

621. 378. 3 (09)

**КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
В ФИЗИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. П. Н. ЛЕБЕДЕВА АН СССР*)****Н. Г. Басов**

Прошедшие с момента возникновения лазеров 25 лет без преувеличения можно назвать «золотым веком» квантовой электроники. Создание лазеров не только коренным образом изменило оптику, но и оказало огромное влияние на многие области современной физики, химии, кибернетики, биологии, медицины, технологии. Сейчас мы видим, что когерентный свет открыл новые, совершенно неожиданные возможности для решения кардинальных проблем нашей бурно развивающейся цивилизации — энергетической, информационной, технологической. Широкое использование лазеров означает качественное преобразование в производительных сферах общества, подобное внедрению в производство и жизнедеятельность человека электричества.

Многоликость современной квантовой электроники не позволяет мне построить доклад в логически замкнутой, классической форме даже при сужении темы до исторического обзора работ в Физическом институте им. П. Н. Лебедева **) Мне придется, подобно художнику-импрессионисту, отдельными нелогичными мазками попытаться нарисовать цельную картину. По-видимому, в данной ситуации развития наука для своего выражения должна заимствовать форму у искусства. Во всяком случае нужны новые формы. Прежде всего мне хочется показать слайд, в какой-то мере отражающий «древнюю» историю квантовой электроники, — список научных идей и событий (табл. I).

Всех перечисленных выше ученых я знаю или лично, или по работам. За прошедшие годы квантовая электроника обогатилась неисчислимым количеством достижений и огромным отрядом пришедших в нее людей. Например, в ФИАНе сейчас в области квантовой электроники работает около тысячи человек, а с большинством докладчиков нашей конференции я не знаком не только лично, но и по работам. Такое знакомство уже не под силу одному человеку. Квантовая электроника стала многоликой в буквальном смысле этого слова.

С чего мы начинали работы по созданию лазеров в нашем Физическом институте? После того, как понятие кванта прочно укрепилось в радиотехнике (1956) и были созданы генераторы и усилители сантиметрового диапазона, у нас возникла прямо противоположная идея. Что, если, наоборот, перенести радиотехнические понятия в сугубо квантовый мир — в оптику. Мы много думали об использовании трехуровневой системы и оптической накачки для получения инверсии. Мы также ясно поняли, что для создания генераторов в оптическом диапазоне нужны квантовые системы с инверсией

*) Текст доклада, прочитанного 21 мая 1985 г. на Международной конференции CLEO '85, посвященной 25-летию годовщине квантовой электроники. Балтимор, США.

**) Большой объем работ в области квантовой электроники выполнен сотрудниками отделения А ФИАН, на основе которого в 1983 г. был организован Институт общей физики АН СССР.

1900 г.	М. Планк	Гипотеза о квантах излучения
1913 г.	Н. Бор	Квантовая природа спектров
1916 г.	А. Эйнштейн	Идея о существовании вынужденного излучения
1927 г.	П. А. М. Дирак	Квантовая интерпретация эффекта вынужденного излучения
1940 г.	В. А. Фабрикант	Идея о возможности наблюдения вынужденного излучения при разряде в газовых системах
1950 г.	Е. Парсел, Р. Паунд	Экспериментально получено стимулированное излучение при инверсии ядерных спинов
1953— 1954 гг.	Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, Дж. Гордон, Ч. Таунс, Х. Пайгер	Созданы физические принципы мазеров. Получена генерация в сантиметровом диапазоне на молекулах аммиака
1955 г.	Н. Г. Басов, А. М. Прохоров	Идея использования трехуровневой схемы и оптической накачки для получения инверсии
1956 г.	Н. Бломберген	Теория малошумящего парамагнитного усилителя по схеме трех уровней
1957 г.	Х. Сквил, Г. Фехер, Х. Зай- дель	Создание парамагнитного усилителя на кристалле
1958 г.	Ч. Таунс, А. Шавлов, Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, А. Джаван	Идея использования эффекта вынужденного излучения в оптическом диапазоне
1959 г.		I конференция по квантовой электронике
1960 г.	Т. Мейман	Создание рубинового лазера
1960 г.	П. Сорокин, М. Стивенсон	Создание лазера на флюорите
1960 г.	А. Джаван, В. Беннет, Д. Эр- риот	Создание He—Ne-лазера
1961 г.	Е. Снитцер	Создание Nd-лазера
1958— 1961 гг.	Н. Г. Басов, Б. М. Вул, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов	Разработка теории различных типов полупроводниковых лазеров
1962— 1964 гг.	GE, IBM, MIT, ФИАН СССР	Создание полупроводниковых лазеров

и положительная обратная связь в оптическом канале. Возник оптический резонатор, предложенный А. М. Прохоровым,— аналог колебательного контура или объемного резонатора. Для нас стала очевидной проблема поиска люминисцирующего вещества и метода его возбуждения для получения инверсии и генерации. Именно на этом этапе исследований радиофизика должна была объединиться с оптикой. В ФИАНе такое объединение произошло естественно. Существовавшая тогда фиановская оптическая школа (лаборатории люминесценции им. С. И. Вавилова, оптическая лаборатория им. Г. С. Ландсберга) и лаборатория спектроскопии успешно обеспечили такое слияние, преобразовавшее как радиофизику (она стала квантовой), так и оптику (она получила лазеры). Сегодня все эти лаборатории активно занимаются лазерами и их применениями.

