

усилители электромагнитных колебаний", в которой "...рассматривается возможность использования электронных переходов между зоной проводимости (валентной зоной) и донорными (акцепторными) примесными уровнями полупроводника для получения электромагнитного излучения с помощью механизма индуцированного излучения подобно тому, как это имеет место в молекулярном генераторе".

Это были первые работы, в которых делалась попытка продвинуть принципы работы молекулярного генератора в область инфракрасных и оптических частот. Они, конечно, только закладывали начало таких исследований и пытались привлечь внимание научной общности к этому направлению.

Заканчивая эту статью я хочу привести высказывания Ч. Таунса на встрече Нобелевских лауреатов в Санкт-Петербурге летом 2003 г., организованной Ж.И. Алфёровым во время юбилейных торжеств — 300-летия города.

В своем выступлении Ч. Таунс сказал<sup>3</sup>: "И это выросло, как я уже упоминал, из спектроскопии, из молекул, потому что здесь мы проводили в различных местах исследования, и я тоже, и Николай Басов и Александр Прохоров в Москве также разрабатывали свои собственные оригинальные идеи и выдвинули... и в Мэриленде был ученый, который предлагал, и он тоже видел определенные возможности в этом направлении<sup>4</sup>...

И таким образом, в 1954 году мы уже работали с ... (мазером<sup>5</sup>). После этого я вскоре поехал на конференцию в Англию по микроволновой спектроскопии, и там был Прохоров. Это была замечательная привилегия, что я с русским ученым встретился. В те времена это было безумно сложно и трудно встретиться американским и русским ученым — в те времена, в 50-е. И, действительно, они приехали. Они вначале не объявили, о чем будут говорить. Но они как раз говорили о мазере, они строили мазер. Идея была та же самая — пучки молекул. Очень близкая мне идея. Но пока еще у них не получились окончательные результаты, но они почти завершили эксперимент, и они-то прекрасно поняли меня, и мы это обсудили.

И, таким образом, я рассказал им то, что я делал. Я говорю: мы тоже над этим работаем... Мы говорили, говорили, говорили, обменивались опытом. Это было замечательно — с ними беседовать, обмениваться впечатлениями и идеями.

Но они не признали возможность... фокусировки. Ну а потом они использовали, получили хороший мазер, а дальше они продвинули эту идею с тем, чтобы была 8-угольная фокусировка, чтобы еще лучше была, действительно, лучший результат. Они оттолкнулись от этой идеи, улучшили ее, и у них на основе этой идеи возникла другая идея. Они работали. А мы тоже использовали их 8-угольную фокусировку потом. Ну, у них очень близкие идеи были, очень...".

Я воспроизвел в этой статье все, что говорил в своем выступлении на Научной сессии Отделения физических наук 2 июня 2004 г., проходившей в ФИАНе и посвя-

щенной 50-летию квантовой электроники. Я, конечно, осознаю, что попытка адекватно отобразить события, которые происходили в первые годы становления квантовой электроники 50 лет назад, представляет определенный риск, но меня несколько ободряет то, что после моего выступления я не слышал от моих коллег замечаний, которые можно было бы расценить как упрек в искажении истины. Это сняло мои сомнения в возможности опубликовать эту статью в *Успехах физических наук*.

PACS numbers: 01.65. + g, 42.55.Rz, 42.55.Xi

## Твердотельные лазеры — одно из важнейших направлений квантовой электроники

И.А. Щербаков

Обозначенный в заглавии тезис иллюстрируется следующим образом:

а) первый в мире лазер был рубиновым, хотя это и чисто исторический аспект проблемы;

б) сегодня достаточно компактные твердотельные лазерные установки обеспечивают мощности непрерывного излучения до десятка киловатт, а главное — импульсные мощности подходят к петаваттному уровню за счет фемтосекундных длительностей импульса. При фокусировке такого импульса в пятно порядка десятков микрон получается пиковая интенсивность в фокусе до  $10^{21}$  Вт см<sup>-2</sup>. Чрезвычайно интересна физика воздействия таких импульсов на атомы, молекулы, кластеры, а также на твердотельные и газовые мишени.

