

Жорес Алфёров – учёный, благодаря которому работает большинство современных полупроводниковых лазеров. Часть 1

Виктор Алексеев

Эта статья продолжает начатую во втором номере 2024 года журнала «Современная электроника» тему об открытиях великих российских учёных, внёсших существенный вклад в развитие мировой электроники. Весной следующего года исполнится 95 лет со дня рождения выдающегося советского, российского и белорусского учёного, лауреата Ленинской, Государственной и Нобелевской премий – Жореса Ивановича Алфёрова.

К сожалению, немногие знают, за что именно Алфёров получил эти, а также многие другие зарубежные премии и награды, и каково значение его работ для мировой и российской науки. Достаточно сказать, что разработанные им гетеролазеры занимают сегодня первое место среди всех типов лазеров по количеству используемых в различных отраслях науки, техники и промышленности.

От младшего научного сотрудника до Нобелевского лауреата и должности вице-президента Российской Академии Наук

Жорес Иванович Алфёров родился 15 марта 1930 года. Его отец, член РСДРП, искренне веривший в победу коммунизма во всём мире, настоял на том, чтобы сына назвали в честь Жана Жореса, философа и идеолога международного социалистического движения. Воспитание в семье маленького Жореса проходило под соответствующими лозунгами его отца: выбор достойной цели в жизни и её достижение за счёт трудолюбия и самопожертвования. Жорес Алфёров окончил в 1947 году с золотой медалью среднюю школу № 42 в Минске и поступил в Белорусский политехнический институт. В связи с назначением отца на новое место работы в Ленинграде Жорес Алфёров перевёлся на факультет электронной техники Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ).

Жорес Алфёров посвящал всё своё свободное время учёбе. По словам его сокурсников, он старался уклоняться от весёлых студенческих посиделок, предпочитая это время проводить в библиотеке и в вакуумной лаборатории профессора Б.П. Козырева, где начал работать ещё на 3 курсе инсти-

тута. В этой лаборатории Жорес Алфёров принимал активное участие в экспериментах по исследованию инфракрасных полупроводниковых фотоприёмников. В течение трёх лет он был председателем Студенческого научного общества факультета электронной техники [1, 2].

В октябре 1952 года Жорес Алфёров защитил диплом с отличием и был распределён в Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе (ФТИ), в лабораторию В.М. Тучкевича. Вся дальнейшая судьба Ж. Алфёрова была связана с ФТИ, где он прошёл путь от младшего научного сотрудника до директора института.

Весной 1958 года лаборатория В.М. Тучкевича получила важный правительственный заказ по разработке полупроводниковых устройств для первой советской атомной подводной лодки. Жоресу Алфёрову было поручено изготовление принципиально новых конструкций германиевых вентилялей и их испытание. За выполнение этого заказа сотрудники лаборатории, в том числе и Алфёров, были награждены в 1959 году орденами и медалями.

В 1961 году он защитил кандидатскую диссертацию, посвящённую разработке мощных германиевых и кремниевых выпрямителей. Результаты этой работы были использованы при

организации массового производства отечественных компонентов для силовой электроники.

На следующем этапе своей деятельности группа Жореса Алфёрова занималась исследованиями, связанными с прямым преобразованием электричества в когерентное квантовое излучение [3, 4].

В 1963 году Жорес Алфёров и Рудольф Казаринов разработали, обосновали и запатентовали первую схему гетеролазера. Подробно об этом основном изобретении Алфёрова будет сказано в следующей части статьи [5].

Нужно отметить, что позже в журнале «Proceedings of the IEEE» была опубликована статья с описанием аналогичной конструкции, разработанной Гербертом Крёмером, разделившим в 2000 году с Жоресом Алфёровым Нобелевскую премию за разработку инжекционных лазеров с гетерогенными переходами [6, 7].

Зимой 1971 года Жорес Алфёров за разработку гетеролазера был награждён Франклиновским институтом США медалью Стюарта Баллантайна.

В 1972 году Алфёров стал профессором и заведующим базовой кафедрой оптоэлектроники ЛЭТИ и членом-корреспондентом АН СССР.

В 1973 году Жорес Алфёров вместе с сотрудниками своей лаборатории подали заявку на изобретение «Полупроводникового лазера с гетеропереходами», которая была одобрена в 1977 году [8].

Гетеролазеры стали единственными среди всех других разновидностей светогенерирующих электронных устройств, различные варианты которых очень быстро были реализованы в массовом производстве по всему миру. На сегодняшний день это самый популярный и перспективный тип лазеров.

В 1976 году сотрудники лаборатории Алфёрова получили премию Ленинского комсомола за исследование



Рис. 1. Король Швеции Карл XVI Густаф вручает Жоресу Алфёрову Нобелевскую премию по физике за 2000 год

широкозонных твёрдых полупроводниковых гетеролазеров.

С 1979 года Жорес Алфёров – академик АН СССР.

С 1987 по май 2003 года Жорес Алфёров занимал пост директора ФТИ имени А.Ф. Иоффе. В дальнейшем он не прекращал своих связей с ФТИ. В период с 2003 до 2006 года был председателем учёного совета института. Жорес Алфёров принимал самое активное участие в работе созданных при его участии таких известных научных структур, как, например, «НТЦ Центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур», «Научно-образовательный комплекс (НОК) Физико-технический институт», «Физико-техническая школа в Санкт-Петербурге», «Физико-технический факультет СПбГУ».

Жорес Алфёров занимал пост вице-президента РАН с 1991 по 2017 год, был председателем Президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН.

В начале 1990-х годов одним из главных направлений работ лаборатории Алфёрова стало исследование возможностей использования квантовых проволок и квантовых точек в электронике [9].

В 1995 году Алфёров со своими сотрудниками успешно испытали инжекционный гетеролазер на квантовых точках, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре [10].

В 2000 году Нобелевская премия по физике в разделе «Фундаментальные

работы в области информационных и коммуникационных технологий» была присуждена Жоресу Алфёрову (25%), Герберту Крёмеру (25%) и Джекю Килби (50%). Алфёров и Крёмер получили премии за свои разработки в области гетерогенных лазеров (рис. 1).

Джон Килби был удостоен этой награды за изобретение интегральных схем.

Фактически Нобелевская премия была присуждена Ж.И. Алфёрову за то, что он и сотрудники его лаборатории буквально за десять лет (1963–1973) реализовали все основные схемотехнические идеи, создавшие основу для большинства современных систем генерации, контроля и управления когерентными световыми потоками в гетероструктурах на основе GaAs–AlAs.

В 2001 году Жорес Алфёров организовал «Фонд поддержки образования и науки» (Алфёровский фонд).

В 2003 году Ж.И. Алфёров оставил пост руководителя ФТИ имени А.Ф. Иоффе в соответствии с уставом, формально ограничивающим предельный возраст директора института.

С 2003 года Алфёров занимал пост председателя Научно-образовательного комплекса «Санкт-Петербургский физико-технический научно-образовательный центр» РАН.

В 2005 году Жоресу Алфёрову за фундаментальные исследования и значительный практический вклад в создание полупроводниковых преобразователей энергии, применяемых в

солнечной и электроэнергетике, была присуждена одна из самых престижных мировых премий «Глобальная энергия».