Прежде всего мы стали изучать возможности создания лазеров на полупроводниках. Полупроводники в качестве активной среды привлекли нас высокими значениями коэффициентов поглощения (усиления). Это открывало возможность создания резонаторов малых размеров. Физика полупроводников в это время изучалась в ФИАНе в лаборатории Б. М. Вула (в последствии — академик). Полученные в этой лаборатории результаты позволили нам разработать метод создания инверсии в полупроводниках. Метод был основан на ионизации примесей при межзонном электрическом пробое с последующим мгновенным снятием поля. Это предложение (авторы — Н. Г. Басов, Б. М. Вул, Ю. М. Попов¹) было зарегистрировано в июле 1958 г. под названием «Квантовомеханические полупроводниковые генераторы и усили-

тели электромагнитных колебаний». Об этой работе я рассказывал на I конференции по квантовой электронике в США.

Позже в 1960—1961 гг. нам удалось разработать другие методы возбуждения полупроводниковых лазеров: накачка пучком быстрых электронов, оптическая накачка, инжекция носителей тока через $p-n$ -переход (авторы — Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов²⁻⁴). В этот период в наших работах был высказан ряд основополагающих идей физики будущих полупроводниковых лазеров: возможность осуществления стационарного режима,

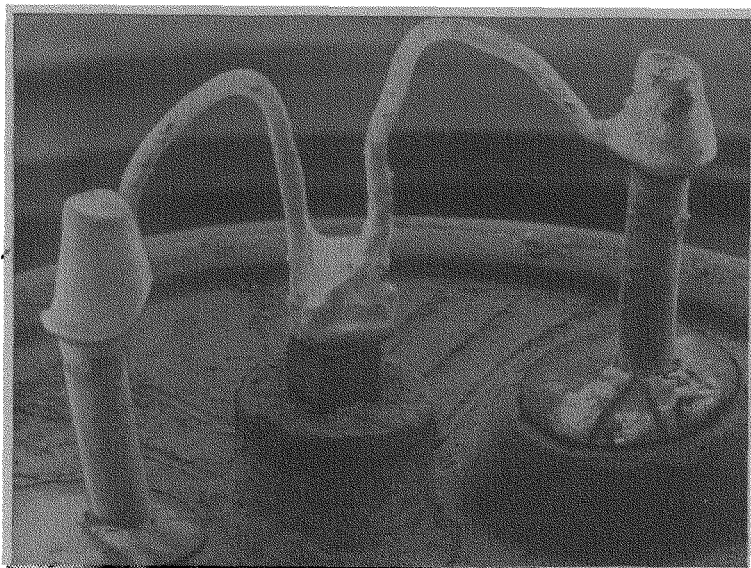


Н. Г. Басов и А. Джаван беседуют во время I Международной конференции по квантовой электронике (США, сентябрь 1959 г.)

волноводный характер активной зоны диода, возможность снижения пороговой плотности тока для $p-n$ -перехода с различными ширинами запрещенной зоны образующих его полупроводников (гетеропереходы), возможность использования самого образца в качестве резонатора. В результате в начале 60-х годов основа теории лазеров на полупроводниках практически была разработана. Одновременно, начиная с 1958 г., в ФИАНе под моим руководством осуществлялась программа «Фотон» — первая советская научная программа по созданию лазеров. Первая публикация — обзор «Генерация, усиление и индикация инфракрасного и оптического излучений с помощью квантовых систем»² — содержала основные идеи этой программы. Многие существующие ныне типы лазеров были предложены при осуществлении этой программы.

В январе 1962 г. группа ученых из ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе экспериментально наблюдала эффект сужения линии в диоде из арсенида галлия.

Генерацию излучения в диодах из арсенида галлия впервые удалось получить группе Р. Холла (лаборатория «Дженерал электрик») и почти одновременно группе М. Натана (фирма ИВМ). Несколько позже это удалось и нам в ФИАНе (В. С. Багаев, Н. Г. Басов, Б. М. Вул, Б. Д. Копыловский, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов, А. П. Шотов и др.⁵). Так, совместными усилиями, были созданы первые полупроводниковые лазеры. Эти результаты обсуждались на III конференции по квантовой электронике в 1963 г. в Париже. Таким образом, первые квантовые генераторы на полупроводниках были созданы на стыке нескольких наук — радиофизики, оптики, физики твердого тела, атомной физики. Успеху этой работы в значительной степени способствовала комплексность исследований, традиционная для нашего Института,



Один из первых инжекционных лазеров на арсениде галлия (Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР, 1962 г.)

давшая возможность объединить усилия ученых, работающих в различных направлениях. Кроме того, мы стремились осмыслить физическую картину явлений по возможности до эксперимента, что позволило нам правильно идти кратчайшим путем к цели.

