

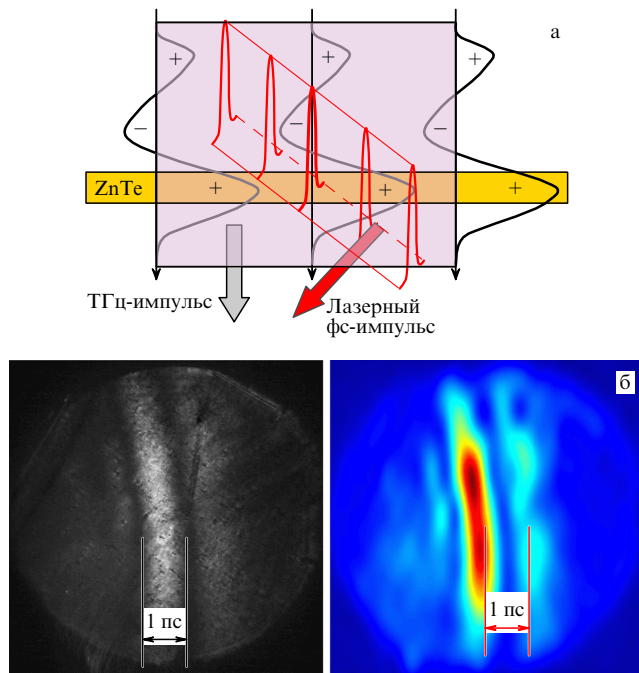


Рис. 6. (а) Принципиальная схема метода пространственной визуализации ТГц-поля. (б) Зарегистрированные временные профили одиночных ТГц-импульсов.

Для измерения амплитудно-временного профиля ультракоротких (~ 1 пс) одиночных (частота следования ~ 1 Гц) ТГц-импульсов был выбран и реализован метод пространственной визуализации ТГц-поля, основанный на электрооптической регистрации "изображения" одиночного ТГц-импульса стробирующим одиночным фемтосекундным лазерным импульсом в результате наводимой ТГц-полем оптической анизотропии в электрооптическом кристалле ZnTe [11].

Принципиальная схема метода и результаты измерения временного профиля пикосекундного ТГц-импульса приведены на рис. 6.

5. Заключение

В лабораториях ИОФ РАН им. А.М. Прохорова созданы лазерные источники импульсного терагерцевого излучения ультракороткой длительности, позволяющие получать рекордно высокую напряжённость электрического поля — более 10^6 В см $^{-1}$. Достигнутые значения напряжённости терагерцевого поля мегавольтного уровня открывают широкие перспективы для нового направления физики — нелинейной оптики терагерцевых волн, которая начинает активно развиваться в последнее время именно благодаря появлению новых компактных лазерных источников высокоинтенсивных терагерцевых импульсов. Среди задач решаемых методами нелинейной ТГц-оптики можно выделить, в частности, нелинейные процессы плазмообразования — ионизацию веществ и "оптический" пробой материальных сред; процессы генерации высших гармоник токов и излучения; ускорение заряженных частиц высокоинтенсивным ТГц-полем; модуляционные и параметрические неустойчивости плазмы в поле терагерцевого излучения и самофокусировку терагерцевых импульсов.

Метод оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивно-

сти в нелинейных кристаллах в принципе позволяет генерировать одноперiodные пикосекундные ТГц-импульсы с ещё большей энергией (более 100 мкДж) и амплитудой напряжённости поля вплоть до 10^9 В см $^{-1}$. Такие импульсы можно получать на уже существующих лазерных установках мультитераваттного уровня, в частности на установке "Луч" в Институте лазерно-физических исследований Российского федерального ядерного центра "Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" (г. Саров).

В заключение авторы выражают глубокую благодарность своим коллегам, принявшим активное участие в проведённых исследованиях: А.Г. Степанову (Институт спектроскопии РАН), внёсшему значительный вклад на начальном этапе работы, сотрудникам ИОФ РАН В.В. Букину, А.А. Сироткину, А.И. Ритусу и А.И. Загуменному, а также Российскому фонду фундаментальных исследований, Президиуму РАН и Отделению физических наук РАН за материальную поддержку выполненных работ.