Жорес Алфёров был главным редактором журналов: «Письма в Журнал технической физики», «Физика и техника полупроводников», «Нанотехнологии – Экология – Производство». Также он входил в редакционную коллегию журналов «Поверхность: Физика, химия, механика» и «Наука и жизнь». Был в составе правления общества «Знание».

С 2010 года он был сопредседателем «Консультативного научного Совета Фонда Сколково».

Жорес Алфёров активно занимался политической деятельностью:

- 1989–1992 – народный депутат СССР;
- 1995–2019 – депутат Государственной думы Федерального собрания РФ II, III, IV, V, VI, VII созывов.

Жорес Алфёров никогда не был официальным членом какой-либо партии. Единственной достойной «партией», к которой он себя «причислял», была Академия наук СССР. Будучи воспитанным в духе коммуниста-идеалиста, он верил в светлое будущее своей страны и тяжело переживал развал академической науки после распада СССР. В те годы о нём говорили, что Алфёров – единственный истинный коммунист, хотя и не член КПСС. До конца своих дней Алфёров отстаивал идеи всеобщего бесплатного образования, приоритетного государственного финансирования Академии наук и создания собственного производства современных электронных компонентов.

Жорес Иванович Алфёров ушёл из жизни 1 марта 2019 года. Он похоронен на Комаровском кладбище под Санкт-Петербургом.

Доктор физико-математических наук, академик Жорес Алфёров внёс огромный вклад в развитие российской науки. Он является автором более 500 научных работ, 50 изобретений и нескольких монографий. На протяжении двадцати шести лет Алфёров занимал должность вице-президента Российской Академии Наук (РАН). Его заслуги были высоко оценены правительствами СССР и Российской Федерации – Лауреат Ленинской премии и Государственных премий СССР, РФ; Полный кавалер ордена «За заслуги перед Отечеством»; награждён орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Знак Почёта.



Рис. 2. Памятная почтовая марка – Академик Жорес Иванович Алфёров, выдающийся российский физик [12]

Среди многочисленных зарубежных наград нужно отметить: ордена Франциска Скорины, Князя Ярослава Мудрого V степени, Почётного легиона, а также золотые медали Х. Велькера, Стюарта Баллантайна, SPIE, «Золотая тарелка» США и другие.

Кроме того, вклад Жореса Алфёрова в современную физику был признан мировым научным сообществом. Он был иностранным членом Национальной академии наук США и Национальной инженерной академии США; Корейской академии наук и технологий; Китайской академии наук; Польской академии наук. Также Жорес Алфёров являлся членом Академий наук Республики Беларусь, Молдавии, Азербайджана, Армении.

Полупроводниковые гетероструктуры, разработанные Жоресом Алфёровым и его сотрудниками, в том или ином виде широко используются сегодня в самых различных устройствах – от детских игрушек до радиационно-устойчивых космических солнечных батарей. Без лазерных диодных трансмиттеров для оптоволоконных сетей невозможна была бы работа современного Интернета [13].

Сверхвысокочастотные усилители сотовых телефонов, плоские экраны мониторов и телевизоров, инфракрасные компьютерные порты, лазерные декодеры особо надёжных грузовых меток, мощные светодиодные прожекторы, светофоры, автомобильные фары, проигрыватели компакт-дисков – все эти устройства используют специализированные модификации гетерогенных лазеров.

Жорес Алфёров был символом советской и российской науки. В его память

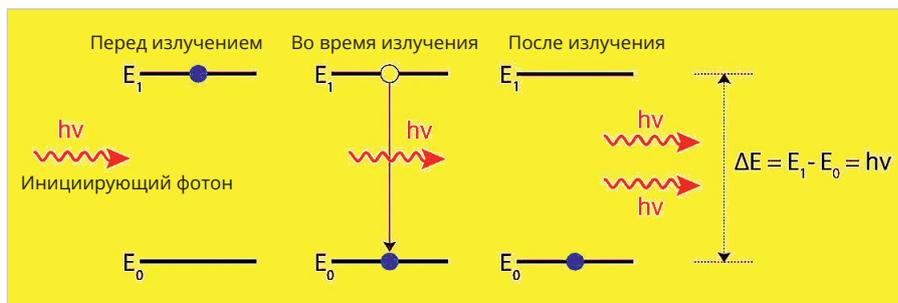


Рис. 3. Схема процесса «Stimulated Emissions» – стимулированное или вынужденное излучение

была выпущена памятная почтовая марка (рис. 2).

Исторические предпосылки создания гетеролазеров

Одной из основных задач группы Алфёрова в исследованиях 1960–1970-х годов было получение стабильных эффективных полупроводниковых структур, которые можно было бы использовать для генерации «технического света». Жорес Алфёров обладал великолепной памятью. Благодаря своей огромной работоспособности он великолепно знал все разделы теоретической физики.

Алфёров свободно владел английским языком, хорошо знал немецкий, свободно читал научную литературу на французском. Это позволяло ему постоянно находиться на острие научных знаний, активно участвовать в международных научных конференциях и сотрудничать с зарубежными коллегами [14].

Для того чтобы понять суть и значение изобретения Алфёрова, имеет смысл коротко рассмотреть тот уровень, на котором находились разработки лазеров на тот момент времени.

Основы теории «индуцированного излучения» были сформулированы ещё в 1917 году Альбертом Эйнштейном [15].

В первом приближении базовую идею этой теории с учётом современных доработок можно объяснить следующим образом. Если атом с несколькими возможными энергетическими состояниями принудительно перевести с основного нижнего уровня с энергией E_1 на верхний уровень с энергией E_2 ($E_2 > E_1$), то он будет находиться в возбуждённом состоянии. Переход в возбуждённое состояние, в частности, может с определённой вероятностью реализоваться, если фотон с частотой ν_{21} будет поглощён атомом, находящимся в основном состоянии.

Применительно к атому возбуждённое состояние означает, что один из его электронов занимает более высокий энергетический уровень, чем в основном состоянии.

В нормальном состоянии в случае термодинамического равновесия состояние с низкой энергией, определяемое количеством невозбуждённых частиц N_1 , является более вероятным по сравнению с возбуждённым состоянием, характеризуемым частицами N_2 (то есть $N_1/N_2 > 1$). Если систему перевести в состояние, когда возбуждённых частиц N_2 будет больше, чем невозбуждённых ($N_2/N_1 > 1$), то говорят, что система перешла в «состояние с инверсией электронных населённостей – ИЭН».

Возбуждённое состояние неустойчиво, и атом будет стремиться вернуться в основное состояние с наименьшей энергией. При этом разница в энергии между этими состояниями ΔE излучится атомом в виде фотона с частотой ν_{21} , которую можно найти из выражения:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu_{21},$$

где h – постоянная Планка.

Существуют два основных варианта снятия возбуждения: пассивный и активный. В первом случае атом, находящийся в возбуждённом состоянии, способен самопроизвольно перейти в основное состояние. Данный вариант, когда фотоны излучаются неупорядоченно (стохастически), а фазы их волн не совпадают, называют «спонтанным (некогерентным) излучением».

