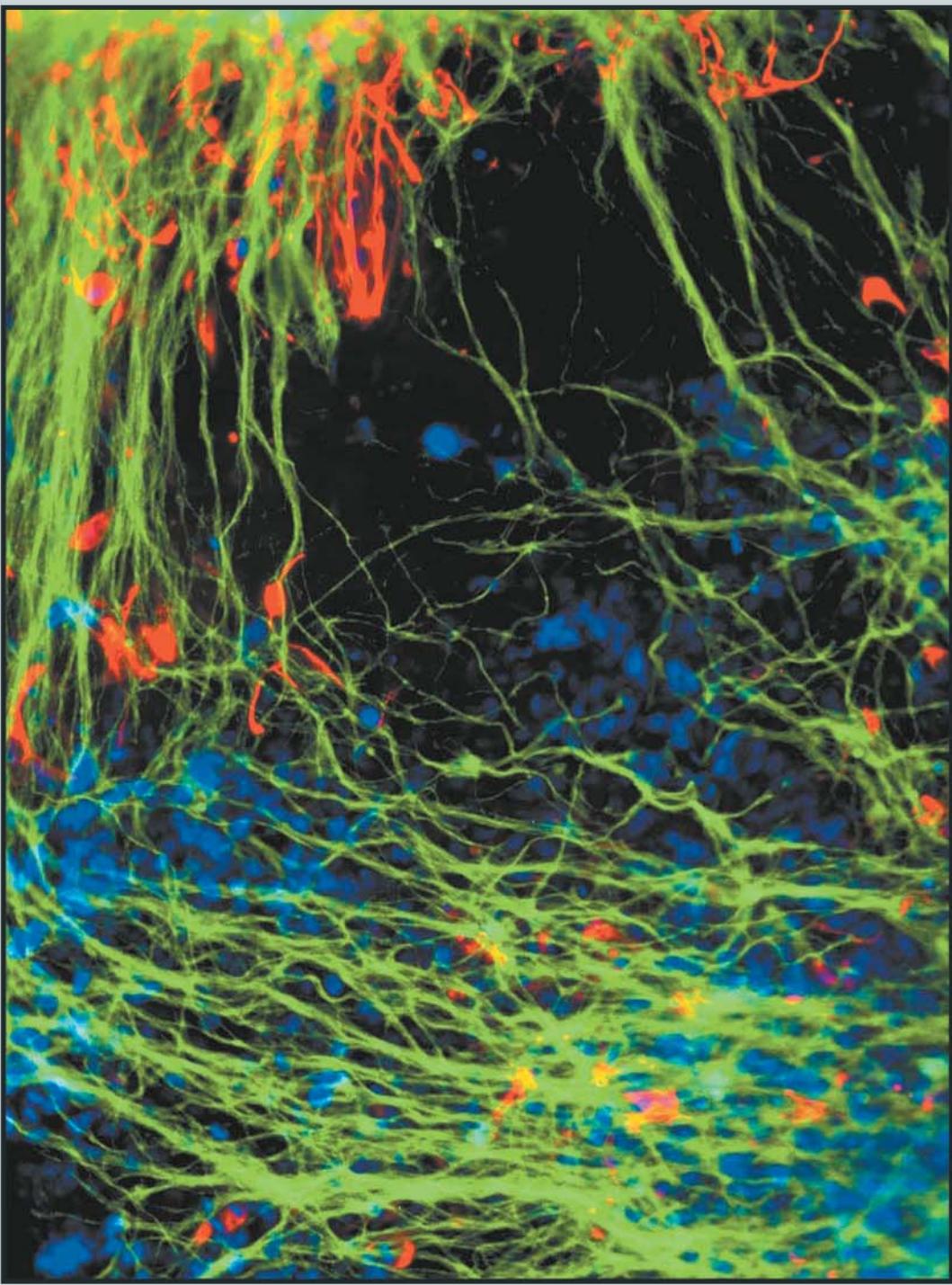


Мирона

5 10



В НОМЕРЕ:

3 Киселев С.Л., Шутова М.В.

Репрограммирование клеток: прыжок вверх по лестнице, ведущей вниз

Четыре года назад в руках ученых оказался «философский камень» — технология, позволяющая возвращать взрослые клетки в эмбриональное состояние. В чем суть этой технологии и каковы ее перспективы для фундаментальной науки и практической медицины?

11 Кривовичев С.В.

Уран в нанотрубке

Нанотехнологический бум уже достиг химии урана и трансурановых элементов — обнаружены первые уранил-селенатные комплексы в виде наноразмерных трубок.

18 Шикин А.М., Радер О.

Квантовые состояния как посредники в магнитном взаимодействии

В слоистых магнитных металлических системах наблюдаются интересные эффекты модуляции магнитных свойств в зависимости от толщины немагнитного слоя. Причиной служат квантование электронных состояний и их спиновая поляризация.

27 Дедыш С.Н., Куличевская И.С.

Планктомицеты: загадочные красавцы из мира бактерий

За последние годы знания о разнообразии, метаболических типах и экологических функциях планктомицетов существенно расширились. Однако по сравнению с другими бактериями эта удивительная группа микроорганизмов остается еще слабо изученной.

36 Лыгина Т.И.

Внутриплитная эндогенная активность в океане — новые факты

Магматическая и постмагматическая деятельность в районе российского лицензионного участка в железомарганцевой провинции Кларион-Клиппертон оказала существенное влияние на формирование и состав конcretionно-коркового оруденения.

46 Михайлов В.М.

Горные реки равнин и горы с равнинными реками

В некоторых интенсивно воздымаемых и сильно расчлененных горных сооружениях реки неспешно петляют в широкопойменных долинах, выстланых аллювием. В то же время на относительно стабильных плоскогорьях большинство водотоков продолжают вгрызаться в скальные породы.

54 Сапожников М.Н.

Лазерная одиссея Теодора Меймана

Пятьдесят лет назад была впервые получена генерация когерентного света в кристалле рубина. К этому событию приурочен выход на русском языке книги Теодора Меймана, создавшего первого рубинового лазера.

Мейман Т.

Лазерная одиссея (56)

О чём писала «Природа»

65 Кольцов Н.К.

Национальная организация науки

75

Новости науки

Еще один класс вспышек сверхновых? (75). Новая космическая линейка. **Вибе Д.З.** (76). Магнитные поверхности (76). Платиновые нанокатализаторы (77). Новая технология массового производства графена (77). Как жабы заселили мир (77). Новый препарат для лечения малярии (78). Освоение железомарганцевых руд океанского дна (78). Ленточные глины на северо-востоке Алтая — признак погребенных россыпей золота (78). Высвобождение метана из мерзлотных толщ арктического шельфа (79). Гигантские рыбы мезозойских морей (80).

Рецензии

81 Сытин А.К.

Тоталитаризм и орнитология

(на кн.: Е.Новак. Ученые в вихре времени: Воспоминания об орнитологах, защитниках природы и других натуралистах)

86

Новые книги

В конце номера

88 Семихатова Н.Б.

