

длинных волнах. К сожалению, волоконные световоды на основе кварцевого стекла нельзя использовать в качестве активной среды ВКР-лазеров из-за быстрого роста фундаментальных оптических потерь в этой спектральной области.

Нами изготовлены волоконные световоды на основе германатного (GeO_2) стекла, которое имеет минимум фундаментальных оптических потерь на волне с $\lambda = 2$ мкм, кроме того, сечение комбинационного рассеяния в этих стеклах на порядок выше, чем в кварцевом стекле [15]. На основе этих световодов разработаны трех- и четырехкаскадные ВКР-лазеры, которые генерируют излучение в спектральной области 2 мкм [16]. Схема этих лазеров аналогична схеме на рис. 3, только лазером накачки в них служит волоконный Er/Yb -лазер, генерирующий на волне с $\lambda = 1610$ нм, а вместо фосфосиликатного световода используется германатный световод. Получена генерация излучения с длинами волн 2027 и 2200 нм и мощностью 900 и 210 мВт соответственно при мощности накачки около 4200 мВт.

Таким образом, разработано семейство волоконных ВКР-лазеров, обеспечивающих генерацию лазерного излучения практически на любой длине волны в области 1,1–2,2 мкм, при этом в качестве лазеров накачки используются волоконные Yb - и Er/Yb -лазеры.

6. Заключение

Недавние успехи в технологиях стеклянных волоконных световодов и лазерных диодов привели к созданию нового поколения твердотельных лазеров — волоконных лазеров. Несмотря на огромные успехи в создании непрерывных одномодовых волоконных лазеров с выходной мощностью ~ 1 кВт в спектральной области 1,06–1,1 мкм, ожидается дальнейшее увеличение выходной мощности непрерывного одноволоконного лазера до 10 кВт.

Однако для достижения этого уровня выходной мощности необходимо разработать новые структуры волоконных световодов с большим диаметром поля моды и низкой нелинейностью. Кроме того ожидается расширение спектральной области генерации мощных волоконных лазеров до 2 мкм за счет создания эрбиевых ($\lambda = 1,55$ мкм) и тулиевых ($\lambda = 2$ мкм) лазеров.

Создание стеклянных волоконных световодов с высокой прозрачностью в ИК-области спектра позволит создать семейство ВКР-волоконных лазеров для спектральной области 3–5 мкм.

Список литературы

1. Koester C J, Snitzer E *Appl. Opt.* **3** 1182 (1964)
2. Russell P St J et al. *Phys. World* (Oct.) 41 (1993)
3. Jeong Y et al., *LEOS 2003*
4. Jeong Y et al., *CLEO'2004, San Francisco, CMS1, 2004*; Liu C H et al., *CLEO'2004, San Francisco, CMS2, 2004*
5. Буфетов И А и др. *Квантовая электроника* **33** 1035 (2003)
6. Мелькумов М А и др. *Квантовая электроника* **34** 843 (2004)
7. Snitzer E et al., in *Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, New Orleans, La., USA, January 27–29, 1988* (Technical Digest Ser., Vol. 2) (Washington, DC: OSA, 1988) PD-5
8. Grudinin A B et al., in *28th European Conf. on Optical Communication, Sept. 8–12, 2002, Copenhagen, Denmark*, PD-1
9. Melkumov M A et al., in *Proc. of the 30th European Conf. on Optical Communication, Sept. 5–9, 2004, Stockholm, Sweden* Vol. 4 (2004) p. 792

10. Dianov E M, Prokhorov A M *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* **6** 1022 (2000)
11. Stolen R H, Ippen E P, Tynes A R *Appl. Phys. Lett.* **20** 62 (1972)
12. Grubb S G et al., in *Optical Amplifiers and Their Applications, Conf., June 15–17, 1995, Davos, Switzerland* (Technical Digest Ser., Vol. 18) (Washington, DC: OSA, 1995) SaA4
13. Dianov E M et al. *Electron. Lett.* **33** 1542 (1997)
14. Dianov E M et al. *Opt. Lett.* **25** 402 (2000)
15. Mashinsky V M et al., in *Proc. of the 29th European Conf. on Optical Communication; 14th Intern. Conf. on Integrated Optics and Optical Fibre Communication, Sept. 21–25, 2003, Rimini, Italy* Vol. 2 (2003) p. 210
16. Дианов Е М и др. *Квантовая электроника* **34** 695 (2004)

PACS numbers: 01.65.+g, 42.55.-f, 84.40.-x

Об истории создания инжекционного лазера

Ю.М. Попов

В 1958 г. в ФИАНе по инициативе Н.Г. Басова начались исследования, направленные на создание лазеров. 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 излучения использовали кристаллы, что подтверждало возможность получения инверсной заселенности в твердых средах.