В дальнейшем, в 60-е и в начале 70-х гг. в ФИАНе велись работы по различным типам полупроводниковых лазеров: были исследованы динамические режимы разных диодов, разработаны быстродействующие оптические переключатели, созданы оптические логические элементы (авторы — Н. Г. Басов,⁶ П. Г. Елисеев, В. Н. Морозов, В. В. Никитин и др., 1963—1965 гг.⁷); совместно с группой Ж. И. Алферова из ЛФТИ были проведены работы по оптимизации характеристик гетеролазеров на галлий — алюминий — мышьяке^{6,33}, был создан первый лазер с возбуждением быстрыми электронами на сульфиде кадмия с $\lambda = 0,5$ мкм (1964 г.)³⁴, разработаны лазерная электронно-лучевая трубка для трехцветного проекционного телевидения и адресные трубки для оптической памяти (авторы — Н. Г. Басов, О. В. Богданкевич, А. С. Насибов, А. Н. Печёнов⁸), исследованы полупроводниковые лазеры с одно- и двухфотонным возбуждением излучением рубинового и Nd-лазеров^{9,10}.

В 1974 г. в совместной работе ФИАН и Гиредмета были созданы инжекционные лазеры на четырехкомпонентной гетероструктуре галлий—индий — фосфор — мышьяк с перестраиваемой в зависимости от состава в широких

пределах частотой излучения (авторы — А. П. Богатов, Л. М. Долгинов, Л. В. Дружинина, П. Г. Елисеев и др.¹¹).

Работы в области полупроводниковых лазеров помогли нам создать эксимерные лазеры (авторы — Н. Г. Басов, В. А. Данилычев, Ю. М. Попов, Д. Д. Ходкевич, 1970 г.¹²) и лазеры с комбинированным электроионизационным возбуждением (авторы — Н. Г. Басов, В. А. Данилычев, Э. М. Беленов, А. Ф. Сучков, 1971 г.¹³). В ФИАНе были предложены и затем успешно развивались химические, газодинамические и фотодиссоционные лазеры^{14-19, 35, 36}. В 1984 г. был разработан He — Ne-лазер высокого давления (2—3 атм), работающий в видимых красной и желтой областях спектра (авторы — Н. Г. Басов, В. А. Данилычев, О. М. Керимов и др.²⁰). В настоящее время создан проект кислородно-йодного лазера для исследований в области термоядерного синтеза. Сейчас все эти типы лазеров связаны с важнейшими применениями в различных областях науки и техники.

В конце 60-х годов в оптической лаборатории ФИАНа были начаты работы с целью создания эффективных лазеров на парах металлов. В 1972 г. был разработан саморазогревный лазер на парах меди (авторы — А. А. Исаев, М. А. Казарян, Г. Г. Петраш³⁷) и на его основе осуществлен лазерный проекционный микроскоп, позволяющий получать усиленное по яркости изображение микрообъектов на больших экранах (авторы — К. И. Земсков, А. А. Исаев, М. А. Казарян, Г. Г. Петраш, 1974 г.⁴⁰).

В начале 70-х годов в лаборатории квантовой радиофизики (ФИАН) были начаты работы по поиску путей создания лазеров в далекой УФ и мягкой рентгеновской областях спектра. Теоретически был предложен ряд возможных схем создания инверсии на переходах многозарядных ионов в лазерной плазме (авторы — А. В. Виноградов, И. И. Собельман, Е. А. Юков²¹). Как наиболее оптимальные были рассмотрены две схемы — создание инверсии за счет электронного возбуждения на переходах Ne-подобных ионов и метод селективной фотонакачки. Одновременно были начаты экспериментальные работы по достижению усиления и генерации на переходах Ne-подобного CaXI. В 1977 г. впервые были получены предварительные положительные результаты в области $\lambda \approx 600 \text{ \AA}$ (авторы — Г. В. Перегудов, Е. Н. Рагозин, И. И. Собельман и др.²²). В 1984 г. в Ливерморе (США) было получено вынужденное усиление на переходах Ne-подобных ионов селена ($\lambda = 206 \text{ \AA}$; 209 \AA) и иттрия ($\lambda = 155 \text{ \AA}$; 157 \AA) (авторы — Д. А. Метьюз и др., 1984 г.).

По-видимому, одной из наиболее значительных областей применения лазеров является инерциальный термоядерный синтез. Лазерная термоядерная «лихорадка», начавшаяся в 1962 г., очень быстро выросла в независимое научное направление в физике и технике термоядерного синтеза. Сейчас можно отдельно говорить об истории ЛТС (табл. II).

Разумеется, приведенная историческая справка не включает многих важных теоретических и экспериментальных моментов, возникших на пути ЛТС, например, таких как генерация быстрых электронов и ионов, открытие многочисленных лазерно-плазменных эффектов, эволюция проблемы устойчивости сжатия мишеней, конкуренция длинноволновых и коротковолновых лазеров и т. д.