Взгляд в прошлое

Лазерная одиссея Теодора Меймана

М.Н.Сапожников,
доктор физико-математических наук
Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН
Москва

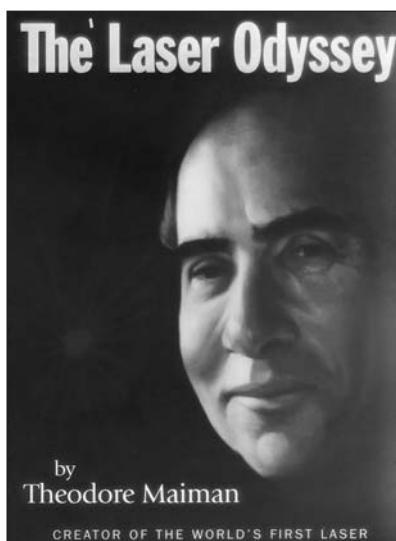
Пятьдесят лет назад на вершине горы на берегу Тихого океана, в Калифорнии, произошло чудесное событие. Человек впервые создал когерентный свет. 16 мая 1960 г. Теодор Мейман, сотрудник Исследовательской лаборатории Хьюза в Малибу, создал первый в мире лазер. Он получил генерацию красного когерентного излучения на бесфононной R₁-линии на длине волны 6943 Å в кристалле розового рубина.

Мейман написал книгу «Лазерная одиссея» (Maiman T.H. *The Laser Odyssey*. Blaine, 2000), в которой откровенно и увлекательно рассказал драматическую историю создания лазера. Тогда шла напряженная гонка с участием многих университетов и лабораторий США, стремившихся первыми получить генерацию когерентного света, после того как в 1954 г. был создан мазер.

2010 г. объявлен Международным годом лазера, и сейчас перевод книги Меймана готовится к публикации в России. Журнал «Природа» предлагает вниманию читателя фрагменты этой книги. Вкратце перечислим факты, оставшиеся за их пределами.

Теодор Мейман родился 11 июля 1927 г. в Лос-Анджелесе. В 1949 г. он закончил Колорадский университет и затем поступил в аспирантуру Стэнфордского университета, где под руководством лауреата Нобелевской премии Уиллиса Лэмба выполнил экспериментальное исследование лэмбовского сдвига в атомах гелия и защитил в 1955 г. докторскую диссертацию.

После этого, к большому огорчению Лэмба, который предлагал ему продолжить исследования, Мейман в 1956 г. перешел на работу в исследова-



Обложка американского издания книги «Лазерная одиссея». 2000 г.

тельскую лабораторию Авиационной компании Хьюза в Калифорнии. Здесь ему поручили усовершенствовать рубиновый мазер. Закончив с большим успехом летом 1959 г. проект с рубиновым мазером, Мейман решил заняться проблемой создания лазера, которая стала актуальной после того, как был впервые сделан мазер.

Первым устройством, основанном на использовании стимулированного излучения, был микроволновый молекулярный генератор/усилитель (мазер) на пучке молекул аммиака. В 1954 г. его конструкция была разработана детально Николаем Геннадьевичем Басовым и Александром Михайловичем Прохоровым в Физическом Институте им.П.Н.Лебедева АН ССР и независимо группой

Чарльза Таунса в Колумбийском Университете в США. (В 1964 г. Басов, Прохоров и Таунс получили Нобелевскую премию по физике «за фундаментальную работу в области квантовой электроники, которая привела к созданию генераторов и усилителей, основанных на мазерно-лазерном принципе».)

В 1958 г. Шавлов и Таунс опубликовали статью в журнале *Physical Review*, в которой изложили принцип работы мазеров, рассмотрели возможность получения когерентного излучения в инфракрасной и оптической областях спектра и предложили попытаться создать лазер на парах калия. Их статья вызвала очень большой резонанс и стимулировала интенсивные исследования во многих университетах и лабораториях США.

Мейман проанализировал свойства различных систем, в которых можно было попытаться получить генерацию когерентного света, и остановил свой выбор на кристалле розового руби-на. Однако администрация Лаборатории Хьюза

весыма скептически относилась к этой его работе, потому что та была «не по профилю» лаборатории и потому что Шавлов авторитетно утверждал во время Первой международной конференции по квантовой электронике в Нью-Йорке в сентябре 1959 г. и позже, что кристалл розового рубина не годится для этой цели.

Мейман сконструировал изящное, компактное устройство, поместив небольшой цилиндрический стержень из розового рубина с отшлифованными параллельными зеркальными торцами внутри спирали стандартной лампы-вспышки, которая находилась внутри цилиндрического кожуха с полированной зеркальной внутренней поверхностью. И в первом же эксперименте с этой системой он получил 16 мая 1960 г. стимулированное оптическое излучение в рубине.

Через месяц после этого, 22 июня 1960 г., Мейман направил краткое сообщение о своем достижении в журнал *Physical Review Letters* и через два дня получил от его редактора письмо с отказом публиковать статью на том основании, что журнал уже больше не интересуют работы, посвященные мазерам.

Это стало началом загадочной, детективной, истории в «лазерной одиссее» Меймана. Получив отказ из *Physical Review Letters*, он направил краткую версию статьи в престижный британский журнал *Nature*. В результате первое научное сообщение о создании лазера появилось 6 августа 1960 г. не в США, а в Великобритании. Статья называлась «Стимулированное оптическое излучение в рубине» (*Nature*. 1960. V.187. P.493).

Пока Мейман занимался проблемой публикации своей статьи, возникли слухи, что в некоторых лабораториях в США тоже уже созданы лазеры или дело близко к этому. Это обеспокоило администрацию Лаборатории Хьюза, которая не собиралась терять приоритет и, несмотря на возражения Меймана, решила срочно устроить пресс-конференцию.

Специальное рекламное агентство организовало 7 июля 1960 г. пресс-конференцию в отеле «Дельмонико» в Нью-Йорке. На ней присутствовали журналисты из газеты *New York Times*, журналов *Time*, *Life*, *Newsweek*, *Christian Science Monitor* и всех главных агентств печати. Выступление Меймана вызвало огромный интерес. На следующий день появились сенсационные сообщения на первых страницах всех ведущих газет в США. Затем в общественно-политических журналах были напечатаны статьи с кричащими заголовками: «Человек из Лос-Анджелеса создал луч света ярче Солнца»; «Поразительное открытие луча смерти»; «Свет ярче Солнца»; «Угрожающее ужасное оружие»; «Научный прибор, сделанный из света».

Научная общественность была потрясена. Пресс-релиз Лаборатории Хьюза застал всех врасплох. Все ожидали, что, когда лазер появится, он будет основан на использовании газа или пара, как полагали Шавлов и Таунс, и сделают его в Лабораториях Белл, или в Колумбийском университете, или в какой-нибудь другой хорошо финансируемой лаборатории. И конечно, никто не ожидал, что лазер будет основан на кристалле розового рубина.

