастает (на несколько порядков величины).

При этом скорости переноса сопоставимы с излучательными вероятностями переходов донорных ионов или даже на порядок их выше. Эти особенности надо учитывать при разработке и исследовании лазерных материалов, чего ранее не делалось. Кооперативная сенсификация с даун-конверсией представляет особый интерес, так как она может позволить продвинуться в получении лазерной генерации в среднем ИК-диапазоне длин волн (3–6 мкм) и, кроме того, повысить квантовый выход (200–300 %) за счёт дробления одного большого кванта возбуждения на несколько малых.

Теоретически задача о кооперативном переносе энергии с усреднением по пространству была рассмотрена в приближении сплошной среды и нулевого размера частиц [19–21]. В случае тушения двухчастичными акцепторами кинетическая зависимость на дальних временах имеет следующий вид:

$$I_2(t) = \exp \left[- (W_2 t)^{d/(2S-d)} \right],$$

$$W_2 = \frac{d}{S-d} \left[\Gamma \left(\frac{2S-2d}{2S-d} \right) \right]^{(2S-d)/d} \frac{c_A^{2S/d}}{t_0}, \quad (5a)$$

а для тушения трёхчастичными акцепторами

$$I_3(t) = \exp \left[- (W_3 t)^{d/(3S-2d)} \right],$$

$$W_3 = \left(\frac{d}{S-d} \right)^2 \left[\Gamma \left(\frac{3S-3d}{3S-2d} \right) \right]^{(3S-2d)/d} \frac{c_A^{3S/d}}{2t_0}, \quad (5b)$$

где W_2 и W_3 — средние скорости кооперативного тушения, Γ — гамма-функция, t_0 — время элементарного акта кооперативного переноса энергии на две или три акцепторные частицы, находящиеся на минимальном расстоянии от донора.

На примере простой кубической решётки нами было проведено моделирование методом Монте-Карло и получено хорошее согласие результатов теории и численного эксперимента. На рисунке 2 показан кооперативный перенос энергии на двухчастичные акцепторы. Видно, что наклоны модельных и теоретических кривых интенсивности в логарифмической шкале относительно времени в $d/(2S-d)$ -степенной шкале на долговременной стадии хорошо согласуются, что говорит о совпадении функциональных законов затухания в теории и компьютерном эксперименте. В найденных кинетических зависимостях характерно то, что дробный показатель степени

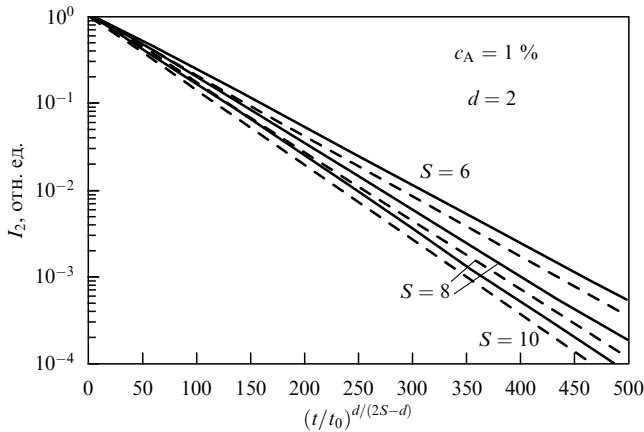


Рис. 2. Кооперативное тушение люминесценции: моделирование методом Монте-Карло (сплошные линии) и аналитическое выражение (5а) (штриховые линии).

$d/(2S - d)$ при времени t сильно зависит от мультипольности взаимодействия S и размерности пространства d . Например, для одномерной задачи и квадруполь-квадрупольного взаимодействия показатель степени при t очень мал (0,053), тогда как для трёхмерной задачи и диполь-дипольного переноса показатель степени значительно выше (0,333). То есть крутизна неэкспоненциальной кинетической зависимости резко меняется при изменении степени мультипольности S и размерности пространства d и может служить "зондом" как для S , так и для d .

Если мы рассмотрим зависимость скорости переноса от количества (концентрации) акцепторов (см. выражение (5а)), то увидим, что она тоже сильно зависит от размерности и мультипольности взаимодействия ($c_A^{2S/d}$). Причём степень концентрационной зависимости очень высока, от 4 до 20, в отличие от таковой в случае традиционного концентрационного тушения.

В последние годы в физике люминофоров и лазерных сред особое место занимают *наноструктурированные среды*. Нанодисперсные материалы, фотонные кристаллы и нанопорошки, легированные флуоресцентными ионами, важны с точки зрения их применения в медицине, биологии и оптике.

Встаёт вопрос: как меняются оптические свойства люминесцирующих сред при переходе от массивных тел к наноразмерным? Целью было определить особенности и найти аналитические выражения для кинетики релаксации оптического возбуждения примесных ионов в наночастицах.

Мы использовали [22] метод Монте-Карло для моделирования кинетики переноса энергии от донорных ионов к акцепторным ионам, случайно расположенным в сферических наночастицах с размером, много меньшим длины волны (5–50 нм). Мы обнаружили, что в случае наночастиц затухание медленнее, а квантовый выход выше и этот эффект сильнее для наночастиц меньшего размера.

Аналитическое выражение для статического тушения в наночастицах было получено в виде [23, 24]

$$I_{st_nano}(t) = \left(1 - \frac{(W_F t)^{1/S}}{2k_1 N_A^{1/3}}\right)^3 \exp\left[-(W_F t)^{3/S}\right] + \frac{3}{k_1} \frac{N_A^{1/3}}{(W_F t)^{2/S}} \exp\left[-\frac{(W_F t)^{3/S}}{2} \left\{1 - 2k_0 \frac{(W_F t)^{1/S}}{N_A^{1/3}}\right\}\right], \quad (6)$$

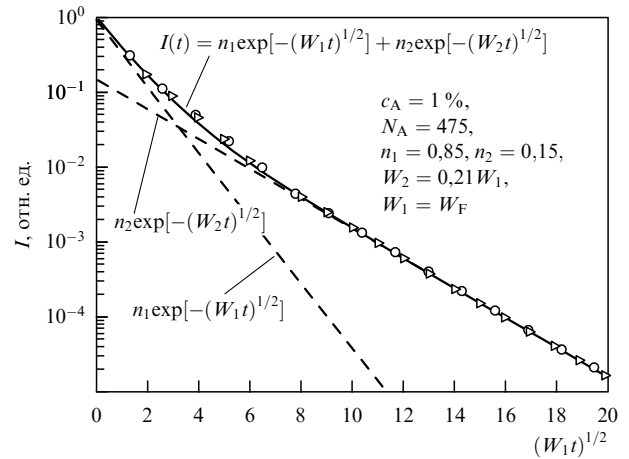


Рис. 3. Двухстадийная кинетика тушения люминесценции в наночастицах: моделирование методом Монте-Карло (кружки) и аналитическое выражение (сплошная линия с треугольниками), состоящее из двух слагаемых.

где k_0, k_1 — константы, N_A — среднее число акцепторов в одной наночастице. В случае не слишком малых наночастиц вторым членом в фигурных скобках в правой части (6) можно пренебречь.

Выражение (6) как с постоянными, так и с зависящими от времени амплитудными коэффициентами перед слагаемыми успешно описывает модельные кинетики (рис. 3). Начальная стадия кинетики тушения в наночастицах демонстрирует степенную временную зависимость (первое слагаемое в правой части (6)), подобную зависимости для кинетики тушения в объёмном образце (см. (4б)). Однако уже на первом-втором порядке глубины тушения люминесценции ($I(t) \sim 0,1 - 0,01$) включается второй член в правой части (6) и происходит плавный переход к более медленной кинетике. Последняя тоже линеаризуется в координатах $t^{3/S} - \ln(I)$, но она имеет другую макроскопическую скорость переноса. Анализ показал, что микрофизика тушения в наночастицах проявляется в том, что сначала затухают находящиеся в объёме наночастиц доноры, имеющие акцепторы в полной сфере тушения (в телесном угле 4π). Затем, по мере выгорания объёмных доноров, начинает проявляться тушение доноров, которые находятся в приповерхностном слое и имеют акцепторы только в полусфере тушения (в телесном угле 2π), а значит в два раза меньше, чем в объёмном случае, акцепторов, и макроскорость, меньшую в $2^{S/d}$ (от 4 до 1000) раз.

Следующий пример — *сверхмиграция в наночастицах*. Выше мы отмечали, что при переносе энергии и тушении в режиме сверхмиграции, когда $C_{DB} \gg C_{DA}$ и возбуждение движется по донорам очень быстро, происходит усреднение скоростей тушения разных доноров, и тогда мы обычно наблюдаем так называемый кинетический предел — моноэкспоненциальное затухание с одной-единственной средней скоростью. И опять возникает вопрос: как перейти к микропараметрам, к микрооптике, если у нас есть только один скоростной макропараметр W (средняя величина) и много неизвестных микропараметров?

Было обнаружено [25], что в ансамбле одинаковых наночастиц кинетика на дальних временах перестаёт быть моноэкспоненциальной и переходит в неэкспоненциальную, степенную, стадию, подобно статическому

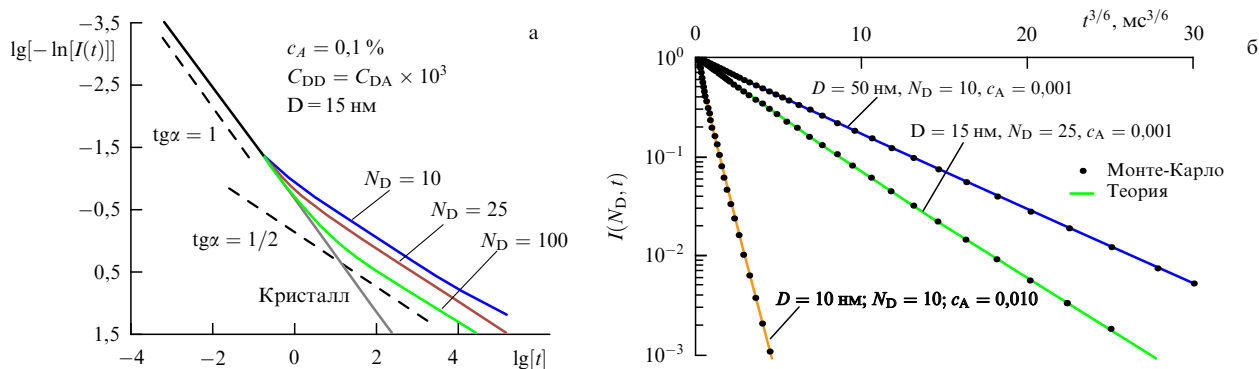


Рис. 4. Двухстадийная кинетика сверхмиграционного тушения люминесценции в массивном кристалле и наночастицах с различной концентрацией доноров; α — угол наклона кинетической кривой в дважды логарифмической шкале к оси абсцисс.

тушению. Причём из этого сложного закона можно найти, как и ранее, сразу все искомые микропараметры: S , d , C_{DA} , R_{\min} . Грубо говоря, если мы берём объёмный кристалл с одноэкспоненциальной кинетикой затухания, то, диспергировав его на наночастицы, получаем неэкспоненциальную кинетику и тогда мы можем определить все искомые микропараметры взаимодействия в системе.

На больших временах точное аналитическое решение [25] имеет вид

$$I(t) = \exp \left[-N_D \left(\frac{W_F t}{N_D} \right)^{3/S} \left\{ 1 - \frac{9\Gamma(1-4/S)}{16\Gamma(1-3/S)} \times \frac{1}{R} \left(\frac{C_{DA} t}{N_D} \right)^{1/S} \right\} \right] \approx \exp \left[-N_D \left(\frac{W_F t}{N_D} \right)^{3/S} \times \left\{ 1 - \frac{0,6}{N_A^{1/3}} \left(\frac{W_F t}{N_D} \right)^{1/S} \right\} \right], \quad (7)$$

и эта зависимость хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования.

Анализ показывает, что (7) подобно решению для статического случая, за исключением важной особенности: скорость затухания стала зависеть от N_D — числа доноров в наночастице, или концентрации доноров. Ранее, в объёмном образце и в статике, такой зависимости не было.

На рисунке 4 показаны кинетические зависимости для наночастиц в этом режиме сверхмиграции, когда $C_{DD} \gg C_{DA}$. Для образцов из наночастиц с различными диаметрами D и разной концентрацией доноров и акцепторов в дважды логарифмической шкале интенсивности и времени в логарифмической шкале хорошо видна двухстадийность кинетики: экспоненциальный закон при $t < t_b$ со скоростью, близкой к скорости кинетического предела в объёмном образце, сменяется при $t > t_b$ степенной, неэкспоненциальной, зависимостью (рис. 4а). На больших временах заметно спрямление кинетической кривой в координатах $t^{3/S} - \ln(I)$ (рис. 4б). Как и ранее, из наклона кривой в координатах $\ln(t) - \ln(\ln(I))$ при $t \gg t_b$ мы находим показатель d/S степенного закона, а значит либо размерность пространства, либо мультипольность взаимодействия. Затем из наклона кривой в координатах $t^{3/S} - \ln(I)$ находим среднюю скорость $W_{nF} = W_F N_D^{S/3-1}$, подставив в которую c_A , N_D , D и S , определяем микропараметр C_{DA} . По известным t_b или скорости затухания на начальном участке мы можем найти элементарную скорость переноса донор-акцеп-



Рис. 5. В руке девочки образец керамики, полученной методом горячего прессования.

тор на ближайшем расстоянии (в донор-акцепторной паре) или R_{\min} .

Остановимся ниже на ряде достижений в разработке современных лазерных материалов и связи их свойств с микропроцессами взаимодействия на наноуровне в лазерной среде.

На рисунке 5 показан один из образцов разработанной нами фторидной лазерной нанокерамики, не имеющей аналогов в мире. Фторидная основа была выбрана потому, что щелочноземельные фториды обладают широкой запрещённой зоной и коротким фоновым спектром, обеспечивая уникальную возможность создания лазерных материалов с рекордно широким спектром длин волн, от ультрафиолетового диапазона до среднего ИК-диапазона. Кроме того, эти материалы являются достаточно прочными, влагостойкими и обладают высоким уровнем легирования и теплопроводности. Низкие показатели преломления, линейный и нелинейный,

позволяют избежать нежелательных потерь, паразитной генерации, вынужденного комбинационного рассеяния и самофокусировки.

Редкоземельные (РЗ) ионы в кристаллах фторидов (например, ионы Yb и Er) имеют малое сечение генерационного перехода и большие времена жизни метастабильных уровней, благодаря чему снижаются потери на суперлюминесценцию и удешевляется источник накачки, что важно при создании мощных лазерных усилителей и генераторов.