Свойства лазерного света — выделение значительной энергии за короткое время и высокие значения плотности потока, позволяют достичь скорости удельного энерговложения 10^{18} Вт/г. Это дает возможность осуществить нагрев вещества до термоядерных температур и сжатие до больших плотностей, вследствие высокого давления за счет измерения. На это обстоятельство мы (совместно с О. Н. Крохиным) обратили внимание в 1962 г. (доклад на Президиуме АН СССР, март 1962 г.), а в 1963 г. впервые теоретические оценки были доложены на III конференции по квантовой электронике (Париж)²³. С этого времени в Физическом институте начались теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия мощного лазерного излучения

1962 г.	Н. Г. Басов, О. Н. Крохин	Предложение использовать лазеры в управляемом термоядерном синтезе
1968 г.	Н. Г. Басов, П. Г. Крюков, Ю. В. Сенатский, С. Д. Захаров	Зарегистрированы термоядерные нейтроны в лазерной плазме
1972 г.	Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Г. В. Склизов, С. И. Федотов	Создана первая многоканальная лазерная установка «Кальмар» («Русский „монстр“»), проведены эксперименты по лазерному сжатию сферических мишеней. Достигнуты плотности ядра 30 г/см^3
1972 г.	Э. Теллер, Дж. Накколлс, Л. Вуд, Дж. Циммерман	Предложена схема лазерного сверхсжатия однородных термоядерных мишеней
1974 г.	Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша АН СССР	Предложена концепция низкоэнтропийного сжатия высокоаспектных многослойных мишеней
1975—1978 гг.	Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР	Экспериментально достигнуто тысячекратное лазерное сжатие оболочечных мишеней
1978 г.	Ливерморская лаборатория им. Лоуренса (LLL)	Запуск 20-канальной лазерной установки «Шива»; получение нейтронного выхода $3 \cdot 10^{10}$
1978 г.	Лос-Аламосская лаборатория	Запуск 8-канального CO_2 -лазера «Гелиос»
Начало 80-х годов	Институт лазерной технологии (Осака)	Предложена концепция рентгеновских мишеней и мишеней типа «саппон-балл», достигнута плотность DT-горючего $\sim 30 \text{ г/см}^3$
1982 г.	Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР	Запуск 108-канальной установки «Дельфин»; достигнута плотность 8 г/см^3 при сжатии высокоаспектных оболочечных мишеней
1983 г.	LLL	Запуск установки «Новетта»; достигнута плотность DT $\sim 50 \text{ г/см}^3$
1983 г.	Институт лазерной технологии (Осака)	Запуск установки «Гекко». Достижение нейтронного выхода $4 \cdot 10^{10}$
1983—1984 гг.	Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР	Экспериментальное доказательство устойчивости сжатия высокоаспектных $\sim 10^2$ мишеней
1985 г.	LLL	Запуск установки «Нова»

с плазмой. В ходе осуществления экспериментальной программы мы разработали рубиновые и Nd-лазеры с рекордными для того времени параметрами по мощности.

Уже осенью 1962 г. в ФИАНе была высказана идея метода повышения мощности лазера на рубине — модуляция добротности. Экспериментально эта идея была реализована путем использования быстро вращающегося диска с отверстием в фокальной плоскости двух софокусных линз. В США модуляция добротности была осуществлена с помощью электрооптического затвора Керра (авторы — Мак-Кланг, Хелворт, 1962).

Далее с целью создания лазерных источников для получения плазмы в ФИАНе начались работы по усилению наносекундных импульсов в усилителях бегущей волны. Экспериментальные и теоретические исследования процессов усиления в режиме насыщения позволили получить дальнейшее сокращение длительности лазерного импульса и довести мощность излучения до нескольких гигаватт. Изучение процессов усиления импульсов со сложной многомодовой структурой привело к построению модели твердотельных лазеров с пассивной синхронизацией мод (авторы Н. Г. Басов, П. Г. Крюков, В. С. Летохов и др., 1969 г.²⁴). Впервые режим самосинхро-

низации мод в лазере на неодимовом стекле наблюдался в оптической лаборатории ФИАНа (авторы — В. И. Малышев, А. С. Маркин, 1965 г.⁴¹). Одновременно были созданы методы диагностики горячей лазерной плазмы, обладающие уникальным пространственно-временным разрешением. Многие из этих методов, например, такие как лазерная интерферометрия и шпирен-фотография, относятся сейчас к числу классических. Значительным успехом наших экспериментальных работ стало наблюдение первых термоядерных нейтронов в плазме, образованной Nd-лазером²⁵. Этот результат, повторенный через год в Лиме, явился доказательством возможности лазерной стимуляции реакции термоядерного синтеза.



На семинаре по квантовой электронике в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР (сентябрь 1965 г.)

В начале 70-х годов наступила пора лазерного сжатия облучаемых мишеней. В 1972 г. в ФИАНе была запущена девятиканальная лазерная установка «Кальмар» для сферического облучения мишеней. На этой установке были проведены первые эксперименты со сферическими однородными мишенями, в которых наблюдалась генерация DD -нейтронов, а позднее и вторичных $D-T$ -нейтронов (авторы — Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Г. В. Склизков, С. И. Федотов и др., 1972 г.^{26,27}). Вторичные $D-T$ -нейтроны свидетельствовали о существовании сжатого ядра. В этом же году на конференции в Монреале группа Э. Теллера из Ливермора выступила с красивой физической идеей о сверхсжатии профилированным по времени лазерным импульсом (авторы — Э. Теллер, Дж. Накколз, Л. Вуд, Дж. Циммерман). Однако, с нашей точки зрения, существовало, по крайней мере, два обстоятельства, существенно затрудняющих реализацию этой схемы. Первое из них наглядно свидетельствовало о том, что «нельзя медленно выстрелить из ружья». В данной схеме требовались на конечной стадии импульса сверхвысокие плотности потока излучения, которые неизбежно должны были приводить к эффекту предварительного нагрева сжимаемого вещества быстрыми электронами и жесткими квантами из горячей «короны».