Список литературы

1. Zhang X-C, Xu J *Introduction to THz Wave Photonics* (New York: Springer, 2009)
2. Auston D H, Cheung K P, Smith P R *Appl. Phys. Lett.* **45** 284 (1984)
3. Bass M et al. *Phys. Rev. Lett.* **9** 446 (1962)
4. Власов В И и др. *Квантовая электроника* **37** 938 (2007) [Vlasov V I et al. *Quantum Electron.* **37** 938 (2007)]
5. Sirotkin A A et al. *Laser Phys.* **19** 1083 (2009)
6. Hebling J et al. *Opt. Express* **10** 1161 (2002)
7. Yeh K-L et al. *Appl. Phys. Lett.* **90** 171121 (2007)
8. Гинзбург В Л *УФН* **69** 537 (1959) [Ginzburg V L *Sov. Phys. Usp.* **2** 874 (1960)]
9. Stepanov A G, Hebling J, Kuhl J *Appl. Phys. B* **81** 23 (2005)
10. Хазанов Е А, Сергеев А М *УФН* **178** 1006 (2008) [Khazanov E A, Sergeev A M *Phys. Usp.* **51** 969 (2008)]
11. Shan J et al. *Opt. Lett.* **25** 426 (2000)

PACS numbers: **01.65. + g**, 42.55.Px, **42.60. - v**
DOI: 10.3367/UFNr.0180.2011011.0102

История создания инжекционного лазера

Ю.М. Попов

Одним из ярких достижений мировой науки, оказавших большое влияние на технический уровень современного общества, является генерация оптического излучения с использованием полупроводниковых материалов. Идеи и первые работы в этом направлении возникли в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), где созданная по инициативе Н.Г. Басова группа молодых учёных начиная с 1957 г. работала над проблемой создания полупроводникового лазера. Эти работы носили пионерский характер не только в нашей стране, но и в мире, наряду с работами Ч. Таунса и А. Шавлова в США.

Хотя молекулярные генераторы работали на газах, но уже парамагнитные усилители вынужденного излу-

Ю.М. Попов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ. E-mail: ympop@sci.lebedev.ru

ния использовали кристаллы, что подтверждало возможность получения инверсной заселённости в твёрдых средах. Полупроводники в качестве активной среды привлекли нас высокими значениями коэффициентов поглощения (усиления). Это открывало возможности создания резонаторов малых размеров. В ФИАНе исследованием свойств полупроводников в сильных электрических полях занимались в лаборатории физики полупроводников, руководимой Б.М. Вулом. С обсуждением возможной реализации идеи о получении необходимой для усиления света инверсной заселённости в полупроводниках Н.Г. Басов с сотрудниками обратился к Б.М. Вулу и его коллегам. В качестве первого шага Н.Г. Басов, Б.М. Вул и Ю.М. Попов послали авторскую заявку (1958 г.) и опубликовали статью об использовании коротких импульсов тока для лавинного размножения носителей тока из валентной зоны (или с примесей), образующих при мгновенном снятии поля после охлаждения решёткой инверсную заселённость [1]. Работа зарегистрирована Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР с приоритетом 7 июля 1958 г. Об этой работе Н.Г. Басов рассказывал на I Конференции по квантовой электронике в США (1959 г.).

Так как для межзонного лавинного размножения в германии и кремнии требовались высокие напряжённости поля, а оптические межзонные переходы были прямыми, в экспериментальном плане было решено работать над ионизацией примесей в этих материалах, а для межзонной ионизации использовать полупроводники с узкими запрещёнными зонами и прямыми оптическими переходами. В то время таким наиболее исследованным полупроводником был антимонид индия, который выращивался в Ленинградском физико-техническом институте (ЛФТИ) в лаборатории Д.Н. Наследова, с которой установились дружественные контакты. Группа в лаборатории физики полупроводников ФИАН занималась наблюдением свечения при рекомбинации электронов, ионизованных с мелких примесей в германии, группа в лаборатории колебаний — наблюдением излучения при лавинном размножении в антимониде индия. Однако в этих исследованиях, хотя и были получены интересные научные результаты, признаков вынужденного излучения не наблюдалось. Основные трудности были связаны с необходимостью получения импульсов тока с очень короткими фронтами и сложностью работы в инфракрасном диапазоне. Позднее, уже после создания полупроводниковых лазеров другими методами, удалось реализовать инверсную заселённость между уровнями донорных примесей в кремнии при использовании излучения лазера на углекислом газе.

