

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

О создании первого лазера на рубине в Москве

А.М. Леонтович, З.А. Чижикова

Описана история создания в 1961 г. первого в Москве лазера на рубине в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН). В приложениях приводятся фрагмент отчёта ФИАНа 1961 года и текст доклада на III Международной конференции по квантовой электронике (1963 г.), в котором освещаются одни из первых научных результатов, полученных с помощью лазера.

PACS numbers: 01.65. + g, 42.50. – p, 42.60. – v

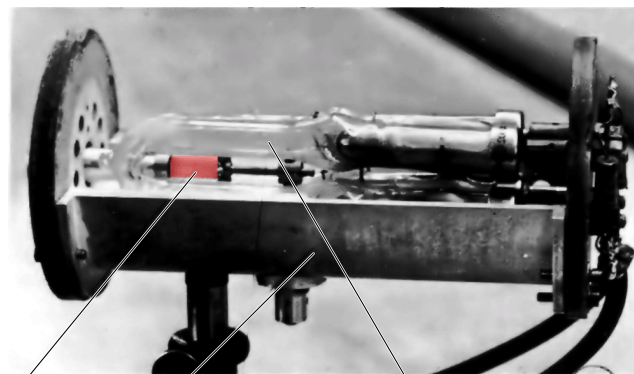
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201101g.0082

В 1958 г. Шавлов и Таунс [1], а также Басов с сотрудниками [2] опубликовали статьи о перспективности получения генерации в оптической области спектра с использованием индуцированного излучения. В июне 1960 г. американским учёным Мейманом [3] были опубликованы обнадеживающие результаты с рубином, полученные в апреле 1960 г. (заметное увеличение населённости верхнего метастабильного уровня Cr^{3+}). Мейман 7 июля 1960 г. на пресс-конференции рассказал о своём открытии "усиления света". На другой день газета *New York Times* опубликовала об этом статью "Light Amplification Claimed by Scientist". И только 6 августа появилась заметка Меймана в *Nature* [4] о сужении линии люминесценции атомов хрома в рубине из-за индуцированного излучения (т.е. о сверхлюминесценции). А первая статья с описанием работы рубинового лазера была опубликована Шавловым с сотрудниками в *Phys. Rev. Letters* [5] 1 октября 1960 г. В ней была приведена осциллограмма с "пиками" генерации.

Работы по лазерам в лаборатории люминесценции ФИАНа возникли по инициативе Н.Г. Басова в 1960 г. в рамках темы "Фотон". Н.Г. Басов предложил эту работу М.Д. Галанину. Знаменательно, что он обратился именно в лабораторию люминесценции, в которой хорошо знали люминесценцию и владели оптическими методами исследований. Большую роль тогда сыграла полифизичность исследований в ФИАНе, заложенная основателем ФИАНа Сергеем Ивановичем Вавиловым. Михаил Дмитриевич Галанин с радостью откликнулся на это предложение, и он сам, а также Зоя Афанасьевна Чижикова и Александр Михайлович Леонтович занялись этой проблемой. В начале мы пошли тем же путём, что и американцы, — обнаружили изменение населённости



Группа Галанина (слева направо): А.М. Можаровский, О.П. Варнавский, А.М. Леонтович, М.Д. Галанин, З.А. Чижикова, А.Н. Киркин (в 1960-е годы). Коллаж А.М. Леонтовича.



Рубин
Кожух с открытой крышкой
U-образные импульсные лампы накачки

Рис. 1. В 1967 г. в ФИАНе к 50-летию советской власти была организована выставка научных достижений института за 1934–1967 гг., на которой был представлен наш реальный первый лазер на рубине. Позднее он был передан в Политехнический музей в отдел истории физики.

А.М. Леонтович, З.А. Чижикова. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
Тел. (499) 135-78-31, (499) 132-62-47
E-mail: leon@lebedev.ru

Статья поступила 4 июня 2010 г.,
после доработки 16 июля 2010 г.

верхнего уровня хрома при оптической накачке импульсной лампой. Весной 1961 г. наша группа самостоятельно создала собственную лазерную установку, в которой образец рубина с концентрацией хрома 0,05 % и длиной

КОГЕРЕНТНОСТЬ И НАПРАВЛЕННОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА РУБИНЕ

М. Д. Галанин, А. М. Леонтович, Э. А. Чижикова

Направленность излучения оптического генератора на кристалле рубина обычно хуже дифракционного предела, определяемого размерами кристалла. Это обусловлено оптическим несовершенством кристаллов. Нельсоном и Коллинсом [1] было показано, что излучение когерентно на протяжении малых областей торцевой поверхности кристалла. Предполагалось, что дифракция на границах этих областей и обуславливает угловое расхождение генерируемого пучка излучения. Однако, как было показано Мастерсом и Паррентом [2], излучение когерентно на участках, отстающих друг от друга более чем на 3 мм.

Описываемые ниже опыты имели целью исследовать соотношение между когерентностью и направленностью излучения рубинового генератора. Прежде всего было показано, что пульсации излучения при генерации возникают одновременно по всей излучающей поверхности кристалла.

23*

k -е кольцо соответствует условию $2nl \cos \theta_k = (m - k) \lambda$, где l — длина кристалла, n — показатель преломления, θ_k — угол между нормалью к фронту волны внутри кристалла и нормалью к плоскости торца. Измерение диаметров подтверждает это соотношение.

Авторы выражают благодарность А. С. Бебчуку и Ю. Н. Соловьевой за предоставление исследованных кристаллов, а также В. Н. Луканину и Н. Е. Щелкалину за обработку кристаллов.

Авторы благодарны также Н. Г. Басову за постоянное внимание и обсуждение этой работы.

Поступило в редакцию
18 мая 1962 г.

Литература

- [1] D. J. Nelson, R. J. Collins, J. Appl. Phys., 32, 739, 1961.
- [2] J. I. Masters, G. B. Parrent, Proc. of J. R. E., 50, 230, 1962.

Рис. 2. Начальная и конечная страницы первой в СССР публикации о работе рубинового лазера [7].

4 см накачивался двумя ксеноновыми импульсными лампами ИФК-2000 в кожухе с напылённым MgO. Фотография нашего устройства приведена на рис. 1. На этой установке мы добились генерации 18 сентября 1961 г. (через один месяц после выхода в свет статьи Меймана 15 августа 1961 г. в *Phys. Rev.* [6], в которой описано устройство его лазера). Подробное описание нашего лазера было дано в отчёте ФИАНа в декабре 1961 г. Страницы отчёта с описанием работы по созданию рубинового лазера воспроизведены в приложении I. Мы тогда просили Михаила Дмитриевича послать в открытую печать статью о создании и работе нашего лазера —

она была бы опубликована ещё в 1961 г. Но Михаил Дмитриевич сказал: "Вот сделаем научную работу с нашим лазером, тогда и пошлём!"