Вторая трудность заключалась в неустойчивости данной схемы сжатия по отношению к переходу от изоэнтропического режима к режиму с сильными ударными волнами.

В 1974 г. мы совместно с учеными из Института прикладной математики им. М. В. Келдыша предложили альтернативную схему низкоэнтропийного сжатия с использованием однородного по времени лазерного импульса и неоднородных высокоаспектных мишеней (авторы — Ю. В. Афанасьев, Н. Г. Басов, П. П. Волосевич, Е. Г. Гамалий, О. Н. Крохин, С. П. Курдюмов, Е. И. Леванов, В. Б. Розанов, А. А. Самарский, А. Н. Тихонов^{28, 29}). В течение следующих лет был проведен большой цикл экспериментальных исследований по сжатию оболочечных мишеней на установке «Кальмар», полностью подтвердивших выработанную нами концепцию (авторы — Н. Г. Басов, Г. В. Склизков, А. С. Шиканов и др.³⁰). Мы, естественно, ясно понимали, что основная проблема ЛТС при использовании тонких оболочек связана с устойчивостью сжатия. Вместе с теоретико-численным циклом исследований в конце 70-х — начале 80-х годов³¹ были проведены эксперименты на созданной в 1982 г. 108-канальной установке «Дельфин» по сжатию оболочек с аспектным отношением $\sim 10^2$ ³². В этих экспериментах удалось достичь $3 \cdot 10^3$ -кратного сжатия, что свидетельствовало о возможности устойчивого сжатия таких мишеней (авторы — Н. Г. Басов, Г. В. Склизков, С. И. Федотов и др., 1983 г.⁵⁰). Сейчас основными задачами в этой области мы считаем дальнейшее развитие физики термоядерных мишеней, особенно в области сжатия 10^4 , выбор и создание драйвера для ЛТС, инженерно-техническую разработку лазерного термоядерного реактора и создание в конечном счете проекта технически реализуемой, экономически рентабельной, безопасной для людей и окружающей среды лазерной термоядерной электростанции.

Начиная с 1963 г., в астрофизической лаборатории (ФИАН СССР, Крым) проводились исследования по лазерной локации Луны. Расстояние до Луны было измерено с высокой точностью, что позволило уточнить параметры системы Земля — Луна на несколько порядков. В 1978 г. измерение расстояния Земля — Луна достигло точности ~ 10 см. Подобные прецизионные измерения позволяют точно измерять расстояния между различными точками Земли. Так, в 1984 г. расстояние между обсерваторией Макдональда (шт. Техас, США) и Крымской лабораторией было измерено с точностью ~ 70 см.

С начала 60-х годов в лаборатории квантовой радиофизики (КРФ) в связи с проблемой ЛТС были начаты работы по преобразованию лазерного излучения с целью повышения его плотности и направленности, а также расширения спектрального диапазона. Конечная цель заключалась в достижении предельной (дифракционной) расходимости (10^{-5} — 10^{-6} рад для установок килоджоульного уровня энергии). Была высказана идея (авторы — Н. Г. Басов, И. И. Собельман) использовать для решения этой задачи эффекты вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ).

Проведенные затем в ФИАНе работы позволили с помощью преобразователей на ВРМБ и ВКР повысить яркость излучения лазеров накачки на несколько порядков в режиме генерации, а при усилении одноимодового стока излучения в поле пространственно неоднородной накачки при вынужденном рассеянии удалось достичь практически 100%-го преобразования по фотонам с сохранением предельной направленности усиленного излучения. Основные результаты суммированы в работе Н. Г. Басова³⁸.

Осуществленные в лаборатории КРФ в рамках программы развития преобразователей эксперименты по ВРМБ привели в 1971 г. к экспериментальному обнаружению явления самообращения волнового фронта при вынужденном рассеянии света (авторы — В. В. Рагульский, В. И. Поповичев, Ф. С. Файзуллов). Первая публикация, содержащая и предварительную

теоретическую интерпретацию явления самообращения волнового фронта, относится к 1972 г. (авторы — Б. Я. Зельдович, В. И. Поповичев, В. В. Рагульский, Ф. С. Файзуллоев³⁹).

С 1978 г. в лаборатории КРФ была начата широкая экспериментальная программа исследований данного явления применительно к проблеме мощных лазеров для управляемого термоядерного синтеза. Впервые эффективная расходимость в одном канале установки типа «Дельфин» $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ рад, равная дифракционной расходимости, была экспериментально получена в 1979 г.⁴²

В 1962 г. в ФИАНе впервые была высказана идея о возможности самофокусировки лазерного луча (автор — Г. А. Аскарьян⁵¹) — явления, играющего чрезвычайно важную роль в проблеме мощных лазеров.

