

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

СОВРЕМЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ*)

А. Шавлов

Невозможно заранее предсказать, когда усовершенствование технологии захватит воображение ученых и инженеров. Пятнадцать лет назад широкому распространению физики твердого тела способствовало открытие транзистора. Новейшим устройством, очаровавшим инженеров, стал оптический квантовый генератор, или, как его теперь часто называют, лазер. Этот термин является сокращением, образованным из первых букв выражения: light amplification by stimulated emission of radiation (усиление света с помощью стимулированного (вынужденного) излучения). (В слове «мазер» букве «м» соответствует «микроволновый», т. е. СВЧ.) Оптический квантовый генератор формирует мощный монохроматический пучок света, волны которого когерентны, иначе говоря, находятся в фазе. Световые волны, излучаемые обычными источниками, такими, как лампы накаливания или дневного света, некогерентны и немонохроматичны.

По скромным подсчетам только в США около 500 исследовательских групп заняты созданием и эксплуатацией оптических квантовых генераторов. Большая часть усилий этих групп направлена на применение пучков света, излучаемых оптическими квантовыми генераторами, в системах связи. Объем информации, которую можно передать по каналу связи, пропорционален его рабочей частоте; поэтому область оптических частот, с длинами волн между 4000 и 7000 Å, могла бы в принципе обслуживать 80 миллионов телевизионных каналов. Осуществление этой возможности — все еще дело далекого будущего. Помимо систем связи — в химии, медицине и некоторых других областях — интенсивно разрабатываются многие направления использования строго монохроматических пучков света, излучаемых оптическими квантовыми генераторами.

Первый теоретический анализ, с помощью которого была установлена возможность построения лазера, произведен в 1958 г. Ч. Таунсом и автором. За несколько лет до этого Таунс нашел принцип усиления радиоволн СВЧ-диапазона с помощью стимулированного излучения. Наш анализ показал также, что можно построить на той же самой основе квантовый генератор, работающий в области оптических частот. Конструкция его, однако, была бы другой, а многие свойства и применения — иными по сравнению с его молекулярным предшественником. Первое сообщение

*) Arthur L. Schawlow, Advances in Optical Masers, Sci. American 209(1), 34 (1963). В оригинале — подзаголовок: «Ровно три года назад, в июле 1960 г., появилось первое сообщение об оптическом квантовом генераторе, или лазере. Около 500 исследовательских групп в США заняты в настоящее время разработкой оптических квантовых генераторов. Перспективы заманчивы, технические проблемы весьма сложны». Перевод В. В. Власова. Печатается с незначительными сокращениями.

о действующей модели оптического квантового генератора было сделано три года назад, в июле 1960 г., Т. Мейманом (см. статью А. Шавлова «Оптические мазеры», УФН 75(3), 569 (1961) *).

Мейман обнаружил, что подходящую генерирующую среду для оптического квантового генератора можно изготовить из монокристалла бледно-розового рубина — окиси алюминия, окрашенной в розовый цвет примесью $\sim 0,05\%$ хрома. Рассказывая о работе первого рубинового квантового генератора, мы опишем атомные процессы, на основе которых происходит генерация лазера. С этой целью я расскажу об оптических квантовых генераторах, построенных Р. Коллинсом, Д. Нильсоном, автором и др. летом 1961 г. Из рубинового кристалла вытачивался стержень длиной около 4 см и диаметром 0,5 см. Торцы его были отполированы с оптической точностью параллельно друг другу и частично посеребрены. Вокруг рубинового стержня помещалась спиралевидная импульсная газоразрядная лампа большой мощности, использованная в качестве сильного источника возбуждающего света («подкачка»). Атомы хрома обычно поглощают ультрафиолетовое излучение и широкую полосу зеленого и желтого света. Поглотив свет, атомы переходят в «возбужденное» (более высокое) квантовое состояние, откуда они возвращаются в «основное» (самое нижнее) энергетическое состояние двумя ступенями. На первой ступени при переходе на метастабильный уровень атомы передают часть своей энергии кристаллической решетке — свет не излучается. Вторая ступень сопровождается испусканием энергии в виде фотонов, или квантов света, с длиной волны (при комнатной температуре) 6943 Å — темнокрасный свет. Переход атомов в метастабильное состояние почти мгновенен, последующий переход в основное состояние совершается случайно за время, равное нескольким миллисекундам. Это запаздывание является полезным фактором, определяющим генерацию лазера. Находящийся в метастабильном состоянии атом можно заставить испустить фотон и мгновенно возвратиться в основное состояние, если он поглотит фотон точно такой же энергии, какая будет излучена им при обычном переходе с метастабильного уровня на основной. И наоборот, атом в основном состоянии можно «поднять» на метастабильный уровень, облучая его фотоном такого же рода. Чтобы достичь генерации лазера, необходим избыток атомов на верхнем уровне рабочего перехода по сравнению с нижним уровнем, иначе поглощение фотонов будет преобладать над испусканием. Если достигнуто требуемое обращение населенностей уровней, первое небольшое количество фотонов, испущенное атомами при случайном переходе в основное состояние, вызовет каскад (лаvinу) фотонов одинаковой длины волны и в фазе между собой **). Обращение населенностей уровней энергии достигается с помощью достаточно интенсивного возбуждающего света. Так как торцы рубинового стержня частично посеребрены, фотоны, отражаясь от них, пролетают вперед и назад параллельно продольной оси лазера и вызывают каскад фотонов в одном направлении. В момент наивысшего развития каскада сильный пучок красного света вырывается из торцов рубинового стержня.

Со времени первой публикации Меймана (июль 1960 г.) было открыто много новых генерирующих материалов, используемых в лазерах. Они

) О работах советских ученых В. А. Фабриканта, М. М. Вудинского, Р. А. Бутаевой, Н. Г. Басова, А. М. Прохорова — об открытии и практическом осуществлении принципов генерации и усиления электромагнитных волн СВЧ- и оптического диапазонов с помощью стимулированного излучения — см., например, в работе ^{7} и подстрочных примечаниях к переводу ^{12*}. Там же указаны и первые публикации. (Прим. перев.)

**) Это так называемая трехуровневая схема генерации. (Прим. перев.)

включают в себя кристаллы (помимо рубина), стекла, пластмассы, жидкости и даже плазму (состояние вещества, когда определенное количество электронов удалено из атомов). Почти каждую неделю открываются новые материалы. Единственным общим условием, которому должна удовлетворять генерирующая среда лазера, является требование, чтобы она имела более высокий энергетический уровень (рабочего перехода), куда можно перевести атомы с помощью энергии возбуждающего света, и нижний уровень, на который они возвратятся при спонтанном испускании фотонов. Подобная атомная система должна допускать также обращение населенностей этих двух уровней. Поскольку длина волны света, излучаемого оптическим квантовым генератором, зависит от характерных резонансных свойств материала, используемого в лазере, применяя этот

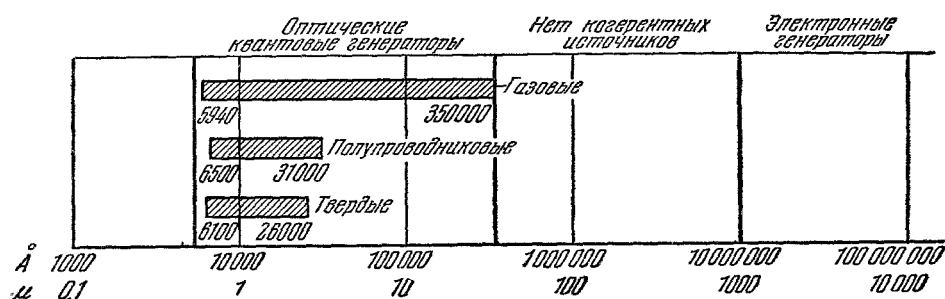


Рис. 1. Длины волн излучения оптических квантовых генераторов охватывают сейчас область от 5940 Å в желто-оранжевой части видимого спектра до 350 000 Å (35 мкм) в далекой инфракрасной области.

Концы заштрихованных полосок обозначают минимальные и максимальные длины волн излучения лазеров разных типов. К настоящему времени газовые лазеры генерируют большое число длин волн — свыше 160. Хотя и полагают, что полупроводниковый лазер может генерировать целый диапазон длин волн от 6500 до 31 000 Å, это еще требует доказательства.

материал, можно получить только ограниченное число длин волн света. Поэтому, чтобы перекрыть весь диапазон оптических частот, необходимы новые материалы, пока какой-либо новый подход не приведет к созданию устройства, настраиваемого на широкую полосу частот.