После исследования когерентных свойств излучения нашего лазера мы опубликовали статью в *ЖЭТФ* [7]. На рисунке 2 приведена фотография первой и последней страниц этой статьи. Это была первая публикация в Советском Союзе по эксперименту с оптическим генератором. Продолжая эту работу, мы опубликовали также заметку о пичковом режиме рубинового лазера в *Оптике и спектроскопии* [8]. В этих и следующей работе [9], которые были доложены на III Международной конфе-

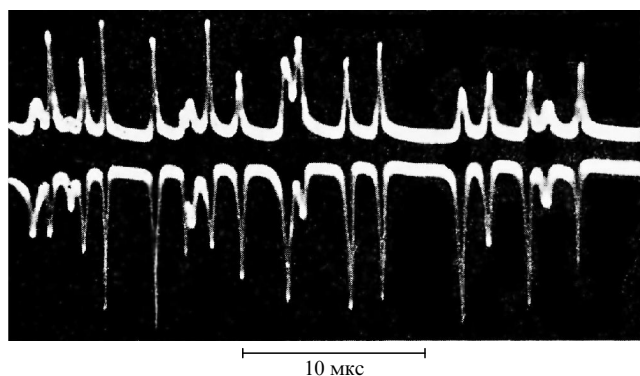


Рис. 3. Осциллограмма излучения от двух различных участков торца лазерного кристалла.

ренции по квантовой электронике, проходившей в Париже в феврале 1963 г., нами было показано, что режим пульсаций и когерентность излучения взаимно связаны [10]. Текст доклада [10] воспроизведён в приложении II.

Осциллограммы хаотических пульсаций показаны на рис. 3. Позднее мы фотографировали также и "модные картинки", т.е. распределение интенсивности излучения в поперечном сечении при генерации одного типа колебаний — моды, в каждом отдельном "пичке" (рис. 4). Оно хорошо укладывалось в теоретическое распределение, если считать, что резонатор аналогичен резонатору со сферическими зеркалами. Эта "сферичность" возникала как из-за начальных оптических неоднородностей образцов рубина, так и из-за термооптических искажений, вызванных светом накачки.

В этих и дальнейших исследованиях, посвящённых также и режиму гигантского импульса, участвовали, кроме упомянутых выше, также молодые научные работники и аспиранты, и не только из нашей, но и из других лабораторий: М. Попова, А. Ведута, В. Коробкин, М. Щелёв, А. Можаровский и др. На материале этих работ все они защитили кандидатские диссертации (а в последующие годы — и докторские). Так, В.С. Зуев, сотрудник Н.Г. Басова, с молодым П.Г. Крюковым освоили с нашей помощью лазерную технику и затем вместе с Басовым опубликовали статью о лазере на рубине с импульсной добротностью. Позднее такая "дружба народов" в ФИАНе стала редкой. На первых этапах нашей работы много внимания уделялось качеству рубиновых образцов (как оптического, так и в отношении наличия примесей), к которому предъявляются высокие требования. В ФИАНе не было соответствующей аппаратуры для изготовления рубина, и мы получали его образцы из двух мест: Института кристаллографии и "почтового ящика" — Особого конструкторского бюро 311 Государственного комитета по электронной технике (ОКБ-311 ГКЭТ). Их изготовили Александр Сергеевич Бебчук и Юлия Николаевна Соловьёва, которые снабжали до этого мазерные работы, и мы пробовали и те и другие. Образцы из Института кристаллографии не заработали. (Содержание Cr^{3+} в них было 0,5 %, а не 0,05 %, и оптическое качество этих образцов было плохое.) А загенерировали образцы из "почтового ящика".

Осенью 1961 г. мы более серьёзно взялись за проверку оптических свойств рубинов (в основном с помощью

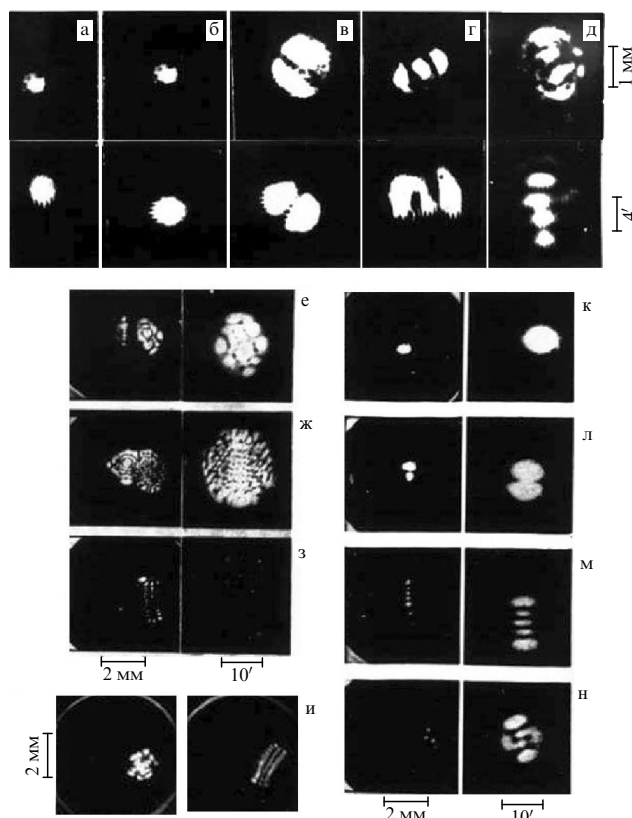


Рис. 4. Одновременные снимки распределения излучения в дальней зоне (по углу) и на торце образца: (а–д) на торце (верхний ряд снимков), по углу (нижний ряд); (е–и) (оба ряда снимков), (к–н) на торце (левый ряд снимков), по углу (правый ряд).

интерферометра Майкельсона) и после этого смогли получить генерацию, сначала с небольшой энергией, а потом и с такой, что можно было прожигать бритвы сфокусированным пучком. В это же время в нашем распоряжении оказался американский образец рубина (полученный по "шпионской линии"), генерацию от которого мы также получили, примерно с теми же параметрами, что и с нашими образцами. Тогда был распространён предрассудок насчёт формы образцов — все первые рубины были в форме параллелепипедов, и американские и наши. Это, по-видимому, было наследием мазерной эры. А потом стало понятно, что форма образцов не играет роли, что важна только параллельность торцов этих кристаллов, на которые тогда и наносились зеркала из напылённого серебра. Потом появились образцы цилиндрической формы, и также, когда стали применять внешние зеркала, — с брьюстеровскими торцами.

Как сказано выше, мы занялись исследованием хаотических пульсаций излучения при генерации. Оказалось, что хаос в пульсациях обусловлен тепловыми нестабильностями термических и оптико-механических свойств, вызываемых нагреванием той же лампой, которая осуществляет и оптическую накачку [11].