Уже при интенсивности излучения порядка  $5 \times 10^{16}$  Вт см<sup>-2</sup> пиковая напряженность поля в фокусе сравнивается с напряженностью внутриатомного поля, т.е. с напряженностью кулоновского поля ядра атома водорода на борновском радиусе ( $5 \times 10^9$  В см<sup>-1</sup>). В этой области интенсивностей возникает целый ряд уникальных эффектов, не имеющих аналогов в слабом поле. Например, генерация очень высоких гармоник лазерного излучения в процессе ионизации атомов (с номерами гармоник до 300 и выше), полная перестройка спектра атомов и т.п. Высказываются идеи о возможности использования таких необычных явлений, сопровождающих ионизацию атома в сильном лазерном поле, для генерации еще более коротких (аттосекундных,  $10^{-18}$  с) импульсов излучения. Вполне вероятно, что многие интересные явления в этой области пока еще остаются за гранью существующих представлений.

Следующий важный рубеж — так называемая релятивистская интенсивность, при которой скорость осциллирующей свободной электрона в световом поле становится порядка скорости света. На частоте излучения неодимового лазера это условие достигается при интенсивности лазерного излучения в фокусе порядка  $5 \times 10^{18}$  Вт см<sup>-2</sup>, что соответствует напряженности поля около  $5 \times 10^{10}$  В см<sup>-1</sup>. При таких интенсивностях уже становится возможным наблюдение нелинейных квантово-электродинамических эффектов, таких как многофотонное комптоновское рассеяние, приводящее к излучению жестких  $\gamma$ -квантов, последующее рождение электрон-позитронных пар в лазерном поле и т.п.

<sup>3</sup> Приводится перевод, сделанный с фонограммы выступления без обработки. (Примеч. автора.)

<sup>4</sup> Имеется в виду, вероятно, Дж. Вебер. (Примеч. автора.)

<sup>5</sup> В стенограмме неразборчиво, по-видимому, мазер. (Примеч. автора.)

При взаимодействии с газовыми мишенями могут возникать эффекты типа самоканалирования лазерных пучков в среде за счет быстрой ионизации атомов мишени и выталкивания электронов из области фокуса под действием пондеромоторных сил в неоднородном лазерном поле. Это явление может сопровождаться последующим разлетом ионов, интерпретируемым как кулоновский взрыв.

Дальнейшее увеличение интенсивности в пределах указанного выше диапазона может привести к открытию и исследованию новых квантово-электродинамических явлений, к постановке экспериментов по лазерному возбуждению ядер и ко многим другим трудно предсказуемым сейчас новым результатам.

Таким образом, возникает новая область физики, достижения которой позволят развить совершенно новые технологии XXI века. Сверхвысокие плотности мощности при относительно небольших плотностях энергии чрезвычайно активизируют различного рода нелинейные процессы, не приводя при этом к разрушению материала. Эти уникальные возможности трудно переоценить. Их, например, можно использовать при создании элементов объемной оптической памяти, что приведет к революции в вычислительной технике.

Постановка обозначенных выше экспериментов может быть обеспечена с использованием твердотельных лазеров. Поэтому иногда звучащий тезис о возможности вытеснения твердотельных лазеров лазерами других типов в ближайшее обозримое время вряд ли обоснован.

Один из основателей квантовой электроники, А.М. Прохоров, уделял очень большое внимание становлению твердотельных лазеров в нашей стране. Именно им была заложена стратегия их развития. В частности, она заключалась в единстве деятельности технологов, спектроскопистов и лазерщиков. В подтверждение сказанному можно привести множество примеров реализации этого тезиса как в рамках академии, так и на промышленном уровне. Результаты, обсуждаемые в настоящем сообщении, были получены в рамках указанной стратегии в Институте общей физики с участием целого ряда других организаций, в том числе и зарубежных.