В другом случае до того, как произойдёт «спонтанное излучение» фотона, атомы могут находиться в возбуждённом состоянии довольно длительное время, составляющее для некоторых веществ доли микросекунды. Если в этот момент рядом с атомом пройдёт другой «независимый» фотон с частотой ν_{21} , соответствующей энергии ΔE , то атом

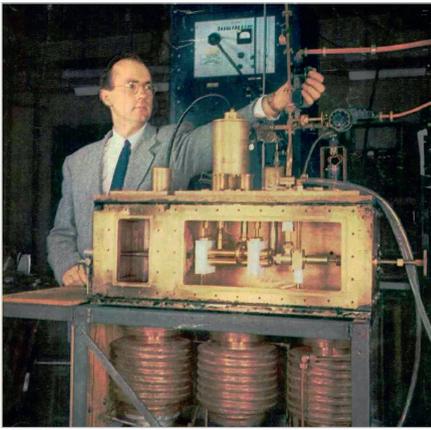


Рис. 4. Чарльз Таунс настраивает изобретённый им лабораторный образец установки «Maser»

излучит второй фотон частоты ν_{21} . Фотоны, вызывающие снятие возбуждения без поглощения атомом, получили название «иницирующий фотон – ИФ». Когда ИФ проходит вблизи возбуждённого атома, он взаимодействует с электронами атома, используя при этом их электромагнитные поля. Колеблущееся электромагнитное поле ИФ резонирует с энергетическим состоянием возбуждённого электрона. Это заставляет электрон колебаться в фазе с полем ИФ. В результате резонанс вызывает переход возбуждённого электрона в более низкое энергетическое состояние, сопровождающееся излучением фотона. Испускаемый фотон имеет ту же энергию, частоту, фазу и направление, что и ИФ. Таким образом, получаются два идентичных фотона: один инициирующий фотон (ИФ) и другой, вновь испущенный. Такое излучение получило название «Stimulated Emissions» – «стимулированное или вынужденное излучение» (рис. 3) [16].

Этот сложный квантово-механический процесс «Stimulated Emissions» описывается с помощью нестационарной теории возмущений для случая, когда поле падающего фотона действует как триггер волновой функции атома, вызывающий переход в состояние с более низкой энергией. Теоретическое объяснение процесса «Stimulated Emissions» представляет собой достаточно сложный раздел квантовой электродинамики и выходит за рамки нашей статьи. Дополнительную информацию по этому вопросу можно найти, например, в объёмной монографии [17].

Самым важным в «эффекте вынужденного излучения» является то, что

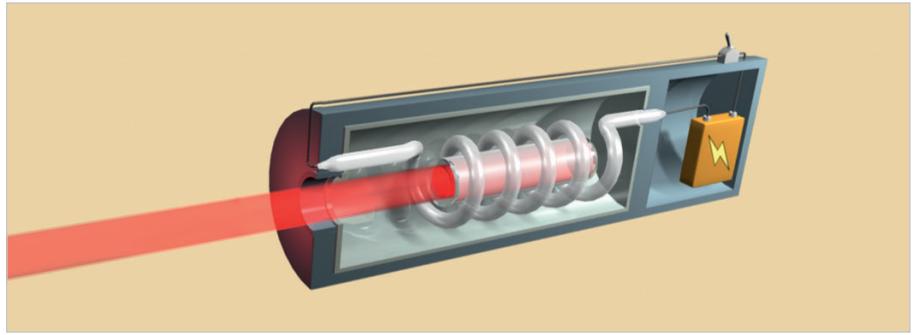


Рис. 5. Схема рубинового лазера Меймана

второй фотон имеет ту же частоту, направление и фазу, что и первый ν_{21} . В этом случае говорят, что оба фотона «когерентны». Это свойство является одним из базовых для всех типов лазеров.

Первыми в мире пути реализации изложенных выше идей Эйнштейна предложили советские физики Николай Басов и Александр Прохоров из Физического института имени Лебедева. На Всесоюзной конференции по радиоспектроскопии АН СССР в мае 1952 года они впервые сформулировали концепцию использования вынужденного излучения для усиления и генерации миллиметрового и сантиметрового диапазонов. Суть их предложения заключалась в том, что для достижения вынужденного излучения необходимо создать состояние с инверсией электронных населённостей (ИЭН) в активной среде.

Следует упомянуть, что среди докладчиков этого совещания была группа американских физиков во главе с Чарльзом Таунсом, которая занималась аналогичными вопросами [18].

В июне 1953 года Джозеф Вебер из Мэрилендского университета опубликовал статью в журнале «Transaction of the Institute of Radio Engineers Professional Group on Electron Devices», в которой рассматривались вопросы, связанные с использованием инверсии населённости между вращательными уровнями молекул, необходимой для создания микроволнового излучения.

Кроме того, Вебер описал конструкцию оптического резонатора, который был необходим для усиления излучения и создания когерентного микроволнового сигнала [19].

В 1953 году Чарльз Таунс (Charles Hard Townes) со своими коллегами Джеймсом Гордоном (James P. Gordon), Гербертом Зейгером (Herbert J. Zeiger) из Колумбийского Университета

(Columbia University) продемонстрировали работу первого в мире микроволнового усилителя электромагнитного излучения с помощью вынужденной эмиссии – Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. В дальнейшем аббревиатура по первым буквам «MASER» утвердилась как общее название этого класса устройств. В лабораторном макете этого устройства, генерировавшего когерентное излучение микроволн на частоте около 24 ГГц, использовалось вынужденное излучение в потоке возбуждённых молекул аммиака.

На рис. 4 показано, как Чарльз Таунс настраивает свой лабораторный образец установки «Maser» [20].

В качестве активной среды в мазере Таунса использовался поток молекул аммиака, который был выбран из-за хорошо изученной к тому времени его молекулярной структуры и энергетических уровней.

Молекулы аммиака в потоке пропускались через электрическое поле, которое разделяло молекулы, находящиеся в возбуждённом состоянии, от молекул в основном состоянии. Затем возбуждённые молекулы направлялись в резонансную полость, где реализовывалось состояние с инверсией электронных населённостей (ИЭН) и процесс стимулированного излучения на резонансной частоте. По мере того, как всё больше молекул испускали когерентное излучение, происходила стимуляция других молекул, что приводило к многократному усилению вынужденного когерентного излучения, все волны которого находились в одной фазе.

Микроволны частотой 24 ГГц выводились через вертикальный волновод, показанный на рис. 5.

Мазер Таунса позволял получить на уровне крайне низких шумов излучение с исключительно чистым частотным выходом, который был гораздо

более точным, чем другие микроволновые источники, доступные в то время.

Эта работа Таунса была революционной, поскольку она впервые предоставила новый способ генерации и усиления когерентных электромагнитных волн с беспрецедентной частотной точностью [21].

В 1954 году в статье «Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул», опубликованной в журнале «ЖЭТФ» в 1954 году, Басов и Прохоров изложили ключевые идеи, которые легли в основу создания мазеров и лазеров [23].

В этой статье они обосновали схему использования резонатора, настроенного на частоту перехода между энергетическими уровнями молекул, для получения инверсии электронных населенностей (ИЭН) энергетических уровней в молекулах, необходимой для обеспечения вынужденного излучения.