В 1960 г. мы опубликовали в *УФН* большую статью, содержащую как обзор основных методов и сред для создания лазеров, так и целый ряд оригинальных идей об использовании полупроводников для этих целей [2]. В частности, инверсная заселённость формулировалась в виде условия для неравновесных функций распределения в зонах, а резонатор предлагалось создать за счёт параллельности выходных граней, обладающих у полупроводников достаточным отражением для обратной связи. В начале 1961 г. нами был предложен метод создания инверсной заселённости в полупроводниках быстрыми электронами, а в марте была выдвинута идея и сформулированы основные условия получения инверсной заселённости при инжекции неравновесных носите-

лей тока через р–п-переход вырожденных полупроводников [3]. В результате в начале 1960-х годов основа теории лазеров на полупроводниках была разработана. Подробно остановимся на статье [3], в которой впервые в мире указывалась и обосновывалась возможность создания инжекционного (диодного) полупроводникового лазера (поступила в редакцию *ЖЭТФ* 18 апреля 1961 г., опубликована в июне 1961 г.). Основные положения статьи [3] следующие.

1. При приложении к р–п-переходу в полупроводнике напряжения в прямом направлении, вследствие уменьшения потенциального барьера, образованного пространственным зарядом в р–п-переходе, вблизи него возрастает концентрация неосновных носителей тока. Максимальная концентрация этих носителей соответствует полному снятию потенциального барьера внешним полем и по порядку величины равна их концентрации в той части кристалла, где они являются основными (мы считаем р–п-переход резким). Отрицательная температура в междупереходах возникает только тогда, когда квазиуровни Ферми, соответствующие неравновесным концентрациям электронов и дырок, удовлетворяют следующему условию:

$$F_e + F_p > \Delta, \quad (1)$$

где F_e и F_p — квазиуровни Ферми для электронов и дырок, Δ — ширина запрещённой зоны. При приложении к р–п-переходу напряжения в прямом направлении квазиуровень Ферми неосновных носителей вблизи перехода будет близок к уровню Ферми той части кристалла, в которой эти носители являются основными. В этом случае из условия (1) следует, что по крайней мере в одной части р–п-перехода носители должны быть вырождены. Полупроводники с такими р–п-переходами являются туннельными диодами, однако рассматриваемый механизм возникновения состояний с отрицательной температурой соответствует не туннельной, а диффузионной части вольт-амперной характеристики туннельного диода. В р–п-переходах сильно вырожденных полупроводников состояние с отрицательной температурой возникает раньше, чем происходит полное снятие потенциального барьера, что даёт возможность использовать для получения количественных оценок диффузионную теорию тока через р–п-переход.

2. Как легко показать, минимальное значение внешнего напряжения U , при котором возникает состояние с отрицательной температурой, выражается как

$$U_{\min} = \frac{\Delta}{e}, \quad (2)$$

где e — заряд электрона. Плотность тока I (например, электронная компонента) по порядку величины равна

$$I = \frac{enL}{t}, \quad (3)$$

где t — время жизни, L — диффузионная длина, n — вырожденная концентрация электронов.

3. Анализ формулы (3) показывает, что плотность тока уменьшается с понижением температуры образца. Это обстоятельство даёт возможность получать состояние с отрицательной температурой в стационарном режиме. Однако отрицательный коэффициент поглощения, вследствие наличия различных механизмов абсорбции излучения в полупроводнике, возникает при сравни-

тельно больших (10^{15} см^{-3}) неравновесных концентрациях неосновных носителей, что делает невозможным работу при очень малых значениях плотности тока. Пространственная область, в которой возникает состояние с отрицательной температурой, образуется в слое вблизи р–п-перехода с толщиной порядка диффузионной длины.

4. Высокие плотности основных носителей тока в вырожденных полупроводниках, окружающих область с отрицательной температурой, по-видимому, могут быть использованы в качестве отражающих излучение поверхностей, т.е. служить "резонатором".

5. Заметим, что снижение плотности тока может быть достигнуто в случае, когда полупроводники, образующие р–п-переход, имеют различную ширину запрещенной зоны.

Таким образом, в статье [3] были приведены основные условия создания инжекционного лазера и намечены пути его совершенствования:

- дано условие на расстояние между квазиуровнями Ферми (формула (1)). Это условие позднее было уточнено заменой в формуле (1) Δ величиной $h\nu$ в статье М. Бернара и Ж. Дюрафо [4], вышедшей в конце 1961 г.;
- к условию $U_{\min} = \Delta/e$ (формула (2)) сделано замечание, что в случае непрямых переходов при низких температурах образца в формуле (2) Δ следует заменить величиной $\Delta - e$, где e — энергия излучаемого фотона. То есть в условии (2) мы рассматриваем прямые межзонные переходы;
- выражена надежда на возможность непрерывной генерации;
- указано, что волноводные свойства активной области могут уменьшить дифракционные потери и снизить пороговый ток;
- указано на снижение порогового тока за счёт различной ширины зон, образующих р–п-переход.