Достаточно длительное время твердотельным лазерам был присущ органический недостаток — низкий КПД, обычно не превышающий 3 %, что объясняется плохим перекрытием спектра излучения ламп накачки с узкими линиями поглощения рабочих частиц лазера. Для устранения этого недостатка естественным было использовать эффект сенсibilизации люминесценции. Основы этого явления — переноса энергии от частиц одного типа к частицам другого — были заложены школой С.И. Вавилова. В частности, нельзя не упомянуть классические работы М.Д. Галанина. Было показано, что вероятность переноса энергии пропорциональна интегралу перекрытия спектров излучения доноров со спектром поглощения акцепторов. Однако в случае лазерных кристаллов обычно используются рабочие частицы, обладающие большим числом узких линий, измерение интеграла перекрытия с которыми крайне проблематично. Это не давало возможности целенаправленно искать эффективные донорно-акцепторные пары.

При исследовании процессов переноса применялись также кинетические методы, основанные на тау-прибли-

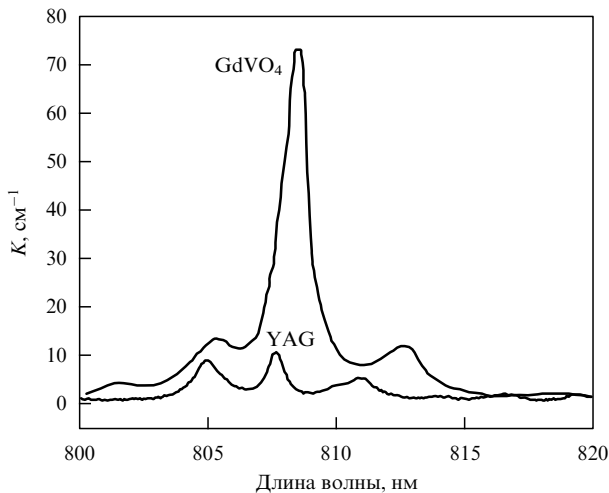
жении, т.е. закон переноса предполагался экспоненциальным. Тем не менее было ясно, что это приближение не всегда оправдано.

Наши измерения кинетики донорной люминесценции в динамическом диапазоне, достигающем пяти порядков, выявили ее достаточно сложный неэкспоненциальный вид. Была получена соответствующая эмпирическая формула, описывающая безызлучательный распад донорной подсистемы. В этой формуле отсутствуют подгоночные параметры, а все измеряемые величины имеют соответствующую теоретическую интерпретацию. Таким образом, удалось измерить целый ряд параметров, описывающих перенос энергии и, в частности, величину, пропорциональную интегралу перекрытия, физический смысл которой — вероятность взаимодействия двух частиц в данной среде на расстоянии в 1 см.

Зная вид распада донорной подсистемы, можно получить временную эволюцию акцепторной, т.е. в данном случае интересующую нас временную эволюцию населенности верхнего лазерного уровня. Экспериментальные результаты хорошо совпали с теоретическими. Было установлено условие эффективной передачи энергии из широких полос поглощения трехвалентных ионов хрома на узкие уровни трехвалентных редкоземельных ионов. Это условие определяется взаимным расположением возбужденных состояний трехвалентных ионов хрома  $^2E$  и  $^4T_2$ . Эффективный перенос энергии имеет место лишь в случае, когда энергетический зазор между указанными состояниями не превышает  $kT$ . Так была объяснена неэффективная работа данных донорно-акцепторных пар в известных к тому времени кристаллах.

Был предложен целый ряд новых кристаллов (и разработана технология их выращивания), в которых указанное выше условие выполнялось. При этом в рамках разработанной технологии соактивация ионами хрома не ухудшала оптического качества кристаллов. Это привело к увеличению населенности верхнего лазерного уровня ионов неодима в несколько раз за счет эффективного переноса энергии, поглощенной в широких спектральных линиях ионов хрома. Так, например, на основе кристаллов иттрий-скандиевого граната с хромом и неодимом были созданы лазеры, обеспечивающие КПД = 11 % в режиме свободной генерации и до 9 % в режиме модулированной добротности, работающие в частотно-периодическом режиме. Эти результаты остаются рекордными и на сегодняшний день.

