



ЛЮДИ
БЕЛОРУССКОЙ
НАУКИ

АКАДЕМИК
Б. И. СТЕПАНОВ



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Институт физики им. Б. И. Степанова

ЛЮДИ
БЕЛОРУССКОЙ
НАУКИ

АКАДЕМИК
Б. И. СТЕПАНОВ

Воспоминания учеников
и современников,
избранные статьи



Минск
«Беларуская навука»
2013

УДК 53(476)(092)+929Степанов
ББК 22.3г(4Беи)
А 38

Серия академическая. Основана в 1997 году

С о с т а в и т е л и:

В. Б. Ходан,
кандидат физико-математических наук О. А. Гапоненко

Н а у ч н ы е р е д а к т о р ы:

академик П. А. Апанасевич,
член-корреспондент НАН Беларуси С. Я. Килин

Академик Б. И. Степанов: воспоминания учеников
А38 и современников, избранные статьи / сост. : В. Б. Ходан,
О. А. Гапоненко ; науч. ред. : П. А. Апанасевич, С. Я. Ки-
лин. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 295 с. – (Люди
белорусской науки).

ISBN 978-985-08-1558-3

Издание приурочено к 100-летию со дня рождения Бориса Ивановича Степанова – выдающегося ученого, педагога и организатора науки, Героя Социалистического Труда, академика АН БССР, профессора, доктора физико-математических наук, заслуженного деятеля науки БССР, организатора и директора (1957–1985) Института физики АН БССР, ныне носящего его имя.

Сборник состоит из статей и очерков-воспоминаний, написанных учениками и коллегами Бориса Ивановича и освещающих различные стороны его многогранной и результативной научной, педагогической и административной деятельности. В нем также содержится ряд статей Б. И. Степанова, как правило, открывающих научные направления, в разработку которых он внес наиболее существенный вклад.

Рассчитано на научную общественность и всех, кто интересуется историей науки.

УДК 53(476)(092)+929Степанов
ББК 22.3г(4Беи)

ISBN 978-985-08-1558-3

© Оформление. РУП «Издательский
дом «Беларуская навука», 2013

**П. А. Апанасевич, А. Н. Рубинов,
В. С. Бураков, С. Я. Килин**

**АКАДЕМИК
БОРИС ИВАНОВИЧ СТЕПАНОВ**

Становление и развитие Института физики, как и в целом физики в Беларуси, тесно связано с именем академика Бориса Ивановича Степанова. Началом можно считать 1953 год, когда Борис Иванович в сорокалетнем возрасте и Антон Никифорович Севченко были избраны академиками Академии наук БССР и переехали из Ленинграда в Минск. Здесь, вместе с работавшим в Белгосуниверситете Ф. И. Федоровым, они организовали сектор физики и математики в Физико-техническом институте АН БССР, на базе которого в январе 1955 г. создается Институт физики и математики. В 1957 г. этот институт, а с 1959 г., после отделения математиков, Институт физики возглавил Б. И. Степанов. В должности директора проработал он 28 лет.

Борис Иванович Степанов сформировался как физик-теоретик в Ленинграде. Здесь в 1913 г. он родился в семье питерского рабочего. Нелегкое детство закалило его характер. Стремление к знаниям привело Бориса Ивановича в Ленинградский госуниверситет, после окончания которого в 1936 г. он был принят в аспирантуру Государственного оптического института (ГОИ), где работали крупные ученые с мировыми именами – Д. С. Рождественский, В. А. Фок, А. Н. Теренин, С. Э. Фриш, Е. Ф. Гросс, В. К. Прокофьев и многие другие.

Работая в этом институте, Борис Иванович часто встречался с Д. С. Рождественским, первым директором ГОИ, слушал его страстные выступления, учился у него, старался подражать ему. Вспоминая те годы, Борис Иванович пишет:

«Научная молодежь ГОИ тех лет чрезвычайно гордилась своей работой в институте... Именно он учил нас работать по 24 часа в сутки, не останавливаться на достигнутом, искать и находить новое, неизведанное и значимое»¹. Борис Иванович воспринял взгляды и идеи Д. С. Рождественского по организации научных и прикладных исследований, которые и сейчас звучат актуально: «Мы должны поставить работу в ГОИ так, чтобы она обнимала всю полноту техники и всю полноту науки – оптику во всей ее целостности. ...Нет границы между техникой и наукой. Широкий план организации научно-исследовательского института должен объединить и самые близкие, и самые отдаленные цели, всю отрасль науки...»². Пытаясь передать ощущение той «романтической» эпохи развития физики, Борис Иванович часто цитировал П. Эренфеста – иностранного члена АН СССР, который, посетив Россию в это время, сказал: «Да, у нас в Лейденском университете тоже умеют работать, но разве можно сравнить условия, в которые поставлены иностранные ученые, с русскими. Там лаборатории поражают своей роскошью, а здесь радостным творчеством. В Советской России так много работают, что становится страшно, не надорвутся ли эти люди? И двигает их высокий поток труда и творчества! Ведь не цели же наживы они преследуют?! Бесконечно поражаюсь русской молодежи. Какая жажда знаний! Юноши без обуви, не заботясь об одежде, рвутся к родникам знания. Я верю, что если народится новый Ломоносов, то он выйдет из стен русского университета»³.

Несмотря на неразбериху с руководителями, Борис Иванович успешно и в срок (в 1939 г.) защитил кандидатскую диссертацию на тему «Изучение резонансных возмущений в спектрах двухатомных молекул». Консультантом по диссер-

¹ Степанов Б. И. Введение в современную оптику. – Минск: Наука и техника, 1989. – Т. 1. – С. 59.

² Степанов Б. И. Очерки по истории оптической науки. – Минск: Наука и техника, 1978.

³ Там же.

тации был М. А. Ельяшевич, который впоследствии также переехал в Минск. Активно начатую научную работу прервала Великая Отечественная война. В конце июля 1941 г. Борис Иванович добровольно ушел на фронт, до февраля 1942 г. входил в состав партизанского отряда, затем служил в регулярной армии на Сталинградском фронте. В январе 1943 г. Б. И. Степанов по ходатайству президента АН СССР С. И. Вавилова был отозван из армии в ГОИ, в то время находившийся в Йошкар-Оле, и активно включился в научную работу. В 1948 г. он успешно защищает докторскую диссертацию, результаты которой вошли в знаменитую двухтомную монографию «Колебания молекул», написанную совместно с М. В. Волькенштейном и М. А. Ельяшевичем и ставшую настольной книгой всех спектроскопистов. В 1950 г. авторы этой книги были удостоены Государственной премии СССР. Одним из прикладных аспектов данной теоретической работы было распознавание различных компонентов нефти в Бакинских месторождениях.