В более ранней статье [2] нами предлагалось создать резонатор за счёт параллельности выходных граней, обладающих у полупроводников достаточным отражением для обратной связи.

Осуществлённая в 1970 г. Ж.И. Алфёровым с сотрудниками структура с двумя гетеропереходами сократила ширину активной области (формула (3)) и усилила волноводный эффект, что сделало возможным получить непрерывную генерацию при комнатной температуре [5]. Даже нам самим идея создания лазера при работе диода в прямом направлении казалась чрезвычайно необычной и в то же время какой-то очень простой. Интересно, что при обсуждении доклада об этой работе на семинаре были даже высказаны сомнения в непротиворечивости данной идеи второму началу термодинамики. Б.М. Вул предложил нам не публиковать работу до получения экспериментальных результатов. Но мы всё же опубликовали наше предложение в июньском номере *ЖЭТФ* за 1961 г., хотя экспериментальные работы в этом направлении нами также были начаты.

Идею создания лазера на р–п-переходе мы докладывали во многих местах в течение 1961 и 1962 гг. Находясь с октября 1961 г. по март 1962 г. в командировке в США, я выступал на семинаре в Гарвардском университете, где мне задавал вопросы относительно селекции типов колебаний Н. Бломберген, и рассказал идею инжекционного лазера Б. Лэксу. В январе 1962 г. после доклада в Колумбийском университете я имел продолжительную

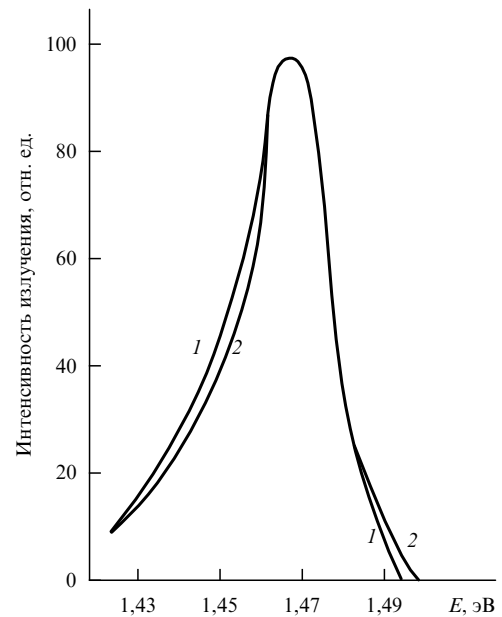


Рис. 1. Спектральное распределение собственного рекомбинационного излучения арсенида галлия при температуре 77 К: 1 — спектр при малых плотностях тока (10 А см^{-2}), 2 — спектр при больших плотностях тока ($1,5 \times 10^3 \text{ А см}^{-2}$).

дискуссию с учёными из ИВМ П. Сорокиным и М. Натаном, который в конце 1962 г. одним из первых получил вынужденное излучение из р–п-перехода арсенида галлия. Позднее в обзорной статье 1964 г. [6] Г. Барнс и М. Натан сослались на наши работы как на приоритетные по предложению использовать полупроводники для генерации света, а на работу [3] — как на первое в мире предложение о создании инжекционного лазера.

В октябре 1961 г. после доклада на конференции в Ташкенте О.Н. Крохин обсудил с учёными ЛФТИ постановку ими эксперимента на имеющемся у них диоде из арсенида галлия. Они осуществили эксперимент в январе 1962 г. В апрельском номере *ФТТ* за 1962 г. [7] Д.Н. Наследов, А.А. Рогачев, С.М. Рывкин, Б.В. Царенков сообщили о наблюдении сужения линии спонтанного излучения при увеличении тока накачки. Как показано на рис. 1, взятом из работы [7], кривая 1 соответствует плотности тока 10 А см^{-2} , а кривая 2 — $1,5 \times 10^3 \text{ А см}^{-2}$ (кривые получены при температуре 77 К). Далее авторы приводят следующие возможные объяснения полученному ими результату:

а) наблюдаемое на опыте сужение спектральной линии собственного излучения может происходить по двум причинам. Во-первых, при больших плотностях тока в р–п-переходе может возникнуть обратное заполнение зон, при котором нижние состояния зоны проводимости заполнены с большей вероятностью, чем верхние состояния валентной зоны, — так называемое состояние с "отрицательной температурой". Возможность получения такого распределения носителей в р–п-переходе обсуждалась в работе [3];

б) возможен, однако, и другой, не связанный с индуцированной рекомбинацией, процесс, которым можно объяснить небольшое сужение спектра при переходе к уровню инжекции, достаточному для того, чтобы создать вырожденное заполнение хотя бы в одной из зон полупроводника. Действительно, увеличение тока и,