Большое значение в ФИАНе мы придаем задачам лазерной технологии. Лазерная технология (отжиг, закалка, сварка и т. п.) — основная задача филиала ФИАН, созданного в г. Куйбышеве.

В ФИАНе разрабатываются также новые типы технологических лазеров. В последнее время создан электроионизационный лазер ($\lambda = 1,73$ мкм) с энергией 80 дж (8 дж/л) с длительностью $4 \cdot 10^{-6}$ с, к. п. д. $\sim 2-3\%$ и расходимостью $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ рад. (авторы — Н. Г. Басов, В. А. Данилычев, И. В. Холлин и др.⁴³).

Говоря о развитии квантовой электроники в ФИАНе, нельзя не коснуться проблемы оптических стандартов частоты (ОСЧ). Основой перехода в оптический диапазон от высокостабильных генераторов СВЧ-диапазона стали работы, проводимые в ФИАНе еще в 50-х годах.

В 1967—1968 гг. в лаборатории квантовой радиофизики были намечены основные направления развития этой проблемы (авторы — Н. Г. Басов, В. С. Летохов, А. Н. Ораевский, 1968 г.^{44,45}).

В 1969—1970 гг. были зарегистрированы узкие резонансы в He — Ne ($\lambda = 3,39$ мкм) = и CO₂ ($\lambda = 10,6$ мкм)-лазерах с внутренней и внешней поглощающей ячейкой. Стабилизация частоты излучения позволила получить долговременную стабильность $\sim 10^{-11}$, превышающую на 3—4 порядка точность известных к тому времени систем стабилизации (авторы — Н. Г. Басов, И. Н. Компанец, О. Н. Компанец, В. С. Летохов, В. В. Никитин⁴⁶).

В конце 60-х годов был выполнен цикл работ по изучению динамики взаимодействия встречных волн в кольцевых газовых лазерах с нелинейным поглощением и предложен метод сужения реперных резонансов на 2—3 порядка по сравнению с однородной шириной спектральной линии⁴⁷. В 1970 г. такие резонансы (шириной 30 кГц) впервые были зарегистрированы в кольцевом He — Ne/CH₄ лазере (авторы — Н. Г. Басов, Э. М. Беленов, М. В. Данилейко, В. В. Никитин⁴⁸). Дальнейшее развитие метода конкурентных резонансов в кольцевых лазерах привело к созданию малогабаритных оптических реперов частоты с долговременной стабильностью $\sim 10^{-13}$.

Новые возможности повышения разрешающей способности прецизионной лазерной спектроскопии и стабильности ОСЧ дает метод частотных резонансов двухмодового лазера с нелинейным поглощением, разрабатываемый совместно сотрудниками ФИАН и МИФИ. Отличительной особенностью метода является высокая чувствительность регистрации очень узких спектральных линий. В настоящее время в ФИАНе на основе двухмодового частотного метода созданы стабилизированные He — Ne/CH₄-лазеры, обладающие узким спектром излучения (~ 10 Гц) при долговременной стабильности $2 \cdot 10^{-14}$, и выделены спектральные линии с добротностью 10^{11} . Характерной особенностью созданных систем являются их малые габариты, удобство эксплуатации и надежность работы, что позволяет рассматривать данный метод как один из наиболее перспективных для достижения долговременной стабильности на уровне 10^{-15} — 10^{-16} и воспроизводимости частоты 10^{-14} — 10^{-15} (авторы — Н. Г. Басов, М. А. Губин, В. В. Никитин, Е. Д. Проценко и др.⁴⁹).

В 1970 г. в ФИАНе была предложена (автор — А. Ф. Сучков⁵²) и реализована высокочувствительная внутрирезонаторная лазерная спектроскопия (авторы — Э. А. Свириденков, А. Ф. Сучков и др.⁵³), позволяющая исследовать ничтожные количества вещества (до 10 атом/см³) благодаря тому, что вещество находится внутри резонатора и многократное прохождение света через вещество дает эквивалентное расстояние порядка 10^7 — 10^9 см.

Мне хотелось бы также сказать о применении лазеров в медицине.

В 1982 г. в ФИАНе была организована лаборатория лазерной хирургии. Сейчас эта лаборатория работает в тесном сотрудничестве с Всесоюзным кардиологическим центром, Всесоюзным лазерно-медицинским центром, Институтом гастроэнтерологии, Каунасским медицинским институтом. В результате этих работ в медицинскую практику вошли лазерные операции на сердце и сосудистой системе: создание новой сосудистой системы миокарда путем лазерного образования каналов, направленное повреждение проводящих путей сердца (пучок Гисса) с целью борьбы с аритмией. Лазеры широко используются для операций по резекции желудка, лечения трофических язв (CO_2 -лазер, 60 Вт), для остановки желудочных кровотечений, удаления полипов, стерилизации ран с последующим усилением эффекта воздействия антибиотиков (Ag-лазер, 10 Вт). С высокой яркостью лазерного света связана, по-видимому, эффективность лазерной терапии. Так, например, Р. В. Амбарцумяном было обнаружено в 1985 г., что эффект малых доз определяется процессами на клеточном уровне и связан с образованием синглетного кислорода.

