

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации, посвященная 50-летию квантовой электроники

(2 июня 2004 г.)

2 июня 2004 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации, посвященная 50-летию квантовой электроники. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Крохин О.Н.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Ранние годы квантовой электроники.*

2. **Дюклуа М.** (Universite Paris-Nord, Paris). *Квантовая электроника в Европе: с первых лет до наших дней.*

3. **Багаев С.Н.** (Институт лазерной физики РАН, Новосибирск). *Квантовая электроника в Сибири.*

4. **Щербаков И.А.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Твердотельные лазеры — одно из важнейших направлений квантовой электроники.*

5. **Микаэлян А.Л.** (Институт оптико-нейронных технологий РАН, Москва). *От квантовой электроники — к лазерной технике (первые шаги применения).*

6. **Апанасевич П.А.** (Институт физики Национальной академии наук Белоруссии, Минск). *Развитие лазерной физики в Белоруссии.*

7. **Макаров В.А.** (Физический факультет и Международный лазерный центр Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва). *Квантовая электроника и школа Р.В. Хохлова и С.А. Ахманова по когерентной и нелинейной оптике в Московском университете.*

8. **Казаков А.А.** (Научно-производственное объединение "Полнос", Москва). *Применение лазеров в военной технике.*

9. **Дианов Е.М.** (Научный центр волоконной оптики Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Волоконные лазеры.*

10. **Попов Ю.М.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Об истории создания инжекционного лазера.*

Краткое содержание докладов № 1, 4–7, 9, 10 публикуется ниже.

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

### Ранние годы квантовой электроники

О.Н. Крохин

В начале 1950-х годов в Лаборатории колебаний им. Л.И. Мандельштама и Н.Д. Папалекси по инициативе А.М. Прохорова начались спектроскопические исследования молекул в радиочастотном диапазоне электромагнитного излучения. Пришедший в ФИАН еще студентом, Н.Г. Басов активно включился в эту работу.

Радиоспектроскопия в то время представляла собой новое, быстроразвивающееся направление физики, в котором работали несколько групп ученых в разных странах, среди которых в первую очередь следует назвать группу Ч. Таунса в Колумбийском университете США.

С какими особенностями и, следовательно, проблемами столкнулись пионеры радиоспектроскопии? Предметом исследований в радиодиапазоне являются квантовые переходы между вращательными уровнями молекул. Частоты этих переходов, например, для молекул аммиака лежат в области субмиллиметрового диапазона длин волн (максимальное значение энергии кванта составляет  $2 \times 10^{-3}$  эВ,  $\lambda \sim 0,5$  мм). Как мы видим, энергия кванта значительно ниже величины  $kT$  ( $T$  — температура), поэтому при нормальной температуре обычно заселены несколько нижних вращательных уровней молекулы. Это приводит к снижению поглощения падающего излучения на частоте перехода, поскольку оно представляет собой баланс актов поглощения при переходе с нижнего уровня на верхний и индуцированного испускания при обратном процессе, т.е. пропорционально разности  $N_1 - N_2$ , где  $N_1$  и  $N_2$  — заселенности нижнего и верхнего уровня соответственно. В результате снижается чувствительность метода спектроскопии, основанного на измерениях поглощения радиоволн.

Другое обстоятельство, которое также приводит к снижению точности определения частот квантовых переходов молекул, находящихся в газовом состоянии, — это уширение линии поглощения из-за эффекта Доплера. Доплеровское уширение линий присутствует во всех

вариантах газовой спектроскопии, в том числе, естественно, и в оптическом диапазоне.

Обе эти проблемы могут быть решены посредством использования вместо газов пучков молекул, пропускаемых через высокочастотный резонатор в направлении, в котором тип колебаний поля в резонаторе является почти "предельным", т.е. имеет очень большую фазовую скорость в этом направлении. При этом ясно, что поскольку доплеровское смещение частоты перехода пропорционально  $v/c$ , где  $v$  — тепловая скорость молекулы, а  $c$  — фазовая скорость волны, то при  $c \rightarrow \infty$  частотный сдвиг будет мал.