Другой важный аспект этой работы заключался в описании общих принципов создания генераторов когерентного электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне.

Таким образом, можно говорить, что Николай Басов и Александр Прохоров разработали нелинейную теорию молекулярного генератора, которая объясняла механизмы генерации и усиления электромагнитного излучения. Эти базовые положения стали одной из основ для нового направления в квантовой электронике. За исследования в этой области Басов, Прохоров и Таунс получили Нобелевскую премию по физике в 1964 году [23].

Однако в то время мощность первых мазеров, работавших в СВЧ-диапазоне, составляла всего лишь единицы нановатт, что не позволяло использовать их в каких-либо реальных прикладных целях. Много позже, спустя десятилетия, идеи Басова, Прохорова и Таунса были реализованы в военных и прикладных отраслях СВЧ-техники. Сегодня существуют разные типы мазеров различных конструкций, среди которых можно назвать, например, атомные лучевые мазеры, аммиачный мазер, водородный мазер, твердотельные мазеры, мазер на циклотронном резонансе (гиротрон).

Современные мазеры, адаптированные под конкретные виды приложений, излучают не только в микровол-

новом диапазоне, но также в широком электромагнитном спектре. Так, мазеры используются для высокоточных стандартов частоты. Эти «атомные стандарты частоты» являются одной из форм атомных часов. Мазеры также используются в качестве электронных усилителей в радиотелескопах.

В качестве примера экзотических работ в области мазеров можно отметить так называемые «природные космические мазеры».

Космические мазеры – это области в космосе, которые усиливают микроволновое излучение с помощью процесса вынужденного излучения аналогично тому, как работают искусственные мазеры. Однако космические мазеры могут иметь размеры, превышающие нашу Солнечную систему [24].

Схема действия точно такая же, как и у искусственных мазеров: 1) в возбужденном состоянии находится больше молекул, чем в основном состоянии (инверсия населенности); 2) входящий фотон вызывает высвобождение большего количества фотонов на той же частоте и фазе (вынужденное излучение); 3) многократное повторение процесса приводит к усилению исходного сигнала. С помощью космических мазеров в далёких галактиках зарегистрированы такие молекулы, как, например, вода (H_2O), гидроксильный радикал (ОН), монооксид кремния (SiO), метанол (CH_3OH) и другие.

Реализация на практике мазера стимулировала исследования в этом направлении. Однако требования мирового рынка склонялись к подобным устройствам, но работающим в оптическом диапазоне.

Поэтому большинство учёных сосредоточились на поисках вариантов создания подобных генераторов когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона.

Впервые реальный «когерентный технический свет» был получен в 1960 году Теодором Мейманом, который создал устройство, представлявшее собой генератор-усилитель когерентных световых колебаний (Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation – Laser). Этот первый лазер излучал красный когерентный свет с длиной волны 694,3 нанометра.

В качестве активной среды в этом устройстве использовался искусствен-

ный рубин, представлявший собой кристалл оксида алюминия, легированного атомами хрома (Al_2O_3-Cr).

В самом первом варианте своего лазера Мейман использовал яркую лампу с эллипсоидным рефлектором для создания избытка возбуждённых атомов в инверсном слое (т.е. оптической накачки). Однако надёжность такого лазера была очень низкой. Поэтому в следующем варианте оптическая накачка была реализована с помощью сверхъярких стробоскопических ламп (фотовспышек). Таким образом, лазер Меймана стал работать в импульсном режиме. Упрощённая схема рубинового лазера показана на рис. 5 [25].

Для возбуждения атомов хрома применялась ксеноновая импульсная лампа накачки, изготовленная в виде спирали, внутри которой находится рубиновый стержень. При поглощении фотонов, испускаемых импульсной лампой, атомы хрома переходят сначала на верхний возбуждённый уровень, а затем на метастабильный уровень, где задерживаются на доли микросекунды, создавая состояние с инверсией электронных населенностей. Дальше процесс продолжался по описанной выше «схеме стимулированного излучения», которая вызывала лавинообразный переход атомов хрома из метастабильного состояния в основное, сопровождавшийся потоком когерентных фотонов с одной длиной волны 694,3 нм.

Торцы рубинового стержня были закрыты двумя зеркалами, одно из которых было полупрозрачным. Фотоны, генерируемые в активной среде, многократно отражались между зеркалами, усиливаясь за счёт вынужденного излучения. Когда количество фотонов достигало критического уровня, они проходили через полупрозрачное зеркало, создавая когерентный монохроматический свет [26, 27].

Предложенная Теодором Мейманом схема имела ряд недостатков, главными из которых были низкая эффективность, громоздкость и сложность управления.

Поэтому конструкция непрерывного рубинового лазера Меймана не получила широкого развития, уступив место другим лазерным технологиям. Однако его работы стали важной вехой в истории создания первого практического лазера.

Тем не менее успешная реализация самой идеи генераторов когерентного света вдохновила других учёных. Во всем мире стали появляться новые конструкции лазеров.

В 1961 году американские физики Франкен (P.A. Franken), Хилл (A.E. Hill), Питерс (C.W. Peters) и Вайнрайх (G. Weinreich), облучая кварцевый кристалл с помощью рубинового лазера с длиной волны 694 нм, обнаружили формирование новых фотонов с удвоенной энергией и длиной волны вдвое меньше начальной, то есть 347 нм. Это явление, получившее название «Second Harmonic Generation – SHG», фактически стало важным основополагающим моментом в развитии нового направления нелинейной оптики. В частности, эффект SHG используется при разработке лазеров с короткими длинами волн УФ-диапазона [28].

К середине 1960-х лазерная тематика стала очень популярной во всём мире. В развитых странах насчитывалось в сумме больше пятисот лабораторий, занимавшихся этой проблемой, среди которых можно назвать такие известные западные фирмы, как General Electric, IBM, MIT, Bell Lab, IBM, RCA, Lincoln Labs, Westinghouse, Siemens, TRG [29].

В 1961 году физики из Bell Lab Али Джаван (Ali Javan), Уильям Беннетт (William Bennett), Дональд Херриотт (Donald Herriott) опубликовали статью с результатами успешного испытания изготовленного ими газового лазера. В этом лабораторном макете в качестве активного вещества использовалась смесь газов гелия и неона, размещённых в стеклянной трубке. Лазер работал следующим образом. На первом этапе с помощью высоковольтного электрического разряда, возникающего между электродами, размещёнными в полости трубки, происходит ионизация газа.

Атомы гелия переходят в метастабильное состояние, а затем через неупругие столкновения передают свою энергию атомам неона. Такой процесс перевода неона в возбуждённое состояние становится возможным, поскольку энергия метастабильного состояния гелия и энергия эмиссионного уровня неона практически совпадают. В результате многократного повторения актов возбуждения неона создаётся инверсия населённости, обуславливающая вынужденное излучение. Первый гелий-неоновый



Рис. 6. Лабораторный гелий-неоновый газовый лазер [33]

лазер излучал когерентный свет в инфракрасном спектре на длине волны 1,15 мкм [30].

Через два года Алан Дэвид Уайт (Alan David White) и Дейн Ригден (Dane Rigden) продемонстрировали гелий-неоновый лазер, работающий в видимом диапазоне спектра на длине волны 632,8 нм [31].