следовательно, концентрации носителей не может существенно изменить заполнения состояний в области, примыкающей к краю зоны, в которой уже есть вырождение. В связи с этим длинноволновая часть излучения с увеличением тока возрастает медленнее, чем эмиссия коротковолновых фотонов. Однако наблюдаемый коротковолновый край спектра не может существенно сместиться в область малых длин волн, поскольку основная масса излучения, выходящего из образца, фильтруется материалом, в котором концентрация носителей близка к равновесной. При этом, если край оптического поглощения достаточно резок (что имеет место в арсениде галлия), возможно некоторое сужение спектра излучения. Отметим, что указанный механизм требует вырожденного распределения только в одной из зон (зоне проводимости в арсениде галлия). Большое отношение эффективных масс носителей в арсениде галлия указывает на то, что обратное заполнение, а тем более отрицательное поглощение, по-видимому, должно происходить здесь при значительно больших концентрациях инжектированных носителей, чем те, которые требуются для вырождения только в одной из зон. Поэтому можно предположить, что последнее объяснение является более вероятным.

Как будет видно из дальнейшего, Р. Холл с сотрудниками незадолго до создания первого инжекционного лазера [8], получив перевод статьи Д.Н. Наследова с соавторами, поняли, что учёные ЛФТИ не могли получить генерацию, так как в их опыте не было обратной связи (зеркал), тем более сами авторы предпочли другое объяснение сужения спектра, не связанное с вынужденным излучением.

Историю создания первого в мире экспериментального образца инжекционного лазера подробно описал (на мой взгляд, интересно и поучительно) руководитель группы сотрудников фирмы "Дженерал электрик" Р. Холл в статье "Инжекционные лазеры", посвящённой 25-летию со дня этого события [9]. Далее я привожу краткое изложение этой статьи.

Как пишет Р. Холл, до лета 1962 г. он считал создание полупроводникового лазера невозможным, хотя и был знаком с предложениями о получении когерентного излучения с использованием полупроводников. Причиной этому он считал, как было уже известно для существующих лазеров, необходимость высокоотражающего резонатора, большого оптического пути, что было несовместимо с сильным поглощением на свободных носителях. Также необычной была широкая полоса энергетических уровней, участвующих в спонтанном излучении. Но наиболее серьёзной проблемой была низкая излучательная рекомбинация в полупроводниках. Однако ситуация кардинально изменилась летом 1962 г. после докладов Кейса и Квиста из Массачусетского технологического института [10] и Панкова из RCA (Radio Corporation of America) [11]. В обоих докладах описывались переходы в арсениде галлия, дающие краевую люминесценцию с эффективностью, близкой к 100 %, при плотности мощности накачки порядка 1 кВ см^{-2} . Таким образом было устранено наиболее важное препятствие, но оставались другие, на которые следовало обратить внимание: размытость энергетических уровней у краёв зон, поскольку, хотя Холл с сотрудниками и имели опыт работы с туннельными диодами, они не знали, как это отразится на вероятности оптических

переходов. Оптические свойства *n*- и *p*-сторон были различными, но как это скажется на выходе излучения, к тому же, при градиенте концентраций? Не было уверенности в использовании диффузии только цинка, как это было у Кейса и Квиста. Всё это до начала работ оставалось невыясненным.

Используя уже известные тогда данные о том, что расстояние между квазиуровнями Ферми должно быть больше ширины запрещённой зоны, т.е. обе стороны *p*—*n*-перехода должны быть вырождены, время жизни является очень коротким, активная область меньше диффузионной длины, для обратной оптической связи необходим резонатор Фабри—Перо, Р. Холл набросал в рабочей тетради свои первоначальные соображения о возможной конструкции инжекционного лазера. Когда Р. Холл обсудил эти соображения с коллегами по работе, многие из них пожелали принять участие в предстоящих исследованиях, даже совмещая их с прежде запланированной работой в фирме. Руководство (Рой Апкер) согласилось с тем, что этот проект не является главным и четверо-пятеро сотрудников, уделяя данному проекту половину рабочего времени, смогут определить ценность этой идеи в течение нескольких месяцев. Тогда, как пишет Р. Холл, "мы полагали, что шанс на успех — один к пяти. Но даже если мы никогда не получим когерентное излучение, мы многое узнаем о высокоэффективной люминесценции перехода, доложенной ранее. Этого нам было достаточно для оправдания наших исследований — даже если мы не создадим лазер, то испытаем удовлетворение от научного исследования. Кроме того, осуществление этой идеи не потребовало оплаты работы".