Кроме того, особенность активации щелочноземельных фторидов РЗ-ионами состоит в том, что РЗ-ионы входят в них в основном в виде кластеров — парных, четверных, восьмерных. Это должно проявляться в люминесцентных и лазерных характеристиках. Так, если для ионов неодима кластеризация является негативным фактором вследствие кроссрелаксации Nd–Nd, которую мы рассмотрели выше, то для других ионов, например Yb, Er, Ho, Tm, кластеризация может играть и положительную роль. Так, из теории миграционно-контролируемого тушения видно, что величина, обратная квантовому выходу, пропорциональна скорости миграции оптических возбуждений по лазерно-активным ионам и нанокластерам к тушителям. Скорость миграции, в свою очередь, пропорциональна числу тушителей, в качестве которых часто выступают неконтролируемые примесью ионы, что обычно приводит к требованию высокой чистоты исходных материалов и, следовательно, к их дороговизне. Однако ещё сильнее скорость тушения зависит от концентрации лазерных ионов N_{las} , степени кластеризации n_{cl} и мультипольности взаимодействия S [26]: $W_{mig} \sim c_A(N_{don})^{(S-2)/3} = c_A(N_{las}/n_{cl})^{(S-2)/3}$. Здесь $N_{don} = N_{las}/n_{cl}$ — концентрация кластеров, между которыми идёт миграция возбуждения. Таким образом, увеличивая степень кластеризации ($n_{cl} = 2-8$), мы можем степенным образом уменьшить скорость миграции $W_{mig} \sim (1/n_{cl})^{(S-2)/3}$ (показатель степени $(S-2)/3$ изменяется от 4/3 до 8/3) и тем самым ослабить тушение возбуждений в 6–100 (!) раз, в зависимости от мультипольности S . То есть, переходя к кластерной активации, можно затормозить тушение и обеспечить более высокий к.п.д. и квантовый выход лазерного и люминесцирующего материала даже при большой концентрации лазерных частиц и тушителей, что позволяет снизить требования к чистоте и стоимости исходного сырья.

Ионы иттербия в различных матрицах в последнее время вызывают повышенный интерес как рабочие ионы при селективной оптической накачке лазерными диодами, благодаря крайне простой схеме электронных уровней и отсутствию вследствие этого различных негативных процессов типа кроссрелаксации или поглощения из возбуждённого состояния, которые существенно снижают эффективность лазерной генерации, особенно при высоких концентрациях легирующей примеси [27, 28]. Использование ионов иттербия во фторидных кристаллах в достаточно высоких концентрациях (2–9 %) даёт возможность получать широкие спектры поглощения для удобной накачки диодными лазерами и широкие спектры люминесценции, позволяющие осуществлять фемтосекундную генерацию и перестройку длины волны выходного излучения в достаточно широких пределах с высоким к.п.д. [29].

На рисунке 6а показан лучший пример генерационных свойств наноструктурированных кристаллов и

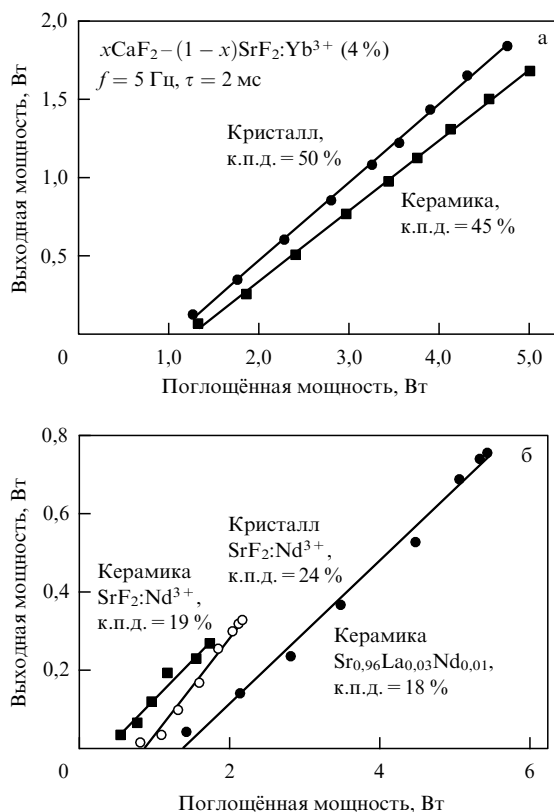


Рис. 6. Сравнение генерационных характеристик (а) лазерной фторидной керамики и аналогичного монокристалла $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{Yb}^{3+}$, (б) монокристалла $\text{SrF}_2:\text{Nd}^{3+}$ и керамики $\text{SrF}_2:\text{Nd}^{3+}$ и $\text{SrF}_2\text{-LaF}_3:\text{Nd}^{3+}$ при селективной диодной накачке в одинаковых экспериментальных условиях.

керамики, легированных ионами Yb^{3+} при диодной лазерной накачке. Дифференциальный к.п.д. достигает 50 % для кристалла и 45 % для керамики [30]. Широкая спектральная область генерации, от 1,01 до 1,09 мкм, позволяет создавать либо перестраиваемые, либо фемтосекундные лазеры с компактной и дешёвой диодной накачкой [31, 32].

Другой важный пример лазерной фторидной керамики — это керамика SrF_2 с Nd. При малом уровне легирования (0,5 %) такая керамика характеризуется высокой теплопроводностью и высоким квантовым выходом.

Наиболее эффективная генерация ионов Nd осуществляется на Nd–F-комплексах (L-центрах тетрагональной симметрии), обладающих одной из самых коротких длин волн генерации на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ (1,037 мкм) и большим для ионов Nd временем жизни метастабильного уровня — 1,1 мс [33]. Последнее очень важно для упрощения и удешевления диодной лазерной накачки и накопления высокой инверсии в лазерной среде. При необходимости повышения концентрации активных ионов Nd оптически неактивные ионы La используются как соактиватор для подавления агрегации ионов Nd друг с другом и тем самым для подавления их само-тушения [34].

На рисунке 6б показаны лучшие результаты по генерации когерентного излучения ионов неодима в лазерных кристаллах и нанокерамике двух типов: $\text{SrF}_2(\text{Nd})$ и $\text{SrF}_2(\text{LaNd})$. Получен достаточно высокий дифференциальный к.п.д. в квазинепрерывном режиме: 24 % для

кристалла, 19 % для керамики $\text{SrF}_2(\text{Nd})$ и 18 % для керамики $\text{SrF}_2(\text{LaNd})$, при измерениях в одинаковых условиях [35]. Лучший результат для кристалла в отсутствие потерь на отражение составил 37 %, что позволяет рассчитывать на конкурентоспособность новых керамических материалов по отношению к широко распространённым лазерным неодимовым стёклам.

Ещё один свежий пример разработки новой лазерной керамики — $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ — первой керамики, работающей в видимом диапазоне спектра (639 нм), где требования к потерям на рассеяние являются более жёсткими, чем в ближнем ИК-диапазоне. Кроме того, коротковолновый синий (445 нм) источник, необходимый для диодной лазерной накачки ионов Pr, ещё более усложняет получение генерации ввиду возможных процессов рассеяния, наведённых потерь и фотоионизации. Нам удалось создать керамику $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$, которая обеспечивает низкий порог красной генерации (639 нм) при непрерывной диодной накачке и достаточно высокую эффективность (9 %) [36–38]. Это открывает возможности создания компактных керамических многоцветных (красный, зелёный, синий (RGB)) когерентных источников света для лазерных дисплеев и проекторов.

Рассмотрим пример фторидных кристаллов и керамики $\text{CaF}_2:\text{Er}$, $\text{SrF}_2:\text{Er}$ с нанокластерами Er_6F_{36} для лазеров среднего ИК-диапазона. Здесь кластеризация играет принципиально важную положительную роль. Дело в том, что ион Er^{3+} обладает самоограниченным лазерным переходом ${}^4I_{11/2} - {}^4I_{13/2}$ (2,7 мкм) с большим временем жизни нижнего лазерного уровня (9 мс) и генерация в случае одиночных ионов Er^{3+} быстро срывается из-за выравнивания инверсии населённости верхнего лазерного уровня относительно нижнего. В нанокластерах Er_6F_{36} , вследствие малых расстояний Er–Er, при интенсивной накачке возникает сильный ап-конверсионный перенос энергии $\text{Er}({}^4I_{13/2}) + \text{Er}({}^4I_{13/2}) \rightarrow \text{Er}({}^4I_{11/2})$ с разгрузкой нижнего лазерного уровня ${}^4I_{13/2}$ и заселением верхнего уровня ${}^4I_{11/2}$. Этот режим для ионов Er^{3+} , который впервые был обнаружен в высококонцентрированных лазерных кристаллах YAG-Er^{3+} [39, 40], впоследствии позволил реализовать режим непрерывной генерации. Для кристаллов $\text{CaF}_2:\text{Er}$, $\text{SrF}_2:\text{Er}$ при поперечной диодной лазерной накачке в таком режиме удалось реализовать непрерывную трёхмикронную генерацию с высоким к.п.д. (5–7 %) и выходной мощностью до 2 Вт [41].

Список литературы

- Вавилов С И *Микроструктура света. Исследования и очерки* (М.: Изд-во АН СССР, 1950) [Translated into German: Vavilov S I *Die Mikrostruktur des Lichtes. Untersuchungen und Grundgedanken* (Berlin: Akademie-Verlag, 1953)]
- Förster Th *Ann. Physik* **437** 55 (1948)
- Галанин М Д *ЖЭТФ* **28** 485 (1955) [Galanin M D *Sov. Phys. JETP* **1** 317 (1955)]
- Свешников Б Я, Широков В И *Оптика и спектроскоп.* **12** 576 (1962) [Sveshnikov B Ya, Shirokov V I *Opt. Spectrosc.* **12** 320 (1962)]
- Ynokuti M, Hirayama F *J. Chem. Phys.* **43** 1978 (1965)
- Blumen A, Manz J *J. Chem. Phys.* **71** (11) 4694 (1979)
- Алимов О К и др., в *Селективная лазерная спектроскопия активированных кристаллов и стекол* (Труды ИОФАН, Т. 9, Отв. ред. В В Осико) (М.: Наука, 1987) с. 50
- Аванесов А Г и др. *ЖЭТФ* **77** 1771 (1979) [Avanesov A G et al. *Sov. Phys. JETP* **50** 886 (1979)]
- Аванесов А Г и др. *ЖЭТФ* **84** 1028 (1983) [Avanesov A G et al. *Sov. Phys. JETP* **57** 596 (1983)]
- Alimov O K et al., in *Selective Laser Spectroscopy of Activated Crystals and Glasses* (Proc. of the Institute of General Physics Academy of Sciences of the USSR, Vol 9, Ed. V V Osiko) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) Ch. II
- Basiev T T *J. Physique Colloques* **46** C7-159 (1985)
- Басиев Т Т, Дорошенко М Е, Осико В В *Письма в ЖЭТФ* **71** 14 (2000) [Basiev T T, Doroshenko M E, Osiko V V *JETP Lett.* **71** 8 (2000)]
- Басиев Т Т и др. *ЖЭТФ* **120** 1362 (2001) [Basiev T T et al. *JETP* **93** 1178 (2001)]
- Basiev T T et al. *J. Luminesc.* **94–95** 349 (2001)
- Basiev T T et al., in *Advanced Solid State Lasers: ASSL — 2001* Technical Digest (Washington, DC: Optical Society of America, 2001) p. 93
- Basiev T T, Doroshenko M E, Osiko V V *OSA Trends Opt. Photon.* **34** 485 (2000)
- Ливанова Л Д, Сайдкулов И Г, Столов А Л *ФТТ* **11** 918 (1969) [Livanova L D, Saitkulov I G, Stolov A L *Sov. Phys. Solid State* **11** 750 (1969)]
- Ostermayer F W (Jr.), Van Uitert L G *Phys. Rev. B* **1** 4208 (1970)
- Басиева И Т, Пухов К К, Басиев Т Т *Письма в ЖЭТФ* **74** 612 (2001) [Basieva I T, Pukhov K K, Basiev T T *JETP Lett.* **74** 539 (2001)]
- Basiev T T, Pukhov K K, Basieva I T *Chem. Phys. Lett.* **432** 367 (2006)
- Basiev T T, Basieva I T *Physica A*, submitted
- Глушков Н А, Басиев Т Т, Орловский Ю В *Российские нанотехнологии* **4** (9–10) 152 (2009) [Glushkov N A, Basiev T T, Orlovskii Yu V *Nanotechnol. Russia* **4** 722 (2009)]
- Басиев Т Т, Басиева И Т, Глушков Н А *Письма в ЖЭТФ* **91** 254 (2010) [Basiev T T, Basieva I T, Glushkov N A *JETP Lett.* **91** 236 (2010)]
- Basiev T T, Basieva I T, Glushkov N A *J. Luminesc.* **130** 2305 (2010)
- Глушков Н А, Басиев Т Т, Басиева И Т *Письма в ЖЭТФ* **93** 777 (2011) [Glushkov N A, Basiev T T, Basieva I T *JETP Lett.* **93** 697 (2011)]
- Бурштейн А И *УФН* **143** 553 (1984) [Burshtein A I *Sov. Phys. Usp.* **27** 579 (1984)]
- Lucca A et al. *Opt. Lett.* **29** 1879 (2004)
- Басиев Т Т и др. *Квантовая электроника*. **37** 934 (2007) [Basiev T T et al. *Quantum Electron.* **37** 934 (2007)]
- Alimov O K et al. "Spectroscopic and laser properties of Yb^{3+} ions in $\text{BaF}_2-\text{SrF}_2-\text{CaF}_2$ single crystals and nanoceramics", in *Intern. Conf. on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter: ICL, Lyon, France, 2008*, Book of Abstracts, p. 147, paper Mo-P-005
- Basiev T T et al. *Opt. Lett.* **33** 521 (2008)
- Siebold M et al. *Opt. Lett.* **32** 1818 (2007)
- Lucca A et al. *Opt. Lett.* **29** 2767 (2004)
- Alimov O K et al. "Spectroscopic and oscillation properties of Nd^{3+} ions optical centers in SrF_2 crystal", in *2nd Intern. Conf. on Physics of Optical Materials and Devices: ICOM, 2009, Herceg Novi, Montenegro, 2009*
- Orlovskii Yu V et al. *Laser Phys.* **6** 448 (1996)
- Basiev T T et al. *Opt. Lett.* **35** 4009 (2010)
- Basiev T T et al. "New visible $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ ceramic laser at 639 nm", in *Advanced Solid-State Photonics: ASSP, Istanbul, Turkey, 2011* Technical Digest (Washington, DC: Optical Society of America, 2011) paper AMF1
- Basiev T T et al. "First Visible 639 nm $\text{SrF}_2:\text{Pr}^{3+}$ ceramic laser", in *CLEO 2011, Munich, Germany, 2011*, paper CA2.2 SUN
- Basiev T T et al. *Optical Material Express* **1** (8) 1511 (2011)
- Басиев Т Т, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 1977)
- Басиев Т Т и др. *Квантовая электроника*. **3** (7) 1471 (1976) [Basiev T T et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **6** 796 (1976)]
- Басиев Т Т и др. *Квантовая электроника*. **36** 591 (2006) [Basiev T T et al. *Quantum Electron.* **36** 591 (2006)]

PACS numbers: 01.65.+g, 78.55.-m, 85.60.-q
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201112k.1341

Прогресс в области источников света и дисплеев

А.Г. Витухновский

Отмечая в этом, 2011-м, году 120 лет со дня рождения выдающегося отечественного оптика Сергея Ивановича Вавилова, необходимо отметить, что его учитель Петр Петрович Лазарев является основателем журнала *Успехи физических наук*. Эта связь накладывает определенные требования к изложению материала о современных источниках света и алфавитно-цифровых дисплеях, представленного ниже.