Первые газовые лазеры имели достаточно большие размеры. Рабочий газ находился в герметичной трубке с зеркальными резонаторами на торцах (рис. 6). У этих газовых лазеров были свои недостатки, и прежде всего, небольшие мощности, необходимость криогенного охлаждения, а также непрерывной прокачки газовой смеси.

В СССР лазерной тематике уделялось очень большое внимание. Разработки лазеров проводились как в академических, так и в отраслевых институтах, например, ФТИ имени Иоффе, ФИАН, НИИ-333 (ныне НИИ «Полус»), НПП «Сапфир», НИИ-311, завод «Старт» и других организациях. Во многом интерес к этой теме был связан с мифом о «лучах смерти», способных уничтожать любые типы ракет. В соревновании за первенство в этой области Советский Союз уступал только США [32].

В 1960-е гг. в ФИАН имени П.Н. Лебедева и в ИРЭ АН были разработаны образцы газовых лазеров. В течение следующих нескольких лет в СССР появлялись

собственные конструкции мощных и эффективных аргоновых и углекислотных лазеров. Позже советские эксимерные и химические газовые лазеры стали активно использоваться в промышленности, приборостроении, медицине, химическом производстве и многих других областях [34].

Однако в начале 1960-х гг. широкомасштабное внедрение лазеров в повседневную жизнь сдерживалось недостатками существующих конструкций, а также невозможностью наладить массовое производство.

Необходимы были миниатюрные надёжные сертифицированные лазеры, производство которых могло бы быть организовано так, как это выглядело тогда для транзисторов.

Поэтому понемногу становились всё более актуальными идеи Николая Басова, предложившего в 1961 году использовать для создания твердотельных инжекционных лазеров с p-n-переходами «вырожденные полупроводники» с очень высокой концентрацией примесей [35].

В таких вырожденных полупроводниках уровень Ферми находится на расстоянии не более kT от границ разрешённых зон. Поэтому, благодаря эффекту экранирования примесных атомов свободными носителями заряда, энергия ионизации примесных атомов снижается практически до нуля [36].

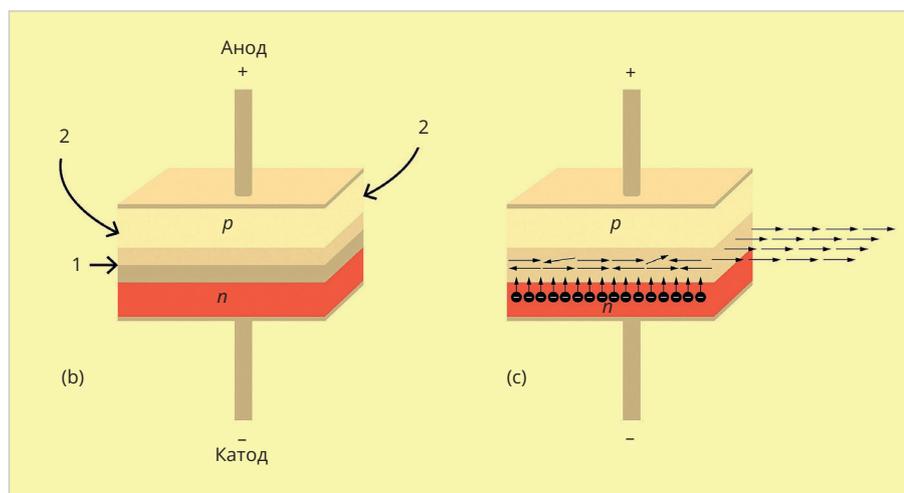


Рис. 7. Структурная схема лазерного диода [44]: 1 – p-n-переход; 2 – полированные грани

Необходимо отметить, что к аналогичным выводам одновременно и независимо пришли Морис Бернар (Maurice G.A. Bernard) и Жорж Дюрафур (Georges Duraffour) [37].

В 1961 году Джеймс Байярд (J.R. Biard) и Гарри Питтманон (Gary Pittman) из Texas Instruments запатентовали схему полупроводникового излучающего светодиода (Semiconductor Radiant Diode) на основе арсенида галлия, содержащего один (p-n) переход, образованный областями с разными степенями легирования.

В описываемом изобретении предлагалось использование сильно легированной ($> 5 \cdot 10^{18}$ акцепторных атомов/см³) области «р-типа». При этом область «n-типа» должна иметь низкий уровень легирования (от $5 \cdot 10^{16}$ до $2 \cdot 10^{18}$ донорных атомов/см³).

При прямом смещении за счёт рекомбинации электронов и дырок вблизи p-n-перехода диод должен излучать рассеянный невидимый глазу свет в ближнем инфракрасном диапазоне в соответствии с «эффектом Лосева» (спонтанная излучательная рекомбинация в p-n-переходах полупроводников) [38].

Авторы отмечают, что световой выход должен зависеть от степени легирования и от температуры.

Ценность этого изобретения заключалась в том, что была предложена конструкция на базе вырожденного полупроводника, излучавшего инфракрасный свет, обусловленный рекомбинациями носителей из p-n-перехода арсенида галлия при приложенном напряжении смещения [39].

Этот патент был одним из промежуточных шагов в истории развития твердотельных лазеров, за которым

последовал калейдоскоп событий, резко изменивший мир лазеров.

На конференции по исследованию твердотельных приборов в Дареме, штат Нью-Гэмпшир, США, проходившей 9 июля 1962 года, Роберт Дж. Кейес (Robert J. Keyes) из Массачусетской технологической лаборатории Линкольна в своём докладе показал, что в их экспериментах наблюдалась интенсивная люминесценция от p-n-переходов арсенида галлия (GaAs) с квантовой эффективностью порядка 85% при охлаждении до 77 К.

Квантовый выход, определяющий эффективность, с которой инжектированные электроны и дырки рекомбинируют с излучением фотонов, в 85% означает, что почти каждая рекомбинация пары электрон-дырка приводит к излучению фотона. Таким образом, в докладе было показано, что арсенид галлия (GaAs) может быть использован для полупроводниковых инжекционных лазеров.

На следующий день после окончания конференции её презентация с описанием наиболее интересных результатов была опубликована в «The New York Times». Таким образом, доклад Кейеса получил широкую огласку, стал своеобразным стартовым выстрелом в гонку за твердотельными полупроводниковыми лазерами [40].

В течение следующих нескольких месяцев четыре исследовательские группы независимо друг от друга работали и продемонстрировали свои варианты полупроводниковых инжекционных лазеров.

Одновременно 1 ноября 1962 года были опубликованы две статьи в двух разных журналах. В журна-

ле «Physical Review Letters» команда американских физиков под руководством Роберта Холла (Robert N. Hall) из «General Electric Research Laboratory, Schenectady, New York» представила свои разработки лазерного диода на основе арсенида галлия, излучавшего когерентный свет в инфракрасном диапазоне. Их статья была принята и зарегистрирована журналом «Phys. Rev. Lett» 24 сентября 1962 года и опубликована 1 ноября 1962 года в 9 номере этого журнала [41].