Новость о создании лазера произвела настоящий взрыв в финансировании лазерных проектов. Ученые, которые уже занимались этой работой, изменили направление своих исследований. Лазерными проектами стали заниматься и «новички», работавшие раньше в других областях.

В 1961 г. Мейман перешел на работу в компанию «Quantatron». В 1962 г. он организовал компанию «Korad» и стал ее президентом. Фирма производила мощные рубиновые лазеры с модулированной добротностью, излучающие гигантские импульсы. В 1968 г. Мейман создал компанию «Maitan Associates».

Теодор Мейман был удостоен ряда престижных наград за свое выдающееся достижение.

Он был награжден американскими научными премиями Фанни и Джона Герца (1965) и Оливера Бакли (1966). В 1984 г. его наградили израильской премией Вульфа по физике и приняли в Чертог Славы национальных изобретателей (США). В 1987 г. ему вручили Премию Японии в области электрооптики, которая считается эквивалентной Нобелевской премии. Он состоял членом американских Национальной академии наук и Национальной инженерной академии и был дважды номинирован на присуждение Нобелевской премии за создание лазера. Таунс отметил выдающиеся достижения Меймана в своей Нобелевской речи, произнесенной 11 декабря 1964 г. Он сказал: «Первый действующий лазер, в котором использовалось оптическое возбуждение ионов хрома в рубине, испускающих красный свет, был продемонстрирован Мейманом в 1960 г. Он выбрал, как тогда казалось, довольно трудный путь, решив получить инверсию населенностей между основным и возбужденным состояниями иона хрома. <...> Мейман блестящее справился с этой задачей...»

Многие университеты мира удостоили Меймана почетных степеней. Последнюю из них он получил в 2002 г. в Университете Саймона Фредера в Ванкувере (Канада), где работал и жил с женой Кэтлин в последние годы. Теодор Мейман умер 5 мая 2007 г. в Ванкувере.

Я благодарю госпожу Кэтлин Мейман, которая с энтузиазмом приняла мое предложение перевести замечательную книгу ее мужа и любезно предоставила мне авторское право издать книгу в России в год пятидесятилетия создания лазера.

Лазерная одиссея

Т.Мейман

В конце июля 1959 г. я закончил мазерный проект и сделал миниатюрный рубиновый мазер, охлаждаемый жидким азотом. С начала августа я вновь стал думать о возможности создания лазера. От первых размышлений на эту тему меня отвлекла работа по усовершенствованию мазера. Теперь я мог полностью сосредоточиться на них.

Гонка за светом

В это время в других лабораториях уже велись интенсивные исследования в данном направлении. Катализатором стала широко рекламированная статья Артура Шавлова и Чарльза Таунса в журнале «Physical Review» [1]. Благодаря ей на эти работы стали выделять деньги по правительенным контрактам и контрактам с промышленными и университетскими научными лабораториями. Многие ученые, которые не изучили внимательно статью, считали, что сделать лазер можно, просто осуществив идеи, которые обсуждались в публикации Шавлова и Таунса. Это было весьма наивное и ошибочное представление.

Группа Таунса из пяти ученых в Радиационной лаборатории Колумбийского университета получила правительственный контракт на создание лазера на парах калия в соответствии с концепцией статьи [1]. Несколько хорошо финансируемых лазерных проектов осуществлялись в Лабораториях Белл Телефон. Одно из таких исследований, инициированное Шавловым, проводилось группой из шести ученых в отделении твердого тела и курировалось Альбертом М.Клогстоном. Кроме того, в Лаборатории Белл были организованы две группы, которые пытались создать газовый лазер. Одной группой руководил Дж.Г.Сандерс из Оксфордского университета, который находился в Лаборатории Белл в творческом отпуске, а другую возглавлял бывший студент Таунса Али Джаван.

Интенсивные работы по лазерам велись и во многих других лабораториях в США. Компания TRG получила правительственный контракт на 1 млн долл. Кроме того, лазерные исследования проводились в Массачусетском технологическом институте и в компаниях IBM, GE, RCA и «Westinghouse». Охота за лазером началась также в лабораториях Европы и Азии. Важные исследо-

вания проводились, в частности, в Советском Союзе Н.Г.Басовым и А.М.Прохоровым в Физическом институте им.Лебедева.

Попытки компании TRG создать лазер следует отметить особо. Эта небольшая технологическая компания была организована группой ученых, которые заинтересовались идеями Гордона Гоулда. Во время появления публикации [1] Гоулд был аспирантом в Колумбийском университете. По случайному стечению обстоятельств он подал патентную заявку на лазерную систему, которая была очень похожа на систему Шавлова и Таунса. Основное отличие между двумя предложениями заключалось в выборе рабочей среды: Гоулд планировал использовать пары натрия вместо калия. Впоследствии Гоулд долго с боем выяснял с Шавловым и Таунсом, кто у кого заимствовал идею использования паров щелочных металлов. Но это не имело никакого значения, потому что ни та, ни другая система никогда не работала.

Во время холодной войны конкуренция между США и Советским Союзом была особенно напряженной. После успешного запуска русского спутника в 1957 г. Конгресс США создал новый департамент — Агентство по передовым исследовательским проектам (Advanced Research Project Agency, ARPA). Агентство должно было обеспечить надлежащий уровень современных исследований в надежде избежать подобного конфузса в будущем. Компания TRG подала на основе идей Гоулда заявку в ARPA на контракт суммой в 300 тыс. долл. Так как агентство располагало очень большими деньгами на финансирование научных проектов и искало возможности для «инвестирования», они выделили компании TRG один миллион долларов!

Я упомянул выше лишь наиболее значимые работы по лазерной тематике, о которых знал, с целью подчеркнуть, что во всем мире уже шло напряженное соревнование. И эти исследования хорошо finanziровались и выполнялись очень компетентными учеными.

Почему же я захотел принять участие в этой гонке?

Потому что знал, какие проекты предлагались разными людьми. Конечно, мне не были известны детали всех исследований. Но обычно ученые не делают особых секретов из своих научных занятий. Они публикуют статьи и выступают на конференциях. Я видел, что пока все предложения создать лазер были весьма туманными. Конечно, это был просто обмен информацией и стимулирующими идеями. Ясно также, что другой целью таких

статьей было «застолбить участок». Во всяком случае мне не казалось, что кто-нибудь был близок к решению проблемы. Что же было в действительности? На самом деле пока еще не было предложено никакой практически осуществимой идеи создания лазера.

Оглядываясь назад, сейчас я вижу, что был тогда весьма самонадеян. Я собирался вмешаться в определенном смысле в технологические Олимпийские игры. Это было международное соревнования наивысшего уровня. Но мой соревновательный дух победил мои сомнения. Меня целиком захватила мысль, что я смогу начать работать в высшей лиге над увлекательным проектом, который требует решения очень многих вопросов и проблем.

Нужно иметь в виду: было совсем не очевидно, что кому-нибудь удастся когда-нибудь получить *когерентный* свет. Ведь прежде это не было сделано! Братья Райт по крайней мере могли посмотреть на небо и увидеть там летающих птиц.

Сразу же возникла проблема. Администрация Лаборатории Хьюза, в которой я работал, не была склонна оплачивать мои исследования по лазерам. Лаборатория Хьюза финансировалась по контрактам Правительства США. До весны 1959 г. моя работа финансировалась в их рамках, а затем — из общего исследовательского фонда лаборатории. В принципе этот фонд тоже был правительственным, так как он выделялся лаборатории для покрытия накладных расходов по контрактам, но администрация имела право использовать его по своему усмотрению. Неудивительно, что финансирование из общего фонда хотели бы получить многие сотрудники, между ними всегда существовала конкуренция, и поэтому мой проект изучали очень тщательно. Лаборатория Хьюза в основном занималась разработкой электронных приборов для военных самолетов. С какой стати она должна была интересоваться лазером?

Я старался не обращать внимания на отсутствие моральной поддержки и отрицательное отношение администрации к моему проекту и начал обдумывать план работы. Но в каком направлении пойти?

Я не собирался идти по пути, предложеному Шавловым и Таунсом. Многие тогда уже пытались осуществить их идею, и меня не вдохновляла мысль присоединиться к этой толпе. Были и другие причины, по которым я отверг идею с щелочными парами. Шавлов и Таунс планировали использовать очень агрессивный химически элемент калий, агрессивность которого еще больше возрастает при нагревании до температуры духовки, что требуется в этом проекте. Перспектива иметь дело с потенциальными проблемами коррозии и примесей меня совсем не привлекала. А главное, мой анализ показал, что аргументация авторов [1] была существенно ошибочна и что предлагаемая ими система имела мало шансов на

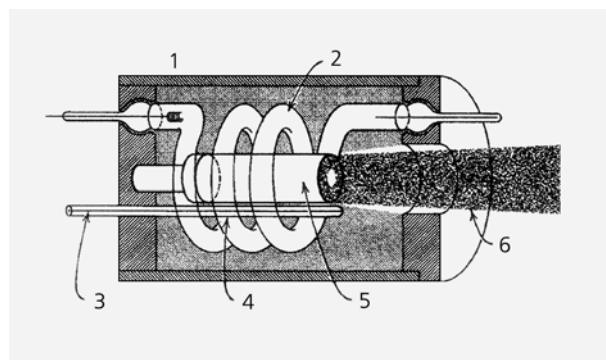


Схема рубинового лазера. 1 — полированый алюминий; 2 — лампа-вспышка; 3 — поджигающий электрод; 4 — кварцевая трубка; 5 — рубин; 6 — луч света.

успех или даже вообще их не имела. Казалось удивительным, что вариант с парами щелочных металлов исследовался многими учеными.

Джаван и Сандерс, о которых я уже упоминал, выдвинули другой подход. Они (и независимо Гоулд) предложили передавать энергию возбуждения атомам в газообразном состоянии за счет столкновений с другими атомами и электронами в электрическом разряде. Эти ученые надеялись таким способом достигнуть не только инверсии населенности, но и получить усиление, достаточное для работы лазера.

Естественно, я серьезно рассмотрел возможности использования газовых сред. Благодаря своей диссертации я хорошо знал вакуумные системы, умел работать с газами и уже имел дело с методом возбуждения атомов в столкновениях с электронами. Но приобретенный мной опыт говорил, что процессы, происходящие в электрическом разряде, очень сложны. Вероятность возбуждения атома на конкретный энергетический уровень в разряде очень трудно рассчитать и определить. Число уровней, на которые атомы и ионы могут возбуждаться, очень велико. Возбужденные состояния атомов и ионов изменяются в процессе разнообразных каскадных переходов на другие уровни, и коэффициенты ветвления для этих переходов трудно найти. Число возможных переходов огромно, и, даже используя современные компьютеры, невозможно выполнить детальный количественный анализ.

Физический процесс, предложенный Джаваном и Сандерсом, был интересен в принципе, но они не привели никаких конкретных данных. Так как многие параметры, необходимые для конструирования, нельзя было рассчитать, им нужно было выполнить много тщательных экспериментов для того, чтобы подобрать ток разряда, давление газа, размер газовой камеры и т.д. и создать устройство, которое могло бы оказаться действующим, — что они и делали. Они даже не могли предсказать уверенно, на какой длине волны мож-



Самый первый лазер.

но ожидать появления лазерного излучения в случае успеха.

Поэтому от идеи создать газовый лазер я также отказался.

Мне нравилось искать ответы на трудные вопросы, но почему же я тогда так старательно избегал иметь дело со сложными системами? Мне трудно передать ощущения, которые испытываешь, решая новую проблему, когда, несмотря на оптимистическую перспективу, существует мучительное сомнение, а возможно ли решение вообще?

Мы знаем *теперь*, что можно сделать лазеры самых разнообразных типов. Но тогда — в 1959 г., мы этого *не знали*. Мы даже не знали, а можно ли вообще сделать лазер. Если бы это было так просто, как кажется теперь, то первоклассные и хорошо финансируемые группы Шавлова, Таунса, Сандерса, Джавана, Гоулда и другие, которые усиленно занимались этой проблемой в течение двух предыдущих лет, создали бы лазер.

Моя стратегия заключалась в том, чтобы изучить только те потенциальные системы для создания лазера, которые не требовали бы затраты слишком больших усилий на конструирование устройства. Я решил исследовать *твердые кристаллы*.

Основное привлекательное свойство кристаллов для меня — простота. В отличие от газового разряда, схема энергетических уровней кристалла очень простая. Число его возможных энергетических состояний относительно невелико, и в целом все параметры кристалла, необходимые для оценки перспективы его использования в качестве среды для лазера, можно рассчитать или измерить. Если построить адекватную модель, то можно *количественно* проанализировать такую систему.

Другое принципиальное преимущество кристаллов — относительно высокий *коэффициент усиления*. Поэтому кристаллическая лазерная среда может иметь небольшой размер, что устраняет проблему разработки специальных зеркал. И действительно, в своем первом лазере я использовал кристалл длиной всего лишь 2 см. Наоборот, коэффициент усиления первого газового лазера

был настолько низким, что этот лазер не мог работать при длине 60 см даже при использовании зеркал с очень высоким коэффициентом отражения. Он заработал лишь после того, как его длина была увеличена до 100 см.

Идея использовать твердую среду привлекла меня также потому, что в этом случае не надо иметь дела с вакуумными насосами, проблемой примесей, аппаратурой для работы с газами и сложными механизмами для юстировки зеркал. Я мог нанести простое серебряное покрытие прямо на кристалл, точно так же, как я делал это в моем небольшом рубиновом мазере. Суть была в том, что конструкция лазера на кристалле в принципе могла быть очень простой, компактной и надежной.

Забавно — в некоторых изложениях истории создания лазера утверждается, что я стремился создать обязательно *практический* лазер, в отличие от других исследователей, которые хотели просто продемонстрировать эффект получения когерентного света. Но это не так. Я не стремился создать практическое устройство; прежде всего, устройство должно было быть простым. Хотя это — трюизм: простые устройства всегда оказываются более практическими.

С самого начала я выбрал для исследований *рубиновый кристалл*.

Кристалл рубина получается в результате добавления небольшого количества примеси окиси хрома в прозрачный, как вода, кристалл окиси алюминия. Содержание примеси хрома в драгоценном рубине составляет около 0,5%. Но даже в таком малом количестве окись хрома придает насыщенный красный цвет камню. Кристаллы рубина — одни из самых твердых драгоценных камней, тверже их только алмаз.

В различных устройствах обычно используются не драгоценные руины, а искусственные. В контролируемых лабораторных условиях можно вырастить гораздо более оптически совершенные кристаллы, которые почти не содержат никаких нежелательных примесей, в отличие от природных камней. Концентрация хрома в искусственно выращиваемых кристаллах подбирается примерно в 10 раз меньше, чем в драгоценном рубине, поэтому его красный цвет более светлый и он называется *розовым рубином*.

Почему я выбрал рубин в качестве потенциального кандидата для создания лазера? У меня в лаборатории уже было несколько рубиновых кристаллов, которые остались после работы с рубиновым мазером. Но гораздо важнее, что я достаточно хорошо знал интересные оптические свойства кристалла рубина.

Однажды я проводил предварительные эксперименты с некоторыми флуоресцентными кристаллами (не только с рубином). Я возбуждал флуоресценцию коротковолновым ультрафиолетовым источником и просто наблюдал ее визуально.

В лабораторию зашел мой непосредственный начальник Джордж Бирнбаум. Я показал ему светящийся рубин и сказал в шутку: «Эй, Джордж, смотри — это лазер». И он ответил: «Да, да, конечно!» В этот момент у меня возник лишь первый проблеск надежды, что со временем я смогу получить лазерное излучение в рубине.

Рубин флуоресцирует не только при облучении ультрафиолетовым светом, но также излучает красный свет при облучении синим или зеленым светом. Именно благодаря наличию широких синей и зеленой полос поглощения рубин имеет красный цвет. Когда зеленый фотон падает на кристалл и поглощается в нем, примесный ион хрома переходит из своего основного состояния в возбужденное. Хотя ион хрома, находясь на возбужденном уровне, может испустить спонтанное излучение, в действие вступает другой процесс. В этом конкурирующем процессе участвуют тепловые колебания кристаллической решетки, которые взаимодействуют с возбужденным ионом, в результате чего большая часть его энергии возбуждения переносится на другой, расположенный немного ниже, возбужденный уровень иона хрома в рубине. На этом *метастабильном* уровне ион хрома находится некоторое время. Этот процесс гораздо более вероятен, чем первый процесс, и доминирует. Энергия испущенных красных фотонов меньше, чем энергия зеленых, которые запустили процесс. Потерянная энергия передается кристаллу рубина в виде тепла. При высоких уровнях возбуждения рубин нагревается.

Когда я начал детально изучать оптические свойства рубина, я не считал, что рубин — предпочтительный кристалл для создания лазера. Я довольно долго думал, что для этой цели можно найти хороших кандидатов среди флуоресцирующих твердых материалов. И сначала я продолжал изучать рубин просто потому, что этот кристалл был одним из возможных кандидатов.

Я построил модель, которую можно было проанализировать математически, и вывел так называемые *кинетические уравнения*, которые описывают различные механизмы, участвующие в процессе флуоресценции. Я также установил простые интуитивные критерии получения условий для работы лазера. Эта модель и эти уравнения стали *стандартным подходом*, которым впоследствии пользовались другие исследователи при создании кристаллических лазеров.

Решив уравнения, описывающие модель, я смог определить, какие свойства материала имеют важное значение для создания лазера. Некоторые из этих характеристик были приведены в литературе, некоторые нужно было измерить или рассчитать из других измерений. Используя известные и оцененные значения соответствующих параметров рубина, я выполнил некоторые предварительные расчеты и выяснил, что для получения лазерного излучения в рубине кристалл необходимо возбуж-

дать очень яркой лампой накачки. Тогда я решил поискать другие перспективные кристаллы, которые для получения лазерного излучения можно было бы возбуждать менее яркой лампой. В литературе имелись данные о спектрах флуоресценции кристаллов с примесями редкоземельных химических элементов. Ион одного из них, гадолиния, излучает очень узкие линии флуоресценции в ультрафиолетовой части спектра. Перспектива использовать его в подходящей кристаллической решетке в качестве возможного материала для лазера очень заинтересовала меня.

Здесь я пожадничал. Если бы мне удалось получить когерентный свет, это было бы важным достижением. Но если бы это удалось сделать с гадолинием, я бы получил когерентное излучение в ультрафиолетовой области. И тогда прыжок по частоте по отношению к мазеру составлял бы уже более 25 тыс. вместо только 10 тыс.! Однако мои дальнейшие расчеты показали, что кристаллы с примесью гадолиния еще труднее возбудить для получения лазерного излучения, чем рубин. И я вновь вернулся к рубину, чтобы более тщательно обдумать эту проблему.

Препятствия и решения

Случилось так, что я перестал исследовать рубин... на некоторое время. Но причиной тому были не мнение Шавлова и не давление Бирнбаума. Это произошло из-за статьи Ирвина Видера. Он был аспирантом, которого я научил работать на моей установке, чтобы Уиллис Лэмб отпустил меня после защиты диссертации. Ирв тоже защитил диссертацию в Стэнфорде и перешел в Исследовательскую лабораторию «Westinghouse» в Питтсбурге. Пытаясь усовершенствовать рубиновый мазер, он измерил квантовый выход флуоресценции рубина (число фотонов флуоресценции, деленное на число фотонов накачки). На основании своих измерений Видер сообщил в статье, вышедшей в ноябре 1959 г. [2], что квантовый выход флуоресценции рубина составляет *всего лишь 1%*.

Этот результат вызвал у меня большое беспокойство. Мои модельные расчеты показали, что для возбуждения рубина требуется яркий источник накачки и, следовательно, получить лазерное излучение в нем будет довольно трудно. Тем не менее я пришел к выводу, что это можно сделать, несмотря на то, что Шавлов настойчиво утверждал обратное. Однако в своих расчетах я предполагал, что квантовый выход флуоресценции рубина близок к 100%. Если же подставить в расчеты результат Видера, действительно окажется, что рубин не годится для создания лазера.

Я не сомневался в достоверности результата измерений Ирва. Он был моим протеже в Стэнфорде, и поэтому я верил его результатам. Я очень огорчился и начал думать о других возможностях.



Фотография не самого первого лазера, приведенная в пресс-релизе в июле 1960 г. и перепечатанная затем во многих газетах и журналах.

Но, оглядевшись вокруг, не нашел никаких систем, которые могли бы представить интерес для моей цели. Тогда я решил вернуться к рубину и изучить его более внимательно. Я понимал, что квантовый выход флуоресценции кристалла рубина изменить невозможно, так как это его фундаментальное свойство. Но, с другой стороны, мне хотелось узнать, в чем проблема и чем вызван такой низкий квантовый выход.

Примерно в это время я решил заказать прибор, необходимый мне для измерений, — монохроматор, содержащий дифракционную решетку, которая выделяет излучение определенного цвета подобно оптическому фильтру, но более точно, чем призма. Монохроматор, который был мне нужен, производила фирма «Bausch and Lomb». Это был точно такой же монохроматор, с которым я работал в аспирантуре. Он стоил 1500 долл.

Заказ на приобретение такого капитального оборудования должен был подписать руководитель отдела атомной физики Гарольд Лайонс. Он был против этой покупки. Интересно, что в Стэнфорде такой проблемы не было. Лайонс, как и Бирнбаум, считал, что я занимаюсь бесплодным делом. Разве Шавлов не сказал, что рубин не может работать? Населенность основного состояния нельзя уменьшить. Гарольд сказал мне: «Почему бы вам не заняться чем-нибудь полезным, например, компьютерами?» Мне опять пришлось защи-

щать свой проект. К счастью, мне удалось убедить и Гарольда. Я получил монохроматор, и мне разрешили продолжить эксперименты.

Почему я так привязался к рубину?

Кристалл рубина имеет много нужных качеств. С ним удобно работать, потому что он очень устойчивый и твердый. У него имеются широкие полосы поглощения, которые можно использовать для переноса энергии от некогерентной лампы накачки, и, в отличие от других кристаллов, которые я исследовал, рубиновый лазер должен излучать видимый свет. Другие кристаллы (в том числе темный рубин) излучают в инфракрасной области, что менее желательно, и, кроме того, они требуют криогенного охлаждения. А с криогеникой я твердо решил дела больше не иметь. Если же лазер на розовом рубине заработает, он будет работать при комнатной температуре.

Я не мог *переделать* кристалл рубина как таковой. Но я рассуждал, что если я смогу понять, почему в рубине теряется 99% энергии его возбуждения, это поможет мне найти другие материалы, которые бы сохраняли полезные качества рубина, но в то же время не обладали бы фатальным свойством, которое, как казалось, было ему присуще.

Я рассмотрел очень критически и детально процесс флуоресценции розового рубина и про-думал эксперименты для измерения различных характеристик, которые могут влиять на его квантовый выход. Я делал один эксперимент за другим, но никак не мог обнаружить возможные механизмы утечки энергии возбуждения. В недоумении я решил сам измерить квантовый выход флуоресценции рубина. И мои измерения показали, что квантовый выход флуоресценции рубина был около 75%, а не 1%, как сообщил Видер... Это была фантастика!

Новые данные решающим образом изменили ход моих дальнейших исследований. Я испытал сильный подъем и приобрел уверенность и оптимизм. Рубин опять вернулся в игру!.. Или нет?

Теперь у меня было достаточно информации, чтобы начать разрабатывать конкретную конструкцию лазера. Но как накачивать рубин? Какие размеры и форму должен иметь кристалл рубина?

Я знал, что нужна очень яркая лампа. Самой яркой, имевшейся в моем распоряжении, была дуговая ртутная лампа высокого давления AH6 производства компании GE. Она была не только одним из наиболее ярких лабораторных источников, но и излучала энергию в основном в зеленой и сине-фиолетовой областях спектра. Такое излучение хорошо подходит для возбуждения рубина.

Я сделал чертеж устройства с лампой AH6, расположенной в одном фокусе эллиптического цилиндра; маленький рубиновый стержень должен был помещаться в другом его фокусе. Эллиптический рефлектор обладает тем свойством, что точечный источник света, помещенный в одном из фокусов эллипса, отображается в другом. Я соби-

рался использовать эллиптический цилиндр с тщательно отполированной зеркальной внутренней поверхностью.

Но здесь возникла проблема. Мои предварительные расчеты этой конструкции показали, что она, хотя и должна работать, но — на самом пределе. Я проанализировал конструкцию более детально, пытаясь оптимизировать и улучшить ее, но вновь убедился в том, что она сможет работать только на пределе.

Меня мучили сомнения. Можно ли вообще получить когерентный свет? Действительно ли все остальные исследователи ошибаются, когда утверждают, что рубин — неподходящий материал для лазера? А вдруг окажется, что мой потенциальный лазер не заработает, но я был очень близок к цели? Как я узнаю, в чем причина? Может быть дело в том, что его конструкция имеет недостатки, а может быть, причина более фундаментального свойства. Бирнбаум был убежден, что я занимаюсь бессмысленным делом, и это тоже не помогало мне.

Конструкция лазера, которая могла оказаться успешной только на пределе своих возможностей, совсем не вдохновляла меня. Я обдумывал проблему вновь и вновь, пытаясь рассмотреть ее с новых сторон. Испытывал разочарование и неверие в свои силы. Чувствовал, что нахожусь где-то на пороге решения, но в то же время оно ускользало от меня.

Я вернулся к своей аналитической модели, обдумал различные варианты и решил сформулировать требования к лампе накачки для рубина в другом виде. Я рассчитал эквивалентную температуру *черного тела*, которую должна иметь лампа накачки. Например, обычная вольфрамовая лампа накаливания является почти идеальным черным телом с яркостной температурой 2800 К.

Согласно моим расчетам, яркостная температура, необходимая для получения лазерного излучения в рубине, была примерно 5000 К. Эта температура близка к температуре поверхности Солнца! В принципе я мог бы сделать солнечный коллектор (зеркальный или линзовый) для фокусировки солнечного света прямо на рубин, но опять такая конструкция могла бы работать только на пределе.

Однако теперь, когда я выразил требования к лампе накачки с помощью понятия яркостной температуры, я стал рассуждать по-другому. Я вспомнил, что как-то читал статью о стробоскопических лампах-вспышках, используемых в фотографии. В статье говорилось, что яркостная температура стробоскопических ламп может превышать 8000 К!

Ага, это было именно то, что нужно!

Большинство ученых думали о создании непрерывного лазера. И я тоже начал свои исследования с этого. Но зачем ставить себе такое ограничение?

В настоящий момент я только пытался показать, что когерентный свет можно получить в принципе. Кроме того, импульсные источники света тоже можно использовать для разных приложений, иногда они оказываются даже предпочтительными, как, например, в радарах, при сварке и сверлении отверстий и т.д. Я вернулся к своей аналитической модели, модифицировал уравнения с учетом импульсного источника света и проанализировал результаты, чтобы понять, какую конкретную конструкцию должен иметь лазер. Мне уже было ясно, что наиболее важный параметр источника света — его *яркость*. Расчеты также показали, что требование, предъявляемое к яркости лампы, фактически не зависит от размеров кристалла рубина и содержания хрома в нем в довольно широких пределах. Модель рассматривала трехуровневую систему (соответствующую рубину), у которой нижний лазерный уровень отвечает основному состоянию.

Затем я тщательно просмотрел все каталоги ламп-вспышек, которые мог найти, и выбрал подходящие лампы. Наибольшую интенсивность имели три спиральные лампы-вспышки FT-506, FT-503/524 и FT-623 производства компании GE. Мои расчеты показали, что, используя даже самую маленькую лампу FT-506, я получу надежный, примерно двух-трехкратный, запас по яркости для возбуждения лазера. Так как для ее питания нужен гораздо менее мощный источник, а размеры кристалла были не критичны, я решил первую конструкцию лазера сделать, используя эту лампу. Но для страховки я также заказал по нескольку запасных ламп всех размеров.

К сожалению, в декабре 1959 г. было объявлено, что Лаборатория Хьюза переедет из помещения в Калвер Сити Консет в новое здание, арендованное в Малибу. Этот переезд отнял у меня по крайней мере три недели.

Да будет «когерентный» свет

Расчеты и измерения, которые я выполнил в последнее время, вселили в меня оптимизм и надежду, что лазер сделать можно. Напряжение возрастало, и в своих мечтах я стал представлять, что мне это действительно удалось. Вкус победы был бы особенно сладок, так как я пошел путем, который отвергли наиболее авторитетные «большие люди».

Однако по-прежнему меня беспокоила мысль, что, возможно, я упустил что-то. Может быть, существует какое-то непреодолимое фундаментальное препятствие, о котором я не подозреваю? В довершение ко всему мой приятель — физик Питер Франкен, который был профессором в Мичиганском университете и пользовался большим авторитетом в области оптики, планировал прочитать курс лекций в университете летом 1960 г.



Лазерная установка «Нова» в Ливерморской лаборатории им.Лоуренса и Т.Мейман со своим первым лазером (пресс-релиз фирмы TRW, 1980 г.).

и одну из них назвал «Почему невозможно сделать лазер».

Я вновь и вновь анализировал свою модель, пытаясь найти какие-нибудь процессы, которые могли ускользнуть от моего внимания и могли бы сделать модель неверной. И действительно, нашел пару возможных потенциальных проблем, связанных с предполагаемыми нежелательными переходами между энергетическими уровнями. Профессор Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе Роберт Саттен — теоретик, специализирующийся в области теории кристаллического поля, работал консультантом в Лаборатории Хьюза. Я попросил Боба проверить мои предположения. Он выполнил тщательные расчеты, и в результате мы пришли к выводу, что я иду правильным путем.

Прежде чем прямо приступить к конструктированию устройства, я решил провести специальные эксперименты для проверки адекватности моей модели. Я изготовил кубик из розового рубина со сторонами длиной в 1 см. Ось кристалла была перпендикулярна двум противоположным граням куба. Поместив этот кубик между двумя параллельными пластинками, я сделал таким образом микроволновый резонатор. Резонансная частота резонатора была подобрана равной величи-

не естественного расщепления уровня рубина в основном состоянии. Эти подуровни в основном состоянии используются в рубиновом мазере. Данная установка была предназначена для измерения изменений населенности основного состояния рубина. Напомню, что Шавлов утверждал, что населенность основного состояния ионов хрома в рубине невозможно существенно уменьшить и поэтому рубин не годится для создания лазера. Мои же расчеты показали, что это сделать можно, и я решил подтвердить свои оптимистические выводы экспериментально.

Я соединил одну из двух других параллельных граней с концом полированного кварцевого стержня — световода. Другой его конец был соединен с лампой-вспышкой FT-506. Третий набор параллельных граней куба использовался для зондирования на различных длинах волн света. Я следил за населенностью основного состояния рубина по «нагрузке» на микроволновом резонаторе, используя микроволновые свойства рубина, которые я изучил, работая с рубиновым мазером.

Когда рубин освещался вспышкой от лампы FT-506, нагрузка на резонаторе действительно изменялась. Она уменьшалась, потому что, как и ожидалось, количество ионов хрома в основном

состоянии становилось меньше. Но еще более важно было то, что *величина уменьшения населения в основном состоянии, равная 3%,* была очень близка к значению, которое я предсказал на основании анализа экспериментальных параметров. Этот результат доставил мне огромную радость, так как он дополнительно подтвердил применимость моей модели и анализа. Результаты были опубликованы в статье [3].

Теперь я почувствовал сильное волнение. Больше уже не было необходимости проверять что-нибудь еще и наступило время приступить к конструированию лазера. Сначала я хотел использовать какой-нибудь вариант конфигурации с эллиптическим цилиндром, но нужна была прямая лампа в виде стержня, а интенсивность свечения прямых ламп была недостаточна. Я решил использовать спиральные лампы, которые у меня были, потому что не хотел тратить время на разработку специальной лампы. Агент по продаже ламп сказал мне, что лампа FT-623 настолько яркая, что если поднести к ней металлическую мочалку, то она загорится. И тут мне пришло в голову, что никакая фокусирующая система вообще не требуется. Яркость излучения, которая достигается в фокусе зеркала или линзы, может лишь приблизиться к яркости источника, но не превысить ее. Это следствие известного второго закона термодинамики. А почему бы не поместить кристалл очень близко к лампе? Почему бы не поместить его просто *внутри* спиральной лампы? Для того чтобы *собрать* больше света, я поместил спиральную лампу внутри отполированного алюминиевого цилиндра. Я использовал небольшой кристалл розового рубина в форме цилиндрического стержня диаметром 3/8 дюйма и длиной 3/4 дюйма (примерно 1×2 см), который можно было вставить внутрь спирали лампы. Плоские торцы рубинового цилиндра были отполированы, параллельны друг другу и перпендикулярны оси цилиндра. Зеркала на торцах приготавливались напылением слоев серебра.

В идеальном случае на одном торце рубинового стержня должно находиться толстое, непрозрачное серебряное покрытие с высоким отражением, а на другом — очень тонкое, частично пропускающее свет, через которое должен выходить лазерный луч. Я выбрал серебро для приготовления зеркал, потому что оно имеет наибольший коэффициент отражения среди всех металлов на длине волны красного излучения рубинового лазера. Однако серебро быстро становится тусклым, поэтому пропускание тонкого слоя серебра выходного зеркала менялось со временем, т.е. слой был нестабильным.

Я решил эту проблему, напылив *толстые* слои серебра на оба торца кристалла. В покрытии на одном из торцов я процарапал крошечное отверстие, через которое должен был выходить лазерный луч. Лазерная головка имела размер и форму обычного небольшого стакана. Как видно из рисунка, конструкция лазера была *очень простая*.

Когда я заканчивал конструирование лазера, Боб Хеллварт, один из моих коллег в отделе атомной физики, спросил меня: «А как ты узнаешь, что он заработал?»

Сначала я опасался, что если оптическое качество кристалла рубина будет сильно отличаться от идеального, то его дефекты могут помешать получить лазерное излучение. Тщательный анализ с учетом влияния дефектов показал, что, если мне удастся значительно превысить порог возбуждения лазерного излучения в рубине, я смогу обнаружить когерентное излучение даже в кристалле плохого качества.

Что же конкретно я надеялся увидеть? Я планировал регистрировать красный свет, излучаемый рубином через маленькое отверстие в выходном серебряном зеркале, и ожидал увидеть три эффекта: уменьшение времени затухания флуоресцентного уровня, сжатие излучения в пучок и значительное уменьшение спектральной ширины красного света. Это следует из анализа лазерного процесса.

Лазерный процесс начинается, когда кристалл рубина возбуждается лампой-вспышкой и ионы хрома переходят на метастабильный флуоресцентный уровень. Ионы теряют свою энергию, излучая случайным образом фотоны в красной области спектра. Это — хорошо известная красная флуоресценция (спонтанное излучение). Если уровень возбуждения достаточно высок, достигается требуемое условие инверсной населенности. В этом случае число ионов хрома, находящихся на верхнем метастабильном флуоресцентном уровне, больше, чем их число в основном состоянии. Поэтому ионы хрома могут испускать *стимулированное* излучение наряду с обычным спонтанным. Так как теперь метастабильный уровень опустошается гораздо быстрее, чем обычно, время жизни флуоресценции уменьшается. Это сокращение времени жизни можно наблюдать, возбуждая красное свечение рубина лампой-вспышкой и регистрируя его затухание с помощью фотоэлемента, соединенного с осциллографом.

Когда рубин находится в состоянии с инверсной населенностью, он становится усилителем. Красные фотоны усиливаются во время распространения в кристалле. Начинается важный процесс селекции. Сначала красные фотоны испускаются в произвольных направлениях. Однако фотоны флуоресценции, испускаемые под большими углами к механической оси рубинового цилиндра, выходят через боковые стороны кристалла и таким образом теряются. С другой стороны, фотоны, испускаемые вдоль оси кристалла или под небольшими углами к его оси, оказываются фактически в ловушке. Они отражаются от противоположных зеркал на торцах кристалла и распространяются взад-вперед в кристалле. Аксидальные фотоны усиливаются во время их распрост-

ранения в кристалле и генерируют новые фотоны в том же направлении — вдоль или почти вдоль оси кристалла. В результате *стимулированное излучение* с возбуждённого метастабильного уровня быстро становится доминирующим и из маленького выходного отверстия оно должно выйти в виде узкого пучка.

Красное (спонтанное) излучение флуоресценции рубина испускается в диапазоне частот, распределение которых описывается колоколообразной кривой. В состоянии инверсной населенности наибольшее усиление достигается в максимуме этой кривой. В результате фотоны с частотами вблизи центра распределения оказываются в более благоприятных условиях, так как усиливаются сильнее во время распространения туда и обратно в результате многократных отражений от зеркал. Именно поэтому частотное распределение лазерного излучения оказывается узким, т.е. *ширина лазерной линии мала*.

Итак, я собирался наблюдать в экспериментах сокращение времени жизни флуоресценции рубина при высоком уровне возбуждения лампой-вспышкой. С повышением мощности возбуждения рубина интенсивность его флуоресценции должна возрастать пропорционально до момента достижения порога. Но выше порога небольшое увеличение мощности возбуждения должно вызывать гораздо более сильное изменение интенсивности выходного излучения, так как монохроматор в сочетании с детектором более чувствителен к воздействию узкого луча света с небольшой спектральной шириной. Я также планировал независимые измерения сужения спектральной ширины линии излучения рубина с помощью спектрографа.

В апреле 1960 г., когда я уже заканчивал подготовку к экспериментам с рубином, Лабораторию Хьюза посетил Клогстон — шеф Шавлова в Лаборатории Белл Телефон. Клогстон заметил в разговоре (видимо, из нашей лаборатории происходила утечка информации): «Мы слышали, что вы по-прежнему занимаетесь исследованием рубина. Мы тщательно изучили возможность использования рубина для создания лазера. Он не годится для этой цели. Продолжая эти исследования, вы только зря тратите время, усилия и деньги на бесполез-

ный проект». Я подумал, может быть сотрудники Лаборатории Белл знали что-то, что я упустил?

И вот наступил день 16 мая 1960 г. — время подтвердить или опровергнуть все опасения, что «рубин не может работать» или что «вообще лазер нельзя сделать». Настал момент истины!

Лазерная головка была установлена на оптическую скамью. Лампа-вспышка была подключена к источнику питания. Поджигающий электрод был соединен с искровой катушкой, инициирующей вспышку стробоскопической лампы. Свет, выходящий из отверстия в зеркале на торце рубинового стержня, направлялся через монохроматор на фотоумножитель. Электрический сигнал с фотоумножителя подавался на вход специального запоминающего осциллографа производства Лаборатории Хьюза.

Мы проводили эксперимент вдвоем с Ирни Д'Хененсом. Больше в лаборатории никого не было. Сначала мы произвели пробное возбуждение флуоресценции рубина лампой-вспышкой для отладки системы детектирования. Мы установили напряжение источника питания лампы, равное примерно 500 В, возбудили флуоресценцию вспышкой лампы и стали наблюдать развертку импульса на экране осциллографа. Этот импульс описывал изменение во времени интенсивности красной флуоресценции рубина. Импульс затухал в течение примерно 3 мс (время жизни возможного лазерного уровня). Мы произвели необходимую настройку параметров, чтобы оптимизировать вид кривой на экране осциллографа.

Затем мы начали постепенно поднимать напряжение источника питания и каждый раз регистрировали импульсы флуоресценции рубина. При этом пиковая интенсивность импульса возрастала пропорционально энергии возбуждения, а время его затухания не менялось... Пока все шло, как обычно. Но когда мы подняли напряжение источника питания лампы выше 950 В, все изменилось! Пиковая интенсивность импульса стала резко возрастать, а время его затухания быстро уменьшилось.

Отлично! Это было именно то, что нужно!
Лазер родился!

© Перевод с английского М.Н.Сапожников

Литература

1. Schawlow A.L., Townes C.H. // Physical Review. 1958. V.112. №6. P.1940—1949.
2. Wider I. // The Review of Scientific Instruments. 1959. V.3. №11. P.995—996.
3. Maiman T.H. // Physical Review Letters. 1960. V.4. P.564—566.

Теодор Мейман не был удостоен Нобелевской премии, хотя, вне всякого сомнения, заслужил ее. Мы знаем, что мир изменился после того, как Мейман создал первый в мире лазер. И независимо от всех премий, которые он получил или не получил, он внес неоценимый вклад в мировую науку и развитие нашей цивилизации в целом.