С.И. Вавилов заложил отечественную школу науки о люминесценции. Помимо существенного вклада в развитие фундаментальных представлений о природе люминесценции, именно благодаря организационному таланту Сергея Ивановича наша страна получила новые источники света — люминесцентные лампы, столь известные каждому. Под руководством С.И. Вавилова его соратники и ученики создали целую отрасль энергетики и внесли значительный вклад в экономию электроэнергии. Созданные при непосредственном участии С.И. Вавилова высокоэффективные люминофоры позволили в кратчайшие сроки наладить в нашей стране выпуск отечественных телевизоров.

Усилия учёных под руководством С.И. Вавилова были отмечены Сталинской (Государственной) премией СССР 1951 г. "За разработку люминесцентных ламп". Следует перечислить всех получивших эту важную награду: С.И. Вавилов (посмертно), В.Л. Левшин, В.А. Фабрикант, М.А. Константинова-Шлезингер, Ф.А. Бутаева, В.И. Долгополов. Сейчас применение люминесцентных ламп, прежде всего основательно модернизированных компактных люминесцентных ламп, является наилучшим решением задач освещения.

Несколько слов об истории ламп. В 1872 г. родилась первая лампа накаливания, что завершило тысячелетние поиски и произвело революцию в технике освещения. Случилось это в России, а первым, кто догадался откачать из стеклянной колбы воздух и поместить туда угольный стержень, накалявшийся под действием тока, был гениальный русский учёный Александр Николаевич Лодыгин. Лампы его конструкции зажглись 20 мая 1873 г. в Санкт-Петербурге. Это были восемь фонарей с лампами Лодыгина. К сожалению, лавры первооткрывателя достались не А.Н. Лодыгину, а выдающемуся американскому изобретателю Томасу Алве Эдисону, который получил соответствующий патент [1]. Эдисон всего лишь соединил проводами в одну схему лампу Лодыгина, электрогенератор, розетку и вилку!

В дальнейшем произошла замена угольного стержня вольфрамовой спиралью. Продолжалась разработка таких источников света, как ртутные, галогенные, натриевые и ксеноновые лампы. Все эти усилия были связаны с несовершенствами ламп накаливания. Лампы

накаливания, являясь лучшими для своего времени (на протяжении 70–80 лет), тем не менее обладали рядом очевидных недостатков, прежде всего низкой световой отдачей. В частности, у первых ламп накаливания световая отдача составляла всего 1,5 лм Вт⁻¹. Сейчас она увеличилась в 10 раз и составляет 10–15 лм Вт⁻¹.

Около 10 лет назад в мир светотехники вошло новое достижение электроники: появился третий (после тепловых и газоразрядных) тип источников света — светодиоды (СД). Сегодня СД уже перестали быть экзотикой и стали полноправными партнёрами ламп накаливания и разрядных ламп. Эффективность источников света на неорганических (полупроводниковых) светоизлучающих диодах достигает 90 лм Вт⁻¹ [2] при сравнительно большом сроке эксплуатации.

Следует отметить *преимущества светодиодов*. В светодиоде электрический ток, в отличие от такового в лампе накаливания или люминесцентной лампе, преобразуется непосредственно в световое излучение, а не в тепло, и теоретически это может происходить почти без потерь. Действительно, светодиод (при должном теплоотводе) мало нагревается, что делает его незаменимым для некоторых приложений. Далее, светодиод излучает в узкой части спектра, его цвет чист, что особенно ценят дизайнеры, а ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, как правило, отсутствуют. Светодиод механически прочен и исключительно надёжен, срок его службы достигает 100 тыс. часов, почти в 100 раз превышая срок службы лампы накаливания и в 5–10 раз — срок службы люминесцентной лампы. Наконец, светодиод — низковольтный электроприбор, а стало быть безопасный.

Следующим этапом развития следует считать изобретение в 1987 г. *органического* светоизлучающего диода — OLED (Organic Light Emitting Diode) [3, 4], который, обладая низкой энергией потребления, обеспечивает замечательную цветопередачу при низкой цене и эффективности до 100 лм Вт⁻¹ с использованием фосфоресцентных органических материалов. Сравнение характеристик источников света проведено в таблице.

Лабораторные образцы OLED-структур в настоящее время демонстрируют характеристики, сравнимые с характеристиками лучших образцов светодиодов мировых лидеров. Однако стоит отметить, что в программе развития светодиодной промышленности, разработанной Министерством энергетики США (US DOE Solid State Lighting Roadmap, July 2011), прописана стратегия, в которой технологии OLED и LED (Light Emitting Diode) рассматриваются не как конкурирующие, а как взаимодополняющие направления. К основным недостаткам LED в первую очередь стоит отнести низкую габаритную яркость и довольно малую гибкость. Именно это даёт OLED преимущество перед LED в системах общего освещения, например офисного.

Мировой уровень развития OLED-технологии перешёл на стадию коммерциализации. Эта технология всё более уверенно занимает лидирующие позиции на рынке, о чём свидетельствует пример дисплейных применений. Учитывая научные и технологические достижения, колоссальные объёмы мирового финансирования, программы развития, принятые на уровне ведущих государств и крупнейших корпораций, не возникает сомнений в успехе OLED-технологии в области освещения.

Обратимся теперь к прогрессу в области алфавитно-цифровых дисплеев (рис. 1). Очевиден прогресс в связи с

А.Г. Витухновский. Физический институт
им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ
E-mail: alexei@sci.lebedev.ru

Таблица. Характеристики различных источников света

Категория	Тип	Эффективность, лм Вт ⁻¹	К.п.д., %
	Свеча	0,3	0,04
	100-ваттная лампа накаливания (220 В)	13,8	2,0
	Люминесцентная линейная лампа	60	9,0
	Белый светодиод	10–90	1,5–13
	Белый OLED	102	15,0

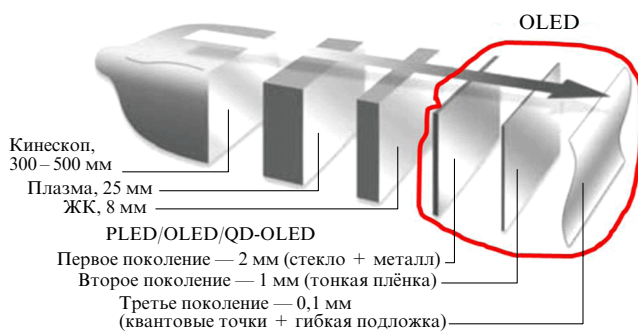


Рис. 1. Прогресс в дисплейной технологии.

переходом от классических дисплеев на основе электронно-лучевых трубок (вспомним громоздкие "Рубины" и мечты о телевизорах "Sony") к изящным плазменным панелям, а затем к современным жидкокристаллическим (ЖК) мониторам, которые не только представляют собой экраны современных телевизоров, ноутбуков, но и используются в бесчисленных так называемых гаджетах (сотовые телефоны, навигаторы и т.д.). Однако прогресс неостановим, и на смену ЖК-дисплеям приходят различные модификации органических светоизлучающих устройств: PLED (Polymer Light Emitting Diode) — на основе проводящих полимеров; OLED — на основе "малых" молекул металлоорганических комплексов; QD-OLED (органическая матрица с внедрёнными в неё полупроводниковыми квантовыми точками (QD)) — с использованием гибких подложек и гибридных материалов.

Аналитики компании "Research and Markets" (Ирландия) уверены, что дисплеи, в которых используется технология органических светоизлучающих диодов (OLED), станут основным "двигателем" отрасли в ближайшее десятилетие. Во всяком случае, такой вывод содержится в подготовленном ими отчёте "Energy

Efficient Displays Technologies to 2020 — Organic Light Emitting Diodes (OLED) Displays Set to Propel Growth of the Industry" ("Технологии энергетически эффективных дисплеев до 2020 г. — дисплеи OLED как стимулятор роста промышленности").

Дисплеи OLED обладают огромным рыночным потенциалом — по оценке экспертов, объём их продаж к 2020 г. достигнет 10,6 млрд долларов.

Технология OLED уже несколько лет считается наиболее перспективной с точки зрения развития дисплеев. С 2005 г. по 2009 г. соответствующий рынок рос в среднем на 33,9 % ежегодно, увеличившись от 256 до 822 млн долларов. В ближайшие десять лет сохранится ежегодный рост в 25,5 %, как полагают специалисты "Research and Markets". К настоящему моменту основной областью применения дисплеев OLED остаются мобильные устройства. Дисплеи, используемые в готовых телефонах (сейчас на этот сегмент приходится 65 % всего объёма в денежном выражении), цифровых камерах, проигрывателях и других подобных устройствах, имеют небольшие размеры. Спрос начнёт увеличиваться, когда OLED-панели большого размера придут в телевизоры, мониторы, персональные компьютеры.

Предполагается, что органические дисплеи вытеснят жидкокристаллические. Поэтому основным фактором, сдерживающим распространение OLED, названо постоянное совершенствование и удешевление ЖК-дисплеев. Однако аналитики надеются, что нововведения в технологии и переход к массовому выпуску продукции позволят снизить цену дисплеев OLED.

Следует детально остановиться на последнем достижении в области современных дисплеев — технологии QD-OLED. Основным элементом такого рода устройств является коллоидная квантовая точка (нанокристалл) размером 2–7 нм. Как правило, используются так называемые квантовые точки ядро–оболочка (core-shell). Примеры квантовых точек, полученных методами коллоидной химии [5], и поведение их энергетических уровней представлены на рис. 2.

На рисунке 2а показаны также квантовая точка CdS без оболочки и распределение электронов и дырок как функция расстояния. Квантовая точка CdSe/CdS (рис. 2б) соответствует наногетероструктуре так называемого типа I, когда электроны и дырки находятся в ядре (core). Иной характер распределения электронов и дырок имеет квантовая точка CdTe/CdSe (рис. 2в). Эта наногетероструктура относится к типу II, и в ней электрон преимущественно находится в оболочке, в то время как дырка располагается в ядре наночастицы. (О классификации гетероструктур см., например, [6].)

Помещая квантовые точки между двумя слоями органических проводников n- и p-типа и прикладывая напряжение на внешние электроды, можно возбудить квантовые точки и в итоге получить электронно-дырочную излучательную рекомбинацию [7]. Простейшая схема QD-OLED приведена на рис. 3.

Очевидным преимуществом использования такой гибридной схемы являются возможность перестройки длины волны излучения, которая определяется только размером наночастицы, а также её стабильность (долговечность, достигаемая за счёт использования в качестве эмиттера неорганического материала) и дешевизна синтеза коллоидных наночастиц. Немаловажным факто-

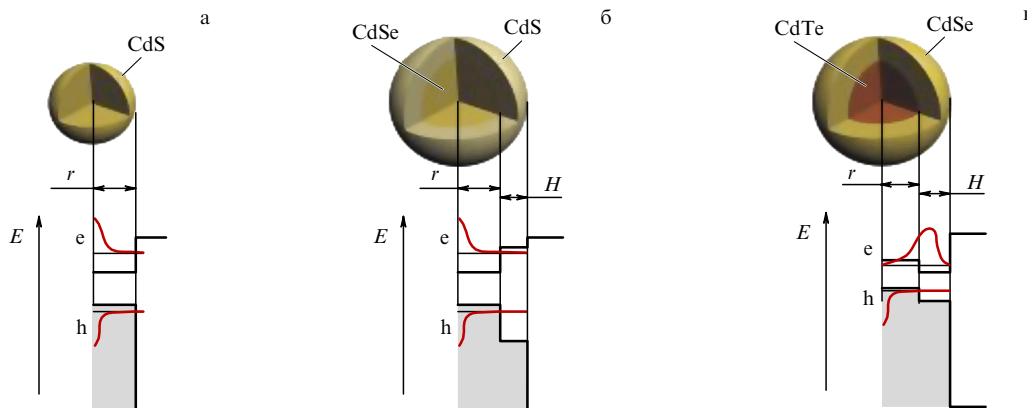


Рис. 2. Структура энергетических уровней наиболее популярных коллоидных квантовых точек халькогенидов кадмия.

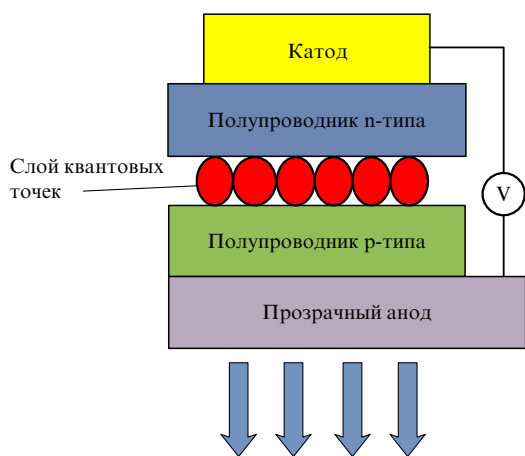


Рис. 3. Схема действия простейшего органического светоизлучающего диода (пикселя дисплея) с полупроводниковыми квантовыми точками (QD-OLED).

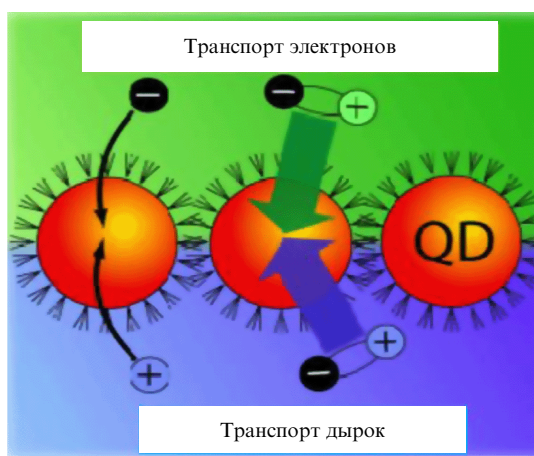


Рис. 5. Механизмы возбуждения квантовых точек на границе органических слоёв n-типа (транспорт электронов) и p-типа (транспорт дырок).

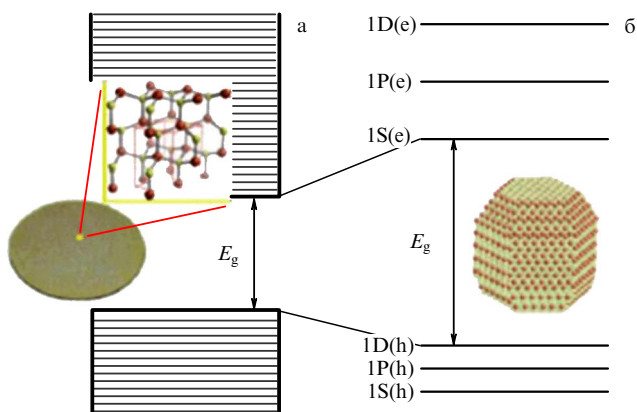


Рис. 4. Энергетическое строение двух типов объектов: массивного (а) и наноразмерного (б).

ром является высокий квантовый выход электролюминесценции квантовых точек.

На рисунке 3 показано изменение энергетической структуры материала при переходе от массивного (bulk) (рис. 4а, где E_g — ширина запрещённой зоны) к наноразмерному (рис. 4б, где E_g — энергия нижайшего перехода). Эта величина определяется простой формулой: $\Delta E =$

$= h/(2md^2)$, связывающей диаметр наночастицы (квантовой точки) d и энергию перехода.

Очевидно, что, изменяя размер наночастицы (квантовой точки), можно получить излучение в разных частях видимой части спектра, что и необходимо для получения полноцветного дисплея.