В настоящее время созданы оптические квантовые генераторы, формирующие пучки света с выходной длиной волны от ~ 5900 Å (0,59 мкм) в желто-оранжевой области вплоть до 35 мкм в середине инфракрасной части спектра (рис. 1). Зафиксировано вынужденное излучение с длиной волны короче 3100 Å (0,31 мкм) в ультрафиолетовой части спектра, однако никто еще не наблюдал генерацию лазером остронаправленного пучка света этой длины волны. Отношение наибольшей длины волны света, излучаемого лазером (35 мкм), к наименьшей (0,59 мкм) равно почти 60 : 1. Между 35 мкм и началом СВЧ-диапазона вблизи ~ 1 мм, где можно применять обычные электронные генераторы, имеется интервал длин волн, в котором все еще отсутствуют источники когерентного излучения. Так как он содержит частоты с отношением наибольшей длины волны к наименьшей 30 : 1, этот интервал меньше области спектра, охватываемой излучением оптических квантовых генераторов.

Поиски новых генерирующих материалов для лазеров являются, в сущности говоря, поисками элементов, которые обладают атомной структурой с подходящим набором уровней энергии. Как мы уже видели, активным ионом в первом оптическом квантовом генераторе был ион хрома. Главным недостатком в этом случае является то, что нижний уровень

рабочего перехода, используемого для генерации, совпадает с основным состоянием. Так как оно обычно полностью заселено, уменьшение его населенности требует притока большого количества энергии. Это означает, что очень трудно достичь непрерывной генерации рубинового лазера. Тем не менее У. Бойль и Д. Нельсон добились непрерывной работы оптического квантового генератора.

В некоторых новейших лазерах, генерирующих вблизи $\sim 6100 \text{ \AA}$, используются трехзарядные ионы редкоземельного элемента европия; эта возможность была указана еще в оригинальной работе Таунса и автора в 1958 г. Флуоресценция ионов европия содержит резкие интенсивные линии, и некоторые самые сильные из них отвечают переходам, оканчивающимся на нижнем уровне рабочего (генерирующего) перехода, расположенном достаточно высоко над основным уровнем энергии*). При средних температурах нижний уровень рабочего перехода почти не населен, атомы, попавшие на него, быстро возвращаются в основное состояние. Следовательно, если относительно малое количество атомов можно переводить на верхний уровень рабочего перехода, появляется стимулированное излучение и без конкурирующего процесса поглощения атомами света на нижнем уровне. К сожалению, трудно возбудить даже небольшое число атомов европия в верхнее энергетическое состояние, так как в большинстве кристаллов ион европия не имеет широкой полосы поглощения возбуждающего света. Большая часть фотонов, испускаемых импульсной лампой, без пользы проходит через кристаллы, содержащие ионы европия.

Обходный путь для преодоления этой трудности состоит в использовании ионов европия, включенных в химическое соединение, известное под названием хелатного (клетшевидного), которое обладает свойствами органической молекулярной матрицы. Хелат имеет интенсивные широкие полосы поглощения в ближней ультрафиолетовой части спектра; большая часть поглощенной им энергии быстро передается ионам европия, переводя их в возбужденное состояние, необходимое для осуществления генерации лазера.

Возможность связать ион европия с хелатом для использования в оптическом квантовом генераторе была установлена еще три года назад. О первом успехе в этом направлении сообщалось только в феврале 1963 г. Удачным генерирующим материалом оказался бензоил-ацетонат европия; он применяется не в виде кристалла или даже стекла, а в виде жидкого раствора в этиловом спирту. Это особенно удивительно, так как предполагалось, что, поскольку молекулы жидкости подвергаются энергичным соударениям из-за теплового движения, линии спектра слишком расширятся и не произойдет генерации. Ион европия, однако, не очень чувствителен к таким соударениям, он в какой-то мере защищен от них внешними частями молекулы хелата.

Почти одновременно с этим Н. Вулф и Р. Пресли сообщили о работе другого оптического квантового генератора, в котором используются ионы европия, включенные в хелат, содержащийся в акриловой пластмассе: В таком лазере пластмасса может применяться как в виде обычных стержней, так и в виде длинных волокон. Лазеры, в которых используются жидкости и пластмассы, содержащие ионы европия, оптически возбуждаются с помощью мощной импульсной лампы и генерируют когерентный свет с характерной длиной волны около 6100 \AA .

Другие материалы, которые при оптическом возбуждении обеспечивают работу квантовых генераторов света, включают в себя большое число кристаллов, стекол и, наконец, один газ — пары цезия.

*) Это так называемая четырехуровневая схема генерации. (Прим. перев.)

Цезий излучает свет двух длин волн — вблизи 3 и 7 μ . Из-за большой концентрации активных ионов лазеры, построенные на твердых телах, обычно генерируют более интенсивные пучки света, чем газовые лазеры.

Привлекательной особенностью газовых лазеров является генерация в широком диапазоне длин волн. За исключением цезиевого оптического квантового генератора, газовые лазеры возбуждаются чаще электрически, чем оптически. Выяснено, что условия усиления света определенных длин волн с помощью вынужденного излучения удовлетворяются при электрическом разряде почти в любом газе. Кроме того, подобные квантовые генераторы работают большей частью в режиме непрерывной генерации, а не импульсной. Подробно исследованы благородные газы: гелий, неон, аргон, криптон, ксенон; найдено, что каждый из них обеспечивает генерацию лазера более чем на одной длине волны. Наибольшая полученная до сих пор длина волны света, излучаемого оптическими квантовыми генераторами, 35 μ , была генерирована ксеноновым лазером.

В этих экспериментах обнаружено, что в процессе разряда сталкивающиеся с быстрыми электронами атомы газа охотнее переходят в некоторые определенные возбужденные состояния, чем в другие. Эти предпочтительные состояния можно использовать в качестве верхних уровней энергии в квантовых генераторах света, откуда совершается рабочий переход на нижние уровни энергии. Если же атомы задержатся на нижнем уровне рабочего перехода, они тем не менее смогут поглотить свет определенной частоты и возвратиться на верхний рабочий уровень. Следовательно, их можно заставить излучать эту энергию и переходить с нижнего уровня рабочего перехода на еще более низкий — в основное состояние. Поскольку этому способствуют частые столкновения атомов газа со стенками разрядной трубки, удобно использовать трубки малого диаметра. Уменьшая диаметр газоразрядной трубки примерно до 3 мм и применяя зеркала с большой отражательной способностью в видимой, но не инфракрасной части спектра, Дж. Ригден и А. Уайт построили газовый оптический квантовый генератор с длиной волны выходящего пучка света 6328 Å. Этот лазер специального типа мог бы стать для многих лабораторных исследований простым и удобным источником монохроматического света, излучаемого в виде непрерывного и остронаправленного пучка (см. рис. 11 на вклейке между стр. 756—757).

Как газовые, так и квантовые генераторы света на твердом теле (твердые), с оптическим возбуждением, не очень эффективны. Энергия формируемого ими пучка света обычно меньше 1% входной энергии возбуждения. Это ограничение неожиданно было преодолено осенью 1962 г. открытием класса оптических квантовых генераторов, работающих на полупроводниковом переходе. Они обещают увеличение к.п.д. квантового генератора света более чем до 10% и, возможно, даже достижение 100%. О новом классе оптических квантовых генераторов сообщили почти одновременно три группы исследователей.

Уже в течение нескольких лет обсуждались возможности создания оптического квантового генератора на полупроводнике. В соответствии с квантовой теорией электроны могут занимать в твердом теле два широких энергетических уровня: нижний уровень называется валентной зоной, а верхний — зоной проводимости. Чтобы обеспечивать проводимость электрического тока, в твердом теле должен быть запас электронов в зоне проводимости; полупроводник же имеет их в меньшем количестве. Отдельные электроны в зоне проводимости обладают энергией возбуждения, по меньшей мере равной энергетическому промежутку между двумя зонами. В принципе можно заставить электрон поглотить эту энергию

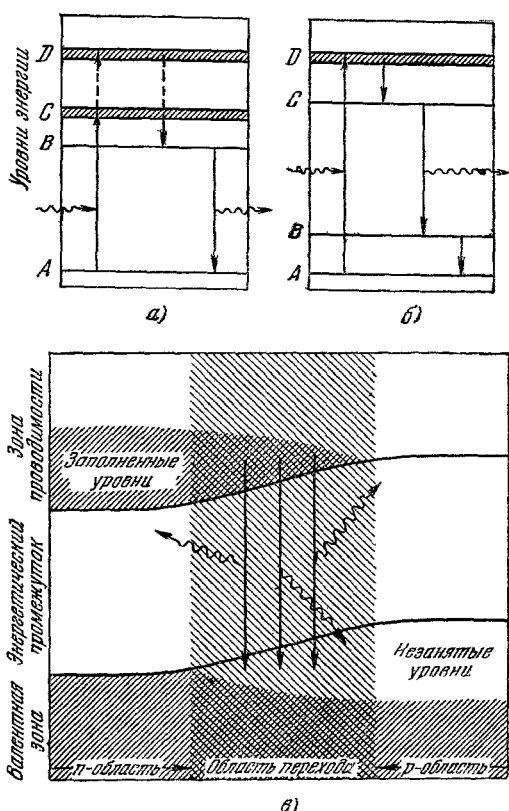


Рис. 2. Принцип действия оптического квантового генератора основан на непрерывном испускании фотонов электронами (волнистые стрелки) при их переходах с верхнего уровня энергии на нижние.