В другом журнале «Applied Physics Letters» также именно 1 ноября 1962 года появилась статья, в которой сотрудники «IBM Watson Research Lab» Маршалл Натан, Уильям Дамке, Джеральд Бернс и Фредерик Дилл сообщали о результатах своих экспериментов, в которых наблюдалось стимулированное излучение из GaAs p-n-переходов. Статья была принята журналом 4 октября [42].

Несмотря на многочисленные споры, формальный приоритет открытия лазерного диода, согласно фактическим датам публичного представления работы (дата получения журналом), принадлежит именно Ричарду Холлу и его команде. Кроме того, поданная им 24 октября 1962 года заявка на изобретение лазерного диода была удовлетворена в 1966 году [43]. Поэтому имеет смысл остановиться на изобретении Ричарда Холла немного подробнее.

В заявке на изобретение Холл описывает своё устройство как «полупроводниковые диоды, предназначенные для получения когерентного стимулированного излучения, изготовленные на основе вырожденных полупроводников, легированных примесями, создающие зоны N- и P-типа, разделённые очень тонким p-n-переходом».

Слово «диод» подчёркивает стандартную схему полупроводникового p-n-перехода, аналогичную той, которую предложил Джеймс Байярд. Словосочетание «когерентное стимулированное излучение» подразумевает лазер. Из этих двух выражений позже образовалось и укоренилось название «лазерный диод» – «Laser Diode» Используется иногда также русский перевод – «диодный лазер».

В базовой статье [41] описывается диод с прямым смещением p-n-перехода на основе арсенида галлия (GaAs), изготовленный в виде куба со стороной 0,4 мм. Структурная схема

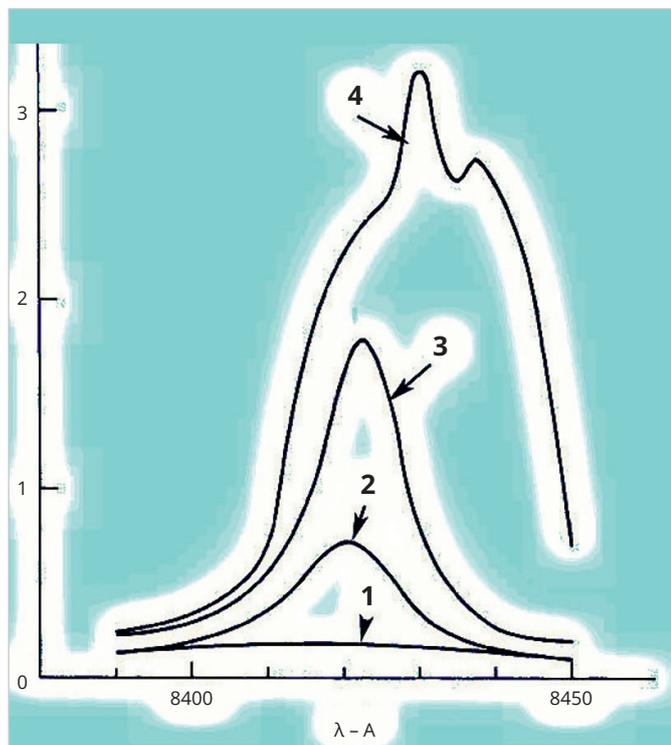


Рис. 8. Спектры излучения для лазерного диода Холла в зависимости от плотности тока смещения: 1 – 6000 А/см²; 2 – 8600 А/см²; 3 – 10 400 А/см²; 4 – 20 000 А/см²

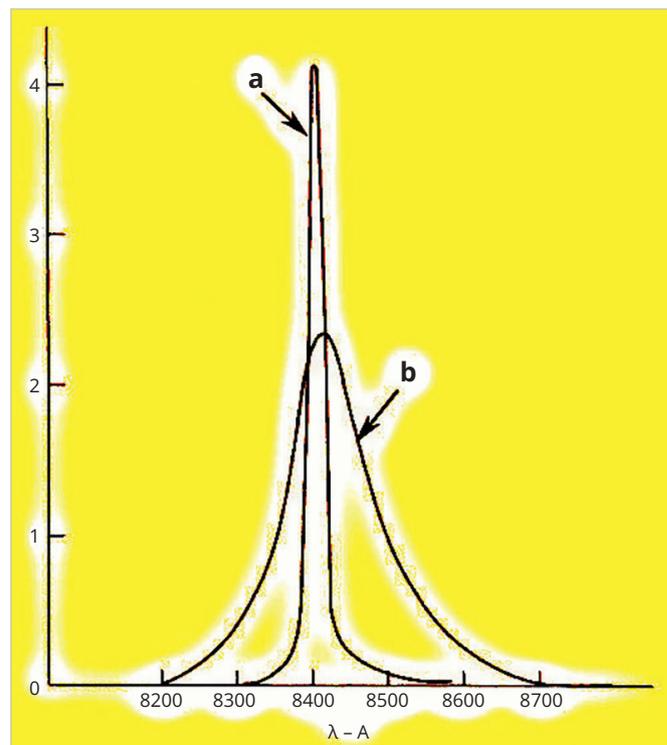


Рис. 9. Измеренные зависимости интенсивности излучения от частоты для различных диапазонов плотности тока смещения: a – пороговое значение плотности тока; b – диапазоны до и после порогового значения тока смещения

лазерного диода Холла в принципе не отличается от схемы светодиода Байярда, за исключением резонатора. В самой статье нет рисунка конструкции диода Холла. Однако во всех рассматриваемых четырёх пионерских работах использовалась в принципе одна и та же структурная схема, которая стала общепринятой для иллюстрации работы лазерного диода (рис. 7).

На середине конструкции была расположена плоскость тонкой области арсенидогаллиевого р-п-перехода, полученного с помощью стандартного метода с диффузией цинка. Для смещения перехода использовался прямой импульсный ток с длительностью импульсов от 5 до 20 мкс (плюс подаётся на р-зону, минус на п-зону). Тщательно отполированные передняя и задняя грани создавали необходимые резонансные условия для спектрального диапазона, в котором возможно было существование стимулированного излучения. Расстояние между этими гранями определяло параметры стоячей волны, возникающей в этой зоне. Вся конструкция была размещена в ёмкости с жидким азотом (–196°С). Инжекция носителей заряда в зону перехода реализовывалась подбором плотности тока смещения.

Электроны, диффундировавшие в зону проводимости, комбинировали с дырками, испуская фотоны. При подаче импульсов прямого смещения, создающих токи с большими плотностями (> 1000 А/см²), начиная с некоторого значения наблюдалось слабое свечение через боковые отполированные поверхности. Инверсия заселённости возникала за счёт резонансных явлений, вызываемых в зоне между отполированными гранями.

Когерентность излучения лазерного диода Холла была подтверждена также экспериментами с устройствами преобразования инфракрасного излучения в диапазоне видимого света, который фиксировался с помощью скоростной фотосъёмки. На полученных фотографиях отчётливо были видны вертикальные полосы, которые обусловлены интерференцией между волнами, излучаемыми в различных точках вдоль края перехода на передней грани куба. Их появление говорит о том, что существовало определённое фазовое соотношение между излучением, исходящим из различных точек вдоль перехода. При этом угловое разделение между интерференционными максимумами было согласовано с размерами перехода и длиной волны излучения. Эти факторы также свидетельствова-

ли о когерентности зарегистрированного инфракрасного излучения.