Белорусский этап деятельности Бориса Ивановича связан с расцветом его творческой, организационной и педагогической активности. Накопленные за ленинградский период знания и опыт трансформировались в развитие оптических исследований в Беларуси, которую он считал своей второй родиной, и в его детище – Институт физики. Не перечисляя всего богатства и значимости полученных Борисом Ивановичем и его сотрудниками результатов, отметим здесь классификацию различных типов вторичного свечения – проблему, которую поставил С. И. Вавилов, получение универсального соотношения между спектрами люминесценции и поглощения и, конечно же, работы по созданию источников когерентного излучения, революционизировавших всю современную жизнь, – лазеров. Когда в 1960 г. появилась публикация Т. Х. Меймана о создании первого лазера, практически ничего не было известно о принципах его работы. Однако Борис Иванович обратил очень

серьезное внимание на это событие, расценил его как начало принципиально нового направления в развитии оптики, с большим энтузиазмом включился в его разработку сам, энергично привлек внимание к нему своих учеников и многих других сотрудников института. В результате этого очень скоро физика оптических квантовых генераторов и их применений или, как это направление стали называть позже, лазерная физика и нелинейная оптика, заняли ведущее место в научных исследованиях и разработках института. Наряду с успешной организацией исследований в области этого нового и оказавшегося весьма перспективным научного направления исследований и разработок в Институте физики Б. И. Степанов всячески содействовал его развитию и в целом ряде других организаций нашей республики и за ее пределами. Так что с полным основанием Бориса Ивановича можно считать отцом лазерной физики в Беларуси и одним из ведущих ученых в области лазерной физики Советского Союза.

Б. И. Степанов внес определяющий вклад в решение многих проблем спектроскопии, физической оптики, лазерной физики. О разносторонности научных интересов свидетельствуют его достижения, отмеченные тремя Государственными премиями СССР, Государственной премией БССР и Золотой медалью имени С. И. Вавилова, присужденной ему Президиумом АН СССР. Эти высокие награды Борис Иванович получил за теорию колебаний многоатомных молекул; предсказание и исследование явления оптической генерации в растворах сложных органических соединений и создание на их основе нового типа лазеров с перестраиваемой частотой излучения в широкой области спектра; разработку физических основ динамической голографии и новых методов преобразования пространственной структуры световых пучков; создание инженерных методов расчета энергетических характеристик лазеров и теорию люминесценции и поглощения света сложными молекулами.

Результаты исследований Б. И. Степанова получили мировое признание ученых и общественности. В 1973 г. он награжден Золотой Звездой Героя Социалистического Труда. Значимость работ Б. И. Степанова подчеркивается высказыванием, приведенным в монографии, изданной под редакцией Л. А. Арцимовича: «...Используя процесс вынужденного испускания, удается генерировать строго направленные, монохроматические когерентные световые пучки с длинами волн оптического диапазона. В США такие работы были проведены Ч. Таунсом. Большое значение для развития теории квантовой генерации света имели также работы Б. И. Степанова и его школы»¹.

Многочисленные ученые, специалисты и государственные деятели, посещавшие Институт физики, отмечали творческую атмосферу, созданную Борисом Ивановичем. Академик В. А. Амбарцумян отмечал, что «причиной быстрого развития Института является направленность и целеустремленность, с которой замечательный советский ученый, известный в нашей стране физик, академик Б. И. Степанов руководит институтом, следя за всеми деталями работы и вместе с тем предоставляя своим талантливым сотрудникам широкую возможность проявления инициативы. Этот Институт есть Институт современной оптики. У каждого, кто знакомится с результатами его работы, возникает желание использовать эти результаты...». Лауреаты Нобелевских премий академики Н. Г. Басов и В. Л. Гинзбург пишут: «Достижения института велики и охватывают многие области современной оптики... Это только начало и в ближайшее время мы будем свидетелями еще более выдающихся достижений института». Лауреат Нобелевской премии академик Ж. И. Алферов: «Институт, с которым связано очень много в истории советской физики и в истории науки Ленинграда и Беларуси». Летчик-космонавт, Герой Советского Союза В. В. Коваленок: «Надеюсь, что

¹ Развитие физики в СССР в 1917–1967 гг. / под ред. Л. А. Арцимовича. – М., 1967. – Т. 2.

современная космонавтика с большой пользой и перспективой будет использовать результаты исследований института в своих практических делах по освоению космического пространства».

Образ Бориса Ивановича будет неполным, если не сказать о его отношении к воспитанию научной смены. Эту задачу он рассматривал как одну из двух совершенно неразрывных частей работы научного сотрудника – непосредственной научной работы и передачи своих знаний, подготовки научной смены. Будучи преподавателем БГУ, руководя аспирантами, он всегда завоевывал авторитет у молодежи своим четким и ясным стилем изложения лекций и своей преданностью науке. Его монографии и книги постоянно обращаются к молодежи.

Борис Иванович был прекрасным семьянином. Взаимная истинная любовь и подлинная дружба Бориса Ивановича и Екатерины Ивановны не увядали на протяжении всей их жизни. Они воспитали двух замечательных дочерей, их семья была достойна подражания. Екатерина Ивановна сыграла важную роль в жизни и деятельности Бориса Ивановича, убедительно подтверждая слова одного знаменитого ученого, что человек может добиться в жизни так много, насколько сподвигнет его жена. «Если я жив и трудоспособен, то только благодаря ей, моему помощнику, моей дорогой супруге Екатерине Ивановне», – часто повторял Борис Иванович.

Как завещание работающим в науке и как исповедь ученого и организатора науки звучат слова Б. И. Степанова из неопубликованных заметок и дневников:

«Суть моей линии (может быть утопической):

а) в институте должны быть толковые, талантливые люди. Ставку надо делать именно на них;

б) вести борьбу с серостью, поднимать на щит все умное, выискивать в институте по крупице все свежие идеи, которые могут поднять институт до уровня передового института;

в) концентрировать усилия института вокруг наиболее перспективных задач, прекращать устаревшие работы;

г) сочетать фундаментальные исследования с практикой. Так проводить фундаментальные исследования, чтобы они были ориентированы на вклад в практику, тем более, что ситуация в оптике дает этому блестящие возможности;

д) институт должен помогать производству;

е) институт должен помогать обороне;

ж) институт должен помогать республике;

з) надо решительно ускорять методы решения проблем: слишком часто наши хорошие идеи оставались «зряшными», так как другие учреждения обгоняли нас;

и) хорошие хоздоговора способствуют ускорению темпов, внедрению, повышению ответственности;

к) правительственные работы важны не только сами по себе, но и способствуют мобилизации сил;

л) надо расти качественно, а не количественно;

м) настоящий ученый (лаборатория) должен получить всесоюзное признание;

н) решающим в науке является голова, идеи, а не аппаратура. Многие хорошо оснащенные институты работают плохо из-за отсутствия идей;

о) надо развивать приборостроение, доводить идеи до конца;

п) хозрасчет в науке необходим;

р) надо повышать эффективность исследований;

с) квантовая электроника – это одно из наиболее передовых направлений оптики.