В твердых и газовых лазерах электроны содержатся в «возбуждаемых атомах». В полупроводниковых оптических квантовых генераторах электроны не связаны с атомами. В первом рубиновом лазере оптическое возбуждение переводит атомы из «основного» состояния A в состояние C или D (а). Эти атомы быстро «спускаются» на метастабильный уровень B . Возвращение атома в основное состояние, являющееся обычно случайным процессом, можно стимулировать, если облучить атом фотоном такой же энергии, какую он излучает, переходя из B в A . При избытке атомов в состоянии B по сравнению с A вынужденное излучение преобладает над поглощением. В различных твердых и газовых оптических квантовых генераторах нижний уровень рабочего перехода находится немного выше основного (б) и обычно заселяется легко. Поэтому быстро достигается избыток атомов на уровне C . В полупроводниковом, т. е. работающем на диодном $p-n$ -переходе, лазере электроны оказываются в кристаллическом «сандвиче», содержащем p - и n -области, на более высоком уровне энергии и переходят с него на ниже лежащий (в). В диодном оптическом квантовом генераторе возбуждение производится электрически. В области перехода электроны попадают в «дырки» на незанятых уровнях с краю p -области. Рекомбинация электрона и «дырки», приводящая к излучению фотона, можно стимулировать другим фотоном той же энергии. Самопроизвольно испущенные фотоны летят во всех направлениях. Однако фотоны, пролетающие в плоскости перехода, более всего стимулируют рекомбинацию и осуществляют генерацию лазера.

в виде фотона. Однако в обычно применяемых полупроводниках, таких, как германий или кремний, электроны в зоне проводимости могут получать также импульсы от кристаллической решетки, которые должны возвращаться ими при переходе. Поскольку это связано с колебаниями решетки, данный процесс относительно маловероятен. По этой причине подобные полупроводники, называемые полупроводниками с непрямым переходом, излучают ничтожное количество света и непригодны для создания оптических квантовых генераторов.

Имеется другой класс полупроводников — с прямым переходом, типичным представителем которых является арсенид галлия; переход может происходить в нем и без включения колебаний решетки. В полупроводниках этого класса электрон может выйти из зоны проводимости и занять место «дырки» в валентной зоне или же рекомбинировать с нею. Эта рекомбинация происходит спонтанно вместе с излучением фотона. Если имеется достаточная концентрация возбужденных, находящихся в зоне проводимости электронов, спонтанное излучение приводит к стимулированному, в результате чего начинается генерация лазера на полупроводнике. Требуемая концентрация электронов имеется в области $p-n$ -перехода диода (рис. 2). В p -области (положительной) — избыток электронов в валентной зоне, в n -области (отрицательной) — избыток электронов в зоне проводимости. Находящиеся в n -области свободные электроны поступают в область перехода, рекомбинируют с дырками p -области, испуская фотоны. Поскольку большая часть свободных электронов находится в плоскости перехода, излучение,

вызванное рекомбинацией электронов и дырок, возрастает, если оно распространяется вдоль этой плоскости, — интенсивно излучается свет в местах пересечения области перехода с боковыми гранями кристалла. Чтобы придать излучаемому свету определенное направление, необходимо только поместить на двух противоположных сторонах кристалла параллельные зеркала. Этого можно добиться также особой полировкой поверхностей кристалла. Внешние границы кристалла представляют собой естественные отражающие плоскости. Поверхности скола кристалла также являются превосходными зеркалами. Только две противоположные грани кристалла должны обладать зеркальными свойствами, остальные грани его оставляются неровно зачищенными или осторожно протравленными (рис. 3).

Так как в диодном переходе образуется большое количество возбужденных электронов, для генерации лазера необходимо лишь небольшое число диодов. В типичном случае область перехода равна примерно 1 мм^2 . Лазеры на диодных $n-p$ -переходах очень эффективны, так как каждый попадающий в область перехода электрон излучает фотон, а потери сводятся только к омическому рассеянию энергии на электрических сопротивлениях в остальных частях диода. Построенные к настоящему времени оптические квантовые генераторы на диодном переходе имеют малые размеры и выходную мощность менее одного ватта, однако, по-видимому, ничто не ограничивает создание более крупных лазеров этого типа.

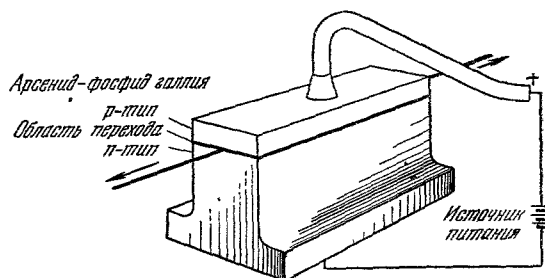


Рис. 3. Устройство этого квантового генератора света сходно с обычными диодами, работающими на $p-n$ -переходе.

Генерирующим веществом является кристалл арсенида-фосфида галлия. Небольшое количество примесей создает p - и n -области. На переходе электроны попадают в «дырки» и происходит излучение фотонов. Две противоположные поверхности диода зеркально отполированы, чтобы выделять излучаемый свет вдоль одной оси.

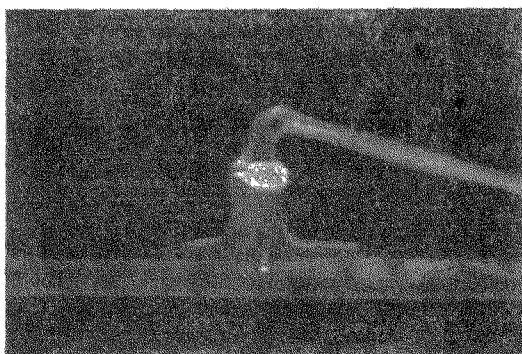


Рис. 4. Диодный квантовый генератор света, построенный Н. Голоняком и С. Беваквой, является первым устройством такого типа, работающим в видимой части спектра.

Длина волны красного света, генерируемого этим лазером, около 7000 \AA . На снимке показан сам оптический квантовый генератор (в центре) и поддерживающая его конструкция.

регулировать в значительных пределах. Н. Голоняк и С. Беваква показали, что можно расширить пределы изменения генерируемой длины волны, если использовать соединения из трех элементов — такие, как арсенид-фосфид галлия (рис. 4 и 5). В зависимости

В чистом арсениде галлия при комнатной температуре генерируется излучение с длиной волны около 9000 \AA в ближней инфракрасной части спектра. При более низких температурах длина волны выходящего света снижается приблизительно до 8400 \AA . Выходную длину волны можно поэтому

путем вариации температуры. В зависимости

от содержания мышьяка и фосфора такой диод будет генерировать в области 6100—8400 Å (рис. 6). Трехэлементное соединение арсенид галлия — индия дает возможность построить лазер, генерирующий в интервале 8400—31 000 Å инфракрасной части спектра. Регулируя рабочую

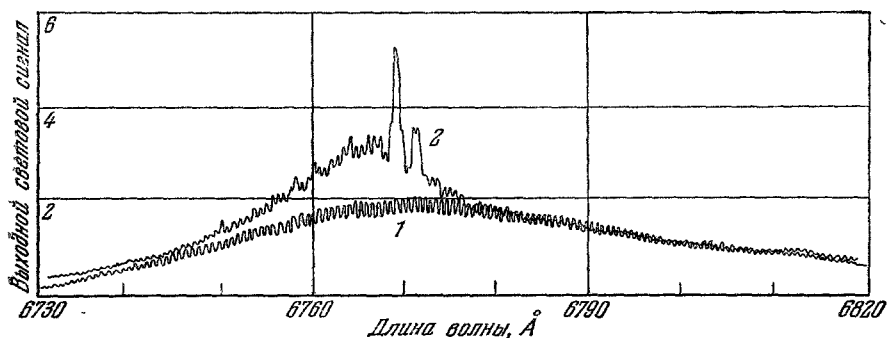


Рис. 5. Спектральное распределение света, генерируемого полупроводниковым лазером (на арсениде-фосфиде галлия), вблизи порога генерации (1) и сразу же после того, как начинает преобладать один тип колебаний (2).