Были предложены и реализованы и более сложные схемы. Так, в системе хром-тулий-гольмий приходу возбуждения на верхний лазерный уровень гольмия предшествуют семь актов безызлучательных переносов энергии. Для описания процесса энергодвижения в этой системе требуется знание более десятка параметров, которые были измерены различными способами в разных кристаллах. Соответствующим подбором составов кристаллов процесс энергодвижения в них был оптимизирован с точки зрения получения максимальной населенности на верхнем лазерном уровне гольмия. В результате на кристалле иттрий-скандиевого граната с хромом, тулием и гольмием был создан непрерывный лазер двухмикронного диапазона, обеспечивающий КПД до 50 % при селективном возбуждении в полосу поглощения ионов хрома. Заметим, что из общих соображений КПД такого лазера не мог превышать 30 %.



**Рис. 1.** Спектры поглощения ионов неодима в области возбуждения диодами на основе арсенида галлия в кристаллах иттрий-алюминиевого граната и ванадата гадолиния.

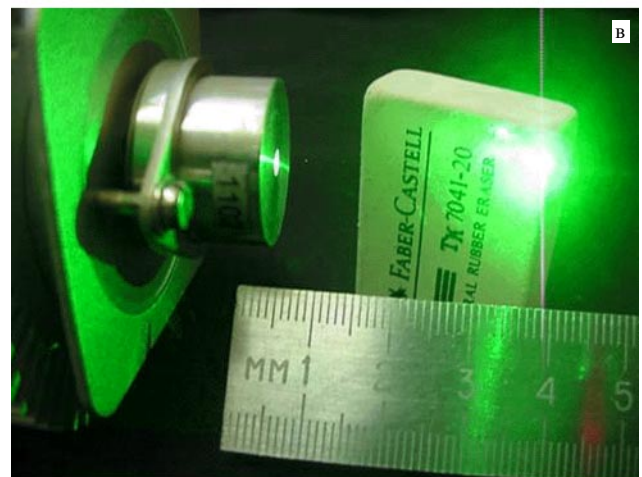
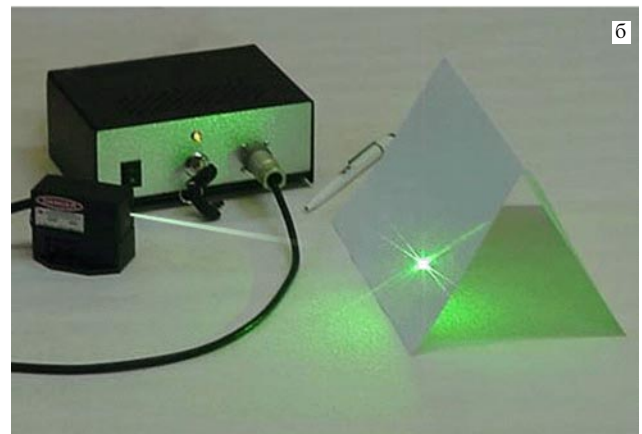
Полученный результат объясняется тем, что один из актов энергодвижения обладает квантовым выходом 2.

В начале 90-х годов на конференциях по физике твердотельных лазеров доклады, посвященные физике лазеров с ламповой накачкой, практически исчезли. Пришло время так называемой диодной накачки, т.е. твердотельные лазеры стали возбуждаться полупроводниковыми лазерами. В лаборатории А.М. Прохорова этой технологией стали заниматься в начале 60-х годов совместно с заводом "Старт". В то время диоды были маломощными и работали при азотной температуре, поэтому генерации получить не удалось, но была четко осознана перспективность этого метода. Хотя даже значительно позднее многие проявляли скепсис: зачем лазер накачивать лазером?

А.М. Прохоров с сотрудниками и Ж.И. Алферов с сотрудниками предложили конкретные лазерные диоды для накачки ионов неодима. К тому времени были созданы достаточно мощные диоды и реализация идеи диодной накачки стала возможной. Этому предшествовали фундаментальные работы по селективному возбуждению генерации твердотельных лазеров излучением криптоновых, аргоновых и других лазеров.

Различаются два вида диодной накачки. Она может быть поперечной, т.е. к кристаллу приставляются различным образом скомпонованные тысячи полупроводниковых источников света, излучающих некогерентным образом. Кристалл в этом случае служит синхронизатором фазы с КПД до 80%. Очевидно, что синхронизовать излучение такого большого числа источников каким-либо другим способом — задача вряд ли выполнимая. Именно на этом пути получены киловаттные мощности непрерывного излучения. К сожалению, у нас это представляет объективную реальность, не данную нам в ощущениях из-за отсутствия мощных диодных матриц в необходимых количествах.

