

Русские открытия XX века

Возникновение и начало развития квантовой электроники

Н.Г. БАСОВ

Избранные статьи и выступления

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2025

УДК 082.2+621.373.8
ББК 32.86
Р89

Р89 Русские открытия XX века

Возникновение и начало развития квантовой электроники

Н.Г. Басов. Избранные статьи и выступления

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2025. – 298 с. ISBN 978-5-94836-725-5

Н.Г. Басов – выдающийся физик XX столетия. В 1964 г. вместе с А.М. Прохоровым (СССР) и Ч.Х. Таунсом (США) он был удостоен Нобелевской премии за «фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей, основанных на мазерно-лазерном принципе». Своё открытие он сделал в 1952 г., ещё будучи аспирантом, и затем всю жизнь отдавал ему большую часть времени. Трудился он в Москве, в Физическом институте АН СССР и в Московском инженерно-физическом институте, где занимался научной и учебной работой. Содержание книги покрывает весь период творческой активности Н.Г. Басова. Отобранные статьи и выступления написаны им лично либо с небольшим числом соавторов. Надеемся, что это даст читателю возможность лучше понять его идеи и взгляды.

Со времени открытия лазеры, как и породившая их квантовая механика, постоянно привлекают общественное внимание. Это отражает продолжающееся их вторжение в деятельность человека, а также то, что они остаются открытым полем для научных исследований и создания технологий.

Предлагаемый сборник трудов Н.Г. Басова может быть полезен физикам и историкам физики, студентам, старшеклассникам, а также всем, кто интересуется лазерами, их историей и применениями.

Много статей написаны простым, доступным неспециалисту языком. Помимо физики речь идёт о развитии науки, её роли в обществе, философских вопросах, организации науки и пр. Таким образом, широкий круг читателей сможет близко познакомиться с мировоззрением нашего выдающегося соотечественника.

УДК 082.2+621.373.8
ББК 32.86

© Виноградов А.В., составление, 2025

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2025

Текст приведен в оригинальном виде.

Орфография, пунктуация и стиль автора сохранены.

ISBN 978-5-94836-725-5



W. J. [unclear]

От издательства

7 июня 2024 года Генеральная Ассамблея ООН официально объявила 2025 год Международным годом квантовой науки и технологий. Поводом послужило столетие квантовой механики, рождение которой ООН отнесло к 1925 г., связав с началом публикации В. Гейзенбергом серии работ 1925–1927 гг. Менее 30 лет спустя, в 1952 г., советский физик Н. Г. Басов разглядел в современной ему квантовой науке ростки нового направления — квантовой электроники. В результате четырехлетней работы вместе с группой поддержавших его молодых ученых Физического института АН СССР (ФИАН) он теоретически обосновал и создал первый в нашей стране мазер. В 1956 г. он защитил по этой работе докторскую диссертацию на тему «Молекулярный генератор». Работа получила развитие и отклик в научных кругах и в правительстве. В 1959 г. докторам физ.-мат. наук, сотрудникам ФИАН Н. Г. Басову и А. М. Прохорову была присуждена Ленинская премия «за разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн», а в 1964 г. оба наших ученых вместе с Ч. Таунсом (США) получили Нобелевскую премию «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей на основе мазерно-лазерного принципа».

Наряду с ядерной физикой и микроэлектроникой лазеры определили направление мирового технического прогресса второй половины XX века. Жизнь и деятельность Н. Г. Басова — образец служения своему народу и науке. Согласно указу президента В. В. Путина, в 2022 году 100-летний юбилей Н. Г. Басова в РФ отмечался официально. Тем же указом учреждены пять персональных стипендий им. Н. Г. Басова для аспирантов ФИАН.

В связи с юбилеем в печати и СМИ появилось много мемуарных и научно-биографических материалов о Н. Г. Басове. Продолжают они выходить и сейчас. В отличие от них в настоящем издании впервые за много лет собраны выступления и статьи, написанные Н. Г. Басовым лично или с небольшим числом соавторов.

Источником в основном служили справочные материалы (РЛ¹ [3]), опубликованные еще при жизни Н. Г. Басова.

Издание охватывает весь период его творческой активности. Основное содержание — «многоликая», по выражению Н. Г. Басова, квантовая электроника. Это научно-технические направления, лично им инициированные либо те, что вызвали его деятельный интерес. Перечислим их в хронологическом порядке. Полупроводниковые лазеры, лазерный термоядерный синтез, квантовые стандарты частоты, применение лазеров в исследованиях космоса, проверка общей теории относительности и космологических гипотез, химические лазеры, эксимерные лазеры. Им посвящены отдельные статьи настоящего сборника. Обзор работ по этим и другим направлениям квантовой электроники, выполненных в ФИАНе от ее создания до 1986 г., дан Н. Г. Басовым в статье 23. Несколько статей посвящены организации лазерных исследований в СССР, вопросам философии, истории науки и ФИАНу. В приложении помещены отзывы и статьи о Н. Г. Басове академиков А. М. Прохорова, Д. В. Скобелыцына и О. Н. Крохина, работавших и близко знавших Н. Г. Басова в разные годы. В конце дана краткая хронология научной деятельности Н. Г. Басова.

Книга будет интересна учащимся старших классов, студентам, преподавателям, профессионалам — инженерам и физикам, а также гуманитариям и всем читателям, интересующимся творчеством Н. Г. Басова, наукой и ее ролью в государстве и общественной жизни.

Составитель сборника — доктор физ.-мат. наук, профессор А. В. Виноградов. Окончив МФТИ в 1964 г., поступил на работу в ФИАН инженером. С 1974 г. после того, как Н. Г. Басов возглавил ФИАН, работал ученым секретарем, а с 1978 по 1982 гг. — заместителем директора института. В 1991 г. в составе авторского коллектива ему была присуждена Государственная премия СССР за цикл работ по разработке и созданию многослойной рентгеновской оптики. В настоящее время — главный научный сотрудник Отделения квантовой радиофизики ФИАН им. Н. Г. Басова. В 2021 г. опубликовал статью «Н. Г. Басов во главе Физического института Академии наук СССР (1973–1988)», см. РЛ [17].

¹ РЛ — рекомендуемая литература, см. стр. 295.