Развитие науки, в том числе и физики, заставляет нас сегодня с глубоким вниманием отнестись к этим четко сформулированным и актуальным положениям. Связь поколений в науке, о важности которой многократно напоминал академик Борис Иванович Степанов, продолжается в настоящее время в делах его учеников и Института, носящего его имя.

О СТАТЬЯХ Б. И. СТЕПАНОВА, ВКЛЮЧЕННЫХ В НАСТОЯЩИЙ СБОРНИК

В настоящее издание включены работы, которые позволят читателю представить ретроспективу развития творческих идей Б. И. Степанова в период с 1930-х по 1980-е годы. Период, охватывающий эпоху создания квантовой механики и квантовой электродинамики, с их широким применением в спектроскопии, эпоху создания лазеров, нелинейной и когерентной оптики; время, когда на основе первоначальных фундаментальных научных идей были созданы новые оптические технологии, неотъемлемым образом связанные с современным обществом.

Первая работа Б. И. Степанова, опубликованная в 1935 г. в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» [1], была связана с применением недавно созданной квантовой теории спектров атомов и молекул к объяснению тонкого расщепления метастабильных уровней азота на основе экспериментальных данных В. М. Чулановского. Эта, как и последующие две работы, относится к ленинградскому периоду деятельности Бориса Ивановича в Государственном оптическом институте. Важнейшими направлениями его исследований в то время были разработка теории и расчет колебательных спектров многоатомных молекул (совместно с М. В. Волькенштейном и М. А. Ельяшевичем) [2], а также анализ проявлений водородной связи в структуре спектров оптического поглощения [3]. Работы по теории колебательных спектров многоатомных молекул отмечены Государственной премией СССР 1950 г.

Последующие четыре работы [4–7], относящиеся уже к Минскому периоду деятельности Б. И. Степанова, связаны

с теорией люминесценции и поглощения света. Отталкиваясь от работ С. И. Вавилова как основополагающих и содержащих в большом количестве постановочные и проблемные вопросы, Б. И. Степанов на основе широкого использования вероятностного (балансного) метода расчета распределения населенностей энергетических уровней люминесцирующих объектов и учета процессов термализации делает ряд принципиальных выводов о свойствах люминесценции и поглощения света. Так, в работе [4] (совместно с В. В. Антоновым-Романовским, М. В. Фоком и А. П. Хапалюком) впервые показано, что энергетический выход люминесценции может быть больше единицы. Установлено также, что при определенных условиях на фоне широкополосного равновесного теплового излучения могут наблюдаться спектральные провалы, другими словами, возможна отрицательная люминесценция – явление, впервые предсказанное в работе [5]. Обобщая этот результат, Б. И. Степанов наряду с отрицательной люминесценцией вводит и понятие отрицательного фотоэффекта; развивает основы спектроскопии отрицательных световых потоков.

Используя метод балансного равновесия и предполагая, что в сложных молекулах процесс восстановления термодинамического равновесия в системе колебательных состояний происходит за очень короткие промежутки времени (10^{-10} – 10^{-12} с), Б. И. Степанов получает универсальное соотношение между спектрами поглощения и люминесценцией сложных молекул [6], теперь носящее название соотношения Степанова¹.

¹ В англоязычной литературе это соотношение также называют соотношением Кеннарда–Степанова (Kennard–Stepanov relation), отмечая работу 1918 г. американского ученого Е. Кеннарда, обратившего внимание на проблему термодинамики флуоресценции. Применительно к полупроводниковым материалам аналогичное соотношение рассматривалось в работах 1957 г. Кубо (R. Kubo), 1959 г. Мартином и Швингером (P. C. Martin, J. Schwinger), а также ван Русброком и Шокли (W. van Roosbroeck, W. Shockley) в 1954 г., поэтому применительно к полупроводникам универсальное соотношение иногда называют соотношением Кубо–Мартина–Швингера или Русброка–Шокли.

Обращаясь к еще одному кругу вопросов, инициированных работами С. И. Вавилова, классификации вторичного свечения, т. е. установлению принципиального различия между люминесценцией и рассеянием, Б. И. Степанов совместно с П. А. Апанасевичем обосновывают [7] принцип такой классификации как наличие (люминесценция) или отсутствие (рассеяние) промежуточных процессов между актами «исчезновения первичных фотонов и возникновения вторичных».

Последующие шесть работ [8–13] связаны с эпохой возникновения и развития лазерной физики, нелинейной и когерентной оптики. В 1960 г., т. е. в год появления работы Т. Маймана по первому наблюдению лазерного эффекта, Б. И. Степанов совместно с В. П. Грибковским публикуют статью [8], в которой проводят расчет нелинейной зависимости параметров поглощения и люминесценции от интенсивности падающего излучения – нелинейно-оптических эффектов, играющих важную роль в работе лазеров. Работа 1961 г. [9] содержит расчет одного из основных элементов лазера – открытого плоскопараллельного резонатора. Наряду с публикацией [10] они стали основой для разработки инженерных методов расчета лазерных систем, получивших широкое применение и отмеченных Государственной премией БССР. В работе [11] Б. И. Степанов совместно с П. А. Апанасевичем публикуют развитый ими вариант теории вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), обнаруженного в США в 1962 г. Данная статья заложила основы большой серии теоретических и экспериментальных исследований ВКР, интенсивно проводимых в институте и в настоящее время. Работа [12] содержит результаты первого наблюдения оптической генерации в растворах сложных молекул (красителей). Выполненное совместно с А. Н. Рубиновым и В. А. Мостовниковым, данное исследование заложило основы разработки нового типа лазеров – плавно перестраиваемых лазеров на красителях. Работы этого авторского коллектива были отмечены Государственной премией СССР 1972 г.

В статье [13] Б. И. Степанов, Е. В. Ивакин и А. С. Рубанов впервые наблюдали новый когерентно-оптический эффект – динамическое обращение волнового фронта, которое стало основой для нового направления динамической голографии. За эти работы Б. И. Степанову в составе коллектива была присуждена Государственная премия СССР 1982 г.