Запуск нашего первого лазера стал событием в жизни ФИАН. Комната 356, в которой появился первый рубиновый лазер, стала неким "лазерным центром" в ФИАНе. Посмотреть на работу лазера шли многочисленные посетители. Ситуация была похожа на кадры кинофильма "Девять дней одного года" (1962 г.) с

возгласами "у Гусева нейтроны пошли!". Запомнилось, как радовался Игорь Евгеньевич Тамм. Сам директор ФИАНа Дмитрий Владимирович Скобелевич постоянно интересовался ходом работы. Речь шла о престиже ФИАНа и советской науки. Эти работы позволили свести к минимуму отставание наших лазерных работ от американских. К нам приходили консультироваться по проблемам оптической генерации физики из ФИАНа и других институтов Москвы, приезжали из лабораторий Киева, Минска, Горького, Ленинграда и др. Это были незабываемые для нашей группы дни. Были и высокие гости: академическое начальство, заведующий отделом науки ЦК КПСС академик В.А. Кириллин. Иногда гостей сопровождал Н.Г. Басов. Однажды Николай Геннадиевич привёл к нам Д.Ф. Устинова, бывшего тогда, правда, ещё не министром обороны, а заместителем председателя Совета Министров СССР, и мы прожигали для него лазером бритвы. Может быть, уже тогда они обсуждали возможность применения мощного лазерного пучка для противоракетных установок.

Первое подробное описание нашего лазера на рубине было дано в отчёте по теме "Применение квантовых систем для генерации, усиления и индикации оптического излучения" от 30 декабря 1961 г. Текст отчёта сохранился благодаря изданию сборника *Записки архивариуса* [12]. Во введении к отчёту сообщается, что "приведены результаты экспериментов по созданию генератора оптического излучения на рубине (длина волны 6943 Å), выполненные в Лаборатории люминесценции М.Д. Галаниным, А.М. Леонтовичем, З.Л. Моргенштерн, З.А. Чижиковой. Подробно исследованы оптические свойства рубина вблизи порога самовозбуждения и исследовано возникающее в режиме генерации излучение. Дано описание технологии изготовления генератора". Часть 1 отчёта посвящена применению люминесцентных кристаллов. Рубиновый лазер описан в главе 1 "Оптический генератор на кристалле рубина" этой части. В главе 1 довольно подробно описываются как предварительные исследования, так и собственно наблюдения генерации. Представления об этом дают названия параграфов: § 1. *Некоторые оптические характеристики рубина*. § 2. *Обработка кристаллов и контроль поверхностей*. § 3. *Спектральная зависимость квантового выхода люминесценции рубина*. § 4. *Серебрение торцов*. § 5. *Система оптической накачки*. § 6. *Наблюдение генерации*. § 7. *Измерение энергии генерации*. § 8. *Кинетика люминесценции, вынужденного испускания и генерации*. В приложении I воспроизведён текст параграфов 5, 6 и 8, рисунки и список литературы из сборника *Записки архивариуса* (с любезного разрешения автора сборника А.Н. Стародуба). В приложении II представлен доклад [10] на III Международной конференции по квантовой электронике (Париж, 1963 г.).

Список литературы

1. Schawlow A L, Townes C H *Phys. Rev.* **112** 1940 (1958)
2. Басов Г Н, Крохин О Н, Попов Ю М *УФН* **72** 161 (1960) [Basov G N, Krokhin O N, Popov Yu M *Sov. Phys. Usp.* **3** 702 (1961)]
3. Maiman T H *Phys. Rev. Lett.* **4** 564 (1960)
4. Maiman T H *Nature* **187** 493 (1960)
5. Collins R J et al. *Phys. Rev. Lett.* **5** 303 (1960)
6. Maiman T H et al. *Phys. Rev.* **123** 1151 (1961)

7. Галанин М Д, Леонтович А М, Чижикова З А *ЖЭТФ* **43** 347 (1962) [Galanin M D, Leontovich A M, Chizhikova Z A *Sov. Phys. JETP* **16** 249 (1963)]
8. Галанин М Д, Леонтович А М, Свириденков Э А, Сморгачев В Н, Чижикова З А *Оптика и спектроскопия* **14** 165 (1963) [Galanin M D, Leontovich A M, Sviridenko E A, Smorchkov V N, Chizhikova Z A *Opt. Spectrosc.* **14** 86 (1963)]
9. Коробкин В В, Леонтович А М *ЖЭТФ* **44** 1847 (1963) [Korobkin V V, Leontovich A M *Sov. Phys. JETP* **17** 1242 (1963)]
10. Chizhikova Z A, Galanin M D, Korobkin V V, Leontovich A M, Smorchkov V N, in *Quantum Electronics: Proc. of the Third Intern. Congress, Paris, 1963* (Eds P Grivet, N Bloembergen) (New York: Columbia Univ. Press, 1964) p. 1483
11. Кирсанов Б П, Леонтович А М, Можаровский А М *Квантовая электроника* **1** 2211 (1974) [Kirsanov B P, Leontovich A M, Mozharovskii A M *Sov. J. Quantum Electron.* **4** 1232 (1975)]
12. Стародуб А Н (Ред.) *Записки архивариуса* Т. 2 (М.: Изд-во ФИАНа, 1997) ч. 1

Приложение I

Применение квантовых систем для генерации, усиления и индикации оптического излучения

(Выдержки из текста отчёта ФИАНа, 30 декабря 1961 г.)

§ 5. Система оптической накачки

Для оптического возбуждения ("накачки") генератора употреблялись 2 ксеноновые импульсные лампы ИФК-2000, включённые последовательно (характеристики их даны в [12]). Схема установки, применявшейся нами, приведена на рис. 5. Ёмкость конденсаторов, питавших лампы, — 900 мкФ, напряжение — до 3 кВ. Такой режим для этих ламп не является номинальным, поэтому срок службы их сокращался, по сравнению с указанным в паспорте. Обычно применявшиеся напряжения для возбуждения генерации были от 1,5 кВ до 3 кВ. Лампы, имевшие U-образную форму, помещались в цилиндрический осветитель специальной конструкции (рис. 6). Кратковременный высоковольтный импульс поджигавший лампы, подавался непосредственно на кожу.