Содержание

От издательства.....	4
1. Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул, ЖЭТФ, 1954.....	10
2. Молекулярный генератор, автореферат докторской диссертации, Физический институт АН СССР, 1956.....	22
3. Молекулярный генератор, докторская диссертация, Выводы и Литература, Физический институт АН СССР, 1956.....	31
4. Молекулярный генератор, Радиотехника и электроника, 1956.....	36
5. Молекулярный генератор на пучке молекул аммиака, Приборы и техника эксперимента, 1957.....	45
6. Об условии самовозбуждения молекулярного генератора без объемного резонатора, Радиотехника и электроника, 1958.....	54
7. Квантово-механические полупроводниковые генераторы и усилители электромагнитных колебаний, ЖЭТФ, 1959.....	58
8. О преобразовании механической энергии в энергию СВЧ- колебаний и о СВЧ-моторе, Радиотехника и электроника, 1959.....	61
9. Квантовая радиофизика, выступление на Общем собрании АН СССР, 1960.....	69
10. Генерация, усиление и индикация инфракрасного и оптического излучений с помощью квантовых систем, Аннотация, УФН, 1960.....	85
11. Выступление на Всесоюзном совещании научных работников в Кремле, 1961.....	90
12. О возможности исследования релятивистских эффектов с помощью молекулярных и атомных стандартов частоты, Аннотация, УФН, 1961.....	96
13. Получение отрицательных температур методом нагрева и охлаждения системы, ЖЭТФ, 1963.....	101
14. Полупроводниковые квантовые генераторы (лекция, прочитанная при вручении Нобелевской премии, УФН, 1965).....	106
15. Opening remarks: Fourth International Quantum Electronics Conference, Phoenix, Az, 1966 (IEEE J. Quantum Electronics, 1966).....	126

16. Физика и технический прогресс, доклад на Общем собрании АН СССР, 1970	134
17. Лазер и энергетика будущего, газета «Правда», 1979	153
18. Индуцированное излучение, доклад на Научной конференции в честь 100-летия А. Эйнштейна, Берлин – Потсдам, 1979	159
19. Квантовая электроника и философия, доклад на III Всесоюзном совещании по философским вопросам современного естествознания, 1981	174
20. Первый директор ФИАН. К 90-летию со дня рождения С. И. Вавилова, Наука и жизнь, 1981	187
21. Лазерный термоядерный синтез, Физика плазмы, 1983	192
22. Легендарный ФИАН, ответы на вопросы корреспондента «Огонька» В. Белецкой, 1984	203
23. Квантовая электроника в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР, УФН, 1986	211
24. Развитие и перспективы лазерного термоядерного синтеза, Квантовая электроника, 1993	231
25. Quantum Frequency Standards (IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2000)	243
Приложение	277
А. М. ПРОХОРОВ. Отзыв о работе Н. Г. Басова «Молекулярный генератор», 1955	279
Д. В. СКОБЕЛЬЦЫН. Отзыв о научных трудах доктора физико-математических наук Н. Г. Басова, 1958	280
О. Н. КРОХИН. Памяти Николая Геннадиевича Басова, Квантовая электроника, 2002	283
О. Н. КРОХИН. Слово о Николае Геннадиевиче Басове, Квантовая электроника, 2017	288
Из хроники научной жизни Н. Г. Басова	292
Рекомендуемая литература	295

ИЗБРАННЫЕ СТАТЬИ И ВЫСТУПЛЕНИЯ

I. Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул^{*}

Разобраны методы использования молекулярных пучков для исследования вращательных спектров молекул. Применение молекулярных пучков позволяет получать узкие спектральные линии с шириной ~ 7 кГц и дает возможность изучать вращательные спектры веществ, которые при нормальных условиях находятся в твердом состоянии.

Введение

Большим ограничением применения радиоспектроскопического метода для исследования вращательных спектров молекул является то, что вращательными спектрами обладают только вещества, находящиеся в газообразном состоянии. Практически необходимо иметь давление паров исследуемого вещества $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст., так как при более низких давлениях уменьшается интенсивность линий. Таким образом, для исследования вращательных спектров твердых при нормальных условиях веществ необходимо нагревать поглощающую ячейку спектроסקопа до такой температуры, при которой упругость паров исследуемого вещества достигает давления $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст. Такой путь исследования ведет к потере разрешающей силы радиоспектроскопа, так как нагревание вещества ведет к расширению спектральных линий из-за эффекта Доплера и соударений молекул со стенками поглощающей ячейки.

Следует отметить, что исследование твердых соединений представляет особый интерес, так как для многих элементов неизвестно достаточно простых газообразных соединений, обладающих дипольными моментами. Большинство же твердых ионных соединений имеют большие дипольные моменты, т.е. могут быть

^{*} Совместно с А. М. Прохоровым // ЖЭТФ, 1954, 27, 431.

исследованы радиоспектроскопическим методом. Например, для элементов группы редких земель неизвестны газообразные соединения, при помощи которых можно было бы определить ядерные моменты этих элементов.

Ширина спектральных линий может быть существенно уменьшена, если наблюдать поглощение микроволн не в газе, как это делается в радиоспектроскопах, а в молекулярном пучке. Ширина линий «монохроматического» по скоростям молекулярного пучка определяется временем пролета молекул в поле микроволнового излучения. Например, если длина пролета молекул в поле равна 1 см и скорость молекул равна 500 м/сек, то полуширина линий получается равной

$$\Delta\nu = 1/2\pi\tau = 8 \text{ кГц}, \quad (1)$$

где τ — время пролета молекул в поле излучения.

Ввиду того что скорости молекул в пучке не одинаковы, казалось бы, что необходимо в пучке также учитывать и доплеровское расширение. От доплеровского расширения линий в немонохроматическом по скоростям пучке молекул можно избавиться, если в объемном резонаторе или волноводе возбуждать такие типы волн, у которых фазовая скорость в направлении распространения пучка равна бесконечности. Это вытекает из того, что смещение частоты, как можно показать, определяется отношением скорости молекул пучка к фазовой скорости волн в направлении распространения пучка¹.

1. Молекулярный пучок

Число молекул, вылетающих из щели источника молекулярного пучка в одну секунду, равно

$$N = \frac{1}{4}n \leq va, \quad (2)$$

¹ Следует заметить, что доплеровское расширение линий молекул газа, заполняющего объемный резонатор или волновод, равно доплеровскому расширению линий газа в свободном пространстве.

где $v = \sqrt{8kT/\pi M}$ — есть средняя скорость молекул пучка; n — плотность молекул внутри источника молекулярного пучка; a — площадь щели источника; M — масса молекулы.

Число молекул пучка, падающих нормально на площадь S в направлении, перпендикулярном плоскости щели источника, равно

$$N_s = (N/\pi r^2)S, \quad (3)$$

где r — расстояние между площадью S и щелью источника.

Из этого числа молекул на вращательном уровне, характеризующем квантовым числом вращательного момента J и колебательным квантовым числом v , находится следующее число молекул:

$$N_{Jv} = N_s \frac{g_J \exp\{-E_J/kT\}}{Q_{\text{вр}}} \frac{g_v \exp\{-E_v/kT\}}{Q_{\text{кол}}}, \quad (4)$$

где E_J — вращательная энергия молекулы; g_J — статистический вес вращательного состояния; $Q_{\text{вр}}$ — вращательная статистическая сумма; E_v — колебательная энергия молекулы; g_v — статистический вес колебательного состояния; $Q_{\text{кол}}$ — колебательная статистическая сумма.