Эти кривые сняты во время работы одного из оптических квантовых генераторов, построенных Голоняком и Беваквой.

температуру, можно установить выходную длину волны света очень мало отличающейся от заданной. Эта легкость изменения длины волны делает

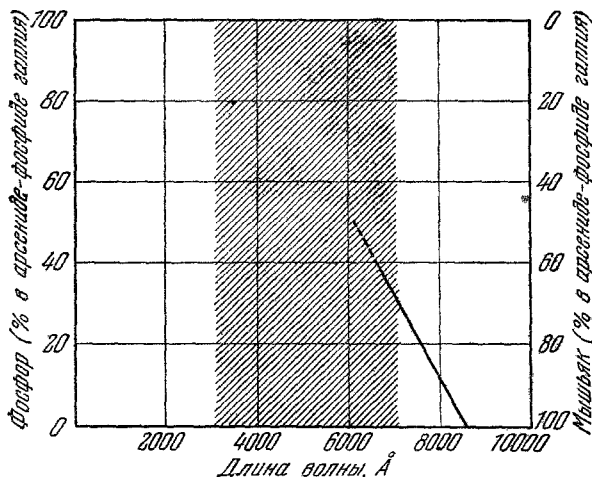


Рис. 6. Зависимость длины волны излучаемого света от содержания мышьяка и фосфора в трехэлементном соединении—арсениде-фосфиде галлия.

Указано процентное содержание только мышьяка и фосфора, так как галлий присутствовал всегда. При избытке фосфора по отношению к мышьяку генерация диодного лазера начинает исчезать.

диодные квантовые генераторы света менее пригодными по сравнению с другими лазерами, излучающими пучки света с точно выбранной длиной волны. Однако они имеют преимущество в компактности, простоте и эффективности. Выходную мощность их можно легко и быстро регулировать путем изменения электропитания, так что световой пучок возможно промодулировать каким-либо сигналом.

Для получения высокой выходной мощности, по-видимому, более всего пригодны оптические квантовые генераторы на рубине и некоторых стеклах с примесью ионов неодима. В этом случае, оптическое

возбуждение ионов производится с помощью ярких вспышек импульсной ксеноновой лампы. Чем большего размера использовались стержни, тем большие энергии выходящих пучков света были получены. Полная энергия импульсной вспышки с энергией в несколько сотен джоулей достигается в течение одной или двух миллисекунд. За короткое время вспышки

Типы оптических квантовых генераторов

В таблице приведены частоты генерируемого света в случае различных «активных материалов», режим работы и максимальные рабочие температуры. В число твердых оптических квантовых генераторов включен один жидкий—раствор трехвалентного европия в этиловом спирту, содержащийся в органической матрице—хелатном соединении. Не описан один газовый лазер, в котором используются пары цезия (с оптическим возбуждением), излучающий пучки света двух длин волн: 3,2 и 7,2 μ . За этим единственным исключением все газовые оптические квантовые генераторы возбуждаются электрическим разрядом

Активная примесь (валентность)	Длина волны генерируе- мого света, μ	Кристаллы и другие ма- териалы	Режим гене- рации	Рабочая тем- пература, °C
Твердые, или ионные, лазеры				
Европий (3+)	0,61	Оксид иттрия, пласт- масса, хелат в спир- товом растворе	Импульсный	20
Хром (3+)	0,70	Оксид алюминия	Непрерывный	20
Самарий (2+)	0,71	Фтористые кальций, стронций	Импульсный	—196
Иттербий (3+)	1,02	Стекло	»	—196
Празеодим (3+)	1,05	Вольфрамат кальция	»	—196
Неодим (3+)	1,06	Различные фториды, молибдаты, стекла	Непрерывный	20
Тулий (2+)	1,12	Фтористый кальций	Импульсный	—253
Эрбий (3+)	1,61	Вольфрамат кальция	»	—196
Тулий (3+)	1,91	Вольфрамат кальция, фтористый стронций	»	—196
Гольмий (3+)	2,05	Фтористый кальций, вольфрамат кальция, стекло	»	—196
Диспрозий (2+)	2,36	Фтористый кальций	Непрерывный	—196
Уран (3+)	2,4—2,6	Различные фториды	»	20
Газовые лазеры				
Гелий	160 длин волн между 5940 Å (0,594 μ) и 35 μ		Непрерывный	
Неон			»	
Криптон			»	
Ксенон			»	
Одноокись угле- рода			»	
Кислород			»	
Прочие газы			»	
Полупроводниковые лазеры				
Арсенид-фосфид галлия	0,65—0,84		Импульсный	—175
Арсенид галлия	0,84		Импульсный и непре- рывный	20 и —196
Фосфид индия	0,91		То же	—153 и —253
Арсенид индия	3,1		» »	—196 и —269

выделяется энергия, равная энергии излучения нескольких тысяч киловаттных ламп. Энергию такого разряда можно сфокусировать и прожечь с помощью ее стальную пластинку толщиной 0,32 см. Это — существенное достижение по сравнению с первыми оптическими квантовыми генераторами, пучки света которых могли прожигать только одно или два стальных лезвия; их выходная мощность измерялась поэтому числом

прожигаемых «лезвий». Существует все же большая разница между пучками излучения лазеров и предсказываемыми тепловыми лучами, которые могли бы разрушать баллистические ракеты. Даже энергия в тысячу джоулей не испарит и одного грамма воды. Но если пучок света, излучаемого оптическим квантовым генератором, сфокусировать особым образом, им можно сваривать, плавить и испарять небольшие количества вещества (рис. 7).

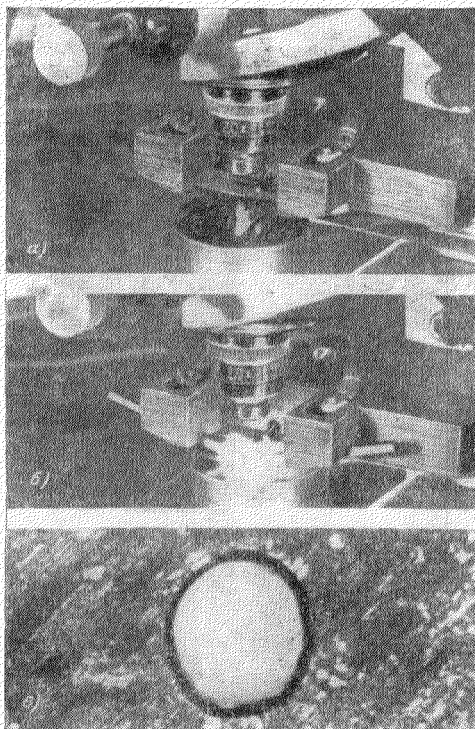


Рис. 7. Новый тип спектроскопа, в котором используется импульсный квантовый генератор света для испарения микроскопических количеств вещества с целью спектрографического анализа.

На снимке а) показано испарение образца с помощью пучка света от оптического квантового генератора. Для дальнейшего анализа пары этого вещества можно сильно нагреть. Это достигается путем короткого электрического разряда через пары этого вещества между двумя электродами (б). На снимке в), сделанном с большим увеличением, видна лунка диаметром 50 мк, выплавленная в металле пучком света, генерируемого лазером.

и длится примерно 10 наносекунд (10^9 сек). Кроме того, пучок света, излучаемый оптическим квантовым генератором в виде гигантского импульса, направлен очень остро. Угол расхождения этого пучка может быть менее $3'$.