Изнутри осветитель покрывался окисью магния. При напылении окиси магния на осветитель подавался

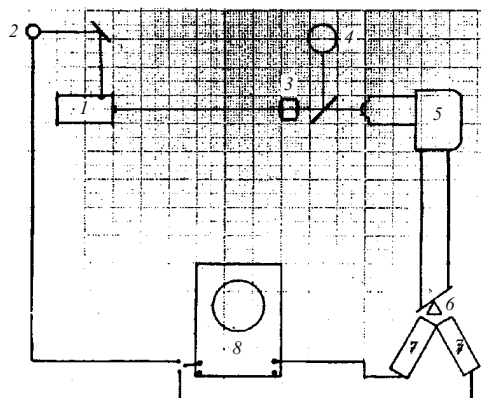


Рис. 5. Схема установки для наблюдения люминесценции вынужденного испускания и генерации рубина. 1 — оптический генератор, 2 — фотоэлемент СЦВ, 3 — конденсор, 4 — ФЭУ-27, 5 — спектрограф ИСК-51 с камерой УФ-84, 6 — разделительная призма, 7 — ФЭУ-12, 8 — ДЭО-1.

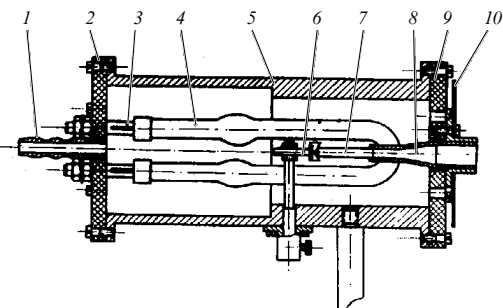


Рис. 6. Схема осветителя оптического генератора. 1 — трубка для охлаждения, 4 — лампа ИФК-2000, 5 — осветитель, 6 — держатель рубина, 7 — кристалл рубина, 8 — светоотводная трубка.

постоянный потенциал 4 кВ. В этом случае слой окиси был прочнее и альbedo его больше, чем без напряжения. Образец располагался между лампами.

После каждой вспышки импульсной лампы образец немного нагревался. Для охлаждения его после каждой вспышки через кожух продувался холодный воздух. Для уменьшения количества рассеянного света импульсной лампы, выходявшего вместе со светом люминесценции и генерации, употреблялась светозащитная трубочка. В верхней крышке было сделано отверстие, в которое выходил свет импульсной лампы и падал на фотозащитный элемент (через светофильтр СЗС-18 для защиты от света люминесценции рубина), регистрировавший свет импульсной лампы. Сигнал от фотозащитного элемента подавался на осциллограф.

§ 6. Наблюдение генерации

Свет люминесценции или индуцированного испускания, выходявший из образца рубина, падал через конденсор на щель спектрографа ИСП-51 с камерой УФ-84. В фокальной плоскости камеры в месте фокусировки линий R_1 и R_2 ставилась щель (ширина щели 1,3 мм). Для разделения линий R_1 и R_2 к щели была приставлена призма, ребро которой было обращено к щели. Лучи, падающие с разных сторон ребра призмы, преломлялись на гранях призмы в разные стороны и таким образом можно было развести линии R_1 и R_2 . Обе линии, R_1 и R_2 падали каждая на свой фотоумножитель. Для регистрации применялись ФЭУ-12А. С сопротивлений нагрузки обоих фотоумножителей сигналы подавались на двухлучевой осциллограф ДЭО-1. Сопротивление нагрузки ФЭУ было от 20 кОм до 1 кОм — в зависимости от того, что наблюдалось — люминесценция или генерация. Напряжение питания ФЭУ 1,5 кВ.

В такой схеме даже при наблюдении люминесценции на выходную щель прибора рассеянный свет импульсной лампы не попадал. Эта схема давала возможность наблюдать одновременно люминесценцию в обеих R -линиях, генерацию в R_1 -линии и люминесценцию в R_2 -линии и т.п. Генерацию можно было наблюдать также и без спектрографа. В этом случае свет от рубина падал прямо на ФЭУ-27 с интерференционным светофильтром, пропускающим длину волны R -линии.

§ 8. Кинетика люминесценции, вынужденного испускания и генерации

На описанной выше установке производилось наблюдение и осциллографирование импульсов свечения от-

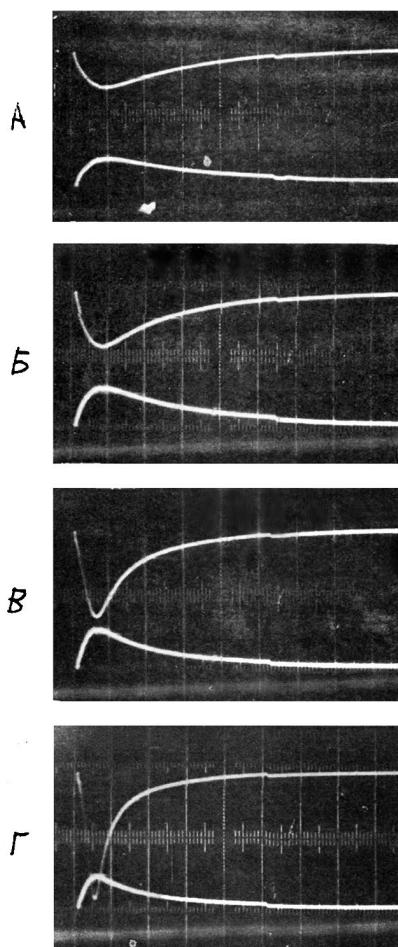


Рис. 7. Кинетика свечения R_1 - и R_2 -линий при разных энергиях накачки. Осциллограммы. На всех снимках верхний луч — линия R_1 , нижний луч — R_2 . Развертка 1 мс/б. дел. Напряжения на лампах: (А) $U = 1000$ В, (Б) $U = 1100$ В, (В) $U = 1200$ В, (Г) $U = 1300$ В.

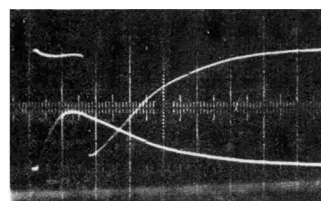


Рис. 8. Кинетика свечения R_1 -линии (индуцированное испускание). Осциллограмма. Верхний луч — линия R_1 , нижний луч — свечение лампы накачки. Развертка 100 мкс/б. дел.

дельно R_1 - и R_2 -линий люминесценции. При малой энергии вспышки импульсных ламп наблюдался процесс затухания люминесценции, совершенно одинаковый для R_1 и R_2 и подчиняющийся экспоненциальному закону с $\tau = 3,5$ мс.

При постепенном увеличении энергии накачки кристаллы по своему поведению, как и в работе Меймана [5], разделялись на два класса: в одних можно было наблюдать только явления вынужденного испускания, в других возникала настоящая оптическая генерация.

Вынужденное испускание проявлялось в том, что начиная с некоторой энергии, наблюдалось изменение соотношения интенсивности линий R_1 и R_2 : интенсив-

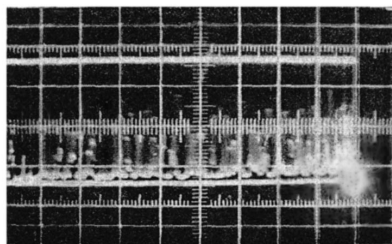


Рис. 9. Кинетика генерации. Осциллограмма снята через 300 мкс после начала вспышки. Развёртка 25 мкс/б.дел.