Теоретическое описание механизма стимулированного когерентного излучения света на тот момент времени не было разработано. Однако авторы предположили, что когерентное стимулированное излучение было обусловлено переходами электронов между зонами, имеющими состояния с аналогичным волновым числом.

На рис. 8 показаны спектры излучения для лазерного диода Холла в зависимости от плотности тока смещения. (Ось абсцисс – длина волны в ангстремах. Ось ординат – интенсивность излучения в относительных единицах.)

В диапазоне плотностей тока от 1000 А/см² до 8000 А/см² интенсивность излучения увеличивается практически линейно. В районе плотности тока около 8600 А/см² интенсивность излучения резко возрастает, что характерно для начала вынужденного излучения. На когерентность излучения при плотностях тока в диапазоне от 8500 А/см² до примерно 9000 А/см² указывает то, что в этой области интенсивность увеличивается почти в пятьдесят раз. Измеренные зависимости интенсивности излучения от частоты при пороговых

значениях плотности тока показали наличие резкого узкого пика в районе 8420 ангстрем (инфракрасный свет) при ширине на половине высоты приблизительно 15 ангстрем (рис. 9).

В целом можно говорить о том, что Роберт Холл со своими коллегами первыми официально продемонстрировали когерентное инфракрасное излучение, испускаемое изобретённым ими «лазерным диодом» на основе GaAs.

Что касается упомянутой выше статьи М. Натана [42], также опубликованной 1 ноября 1962 года, то в их работе использовалась диодная схема, аналогичная представленной на рис. 7. Диод размещался на золочёной шайбе из кобальта. Арсенид-галлиевый переход, полученный с помощью диффузии цинка, легированного теллуrom, занимал площадь примерно $1 \cdot 10^{-4}$ см². Вся система охлаждалась жидким азотом. Инжекция осуществлялась с помощью импульсов тока длительностью 50 нс, создающих высокие плотности. Инфракрасное излучение с длиной волны около 840 нм, исходящее из отполированных граней, перпендикулярных плоскости р-п-перехода, регистрировалось с помощью дифракционного решётчатого спектрометра Perkin Elmer.

Ровно через месяц 1 декабря 1962 года физики из другой лаборатории «General Electric Advanced Research Laboratory», расположенной в городе Сиракузы штата Нью-Йорк, Ник Холоньяк (Nick Holonyak) и его технический ассистент Сэм Беваква опубликовали в том же журнале «Appl. Phys. Lett» результаты своих исследований по этой теме. В статье они сообщили об успешном испытании изготовленного ими полупроводникового лазерного диода, излучавшего при криогенных температурах когерентный красный свет в видимой области спектра [45].

В отличие от других работ, Холоньяк использовал арсенид-фосфид галлия $Ga(As_{1-x}P_x)$. Это тройное соединение полупроводника, полученное путём сплавления арсенида галлия (GaAs) с фосфидом галлия (GaP). Изменяя состав (представленный как «х» в формуле), исследователи могли настраивать ширину запрещённой зоны материала и, следовательно, длину волны излучаемого света. В результате группе Холоньяка удалось создать лазерный диод, генерирующий когерентное излучение с

длиной волны около 600 нм в видимом диапазоне.

В этом же номере журнала «Appl. Phys. Lett. 1», вышедшем 1 декабря 1962 года, авторы из Массачусетского технологического института Т.М. Квист, Р.Х. Редикер, Р.Дж. Кейес, В.Э. Краг, Б. Лакс, А.Л. Маквортер, Х.Дж. Зейглер представили результаты своих экспериментов по обнаружению когерентного стимулированного излучения от арсенид-галлиевого р-п-перехода с прямой инжекцией. Статья была принята редакцией 5 ноября 1962 года. В своих экспериментах эти авторы использовали GaAs диод с р-п-переходом, имевшим размеры $1,6 \times 0,4$ мм. Излучение диода фиксировалось с помощью инфракрасного визора, что давало возможность прямого визуального подтверждения когерентного излучения диода.

Кроме того, что они подтвердили результаты, полученные Робертом Холлом при охлаждении жидким азотом (77 К), им также удалось зафиксировать инфракрасное когерентное излучение при температуре 4,2 К. В случае охлаждения жидким азотом порог стимулированного излучения соответствовал плотности тока смещения, примерно $1 \cdot 10^4$ А/см². При температуре 4,2 К порог был зафиксирован примерно на уровне 760 А/см². Тем не менее целесообразно упомянуть, что интенсивность излучения при 4,2 К была, по крайней мере, на порядок меньше по сравнению с режимом охлаждения до азотных температур [46].

Более подробное описание истории исследований по лазерной тематике, проведённых «MIT Lincoln Laboratory», можно найти в статье [47].

Кроме того, история разработок первых лазерных диодов детально изложена в обзоре [48].

Подводя итог этому краткому описанию истории развития лазеров, в котором опущены некоторые не столь значительные этапы, можно сказать, что рассмотренные выше четыре статьи, по существу, описывают первый этап разработок полупроводниковых инжекторных лазеров. Эти лазерные диоды с одним прямым р-п-переходом (гомопереходом) излучали стимулированное когерентное излучение в инфракрасной области спектра только при охлаждении жидким азотом (77 К). Однако при комнатной температуре эти устройства работали как обычные светодиоды и излучали неко-

герентный, размытый видимый свет в красной области спектра.

В течение двух следующих лет многочисленные попытки повторения и усовершенствования моделей лазерных диодов «Холла – Натана – Холоньяка – Куиста» показали, что эта конструкция хотя и является надёжной и легко воспроизводимой, тем не менее обладает рядом непреодолимых конструкторских и технологических недостатков. Несмотря на многочисленные усовершенствования самой конструкции лазерного диода и технологии изготовления его базовых элементов, основные претензии предъявлялись к высоким порогам возбуждения, необходимости охлаждения до криогенных температур, импульсному режиму работы, низкому КПД, высокой расходимости светового луча, малому сроку службы и низкой надёжности. Бурно развивающаяся теория, объясняющая стимулированное когерентное излучение р-п-перехода, позволила сделать выводы о том, что описанные выше недостатки были обусловлены использованием сильнолегированного вырожденного полупроводника, что вызывало расползание инжектированных электронов в неактивные зоны и бесполезные их потери.

Эти недостатки, имевшие объективный характер, казались для большинства столпов старой лазерно-мазерной школы в принципе непреодолимыми.

Прорыв совершил молодой, малоизвестный мировой науке советский физик Жорес Алфёров. В заявке на изобретение, поданной в 1963 году, он предложил схему «полупроводникового лазера с электрической накачкой».

Идея этого изобретения заключалась в том, что излучающий элемент предлагался в виде комбинированной полупроводниковой структуры, которую позже американская пресса назвала «алфёровским сэндвичем из полупроводников». Активный полупроводник с узкой запрещённой зоной был зажат между двумя проводниками с более широкой запрещённой зоной. В тонком слое между этими полупроводниками возбуждалось состояние с инверсией электронных населённости, которое в итоге вызывало стимулированное когерентное излучение.