Нельзя не отметить и то, что Б. И. Степанов значительное внимание в своей деятельности уделял популяризации научных достижений и истории науки. В качестве примера в настоящее издание включена его статья «Оптика» Ньютона» [14]. Тщательность в выборе представляемого материала, доказательное изложение исторических фактов и предположений и, несомненно, эмоциональность, с которой Борис Иванович пишет о науке и ученых, их влиянии на историю и современность, заставляют нас вспомнить и тот значительный вклад, который внес сам Б. И. Степанов в развитие оптической науки.

П. А. Апанасевич, С. Я. Килин

14. М. Ельяшевич. ЖЭТФ, 13, 65, 1943; ЖФХ, 15, 831. 1941.
 15. М. Ельяшевич и Б. Степанов. ДАН, 32, 481, 1941; ЖФХ, 17, 145, 143.
 16. М. Волькенштейн и М. Ельяшевич. Труды ГОИ (в печати).
 17. М. Волькенштейн и М. Ельяшевич. ДАН, 41, 380, 1943.
 18. К. Kohlrausch. L. c., стр. 128.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ В СПЕКТРАХ МОЛЕКУЛ, ОБРАЗУЮЩИХ ВОДОРОДНУЮ СВЯЗЬ¹

Б. И. Степанов

Свойства водородной связи изучаются в последнее время весьма интенсивно. Правильное объяснение экспериментальных фактов, несомненно, поможет подойти к решению сложных вопросов ассоциации молекул. Важнейшим методом исследования водородной связи является изучение изменений в колебательных спектрах, происходящих при соединении молекул в сложные комплексы. В поглощении паров молекул, образующих водородную связь, наблюдается узкая линия (в CH_3OH – 3670 см^{-1}). В поглощении жидкой фазой линия преобразуется в широкую полосу, максимум интенсивности которой смещается в сторону меньших частот (в молекуле CH_3OH на 270 см^{-1}). Как ширина полосы, так и величина смещения зависят от температуры жидкости. При повышении температуры они уменьшаются. Аналогичные явления имеют место и в растворах.

В настоящей работе сделана попытка объяснить эти закономерности, исходя из свойств простейшей системы с двумя степенями свободы (рис. 1).



Рис. 1

¹ Публикуется по: Известия Академии наук СССР. Серия физическая. – 1945. – Т. IX, № 3. – С. 201–202.

Координаты q_1 и q_2 представляют собой изменение длин связей ОН и Н ... О, координата q' – изменение расстояния второго атома кислорода до центра тяжести гидроксильной группы.

Уравнение Шредингера системы в координатах q_1 и q' имеет вид

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2} \left\{ \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2}{\partial q_1^2} + \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial^2}{\partial q'^2} + u_1(q_1) + u_2 \left(q_2 = q' - \frac{16}{17} q' \right) + u_{\text{ВЗ}}(q_1 q') \right\} \Psi = E \Psi. \quad (1)$$

Потенциальная функция $u_1(q_1)$ есть обычная функция Морзе группы ОН. Функция $u_2(q_2)$ характеризует водородную связь. Энергия диссоциации, соответствующая этой функции, равна примерно 2000 см^{-1} . Вид функции $u_{\text{ВЗ}}(q_1 q')$ определить невозможно, но несомненно, что она весьма значительна.

Решать уравнение (1) возможно лишь методами теории возмущений, пренебрегая первоначально функцией $u_{\text{ВЗ}}(q_1 q')$. Так как колебания связи ОН много быстрее колебаний связи Н ... О, то полученное уравнение проще всего решить, рассматривая движение в связи ОН при заданном параметре q' . Собственные значения этой задачи будут потенциальной функцией для колебаний связи Н ... О. При $v = 0$ (для связи ОН) собственное значение $W_0(q')$ равно $u_2(q')$. При $v = 1$ $W_1(q') = 3650 \text{ см}^{-1} + \overline{u_2(q' - \alpha q')}$, где усреднение производится по всем значениям координаты q_1 . Если q_1 меняется мало по сравнению q' , то $u_2(q' - \alpha q_1) = \overline{u_2(q' - \alpha q_1)}$.

Значение \bar{q}_1 равно нулю для $v = 0$ и отличается от нуля вследствие ангармоничности колебаний для уровня $v = 1$. Расчеты, произведенные по формуле Морзе для группы ОН, дали $\bar{q}_1 = 0,023 \text{ \AA}$. На рис. 2 приведены кривые $W_0(q')$ и $W_1(q')$. Пунктирная кривая представляет собой кривую $W_1(q')$, которая получилась бы при расчетах, если бы ангармоничность отсутствовала. Рассмотрим теперь переходы между

уровнями энергии, соответствующими этим кривым. Разность энергии и, следовательно, частота поглощения зависят от того, с какого уровня происходит поглощение. Если связь отсутствует (уровень E_a), то частота перехода равна 3670 см^{-1} . Для уровней E_b, E_c, E_d , частота поглощения уменьшается. Уровень с которого происходит поглощение, зависит от температуры (по формуле $E_{cp} = kT$). На участке от q'_d до q'_a увеличение температуры приводит к увеличению E_{cp} и, следовательно, увеличению частоты поглощения и уменьшению отклонения от частоты поглощения изолированных молекул. При очень низких температурах следует ожидать обратного эффекта.

Таким образом, самые общие представления о виде потенциальной функции системы ОН ... О объясняют наличие смещения линий поглощения и их зависимость от температуры. Превращение линий в полосу объясняется учетом влияния отброшенной функции $u_{B3}(q_1q')$. Уровни энергии $E'_a, E'_b, E'_c \dots$ взаимодействуют с непрерывными уровнями, полученными при решении уравнения Шредингера для потенциальной кривой $W_0(q')$ выше ее границы диссоциации. Так как расстояния между колебательными уровнями слабой связи весьма малы, а $u_{B3}(q_1q')$ весьма велико, то во взаимодействии приводит к полному размыванию колебательной структуры. В верхнем состоянии возможны любые значения энергий. Так как принцип Франка–Кондона утверждает, что возможны переходы, при которых q' изменяется

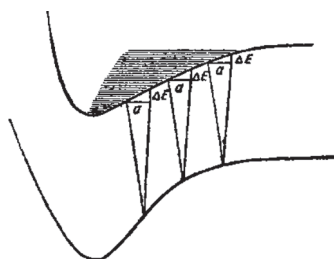


Рис. 2

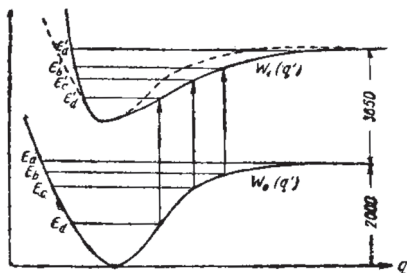


Рис. 3

в небольших пределах (a), то эти пределы определяют и ширину полосы (ΔE на рис. 2). С увеличением температуры, т. е. при переходе от уровня E_d к уровню E_c , ширина полосы будет уменьшаться.