Использование вместо газа пучка молекул позволяет также увеличить поглощение за счет применения метода "сортировки" молекул по уровням неоднородным электрическим или магнитным полем. В частности, если сортировка молекул производится неоднородным электрическим полем (например, квадрупольным конденсатором, состоящим из четырех металлических стержней, вдоль оси которого распространяется пучок), то происходит следующее: при входе в сортирующую систему молекулы, находящейся в результате теплового возбуждения на нескольких квантовых вращательных уровнях (в "смешанном" состоянии), электрическое поле "перепутывает" эти состояния, возникает дипольный момент и, соответственно, сила в поперечном по отношению к направлению движения молекулы (в направлении градиента неоднородного поля). В итоге частицы, находящиеся на близлежащих уровнях исследуемого перехода, фокусируются на ось системы или выбрасываются из пучка.

Мы видим, что применение пучков позволило решить две важные для спектроскопии задачи — исключить доплеровское уширение линии перехода и повысить эффективность поглощения за счет сортировки.

Теперь уже до принципа создания мазера было совсем близко. Действительно, а почему бы не использовать для целей радиоспектроскопии не поглощательные, а излучательные переходы? И если мы попытаемся проследить за логикой авторов первых публикаций в 1954 г. Н.Г. Басова и А.М. Прохорова и Ч. Таунса, Дж. Гордона и Х. Цайгера, то увидим, что обе эти группы радиоспектроскопистов говорили в своих статьях, в первую очередь, об увеличении разрешающей силы радиоспектроскопов за счет использования вместо поглощения индуцированного испускания, поскольку последнее вследствие регенерации должно привести к сужению линии перехода.

Эти две работы действительно ознаменовали начало новой эры в радиофизике — эры применения квантовых систем для генерации электромагнитного излучения. Теперь спустя 50 лет после этого выдающегося открытия мы хорошо осознаем его значение для современной цивилизации.

В конце 1963 г., когда уже было ясно, что это открытие привело к созданию нового научного и технического направления, получившего название "квантовая электроника", и в научных кругах формировалось мнение о том, что оно является выдающимся достижением, Д.В. Скобельцын выдвинул его на соискание Нобелевской премии. В своем письме в Нобелевский комитет он писал: "...изучая этот вопрос, можно вспомнить, что первые соображения об использовании индуцированного излучения для когерентного усиления и генерации электро-

магнитных волн были высказаны независимо этими исследователями в начале 50-х годов на конференциях, труды которых, к сожалению, не были изданы впоследствии.

Первые же публикации в печати, относящиеся к квантовым генераторам, появились в 1954 г. А именно: Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым в январе 1954 г. была направлена в редакцию *Журнала экспериментальной и теоретической физики* статья "Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул", которую редакция опубликовала в томе 27 на стр. 431–438 в октябре 1954 г. В мае 1954 г. Ч. Таунс с сотрудниками направил в журнал *Physical Review* статью "Микроволновый молекулярный генератор и новая сверхтонкая структура микроволнового спектра аммиака". Эта работа была опубликована в томе 93 на стр. 282–284 в июле 1954 г.

Завершая свое письмо, Д.В. Скобельцын пишет: "...То многообразие работ по квантовым генераторам, которое мы имеем к настоящему времени, так или иначе отражает новые идеи, выдвинутые и сформулированные независимо в одно и то же время Ч. Таунсом, Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым.

Я надеюсь, что мои доводы достаточно основательны для рассмотрения Нобелевским комитетом моих соображений, изложенных в настоящем письме".