При пропускании пучка молекул через высокочастотное поле частоты $\nu = (E_{J+1} - E_J)/h$ в поглощении энергии принимает участие число молекул, равное

$$N_{\text{акт}} = g_J \left(\frac{N_{Jv}}{g_J} - \frac{N_{J+1v}}{g_{J+1}} \right) \approx N_{Jv} \frac{h\nu}{kT}. \quad (5)$$

Последнее равенство имеет место потому, что для микроволновой области $h\nu \ll kT$.

Таким образом, вследствие почти одинаковой населенности вращательных уровней E_J и E_{J+1} в поглощении микроволновой энергии принимает участие лишь $h\nu/kT$ часть молекул от полного числа молекул, находящихся на уровне E_{Jv} . Молекулы, которые принимают участие в поглощении энергии, мы будем в дальнейшем называть активными молекулами.

Вследствие того что молекулы в молекулярном пучке не взаимодействуют, нарушение распределения молекул по энергетическим уровням не восстанавливается. Это дает возможность увеличить

число активных молекул, производя их сортировку по вращательным состояниям. Сортировку молекул по различным вращательным состояниям можно получить, если пропускать молекулярный пучок через неоднородное электрическое поле с градиентом поля, направленным перпендикулярно направлению распространения пучка. Благодаря тому что проекция эффективного дипольного момента на направление внешнего поля зависит от квантового числа J и его проекции на внешнее поле M_J , молекулы, находящиеся в различных вращательных состояниях, отклоняются неоднородным электрическим полем по-разному, а следовательно, можно выделить молекулы, находящиеся в определенном вращательном состоянии. Такой метод сортировки применяется в резонансном методе молекулярных пучков [1]. Применение сортировки молекул дает возможность увеличить число активных молекул в $\sim kT/h\nu$ раз.

Максимальная плотность молекул в пучке определяется из условия, чтобы за время пролета молекулами высокочастотного поля излучения не было столкновений между молекулами пучка. Можно показать, что длина свободного пробега молекул в пучке примерно равна длине свободного пробега молекул в газе, если плотность молекул газа равна плотности молекул пучка. При применении сортировки молекул по вращательным состояниям максимальная плотность пучка определяется из условия, чтобы не было соударений между молекулами при пролете последних в сортирующем электрическом поле и в поле излучения².

2. Чувствительность спектроскопа

Чувствительность спектроскопа определяется уровнем шумов кристаллического детектора, при помощи которого обнаруживается поглощение энергии молекулами газа. Так как при малых мощностях шумы кристалла мало меняются с изменением мощности,

² Следует отметить, что газокинетический диаметр соударений молекул меньше микроволнового диаметра соударений.

падающей на кристалл, то чувствительность спектроскопа растет с увеличением абсолютной величины поглощенной молекулами мощности. Величина поглощенной молекулами мощности пропорциональна мощности высокочастотного излучения, через которое пролетает молекулярный пучок, если нет эффекта насыщения.

Определим оптимальную величину мощности высокочастотного излучения. Вероятность перехода молекул из состояния m в состояние n под действием излучения за время τ определяется формулой [2]:

$$W_n^m = 1 - e^{-t/\gamma}, \quad (6)$$

где

$$\gamma^{-1} = 8\pi^2 \rho(\nu) |\mu_n^m|^2 / 3h^2(\Delta\nu), \quad (7)$$

$\rho(\nu)$ — плотность энергии излучения высокочастотного поля; $\Delta\nu$ — полуширина спектральной линии; μ_n^m — матричный элемент дипольного момента молекулы.

Время пребывания молекул в поле излучения определяется величиной τ — временем пролета молекулами пучка высокочастотного поля. Время пребывания молекул в заданном состоянии определяется величиной γ , связанной с плотностью поля излучения $\rho(\nu)$. Если $\gamma < \tau$, то наступает эффект насыщения, при котором ширину спектральной линии будет определять не время пролета τ , а время жизни молекул в заданном состоянии, т.е. γ .

Если $\gamma > \tau$, то за время пролета через высокочастотное поле не все активные молекулы примут участие в поглощении энергии. Оптимальное значение величины $\rho(\nu)$ следует брать такое, при котором $\tau \approx \gamma$; при этом в поглощении примут участие 43 % активных молекул³.

Максимально возможное значение поглощенной энергии получится, когда половина активных молекул перейдет из нижнего состояния в верхнее.

Итак, оптимальная плотность излучения $\rho_{\text{опт}}(\nu)$ определяется

$$\gamma = \tau. \quad (8)$$

³ Следует иметь в виду, что при $\tau = \gamma$ линия расширится до $\Delta\nu' = \Delta\nu\sqrt{2}$.

Отсюда, учитывая (7) и (1), получим

$$\rho_{\text{опт}}(\nu) = 3h^2(\Delta\nu)^2/4\pi|\mu_n^m|^2. \quad (9)$$

При плотности поля $\rho_{\text{опт}}(\nu)$ молекулы пучка поглотят энергию, равную

$$E_{\text{погл}} = 0,43 N_{\text{акт}} h\nu. \quad (10)$$

Следует заметить, что $\rho_{\text{опт}}(\nu)$ для переходов между уровнями с заданными J зависит также от M_J , поэтому в качестве $\rho_{\text{опт}}(\nu)$ следует брать некоторое среднее значение из оптимальных значений для каждой зеемановской компоненты.

Плотность энергии $\rho(\nu)$ в случае применения молекулярных пучков получается значительно меньшей плотности энергии в обычных радиоспектроскопах, так как в случае пучков получаются более узкие линии. Легко показать, что при малых значениях потока энергии применение супергетеродинного приемника дает несомненное преимущество по чувствительности. Если поток мощности равен P , то минимальное обнаруживаемое изменение мощности на фоне шумов при применении супергетеродинного приемника равно

$$\Delta P = 2\sqrt{P_{\text{шум}}P}, \quad (11)$$

где $P_{\text{шум}}$ — мощность шумов.

Величина мощности шумов для супергетеродинного приемника с полосой пропускания Δf равна

$$P_{\text{шум}} = FkT\Delta f, \quad (12)$$

где F — шум-фактор приемника.

Рассмотрим различные варианты применения молекулярных пучков для изучения вращательных спектров молекул.

3. Спектроскоп с волноводной поглощающей ячейкой

Пусть электромагнитное излучение распространяется вдоль оси Ox , причем возбуждается основная волна (рис. 1).

Оптимальная мощность потока энергии, согласно (9), равна

$$P_{\text{опт}} = \{3h^2c(\Delta\nu)^2/4\pi|\mu_n^m|^2\}bd, \quad (13)$$

где c — скорость света.