В заключение моего доклада я хотел бы сказать о том, что нам прежде всего предстоит делать в квантовой электронике совместными усилиями в обозримом будущем. Использование лазеров, особенно полупроводниковых, с их «непритязательностью» — компактностью, простотой, экономичностью, рекордным к. п. д. в оптоэлектронных системах, не вызывает сомнения. Поэтому создание постоянной и оперативной оптической памяти, оптических линий связи, оптических интегральных микросхем на базе полупроводниковых лазеров и других оптических элементов, например, управляемых транспарантов, должно привести к появлению сверхбыстродействующих вычислительных машин. Помехоустойчивость, а, следовательно, и надежность их работы может оказаться значительно выше, чем у самых современных электронных вычислительных машин.

Другой вопрос, связанный с полупроводниковыми лазерами, — это задача создания пространственной решетки синхронизированных лазеров.

В лазерном термояде задача очевидна: нужен драйвер на 10 МДж. Быть может, в конце концов мы в этой проблеме вернемся к стеклянному лазеру, хотя большую конкуренцию ему составляют эксимерный и химические лазеры. Не исключен выход на первый план CO_2 -лазера, если удастся преодолеть физический барьер, связанный с быстрыми электронами. Задача много, перспективы большие, и я глубоко убежден, что к следующему своему юбилею квантовая электроника обогатится новым рядом замечательных открытий.

В заключение выражаю благодарность Ю. В. Афанасьеву, И. Г. Зубареву, Ю. М. Попову и Ф. С. Файзуллову за помощь в подготовке доклада.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов Н. Г., Вул Б. М., Попов Ю. М. — ЖЭТФ, 1959, т. 37, с. 587.
2. Басов Н. Г., Крохин О. Н., Попов Ю. М. — УФН, 1960, т. 72, с. 161.
3. Басов Н. Г., Крохин О. Н., Попов Ю. М. Вестн. АН СССР, 1961, с. 61.
4. Басов Н. Г., Крохин О. Н., Попов Ю. М. — ЖЭТФ, 1961, т. 40, с. 1879.
5. Багаев В. С., Басов Н. Г., Вул Б. М., Копыловский Б. Д., Крохин О. Н., Маркин Е. П., Попов Ю. М., Хвощев А. И., Шотов А. П. — ДАН СССР, 1963, т. 150, с. 275.