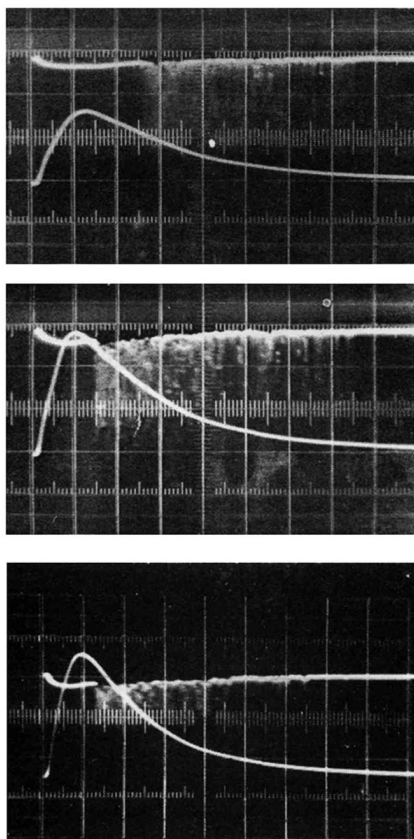


Рис. 10. Кинетика генерации при разных энергиях накачки. Верхний луч — линия R_1 , нижний луч — свечение лампы накачки. Развёртка 100 мкс/б.дел.

ность линии R_1 сильно возрастала и кинетика её затухания резко изменялась: затухание происходило значительно быстрее. На рисунке 7 показано изменение соотношения между R_1 и R_2 с увеличением энергии накачки. Более детальное изучение поведения интенсивности линии R_1 на более быстрой развёртке показало, что изменение R_1 происходит резким скачком через ≈ 250 мкс после начала вспышки ламп (рис. 8).

Кристаллы, в которых получалась оптическая генерация, после достижения порога генерации обнаруживали очень резкое увеличение интенсивности излучения в направлении, перпендикулярном торцу кристалла. Кинетика излучения резко изменялась: излучение происходило отдельными короткими импульсами с длительностью менее 1 мкс (рис. 9). Частота следования этих импульсов тем больше, чем больше превышение энергии над порогом генерации. Генерация начиналась через

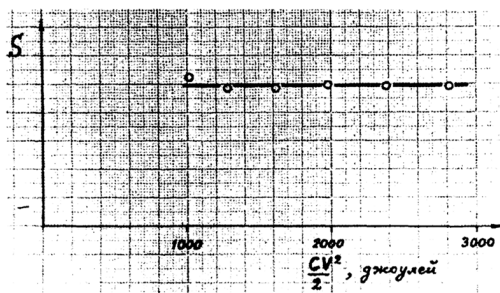


Рис. 11. Зависимость энергии накачки, требующейся для начала генерации, от полной энергии вспышки лампы. S — площадь под осциллограммой вспышки лампы до начала генерации.

100–500 мкс после начала вспышки, в зависимости от её энергии (рис. 10). При этом энергия вспышки, требующаяся для начала генерации, определяемая площадью под осциллограммой вспышки, оказывалась постоянной (рис. 11).

Таким образом, эти результаты дают характерную картину пульсирующей генерации рубина, совпадающую с описанной в работах [5, 7].

Список литературы к части I отчёта

1. Deutschbein O *Ann. Physik* **406** 712, 729 (1932)*; *Z. Phys.* **77** 489 (1932)
2. Sugano S, Tanabe Y *J. Phys. Soc. Jpn.* **13** 880 (1958); Sugano S, Tsujikawa J *J. Phys. Soc. Jpn.* **13** 899 (1958)
3. Толстой Н А, Феофилов П П *ДАН СССР* **85** 551 (1952)
4. Вишневецкий В Н, Пидзырайло Н С *Укр. физ. журн.* **5** 629 (1960)
5. Maiman T H et al. *Phys. Rev.* **123** 1151 (1961)
6. Maiman T H *Nature* **187** 493 (1960); *British Commun. Elect.* **7** 674 (1960)
7. Collins R J et al. *Phys. Rev. Lett.* **5** 303 (1960)
8. Wieder I, Sarles L R *Phys. Rev. Lett.* **6** 95 (1961); Schawlow A L, Devlin G E *Phys. Rev. Lett.* **6** 96 (1961)
9. Cifton M et al. *Proc. IRE* **49** 960 (1961)
10. Вавилов С И *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **9** 283 (1945)
11. Константинова-Шлезингер М А (Ред.) *Люминесцентный анализ* (М.: Физматгиз, 1961) приложение V, с. 386
12. Маршак И С *ПТЭ* (1957), § 5, 3; в сб. *Справочная книга по светотехнике* Вып. 1 (Отв. ред. В С Кулебакин) (М.: Изд-во АН СССР, 1956) с. 434
13. Weisaman S I *J. Chem. Phys.* **10** 214 (1942)
14. Севченко А Н, Морачевский А Г *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **15** 628 (1951)
15. Севченко А Н, Трофимов А К *ЖЭТФ* **21** 220 (1951)
16. Ельяшевич М А *Спектры редких земель* (М.: ГИТТЛ, 1953)
17. Галкин Л Н, Феофилов П П *Оптика и спектроскопия* **7** 840 (1959) [Galkin L N, Feofilov P P *Opt. Spectrosc.* **7** 492 (1959)]
18. Sorokin P P, Stevenson M J *Phys. Rev. Lett.* **5** 557 (1960); *IBM J.* **5** 56 (1961)
19. Беляев Л М, Добржанская Г Ф, Феофилов П П *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **25** 548 (1961)

* Номер тома указан согласно новой нумерации, принятой на сайте Wiley, в оригинале — том 14.

Приложение II

Когерентность, временная развёртка спектра и пульсации лазерного излучения*

З.А. Чижикова, М.Д. Галанин, В.В. Коробин,
А.М. Леонтович, В.Н. Сморгков

Академия наук СССР

I. КОГЕРЕНТНОСТЬ И СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ

В работах [1, 2] было показано, что излучение рубинового лазера когерентно практически на всей излучающей грани рубина, т.е. генерация происходит на модах, возбуждаемых по всему объёму кристалла. Вероятнее всего, это так называемые продольные моды [3], удовлетворяющие уравнению

$$2L\mu = l\lambda, \quad (1)$$

где L — расстояние между зеркалами резонатора, μ — показатель преломления, λ — длина волны излучения, l — целое число. В каждом импульсе генерации возбуждаются несколько продольных мод [4], и этот факт не имеет теоретического объяснения для рубина, обладающего однородным уширением линии усиления [5].