Если через такой волновод пропускать пучок молекул параллельно оси Oy , то доплеровское расширение спектральных линий будет отсутствовать, так как фазовая скорость распространения основной волны в этом направлении равна бесконечности. Если используется расходящийся пучок молекул, то необходимо, чтобы доплеровское расширение из-за наличия компоненты скорости молекул v_x давало бы доплеровскую ширину линии, меньшую, чем ширина линии, связанная со временем пролета молекулами поля излучения, т. е.

$$v_x < c/\pi r v_0 \sqrt{2\pi \ln 2}. \quad (14)$$

Следовательно, допустимый угол разлета молекул пучка будет

$$\operatorname{tg} \alpha < v_x/v = c/\pi v_0 b \sqrt{2\pi \ln 2}. \quad (15)$$

Выражение (15) показывает, что для наблюдения вращательных линий может быть использована только часть молекул, вылетающих из щели источника пучка.

Если в источнике имеется K вертикальных щелей площади a , то через волновод будет пролетать следующее число активных молекул:

$$N_{\text{акт}} = \beta K N_{Jv} \frac{h\nu}{kT}, \quad (16)$$

где β — коэффициент использования молекулярного пучка, определяемый выражением (15) и геометрией установки.

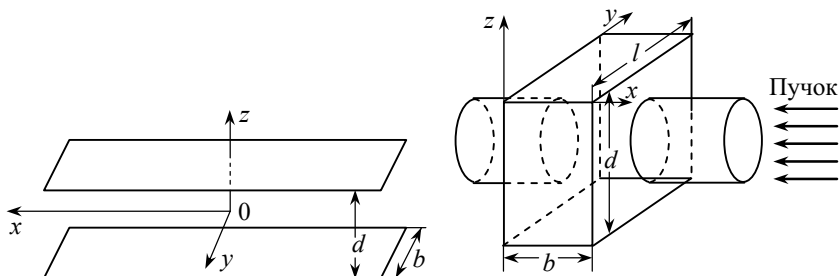


Рис. 1

Количество энергии, поглощаемое этими молекулами, согласно (10), равно

$$E = 0,43\beta K N_{J_v} (h\nu)^2 / kT. \quad (17)$$

Для того чтобы это поглощение энергии могло быть обнаружено, необходимо, согласно (11), выполнение условия

$$P_{\text{шум}} < \frac{E^2}{4P_{\text{опт}}}. \quad (18)$$

Величина $P_{\text{опт}}$ определяется (13).

Рассмотрим в качестве примера возможность наблюдения вращательного перехода $J = 1 \rightarrow J = 2$ молекул CsF. Пусть $K = 200$, $\beta = 0,03$, $a = 10^{-2} \text{ см}^2$, $b = d = 1 \text{ см}$, $n = 10^{15}$, $|\mu_z| = 2/3\mu_0^2$, $\mu_0 = 7,3 \cdot 10^{-18} \text{ CGSE}$, $\nu = 17700 \text{ МГц}$, $T = 850^\circ \text{C}$, $F = 40$, $\Delta f = 0,1 \text{ Гц}$. Тогда $\Delta\nu = 7 \text{ кГц}$, $E = 3 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$, $P = 5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}$, $P_{\text{шум}} = 2 \cdot 10^{-22} \text{ Вт}$, $\Delta P_{\text{мин}} = 6 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}$.

Таким образом, можно ожидать превышения сигнала над шумом в 50 раз.

Описанный здесь спектроскоп расходует в течение одного часа 75 г вещества.

В приведенном выше расчете не учитывалась возможность сортировки молекул по вращательным состояниям. Применение сортировки молекул по состояниям рассматривается ниже, когда в качестве поглощающей ячейки используется объемный резонатор.

4. Спектроскоп с объемным резонатором

Пусть в качестве поглощающей ячейки используется прямоугольный резонатор, в котором возбуждается колебание H_{011} . Если пропускать через такой резонатор молекулярный пучок в направлении оси Ox , то доплеровского расширения спектральных линий не будет, так как фазовая скорость распространения электромагнитной волны в этом направлении равна бесконечности.

Если использовать расходящийся пучок, то необходимо, чтобы доплеровская ширина линий из-за наличия компонент скорости v_y и v_x была меньше ширины линий, обусловленной временем пролета молекул через резонатор, т. е.

$$v_r = \sqrt{v_y^2 + v_x^2} < c/\pi r v_0 \sqrt{2\pi \ln 2}. \quad (19)$$

Следовательно, допустимый угол разлета пучка определяется условием

$$\operatorname{tg} \alpha < v_r/v = c/\pi v_0 r \sqrt{2\pi \ln 2}. \quad (20)$$

При выводе (19) и (20) принято, что фазовая скорость волны в направлении оси Oy равна фазовой скорости в направлении оси Oz .

Для поддержания оптимальной плотности поля $\rho(v)$ внутри объемного резонатора в резонатор необходимо вводить энергию $P_{\text{опт}}$:

$$P_{\text{опт}} = 2\pi\nu\rho(v)bdl/Q = 3h^2(\Delta\nu)^2\nu bdl/2Q|\mu_n^m|^2, \quad (21)$$

где Q — добротность резонатора.

При выводе (21) считалось, что энергия равномерно распределена по объему резонатора. Как видно из (21), вводимая в резонатор энергия уменьшается пропорционально росту Q . Поэтому для увеличения чувствительности спектроסקопа, как это следует из (11), нужно увеличить добротность резонатора. Для получения большой добротности резонатора необходимо устранить потери из-за излучения через отверстия в резонаторе, служащие для пропуска пучка молекул. Этого можно достигнуть, используя в качестве запорных фильтров отрезки цилиндрических волноводов, критическая волна которых меньше длины волны излучения молекул.

Добротность резонатора может быть значительно повышена путем регенерации при помощи лампы бегущей волны. Добротность резонатора также может быть сделана достаточно большой, если охладить резонатор до сверхпроводящего состояния.

Число активных молекул, получаемых от щели при применении сортировки, равно

$$N_{\text{акт}} = \beta N_{J_0}, \quad (22)$$

где β — коэффициент использования молекул пучка, определяемый соотношением (20) и геометрией установки.

Количество энергии, поглощаемое этими молекулами, согласно (10), равно

$$E_{\text{пол}} = 0,43 \beta N_{jv} h\nu. \quad (23)$$

Для того чтобы это поглощение могло быть обнаружено, необходимо, согласно (11), чтобы

$$P_{\text{шум}} < \frac{E_{\text{пол}}^2}{4P_{\text{опт}}}. \quad (24)$$

Величина $P_{\text{опт}}$ определяется из равенства (21). Величина шумов определяется (12).

Применение сортировки молекул по вращательным состояниям дает возможность изучать не только спектры поглощения молекул, но и спектры излучения молекул, так как из пучка по желанию можно отсортировать молекулы, находящиеся в нижнем или верхнем состоянии рассматриваемого перехода.

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

$$N_{\text{акт}} h\nu > E_{\text{пот}}, \quad (25)$$

где $E_{\text{пот}}$ — мощность потерь в объемном резонаторе, а именно

$$E_{\text{пот}} = \frac{2\pi\nu E_{\text{зап}}}{Q}. \quad (26)$$

Принимая, что энергия в объемном резонаторе равномерно распределена по объему резонатора, запишем $E_{\text{зап}}$ в виде

$$E_{\text{зап}} = \rho(\nu)V, \quad (27)$$

где V — объем резонатора.