С продольной накачкой, когда кристалл возбуждается в торец небольшим количеством излучателей, наша "броня крепка". Для этих целей предложены и разработаны новые кристаллы, требования к которым существенно отличаются от требований к кристаллам, возбуждаемым лампами.



**Рис. 2.** (а–в) Внешний вид одночастотных лазеров, излучающих в зеленой области спектра.

Технология продольной диодной накачки требует большого селективного поглощения на длине волны излучения лазерного диода. Это существенно облегчает конструкцию лазера и получение излучения высокого качества. Одним из таких кристаллов является кристалл гадолиниевого ванадата. На рисунке 1 представлены спектры поглощения в области излучения лазерных диодов на основе арсенида галлия. Видно, что коэффициент поглощения неодима в этом кристалле во много

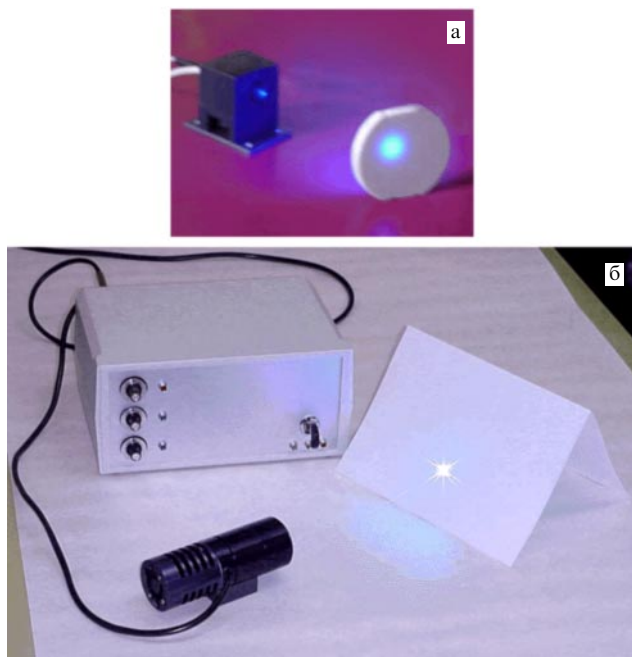


Рис. 3. (а, б) Внешний вид одночастотных лазеров, излучающих в голубой области спектра.

раз выше, чем в кристалле иттрий-алюминиевого граната. Такое большое поглощение позволяет использовать кристаллы толщиной порядка 1 мм и менее. В первых же экспериментах в лазере крайне простой конструкции на кристалле ванадата гадолиния был достигнут КПД = 57 %.

Технология диодной накачки существенно расширила спектральную область эффективной генерации. Так, только для ионов неодима она расширилась от 0,45 до 1,5 мкм, т.е. от голубой до инфракрасной области спектра. Существенно, что в последние два-три года появились отечественные источники накачки на основе полупроводниковых лазеров на выходные мощности от единиц до десятков ватт, в том числе и с волоконным выводом излучения. Это позволило существенно расширить исследования в области физики лазеров с диодной накачкой.

На основе разработанных новых кристаллов было реализовано внутррезонаторное удвоение частоты и получена одномодовая и одночастотная генерация мощностей ваттного диапазона в зеленой области спектра с КПД до 25 %. Внешний вид таких лазеров представлен на рис. 2.

На слабом переходе неодима в области 1444 нм была получена генерация мощностью до 7 Вт с КПД = 19 %. По целому ряду причин эта длина волны представляет большой интерес для широкого круга практических применений.

Был также создан эффективный лазер на переходе в основное состояние ионов неодима с длиной волны 912 нм и с КПД = 48%. Внутррезонаторное удвоение частоты этого излучения привело к созданию лазера в голубой области спектра (456 нм) с КПД = 18 % и мощностью излучения до 250 мВт. Существенно отметить, что выходные мощности всех перечисленных лазеров могут быть значительно повышены путем увеличения мощности накачки. На рисунке 3 представлен внешний вид одночастотных голубых лазеров.