Так как Холлу было известно, что исследования в этом же направлении, причём начатые ранее, проводятся в Линкольновской лаборатории и RCA, он решил действовать быстро, несмотря на перечисленные выше невыясненные факторы, полагая, что решение, как преодолеть возникающие трудности, будет находиться по мере их появления. Холл подробно описывает индивидуальную работу каждого члена своей группы (Г. Феннер, Ж. Кингслей, Т. Солтис и Р. Карлсон), что не свойственно нашим отечественным статьям с несколькими авторами. Выполнялись технологические работы, электрические, оптические и другие измерения.

Была изготовлена большая партия (по-видимому, около ста) образцов кубической формы с размером граней 0,4 мм и с двумя плоско-параллельными гранями, перпендикулярными *p*—*n*-переходу. Переход создавался диффузией цинка в арсенид галлия *n*-типа при различных температурах. Так как эффективность спонтанного излучения ожидалась высокой, начало генерации решили фиксировать не по резкому возрастанию интенсивности, а по изменению картины излучения на удалённом экране (дальнее поле). При испытаниях образцы помещались в жидкий азот. Часть образцов сразу же оказалась непригодной, другая — выходила из строя при повышении тока. Но некоторые образцы давали интенсивное спонтанное излучение. В это время группа получила перевод статьи Д.Н. Наследова с соавторами [7] (опубликована в *ФТТ*, апрель 1962 г.). Как было сказано ранее, группа из "Дженерал электрик" пришла к выводу, что учёные ЛФТИ не могли получить генерации без обратной связи и сами в статье отказались от возможности получения вынужденного излучения.

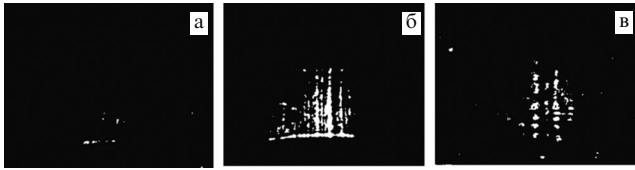


Рис. 2. Изображение дальнего поля излучения лазера в зависимости от расстояния D до $p-n$ -перехода (диод L-69): (а) до порога, (б) выше порога, $D = 6$ см, (в) выше порога, $D = 15$ см.

После месяца работы с помощью интерферометра был улучшен контроль параллельности и качества зеркальных граней, длительность импульсов тока была сокращена от нескольких миллисекунд до нескольких микросекунд.

Как пишет Холл, значительные новости появились утром в воскресенье, когда срок работы над проектом составил только два месяца. Один диод (L-52), который при изменении тока в области ниже 6 А показывал линейную зависимость светового отклика от тока, при возрастании амплитуды тока свыше 12 А начал давать гораздо более быстрое возрастание светового сигнала. При токе менее 12 А на удалённом экране (картина дальнего поля) наблюдалось только рассеянное свечение. Однако при дальнейшем возрастании тока внезапно появились "узоры" — яркие горизонтальные линии, которые не могли быть результатом спонтанного излучения (рис. 2). Эти интерференционные полосы являлись доказательством когерентности излучения из области $p-n$ -перехода.

После этого события в течение нескольких недель в результате напряжённой работы было исследовано много диодов и собраны все возможные данные для публикации результатов. В это же время были подготовлены документы для патентования, что было необходимо сделать до публикации статьи.

Статья [8] появилась в *Phys. Rev. Lett.* 1 ноября 1962 г. (поступила в редакцию 24 сентября 1962 г.). Как пишет Р. Холл, "неожиданностью для нас было то, что группа из IBM также получила излучение когерентного света из $p-n$ -перехода арсенида галлия [12]. Однако эта первоначальная публикация описывала структуру, которая не обеспечивала селекцию мод, но результаты демонстрировали спектральное сужение, и было ясно, что имеет место вынужденное излучение". Несколько позднее появились другие статьи, сообщающие о получении генерации при инжекции носителей через $p-n$ -переход полупроводников [13, 14].

Вскоре после известия о создании в США инжекционного лазера в декабре 1962 г. в ФИАНе в результате совместной работы группы учёных из лабораторий физики полупроводников и квантовой радиофизики был создан первый в СССР инжекционный лазер (рис. 3). Характеристики этого лазера были описаны в статье [15] и доложены на III Международной конференции по квантовой электронике [16]. Можно сказать, что на этой конференции была представлена обширная информация о первой стадии в истории полупроводниковых лазеров — теоретическое обоснование возможности создания инжекционного лазера и его экспериментальное осуществление.