На основании (25)–(27) получим условия самовозбуждения в виде

$$N_{\text{акт}} > 3Vh(\Delta\nu)^2/2Q |\mu_n^m|^2. \quad (28)$$

Стационарное состояние генератора определяется эффектом насыщения. Предельная величина мощности, которая может быть получена от такого генератора, равна

$$E_{\text{макс}} = \frac{1}{2} N_{\text{акт}} h\nu. \quad (29)$$

Рассмотрим в качестве примера возможность наблюдения вращательного перехода $J=0 \rightarrow J=1$ молекул CsF. Для получения молекулярного пучка необходима температура 575 К, при которой в нулевом вращательном состоянии ($J=0$) находится 0,00025-я часть от полного числа молекул.

При угле раствора пучка в 1° можно получить поток 10^{14} молекул в секунду. Из этих молекул в состоянии $J=0$, $v=0$ находится $6 \cdot 10^9$ молекул. Примерно такое же число молекул находится в состоянии $J=1$, $M_J=0$, $v=0$. Так как в пучке отсутствуют молекулы в состоянии $J=0$, $v=0$, то найденное число молекул является числом активных молекул.

Максимальная энергия, которая может быть излучена в резонаторе, равна

$$E_{\text{макс}} = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}. \quad (30)$$

Из формулы (28) найдем добротность резонатора, при которой получается самовозбуждение:

$$Q > 3Vh(\Delta\nu)^2/2N_{\text{акт}} |\mu_n^m|^2. \quad (31)$$

Пусть $V = 5 \text{ см}^3$, $(\Delta\nu)^2 = 5 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-2}$, тогда в данном случае

$$Q > 7 \cdot 10^6. \quad (32)$$

Так как такой резонатор сделать практически невозможно, то получить самовозбуждение в нашем случае также невозможно. Однако, ввиду того что плотность пучка в нашем случае далеко не является предельной для длины свободного пробега молекул, равной

1 см, режим самовозбуждения можно осуществить при практически достижимых добротностях, значительно повысив плотность молекулярного пучка.

При легко достижимых добротностях $\sim 5 \cdot 10^3$ и при числе активных молекул $\sim 3 \cdot 10^9$ вращательный переход может быть изучен при помощи индуцированного излучения. Найдем величину мощности, которую необходимо иметь для создания в резонаторе оптимальной плотности энергии для индуцированного излучения молекул. Вследствие того что $|\mu_n^m| = |\mu_m^n|$, величину $P_{\text{опт}}$ можно получить из (21):

$$P_{\text{опт}} = 4,9 \cdot 10^{-11} \text{ Вт.} \quad (33)$$

Согласно (24), при $F = 40$, $\Delta f = 0,1$ Гц минимально обнаруживаемое изменение мощности равно

$$\Delta P_{\text{мин}} = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вт,} \quad (34)$$

т. е. при указанной плотности пучка получается превышение сигнала над шумом в семь раз.

Литература

1. Hughes H. K. // Phys. Rev., 1947. Vol. 72. P. 614.
2. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. — М.: Гостехтеоретиздат, 1940.

2. Молекулярный генератор (автореферат докторской диссертации^{*})

В диссертации изложены результаты работы, проводимой в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР в течение 1952–1955 гг., по созданию прибора, позволяющего использовать энергию индуцированного излучения молекул. Такой прибор впоследствии был назван молекулярным генератором.

Возможность создания молекулярного генератора обусловлена следующими обстоятельствами:

1. Очень малой величиной естественной ширины спектральной линии в диапазоне радиоволн, которая не превосходит величины 10^6 Гц для волн сантиметрового диапазона.

2. Возможностью получения термодинамически неравновесных молекулярных систем, в которых на одном из уровней рассматриваемого перехода находится значительно больше молекул, чем на другом¹.

3. Сравнительной легкостью достижения эффекта насыщения в диапазоне радиоволн.

Принцип действия молекулярного генератора заключается в следующем: если пропускать молекулярный пучок с положительным числом активных молекул через объемный резонатор, настроенный на частоту спектральной линии, то в резонаторе могут возбудиться колебания за счет энергии индуцированного излучения молекул. Такое возбуждение резонатора происходит потому, что молекулы будут излучать энергию под влиянием запасенной в объеме резонатора энергии, которая образовалась там в результате излучения молекул в предыдущие моменты времени. Таким образом, в основе работы молекулярного генератора лежит компенсация потерь объемного резонатора за счет индуцированного

^{*} 10 мая 1956. Печатается по изданию РЛ [5], стр. 136.

¹ В дальнейшем мы будем называть получение неравновесных систем сортировкой молекул, а разность числа молекул на верхнем и нижнем уровнях — числом активных молекул.

излучения активных молекул. Поэтому для осуществления режима самовозбуждения при заданном числе активных молекул добротность резонатора должна быть больше некоторого критического значения.

Если ширина спектральной линии значительно меньше ширины резонансной кривой резонатора, то частота, на которой работает молекулярный генератор, будет определяться частотой спектральной линии. Несмотря на то что спектральная линия, используемая в генераторе, имеет некоторую ширину (например обусловленную конечным временем взаимодействия молекул с полем излучения), вырабатываемые генератором колебания являются практически монохроматичными.

Монохроматичность установившихся колебаний в молекулярном генераторе обусловлена наличием «положительной обратной связи», которая состоит в том, что излучение молекул возбуждается запасенной в объеме резонатора энергией, которая образовалась там в результате излучения молекул в предыдущие моменты времени.

Рассмотрим качественно процесс установления колебаний в молекулярном генераторе. В первый момент времени, когда активные молекулы только что появились в объеме резонатора, эти молекулы будут излучать под влиянием поля тепловых электрических флуктуаций резонатора, так как вероятность спонтанного излучения мала. Ввиду того что интенсивность флуктуаций на ширине спектральной линии можно считать независимой от частоты излучения, в первый момент времени молекулы излучают в резонатор энергию, плотность которой в зависимости от частоты описывается формой спектральной линии. Но в следующие моменты времени большее число молекул «высветят» энергию на частоте, близкой к частоте вершины спектральной линии, где плотность излучения благодаря излучению молекул в предыдущие моменты времени стала больше, так как индуцированное излучение происходит только на частоте внешней силы. Таким образом, спектральная линия будет сужаться к своей резонансной частоте. В пределе, когда переходные про-

цессы закончатся, в резонаторе установятся монохроматические колебания с частотой спектральной линии. Немонохроматичность излучения генератора, очевидно, будет определяться отношением «высвеченной» молекулами мощности к мощности электрических флюктуаций на ширине спектральной линии.

Если частота резонатора не совпадает с резонансной частотой спектральной линии, то частота генерации окажется несколько сдвинутой от частоты спектральной линии в сторону собственной частоты резонатора. Это объясняется тем, что интенсивность излучения определяется не только формой спектральной линии, но и формой резонансной кривой резонатора.