Предложенная теория объясняет также одинаковую величину смещения полосы в жидкостях и растворах, увеличение смещения и ширины полосы при поглощении обертонов в связи ОН, а также их небольшое уменьшение при замене атома водорода атомом дейтерия.

Подробное изложение работы будет дано в «Журнале физической химии» и «Journal of Chemical Physics».

Государственный оптический институт

ВЫХОД ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СИСТЕМЫ С ТРЕМЯ УРОВНЯМИ ЭНЕРГИИ¹

*В. В. Антонов-Романовский, Б. И. Степанов,
М. В. Фок, А. П. Хапалюк*

(Представлено академиком Г. С. Ландсбергом 10.V.1955)

Вместе с определением люминесценции, данным С. И. Вавиловым [1], сформулированный им закон изменения выхода люминесценции в зависимости от длины волны возбуждающего света является тем принципиальным фундаментом, на котором строится все учение о люминесценции. Поэтому вполне понятен интерес, проявляемый к теоретическому доказательству этого закона. В литературе известен ряд попыток термодинамического доказательства невозможности энергетического выхода $\rho > 1$, однако ни одну из них нельзя считать удовлетворительной.

Иногда считают (см., например, [2]), что существование процесса, единственным результатом которого является получение квантов большой энергии за счет квантов малой энергии, противоречит термодинамике. Однако это не так.

¹ Публикуется по: Доклады Академии наук СССР. – 1955. – Т. 105, № 1. – С. 50–53.

Цитированная литература

1. С. И. Вавилов, Собр. соч., 2, М., 1952.
2. В. Л. Левшин, Фотолюминесценция твердых и жидких веществ, М., 1951, стр. 156.
3. Л. Д. Ландау, J. of Phys., 10, 503 (1946).
4. Э. И. Адирович, Некоторые вопросы теории люминесценции кристаллов, М., 1951, стр. 24.
5. P. Pringsheim, J. of Phys., 10, 495 (1946).
6. М. Н. Аленцев, В. В. Антонов-Романовский, Б. И. Степанов, М. В. Фок. ЖЭТФ, 28, 253 (1955).
7. Б. И. Степанов, ДАН, 99, 971 (1954).

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ФОТОЭФФЕКТ¹

Б. И. Степанов

1. Понятие отрицательной люминесценции введено недавно в работе Антонова-Романовского, Степанова, Фока и Хапалюка [1] в результате расчета квантового выхода системы частиц с тремя уровнями энергии. Несколько более подробное исследование вопроса проведено в работах [2–4]. В настоящее время выясняется, что отрицательная люминесценция представляет собой широко распространенное, хотя и мало заметное явление. Она возникает при любом нарушении равновесного распределения по уровням энергии, вызванном внешним воздействием.

Рассмотрим оптические переходы между двумя уровнями энергии $i \rightleftharpoons j$. Пусть $E_j > E_i$. Полное число квантов, испущенных при переходах $i \rightarrow j$, равно

$$(A_{ji} + B_{ji}u)n_j, \quad (1)$$

где A_{ji} – вероятность спонтанного испускания, $B_{ji}u$ – вероятность испускания, вынужденного окружающим тепловым

¹ Публикуется по: Оптика и спектроскопия. – 1956. – Т. 1, вып. 2. – С. 125–130.

излучением u , а n_j – число частиц с энергией E_j . Согласно определению Вавилова [5, 6], люминесценцией называется не все испускание системы, а только избыток над тепловым испусканием, обладающий длительностью. Чтобы вычислить число квантов, относящихся к люминесценции, необходимо вычесть из (1) число квантов, служащих для компенсации квантов теплового излучения, поглощаемых при переходах $i \rightarrow j$. Число последних равно

$$B_{ji}un_i. \quad (2)$$

Таким образом, выражение для мощности люминесценции имеет вид

$$W_{\text{люм.}}(v_{ji}) = [(A_{ji} + B_{ji}u)n_j - B_{ij}un_i]hv_{ji}. \quad (3)$$

Указанный метод вычисления мощности люминесценции предложен в работах [7, 8]. Если воспользоваться соотношением между коэффициентами Эйнштейна

$$\frac{A_{ji}}{B_{ji}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}; \quad \frac{B_{ji}}{B_{ij}} = \frac{g_i}{g_j} \quad (4)$$

и явным выражением для плотности равновесного излучения u , то вместо (3) получим

$$W_{\text{люм.}}(v_{ji}) = \left(n_j - \frac{g_j}{g_i} n_i e^{-\frac{hv_{ji}}{kT}} \right) \frac{hv_{ji} A_{ji}}{1 - e^{-\frac{hv_{ji}}{kT}}}. \quad (5)$$

Если система находится в термодинамическом равновесии, то

$$\frac{n_j}{n_i} = \frac{g_j}{g_i} e^{-\frac{E_j - E_i}{kT}} = \frac{g_j}{g_i} e^{-\frac{hv_{ji}}{kT}}, \quad (6)$$

и, следовательно, мощность люминесценции (5) равна нулю. В этом случае система обладает только тепловым испусканием, которое полностью компенсируется соответствующим поглощением. Если же термодинамическое равновесие по тем или иным причинам нарушается, то возникает нерав-

новесный процесс люминесценции. Этот процесс может протекать в двух направлениях в зависимости от характера нарушения равновесия. Если

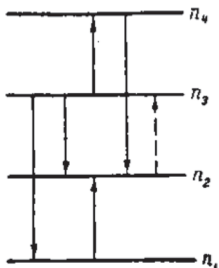
$$\frac{n_j}{n_i} > \frac{g_j}{g_i} e^{-\frac{h\nu_{ji}}{kT}}, \quad (7)$$

то мощность люминесценции больше нуля и, следовательно, мощность испускания (1) превышает мощность поглощения теплового излучения.