В настоящее время нет ясности с механизмами возбуждения квантовых точек в QD-OLED. Рассмотрим возможные схемы возбуждения квантовых точек, приведённые на рис. 5.

Возможна прямая рекомбинация электрона и дырки на квантовой точке, что приведёт к её возбуждению и, как следствие, к испусканию фотона с соответствующей энергией. Но возможен и другой сценарий: электронно-дырочная рекомбинация может произойти либо в органическом слое n-типа, либо в слое p-типа. В этих случаях происходит перенос энергии электронного возбуждения от возбуждённой молекулы в органическом слое к квантовой точке. Такой перенос энергии происходит по механизму Фёрстера [8]. Например, в работе [9] исследован перенос энергии электронного возбуждения от излучающего в синей части спектра конъюгированного полимера poly[(9,9-dihexylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-co(9,ethyl-3,6-carbazole)] к коллоидной квантовой точке ядро-оболочка CdSe/ZnS. Показано, что перенос энергии осуще-

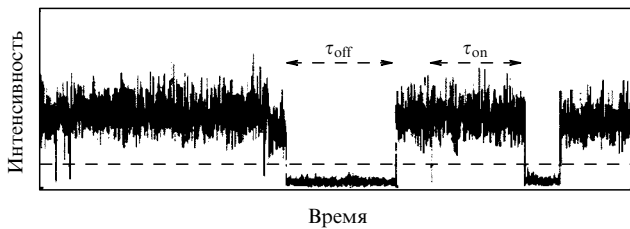


Рис. 6. Мерцающая люминесценция одиночной квантовой точки (blinking).

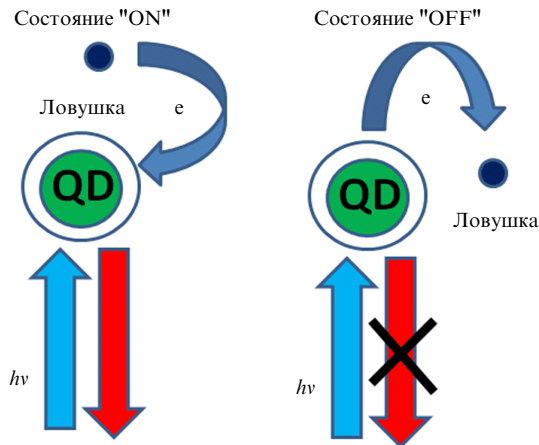


Рис. 7. Связь мерцающей люминесценции квантовой точки с захватом и освобождением носителя заряда ловушкой.

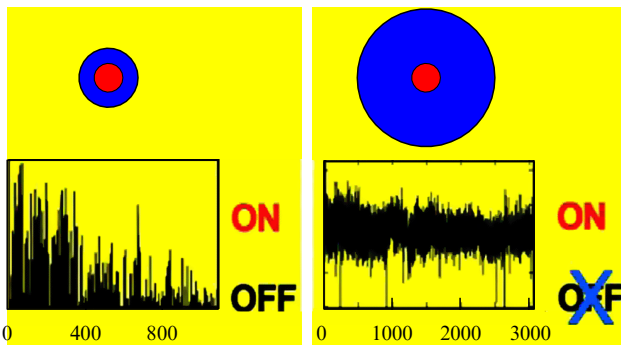


Рис. 8. Иллюстрация роли толщины оболочки квантовой точки ядро-оболочка.

ствляется по механизму Фёрстера и полимер выступает в роли донора, а квантовая точка — в роли акцептора. Определён радиус Фёрстера: (80 ± 15) Å. Исследование процессов на интерфейсе органический слой-квантовая точка необходимо для создания эффективного пикселя дисплея. Существует также ряд физических задач, решение которых необходимо для оптимизации работы QD-OLED.

Известно, что квантовая точка при непрерывном возбуждении излучает свет дискретно [10]. Это явление мерцающей люминесценции (blinking — в англоязычной литературе). На рисунке 6 приведена интенсивность люминесценции одиночной квантовой точки при непре-

рывном возбуждении. Отчётливо видны интервалы свечения и интервалы отсутствия света.

Изменяющаяся во времени интенсивность люминесценции квантовой точки при непрерывном возбуждении характеризуется состояниями "ON" (свет испускается) и "OFF" (свет не испускается). Одно из объяснений данного явления сводится к изменению заряда квантовой точки. Точка, "теряющая" заряд, не люминесцирует, но заряд по истечении некоторого времени может "вернуться" (фактически это процесс захвата и освобождения ловушек на интерфейсе квантовая точка-окружающая среда). Схематически этот процесс представлен на рис. 7. Данное явление играет негативную роль при создании эффективного пикселя дисплея. В связи с этим нужно исследовать причины мерцающей люминесценции (blinking) и найти способы её устранения. Имеются лишь первичные указания на то, какую роль в этом явлении играет толщина оболочки квантовой точки ядро-оболочка (см., например, [11]). На рисунке 8 показана мерцающая люминесценция квантовой точки с разной толщиной оболочки.

Невозможно в небольшой статье охватить все аспекты прогресса в области современных источников света и дисплеев, но даже в отдельном случае использования QD-OLED в качестве пикселя очевидны огромные возможности использования гибридных наноматериалов. Действительно, сочетание полупроводниковых коллоидных наночастиц (квантовых точек) и органических интерфейсов приводит к качественно новому типу дисплея, обладающего большим временем жизни, высокой светоотдачей и возможностью перестройки излучения во всём видимом спектральном диапазоне. Очевидно, что такого рода оптоэлектронные устройства должны быть востребованы промышленностью. С другой стороны, сложность системы органический интерфейс-квантовая точка представляет большой интерес для фундаментальной физики.

Работа поддержана частично грантом РФФИ № 09-02-00546-а и контрактом № 16.516.11.6071 с Министерством образования и науки РФ.

Список литературы

1. Edison T A, U.S. Patent No. 865,367 (1907)
2. Zheludev N *Nature Photon.* 1 189 (2007)
3. Tang C W, VanSlyke S A *Appl. Phys. Lett.* 51 913 (1987)
4. Бочкарев М Н, Витухновский А Г, Каткова М А *Органические светоизлучающие диоды (OLED)* (Н. Новгород: ДЕКОМ, 2011)
5. Murray C B, Norris D J, Bawendi M G *J. Am. Chem. Soc.* 115 8706 (1993)
6. Алферов Ж И *ФТП* 32 1 (1998) [Alferov Zh I *Semiconductors* 32 1 (1998)]
7. Coe S et al. *Nature* 420 800 (2002)
8. Förster Th *Discuss. Faraday Soc.* 27 7 (1959)
9. Anni M et al. *Appl. Phys. Lett.* 85 4169 (2004)
10. Barkai E, Jung Y, Silbey R *Annu. Rev. Phys. Chem.* 55 457 (2004)
11. Chen Y et al. *J. Am. Chem. Soc.* 130 5026 (2008)

PACS numbers: **01.65. + g, 03.30. + p, 41.60. – m**
 DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011121.1345

Эксперименты по прямой демонстрации независимости скорости света от скорости движения источника

(демонстрация справедливости второго постулата специальной теории относительности Эйнштейна)

Е.Б. Александров, П.А. Александров,
 В.С. Запаский, В.Н. Корчуганов, А.И. Стирин

*Посвящается памяти С.И. Вавилова
 и его докторанта А.М. Бонч-Бруевича*

1. Введение

Специальная теория относительности (СТО) — несомненно, самая знаменитая из физических теорий. Популярность СТО связана с простотой её основных принципов, поражающей воображение парадоксальностью выводов и её ключевым положением в физике XX века. СТО принесла небывалую славу Эйнштейну, и эта слава стала одной из причин неустанных попыток ревизии теории. В среде профессионалов споры вокруг СТО прекратились уже более полувека назад. Прочитав из Википедии: "Вся совокупность экспериментальных данных в физике высоких энергий, ядерной физике, спектроскопии, астрофизике, электродинамике и других областях физики согласуется с теорией относительности в пределах точности эксперимента. Например, в квантовой электродинамике (объединение СТО, квантовой теории и уравнений Максвелла) значение аномального магнитного момента электрона совпадает с теоретическим предсказанием с точностью 10^{-9} ".

Но по сей день редколлегия физических журналов постоянно осаждаются любителями, предлагающими варианты пересмотра СТО [1] (см. также [2]). Несмотря на существование бесчисленных свидетельств справедливости выводов СТО, не прекращаются попытки её опровержения или существенного пересмотра, которые мотивируются недостаточной убедительностью экспериментальных подтверждений её основ, в частности второго постулата, утверждающего постоянство скорости света для всех инерциальных систем отсчёта и её независимость от скорости источника. При этом чаще всего критике подвергаются ранние эксперименты по поиску "эфирного ветра" [3], которые традиционно рассматриваются как едва ли не единственное опытное доказательство справедливости СТО. Не проникая в серьёзную научную литературу, попытки пересмотра СТО переполняют средства массовой информации и Интернет, что не может не дезориентировать массового читателя, вклю-

чая школьников и студентов. Ситуация обострилась в годы празднования 100-летнего юбилея теории относительности (100 лет от даты публикации в 2005 г. исторической работы Эйнштейна [4], считающейся днём рождения СТО)¹. Вместе с тем недоверие в отношении СТО (со стороны не обременённого знаниями общественного мнения) существовало и 60 лет назад, когда С.И. Вавилов поручил своему докторанту А.М. Бонч-Бруевичу осуществить эксперимент по прямой проверке второго постулата СТО [10].

Постоянные нападки на СТО мотивируются разночтениями в оценке и трактовке результатов первых релятивистских экспериментов типа опытов Физо и Майкельсона. Например, один из последователей Майкельсона — Миллер [11] — до конца своих дней настаивал, что в этих опытах наблюдался некоторый сезонно-зависимый систематический эффект, который им трактовался как частичное увлечение "светоносного эфира" Землёй при её движении по орбите. После окончательного утверждения справедливости СТО эти эксперименты уже редко воспроизводились, при том что точность наблюдений такого рода долгое время оставалась довольно низкой.

Мало кто знает, что своё первое знаменитое отрицание существования "эфирного ветра" Майкельсон сделал [12] в 1881 г. на основании весьма шатких наблюдений: достигнутая точность измерений лишь немного превышала величину эффекта, ожидаемого на основе гипотезы о "неподвижном светоносном эфире". (Неудивительно, что Эйнштейн откровенно отказывался от этого опыта как экспериментального факта, вдохновившего его на создание СТО.) В дальнейших экспериментах были получены существенно более определённые результаты, однако обычно всё же наблюдалась некая систематическая составляющая скорости "эфирного ветра" — порядка 10% от скорости V орбитального движения Земли вокруг Солнца. Лишь к концу 20-х годов прошлого века удалось достичь достаточно определённого отрицательного результата — верхняя оценка скорости эфирного ветра была снижена до $\sim 3\%$ от V [3]. Дальнейшее уточнение этих результатов вскоре стало малоактуальным ввиду множества совершенно неоспоримых свидетельств справедливости СТО, накопленных по мере развития ядерной физики с её инструментарием ускорителей, само инженерное воплощение которых было бы невозможным без использования теории относительности. Это знание, однако, оставалось уделом профессионалов, в то время как популярные изложения СТО по-прежнему апеллировали к исторической традиции подтверждения теории лишь экспериментами Майкельсона. Именно этот разрыв понимания меры обоснованности СТО между профессионалами и широкой публикой подвиг президента Академии наук СССР С.И. Вави-

Е.Б. Александров. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, РФ
 E-mail: ealexandrov@bk.ru

П.А. Александров, В.Н. Корчуганов, А.И. Стирин. Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, РФ
 В.С. Запаский. Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, РФ

¹ Из несметного множества критических выступлений ограничимся лишь двумя случайными ссылками — на обзорную статью Н. Носкова, разоблачающую "столетний релятивистский обман" [5] и на недавнее выступление Соколовых [6], возрождающих старинную "баллистическую" гипотезу Ритца [7]. Юбилей СТО своеобразно отметил Санкт-Петербургский политехнический университет, переиздавший в 2009 г. претенциозную монографию *Мифы теории относительности* [8] А.А. Денисова, чьи экстравагантные построения 20 лет назад были опровергнуты преподавателями этого же университета [9].

лова в середине прошлого века наметить проект демонстрации независимости скорости света от скорости источника в эксперименте "первого порядка": Вавилов планировал прямое измерение скорости света, испущенного быстро движущимся источником, в отличие от косвенных измерений в опыте Майкельсона, в котором ожидаемый эффект пропорционален квадрату отношения v/c скорости источника v к скорости света c .

К этому времени постулат о независимости скорости света прямо подтверждался только астрономическими наблюдениями двойных звёзд. По идее де Ситтера [13], в случае зависимости скорости света от скорости источника траектории движения двойных звёзд должны были бы качественно отличаться от наблюдаемых (согласующихся с небесной механикой). Однако этот аргумент де Ситтера встретил возражение (воспроизведённое в [6]), связанное с учётом роли межзвёздного газа, который в качестве преломляющей среды рассматривался как вторичный источник света. С этой точки зрения, свет, испущенный движущимся источником, теряет "память" о скорости первичного источника по мере распространения в межзвёздной среде. Поскольку данные об этой среде известны лишь с очень большими допусками (как и абсолютные значения расстояний до звёзд), такая позиция позволяет подвергнуть сомнению большинство астрономических доказательств постоянства скорости света. (В частности, под такую же критику попала намного более поздняя работа [14], в которой в качестве радикального доказательства справедливости второго постулата выдвигался сам факт существования переменных звёзд: в случае линейной зависимости скорости света от скорости источника свет звезды переменной яркости с увеличением расстояния должен утрачивать модуляцию из-за теплового разброса лучевых скоростей элементарных излучателей, так что такие звёзды были бы просто неизвестны.)

С.И. Вавилов предложил своему докторанту А.М. Бонч-Бруевичу спроектировать установку, в которой источником света являлся бы пучок быстрых возбуждённых атомов. В процессе детальной проработки плана эксперимента оказалось, что нет шансов получить надёжный результат, поскольку при технике тех дней нельзя было рассчитывать на получение пучков с нужной скоростью и плотностью: ожидаемая в рамках баллистической гипотезы добавка к скорости света оказывалась на уровне нескольких процентов, а интенсивность излучения пучка оценивалась как слишком низкая. Опыт не был осуществлён. После безвременной смерти С.И. Вавилова в 1951 г. план эксперимента был пересмотрен по инициативе Г.С. Ландсберга, который предложил сравнивать скорости света, испускаемого двумя экваториальными краями вращающегося Солнца. А.М. Бонч-Бруевич полвека спустя писал [10]: "Это предложение лишало опыт его первоначальной красоты, но, по-видимому, было единственной возможностью довести его, хотя бы и в сильно деформированном виде, до конца". И действительно, результат этого опыта не мог рассматриваться как доказательство независимости скорости света от скорости источника, потому что свет Солнца перед измерением пропускаться через стеклянный объектив телескопа, что, по логике концепции переизлучения света преломляющей средой, приводило к уравнению скоростей двух пучков света (не говоря уже о влиянии земной атмосферы).