Амплитуда установившихся колебаний в молекулярном генераторе определяется эффектом насыщения. Действительно, молекулярный генератор работает при эффекте насыщения, когда время, за которое переходят молекулы с уровня на уровень, меньше времени пролета молекулами поля излучения резонатора. Поэтому увеличение мощности, запасенной в резонаторе, увеличит насыщение и не приведет к линейному увеличению мощности, «высвечиваемой» молекулами. Таким образом, эффект насыщения является той нелинейностью, которая определяет амплитуду установившихся в резонаторе колебаний.

Следует заметить, что молекулярный генератор во многом аналогичен другим автоколебательным системам с обратной связью; имеется также ряд существенных различий, ибо молекулярный генератор не является классической системой, потому что индуцированное излучение, вообще говоря, является квантовым эффектом. В отличие от других генераторов молекулярный генератор, строго говоря, является системой с очень большим числом степеней свободы, так как каждая из активных молекул представляет собой независимую степень свободы. Поэтому рассмотрение работы молекулярного генератора следует проводить статистическим квантово-механическим методом.

Если условие самовозбуждения в молекулярном генераторе не выполнено, то есть мощность, излучаемая молекулами, меньше

того значения, которое необходимо для компенсации потерь объемного резонатора, то такой прибор может служить усилителем мощности, увеличивая за счет индуцированного излучения молекул подводимую к резонатору мощность. Молекулярный усилитель аналогичен регенеративному приемнику, причем ширина полосы пропускания усилителя, первоначально определяемая шириной спектральной линии, уменьшается с ростом коэффициента усиления. Молекулярный усилитель вследствие малой вероятности спонтанного излучения молекул обладает малым коэффициентом шума, определяемым тепловыми электрическими флуктуациями в контуре усилителя.

На принципиальную возможность создания молекулярного генератора было впервые указано автором настоящей работы в 1952 году². В конце 1953 года в совместной с А. М. Прохоровым работе «О применении молекулярных пучков в радиоспектроскопии» было получено условие самовозбуждения молекулярного генератора [1].

В начале 1954 года автору удалось теоретически показать, что колебания молекулярного генератора в установившемся режиме являются монохроматическими, и поэтому работа молекулярного генератора в установившемся режиме может быть описана уравнением с одной степенью свободы³. В конце 1954 года на основании квантовой теории дисперсии с учетом эффекта насыщения было получено нелинейное уравнение, описывающее работу молекулярного генератора и усилителя, а также были получены приближенные решения этого уравнения [2] (совместно с А. М. Прохоровым).

В конце 1954 года появилась короткая заметка (письмо в редакцию) Гордона, Цайгера и Таунса, где сообщалось о создании молекулярного генератора, использующего инверсионные переходы молекул аммиака [3]. Эта группа ученых применила для сортировки молекул аммиака по инверсионным уровням цилиндрический

² Н. Г. Басов. Доклад на Всесоюзной конференции по радиоспектроскопии, май 1952 года.

³ Н. Г. Басов. Доклад на заседании секции ВНОРиЭ им. А. С. Попова, октябрь 1954 года.

квадрупольный конденсатор [4]. На основании работы [2] нами было теоретически показано, что такой генератор при осуществимых на опыте параметрах может служить абсолютным эталоном частоты, относительная точность которого не ниже, чем 10^{-9} [5]⁴. К этому времени автором были получены строгие решения уравнения генератора и усилителя. В частности, было показано, что частота генератора не совпадает с частотой молекулярных переходов даже в том случае, когда резонатор настроен на частоту спектральной линии; был исследован вопрос о ширине полосы пропускания молекулярного усилителя и т. д. [6, 7].

К началу 1955 года автором была разработана теория работы отдельных узлов молекулярного генератора на пучке молекул аммиака (источника молекулярного пучка, квадрупольного конденсатора, резонатора и т. д.), что позволило полностью рассчитать и сконструировать молекулярный генератор. Построенный генератор был запущен автором в сентябре 1955 года. В результате сравнения частоты молекулярного генератора с гармоникой частоты кварцевого генератора была экспериментально доказана высокая монохроматичность его колебаний, что подтвердило правильность теоретического рассмотрения работы генератора. Была также измерена мощность молекулярного генератора, причем результаты измерений с точностью до ошибок эксперимента совпали с расчетным значением мощности. Мощность молекулярного генератора оказалась $\sim 10^{-9}$ Вт.

В конце 1955 года была опубликована работа Гордона, Цайгера и Таунса [8], в которой давалось краткое описание молекулярного генератора на пучке молекул аммиака и приводились результаты сравнения частоты двух молекулярных генераторов, доказавшие высокую монохроматичность колебания молекулярного генератора. С цилиндрическим резонатором типа H_{011} длиной в 12 см относительное изменение частоты за время порядка 1 сек. оказа-

⁴ А. М. Прохоров. Доклад на конференции Фарадеевского общества, Англия, апрель 1955 г.

лось равным $4 \cdot 10^{-12}$. В этой работе была также приведена линейная теория молекулярного генератора (без учета эффекта насыщения).

В январе 1956 года автором было также осуществлено сравнение частоты двух молекулярных генераторов. С резонатором типа E_{001} длиной в 2 см относительное изменение частоты за время ~ 1 сек. оказалось равным 10^{-11} .⁵

Диссертация состоит из двух глав.

В первой главе рассматриваются вопросы теории молекулярного генератора и усилителя.

В этой главе:

1. Выведены формулы для комплексной диэлектрической постоянной с учетом эффекта насыщения [9, 10, 6]. Рассмотрено влияние на форму спектральной линии распределения молекул по величине времени взаимодействия с полем излучения.

2. Сделана первая попытка учета влияния когерентности излучения [11] при рассмотрении теории дисперсии.

3. Рассмотрен вопрос о ширине спектральной линии в молекулярном пучке и о способе уменьшения доплеровского уширения.

4. Разобраны методы получения активных молекул.

5. Дана теория установившихся процессов в молекулярном генераторе. Выведены формулы для частоты и амплитуды колебаний молекулярного генератора. Рассмотрено влияние различных факторов на частоту молекулярного генератора. На основании теоретических расчетов показано, что молекулярный генератор, работающий на линии $J = 3$, $K = 3$ аммиака, может быть использован в качестве абсолютного эталона частоты (времени) точности $\sim 10^{-9}$, а также в качестве относительного стандарта частоты точности $10^{-11} - 10^{-12}$.

6. Оценена разрешающая сила молекулярного генератора, используемого в качестве спектроскопа.

⁵ Доклад на Всесоюзной конференции по радиоэлектронике в г. Горьком, январь 1956 г., и Доклад на общем собрании Отделения физико-математических наук АН СССР, февраль 1956 г.

7. Выведены формулы для коэффициента усиления и полосы пропускания молекулярного усилителя. Дано условие работы усилителя в линейной области.