Наконец кратко остановлюсь на новом типе кристаллических лазеров, а именно кристаллических волоконных лазерах с поперечным градиентом показателя преломления. Была разработана и реализована технологическая установка для выращивания кристаллических волокон. Источником нагрева в ней служит CO<sub>2</sub>-лазер. Оригинальной частью этой установки является элемент компьютерной оптики — так называемый фокусатор, преобразующий пучок излучения CO<sub>2</sub>-лазера в кольцо. Необходимо заметить, что сама компьютерная оптика имеет относительно недолгую историю. Ее основателями были А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян и В.А. Соيفер. В данной технологической установке фокусатор позволяет получить на заготовке строго симметричный нагрев кольцевой формы диаметром около 1,5 мм. Вытягивание кристаллического волокна осуществляется из центра этого кольца. Подбирая состав заготовки и соответствующие технологические условия, удалось получить в кристаллическом волокне на основе иттрий-алюминиевого граната с неодимом значительный радиальный градиент как концентрации ионов неодима, так и показателя преломления (рис. 4). В результате в таком волокне был реализован волноводный режим генерации при длине активной среды порядка 1 см. Очевидное

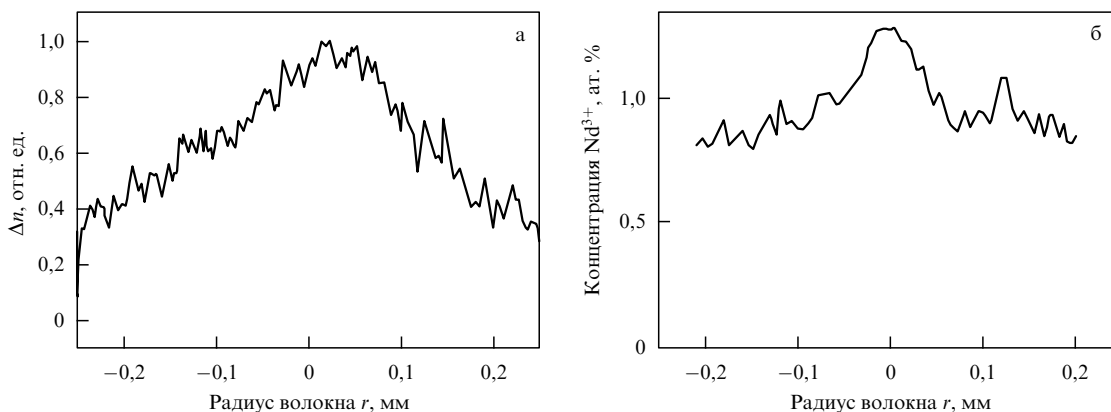


Рис. 4. (а) Радиальный профиль показателя преломления в кристаллическом волокне иттрий-алюминиевого граната с неодимом. (б) Распределение концентрации ионов неодима по сечению волокна.

достоинство такого лазера состоит в том, что диодная накачка осуществляется в полную апертуру волокна (500 мкм), а генерация — лишь в центральной его части порядка 40 мкм.

КПД генерации с диодной накачкой в волноводном режиме достигает 25 % при существенном увеличении яркости и качества излучения. Такая активная среда является кристаллическим аналогом лазера на основе кварцевого волокна с двойной оболочкой. Однако в последнем для реализации эффективной генерации требуется активная среда длиной 30–100 м, что обусловлено малой концентрацией активных частиц и, как следствие малым поглощением возбуждающего излучения.

В заключение хочу сделать вывод, не касающийся изложенных результатов. Не автору данного сообщения о них судить. Этот вывод таков. Следуя стратегии развития и соблюдая традиции, заложенные великими учителями, создателями квантовой электроники, и в настоящее, далеко не лучшее для отечественной науки время нашим научно-исследовательским коллективам удается выполнять работы мирового уровня, в том числе и экспериментальные. Низайший поклон за это как ушедшим от нас, так и всем ныне здравствующим.

PACS numbers: 01.65.+g, 42.55.-f, 42.62.-b

## От квантовой электроники — к лазерной технике (первые шаги применения)

А.Л. Микаэлян

### 1. Введение. "Долазерный период" (50-е годы)

Процесс развития общества сопровождается постоянным увеличением объемов информации, с которыми мы сталкиваемся в различных областях нашей деятельности. Непрерывно растут требования к скорости обработки информации и темпу ее передачи. Появилась необходимость оперировать большими массивами информации при высокой степени параллелизма вычислений и т.п.