В данной работе исследовалась временная зависимость излучения этих мод в импульсном режиме работы лазера. В соответствии с этим мы исследовали когерентность и получали временные развёртки спектров лазерного излучения при различных температурах рубина.

А. Когерентность

Эксперименты проводились при различной температуре рубинового стержня ($+20^\circ\text{C} - -165^\circ\text{C}$). Низкие температуры обеспечивались обдуванием сухим холодным азотом и измерялись термопарой, закреплённой на рубине.

Когерентность излучения изучалась путём наблюдения интерференции с помощью интерферометра Майкельсона, одно из зеркал которого было заменено призмой (рис. 1). В фокальной плоскости F линзы O

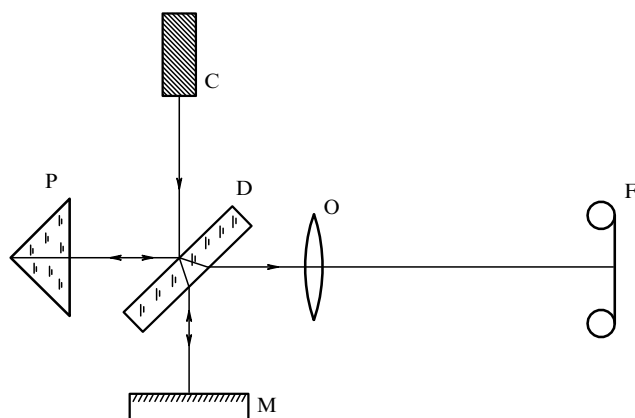


Рис. 1. Схема для наблюдения интерференции.

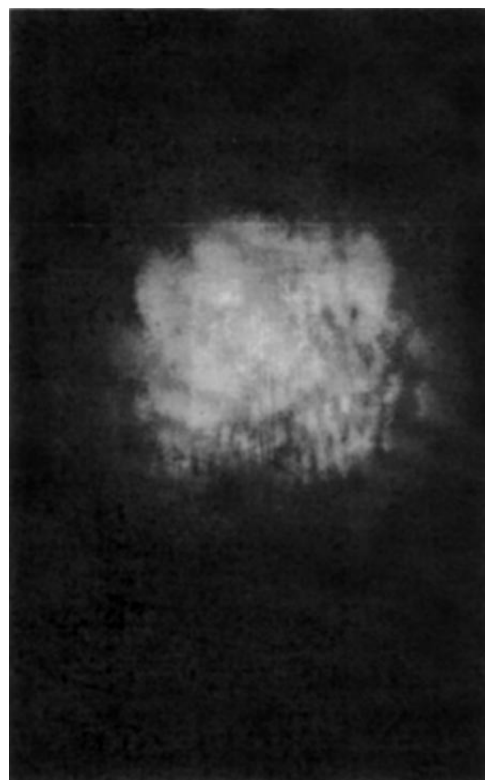


Рис. 2. Интерференция излучения, распространяющегося в различных направлениях.

наблюдались два изображения дальнего поля, наложенные друг на друга. Одно возникало благодаря отражению от призмы P , а другое — от зеркала M . Если свет в разных плечах является когерентным и попадает в одну и ту же точку в плоскости F , то в этой точке возникают интерференционные полосы. Таким же способом мы исследовали когерентность излучения в различных точках торца рубина. В этом случае между кристаллом C и делительной пластинкой D размещалась линза на фокусном расстоянии от грани кристалла. При этом в плоскости F наблюдалось наложение изображений грани кристалла. Таким образом, мы могли изучать всё поле одновременно. На рисунке 2 приведена фотография интерференции, снятая в течение одного импульса накачки при комнатной температуре рубина. На ней видны интерференционные полосы; таким образом, лучи, распространяющиеся в различных направлениях, когерентны. Это означает, что моды распространяются под различными углами, т.е. волновой фронт моды не является плоским (как и в [2]), в отличие от теоретически предсказанного [6] для случая плоско-параллельного резонатора.

При температуре рубина -165°C интерференционные полосы являются менее резкими.

Аналогичными методами было обнаружено, что лазерное излучение когерентно на всей излучающей поверхности грани рубина (как и в [2]).

Интерференционные полосы наблюдались лишь при малом превышении накачки над порогом (около 2%). Эти полосы расплывались и исчезали при большом превышении накачки. Это можно объяснить тем, что интегральная картина интерференции составлена из интерференционных картин отдельных пиков излу-

* Текст доклада на III Международной конференции по квантовой электронике (Париж, 1963) (перевод на русский язык).

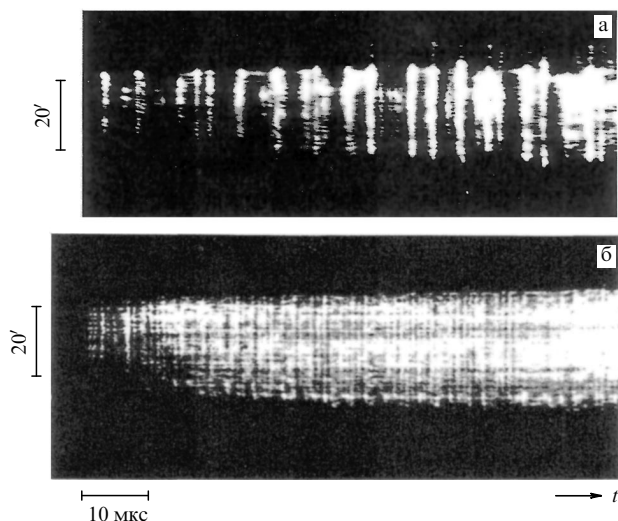


Рис. 3. Временная развёртка расплывающегося по углу излучения. Рубин: концентрация хрома 0,05 %, оптическая ось перпендикулярна оси кристалла, $L = 76$ мм. (а) Температура рубина $+20^\circ\text{C}$, (б) температура рубина -165°C .

ния. Если интерференционные картины различных пичков различны, то общая картина интерференции смазывается. При большом превышении накачки над порогом моды в различных пичках имеют разные поперечные характеристики [7], что может приводить к различию интерференционных картин в различных пичках.

В. Временная развёртка

Временная развёртка излучения лазера осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры СФР (скоростной фоторегистратор) с зеркальной развёрткой (в режиме щелевой фоторегистрации). На рисунке 3а показана одна из фотографий, сделанная при температуре рубина $+20^\circ\text{C}$. Щель камеры S располагалась в фокальной плоскости линзы, куда попадает лазерное излучение. Таким образом, фотография показывает временную развёртку картины дальнего поля. На фотографии видно, что в каждом пичке излучение расплывается в дискретный набор углов с общей расходимостью $30-40'$ (различается для разных пичков). Измеренная разница углов между соседними направлениями составила порядка λ/D , где D — диаметр торца рубина.