8. Рассмотрен вопрос о возможности создания «отпаянного» молекулярного генератора и усилителя.

Во второй главе дано описание молекулярного генератора, работающего на пучке молекул аммиака, использующего линию $J=3$, $K=3$ с частотой ≈ 23870 МГц, который был сконструирован и построен автором настоящей работы в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР, а также приведены некоторые результаты исследования работы этого генератора.

В этой главе:

1. Рассмотрены методы получения молекулярных пучков с большими размерами поперечного сечения. Выведены формулы для максимального числа молекул, которое может быть получено от источника молекулярного пучка.

2. Дана теория сортировки молекул аммиака по инверсионным уровням с помощью квадрупольного цилиндрического конденсатора. Выведены формулы для числа активных молекул, получаемых на выходе такого конденсатора, а также рассмотрен вопрос о распределении отсортированных молекул по величине времени пролета поля резонатора.

3. Дано описание конструкции резонатора, работающего на волне E_{001} . Приведены графики для расчета собственной частоты таких резонаторов, когда для впуска и выпуска молекулярного пучка используются фильтры в виде предельных волноводов.

4. Дано описание двух вариантов конструкции молекулярного генератора.

5. Приведено краткое описание электронных схем и волноводных деталей, использованных для исследования работы молекулярного генератора.

6. Оценено влияние внешней силы на амплитуду колебаний молекулярного генератора.

7. Проведен расчет числа активных молекул. Подсчитана мощность излучения молекул в генераторе. Эти расчеты с точностью до ошибок измерения совпали с результатами наших измерений. Опыты показали, что от молекулярного генератора можно получить мощность 10^{-9} Вт.

8. Приведены результаты экспериментального сравнения частоты молекулярного генератора с частотой гармоник кварцевого генератора и частоты двух молекулярных генераторов, доказавшие высокую монохроматичность колебаний молекулярного генератора.

Относительная стабильность частоты генератора оказалась равной 10^{-11} за время ~ 1 сек. Частота генераторов медленно изменялась со временем, так как установка охлаждалась жидким азотом, а резонаторы не были термостатированы. Относительный уход частоты из-за охлаждения резонаторов был $\sim 4 \cdot 10^{-10}$ за 20 мин. при условии, что до опыта установка находилась 2 часа в контакте с жидким азотом. Эти эксперименты подтвердили возможность использования молекулярного генератора в качестве абсолютного стандарта частоты с точностью $\sim 10^{-9}$.

Выводы

В работе подводятся итоги по разработке нового принципа генерирования электромагнитных колебаний с помощью индуцированного излучения возбужденных молекул — молекулярного генератора.

Теория и эксперимент показывают, что молекулярный генератор дает возможность получать весьма монохроматические колебания, частота которых близка к частоте спектральных линий. Поэтому молекулярный генератор может служить очень точным радиоспектроскопом для обнаружения тонких молекулярных и ядерных взаимодействий, например, для обнаружения старших моментов ядер (электрического 16-польного момента ядра).

Высокая стабильность частоты молекулярного генератора дает возможность применять его в качестве управляющего генератора

в различных устройствах (радионавигационных приборах, абсолютных эталонах частоты, молекулярных часах, радиорелейных линиях и т. д.).

Высокая стабильность частоты молекулярного генератора дает также возможность подойти к задаче об экспериментальной проверке общей теории относительности путем изучения влияния гравитационного поля Земли на скорость течения времени. Такая возможность вытекает из того, что относительный сдвиг частоты в поле Земли вблизи ее поверхности равен 10^{-13} на один километр вертикального расстояния между источниками излучения [12].

Молекулярный усилитель, обладая малой величиной шум-фактора, позволяет повысить чувствительность приемной аппаратуры. Например, он может быть использован в радиоастрономии при наблюдении монохроматического излучения.

Литература

1. Басов Н. Г. и Прохоров А. М. ЖЭТФ, 1954. — 27, 431.
2. Басов Н. Г. и Прохоров А. М. ДАН, 1955. — 101, 47.
3. Gordon J. P., Zeiger H. J., Townes C. H. Phys. Rev., 1954. 95, 282.
4. Bennewitz H. G., Paul W., Schlier C. Zeit. f. Phys., 1955. 141, 6.
5. Басов Н. Г. и Прохоров А. М. Disc. Faradey Soc., 1955. 19, 99.
6. Басов Н. Г. и Прохоров А. М. УФН, 1955. LVII, 485.
7. Басов Н. Г. и Прохоров А. М. ЖЭТФ, 1956. 30, 560.
8. Gordon J. P., Zeiger H. J., Townes C. H. Phys. Rev., 1955. 99, 1253.
9. Karplus R., Schwinger J. Phys. Rev., 1948. 73, 1020.
10. Ландау Л. и Лифшиц Е. Квантовая механика, часть 1, 1948. — С. 170—172.
11. Dicke R. H. Phys. Rev., 1954. 93, 99.
12. Townes C. H. J. Apl. Phys., 1951. 22, 1365.

3. Молекулярный генератор (докторская диссертация: выводы и литература*)

Выводы

В работе подводятся итоги по разработке нового принципа генерирования электромагнитных колебаний с помощью индуцированного излучения возбужденных молекул — молекулярного генератора.

Развитая в работе теория и проведенный эксперимент показывают, что молекулярный генератор дает возможность получать монохроматические колебания, частота которых близка к частоте спектральных линий.

Коротко перечислим возможные применения молекулярного генератора:

Близость частоты генерации к частоте спектральных линий позволяет использовать молекулярный генератор в качестве очень точного радиоспектроскопа. Такой радиоспектроскоп может быть применен для обнаружения и измерения тонких молекулярных и ядерных взаимодействий, например, для обнаружения и измерения старших моментов ядер (электрических 16-польных моментов ядер). Высокая стабильность частоты молекулярного генератора дает возможность применять его в качестве управляющего генератора в различных устройствах (радионавигационных приборах, абсолютных эталонах частоты, молекулярных часах, радиорелейных линиях и т. д.).

Высокая стабильность частоты дает также возможность подойти также к задаче об экспериментальной проверке общей относительности путем изучения влияния гравитационного поля Земли на скорость течения времени. Такая возможность вытекает из того, что относительный сдвиг частоты в поле Земли вблизи ее поверхности равен 10^{-13} на один километр вертикального расстояния между источниками излучения [40].

* 25 июня 1956. Печатается по изданию РЛ [5], стр. 280.

Молекулярный генератор, обладая малой величиной шум-фактора, позволяет повысить чувствительность приемной аппаратуры: например, он может быть использован в радиоастрономии при наблюдении монохроматического излучения.