С тех пор прошло около 50 лет (первый инжекционный лазер был создан через два года и четыре месяца

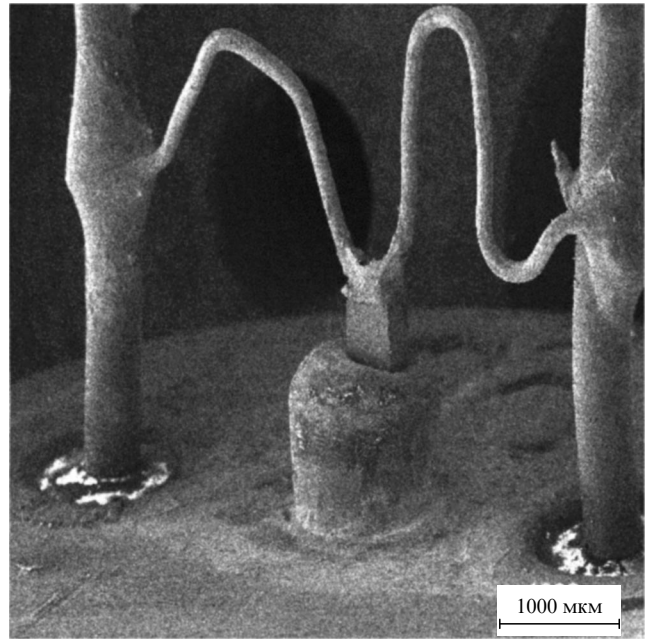
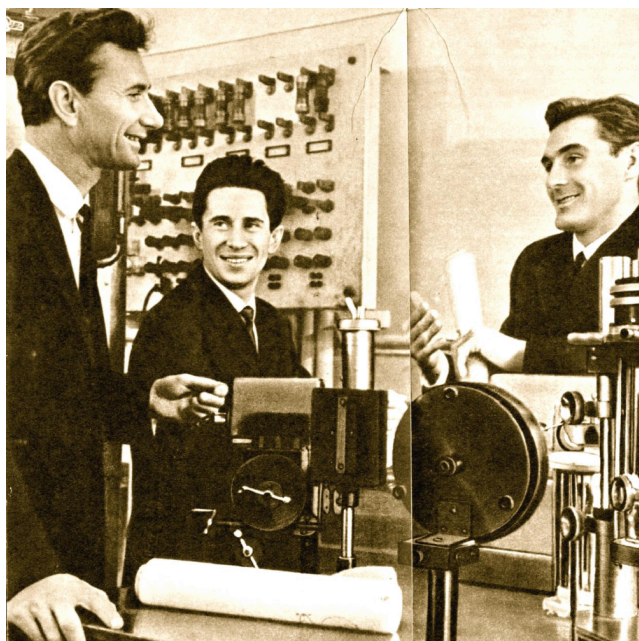


Рис. 3. Фотография первого инжекционного лазера СССР (ФИАН, декабрь 1962 г.).

после появления первого лазера на кристалле рубина). За прошедшие годы никакие другие лазеры не испытали таких кардинальных преобразований, которые сделали инжекционные лазеры основными изделиями лазерной техники, определяющими современный научно-технический прогресс. К таким преобразованиям прежде всего следует отнести использование гетеропереходов [5], позволивших перейти к работе при комнатных температурах, освоение новейших технологических процессов их эпитаксиального изготовления, что увеличило выходную мощность до нескольких десятков ватт, к.п.д. — до



Ю.М. Попов (крайний справа) рассказывает Н.Г. Басову и Ч. Таунсу (в центре) о результатах исследования излучения инжекционного лазера.



Лауреаты Ленинской премии 1964 года за фундаментальные исследования, приведшие к созданию полупроводниковых лазеров, А.П. Шотов, Ю.М. Попов, О.Н. Крохин (слева направо).

70 %, рабочий ресурс — до нескольких десятилетий. Освоенный генерируемый ими диапазон длин волн простирается от инфракрасного до ультрафиолетового. Для эффективной накачки твердотельных лазеров разработаны монолитные линейки инжекционных лазеров и матрицы на их основе. Трудно переоценить тот огромный вклад, который внесли в создание и развитие полупроводниковых лазеров учёные ФИАНа и ФТИ, работавшие под руководством Н.Г. Басова и Ж.И. Алфёрова.