Фотографии временной эволюции излучения, полученные при температуре рубина -165°C (рис. 3б), показывают, что в этом случае пички генерации становятся почти регулярными и излучение состоит из регулярных цепочек импульсов, чередующихся через равные промежутки времени. Иногда появляется нечто, похожее на бегущие между пульсациями. Дискретные направления распространения излучения не так явно выражены, как в случае комнатной температуры рубина. При любых температурах общая расходимость пучка обычно меньше в начале генерации [8], чем в более поздних стадиях генерации.

С. Спектр излучения

Спектры лазерного излучения изучались с помощью интерферометра Фабри–Перо в течение одного импульса накачки как с использованием, так и без временной развёртки. На интегральных снимках без вре-

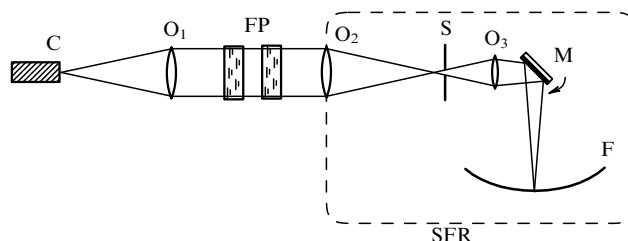


Рис. 4. Схема временной развёртки спектра.

менной развёртки было обнаружено, что генерация происходит на продольных модах, как и в [3]. Расстояние между модами $1/(2L\mu)$ (в волновых числах, см^{-1}). Это означает, что за время всего импульса генерации изменение оптической длины кристалла из-за температурного расширения не превышает $\lambda/2$. Это следует из условия (1). В противном случае изменение частоты продольной моды было бы больше, чем межмодовый интервал, и на интегральной фотографии наблюдалось бы расплывание. Взяв значения $\partial L/\partial T$ и $\partial \mu/\partial T$ из [8], мы получили $\Delta T < 0,3^\circ\text{C}$, т.е. в течение генерации возрастание температуры не превышает $0,3^\circ\text{C}$.

Временная развёртка лазерного излучения осуществлялась с использованием той же высокоскоростной камеры с вращающимся зеркалом СФР (рис. 4). На щель СФР проектировалось изображение торца рубина с помощью двух линз, O_1 и O_2 , между которыми размещался интерферометр Фабри–Перо (FP). Линза O_1 располагалась на фокусном расстоянии от торца рубина C , а линза O_2 — на расстоянии фокуса от щели S прибора СФР. В таком случае изображение торца рубина проецировалось в плоскость щели и наблюдались кольца интерферометра Фабри–Перо. Щель S вырезала из всего изображения торца вертикальную полоску, излучение которой и сканировалось. Таким образом, мы наблюдали временную развёртку излучения от вертикальной полосы рубинового торца.

Если удалить линзу O_1 , то аналогично можно наблюдать временную развёртку спектра излучения в различных направлениях.

На рисунке 5 показана временная развёртка спектра в последнем случае. Видно, что существует несколько частот генерации в каждом импульсе и они одинаковы для разных направлений. Измеренная разница между ближайшими частотами оказалась равной $1/(2L\mu) \text{ см}^{-1}$ (в нашем случае $0,04 \text{ см}^{-1}$), т.е. частоты соответствуют продольным модам. Набор продольных мод различался для разных пичков. При комнатной температуре рубина количество продольных мод составляло 5–8 (спектральный интервал $0,3 \text{ см}^{-1}$). Полная ширина полосы генерации составила 1 см^{-1} (ширина полосы люминесценции 10 см^{-1}). При температуре рубина -165°C генерация происходит на 3–4 продольных модах при полной ширине генерации $\sim 0,25 \text{ см}^{-1}$ (при этой температуре полоса люминесценции составила $0,6 \text{ см}^{-1}$ [9]). При комнатной температуре рубина генерация происходит только на продольных модах и между ними генерация отсутствует, однако при низкой температуре рубина наблюдается заметный фон между продольными модами (см. рис. 5), что соответствует излучению на некоторых промежуточных частотах.

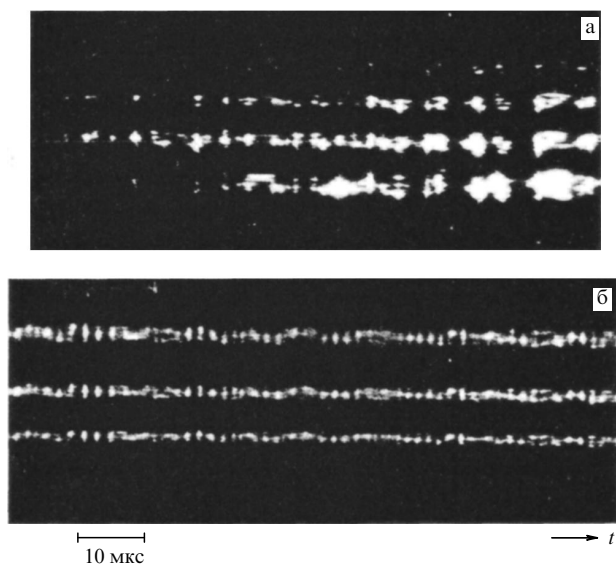


Рис. 5. Временная развёртка спектра излучения, распространяющегося в различных направлениях. Рубиновый кристалл тот же самый, что и на рис. 3. Расстояние между пластинами эталона Фабри – Перо 5 мм. (а) Температура рубина 20 °С, начало генерации. (б) Температура рубина –165 °С, 300 мкс после начала генерации.

Обсуждение

Временная развёртка спектра показывает, что модуляция интенсивности в разных пиках происходит на нескольких модах с различными продольными параметрами. Поперечные же характеристики этих мод одинаковы, как это видно из эксперимента; в противном случае интерференционная картина была бы смазана. Эти моды возбуждаются во всём объёме генерирующей части рубина.

Излучение мод происходит не в одном направлении с расходимостью порядка λ/D (20'), как это было бы в случае плоско-параллельного резонатора, а в нескольких направлениях с суммарной расходимостью 30'–40'. Такую большую расходимость пучка невозможно объяснить оптическими неоднородностями, так как мы проверили внутреннюю однородность кристалла с помощью интерферометра Майкельсона (аналогично [10]), и она оказалась не хуже 1μ ($1,5 \lambda$). Это дало бы в результате расходимость менее 30'', а не 30'. Кроме того, из рис. 3 видно, что расходимость пучка различна для разных пиков, а эффект неоднородности должен быть одинаков для разных пиков. По этой же причине рассеяние света не может быть причиной расходимости пучка. Единственное объяснение заключается в изменении характеристик резонатора во время генерации. Как мы видели, изменение температуры слишком мало, чтобы принимать его во внимание.