Подробно «гетерогенные лазеры Алфёрова» будут рассмотрены во второй части статьи.

Литература

1. Алфёров Ж.И. Международный объединённый биографический центр. URL: <http://biograph.ru/index.php/whoiswho/1/4742-alferov>.
2. Алфёров Ж.И. СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». URL: <https://etu.ru/ru/muzej/vydayushhiesya-uchenyeh/alferov-z-i>.
3. Ioffe A.F., Regel A.R. Journal Prog. Semicond, v. 4, p. 237, 1960. URL: <https://bit.ly/4g3j9MX>.
4. Губанов А.И. Теория выпрямляющего действия полупроводников. М., 1956. URL: <https://bit.ly/3M9tsB1>.
5. Алфёров Ж.И., Казаринов Р.Ф. Авторское свидетельство № 181737, 30 марта 1963, PatentDB. URL: <https://patentdb.ru/patent/181737>.
6. Kroemer H. Proc. IEEE, v 51, 1963. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1444636>.
7. Laureate 2000. URL: <https://web.ece.ucsb.edu/Faculty/Kroemer/pubs.html>.
8. Алфёров Ж.И. и др. Патент 000224_000128_0000521806_19770825_A1_SU, 1977. Полупроводниковый лазер с гетеропереходами, Приоритет 06.11.1973. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000521806_19770825_A1_SU/?ysclid=m06r3qfm-ro387134298.
9. Grundmann M., Christen J., Ledentsov N.N., Böhrer J., Bimberg D., Ruvimov S.S., Werner P., Richter U., Gösele U., Heydenreich J., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I. Ultranarrow luminescence lines from single quantum dots. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.74.4043>.
10. Алфёров Ж.И., Гордеев Н.Ю., Зайцев С.В. и др. Физика и техника полупроводников. М., 1996. Т. 30. С. 357–363. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/34218>.
11. Receiving the Nobel Prize from King Carl XVI Gustaf in Stockholm. Henrik Montgomery/Pressens Bild, via Associed Press. URL: <https://www.nytimes.com/2019/03/02/obituaries/zhores-alferov-dead.html>.
12. Ж.И. Алфёров. Библио-Глобус. 2020. URL: <https://www.biblio-globus.ru/product/10660720>.
13. Волоконно-оптические линии связи. URL: <https://isoit.ru/service/volonno-opticheskie-linii-svyazi/>.
14. Zhores Alferov, Nobel Winner. The New York Times, March 2, 2019. URL: <https://www.nytimes.com/2019/03/02/obituaries/zhores-alferov-dead.html>.
15. Вынужденное излучение. URL: <https://bit.ly/3XvrUrJ>.
16. Scientific Volume Imaging. URL: <https://svi.nl/StimulatedEmission>.
17. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Пятаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989. URL: <http://bit.ly/3XxiMTu>.
18. Басов Н.Г. РМП 2017. URL: <https://lebedev.ru/data/books/Basov.pdf>.
19. Weber J. URL: <https://eng.umd.edu/ihof/joseph-weber>.
20. «MASER» by Charles Townes. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Maser#/media/File:Charles_Townes_and_first_maser.jpg.
21. PRJ ARCHIVE, Gordon J.P., Zeiger H.J. and Townes C.H. Phys. Rev. 95, 282 – Published 1 July 1954. URL: <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.95.282>.
22. ЖЭТФ 27, 431 (1954). URL: <http://quantum.phys.uni-sofia.bg/phonics/Lasers/Beginning-of-the-Laser-Era-in-the-USSR.pdf>.
23. Мазеры. URL: <https://bit.ly/4geH8ss>.
24. Космические мазеры. URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1979/6/e/>.
25. Ruby Laser. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Ruby_laser_beam.png.
26. Первый лазер в истории – каким он был. URL: <https://habr.com/ru/articles/430900/>.
27. Применение лазеров. URL: <https://bit.ly/3AKqWix>.
28. Franken P.A., Hill A.E., Peters C.W., Weinreich G. Generation of Optical Harmonics, Physical Review Letters, 1961. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.7.118>.
29. Anderson R.L. Germanium-Gallium Arsenide Heterojunctions, IBM, Journal, 1960. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5392495>.
30. Javan A. et al. Physical Review Letters, v.6, Issue 3, 1961. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.6.106>.
31. White A.D., Gordon E.I. Applied Physics Letters, Volume 3, Issue 11, p. 197–199, 1963. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1963ApPhL...3..197W/abstract>.
32. Лазерное оружие: технологии, история, состояние, перспективы. URL: <https://topwar.ru/155326-lazer-noe-oruzhie-tehnologii-istorija-sostojanie-perspektivy-chast-1.html>.
33. He-Ne laser. URL: http://c4r0.byethost9.com/lasers/hene04_big.jpg.
34. Академик Николай Геннадиевич Басов. URL: <https://izv-fiz.ru/ru/basov-100/>.
35. Басов Н.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М. УФН 72 161–209 (1960). URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1960/10/a/>.
36. Журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 40, 1961 год. URL: <https://bit.ly/3B4DqBD>.
37. Maurice G.A. Bernard, Georges Durafourg. Laser Conditions in Semiconductors, 1961. URL: <https://doi.org/10.1002/pssb.19610010703>.
38. Лосев Олег Владимирович, Wikipedia. URL: <https://bit.ly/4e6xeXU>.
39. Semiconductor Radiant Diode. US Patent. #3.293.513. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7d/90/87/4a6cb43a592c56/US3293513.pdf>.
40. Early Work at Lincoln Laboratory on GaAs Semiconductor Devices. URL: https://archive.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol02_no1/2.1.1.earlywork.pdf.
41. Hall R.N., Fenner G.E., Kingsley J.D., Soltys T.J. and Carlson R.O. Light Emission From GaAs Junctions, Phys. Rev. Lett. 9, 366 – Published 1 November 1962. URL: <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.9.366>.
42. Marshall I. Nathan et al. Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions. Appl. Phys. Lett. 1, 62 (1962). URL: <https://bit.ly/4d69e6r>.
43. Hall R.N. Patent US # 3245,002. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a5/b0/7f/40f65021c43c80/US3245002.pdf>.
44. Lase Diod Diagram. URL: <https://bit.ly/3MJQr6i>.
45. COHERENT (VISIBLE) LIGHT EMISSION FROM Ga (As_{1-x}P_x) JUNCTIONS. Appl. Phys. Lett. 1, 82–83 (1962). URL: <https://bit.ly/3zsHwCX>.
46. Quist T. et al. SEMICONDUCTOR MASER OF GaAs, Appl. Phys. Lett. 1 (4): 91–92, 1 December 1962. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1753710>.
47. Rediker R.H. Early Work at Lincoln Laboratory on GaAs Semiconductor Devices. The Lincoln Laboratory Journal, v 2, Number 1 (1989). URL: https://archive.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol02_no1/2.1.1.earlywork.pdf.
48. Hecht J. The Birth of the Diode Laser, Optics and Photonics News Vol. 18, Issue 7, pp. 38–43 (2007). URL: <https://doi.org/10.1364/OPN.18.7.000038>. 