Лазерный пучок еще более высокой интенсивности можно получить усилением гигантского импульса света от оптического квантового генератора. Усилителем является другой стержень, зеркала отсутствуют; в действительности для подавления самопроизвольных колебаний в усилителе концы усиливающего стержня обрабатываются до полного исчезновения отражательной способности. Этот усилитель возбуждается другой

Огромные пиковые мощности и очень короткие импульсы стало возможно получать после разработки аппаратуры, генерирующей гигантские импульсы излучения, которая впервые была предложена Р. Хелуарсом. В таком лазере используется метод импульсной модуляции добротности (или мгновенного включения. — *Перев.*); между концом лазерного стержня и зеркалом помещается быстродействующий затвор. Он закрыт в течение большей части времени вспышки возбуждающего света, так что свет из торца стержня не может достичь зеркала и отразиться в стержень. Поскольку путь светового луча перекрыт, генерация лазера не может начаться даже тогда, когда большое количество атомов переведено на верхний уровень. Как только в стержне достигается большое обращение населенностей уровней рабочего перехода, затвор быстро открывается. Когда он открыт, свет может достигать зеркала почти мгновенно — в лазере устанавливается генерация. При этих условиях большая часть энергии возбуждения, накопленной в генерирующем стержне, излучается в одном гигантском импульсе света (рис. 8). Этот гигантский импульс излучения может иметь мощность вплоть до 50 Мвт

импульсной лампой, а поэтому он всегда готов усиливать излучение лазера, как только к нему подводится гигантский импульс света. Этот гигантский

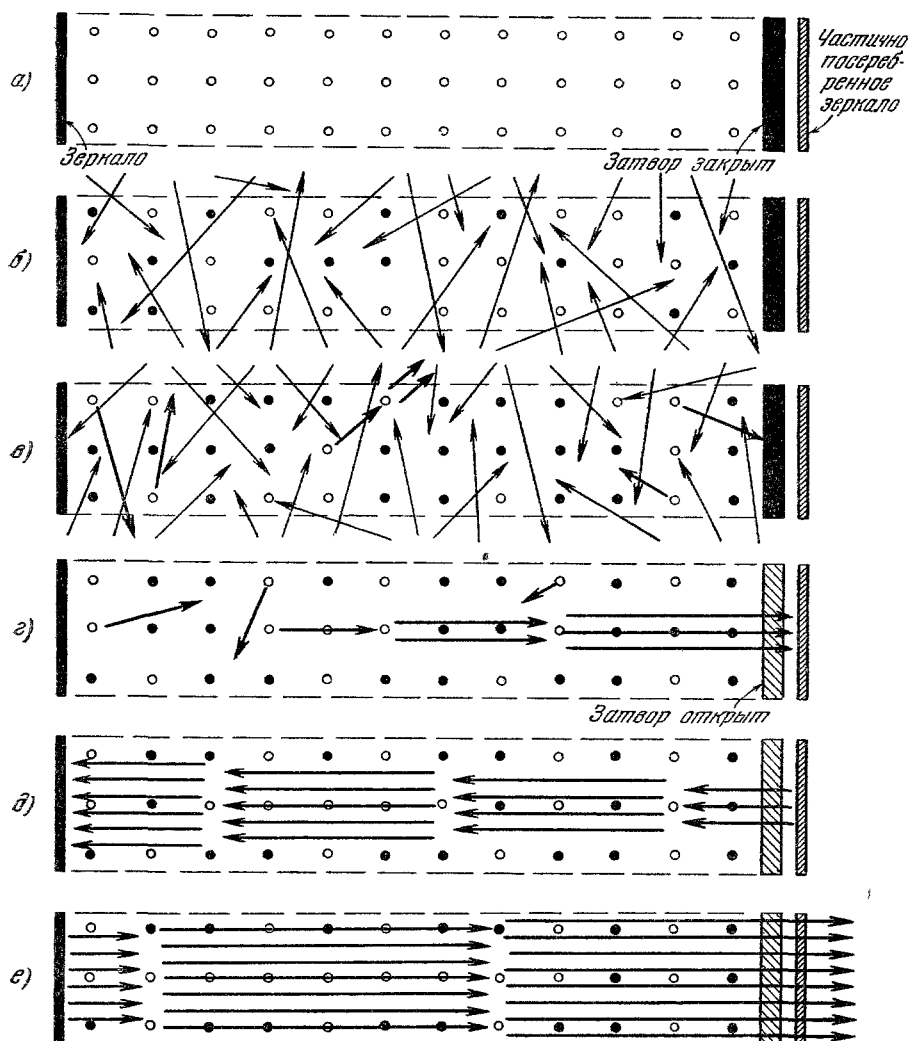


Рис. 8. В рубиновом лазере, излучающем гигантский импульс света, используется затвор для задержки генерации до тех пор, пока не будет достигнута большая населенность возбужденного состояния.

До включения возбуждающего света (а) атомы находятся в основном состоянии (белые кружки). Возбуждающий свет (тонкие стрелки на рисунках б — е) переводит атомы в возбужденное состояние (черные кружки). Если испущенный атомом фотон (жирная стрелка) поглощается другим возбуждаемым атомом, он стимулирует дальнейшее излучение фотонов. Вынужденное излучение ограничивается до тех пор, пока закрыт затвор (г). Когда он открыт, фотоны, летящие в точности параллельно продольной оси оптического квантового генератора, отражаются от обоих зеркальных торцов, вызывая каскад фотонов. Этот каскад завершается генерацией когерентного пучка света, который проходит через частично посеребренное зеркало, обладая мощностью в несколько миллионов ватт.

импульс стимулирует излучение атомов усиливающего стержня с того момента, как импульс начинает проходить через стержень, т. е. передний фронт гигантского импульса усиливается и вовлекает в генерацию все возбуждаемые атомы. Поэтому не остается возбужденных атомов для

усиления остальной части гигантского светового импульса. В результате такого усиления образуется сверхмощный импульс излучения, не только более интенсивный, но и более короткий. Как уже сообщалось, наивысшая мощность пучка света, излучаемого лазером, равна примерно 500 млн. ваттам, а сечение его меньше одного кв. сантиметра. Если принять, что интенсивность такого пучка равна ~ 1 млрд. ваттам на 1 см^2 , интенсивность соответствующего электрического поля в несфокусированном пучке будет около 1 млн. вольт на 1 см . Хорошей линзой с фокусным расстоянием в 1 см можно сфокусировать этот пучок до одной тысячной доли см в диаметре. Интенсивность сфокусированного таким образом пучка

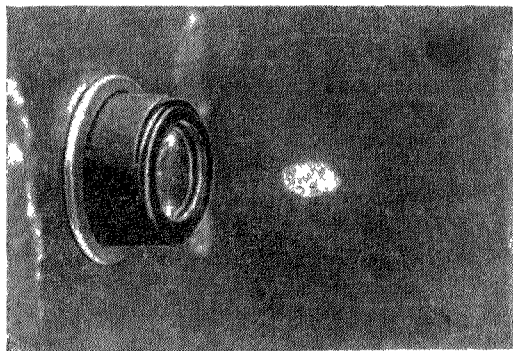


Рис. 9. Электрический разряд в воздухе, произведенный гигантским импульсом света, генерированного рубиновым лазером.

В оптических квантовых генераторах подобного типа применяется затвор для задержки стимулированного излучения, увеличивающей интенсивность пучка. Когда затвор открыт, излучается гигантский импульс света мощностью в несколько миллионов ватт и длительностью от 10^{-8} до $25 \cdot 10^{-9} \text{ сек.}$

Известные с помощью лазеров, показали, что диэлектрическая постоянная (мера изоляционной способности) зависит не только от структуры материала и частоты света, но и от мгновенной величины электрического поля. Другими словами, зависимость ее от высоких электрических полей нелинейна. Когда электромагнитная волна с заданной частотой колебаний проходит через вещество с такими нелинейными свойствами, форма волны искажается. Можно показать с помощью фурье-анализа, что это искажение волны эквивалентно распространению первоначальной волны вместе с одной или большим числом гармонических составляющих. Эти гармоники имеют частоты в два, три и более раз больше частоты колебаний первоначальной волны.

Генерацию гармоник в лазерном пучке впервые наблюдали в Мичиганском университете. Пучок света от рубинового квантового генератора с длиной волны 6943 \AA направлялся на кристалл кварца, и наблюдалось излучение гармоник с частотой, в два раза превышающей первоначальную частоту, т. е. с длиной волны 3472 \AA (рис. 10). В этих первых экспериментах интенсивность гармоник была очень малой — менее одной миллионной доли интенсивности света основной частоты. Последующие усовершенствования этой методики привели к генерации гармоник с к. п. д. выше 20%.