Это время характеризовалось бурным развитием полупроводниковой электроники. Но единственными материалами для этих целей служили германий и кремний, причем широкое развитие кремния только начиналось. 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 заселенности 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 после охлаждения решеткой инверсную заселенность [1].

Так как для межзонного лавинного размножения в германии и кремнии требовались высокие напряженности поля, а оптические межзонные переходы были непрямыми, в экспериментальном плане было решено работать над ионизацией примесей в этих материалах, а для межзонной ионизации использовать полупроводники с узкими запрещенными зонами и прямыми оптическими переходами.

В то время таким наиболее исследованным полупроводником был антимонид индия, который выращивался в Ленинградском физико-техническом институте в лаборатории профессора Д.Н. Наследова.

Николай Геннадиевич с присущим ему энтузиазмом собирал сотрудников и, используя любую возможность, организовывал визиты в Ленинград. Мне хорошо помнится время, когда в конце 50-х в лютые морозы

мы, включая Николая Геннадиевича, неоднократно ночевали в академической гостинице на улице Халтурина в комнате, где было не менее десяти других командированных.

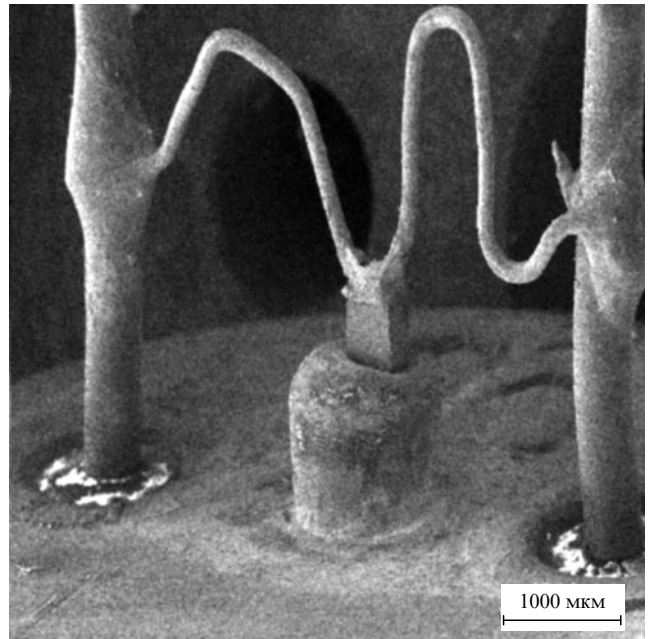
Группа в лаборатории физики полупроводников занималась наблюдением свечения при рекомбинации электронов, ионизованных с мелких примесей в германии, группа в лаборатории колебаний — излучением при лавинном размножении в анимониде индия. Однако в этих исследованиях, хотя и были получены интересные научные результаты, но признаков вынужденного излучения не наблюдалось. Основные трудности заключались в необходимости получения импульсов тока с очень короткими фронтами и сложностью работы в инфракрасном диапазоне. Но эти трудности не только не охладили целеустремленность Н.Г. Басова, но придали ему новую энергию. Он привлекает к созданию лазеров еще ряд оптических лабораторий ФИАНа.

Почти ежедневно Н.Г. Басов подолгу обсуждает проблему создания лазеров с теоретической группой, в которую входили О.Н. Крохин и я.

В 1960 г. мы в *УФН* опубликовали 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 заселенность формулировалась в виде условия на неравновесные функции распределения в зонах, а резонатор предлагалось создать за счет параллельности естественных выходных граней, обладающих у полупроводников достаточным отражением для обратной связи. В начале 1961 г. нами был предложен метод создания инверсной заселенности в полупроводниках быстрыми электронами, а в марте выдвинута идея и сформулированы основные условия получения инверсной заселенности при инжекции неравновесных носителей тока через $p-n$ -переход вырожденных полупроводников [3]. В статье было сказано, что ток накачки — диффузионный и его величина была правильно оценена и предсказана возможность непрерывного режима работы; расстояние между квазиуровнями Ферми должно превысить ширину запрещенной зоны; следует использовать полупроводники с прямыми излучательными переходами; дифракционные потери будут уменьшены за счет большего показателя преломления активной области. Было также указано (еще в то время), что плотность тока инверсии может быть уменьшена за счет использования полупроводников с различной шириной запрещенной зоны.