В данном случае реализуется обычный хорошо изученный вид люминесценции. Если же

$$\frac{n_j}{n_i} < \frac{g_j}{g_i} e^{-\frac{h\nu_{ji}}{kT}}, \quad (8)$$

то мощность люминесценции меньше нуля, т. е. число частиц n_j на более высоком уровне не уменьшается, как при обычной положительной люминесценции, а увеличивается. На рисунке мы приводим для примера направления люминесценции для всех возможных переходов в системе четырех уровней, если $n_3 > n_3^{\text{равн.}}$, $n_2 < n_2^{\text{равн.}}$, а $n_1 \approx n_1^{\text{равн.}}$ и $n_4 \approx n_4^{\text{равн.}}$. Такое распределение по уровням энергии может осуществляться иногда при возбуждении частотой ν_{32} . Стрелками, направленными вниз, обозначена положительная люминесценция, стрелками, направленными вверх, – отрицательная люминесценция. Штриховой стрелкой указан способ возбуждения. Чтобы узнать направление люминесценции для любой пары уровней, достаточно определить направление, способствующее приближению к равновесию.



Интенсивность люминесценции, согласно (5), определяется степенью отклонения от равновесного распределения т. е. величинами

$$\Delta n_j = n_j - n_j^{\text{равн.}}; \quad \Delta n_i = n_j - n_j^{\text{равн.}}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (5), получим

$$W_{\text{люм.}}(v_{ji}) = \left(\Delta n_j - \frac{g_j}{g_i} \Delta n_i e^{-\frac{hv_{ji}}{kT}} \right) \frac{hv_{ji} A_{ji}}{1 - e^{-\frac{hv_{ji}}{kT}}}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что изменение населенности уровней j и i по-разному влияет на мощность люминесценции. Пусть, например, в процессе возбуждения происходит изменение населенности более высокого уровня на величину $\Delta n_j = a$, а Δn_i сохраняется равным нулю. Тогда мощность положительной люминесценции равна

$$a \frac{hv_{ji} A_{ji}}{1 - e^{-\frac{hv_{ji}}{kT}}}.$$

Пусть теперь происходит обратное изменение населенности уровней энергии $\Delta n_i = a$; $\Delta n_j = 0$. При этом возникает отрицательная люминесценция, мощность которой в

$$\frac{g_j}{g_i} e^{-\frac{hv_{ji}}{kT}}$$

раз меньше. Именно поэтому отрицательную люминесценцию труднее наблюдать на опыте.

Отрицательная люминесценция так же, как и положительная, обладает конечной длительностью. Длительность люминесценции определяется скоростью восстановления нарушенного равновесия, т. е. вероятностями всех оптических и неоптических переходов между всеми парами уровней.

2. Приемники лучистой энергии, воспринимающие очень малые потоки, работают в весьма своеобразных условиях, которые подлежат специальному исследованию. Здесь будет дана лишь общая постановка вопроса применительно к фотоэлементам с внешним фотоэффектом.

Рассмотрим какую-либо замкнутую полость с температурой стенок T . Внутри полости помещен фотослой. Пусть вся система находится в полном термодинамическом равно-

весии. В этом случае все процессы, происходящие в системе, полностью компенсируются обратными процессами. Так, например, вылет наиболее «горячих» электронов из металла (термоэлектронная эмиссия) компенсируется переходом электронов из электронного газа, образовавшегося в полости, внутрь металла. В первом случае электроны преодолевают потенциальный барьер и уменьшают свою энергию на величину работы выхода A , во втором увеличивают ее. Кроме термоэлектронной эмиссии, в условиях равновесия осуществляется и фотоэлектронная эмиссия. Вокруг фотослоя имеется обычное равновесное излучение, соответствующее температуре T . Падая на поверхность фотослоя, кванты света с энергией $h\nu > A$ вырывают электроны. Этот процесс также компенсируется противоположным процессом; наряду с вырыванием электронов под действием квантов света неизбежно происходит образование световых квантов при переходе электронов из электронного газа внутрь металла. Энергия таких фотонов равна

$$h\nu = A + \left(\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} \right),$$

где v_2 и v_1 – скорости электрона до и после проникновения внутрь металла.

Одновременно с чистой термоэлектронной и чистой фотоэлектронной эмиссией происходят, с небольшой вероятностью, и смешанные процессы. Кванты света с энергией $h\nu < A$, поглощаемые металлом, могут вызвать вырывание электронов из металла, если электроны внутри металла обладали заметной скоростью. В условиях равновесия эти процессы также компенсируются встречными процессами.

Пусть теперь под влиянием внешнего воздействия произойдет нарушение равновесия. В результате этого возникнут процессы, стремящиеся вернуть систему в положение равновесия. Направление процессов зависит от направления отклонения от равновесия. Пусть, например, в системе создается избыток световых квантов с энергией $h\nu > A$ (по

сравнению с числом квантов при равновесии). Это приведет к увеличению числа актов поглощения света металлом, сопровождающихся вырыванием электронов. В то же время число встречных процессов сохранит вначале свое старое значение и, следовательно, будет происходить нарастание числа электронов в полости, окружающей фотослой. Описанное явление представляет собой обычный фотоэффект, наблюдаемый при падении радиации на фотоэлемент.

Обратные процессы возникнут, если в полости создается недостаток фотонов (по сравнению с равновесием). Этот случай можно реализовать при воздействии на фотослой отрицательной люминесценции, а также при снижении температуры радиации, но сохранении температуры фотослоя и плотности электронного газа.

В этом случае число фотоэлектронов, вырывающихся из металла, будет меньше числа электронов, поглощаемых металлом, а число исчезающих фотонов меньше числа возникающих фотонов, т. е. в полости, окружающей фотослой, будет происходить уменьшение числа электронов и увеличение числа световых квантов. Это явление целесообразно назвать отрицательным фотоэффектом¹. Положительным фотоэффектом следует назвать, по аналогии с определением люминесценции Вавилова, образование избытка фотоэлектронов по сравнению с числом фотоэлектронов при равновесии.

Если к фотокатоду и аноду обычного фотоэлемента подведена разность потенциалов, то при тепловом равновесии возникает некоторый темновой ток. Одной из причин темнового тока является, несомненно, вырывание фотоэлектронов фотонами обычного равновесного излучения. При положительном фотоэффекте возникает фототок, превыша-

¹ При данной постановке опыта оно проявляется одновременно с простым тепловым испусканием охлаждающегося фотослоя, но отнюдь не сводится к нему. Точно так же обычный фотоэффект всегда сопровождается некоторым нагреванием фотослоя и увеличением термоэлектронной эмиссии.

ющий темновой ток. Отрицательный фотоэффект должен проявляться в уменьшении темнового тока.

Аналогичное, но более заметное явление можно наблюдать, по-видимому, если нарушить равновесие, существующее вокруг фотослоя, путем образования избытка электронов за счет внешнего источника электронов. В этом случае в результате поглощения электронов металлом также будет происходить образование световых квантов, т. е. появится избыток над равновесным. Энергия образовавшихся фотонов близка к работе выхода, а интенсивность свечения зависит от количества электронов в падающем пучке (чтобы не происходило нагревание фотослоя, скорости электронов должны быть очень малы)¹.