Остановимся коротко на задачах, которые возникают в связи с разработкой молекулярного генератора, не касаясь приложений. В настоящей работе развита теория установившихся процессов в молекулярном генераторе и усилителе на основе квантовой теории дисперсии с учетом эффекта насыщения. Развита теория нуждается в дополнении, определяющем отклонение от средних величин. Такая теория флуктуаций для молекулярного генератора должна, например, определить ширину полосы излучения, а для молекулярного усилителя — количественно величину шум-фактора. Теория флуктуации должна учитывать когерентность радиационных процессов (см. Глава I, § 2). Нуждается в разработке также теория переходных процессов в молекулярном генераторе и усилителе. Существенный интерес представляет рассмотрение нелинейных процессов в молекулярном генераторе, и в первую очередь вопрос о захватывании частоты молекулярного генератора.

В отношении экспериментальной части работы следует заметить следующее. При разработке генератора основное внимание было уделено исследованию физических принципов, лежащих в основе работы отдельных частей генератора и генератора в целом. И очень мало внимания было уделено изысканиям наиболее рационального решения технических вопросов. Поэтому необходимо проведение большой инженерной работы с целью изыскания оптимальной конструкции, после чего станет возможным более точное исследование работы генератора. Существенный интерес представляет осуществление молекулярных генераторов на других веществах. Для прикладных задач большое значение имеет осуществление «отпаянной системы». Необходимо также детальное экспериментальное исследование работы молекулярного усилителя.

В заключение пользуюсь случаем, чтобы выразить глубокую благодарность моим товарищам по работе: доктору физико-мате-

матических наук А. М. Прохорову за постоянную помощь в работе и дискуссию о полученных результатах; кандидату физико-математических наук Н. А. Ирисовой и аспиранту В. Г. Веселаго за помощь на первых этапах работы; студентам-дипломникам А. Н. Ораевскому и К. К. Свидзинскому за помощь в расчетной работе; конструкторам Г. М. Старшину и К. К. Ермошиной за разработку чертежей генератора; инженерам В. В. Никитину, А. П. Петрову и студенту-дипломнику В. С. Зуеву за помощь в наладке установки, а также хочу поблагодарить весь коллектив сотрудников радиоспектроскопического сектора Лаборатории колебаний ФИАН за внимание и помощь в работе.

Литература

1. Басов Н. Г., Прохоров А. М. ЖЭТФ, 1954. 27, 431.
2. Басов Н. Г., Прохоров А. М. ДАН СССР, 1955. 101, 47.
3. Gordon J. P., Zeiger H. J., Townes C. H. Phys. Rev., 1954. 95, 282.
4. Bennewitz H. G., Paul W., Schlier C. Zeit. f. Phys., 1955. 141, 6.
5. Басов Н. Г., Прохоров А. М. Disk. Faradey Soc., 1955. 19, 59.
6. Басов Н. Г., Прохоров А. М. УФН, 1955. LII, 485.
7. Басов Н. Г., Прохоров А. М. ЖЭТФ, 1956. 30, 560.
8. Басов Н. Г. Молекулярный генератор на пучке молекул аммиака // ЖПТФЭ (в печати).
9. Gordon J. P., Zeiger H. J., Townes C. H. Phys. Rev., 99, 1253 (1955).
10. Басов Н. Г. Труды Горьковской конференции по радиоэлектронике (в печати).
11. Басов Н. Г. ЖРТЭ (в печати), «О сравнении частоты двух молекулярных генераторов».
12. Lyons H., Annals N. J. Acad. Sci., 1955. 55, 630.
13. Lewis. Proc. Inst. Radio. Eng., 1955. 43, 1046.
14. Geschwind S., Gunter-Mhor G. R., Townes C. H. Rev. Phys. Mod., 1954. 26, 444.
15. Jaccarino V., King J. G., Satten R. A., Stroke H. H. Phys. Rev., 1954. 94, 1798.
16. Kisch P., Eck T. G. Phys. Rev., 1954. 94, 1799.

17. Басов Н. Г., Ораевский А. Н., Свидзинский К. К. Теория вращательных спектров молекул, обусловленная электрическим 2^4 -полным ядерным взаимодействием // ЖСО (в печати).
18. Wang T.-C. Phys. Rev., 1955. 99, 566.
19. Горди И., Смит В., Трамбуло Р. Радиоспектроскопия. — Москва, 1955.
20. Осипов В. Д. Диссертация. ФИАН, 1955.
21. Shimodo K. J. Phys. Soc. Jap., 1954. 9, 378.
22. Jonson H. R., Strandberg M. W. P. Phys. Rev., 1952. 85, 508.
23. Strandberg M. W. P., Dreicer H. Phys. Rev., 1954. 94, 1393.
24. Newel G., Dicke R. H. Phys. Rev., 1951. 83, 1064.
25. Dicke R. H. Phys. Rev., 1954. 96, 530; Proc. Inst. Radio Eng., 1955. 43, 364.
26. Ramsey N. F. Phys. Rev., 1949. 76, 996.
27. Zacharios J. R., Yates J. G., Haun R. D. Proc. Inst. Radio Eng., 1955. 43, 364.
28. Zacharios J. R., Yates J. G., Haun R. D. J. R. E. Con. Rev., 1955. 3, № 10, 180.
29. Essen L., Parry J. W. Nature, 1955. 176, 280.
30. Басов Н. Г., Прохоров А. М. ЖЭТФ, 28, 249 (1955).
31. Dicke R. H. Phys. Rev., 1954. 93, 99.
32. Karplus R., Schwinger J. Phys. Rev., 1948. 73, 1020.
33. Ландау Л., Лившиц Е. М. Квантовая механика, часть 1, 1948. — С. 170–172.
34. Басов Н. Г., Ораевский А. Н., Свидзинский К. К. Некоторые вопросы теории молекулярного генератора. Отчет ФИАН (1955).
35. Autler S. H., Townes C. H. Phys. Rev., 1955. 100, 703.
36. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов. — Москва, 1948.
37. Борн М. Оптика. Киев: ДНТБУ, 1937.
38. Huges H. K. Phys. Rev., 1947. 72, 614.
39. Schlier C. Zeit. f. Phys., 1955. 141, 15.
40. Townes C. H. J. Appl. Phys., 22, 1365 (1951).
41. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул. — Москва, 1949.

42. Nuckolls R. G., Rueger L. J., Lyons H. Phys. Rev., 1953. 89, 1101.
43. Burrus C. A., Gordy W. Phys. Rev., 1956. 101, 599.
44. Эстерман. УФН, 1947. 32, 89.
45. Басов Н. Г., Петров А. П. Резонатор для молекулярного генератора на пучке молекул аммиака. Отчет ФИАН (1955).
46. Gunter-Mohr G. R., Townes C. H., Van-Vleck J. H. Phys. Rev., 1954. 94, 1191.
47. Gunter-Mohr G. R., Wite R. L., Schawlow A. L., Good W. E., Coles D. K. Phys. Rev., 1954. 94, 1184.
48. Gordon J. P. Phys. Rev., 1955. 99, 1253.
49. Корсунский М. И., Векшинский С. А. ЖЭТФ, 1945. 15, 593.
50. Morgenau H. Phys. Rev., 1949. 76, 1423.