6. Алферов Ж. И., Андреев В. М., Елисеев П. Г., Пинскер И. З., Портной Е. Л.— ФТП, 1970, т. 4, с. 2388.
7. Басов Н. Г., Никитин В. В., Семенов А. С.— УФН, 1969, т. 97, с. 561.
8. Басов Н. Г., Богданкевич О. В., Насибов А. С., Печенов А. Н. и др.— ДАН СССР, 1972, т. 205, с. 72.
9. Басов Н. Г., Грасюк А. З., Зубарев И. Г., Катулин В. А.— Письма ЖЭТФ, 1965, т. 1, с. 29.
10. Басов Н. Г., Грасюк А. З., Катулин В. А.— ДАН СССР, 1965, т. 161, с. 1306.
11. Богатов А. П., Долгинов Л. М., Дружинина Л. В., Елисеев П. Г., Свердлов Б. Н., Шевченко Е. Г.— Квант. электрон., 1974, т. 1, с. 2294.
12. Басов Н. Г., Данилычев В. А., Попов Ю. М., Ходкевич Д. Д.— Письма ЖЭТФ, 1970, т. 12, с. 473.
13. Басов Н. Г., Беленов Э. М., Данилычев В. А., Сучков А. Ф.— В кн.: Квантовая электроника.— М.: Сов. радио, 1971, № 3, с. 121.
14. Раутиан С. Г., Собельман И. И.— ЖЭТФ, 1961, т. 41, с. 2018.
15. Басов Н. Г., Ораевский А. Н.— ЖЭТФ, 1963, т. 44, с. 1742.
16. Ораевский А. Н.— Ibidem, т. 45, с. 177.
17. Басов Н. Г., Ораевский А. Н., Щеглов В. А.— ЖТФ, 1967, т. 37, с. 339.
18. Басов Н. Г., Кулаков Л. В., Маркин Е. П., Никитин А. И., Ораевский А. Н.— Письма ЖЭТФ, 1969, т. 9, с. 613.
19. Дронов А. П., Дьяков А. С., Кудрявцев Е. М., Соболев Н. Н.— Ibidem, 1970, т. 11, с. 516.
20. Басов Н. Г., Александров А. Ю., Данилычев В. А., Долгих В. А., Керимов О. М., Мызников Ю. Ф., Рудой И. Г., Сорока А. М.— Ibidem., 1985, т. 41, с. 156.
21. Виноградов А. В., Собельман И. И.— ЖЭТФ, 1972, т. 63, с. 210, Виноградов А. В., Собельман И. И., Юков Е. А.— Квант. электрон., 1975, т. 2, с. 105.
22. Илюхин А. А., Перегудов Г. В., Рагозин Е. Н., Собельман И. И., Чирков В. А.— Письма ЖЭТФ, 1977, т. 25, с. 569.
23. Басов Н. Г., Крохин О. Н.— ЖЭТФ, 1964 т. 46, с. 171.
24. Басов Н. Г., Дрожбин Ю. А., Крюков П. Г., Лебедев В. Б., Летохов В. С., Матвеев Ю. А.— Письма ЖЭТФ, 1969, т. 9, с. 428.
25. Басов Н. Г., Захаров С. Д., Крюков П. Г., Сенатский Ю. В., Чекалин С. В.— Ibidem, 1968, т. 8, с. 26.
26. Басов Н. Г., Крохин О. Н., Склизков Г. В., Федотов С. И., Шиканов А. С.— ЖЭТФ, 1972, т. 62, с. 203.
27. Басов Н. Г., Иванов Ю. С., Крохин О. Н., Михайлов Ю. А., Склизков Г. В., Федотов С. И.— Письма ЖЭТФ, 1972, т. 15, с. 589.
28. Афанасьев Ю. В., Басов Н. Г., Волоосевич П. П., Гамалий Е. Г., Крохин О. Н., Курдюмов С. П., Леванов Е. И., Розанов В. Б., Самарский А. А., Тихонов А. Н.— In: Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research — 1974: Proc. of the V Intern. Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research Held by the Intern. Atomic Energy Agency. Tokyo, 11—15 November 1974.— Vienna, IAEA, 1975, v. 2, p. 559.
29. Афанасьев Ю. В., Басов Н. Г., Волоосевич П. П., Гамалий Е. Г. и др.— Письма ЖЭТФ, 1975, т. 21, с. 150.
30. Басов Н. Г., Ерохин А. А., Захаренков Ю. А., Зорев А. Н. и др.— Ibidem, 1977, т. 26, с. 581.
31. Афанасьев Ю. В., Басов Н. Г., Гамалий Е. Г., Крохин О. Н., Розанов В. Б.— Ibidem, 1976, т. 23, с. 617.
32. Александрова И. В., Басов Н. Г., Васин Б. Л., Галичий А. А. и др.— Квант. электрон., 1983, т. 10, с. 1677.
33. Елисеев П. Г.— В кн. ¹³, с. 120.
34. Басов Н. Г., Богданкевич О. В., Девятков А. Г.— ЖЭТФ, 1964, т. 47, с. 1588.
35. Конюхов В. К., Прохоров А. М.— Письма ЖЭТФ, 1966, т. 3, с. 436.
36. Конюхов В. К., Матросов И. В., Прохоров А. М. и др.— Ibidem, 1970, т. 12, с. 461.
37. Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г.— Ibidem, 1972, т. 16, с. 40.
38. Basov N. G. Preprint FIAN USSR № 153.— Moscow, 1978.
39. Зельдович Б. Я., Поповичев В. И., Рагульский В. В., Файзулов Ф. С.— Письма ЖЭТФ, 1972, т. 15, с. 160.
40. Земсков К. И., Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г.— Квант. электрон., 1974, т. 1, с. 14.
41. Малышев В. И., Маркин А. С.— ЖЭТФ, 1966, т. 50, с. 339.
42. Ефимков В. Ф., Зубарев И. Г., Котов А. В., Миронов А. Б., Михайлов С. И., Смирнов М. Г.— Квант. электрон., 1979, т. 6, с. 2031. Basov N. G., Zubarev I. G. Preprint FIAN USSR № 73.— Moscow, 1979.

43. Баранов В. В., Басов Н. Г., Данилычев В. А., Дудин А. Ю., Зарный Д. А., Устиновский Н. Н., Холин И. В., Чугунов А. Ю.— Письма ЖЭТФ, 1984, т. 39, с. 426.
44. Басов Н. Г., Летохов В. С.— УФН, 1968, т. 96, с. 585.
45. Ogaevsky A. N.— IEEE, Trans. 1968, v. IM-17, p. 346.
46. Басов Н. Г., Компанец И. Н., Компанец О. Н., Летохов В. С., Никитин В. В. Письма ЖЭТФ, 1969, т. 9, с. 569.
47. Басов Н. Г., Беленов Э. М., Данилейко М. В., Никитин В. В.— ЖЭТФ, 1969, т. 57, с. 1991.
48. Басов Н. Г., Беленов Э. М., Данилейко М. В., Никитин В. В.— Крат. сообщ. физ. (ФИАН СССР), 1970, № 10, с. 48.
49. Басов Н. Г., Губин М. А., Никитин В. В., Никульчин А. В., Петровский В. Н., Проценко Е. Д., Тюрников Д. А.— Изв. АН СССР, Сер. физ. 1982, т. 46, с. 1573; Квант. электрон., 1983, т. 10, с. 702.
50. Басов Н. Г., Галичий А. А., Данилов А. Е., Исаков А. И. и др.— Письма ЖЭТФ, 1983, т. 37, с. 109.
51. Аскарьян Г. А.— ЖЭТФ, 1962, т. 42, с. 1567.
52. Сучков А. Ф. Препринт. ФИАН СССР № 126.— Москва, 1970.
53. Пахомычева Л. А., Свириденков Э. А., Сучков А. Ф. и др.— Письма ЖЭТФ, 1970, т. 12, с. 60.