Используя условия равновесия, можно получить некоторые соотношения между вероятностью вырывания электрона под действием одного фотона и вероятностью образования одного фотона при падении на фотослой одного электрона². Пусть на площадку фотослоя dS падает поток фотонов

$$dN = \rho_v c \cos(\bar{k}, \bar{n}) dv dS. \quad (11)$$

Здесь $\rho_v dv$ – число фотонов в единице объема падающего пучка; c – скорость света; \bar{k} – волновой вектор, а \bar{n} – нормаль к площадке. Тогда число электронов, выброшенных из металла за время dt , равно

$$dN = c \rho_v \cos(\bar{k}, \bar{n}) f_{vE} dt dv dS, \quad (12)$$

¹ Рассматриваемое явление не следует отождествлять с обычной катодолюминесценцией. В этом последнем случае свечение возникает в результате сочетания двух процессов: возбуждения системы за счет энергии электронного пучка и последующего перехода системы в нижнее состояние. В нашем случае процесс возбуждения полностью отсутствует и свечение носит характер рекомбинационной люминесценции. Именно поэтому скорости электронов падающего пучка могут быть малыми. Рассматриваемый процесс можно назвать обратным фотоэффектом.

² При расчете мы не учитываем различия фотоэлектрического действия при падении света под разными углами.

где $f_{\nu E}$ – вероятность получения фотоэлектрона с энергией E под действием одного кванта с частотой ν (в расчете на 1 сек). Формулы (11) и (12) справедливы и в том случае, если внешняя радиация отсутствует, а поток фотонов создается за счет равновесного излучения в полости вокруг фотослоя. В этом частном случае

$$\rho_{\nu}^{\text{равн.}} d\Omega = \frac{1}{hv} \frac{2hv^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} d\Omega \simeq \frac{2\nu^2}{c^3} e^{-\frac{hv}{kT}} d\Omega, \quad (13)$$

и, следовательно,

$$\begin{aligned} dn^{\text{равн.}} &= \int_{\Omega} c \cos(\overline{kn}) \rho_{\nu}^{\text{равн.}} f_{\nu E} d\nu dS dt d\Omega = \\ &= \frac{2\nu^2 \pi}{c^2} e^{-\frac{hv}{kT}} f_{\nu E} d\nu dS dt \pi. \end{aligned} \quad (14)$$

Пусть теперь на площадку dS падает поток электронов

$$dL = \nu \cos(\overline{vn}) L_E dE dS. \quad (15)$$

Здесь $v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$ – скорость электронов, а $L_E dE$ – число электронов с энергией E в единице объема. Число актов поглощения электронов, сопряженных с возникновением фотонов с частотой ν , равно

$$dl = \nu \cos(\overline{v}, \overline{n}) L_E F_{E\nu} dE dS dt, \quad (16)$$

где $F_{E\nu}$ – вероятность образования одного кванта с частотой ν за счет одного электрона, падающего на металл с энергией E . Если имеется полное термодинамическое равновесие, то поток электронов на поверхности металла создается за счет электронного газа, находящегося в полости, окружающей фотослой. Считая приближенно, что распределение электронов по энергиям задается обычной формулой Максвелла

$$L_E^{\text{равн.}} d\Omega = L_0 \frac{2}{4\pi\sqrt{\pi}(kT)} \sqrt{E} e^{-\frac{K}{kT}} d\Omega \quad (17)$$

(L_0 – плотность электродного газа), получим

$$dl^{\text{равн.}} = \int_{\Omega} v \cos(\bar{v} \bar{n}) L_E^{\text{равн.}} F_{Ev} dEdSdt\Omega =$$

$$L_0 \frac{1}{\pi\sqrt{2\pi m}(kT)^3} E e^{-\frac{E}{kT}} F_{Ev} dEdSdt\pi. \quad (18)$$

При полном термодинамическом равновесии соблюдается принцип детального равновесия, и поэтому $dl^{\text{равн.}} = dn^{\text{равн.}}$ при любых значениях v и E . Приравнявая (14) и (18), имеем

$$\frac{2v^2}{c^2} e^{-\frac{hv}{kT}} f_{vE} dv = \frac{1}{\pi\sqrt{2\pi m}(kT)^3} EL_0 e^{-\frac{E}{kT}} F_{Ev} dE. \quad (19)$$

Частота света и энергия электрона связаны между собой соотношением Эйнштейна

$$hv = A + E; \quad h\Delta v = dE. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (19), получим

$$\frac{2v^2}{c^2} e^{-\frac{A}{kT}} f_{vE} = \frac{1}{\pi\sqrt{2\pi m}(kT)^3} EL_0 F_{Ev}. \quad (21)$$

Формула (21) связывает четыре постоянные – A , L_0 , f_{vE} и F_{Ev} . Зная из опыта первые три, можно вычислить F_{Ev} – вероятность возникновения фотона при падении на металл одного электрона. Необходимо отметить, что формула (21) весьма приближенна; при выводе мы не учли, например, что электроны внутри металла имеют значительные энергии, в результате чего возникает термоэлектронная и смешанная фототермоэлектронная эмиссия. В частности, плотность электронного газа вокруг металла зависит не только от фотоэлектрических, но и от термоэлектрических процессов и связана с работой выхода и температурой.

Некоторые дополнительные сведения можно получить, если использовать соотношения

$$\frac{dn}{dn^{\text{равн.}}} = \frac{\rho_v \cos(\bar{k} \bar{n})}{\rho_v^{\text{равн.}} \pi}, \quad \frac{dl}{dl^{\text{равн.}}} = \frac{L_E \cos(\bar{v} \bar{n})}{L_E^{\text{равн.}} \pi}. \quad (22)$$

Так как $dn^{\text{равн.}} = dl^{\text{равн.}}$, то

$$\frac{dl}{dn} = \frac{L_E \cos(\bar{v} \bar{n})}{L_E^{\text{равн.}}} \cdot \frac{\rho_v^{\text{равн.}}}{\rho_v \cos(\bar{k} \bar{n})}. \quad (23)$$

Формула (23) позволяет оценить интенсивность процесса выделения фотонов при падении электронов на поверхность металла. Допустим, что при некоторой плотности падающей радиации ρ_v мы получаем достаточно заметное число фотоэлектронов dn . Точно такое же число выделяющихся фотонов можно получить, если плотность электронов в падающем пучке будет равна

$$L_E = \frac{\rho_v}{\rho_v^{\text{равн.}}} L_E^{\text{равн.}} \frac{\cos(\bar{k} \bar{n})}{\cos(\bar{v} \bar{n})},$$

т. е. примерно в $\frac{\rho_v}{\rho_v^{\text{равн.}}}$ раз больше плотности электронного газа, соответствующей данной температуре фотослоя. Поток фотонов, возникающий в этом случае, будет достаточно велик и может быть легко обнаружен.