История развития показывает, что решение указанных проблем передачи, обработки и хранения информации наиболее успешно достигается путем освоения новых, более коротковолновых диапазонов электромагнитных волн.

40-е годы ознаменовались началом освоения микроволнового диапазона волн (дециметровые и сантиметровые волны). Это привело к созданию волноводной и полупроводниковой техники, а также к многочисленным ее применениям в системах связи и радиолокации, в вычислительной технике и системах обработки и хранения информации.

Характерная особенность развития СВЧ-техники заключалась в широком использовании методов классической оптики. Так, например, были предложены и созданы многозеркальные антенны, получившие широкое применение (А.А. Пистолькорс, Л.Д. Бахрах), линзовые СВЧ-антенны с переменным показателем преломления из искусственного диэлектрика (W. Коск, А.Л. Микаэлян), геодезические СВЧ-линзы (А.А. Пистолькорс, Я.Н. Фельд, Л.Е. Зелкин) и др. Особенно важным для радиолокационных и радиорелейных систем связи стало

создание "невзаимных" волноводно-ферритовых элементов (в том числе вентиля на "пределном волноводе"), использующих хорошо изученные в оптике магнитооптические явления в ферромагнитных средах. Разработка этих устройств (предложенных автором в 1951 г.) проводилась по инициативе А.А. Пистолькорса и была доведена до стадии их широкого внедрения в нашей стране.

Несмотря на бурное развитие СВЧ-техники, уже в начале следующего десятилетия (т.е. в 50-е годы) были предприняты попытки продвинуться в еще более коротковолновые (миллиметровый и субмиллиметровый) диапазоны волн, где целый ряд практических реализаций выглядел более изящно (например, остронаправленные диаграммы излучения при небольших размерах антенн, широкополосность каналов связи и др.). Однако СВЧ-техника по многим причинам не получила заметного развития в этих диапазонах волн (трудности создания волноводов с малыми потерями, большие шумы в приемниках, ухудшение условий распространения волн в атмосферном слое и др.).

Одновременно с этим процессом все более четко начали вырисовываться контуры становления и развития квантовой электроники — нового научного направления, связанного с использованием явления индуцированного излучения (открытого Эйнштейном в 1917 г.) для создания когерентных источников излучения в оптическом диапазоне волн. Фундаментальные исследования в области квантовой электроники наиболее интенсивно проводились в нашей стране и в США.

Характерной особенностью исследований, проводимых у нас под руководством А.М. Прохорова и Н.Г. Басова, была практическая направленность на конечную цель — создание когерентного оптического генератора, что позволило бы начать освоение оптического диапазона волн для широкой гаммы разнообразных применений. Уже в 1955 г. появилась статья Басова, Прохорова по трехуровневой накачке, в 1958 г. был сформулирован принцип использования резонатора (Прохоров), после чего стало ясно, что на базе накопленных результатов исследований по спектроскопии кристаллов и газов (ФИАН, ИКАН, ГОИ и др.) можно приступить непосредственно к созданию лазера. В 1959 г. результаты фундаментальных исследований Басова и Прохорова были отмечены Ленинской премией, а в 1960 г. появился первый лазер на рубине.

### 2. Создание лазера — начало освоения оптического диапазона

Таким образом, 60-е годы можно считать началом освоения оптического диапазона волн, т.е. началом развития лазерной техники. Важность этого события была по достоинству отмечена в 1964 г. присуждением Нобелевской премии по физике Н.Г. Басову, А.М. Прохорову (СССР) и Ч. Таунсу (США).

Надо отметить, что большинство специалистов в области радиолокации и связи не придавали должного значения возможностям использования оптического диапазона волн ввиду ряда причин (большие потери при распространении волн в атмосфере, отсутствие оптических волноводов для передачи информации, низкая эффективность лазеров, шумовые ограничения при приеме и др.). В связи с этим Министерство радиопромышленности поручило институту, в котором я работал,