С помощью пучков излучения оптических квантовых генераторов высокой интенсивности были изучены и другие нелинейные явления. Ими являются смешение световых волн для получения частот, равных

ка была бы равна 10^{15} ватт на 1 см^2 , и электрическое поле этой оптической волны было бы около миллиарда вольт на 1 см . Это поле больше, чем электрическое поле, связывающее внешние электроны в большинстве атомов. Оно могло бы производить страшные разрушения даже в прозрачных веществах (рис. 9). Обычно считается, что световое давление пренебрежимо мало, однако в таком сфокусированном пучке света оно было бы выше 1 млн. кг на 1 см^2 . Даже при обычных интенсивностях излучения оптических квантовых генераторов прозрачные материалы, обычно являющиеся изоляторами, ведут себя непривычным образом. Эксперименты, выпол-

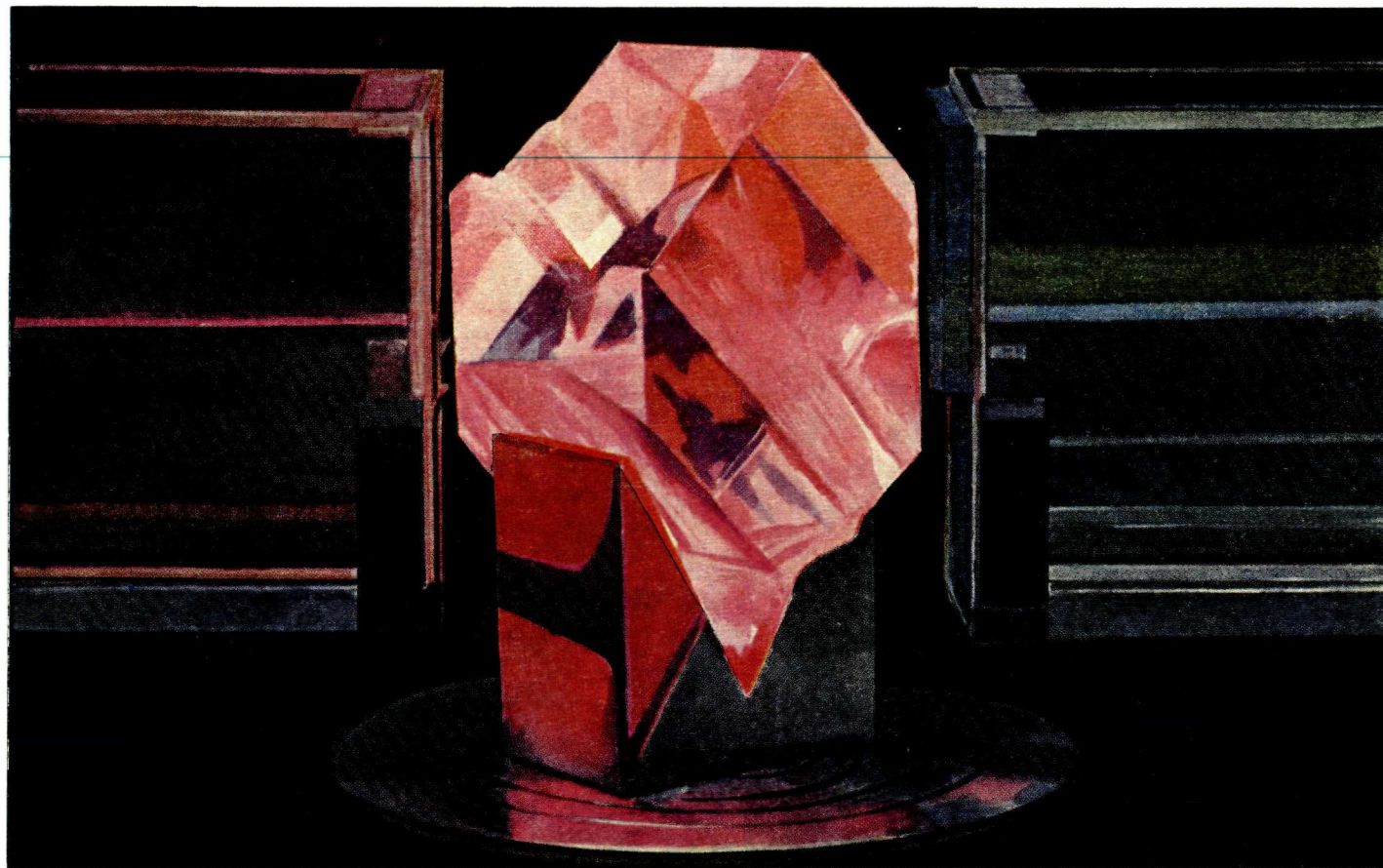


Рис. 10. Удвоение частоты света.

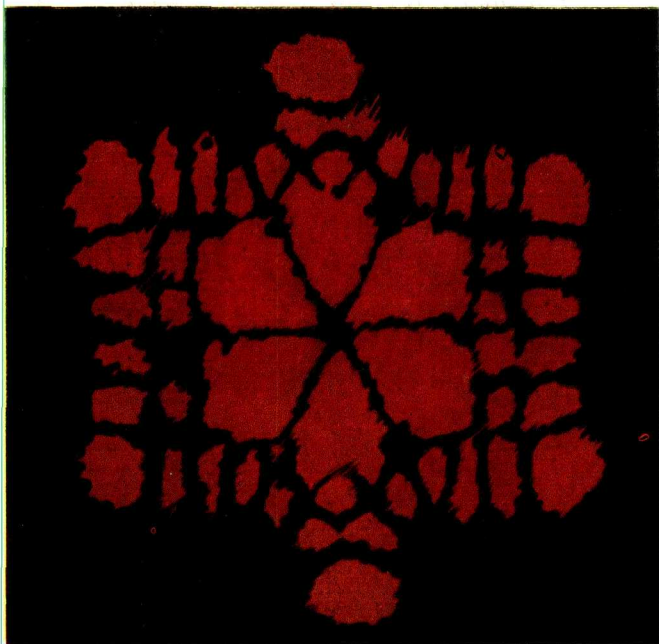


Рис. 11. Наглядная интерференционная картина колебаний газового оптического квантового генератора. Пучок света имеет диаметр около 0,5 см. На фотографии видно, где световые волны усиливаются и где пропадают

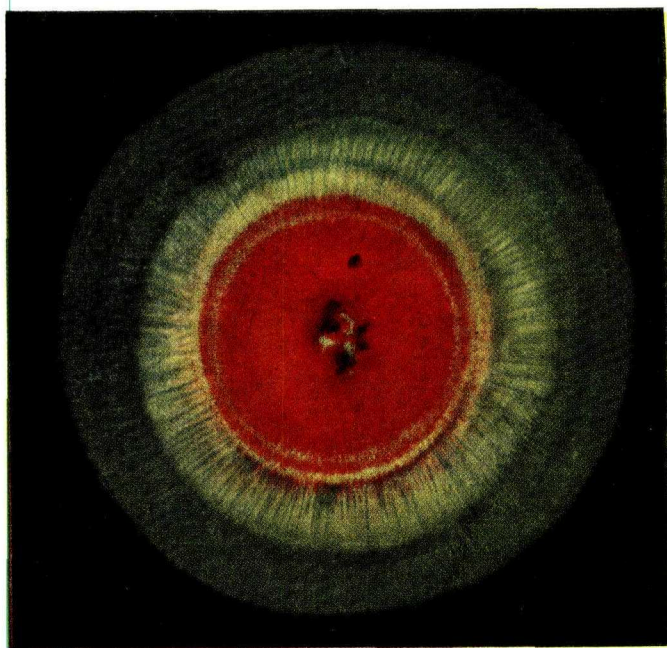


Рис. 12. Индуцированный раман-эффект наблюдается, когда пучок света от лазера, генерирующего гигантские импульсы излучения, сфокусирован и пропущен через бензол.

Частота колебаний молекулы бензола комбинируется с частотой оптического квантового генератора, что дает окрашенные кольца (снимок Р. Терхуна).

сумме и разности смешиваемых. В связи с этим стало возможно получать интенсивные когерентные пучки света разнообразных и ранее недоступных длин волн путем комбинирования выходных длин волн различных оптических квантовых генераторов. Этот вид смешения давно освоен в диапазоне радиочастот, но не в оптике. Н. Бломберген, П. Першан и их сотрудники из Гарвардского университета пересмотрели большую часть теории распространения световых волн с целью учета указанных нелинейностей. Все законы оптики в случае световых пучков большой интенсивности, излучаемых импульсными лазерами, до некоторой степени видоизменяются.