С тех пор неоднократно предпринимались различные попытки экспериментального доказательства второго постулата СТО (см., например, монографии [15, 16] и недавние обстоятельные обзоры Г.Б. Малькина [17, 18]). Все авторы соответствующих работ приходили к выводу о справедливости постулата. Но это не прекращало критических выступлений, в которых выдвигались возражения против идей экспериментов или ставилась под сомнение их точность. Последнее связано, как правило, с малой достижимой скоростью движения источника излучения по сравнению со скоростью света. Возобновлением интереса к баллистической гипотезе был отмечен 1962 г., в котором были опубликованы результаты эксперимента В. Кантора, якобы обнаружившего изменение скорости света, прошедшего через движущуюся стеклянную пластинку [19]. Работа Кантора вызвала широкую дискуссию, но вскоре её результаты были оспорены на основе контрольных экспериментов. Тем не менее баллистическая гипотеза остаётся популярной среди критиков СТО. В 1980 г. Президиум Академии наук Украины поддержал постановку масштабных экспериментов М.И. Дуплищева по проверке гипотезы Ритца. Дуплищев, развивая концепцию Кантора, измерял скорость света, пропущенного через быстро движущуюся преломляющую среду, которая рассматривалась в качестве вторичного источника света. Автор пришёл к выводу о справедливости идеи сложения скорости света со скоростью источника, в согласии с "корпускулярной (баллистической) теорией Ньютона – Ритца", однако не добился публикации своих результатов в уважаемых журналах. В 2008 г. отчёт об этих экспериментах [20] его дочь издала на коммерческой основе.

Представляется, что пришло время вернуться к предложению С.И. Вавилова. Теперь его можно реализовать "в первоначальной красоте", потому что сегодня физика имеет в руках чрезвычайно яркий ультрарелятивистский источник. Это синхротронный излучатель, в котором источником света служит густок электронов, движущийся по искривлённой траектории со скоростью, очень близкой к скорости света. В этих условиях легко измерить скорость испущенного света в безукоризненном лабораторном вакууме. По логике баллистической гипотезы эта скорость должна быть равна удвоенной скорости света от неподвижного источника! Это весьма грубый эффект, обнаружение которого (в случае его существования) не потребовало бы специальных ухищрений. Действительно, достаточно просто измерить время прохождения световым импульсом мерного отрезка в вакуумированном пространстве.

Откладывая пока обсуждение деталей и конкретных вариантов эксперимента, имеет смысл суммировать аргументы в пользу целесообразности самой постановки такого опыта. Разумеется, для профессиональных физиков нет никаких сомнений в ожидаемом результате. В этом смысле опыт бесполезен. Однако прямая демонстрация постоянства скорости света имеет большую дидактическую ценность, ограничивая почву для дальнейших спекуляций о недоказанности основ теории относительности. Физика в своём развитии постоянно возвращалась к воспроизведению и уточнению основополагающих экспериментов, осуществляемых с привлечением новых технических возможностей. В данном случае не ставится цель уточнить скорость света. Речь идёт о восполнении исторической недоработки в эксперимен-

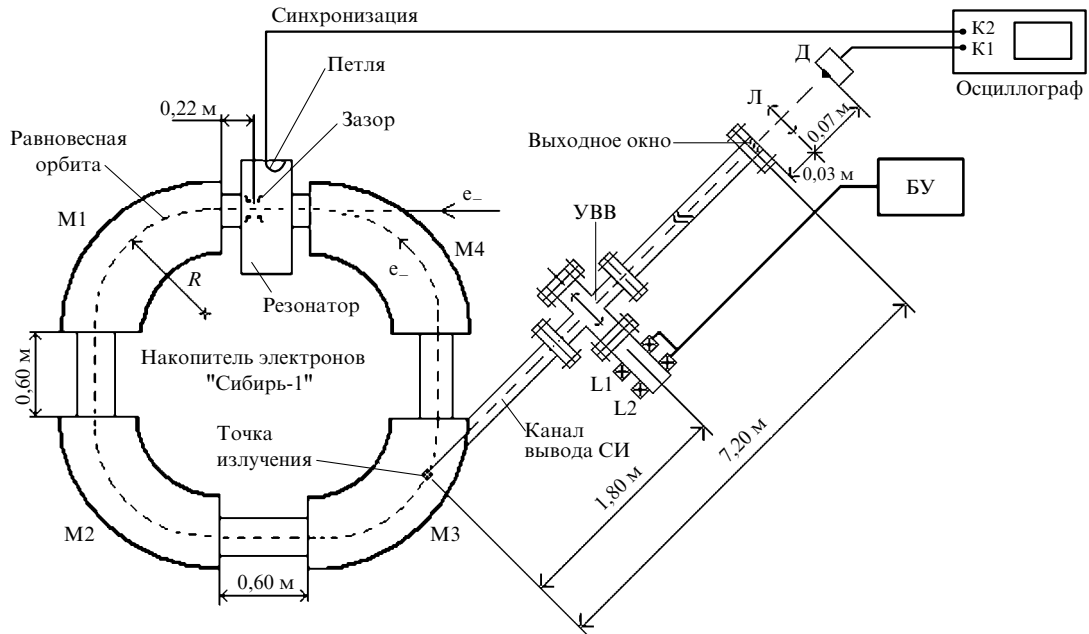


Рис. 1. Схема эксперимента. M1–M4 — поворотные магниты; УВВ — устройство ввода-вывода стеклянной пластинки; Л — собирающая линза; Д — детектор излучения; БУ — блок управления для УВВ; L1, L2 — катушки индуктивности.

тальном обосновании истоков СТО, что должно облегчить восприятие этой достаточно парадоксальной теории. Можно сказать, что речь идёт о демонстрационном опыте для будущих учебников физики.

2. Описание установки и схема эксперимента

В экспериментах в качестве импульсного источника света использовался источник синхротронного излучения (СИ) — накопитель электронов "Сибирь-1" в Курчатовском центре синхротронного излучения и нанотехнологий (КЦСИиНТ) Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ КИ) [21]. Вид в плане накопителя "Сибирь-1" со схемой вывода СИ и эксперимента показан на рис. 1.

Магнитная система электронного накопителя "Сибирь-1", формирующая замкнутую орбиту электронов, состоит из четырёх поворотных 90-градусных магнитов (M1–M4), разделённых четырьмя прямолинейными промежутками длиной по 60 см. Индукция магнитного поля на равновесной орбите 1,5 Тл. Радиус равновесной орбиты электронов в поворотных магнитах $R = 1$ м. Номинальная энергия электронов в накопителе 450 МэВ. Синхротронное излучение, создаваемое релятивистскими электронами в поворотных магнитах, имеет широкий спектр — от инфракрасного и видимого диапазонов до рентгеновского диапазона с характеристической длиной волны 61,3 Å. СИ приводит к потерям энергии в 3,69 кэВ на оборот каждым электроном.

В промежутке 1 накопителя "Сибирь-1" находится высокочастотный резонатор, электрическое поле которого компенсирует радиационные потери электронного пучка на каждом обороте. Высокочастотная (ВЧ) мощность, подводимая к резонатору от ВЧ-генератора, создаёт на ускоряющем зазоре резонатора напряжение с амплитудой 15 кВ и частотой 34,53 МГц, равной частоте обращения электронного сгустка в накопителе. При этом распределение продольной плотности электронов в сгустке является гауссовым со стандартной полушириной 0,3 м.

Ось канала вывода СИ, являясь касательной к равновесной орбите в магните M3, проходит под углом 30° к оси прямолинейного промежутка 4, следующего за магнитом M3. То есть точка излучения — начало отсчёта длины пути СИ вдоль оси канала — находится на расстоянии $\pi R/3$ от входного торца магнита M3. Длина канала от точки излучения до выходного сапфирового окна 7,2 м.

В канале СИ на расстоянии 1,8 м от точки излучения установлено устройство ввода-вывода стеклянной пластинки на пучок СИ. Конструктивно оно представляет собой вакуумный узел (рис. 2), внутри которого находится подвижная пластинка с отверстием диафрагмы и стеклянной пластинкой толщиной около 1 мм. Пластинка установлена на небольшие колеса, и она может перемещаться по направляющим перпендикулярно оси канала СИ, фиксируясь в двух крайних положениях: в одном положении пучок СИ перекрывается стеклянной пластинкой.

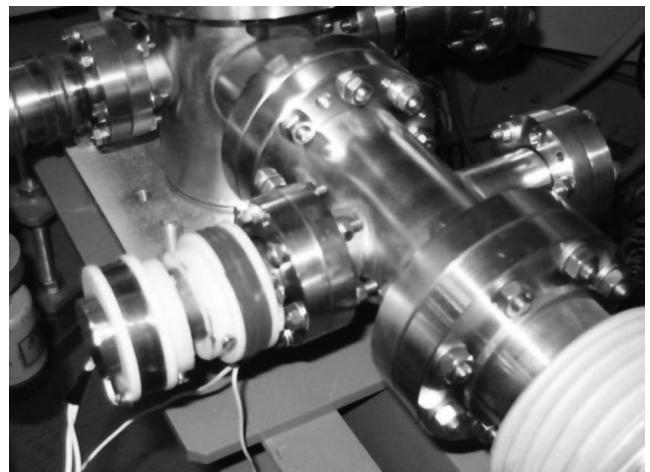


Рис. 2. Вакуумный узел устройства ввода-вывода стеклянной пластинки.

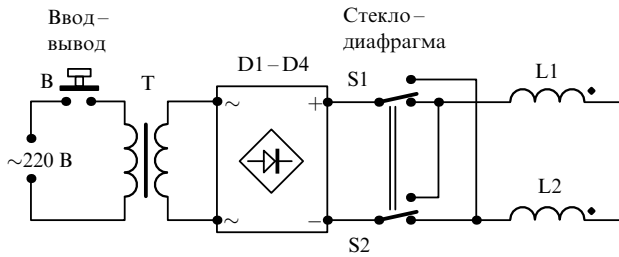


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема блока управления.

тинкой, а в другом — беспрепятственно проходит через диафрагму. На торце подвижной пластины закреплён постоянный магнит, а на трубу, внутри которой происходит перемещение, надеты две катушки индуктивности, включённые встречно. При подаче на катушки постоянного напряжения с той или иной полярностью от блока управления (рис. 3) за счёт втягивания постоянного магнита в максимум поля катушек пластина перемещается в том или ином направлении. Так осуществляется ввод стеклянной пластинки в зону пучка СИ или вывод её из этой зоны.

Эксперимент проводился по двум схемам. В эксперименте по первой схеме производилось сравнение времени распространения импульса СИ в вакууме на контрольном отрезке пути для двух случаев: 1) импульс СИ поступал на вход контрольного отрезка пути, проходя сквозь открытую диафрагму; 2) импульс СИ поступал на вход контрольного отрезка пути, проходя сквозь диафрагму, закрытую тонкой стеклянной пластинкой, прозрачной в спектральном диапазоне видимого света. В эксперименте по второй схеме осуществлялось прямое измерение скорости импульса СИ в вакууме: величина пути, пройденного светом, делилась на время прохождения этого пути.

Вакуумная труба канала оканчивается выходным фланцем с прозрачным для видимого света сапфировым окном, через которое видимая часть СИ выводится в воздух.

На расстоянии 3 см от выходного сапфирового окна (спектральный диапазон на пропускание $(0,17 - 5,5)$ мкм) толщиной 2,4 см установлена собирающая линза толщиной 1,4 см, фокусирующая изображение пучка СИ на чувствительной области детектора излучения, расположенной на расстоянии 7 см от линзы. В качестве детектора излучения используется кремниевый PIN-фотодиод "Hamamatsu S5972" (область спектральной чувствительности $(0,32 - 1)$ мкм, полоса частот 500 МГц, эффективная площадь чувствительной зоны $0,5 \text{ мм}^2$). Схема включения PIN-диода представлена на рис. 4.

При поступлении на вход PIN-диода светового импульса созданное фототоком в цепи диода напряжение на нагрузке в 50 Ом подаётся по радиочастотному кабелю на один из входов (50 Ом) двухканального осциллографа "Tektronix TDS3052C" (полоса частот 500 МГц). На другой вход (50 Ом) осциллографа подаётся непрерывный синусоидальный ВЧ-сигнал синхронизации с измерительной петли резонатора. Для исключения ошибки, связанной с фазовыми сдвигами сигналов, для транспортировки полезного сигнала с нагрузки PIN-диода и сигнала синхронизации используются кабели одного и того же типа (PK-50) и одинаковой длины (8 м).

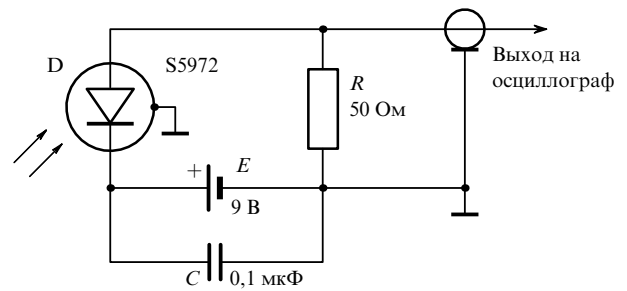


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема детектора излучения на PIN-диоде.

Таким образом, в идеальном случае наблюдатель увидит следующие друг за другом с частотой 34,53 МГц периодические импульсы СИ с зависимостью интенсивности от времени, близкой к гауссовой, со стандартной длительностью 1 нс, наложенные на синусоидальный сигнал с частотой 34,53 МГц.

3. Результаты эксперимента

Схема 1. На рисунках 5 и 6 представлены осциллограммы импульсов с PIN-диода и сигналов синхронизации с петли резонатора, полученные в результате эксперимента. Осциллограммы зарегистрированы при одном и том же токе электронного пучка в накопителе. Как видно, они идентичны с точки зрения фазовых соотношений между сигналами. То есть положение импульсов сигналов с PIN-диода сохранилось неизменным по отношению к сигналам синхронизации, вне зависимости от того, проходил ли свет беспрепятственно или через стеклянную пластинку.

Это означает, что скорость света, излучённого релятивистскими электронами в вакууме, равна скорости света, прошедшего в вакууме через стеклянную пластинку, т.е. не зависит от скорости источника, что опровергает баллистическую гипотезу В. Ритца.

Действительно, если бы скорость света, испущенного релятивистскими электронами в вакууме, равнялась $2c$, то путь в 7,2 м от точки излучения до выходного сапфирового окна свет прошёл бы за 12 нс.

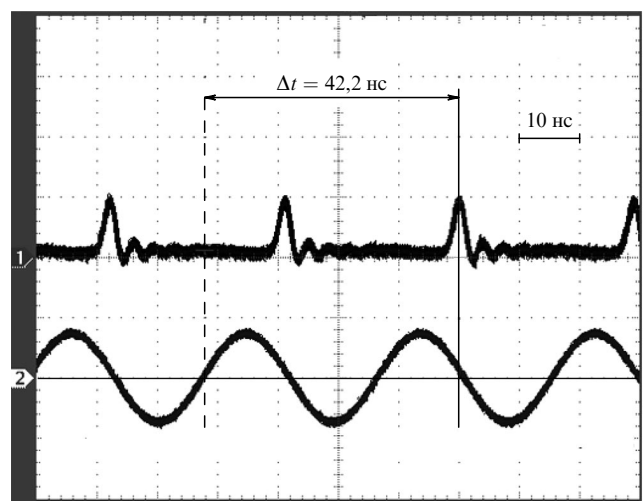


Рис. 5. Световой сигнал (канал 1) для случая прохождения света в вакууме на контрольном участке с открытой диафрагмой на входе и сигнал синхронизации (канал 2).