Дальнейшее исследование описанных явлений следует проводить прежде всего экспериментально. Это позволит выяснить значения исходных параметров (прежде всего $F_{E\nu}$) и позволит построить более правильную теорию работы фотоэлектрических (и других) приемников лучистой энергии и лучше использовать их возможности.

Литература

1. В. В. Антонов-Романовский, Б. И. Степанов, М. В. Фоки и А. П. Хапалюк. ДАН СССР, **105**, 50, 1955.
2. Б. И. Степанов. Труды Инст. физ. АН БССР, вып. 1, 1956.
3. Б. И. Степанов. УФН, 58, 1, 1956.

СОДЕРЖАНИЕ

ВОСПОМИНАНИЯ УЧЕНИКОВ И СОВРЕМЕННИКОВ

| | |
|---|-----|
| Академик Борис Иванович Степанов (<i>Апанасевич П. А., Рубинов А. Н., Бураков В. С., Килин С. Я.</i>)..... | 4 |
| Жизненный и творческий путь Бориса Ивановича Степанова (<i>Апанасевич П. А.</i>)..... | 11 |
| Векопомные годы (<i>Бураков В. С.</i>)..... | 25 |
| Степановские принципы стимулирования творческой активности (<i>Валявко В. В.</i>)..... | 48 |
| Мой главный учитель (<i>Рубинов А. Н.</i>)..... | 54 |
| Счастье иметь такого учителя (<i>Рубанов А. С.</i>)..... | 63 |
| Степановские принципы успеха (<i>Грибковский В. П.</i>)..... | 70 |
| Первые работы Б. И. Степанова и его учеников в Институте физики по рассеянию света (<i>Иванов А. П.</i>)..... | 74 |
| Учитель и человек (<i>Жбанков Р. Г.</i>)..... | 80 |
| Оптика не только в Минске (<i>Гончаренко А. М.</i>)..... | 88 |
| Масштаб личности Б. И. Степанова: историко-методологический ракурс (<i>Томильчик Л. М.</i>)..... | 91 |
| Времена не выбирают (<i>Орлов Л. Н.</i>)..... | 100 |
| Крупный ученый, внимательный человек (<i>Соловьев К. Н.</i>)..... | 106 |
| Личность и учитель (<i>Зега Э. П.</i>)..... | 109 |
| Несколько штрихов к портрету (<i>Умрейко Д. С.</i>)..... | 113 |
| Ученый и педагог, достойный подражания (<i>Воропай Е. С., Толстик А. Л.</i>)..... | 116 |
| Воспоминания о Б. И. Степанове (<i>Зяцьков И. П., Казаченко Л. П.</i>)... | 124 |
| Борис Иванович Степанов и лазеры в Институте кристаллографии РАН (<i>Севастьянов Б. К.</i>)..... | 129 |
| Борис Иванович Степанов – штрихи к портрету (<i>Грибов Л. А.</i>)..... | 136 |
| Воспоминания об академике Б. И. Степанове (<i>Сухоруков А. Н.</i>)..... | 146 |
| Уроки Бориса Ивановича (<i>Килин С. Я.</i>)..... | 148 |
| Страсть к познанию, гражданственность во всем (<i>Бобович Я. С.</i>).... | 155 |

ИЗБРАННЫЕ СТАТЬИ Б. И. СТЕПАНОВА

| | |
|---|-----|
| О статьях Б. И. Степанова, включенных в настоящий сборник (<i>Апанасевич П. А., Килин С. Я.</i>)..... | 164 |
| Список публикуемых статей..... | 168 |
| Тонкое строение метастабильных уровней азота (<i>Степанов Б.</i>).... | 170 |

| | |
|--|-----|
| Теория колебательных спектров многоатомных молекул (<i>Волькенштейн М., Ельяшевич М., Степанов Б.</i>) | 172 |
| Закономерности в спектрах молекул, образующих водородную связь (<i>Степанов Б. И.</i>) | 186 |
| Выход люминесценции системы с тремя уровнями энергии (<i>Антонов-Романовский В. В., Степанов Б. И., Фок М. В., Хапалюк А. П.</i>).... | 189 |
| Отрицательная люминесценция и отрицательный фотоэффект (<i>Степанов Б. И.</i>) | 196 |
| Универсальное соотношение между спектрами поглощения и люминесценции сложных молекул (<i>Степанов Б. И.</i>) | 206 |
| Классификация вторичного свечения (<i>Степанов Б. И., Апанасевич П. А.</i>) | 211 |
| Нелинейные оптические явления в системе частиц с тремя уровнями энергии (<i>Степанов Б. И., Грибковский В. П.</i>) | 228 |
| Накопление и расход радиации внутри плоскопараллельного слоя (<i>Степанов Б. И.</i>) | 236 |
| Аптычныя ўласцівасці квантавых генератараў і ўзмацняльнікаў (<i>Сцяпанав Б. І.</i>) | 242 |
| Вынужденное комбинационное рассеяние внутри резонатора первичного ОКГ (<i>Степанов Б. И., Апанасевич П. А.</i>) | 256 |
| Оптическая генерация в растворах сложных молекул (<i>Степанов Б. И., Рубинов А. Н., Мостовников В. А.</i>) | 268 |
| О регистрации плоских и объемных динамических голограмм в просветляющихся веществах (<i>Степанов Б. И., Ивакин Е. В., Рубанов А. С.</i>) | 273 |
| «Оптика» Ньютона (<i>Степанов Б. И.</i>) | 277 |

Научно-популярное издание

АКАДЕМИК Б. И. СТЕПАНОВ

**Воспоминания учеников
и современников, избранные статьи**

Составители:

Ходан Валентина Борисовна
Гапоненко Ольга Анатольевна

Редактор *О. Н. Пручковская*
Художественный редактор *Т. Д. Царева*
Технический редактор *О. А. Толстая*
Компьютерная верстка *Л. И. Кудерко*

Подписано в печать 19.04.2013. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,64 + 0,74 вкл. Уч.-изд. л. 14,0.
Тираж 120 экз. Заказ 90.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом
«Беларуская навука». ЛИ № 02330/0494405 от 27.03.2009.
Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск.