

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.gpad.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. **Басиев 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

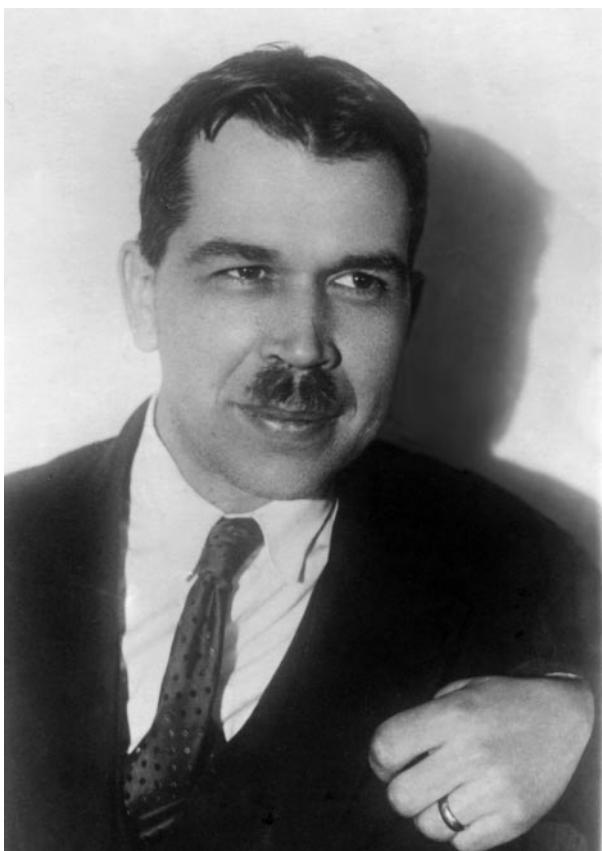
А.В. Масалов, З.А. Чижикова

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 "детищах" 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 существе 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.Л. Левшин ясно формулируют механизм, отвечающий за ожидаемое уменьшение поглощающей 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). Данная также оценка доли x при непрерывном освещении в пределе слабого эффекта: $x = J_{abs}\tau/(Nh\nu)$, 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 подготовили 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 флюоресцеине была

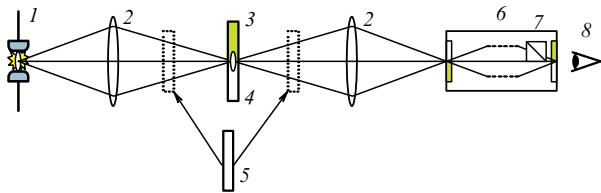


Рисунок. Схема установки для наблюдения поглощения в урановом стекле: 1 — искра, 2 — линзы, 3 — урановое стекло либо кювета с флюоресценцией, 4 — область, свободная от образца, 5 — фильтр-ослабитель, 6 — спектрофотометр, 7 — поляризатор, 8 — глаз наблюдателя.

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 анализировалось 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 максимально возможной интенсивностью. В этом случае следовало ожидать проявления нелинейности поглощения уранового стекла, т.е. нарушения баланса освещённости наблюдаемых полей. Наблюдатель восстанавливал баланс освещённостей 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 флюоресценцией; скорее всего, точность ограничивалась нестабильностью искры). Перестановка фильтра-ослабителя привела к падению поглощающей 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 описан 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 абсорбировать 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, врачающей способности и т.д.». Здесь С.И. Вавилов обобщает проявление 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 коллектизы 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, антистоково 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. Леонович — 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 населённостей 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-

щиеся 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 сверхзузких 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 терагерцевого 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 расширялись, 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 развертыванию 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 невероятно 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 SI *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, Chizikova 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 нанофотоника, 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 нанофотоники 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 нанофотоники, как сейчас принято называть).

К микрооптике (нанофотонике) 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 усилинию 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