Перейдем теперь к этим первым работам. В статье Ч. Таунса и его сотрудников Дж. Гордона и Г. Цайгера, опубликованной в письмах к редактору журнала *Physical Review* в т. 93, с. 282–284 в июле 1954 г. и полученной редакцией 5 мая 1954 г., сообщалось о том, что "создана и работает экспериментальная установка, которая может быть использована в качестве микроволнового спектрометра высокого разрешения, микроволнового усилителя или очень стабильного генератора. Это устройство, в котором используется инверсионный спектр молекулы аммиака, основано на излучении энергии внутри резонатора с высокой добротностью пучком молекул аммиака...".

Это было первое сообщение о реализации молекулярного генератора — мазера. Статья называлась "Молекулярный микроволновый генератор и новая сверхтонкая структура в микроволновом спектре  $\text{NH}_3$ ".

Н.Г. Басов и А.М. Прохоров опубликовали в *ЖЭТФ* в т. 27, с. 431–438 в октябре работу (послана в печать в январе 1954 г.), в которой, в частности, было сказано: "...Используя молекулярный пучок, в котором отсутствуют молекулы в нижнем состоянии рассматриваемого перехода, можно сделать "молекулярный генератор". Принцип действия молекулярного генератора состоит в следующем.

Отсортированный молекулярный пучок, в котором отсутствуют молекулы в нижнем состоянии рассматриваемого перехода, пропускается через объемный резонатор. За время пролета молекул в объемном резонаторе часть молекул переходит из верхнего состояния в нижнее, отдавая энергию объемному резонатору. Если мощность потерь внутри резонатора меньше мощности излучения молекул, то наступает самовозбуждение, при котором мощность в резонаторе растет до величины, определяемой эффектом насыщения. Таким образом, самовозбуждение наступит, если ...". Далее идут формулы, определяющие основные параметры генератора и в конечном итоге оценивается величина добротности, необходимая

для самовозбуждения молекулярного генератора. Для молекулы CsI, которую исследовали Н.Г. Басов и А.М. Прохоров, оказалось, что добротность должна составлять величину не менее  $7 \times 10^6$  (!). Это послужило основанием утверждать, что в данном случае самовозбуждение невозможно (не хватает трех порядков). Однако учитывая, что система формирования пучка в их экспериментах была недостаточно эффективной, авторы все же делают оптимистический вывод о возможности реализации генератора.

Здесь надо сказать, что, понимая это обстоятельство, Н.Г. Басов и А.М. Прохоров начали создавать установку на пучке молекул формальдегида, который был гораздо интенсивнее. Однако после публикации Ч. Таунса они перешли на аммиак и через непродолжительное время получили генерацию. Официальной публикации на эту тему по понятным причинам не было, однако в докторской диссертации Н.Г. Басова, представленной к защите в конце 1955 г., содержалось подробное описание молекулярного генератора, работающего на пучке молекул аммиака. В отзыве на диссертацию А.М. Прохоров, в частности, писал: "Возможность создания молекулярного генератора была впервые указана Н.Г. Басовым в 1952 г."

Следует добавить: единственное, что удалось обнаружить в архивах на эту тему, — доклад Н.Г. Басова и А.М. Прохорова, находящийся в стенограмме Совещания по магнитным моментам ядер от 22–23 января 1953 г. (Архив Российской академии наук, фонд 1522, опись 1, дело 59, с. 36–47). Доклад был сделан Н.Г. Басовым, и в нем есть два существенных места, имеющих прямое отношение к исследуемой здесь теме. В частности, там сказано следующее: "После того, как мы выяснили в общем теоретические возможности сортировки молекул, сразу естественно было перейти на новую методику получения<sup>1</sup>. Именно: смотреть не поглощение микроволн, а излучение, т.е. отсортировать молекулы, находящиеся не в нижнем вращательном состоянии, а выделять молекулы, находящиеся в верхнем вращательном состоянии. И наблюдать уже не спектр поглощения, а спектр излучения молекул... Для наблюдения индуцированного излучения такого молекулярного пучка он пропускается через резонатор. С течением времени, если добротность резонатора достаточно велика, энергия, запасенная в резонаторе, растет и вероятность излучения молекулами энергии стремится к единице".