Другой вид нелинейного эффекта обнаружил почти случайно Э. Вудбери. Он использовал гигантские импульсы излучения квантового генератора, в котором затвором являлась ячейка Керра, наполненная нитробензолом. (Такой затвор пропускает или задерживает свет в зависимости от приложенного электрического поля.) Вудбери нашел, что выходящий пучок содержал, кроме волны 6943 \AA , генерируемой рубиновым лазером, дополнительные длины волн, отличающиеся на несколько сотен ангстрем в длинноволновую сторону относительно волны основного излучения рубинового лазера. Световой пучок с этими дополнительными длинами волн был так же когерентен и хорошо сфокусирован, как и основной пучок. Тщательное исследование показало, что новые длины волн были смещены относительно световых волн рубинового оптического квантового генератора на величины, соответствующие различным колебательным частотам молекулы нитробензола. Такой сдвиг частот световых колебаний известен как раман-эффект (комбинационное рассеяние света). В описанном случае частота излучения рубинового лазера комбинировалась с частотами колебаний молекулы нитробензола. В результате обычного раман-эффекта получается некогерентный свет малой интенсивности. Линии раман-эффекта, полученного с помощью излучения оптического квантового генератора, когерентны, и было найдено, что их интенсивность равна примерно половине интенсивности первоначального пучка (рис. 12, 13). Раман-эффект в пучке излучения оптического квантового генератора делает возможным получать высококогерентные световые пучки с новыми длинами волн. Это обеспечивает также новый путь быстрого накопления информации о частотах колебаний молекул и, может быть, о частотах их вращательного движения.

Поскольку почти ежедневно публикуются новые важные результаты, нет возможности для тщательного и подробного изучения достигнутого с целью выбора его практических применений. Некоторые из предложенных применений, в частности военных, рассчитаны на более высокие энергии выходящего пучка, чем доступные в настоящее время. До тех пор пока к. п. д. и средняя выходная мощность (по сравнению с пиковой) не возрастут, нецелесообразно использовать оптические квантовые генераторы для резки и сварки металлов в производственных масштабах. Вообще говоря, не существует причин этого не делать. Лазеры с большим к. п. д. уже существуют, число их непрерывно увеличивается, однако их излучение не обладает необходимыми высокими мощностями.

В связи с этим путями использования лазеров будут те, где существуют такие свойства оптических квантовых генераторов, как высокая пиковая мощность или большая монохроматичность выходящего пучка. По крайней мере, в одном случае применение световых импульсов лазера, длящихся менее одной миллисекунды и несущих энергию менее одного джоуля, является идеальным. Это относится к медицине: в случае отслоения или повреждения сетчатки глаза можно «приваривать» ее

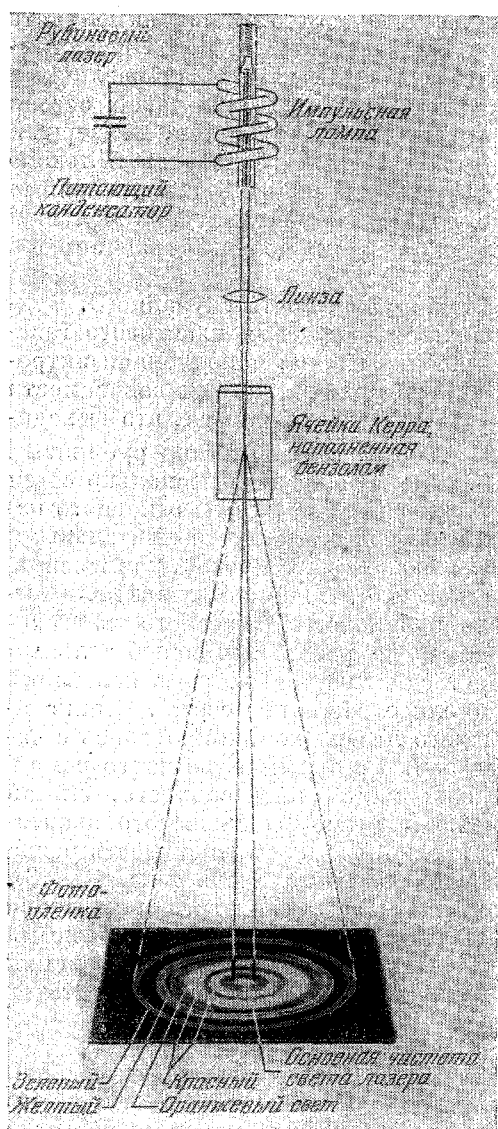


Рис.13. Раман-эффект, наблюдаемый при пропускании сфокусированного интенсивного пучка света, генерируемого лазером, через бензол; результат фиксируется непосредственно на фотоплёнке (см. рис. 12).

Частота световых колебаний прошедшего пучка сдвинута в обе стороны от основной частоты оптического квантового генератора из-за комбинирования ее с частотами колебаний молекулы бензола. Сдвиг в длинноволновую сторону дает частоты в инфракрасной части спектра; это не видно на цветном фотоснимке (см. рис. 12). Сдвиг в коротковолновую сторону из-за комбинирования основной частоты с одной, двумя, тремя, четырьмя частотами колебаний бензола приводит соответственно к появлению красного, оранжевого, желтого и зеленого колец.

света не зависит от движения Земли в мировом пространстве. Это привело к отказу от идеи о «всепроницающем эфире», в котором распространяются

на нижележащие ткани с помощью коагуляции под действием интенсивного светового луча и, таким образом, предотвращать полное отпадение сетчатки. На основе работы Д. Мейер-Швикерата офтальмологи действительно использовали в прошлые годы сильные пучки света, излучаемые обычными лампами, для коагуляции в глазной сетчатке.

Одним из преимуществ оптического квантового генератора является миллисекундная длительность импульса света по сравнению с полсекундой, необходимой для коагуляции сетчатки под действием обычного пучка света. Короткое время глаз не сможет двигаться, но это не будет потерей его иммобилизации, как это происходит в предыдущем случае. Н. Капани и Н. Пепперс (медицинская школа при Стэнфордском университете) показали, как можно регулировать выходной пучок лазерного света в различных случаях лечения глаз. Показано, что их прибор легко можно использовать. Поскольку доказана одинаковая успешность этого метода во всех медицинских случаях, это может дать офтальмологам возможность предотвращать отслоение сетчатки уже в начале болезни.

Можно использовать также совершенно необычную монохроматичность света, излучаемого лазером. Например, А. Джаван, Г. Джасейя и Ч. Таунс недавно применили гелий-неоновый оптический квантовый генератор для повторения классического опыта Майкельсона — Морли с точностью более высокого порядка.

В этом эксперименте, впервые выполненном в 1881 г. А. Майкельсоном и Э. Морли, было обнаружено, что скорость

световые волны (при существовании эфира скорость света не была бы постоянной), и расчистило место для теории относительности Эйнштейна.

Чтобы повторить этот опыт, группа исследователей из Массачусетского технологического института установила свои лазеры в винном подвале на мысе Код на большом удалении от автомобильных дорог. В дни, когда погода была тихой и земная поверхность спокойной, частота генерируемого лазером света оставалась постоянной в течение нескольких тысяч световых колебаний из 10^{14} . Относительный сдвиг частот лазеров иногда достигал малой величины, равной 10^{-13} . Чтобы добиться такой стабильности, конструкция оптического квантового генератора должна была быть в высшей степени жесткой. Изменение частоты на 10^{-13} долю соответствует относительному изменению длины, равному 10^{-13} . Поскольку зеркала у концов оптического квантового генератора отстоят друг от друга на расстоянии около 1 м, это указывает на изменение длины, равное 10^{-13} м, или тысячной доле диаметра атома.

Джаван с сотрудниками повторили опыт Майкельсона — Морли, направляя лазерные пучки по различным направлениям относительно движения Земли. Какое-либо изменение скорости света привело бы к изменению времени, необходимого для прохождения пучка света между обоими зеркалами, и было бы обнаружено как изменение частоты выходящего пучка. Описанная схема обладает достаточной чувствительностью, чтобы установить малое изменение скорости света, равное 3 мм за секунду. Предварительные результаты показывают, что это изменение, если бы оно и существовало, могло быть измерено с точностью меньше указанной. Более того, описанная установка обладала достаточной чувствительностью, чтобы зафиксировать незначительное изменение скорости света, равное 0,03 мм/сек. Предельная точность, достигнутая Майкельсоном, была около 150 мм/сек; применяя его метод, последующие исследователи имели возможность улучшить точность приблизительно на порядок (в 10 раз).