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 докладе об этой работе на семинаре были высказаны даже сомнения о непротиворечивости этой идеи второму началу термодинамики. Б.М. Вул предложил нам не публиковать эту работу до получения экспериментальных результатов. Но мы все же опубликовали наше предложение в июньском номере *ЖЭТФ* за 1961 г., хотя и экспериментальные работы в этом направлении были начаты.

Идею создания лазера на $p-n$ -переходе мы докладывали во многих местах в течение 1961 г. и первой половины 1962 г. Находясь с октября 1961 г. по март 1962 г. в командировке в США, я выступал на семинаре в Гарвардском университете, где мне задавал вопросы



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

относительно селекции типов колебаний Н. Бломберген. В январе 1962 г. после доклада в Колумбийском университете я имел продолжительную дискуссию с учеными из ИВМ П. Сорокиным и М. Натаном, который в конце 1962 г. один из первых получил вынужденное излучение из $p-n$ -перехода арсенида галлия. Позднее в обзорной статье 1964 г. [4] Г. Барнс и М. Натан сослались на наши работы [1, 2] 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 сентябре 1961 г. после доклада на конференции в Ташкенте О.Н. Крохин обсудил с учеными ЛФТИ постановку ими эксперимента на имеющемся у них диоде из арсенида галлия. Они осуществили его в начале 1962 г. В апрельском номере *ФТТ* за 1962 г. [5] Д.Н. Наследов, А.А. Рогачев, С.М. Рывкин, Б.В. Царенков сообщили о наблюдении сужения линии спонтанного излучения при увеличении тока накачки и как на одну из возможностей объяснения этого явления указали на частичное присутствие стимулированного излучения согласно нашей работе [3].

В ноябрьском номере 1962 г. *Phys. Rev. Lett.* появилась статья Р. Холла с соавторами из фирмы "Дженерал Электрик", в которой впервые сообщалось о получении когерентного излучения из $p-n$ -перехода арсенида галлия [6]. Почти одновременно в трех других лабораториях США также были созданы первые инжекционные лазеры [7–9], а в декабре, в результате совместной работы групп, руководимых Н.Г. Басовым и Б.М. Вулом, в ФИАНе был создан в СССР первый лазер на $p-n$ -переходе [10].

С тех пор минуло более 40 лет. Без преувеличения можно сказать, что за это время в развитии инжекционных лазеров произошло несколько "научно-технических революций", использование гетеропереходов в трех- и четырехкомпонентных твердых растворах, увеличение непрерывной работы при комнатной температуре до

100 лет, получение прямого преобразования электрической энергии в когерентный свет с КПД до 70 %, достижение генерируемой мощности более 10 Вт, создание инжекционных лазеров в сине-зеленой и фиолетовой областях спектра с использованием нитридных соединений. Большой вклад в это развитие внесли ученые ЛФТИ и ФИАН под руководством Ж.И. Алферова и Н.Г. Басова. Эти достижения обеспечили современный научно-технический прогресс в области волоконно-оптической связи, высокочастотной памяти на оптических дисках, спектроскопии высокого разрешения, эффективной накачки твердотельных лазеров и т.д. По-видимому, роль инжекционных лазеров в ближайшем будущем еще более

возрастет, так как "смелые" высказывания сулят замену ими всех существующих средств освещения.

Список литературы

1. Басов Н Г, Вул Б М, Попов Ю М *ЖЭТФ* **37** 587 (1959)
2. Басов Н Г, Крохин О Н, Попов Ю М *УФН* **72** 161 (1960)
3. Басов Н Г, Крохин О Н, Попов Ю М *ЖЭТФ* **40** 1879 (1961)
4. Burns G, Nathan M I *Proc. IEEE* **52** 770 (1964)
5. Наследов Д Н и др. *ФТТ* **4** 1062 (1962)
6. Hall R N et al. *Phys. Rev. Lett.* **9** 366 (1962)
7. Nathan M I et al. *Appl. Phys. Lett.* **1** 62 (1962)
8. Holonyak N, Bevacqua S F *Appl. Phys. Lett.* **1** 82 (1962)
9. Quist T M et al. *Appl. Phys. Lett.* **1** 91 (1962)
10. Багаев В С и др. *ДАН СССР* **150** 275 (1963)

Октябрь 2004 г.