Другое интересное заявление, сделанное в этом докладе, звучит так: "Здесь сразу надо сказать, что, как было показано А.М. Прохоровым, монохроматизация пучка по скоростям необязательна, так как здесь можно пользоваться таким высокочастотным полем, при котором доплеровское расширение<sup>2</sup> не получается. Если пропустить пучок вдоль волновода в таком направлении, в котором фазовая скорость волн, скажем  $E$ -волны, равна бесконечности, то сдвига из-за доплеровского эффекта не получается, так как сдвиг частоты определяется отношением скорости молекулярного пучка к фазовой скорости волн в направлении распространения пучка".

Заканчивая анализ событий, которые происходили в начале 50-х годов, я все же упомяну, что позже

Н.Г. Басову и его ученикам удалось запустить молекулярный генератор на пучке молекул формальдегида.

Из работ раннего цикла мне хотелось бы упомянуть предложение "сортировки" частиц методом накачки активных сред электромагнитным излучением — так называемая трехуровневая схема, которая с успехом была применена для создания мазеров — малошумящих усилителей СВЧ-диапазона на кристалле рубина, а в дальнейшем — для создания лазеров. Эта работа была опубликована в *ЖЭТФ* в т. 28, с. 249, 250 в феврале 1955 г. Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым и называлась "О возможных методах получения активных молекул для молекулярного генератора".

Открытие новых методов генерации электромагнитного излучения — области науки и техники, которую мы сейчас называем квантовой электроникой, привело к бурному развитию научных исследований в этом направлении и к беспрецедентному внедрению этих методов во многих областях техники, где в ряде случаев достигнуты фантастические результаты, которые в те далекие 50-е годы было просто невозможно себе представить. Например, сейчас реализована генерация импульсов излучения, имеющих длительность  $4 \times 10^{-15}$  с, получены стабильные колебания, частота которых определена с точностью  $10^{-15}$ , построены линии оптической связи со скоростью передачи  $10^{10}$  бит в секунду и многое другое. Поэтому в заключение этой статьи, как мне кажется, нельзя не сказать о первых работах, в которых были сделаны попытки перенести принципы молекулярного генератора на область оптических частот.

В июне 1958 г. А.М. Прохоров опубликовал в *ЖЭТФ* в т. 34, с. 1658, 1659 статью (послана в редакцию в апреле) "О молекулярном усилителе и генераторе на субмиллиметровых волнах". В этой работе был предложен так называемый открытый резонатор, в котором высокая добротность обеспечивалась за счет короткой длины волны излучения: "Для создания молекулярного генератора в качестве резонатора можно использовать два плоскопараллельных зеркала. Если расстояние между зеркалами равно  $l$  и коэффициент отражения от зеркала равен  $k$  (считая, что потери энергии плоской волны происходят только при отражении от зеркала), то добротность такой системы равна

$$Q = \frac{2\pi l}{\lambda} (1 - k)^{-1}."$$

Как известно, открытые многомодовые резонаторы являются неизменным атрибутом лазеров.

В том же году А.Л. Шавлов и Ч. Таунс опубликовали в *Physical Review* в т. 112, с. 1940–1949, в декабре (послана в редакцию в августе) развернутую статью "Инфракрасные и оптические мазеры". В этой статье сообщалось: "Рассмотрена возможность переноса техники мазеров в инфракрасный и оптический диапазон. Показано, что при использовании резонатора сантиметрового размера, имеющего много резонансных мод, генерация на указанных волнах может быть достигнута при накачке вполне реальной мощностью некогерентного света".

И, наконец, Н.Г. Басов, Б.М. Вул и Ю.М. Попов опубликовали в *ЖЭТФ* в т. 37, с. 586, 587 в августе 1959 г. (поступила в редакцию в мае 1959 г., зарегистрирована в Комитете по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР 7 июля 1958 г.) статью "Квантово-механические полупроводниковые генераторы и

<sup>1, 2</sup> Так в тексте. (Примеч. автора.)

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 общественности 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.)