Возможно, объяснение состоит в том, что во время генерации показатель преломления в R₁-линии рубина изменяется из-за изменения населённости верхнего лазерного уровня. В таком случае характеристики резонатора должны измениться, что приведёт к изменению расходимости пучка. Модуляция оптического пути резонатора сама по себе также может привести к частотной модуляции при низких температурах рубина, что могло бы объяснить излучение на частотах в промежутках между продольными модами.

II. ПУЛЬСАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Теория пульсации излучения ("пиков") лазера, развитая в нескольких работах [10–15], пока не закончена. Возможно, это объясняется недостаточным количеством экспериментальных данных о пиках. Мы экспериментально измерили зависимость средней частоты пиков от мощности накачки и температуры рубина. Амплитуды пиков очень сильно различаются, и пикки следуют друг за другом нерегулярно. Мы измеряли среднее время 20–30 пиков, подсчитывали среднюю частоту пиков и сравнивали её со средней мощностью накачки за тот же интервал времени. Эти эксперименты проводились с использованием как фотоумножителей, так и временной развёртки. Обычно данные соответствуют началу процесса генерации.

На рисунке 6 показана зависимость средней частоты пиков от мощности накачки. Видно, что частота пиков является линейной функцией мощности накачки. Средняя амплитуда пиков возрастает также линейно, а их ширина, соответственно, уменьшается.

Как уже упоминалось ранее, при низких температурах пульсации почти регулярны, а между ними наблюдается фон. При температуре –165 °С частота пульсаций возрастает втрое, по сравнению с комнатной температурой рубина. Зависимость частоты пульсаций от накачки — сверхлинейная.

Простая теоретическая схема пульсаций приводит к следующим уравнениям [13]:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau} + bnN, \quad \frac{1}{2} \frac{dn}{dt} = -bnN + E, \quad (2)$$

где N — плотность энергии в кристалле в числах фотонов, n — количество активных атомов, $b = Bh\nu$ — коэффициент Эйнштейна, E — энергия накачки (число фотонов, поглощённых в 1 см³ за 1 с), τ — радиационное время жизни фотона в кристалле. Решение системы уравнений (2) даёт затухающие пульсации (если $bE\tau^2 < 2$; в наших случаях этот параметр порядка 10^{-3}). Частота пульсаций, полученная из уравнений (2), пропорциональна $\sqrt{bE}$, и она не согласуется с вышеупомянутой экспериментальной линейной и суперлинейной (при низких температурах) зависимостями от E . Вероятно, пульсации не являются затухающими пульсациями состояния равновесия, а представляют собой релаксационные автоколебания. Это означает, что урав-

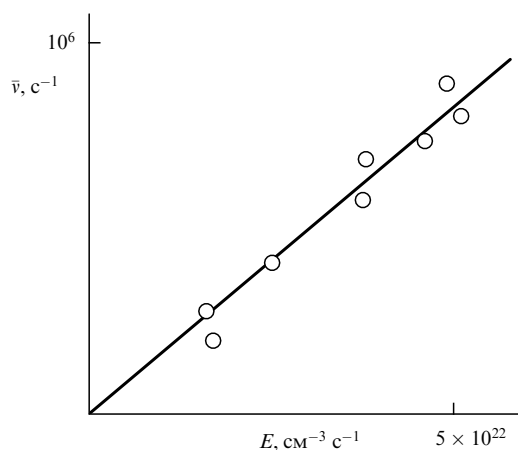


Рис. 6. Зависимость средней частоты пиков от мощности накачки E .

нения (2) не подходят для объяснения пульсаций излучения. Вероятно, как заметил А.В. Гапонов-Грехов [16], эти пульсации и их нерегулярность при комнатной температуре связаны с флуктуациями спонтанного излучения. Фактически, несмотря на то что плотность фотонов непосредственно перед излучением довольно велика, число спонтанных фотонов в моде мало (~ 100).

Флуктуации числа спонтанных фотонов с частотой вблизи максимума люминесценции могут приводить к возбуждению разных мод в разных пичках.

Список литературы

1. Masters J I, Parrent G B (Jr.) *Proc. IRE* **50** 230 (1962)
2. Галанин М Д, Леонтович А М, Чижикова З А *ЖЭТФ* **43** 347 (1962) [Galanin M D, Leontovich A M, Chizhikova Z A *Sov. Phys. JETP* **16** 249 (1963)]
3. Ciftan M, Krutchkoff A, Koozekanani S *Proc. IRE* **50** 84 (1962)
4. McMurty B J, Siegman A E *Appl. Opt.* **1** 51 (1962)
5. Луговой В Н *Радиотех. и электрон.* **7** 349 (1961)
6. Schawlow A L, Townes C H *Phys. Rev.* **112** 1940 (1958); Fox A G, Li T *Bell Syst. Tech. J.* **40** 453 (1961)
7. Evtuhov V, Neeland J K *Appl. Opt.* **1** 517 (1962)
8. Jeppesen M A *J. Opt. Soc. Am.* **48** 629 (1958)
9. Schawlow A L, in *Advances in Quantum Electronics* (Ed. J R Singer) (New York: Columbia Univ. Press, 1961) p. 50
10. Hercher M *Appl. Opt.* **1** 665 (1962)
11. Hellwarth R W *Phys. Rev. Lett.* **6** 9 (1961)
12. Singer J R, Wang S, in *Advances in Quantum Electronics* (Ed. J R Singer) (New York: Columbia Univ. Press, 1961) p. 299
13. Statz H, Luck C, Shafer C, Ciftan M, in *Advances in Quantum Electronics* (Ed. J R Singer) (New York: Columbia Univ. Press, 1961) p. 342
14. Самсон А М, Сава В А *ДАН БССР* **7** 418 (1962)
15. Kaplan J I, Zier R J. *Appl. Phys.* **33** 2372 (1962)
16. Гапонов-Грехов А В, Беспалов В И *Изв. вузов. Радиофизика* (в печати)

On the creation of the first ruby laser in Moscow

A.M. Leontovich, Z.A. Chizhikova

P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-499) 135-78 31, (7-499) 132-62 47
E-mail: leon@lebedev.ru

The paper describes the history of the creation of the first ruby laser in 1961 at the P.N. Lebedev Physical Institute, Academy of Sciences of the USSR, Moscow. Appendices present a fragment of FIAN's 1961 annual report and a talk at the Third International Congress on Quantum Electronics (1963), in which one of the first scientific results obtained with a laser is described.

PACS numbers: **01.65. + g**, **42.50. – p**, **42.60. – v**

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201101g.0082

Bibliography — 16 references

Received 4 June 2010, revised 16 July 2010

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **181** (1) 82–91 (2011)

Physics – Uspekhi **54** (1) (2011)