Том 174, № 10

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВЫЕ КНИГИ ПО ФИЗИКЕ И СМЕЖНЫМ НАУКАМ

Фейнберг Е.Л. *Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке.* 3-е изд., расширенное и доп. (Серия "Наука для всех") (Фрязино: Век-2, 2004) 288 с. ISBN 5-85099-145-X.

Зачем искусство нужно человечеству? Каковы взаимоотношения искусства и науки? Где кончается логика и начинается интуиция? Общие проблемы "двух культур" (естественнонаучного знания, с одной стороны, искусства и гуманитарных наук — с другой) рассматриваются с философской точки зрения известным физиком, академиком Е.Л. Фейнбергом. Первое издание вышло в 1981 г. в издательстве "Радио и связь" под названием *Кибернетика, логика, искусство*. Книга была издана также на английском языке под названием *Art in the Science dominated World* издательством "Gordon and Breach", 1987. Вторая книга этой серии, *Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке* (М.: Наука, 1992), помимо доработки текста первого издания, содержала исследование нового вопроса — о судьбе взаимоотношений искусства и науки. Эта вторая книга вышла в Германии под названием *Zwei Kulturen. Intuition und Logic in Kunst und Wissenschaft* (Berlin: Springer-Verlag, 1998). Настоящая книга содержит помимо пересмотренного и кое-где дополненного материала первых двух изданий также новую тему: о спорах по поводу роли интуиции между философами и учеными, представляющими "точные" науки в XIX–XX веках. (Издательство ООО "Век-2": 141195 Фрязино, Московская обл., а/я 107; тел. (095) 365-43-55; e-mail: vek-2@mail.ru; URL: <http://www.vek2.nm.ru/>)

Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. *Физика неидеальной плазмы.* Учебное пособие. (М.: Физматлит, 2004) 528 с. ISBN 5-9221-0173-0.

Книга посвящена плазме высокой плотности, сжатой так сильно, что энергия межчастичного взаимодействия становится сопоставимой с кинетической энергией теплового движения. Эффекты межчастичного взаимодействия — неидеальность — определяют необычные свойства такой плазмы. Большая часть вещества Вселенной находится именно в этом экзотическом состоянии. Интерес к исследованию свойств неидеальной плазмы возрос в последние годы, когда состояния с высокой

концентрацией энергии, составляющие основу многих современных технических устройств и энергетических установок, стали доступны импульсным экспериментам. В книге рассматриваются методы генерации и диагностики неидеальной плазмы. Приведены результаты экспериментальных исследований термодинамических, переносных и оптических свойств. Обсуждаются основные теоретические методы и модели. Особое внимание обращено на быстро развивающиеся новые направления физики неидеальной плазмы, такие как металлизация диэлектриков и диэлектризация металлов, однозарядная плазма, пылевая плазма и ее кристаллизация. Для студентов, аспирантов и научных работников, занимающихся вопросами физики плазмы, плотных сред, статистической теорией многих частиц, вопросами плазменных технологий и явлениями в газовом разряде. (Издательство "Физматлит": 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 90; тел. (095) 334-74-21; факс (095) 334-76-20; e-mail: fizmat@maik.ru; URL: <http://www.fml.ru/>)

Белоцерковский О.М., Опарин А.М. *Численный эксперимент в турбулентности: от порядка к хаосу.* 2-е изд., доп. (М.: Наука, 2001) 223 с. ISBN 5-02-013191-1.

Книга посвящена анализу фундаментальных понятий и методов, необходимых для изучения турбулентности, взаимодействия порядка и хаоса. С помощью новых численных методик (вычислительный эксперимент) проводится прямое численное моделирование свободной развитой турбулентности, при этом удается получить основные количественные характеристики строения турбулентности на различных режимах движения: когерентные структуры, ламинарно-турбулентные течения, переход к хаосу. Во второе издание добавлен обширный материал А.М. Опарина, касающийся пространственных задач развития гидродинамических неустойчивостей. Для специалистов различных областей науки и техники, преподавателей, студентов. (Издательство "Наука": 117997 ГСП-7 Москва В-485, Профсоюзная ул., 90; тел. (095) 334-71-51; факс (095) 420-22-20; e-mail: secret@naukaran.ru; URL: <http://www.naukaran.ru/>)

Подготовила *Е.В. Захарова*
(e-mail: zaharova@ufn.ru)