Другой классический опыт Майкельсона был также повторен, в несколько видоизмененном виде, с помощью оптических квантовых генераторов. Это — эксперимент, впервые предложенный Майкельсоном в 1904 г. с целью обнаружить абсолютное движение Земли. Посредством зеркал свет пропусклся в обоих направлениях вдоль четырех сторон квадрата по его периметру. Время, необходимое для полного прохождения света, — одно и то же для всех направлений, пока квадрат остается в покое. Однако если он вращается вокруг оси, перпендикулярной к плоскости квадрата, бегущему в направлении вращения лучу потребуется

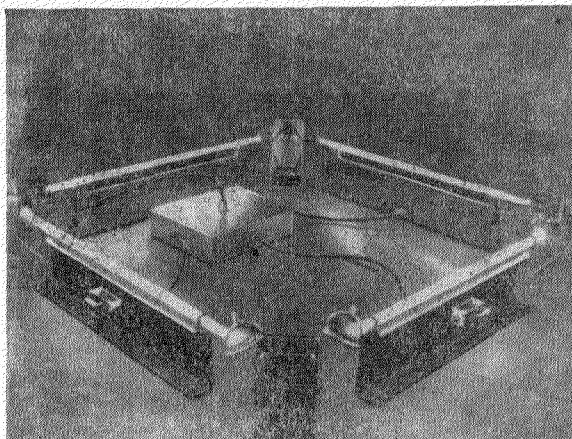


Рис. 14. «Замкнутый» оптический квантовый генератор, построенный У. Мацеком с сотрудниками. Два лазерных пучка света обращаются в противоположных направлениях вдоль периметра квадратной установки (см. рис. 15). При ее вращении частота световых колебаний одного пучка увеличивается, а другого — уменьшается.

больше времени, чтобы пройти все расстояние, чем лучу, бегущему в противоположном направлении. Причиной этого является убегание зеркал от первого луча и второго луча от зеркал.

Этот связанный с вращением Земли эффект, конечно, очень мал, так как скорость света значительно больше скорости движения зеркал. На широте 40° суточное вращение Земли приводит к изменению длины волны света, равному в случае горизонтального расположения квадрата со сторонами в 3 м нескольким сотым или тысячным долям первоначальной длины волны. Майкельсон предчувствовал, что этот эффект слишком незначителен, чтобы его можно было измерить. Однако в 1914 г. Ж. Саньяк (Франция) смог обнаружить указанный эффект на установке, включающей в себя четыре зеркала, укрепленные на вращающейся платформе. В свою очередь в 1925 г. А. Майкельсон и Г. Гэйл осуществили

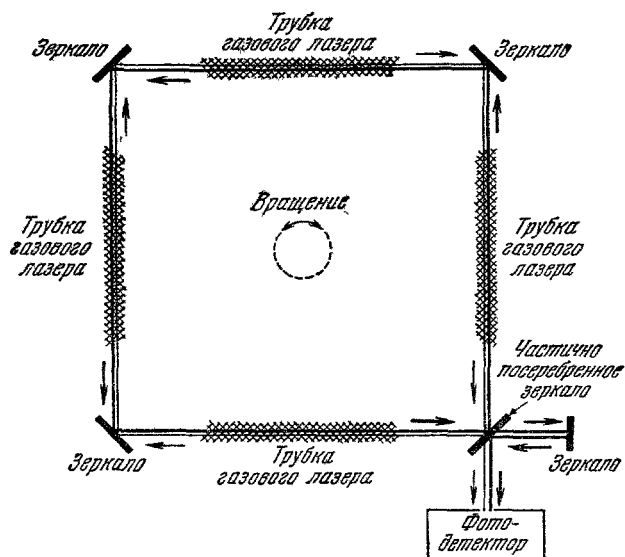


Рис. 15. В «замкнутом» лазере используется излучение стабильной частоты, генерируемое четырьмя газовыми лазерами в виде длинных трубок, управляемыми подобно отдельному оптическому квантовому генератору. Частоты двух пучков сравниваются с помощью фотодетектора. При вращении «замкнутого» оптического квантового генератора, например, вправо световой пучок, обращающийся по часовой стрелке, движется быстрее, чтобы образовать замкнутую цепь, — частота его световых колебаний уменьшается.

поистине героический опыт с помощью откачанных трубок, образующих стороны квадрата длиной 450 м, и показали, что суточное вращение Земли производит сдвиг, равный четверти длины волны света. После появления оптических квантовых генераторов А. Розенталь и У. Мацек показали, что описанный эксперимент можно провести в новой и более простой форме. В предложенном методе используются четыре гелий-неоновых оптических квантовых генератора, смонтированных по четырем сторонам квадрата (рис. 14 и 15). На четырех углах установки помещались зеркала, так что свет, выходящий из одного лазера, попадал в следующую и, таким образом, совершив оборот, возвращался в исходную точку. Все четыре газоразрядные трубки образовали единый оптический квантовый генератор, в котором свет распространялся в обоих направлениях по периметру квадрата. Время, необходимое для одного оборота

светового луча, определяло частоту колебаний лазера. Когда «квадрат» вращался вокруг перпендикулярной оси, лазер генерировал свет двух несколько различающихся между собой частот, соответствующих двум направлениям движения света вдоль периметра квадрата. Два световых пучка с разными частотами можно было объединить в фотодетекторе и измерить разность частот. Например, У. Мацек и Д. Дэвис показали недавно, что «замкнутый» лазер в виде квадрата, генерирующий свет с длиной волны $1,4 \mu$, производил частоту «оптического» биения 500 гц , когда квадрат вращался с угловой скоростью 2 град/мин . На широте Нью-Йорка движущаяся Земля вращает квантовые генераторы с угловой скоростью около 6 град/мин , что можно продемонстрировать, определив частоту светового биения в 40 гц . Это вполне обнаружимо. Поскольку «замкнутый» оптический квантовый генератор может вращаться подобно гироскопу, его можно будет со временем применять в целях навигации.

Необходимо отметить, что те немногочисленные научные и технические применения оптических квантовых генераторов, которые я описал, в настоящее время являются наиболее доступными. Большая часть других предложенных применений лазеров далека от практического осуществления.

Ошеломленные богатейшими возможностями, открываемыми лазерами, ученые и инженеры с трудом могут решить вопрос, на каких применениях оптических квантовых генераторов стоило бы сосредоточить усилия.

Эти совершенно новые источники электромагнитного излучения будут иметь обширную сферу использования. Установлено, что оптические квантовые генераторы могут формировать пучки видимых и инфракрасных лучей всех длин волн, что они дают огромную пиковую мощность на выходе, что они могут работать стабильно, излучать монохроматический свет и быть вполне эффективны. И это в то время, когда не существуют устройства, сочетающие все эти качества. Задача инженеров состоит в выборе подходящих возможностей лазеров, необходимых для предполагаемого использования, и в разработке специальных оптических квантовых генераторов для его осуществления. Можно быть уверенным, что в этой области будут все время появляться удивительные новинки и открытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. S. Jaseia, A. Javan and C. H. Townes, Phys. Rev. Letts. 10, 165 (1963).
2. Bela A. Lengyel, Lasers, N. Y., 1962 (в Издательстве иностранной литературы готовится перевод: Б. Лендъел, Лазеры).
3. W. M. Masek and D. T. Davis, Jr., Appl. Phys. Letts. 2 (3), 67 (1963).
4. Special Issue on Quantum Electronics of Proc. of the Institute of Electrical and Electronics Engineers 51(1), 1—294 (1963).
- 5*. Н. Г. Басов и А. М. Прохоров, Молекулярный генератор и усилитель, УФН 57, 485 (1955)*.
- 6*. Н. Г. Басов, Б. Д. Осипов и А. М. Прохоров, О молекулярном генераторе без использования молекулярного пучка, УФН 59, 375 (1956).
- 7*. Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов, Генерация, усиление и индикация инфракрасного и оптического излучения с помощью квантовых систем, УФН 72, 161 (1960).
- 8*. Н. Г. Басов, О. Н. Крохин, А. Н. Ораевский, Г. М. Страховский, Б. М. Чихачев, О возможности исследования релятивистских эффектов с помощью молекулярных и атомных стандартов частоты, УФН 75, 3 (1964).

*) Литература, помеченная звездочкой, добавлена при переводе.

- 9*. А. Шавлов, Оптические мазеры, УФН 75, 569 (1961).
- 10*. Г. М. Зверев, Н. В. Карлов, Л. С. Корниенко, А. А. Маненков, А. М. Прохоров, Применение парамагнитных кристаллов в квантовой электронике, УФН 77, 61 (1962) (особенно гл. V).
- 11*. Э. В. Шпольский, Новые данные о свойствах излучения квантовых генераторов света (лазеров), УФН 77, 553 (1962).
- 12*. А. Шавлов, С. Фогель, Л. Далберджер, Оптические квантовые генераторы (лазеры). М., ИЛ, 1962. Первая статья в этом сборнике — 9*.
- 13*. «Лазеры». Сб. переводов. М., ИЛ, 1963.
- 14*. В. Р. Беннетт, Газовые оптические квантовые генераторы, УФН 81 119 (1963).
- 15*. О. С. Хивенс, Оптические квантовые генераторы, УФН 81, 507 (1963).
-