Роль инжекционных лазеров в нашей жизни хорошо известна — это волоконно-оптическая связь, лазерные принтеры, высокоскоростная память на оптических дисках, многочисленные приборы для медицины, технологические установки, позволяющие производить обработку лазерным лучом различных материалов. Следует ожидать, что в недалёком будущем их значение возрастёт, особенно в области производства средств освещения и дисплеев, включая высококачественное трёхмерное телевидение.

Список литературы

1. Басов Н Г, Вул Б М, Попов Ю М *ЖЭТФ* **37** 587 (1959) [Basov N G, Vul B M, Popov Yu M *Sov. Phys. JETP* **10** 416 (1960)]
2. Басов Н Г, Крохин О Н, Попов Ю М *УФН* **72** 161 (1960) [Basov N G, Krokhin O N, Popov Yu M *Sov. Phys. Usp.* **3** 702 (1961)]
3. Басов Н Г, Крохин О Н, Попов Ю М *ЖЭТФ* **40** 1879 (1961) [Basov N G, Krokhin O N, Popov Yu M *Sov. Phys. JETP* **13** 1320 (1961)]
4. Bernard M G A, Duraffourg G *Phys. Status Solidi B* **1** 699 (1961)
5. Алфёров Ж И и др. *ФТП* **4** 1826 (1970) [Alferov Zh I et al. *Sov. Phys. Semicond.* **4** 1573 (1971)]
6. Burns G, Nathan M I *Proc. IEEE* **52** 770 (1964)
7. Наследов Д Н и др. *ФТТ* **4** 1062 (1962) [Nasledov D N et al. *Sov. Phys.-Solid State* **4** 2449 (1963)]
8. Hall R N et al. *Phys. Rev. Lett.* **9** 366 (1962)
9. Hall R N *IEEE J. Quantum Electron.* **23** 674 (1987)
10. Keyes R J, Quist T M *Proc. IRE* **50** 1822 (1962)

11. Pankove J I, Berkeyheiser J E *Proc. IRE* **50** 1976 (1962)
12. Nathan M I et al. *Appl. Phys. Lett.* **1** 62 (1962)
13. Holonyak N, Bevacqua S F *Appl. Phys. Lett.* **1** 82 (1962)
14. Quist T M et al. *Appl. Phys. Lett.* **1** 91 (1962)
15. Багаев В С и др. *ДАН СССР* **150** 275 (1963) [Bagaev V S et al. *Sov. Phys. Dokl.* **8** 453 (1963)]
16. Grivet P, Bloembergen N (Eds) *Quantum Electronics: Proc. of the Third Intern. Congress, Paris, 1963* (New York: Columbia Univ. Press, 1964)

PACS numbers: **01.65. + g, 42.60. – v, 42.65. – k**

DOI: 10.3367/UFNr.0180.201101m.0107

Самофокусировка лазерных пучков: современное состояние и перспективы исследований

А.А. Маненков

1. Введение

Самофокусировка лазерных пучков при их распространении в нелинейных средах — одно из фундаментальных явлений нелинейной оптики. Суть этого явления заключается в изменении пространственного профиля пучка вследствие зависимости показателя преломления среды от интенсивности излучения. Характер этого изменения зависит от амплитудно-временных параметров пучка и оптических свойств среды. Важность явления самофокусировки определяется её сильным влиянием на процессы взаимодействия мощного лазерного излучения с оптическими средами (ионизация, разрушение) и другие нелинейные эффекты (вынужденное рассеяние, генерация гармоник, фазовая самомодуляция и др.). В последние годы в связи с обнаружением самофокусировки лазерных пучков с фемтосекундной (фс) длительностью импульсов в воздухе значительный интерес вызывает возможность практических применений этого явления (дистанционное зондирование атмосферы, управление электрическими разрядами и др.).

В связи с отмеченным исследование механизмов самофокусировки в различных средах и различных диапазонах частот и длительностей импульсов, выяснение адекватных моделей явления — важнейшее направление лазерной физики и нелинейной оптики.

Цель данного доклада — краткое изложение основных результатов исследований явления самофокусировки, достигнутых к настоящему времени, и анализ перспектив дальнейших исследований. Заметим, что явление самофокусировки с момента предсказания (1962 г.) исследовалось в огромном числе работ, результаты которых стали предметом обсуждения во многих обзорах, монографиях и других публикациях. Например, в 2009 г. опубликована книга [1], содержащая обширную коллекцию из 24 глав, написанных известными специалистами в этой области, по различным теоретическим и экспериментальным аспектам проблемы. Далее мы остановимся лишь на некоторых основных, принципиальных, на наш взгляд, аспектах проблемы.

А.А. Маненков. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ. E-mail: manenkov@kapella.gpi.ru