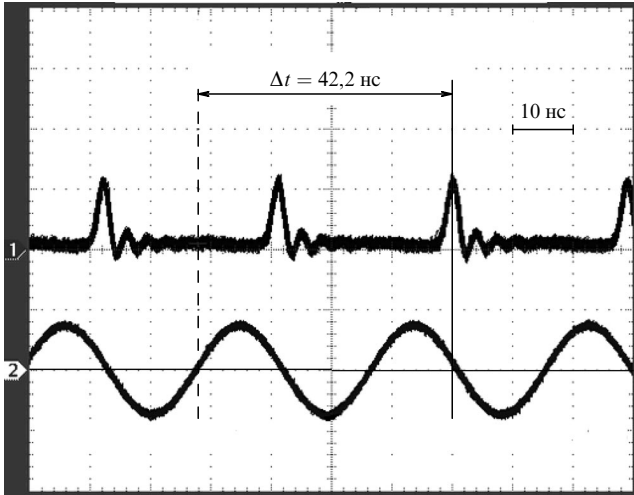


Рис. 6. Световой сигнал (канал 1) для случая прохождения света в вакууме на контрольном участке с диафрагмой на входе, закрытой стеклянной пластинкой, и сигнал синхронизации (канал 2).

С другой стороны, если на расстоянии 1,8 м от точки излучения на пути СИ поместить стеклянную пластинку, то эта пластинка становится источником вторичного излучения, распространяющегося вперёд со скоростью c . Тогда время прохождения светом расстояния в 7,2 м должно складываться из времени прохождения им пути от точки излучения до стеклянной пластинки (1,8 м) и времени прохождения им пути от стеклянной пластинки до выходного сапфирового окна (5,4 м). Следовательно, в сумме получили бы $3 \text{ нс} + 18 \text{ нс} = 21 \text{ нс}$.

Таким образом (если пренебречь малой задержкой света в стеклянной пластинке вследствие коэффициента преломления $n > 1$), на осциллограммах рис. 5 и 6 можно было бы зафиксировать фазовый сдвиг между оптическими сигналами, соответствующий разности моментов времени появления этих сигналов на входах,

$$21 \text{ нс} - 12 \text{ нс} = 9 \text{ нс}.$$

Отметим, что амплитуда светового сигнала на осциллограмме рис. 5 (диафрагма без стеклянной пластинки) немного меньше амплитуды светового сигнала на осциллограмме рис. 6 (диафрагма закрыта стеклянной пластинкой), что объясняется незначительным подрезанием пропускаемого светового потока по горизонтали боковой стенкой диафрагмы без стекла.

Схема 2. Теперь, опираясь на полученные в первой схеме эксперимента осциллограммы, можно оценить величину скорости света, излучаемого релятивистскими электронами в вакууме.

Длина l пути, пройденного световым импульсом от точки излучения до выходного сапфирового окна, равна 7,2 м. Для того чтобы вычислить скорость света, необходимо измерить время прохождения светом этого пути. Для этого нужно знать момент прохождения электронным сгустком точки излучения, находящейся на равновесной орбите накопителя внутри магнита МЗ (см. рис. 1). Используем напряжение с петли в высокочастотном резонаторе в качестве синхронизирующего сигнала. Эта петля в резонаторе ориентирована таким образом, что напряжение, снятое с неё, сдвинуто по фазе на 180° относительно напряжения на ускоряющем зазоре резонатора. Синхронные частицы проходят ускоряющий

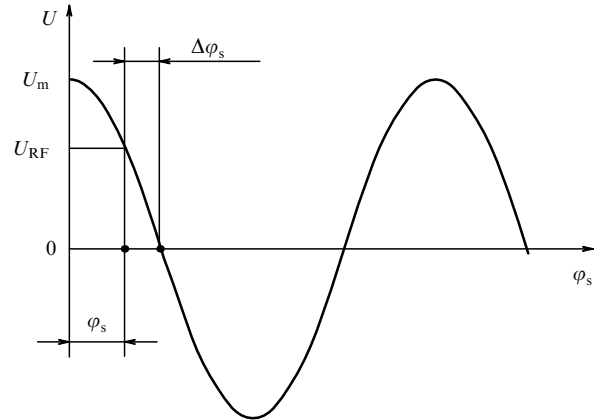


Рис. 7. Кривая изменения напряжения на резонаторе; φ_s — фаза синхронной частицы.

зазор в определённой фазе φ_s ускоряющего напряжения. Зная эту фазу и учитывая геометрию равновесной орбиты накопителя "Сибирь-1", можно рассчитать момент (фазу) прохождения электронным сгустком точки излучения.

На рисунке 7 показана кривая напряжения на ускоряющем зазоре резонатора. Условие устойчивости движения частиц в накопителях релятивистских электронов требует, чтобы электронный сгусток проходил зазор ВЧ-резонатора при уменьшающемся напряжении на нём. Другими словами, равновесная фаза φ_s соответствует спадающей ветви кривой высокочастотного напряжения резонатора.

Вычислить φ_s можно исходя из следующих соображений. При каждом пересечении зазора ВЧ-резонатора синхронная частица получает постоянное приращение энергии $\Delta W = 3,69 \text{ кэВ}$, которое компенсирует потери на СИ на одном обороте. В свою очередь

$$\Delta W = qU_{\text{RF}}, \quad (1)$$

где $q = 1$ — заряд электрона, U_{RF} — напряжение на зазоре резонатора в момент пролёта синхронной частицы. Известно, что

$$U_{\text{RF}} = TU_m \cos \varphi_s. \quad (2)$$

Здесь φ_s — фаза синхронной частицы, отсчитываемая от максимума напряжения, $T = 0,99$ — пролётный коэффициент, определяемый как результат усреднения ускоряющего ВЧ-напряжения в зазоре резонатора как по времени, так и по продольной координате. Отметим, что в случае однородной напряжённости ВЧ-поля в ускоряющем зазоре резонатора протяжённостью d имеем

$$U_{\text{RF}}(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi), \quad T = \frac{\sin \psi}{\psi},$$

где $\psi = \pi d / \lambda_{\text{RF}}$, λ_{RF} — длина волны ускоряющего напряжения, $U_m = 15 \text{ кВ}$ — амплитуда высокочастотного напряжения на резонаторе.

Из формулы (2) с учётом (1) находим

$$\varphi_s = \arccos \left(\frac{\Delta W}{qTU_m} \right). \quad (3)$$

Подставляя все известные величины в (3), получим

$$\varphi_s = \arccos\left(\frac{3,69}{0,99 \times 15}\right) = 75,61^\circ.$$

Отсюда, согласно рис. 7,

$$\Delta\varphi_s = 90 - 75,61 = 14,39^\circ,$$

или в единицах времени, с учётом того, что период высокочастотных колебаний (частота 34,53 МГц) равен 28,96 нс,

$$\Delta t_s = \frac{14,39^\circ \times 28,96 \text{ нс}}{360^\circ} \approx 1,16 \text{ нс}.$$

Рассчитаем время пролёта t_e электронным сгустком пути L от ускоряющего зазора в резонаторе до точки излучения в магните М3. Сначала исходя из геометрии накопителя "Сибирь-1" (см. рис. 1) находим путь L :

$$L = 0,22 \text{ м} + \frac{\pi R}{2} + 0,6 \text{ м} + \frac{\pi R}{2} + 0,6 \text{ м} + \frac{\pi R}{3} = \\ = 0,22 + 1,57 + 0,6 + 1,57 + 0,6 + 1,05 = 5,61 \text{ м},$$

здесь $R = 1 \text{ м}$.

Затем, с учётом того, что скорость ультрарелятивистских электронов практически равна скорости света ($c = 2,997924 \times 10^8 \text{ м с}^{-1}$), для времени t_e пролёта электронным сгустком пути L получаем

$$t_e = \frac{L}{c} = \frac{5,61 \text{ м}}{2,998 \times 10^8 \text{ м с}^{-1}} \approx 18,71 \times 10^{-9} \text{ с} = 18,7 \text{ нс}.$$

Обратимся теперь к приведённой на рис. 8 осциллограмме, которая повторяет осциллограмму рис. 5. В нашем случае фаза напряжения — сигнала синхронизации, снимаемого с измерительной петли в резонаторе, — сдвинута на 180° относительно фазы напряжения на ускоряющем зазоре (которая условно показана на рис. 8 штриховой кривой).

Суммируя полученный выше интервал времени $\Delta t_s = 1,16 \text{ нс}$ и измеренный осциллографом временной интервал $\Delta t \approx 42,20 \text{ нс}$ между установленными курсорами (сплошная и штриховая вертикальные линии на

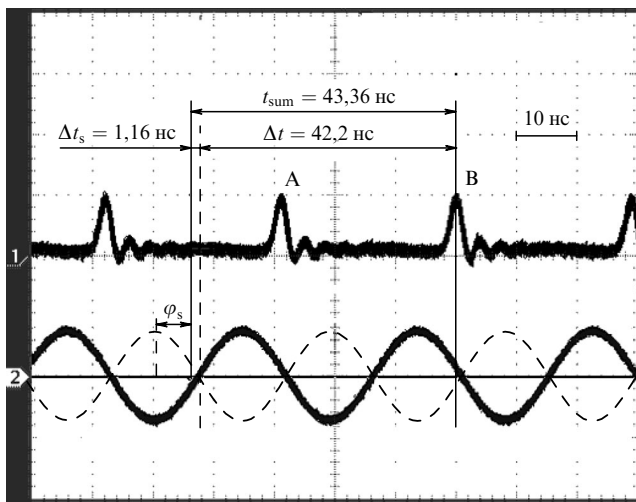


Рис. 8. Измерение задержки светового импульса в детекторе относительно фазы синхронной частицы в ускоряющем зазоре.

осциллограммах), находим из осциллограммы рис. 8 задержку t_{sum} появления светового сигнала в детекторе относительно момента прохождения соответствующего электронного сгустка через ускоряющий зазор:

$$t_{\text{sum}} \approx 43,36 \text{ нс}.$$

Мы рассматриваем здесь световой импульс В, излучённый электронным сгустком, влетающим в ускоряющий зазор резонатора в фазе φ_s , световой же импульс А излучён электронным сгустком, который влетел в зазор раньше на один период обращения. Вычитая из этой задержки ранее подсчитанное время пролёта t_e электронным сгустком пути L , находим время t_d прохождения светом пути от точки излучения до детектора:

$$t_d = t_{\text{sum}} - t_e \approx 43,36 \text{ нс} - 18,71 \text{ нс} = 24,65 \text{ нс}.$$

Суммарная длина пути светового импульса, отсчитываемая от входа в сапфировое окно до детектора, равна 13,8 см: 2,4 см (сапфировое окно, коэффициент преломления сапфира $n = 1,765$) + 10 см (воздух, 3 см до линзы и 7 см после линзы) + 1,4 см (стекло линзы с коэффициентом преломления $n = 1,52$). Свет, имея скорость в вакууме 30 см нс^{-1} , с учётом коэффициентов преломления в сапфире и стекле, проходит этот путь за 0,55 нс. Задержкой формирования электрического сигнала в детекторе мы здесь пренебрегаем.

Исходя из последнего замечания находим t_{SR} — время прохождения светом пути от точки излучения до выходного сапфирового окна ($l = 7,2 \text{ м}$),

$$t_{\text{SR}} = 24,65 \text{ нс} - 0,55 \text{ нс} = 24,10 \text{ нс}.$$

И окончательно вычисляем скорость света, излучённого релятивистскими электронами в вакууме:

$$c_{\text{SR}} = \frac{l}{t_{\text{SR}}} = \frac{7,20 \text{ м}}{24,10 \times 10^{-9} \text{ с}} \approx 2,99 \times 10^8 \text{ м с}^{-1}.$$

Полученный результат отличается от справочных значений скорости света в вакууме не более чем на 0,5 %.

4. Замечания

В ходе экспериментов существенные усилия были затрачены на устранение наводки высокочастотного ускоряющего напряжения на канал регистрации оптического сигнала. Эта синхронная наводка содержала ряд гармоник основной частоты и первоначально сильно искажала полезный сигнал. От неё практически полностью удалось избавиться применением в сигнальном и синхронизирующем каналах кабелей с двойной экранирующей оплёткой. Степень подавления наводки демонстрирует рис. 9, повторяющий осциллограмму рис. 6 в условиях, когда фотодетектор закрыт чёрной бумагой.

Наблюдавшийся оптический сигнал по длительности хорошо соответствовал ожиданиям, а по форме обнаруживал паразитный "звон" на заднем фронте импульсов, связанный с колебательными процессами в электрических цепях фотодетектора. Это осложнение сигнала не повлияло на точность измерений. Представление о достижимой точности даёт рис. 10, демонстрирующий осциллограммы оптического сигнала и синхронизации после цифрового усреднения. Временной масштаб рас-

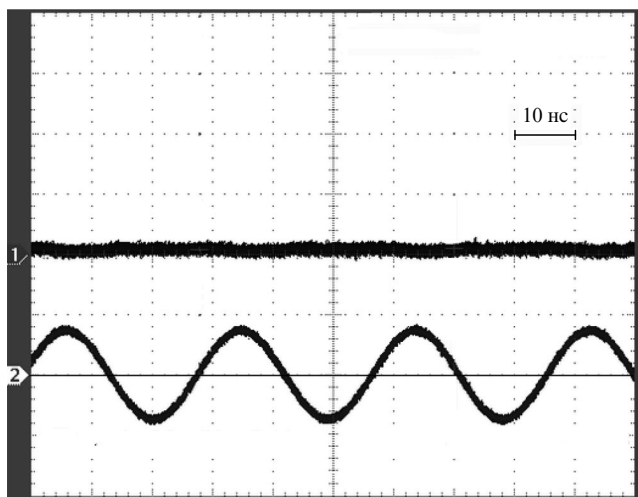


Рис. 9. Остаточный сигнал высокочастотной наводки (канал 1) и сигнал синхронизации (канал 2).

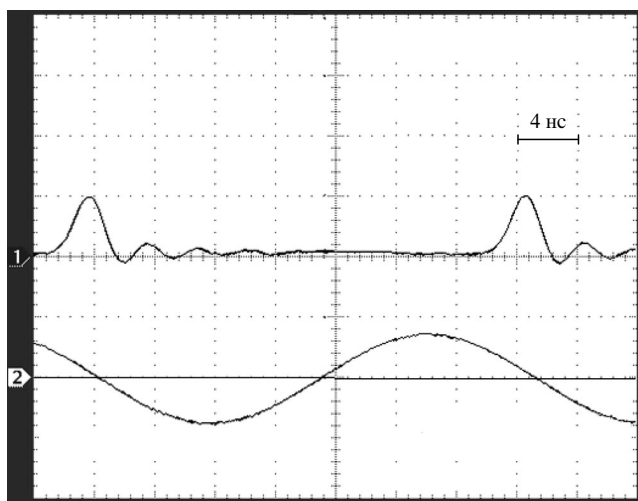


Рис. 10. Растянутый во времени сигнал с подавлением шума.

тянут в 2,5 раза по отношению к предыдущим осциллограммам.

В сокращённом виде содержание настоящей статьи опубликовано в [22].

5. Заключение

В настоящей работе осуществлено — насколько нам известно, впервые — прямое измерение скорости света, испущенного ультрарелятивистским источником. Полученные результаты несовместимы с баллистической гипотезой Ритца, предполагающей сложение скорости света со скоростью источника. Показано, что введение стеклянной пластинки в пучок света не изменяет его скорости с точностью до нескольких долей процента, в то время как по логике гипотезы Ритца скорость света после прохождения неподвижного окна должна была уменьшиться вдвое. Измерение скорости светового импульса в вакууме привело к величине, совпадающей с табличным значением скорости света с точностью до 0,5%. Результаты измерений могут рассматриваться в качестве наиболее прямого доказательства справедливости второго постулата СТО.

Авторы выражают благодарность оперативному персоналу источника СИ ускорительно-накопительного комплекса "Сибирь" за помощь в проведении экспериментов, Квардакову В.В. за внимание к работе, директору НИЦ КИ Ковальчуку М.В. за предоставление возможности проведения экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00538-а) с использованием оборудования Центра коллективного пользования КЦСИиНТ НИЦ "Курчатовский институт".

Список литературы

1. Александров Е "Была ли ошибка?" *Наука и жизнь* (12) 109 (1990)
2. Александров Е Б "О плюрализме мнений в точных науках и о критике теории относительности" *Оптика и спектроскоп.* **71** 555 (1991)
3. Joss G "Wiederholungen des Michelson-Versuchs" *Naturwissenschaften* **19** 784 (1931) [Пер. на русск. яз.: Иоос Г "Повторения опыта Майкельсона" *УФН* **12** 136 (1932)]
4. Einstein A *Ann. Physik* **17** 891 (1905)
5. Носков Н "Столетняя эфирная война" *Наука Казахстана* (21(105)) (1997); <http://n-t.ru/tp/ng/sev.htm>
6. Соколов В, Соколов Г "Сущность специальной теории относительности", <http://www.wbabin.net/sokolov/sokolov9r.pdf>
7. Ritz W *Ann. Chim. Phys.* **8** **13** 145 (1908)
8. Денисов А А *Мифы теории относительности* (СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009)
9. Ипатова И П и др. «Чему учит книга "Мифы теории относительности"» *УФН* **160** (4) 97 (1990) [Ipatova I P et al. «What we can learn from "The Myths of Relativity Theory"» *Sov. Phys. Usp.* **33** 310 (1990)]
10. Бонч-Бруевич А М "Сергей Иванович Вавилов в моей жизни" *УФН* **171** 1087 (2001) [Bonch-Bruevich A M "Sergei Ivanovich Vavilov in my life" *Phys. Usp.* **44** 1033 (2001)]
11. Miller D C "Significance of the ether-drift experiments of 1925 at Mount Wilson" *Science* **63** 433 (1926); "Ether-drift experiments at Mount Wilson" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **11** 306 (1925) [Пер. с англ. С И Вавилова: Миллер Д К "Эфирный ветер. Доклад, прочитанный в Вашингтонской Академии наук" *УФН* **5** 177 (1925); в сб. *Эфирный ветер* (Под ред. В А Ацюковского) (М.: Энергоатомиздат, 1993)]
12. Michelson A A "The relative motion of the Earth and the luminiferous ether" *Am. J. Sci.* **3** **22** 120 (1881)
13. de Sitter W "Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit" *Phys. Z.* **14** 429 (1913)
14. Александров Е Б "Об одном астрономическом доказательстве второго постулата СТО" *Астроном. журн.* **42** 676 (1965) [Aleksandrov E B "An astrophysical proof of the second postulate of Special Relativity" *Sov. Astron.* **9** 519 (1965)]
15. Франкфурт У И, Френк А М *Оптика движущихся тел* (М.: Наука, 1972) с. 113
16. Сацункевич И С *Экспериментальные корни специальной теории относительности* (М.: УРСС, 2003)
17. Малыкин Г Б "Классические оптические эксперименты и специальная теория относительности" *Оптика и спектроскоп.* **107** 624 (2009) [Malykin G B "Classical optical experiments and special relativity: A review" *Opt. Spectrosc.* **107** 592 (2009)]
18. Малыкин Г Б "Эффект Саньяка и баллистическая гипотеза Ритца" *Оптика и спектроскоп.* **109** 1018 (2010) [Malykin G B "Sagnac effect and Ritz ballistic hypothesis (Review)" *Opt. Spectrosc.* **109** 951 (2010)]
19. Kantor W "Direct first-order experiment on the propagation of light from a moving source" *J. Opt. Soc. Am.* **52** 978 (1962)
20. Дулищева О М, Шпирка И И (Сост.) *Результаты экспериментальных исследований М.И. Дулищева закономерностей явления излучения и распространения света в пространстве* (Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2008) с. 35
21. Filipchenko A V et al. "Realized parameters of KRSR storage rings" *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **448** 8 (2000)
22. Александров Е Б и др. *Письма в ЖЭТФ* **94** 374 (2011) [Aleksandrov E B et al. *JETP Lett.* **94** (5) (2011)]

PACS numbers: 01.65.+g, 01.70.+w
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201112m.1352

Сергей Иванович Вавилов как историк науки

В.П. Визгин, А.В. Кессених, К.А. Томилин

1. Введение

"Можно надеяться, что история науки когда-нибудь сама станет наукой. Залог этому — до тривиальности очевидный рост естествознания и техники и сотни тысяч людей, творящих историю науки на земном шаре на наших глазах. Нельзя оставить без внимания это мощное явление природы, способное изменять Землю не менее радикально, чем землетрясения и потопа" (С.И. Вавилов [1, с. 3, 4]).

В советский период вместе с бурным ростом физических исследований быстро росла и литература по истории физики, которую вначале формировали также сами физики (П.П. Лазарев, В.К. Фредерикс, А.Н. Крылов, С.И. Вавилов и др.). Труды А.Н. Крылова и С.И. Вавилова, посвящённые Ньютону, включающие в себя комментированные переводы его *Начал* и *Оптики*, соответствовали самому высокому профессиональному уровню историко-научного исследования. На этой основе возникла профессиональная история физики (в Институте истории науки и техники в Ленинграде и на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова). Но вскоре ленинградский институт, руководимый Н.И. Бухариным, был распущен, и вторая волна институционализации истории науки и техники имела место в послевоенные годы. На этой волне возник в системе Академии наук Институт истории естествознания и техники.

Заметим, что и в довоенный, и в послевоенный периоды ключевую (как организационную, так и концептуальную) роль в формировании профессиональной истории науки, и в частности истории физики, играл С.И. Вавилов. Некоторые из его работ и по сей день являются образцами историко-научных исследований (книга Вавилова о Ньютоне и цикл его работ по истории оптики XVII–XVIII вв.). В них содержатся определённые общие представления о структуре физического знания и его развитии, соотношении эксперимента, физических основ теории и её математического аппарата, механизмах возникновения нового научного знания, его взаимосвязи с социальными институтами и т.д. Именно такого рода круг идей мы будем называть историографической концепцией.

В нашем докладе мы рассмотрим историографическую концепцию С.И. Вавилова, имя которого не случайно носит Институт истории естествознания и техники РАН. Вавилов поразительным образом с 1920-х годов и особенно с начала 1930-х годов и до конца жизни совмещал огромную организационную деятельность и исследовательскую работу в области оптики с занятиями историей физики. Краткая хронологическая и библио-

графическая справка, характеризующая С.И. Вавилова как историка науки, приведена в приложении¹.

2. Историографическая концепция С.И. Вавилова

«...История науки может и должна стать истинной и единственной "теорией познания" взамен многих искусственных гносеологических построений...» (С.И. Вавилов [1, с. 7])².

Ключевые положения историографической концепции Вавилова изложены в 1933 г. в статье [1] "Старая и новая физика" в сборнике *Памяти Карла Маркса*, воспроизведённой в сборнике *История и методология естественных наук* в 1965 г., а также в статье "Физика" 1936 г. в 57 томе *Большой советской энциклопедии* [3]³. Размышления С.И. Вавилова о движущих силах и определяющих процессах истории науки неоднократно появлялись и в его дневниках, к которым он обращался в каждую свободную минуту.

Историографическую концепцию С.И. Вавилова можно аппроксимировать следующими положениями.

1. История науки должна стремиться стать наукой, но не в смысле её сведения к "наивным" логическим схемам, изъятым из живого человеческого и социокультурного контекста, а скорее в смысле некоего синтеза наук естественного и гуманитарного циклов, учитывающего эти контексты.

2. При всём многообразии факторов, определяющих тематику и особенности развития науки, всегда есть небольшое число доминирующих факторов. Их выявление — одна из главных задач историко-научного исследования.

3. «На непрерывной линии развития науки существуют некоторые "особые точки", как будто бы являющиеся эпохами перелома», своего рода "научные перевороты", или научные революции, хотя последние (в противовес подходу Т. Куна) подчинены идее непрерывности научного развития.

4. Последовательная историографическая концепция должна включать в себя описание процесса восприятия нового научного знания; только этот процесс и может объяснить преемственность и непрерывность развития научных идей и теорий.

5. Опыт истории физики учит, что фундаментальными системными единицами научного знания являются теории и что существует три главных метода их построения (по крайней мере, в области точного естествознания): метод гипотез-моделей, метод принципов и метод математической гипотезы.

6. Подлинная теория познания и философия науки должны опираться на историю науки (или даже ещё резче — они и есть концептуализированная история науки, или теоретическая историография науки).

¹ Краткий очерк историографической концепции С.И. Вавилова публиковался ранее [2].

² Кстати, замечательная статья [1], из которой взята эта фраза и которая является одной из наиболее глубоких концептуальных работ по истории науки, не была в своё время включена в *Собрание сочинений* Вавилова. Не из-за этой ли фразы?

³ Ссылки на страницы [3], как и для других работ, включённых в *Собрание сочинений* Вавилова, даны по этому собранию. Ссылки на страницы статьи [1] указаны по её переизданию в сборнике МГУ 1965 г.

3. История науки должна стремиться стать наукой

"...История науки — необходимая и, пожалуй, даже достаточная предпосылка планирования науки. Поэтому рано или поздно история науки должна стать наукой" (С.И. Вавилов [1, с. 4]).

История науки выросла, превратилась в обширную специальную область, но проблемы, поставленные Вавиловым, сохраняют актуальность. Кратко опишем их, дав слово самому С.И. Вавилову. Вот некоторая мозаика из цитат с короткими комментариями.

О научности истории науки и планировании науки на её основе: "Понять этот процесс (рост естествознания и техники. — *Авторы*), как всегда, значит во многом им овладеть и научиться направлять его куда нужно. История науки — необходимая и, пожалуй, даже достаточная предпосылка планирования науки." [1, с. 4]. К сожалению, несмотря на прогресс истории науки, остаётся до некоторой степени справедливой вавиловская довольно безрадостная оценка состояния этой области знания: «До сего времени она (история науки в начале 1930-х годов. — *Авторы*) пребывает, однако, в колыбели персональных характеристик и биографий, хронологических дат и, во многих случаях, весьма несовершенной документации. "Научность" этой истории сводится к наивным схемам, в которых наука изъята из живой, меняющейся среды и трактуется как автономный, чуть ли не с логической стройностью развивающийся организм» [1, с. 4].

Таким С.И. Вавилову виделся "научный облик" истории науки. Превращение истории науки собственно в науку позволило бы прогнозировать и планировать развитие общества, что рассматривалось в начале 1930-х годов как актуальнейшая для страны задача, которая должна решаться на научной основе. А потому и сама наука должна планироваться. Последнее, по Вавилову, возможно только на основе изучения историко-научного опыта, которое нужно было довести до научного уровня.

Но Вавилов предостерегал от поспешного решения этой проблемы посредством "изъятия" науки из социального и культурного контекста и построения "наивных" логизированных схем. По-видимому, "историко-научная научность" представлялась ему неким синтезом естественнонаучного и гуманитарно-научного подхода. Поэтому требовался своего рода союз естественников с гуманитариями (историками, философами, социологами), для того чтобы выработать определённую форму историко-научного профессионализма, на основе которого и можно будет решить проблему научности истории науки.

Но вместо этого союза (практически нереального тогда в СССР из-за катастрофического упадка гуманитарных наук) существовал серьёзный разрыв между теми и другими и ощущалась досадная промежуточность истории науки (историкам "непонятен и чужд самый предмет", а учёным-естественникам "некогда оглядываться" и "не хватает... во многих случаях нужных общеисторических и философских знаний"). Далее Вавилов перечисляет ряд фундаментальных вопросов о связи науки с донаучным и вненаучным знанием, хотя и продвинутых, но всё-таки не решённых и по сей день.

"Наука как фактор истории" — ещё одна важнейшая проблема истории науки, которую выдвигает С.И. Вавилов. С этой проблемой тесно переплетена и другая основная задача историко-научного исследования — задача выявления движущих стимулов развития науки.

Почти единственным таким стимулом, отмечает Вавилов, "сознательно или бессознательно полагалась внутренняя логика самой науки" [1, с. 6]. Между тем, как он показывает на примере оптики XVII–XVIII вв., такие стимулы "естественно искать в технических требованиях эпох, в социально-экономических условиях народов и времён и т.д." [1 с. 6]. Вместе с тем "ошибочным было бы, однако, стремление искать постоянного детального параллелизма в истории науки и в истории общества" (там же). "Социально-экономические факторы — основной катализатор развития науки, но эти процессы начинаются с того уровня, которого уже достигла наука" (там же). С XVI в. этот уровень поддерживается "на известной высоте" благодаря "международной научной связи". Проблемы истории науки, поставленные С.И. Вавиловым в начале 1930-х годов, продолжают оставаться актуальными.

4. Определяющие "факторы кинетики развития науки". Телескопы Галилея и Ньютона

С.И. Вавилов считал, что несмотря на прогрессивность, кумулятивность развития научного знания, «ход науки не одномерен, он обладает "шириной", обнаруживает разветвление, зигзаги и петли» [4, с. 235]. Он возражал против сведения живой, многомерной и многофакторной кинетики к одномерной схеме, повторяющей "развёрнутую во времени внутреннюю логику научной догмы сегодняшнего дня", но "редко совпадающей со сложными зигзагами подлинно происходящего" (там же).

Но в этом сложном, многофакторном процессе Сергей Иванович умел выделять некоторые доминирующие факторы. Например, в развитии оптики, механики, да и физики в целом в героическую эпоху Кеплера, Галилея и Ньютона (XVII в.) одной из таких доминант был телескоп. "*Siderius Nuncius* (Звёздный вестник Галилея, в котором описаны применения им телескопа. — *Авторы*), — писал С.И. Вавилов, — заставил учёный мир начала XVII в. заняться диоптрическими приборами, шлифовкой и полировкой стёкол. За этим делом история застаёт Декарта, Спинозу, Ньютона, королей и принцев, аббатов и монахов, физиков, философов и врачей. На этой почве неслыханно быстро выросла геометрическая оптика преломляющих сред, технология обработки стекла, искусство построения оптических приборов и оптических производств в широком смысле" [4, с. 236, 237]. В другой работе Вавилов выделяет этот же фактор, ставший главным стимулом всего творчества Ньютона: "Исток научных занятий Ньютона, в котором пересекаются три основных русла — оптика, небесная механика и математические исследования, — телескоп-рефлектор". И дальше идёт расшифровка этой "формулы": "Поиски совершенной формы оптических стёкол... — вероятный практический повод первых геометрических работ Ньютона. Открытие дисперсии света — прямое следствие работ по усовершенствованию телескопических стёкол. Самый объект телескопа — планеты и спутники их — привлекли внимание Ньютона к небесной механике. Наконец, длительные химические работы... имели целью вначале разыскание сплавов, пригодных для изготовления металлических зеркал рефлекторов... Таким образом, естественно искать внешний повод (развёртывания тематики ньютоновских исследований. — *Авторы*) в технической задаче усовершенствования телескопов" [5, с. 109]. Через полтора десятилетия С.И.

Вавилов перенёс эту ключевую мысль в свою книгу о Ньюtone, сравнив ньютоновский телескоп с увертюрой: "Как в увертюре, предшествующей большой музыкальной пьесе, переплетаются основные мотивы этой пьесы, так в телескопе Ньютона можно проследить истоки почти всех главных направлений его дальнейшей научной мысли и работы" [6, с. 321]. И в других случаях С.И. Вавилов умел находить аналогичные определяющие факторы выбора научной тематики, а также рождения и последующего развития научных идей и построений.

5. "Особые точки" на "непрерывной линии развития науки"

Признавая однонаправленность и прогрессивность развития науки, Вавилов полагал, что это развитие не вполне непрерывно, что "на непрерывной линии развития науки" существуют «некоторые "особые точки", как будто бы являющиеся эпохами перелома» [1, с. 7]. Этот подход превосходит концепцию научных революций Т. Куна, ставшую популярной в 1960–1970-е годы. Кстати говоря, Сергей Иванович использовал аналогичный термин — "научный переворот".

Внимательное прочтение его работ, посвящённых Ньюtone и Галилею, позволяет понять особенности научной революции XVII в. и некоторые особые черты "научных переворотов". К ним Вавилов относил также квантово-релятивистскую революцию конца XIX в. — первой трети XX в. На первое место в научных революциях он ставил радикальное преобразование фундаментальной теоретической системы понятий, позволяющее полнее, глубже и точнее описать накопившийся экспериментальный материал. При этом он подчёркивал, что корни революционных преобразований "простираются далеко назад" и что новые теоретические схемы — "необходимый результат предшествующего развития, поражающий своей зрелостью и плодотворностью, но, в сущности, не содержащий чего-либо качественно нового" [1, с. 7]. С последним, впрочем, нелегко вполне согласиться, и это, конечно, расходится с куновским пониманием научной революции [7]. Для Вавилова аспект прерывности подчинён континуальности научного развития, так же как "особые точки" являются решениями континуальных по своему существу дифференциальных уравнений. С.И. Вавилов, отдавая должное предшественникам Ньютона, показывал новизну и глубину ньютоновского прорыва. Это относится и к квантово-релятивистской революции, хотя он считал необходимым выявлять классические истоки квантовых и релятивистских идей.

6. "Внедрение научной истины"

Для того чтобы научное открытие, новая научная теория утвердились в науке, недостаточно их сделать или построить — нужно, чтобы они были восприняты научным сообществом. Историки науки сравнительно недавно поняли важность проблемы восприятия нового научного знания. Так, обстоятельное исследование восприятия теории относительности научными сообществами разных стран [8] впервые появилось только в 1987 г.

С.И. Вавилов хорошо понимал важность этой стороны историко-научного исследования. Правда, вместо восприятия он говорил о "внедрении", что напоминало процесс ассимиляции результатов фундаментальных

исследований практикой, техникой. Так, он говорил о том, что Галилей обладал изумительным даром того, что у нас теперь называют "внедрением научной истины". "Истина, — продолжал он, — делалась общим достоянием благодаря её применению, новым понятным всем аргументам, вследствие активной борьбы за неё..." [4, с. 236]. В статье об оптических работах Ломоносова С.И. Вавилов говорил о его трагедии, поскольку богатейшее научное наследие учёного "погребено в нечитавшихся книгах, в ненапечатанных рукописях, в оставленных и разорённых лабораториях на Васильевском острове и на Мойке" [9, с. 168].

Такая же судьба постигла, как замечал Сергей Иванович, и замечательные оптические открытия Леонардо да Винчи [4, с. 250].

7. Три главных метода построения физических теорий

Изучение трудов Ньютона, истории оптики и творившейся на его глазах истории теории относительности и квантов привело С.И. Вавилова к следующей классификации основных методов построения физических теорий: метод гипотез-моделей, ньютоновский метод принципов и максвелловский метод математической гипотезы (или математической экстраполяции). О методе принципов у Ньютона Вавилов уже писал в 1927 г., показывая, что ньютоновские и *Оптика*, и *Начала* построены на основе этого метода, противостоящего популярному в то время методу гипотез-моделей [5]. Однако не следует недооценивать последний: "На основе метода модельных гипотез выросла классическая теория тепла, света, звука и т.д." [3, с. 156]. Преимущества этого метода — наглядность и "понятность". Ограниченность его — в необоснованности экстраполяции связанной с ним "человекомерности", макроскопичности, на микромир.

Принципы, фигурирующие в "методе принципов", С.И. Вавилов понимал как "констатирование опыта в адекватной математической форме" [3, с. 156]. "Такие принципы, математически выраженные и обобщённые, играют в дальнейшем роль аксиом в геометрии, из которых в применении к конкретным физическим задачам делаются логические выводы" [3, с. 157]. Примерами теорий, построенных с помощью этого метода, являются не только классическая механика Ньютона или оптика Ньютона, но и классическая термодинамика и специальная теория относительности. Надёжность и живучесть теорий, построенных таким методом, подтверждается всем опытом развития физики. По сравнению с методом модельных гипотез он значительно более абстрактен и значительно менее нагляден. Общей чертой обоих методов является то, что в них "математика играет... главным образом служебную техническую роль" [3, с. 157].

Совсем иную, творческую, эвристическую, структурно-образующую, роль играет математика в методе математической гипотезы, который "наиболее отвлечён и оторван от прямой связи с опытом", но имеет "громоздкое значение в современной физике" (там же). Сам Вавилов никогда не использовал этот метод, но хорошо понимал и высоко ценил его. Согласно Вавилову, "впервые этот метод был с поразительным успехом применён Максвеллом в области электродинамики" [1, с. 11] и с этого времени "математика получила для физики несравнимо более глубокое значение". "Из подсобного орудия для количественного расчёта и формулировок

математика превратилась в эвристический метод, позволяющий теоретику предвосхищать опыт..." (там же). Создание общей теории относительности и квантовой механики — по мнению С.И. Вавилова — "потрясающие примеры могущества метода математической экстраполяции"⁴ (там же). Высоко оценивая метод математической гипотезы, С.И. Вавилов полагал, что, помимо опыта, он должен дополняться или корректироваться такими методологическими регулятивами, как принципы соответствия, простоты и др. [1, с. 12]. Восхищённый недавними поразительными достижениями общей теории относительности, квантовой механики и квантовой электродинамики, Вавилов так завершил замечательную статью 1933 г.: "Теоретический метод Максвелла безграничен, как математика, ему не страшны никакие масштабы, сколь угодно далёкие от человеческого обихода. На основе этого метода физика может развиваться беспредельно, опираясь попеременно на опыт и математическое мышление" [1, с. 12].

Вавилов считал, что непроходимой грани между этими теоретическими методами нет. В реальной работе физика-теоретика они переплетаются и переходят друг в друга (см., например, [5, с. 108]). Так из истории науки вырастает живая, опирающаяся на опыт ряда поколений естествоиспытателей-исследователей, теория познания, философия естествознания, не обременённая надуманными гносеологическими схемами.

8. Приложение.

С.И. Вавилов — историк науки.

(Хронологическая справка)

С 1922 г. — переводы Вавиловым иностранных книг по теории относительности (А. Эйнштейн, Ф. Ауэрбах). В дальнейшем (вплоть до 1951 г.) неоднократно переводил и редактировал переводы.

С 1926 г. — биографические статьи и статьи по физике в энциклопедиях (78 статей).

1927 г. Обзор "Принципы и гипотезы оптики Ньютона" в *УФН* [5]. В дальнейшем неоднократно возвращался к творчеству Ньютона.

1927 г. Перевод *Оптики* Ньютона [10].

1928 г. Монография *Экспериментальные основания теории относительности*, главы которой сопровождалась эпиграфами из *Начал* и *Оптики* Ньютона [11].

1933 г. Статья "Старая и новая физика" [1].

С 1934 г. — заведующий секцией истории физики и математики Института истории науки и техники АН СССР (Ленинград).

1937 г. Статья "Оптические воззрения и работы М.В. Ломоносова" [9].

С октября 1938 г. — председатель комиссии по истории науки Академии наук.

1939 г. Статья "Наука и техника в период французской революции" [12].

1943 г. Биографическая книга *Исаак Ньютон* (1-е издание [6], переиздана многократно, см. [13]).

1943 г. Статья "Галилей в истории оптики" [4].

1945 г. "Очерк развития физики в Академии наук СССР за 220 лет" [14].

С 1945 г. — председатель Комиссии по истории физико-математических наук при Отделении физико-математических наук (после смерти А.Н. Крылова).

С 1945 г. — член Учёного совета Института истории естествознания АН СССР (ИИЕ), член редколлегий *Трудов ИИЕ* и серии *Научное наследие*, выпускаемых ИИЕ.

1946 г. Доклад "Физика Лукреция" [15]. (В кн. *Общее собрание Академии наук СССР 15–19 января 1946 г.*)

1946 г. Перевод с латинского *Лекций по оптике* Ньютона.

1946 г. Доклад в Англии "Атомизм Ньютона" (зачитан Г. Дейлом) (см. [16]).

1948 г. Публикации в книге *Люди русской науки* статьи "Пётр Николаевич Лебедев" [17] и других статей.

1949 г., январь. Выступление на сессии АН СССР, посвящённой истории отечественной науки.

1949 г. Публикация в *УФН* "Ленин и философские проблемы современной физики" [18].

Характеристику трудов С.И. Вавилова в области истории физики и его роли в становлении отечественной истории науки см. также в биографической книге Л.В. Лёвшина [19], очерках Т.П. Кравца [20], сборнике [21] и в работах [2, 22]. Полный список трудов С.И. Вавилова в области истории науки см. в [23].

Список литературы

1. Вавилов С И "Старая и новая физика (1933)", в сб. *История и методология естественных наук* Вып. 3 *Физика* (Под ред. А Х Хргиана) (М.: Изд-во МГУ, 1965) с. 3; в сб. *Памяти Карла Маркса. Сборник статей к пятидесятилетию со дня смерти. 1883–1933* (Под ред. Н И Бухарина, А М Деборина) (М.: Изд-во АН СССР, 1933)
2. Визгин В П "Историографические концепции отечественных физиков и историков науки XX в. (С.И. Вавилов, И.Б. Погребынский, Я.Г. Дорфман)", в сб. *Принципы историографии естествознания: XX век* (Отв. ред. И С Тимофеев) (СПб.: Алетей, 2001) с. 280–303
3. Вавилов С И "Физика. (1935)" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 148–164; *Физика. Проект статьи 57 тома Большой советской энциклопедии* (М.: 16 тип. треста "Полиграфкнига", 1935)
4. Вавилов С И "Галилей в истории оптики" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 235–277; в сб. *Галилео Галилей (1564–1642). Сборник, посвященный 300-летней годовщине со дня смерти Галилео Галилея* (Под ред. А М Деборина) (М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1943) с. 5–56; *УФН* 83 583–615 (1964) [Vavilov S I "Galileo in the history of optics" *Sov. Phys. Usp.* 7 596–616 (1965)]
5. Вавилов С И "Принципы и гипотезы оптики Ньютона" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 107–126; *УФН* 7 87 (1927)
6. Вавилов С И "Исаак Ньютон (1-е изд.)" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 288–467; *Исаак Ньютон* (М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1943) [Пер. на нем. яз.: Vavilov S I *Isaac Newton* (Berlin: Akademie-Verlag, 1950)]
7. Kuhn T S *The Structure of Scientific Revolutions* (Chicago: Univ. of Chicago Press, 1970) [Кун Т *Структура научных революций* (М.: Прогресс, 1977)]
8. Glick Th F (Ed.) *The Comparative Reception of Relativity* (Dordrecht: D. Reidel, 1987)
9. Вавилов С И "Оптические воззрения и работы М.В. Ломоносова" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956)

⁴ Согласно Вавилову, "сущность его состоит... в разыскании таких математических форм, которые, включая все отдельные случаи, непосредственно найденные на опыте, давали бы одновременно значительно более широкое содержание. Разумеется, единственным оправданием правильности избранной математической формы может служить её последующее подтверждение опытом. Лишённый в мире новых масштабов конкретных образов и моделей, физик нашёл в математике безгранично ёмкий метод для создания новой теории" [1, с. 11, 12].

- с. 168–175; *Изв. АН СССР. Отд. обществ. наук* (1) 235–242 (1937)
10. Ньютон И *Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света* (Пер. с 3-го англ. изд. 1721 г. с примеч. С И Вавилова) (М. – Л.: ГИЗ, 1927)
 11. Вавилов С И *Экспериментальные основания теории относительности* (М. – Л.: ГИЗ, 1928)
 12. Вавилов С И "Наука и техника в период Французской революции" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 176–190; *Вестн. АН СССР* (7) 15–25 (1939)
 13. Вавилов С И *Исаак Ньютон. 1643–1727* (Научно-биографическая серия, Отв. ред. В С Вавилов) 4-е изд., доп. (М.: Наука, 1989)
 14. Вавилов С И "Очерк развития физики в Академии наук СССР за 220 лет" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 530–552; в сб. *Очерки по истории Академии наук. 1725–1945* Вып. *Физико-математические науки* (Под ред. А Ф Иоффе) (М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1945) с. 3–29
 15. Вавилов С И "Физика Лукреция" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 646–663; в сб. *Общее собрание Академии наук СССР. 15–19-е января 1946 г. Доклады* (Отв. ред. С И Вавилов) (М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1946) с. 147–165; *УФН* **29** 161–178 (1946)
 16. Вавилов С И "Атомизм И. Ньютона" *УФН* **31** (1) (1947)
 17. Вавилов С И "Петр Николаевич Лебедев (1866–1912)" *Собрание сочинений* Т. 3 (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 761–770; в сб. *Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники* Т. 1 (Сост. и ред. И В Кузнецов) (М. – Л.: Гостехиздат, 1948) с. 11–12
 18. Вавилов С И "Ленин и философские проблемы современной физики" *УФН* **38** 145 (1949); Газета "Правда", 12 мая 1949 г.
 19. Лёвшин Л В *Сергей Иванович Вавилов. 1891–1951* (Сер. "Научно-библиографическая литература", Отв. ред. Н А Борисевич) 2-е изд., испр. и доп. (М.: Наука, 2003) Гл. 20, с. 283–298
 20. Кравец Т П *От Ньютона до Вавилова. Очерки и воспоминания* (Л.: Наука, 1967)
 21. Франк И М (Отв. ред.) *Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания* 3-е изд., доп. (М.: Наука, 1991)
 22. Визгин В П "О ньютоновских эпитафиях в книге С. И. Вавилова по теории относительности", в сб. *Ньютон и философские проблемы физики XX века* (Отв. ред. М Д Ахундов, С В Илларионов) (М.: Наука, 1991) с. 184–206
 23. Красноухова О В, Каминер Л В (Сост.) "Список работ академика С.И. Вавилова по истории естествознания", в сб. *Труды Института истории естествознания* Т. 4 (М.: Изд-во АН СССР, 1952) с. 18–30