

АТОМНАЯ РАДИОТЕХНИКА

П.Т. АСТАШЕНКОВ



ГОСАТОМ ИЗДАТ • 1962

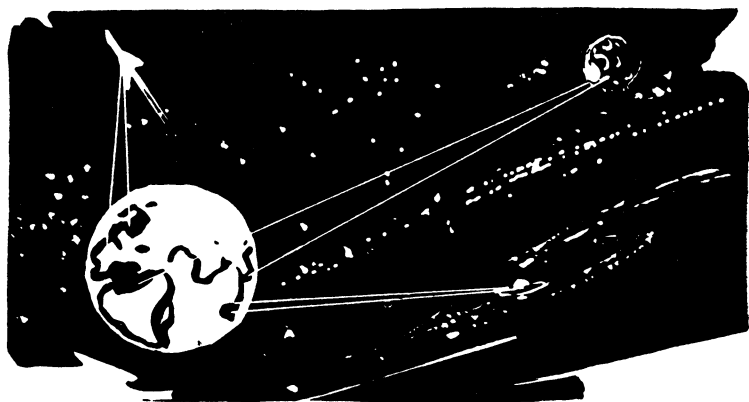
АТОМНАЯ РАДИОТЕХНИКА

П. Т. А С Т А Ш Е Н К О В



Государственное издательство литературы
по атомной науке и технике
Государственного Комитета Совета Министров СССР
по использованию атомной энергии

Москва 1962



ВВЕДЕНИЕ

Атом... Казалось бы, как много люди уже научились брать от него. Энергия деления атомных ядер движет надводные и подводные корабли, дает ток промышленности и сельскому хозяйству. Реакции синтеза ядер легких атомов дали человечеству источники энергии необычайной мощности, и сейчас ученые настойчиво ищут пути их «приручения», чтобы зажечь собственное солнце на земле, навсегда решить проблему снабжения всех отраслей народного хозяйства дешевой энергией.

А атомы радиоактивных элементов? Их излучения позволяют строить генераторы тока без движущихся частей, точные приборы — контролеры, автоматы, безошибочно выполняющие на производстве сложнейшие операции. Атомы, испускающие радиоактивные излучения и называемые в технике мечеными, стали самыми верными помощниками человека в изучении природы, совершенствовании машин и механизмов, выполнении промышленных и сельскохозяйственных работ.

И вот мы слышим нечто новое, необычайное. На Всесоюзном совещании научных работников в Кремле, в июне 1961 года, академик Л. А. Арцимович среди других крупных вкладов науки в практику назвал воз-

никшее в последние годы совершенно новое направление использования законов атомного мира — атомную радиотехнику, или квантовую радиофизику.

В чем же суть нового направления, в использовании возможностей атома? В том, что каждый атом рассматривается как миниатюрнейшая радиостанция, весь «механизм» которой спрятан в его внешней электронной оболочке. Эта возможность была известна ученым давно — более пятидесяти лет назад. Однако идея использовать излучение атомов, заставляя их колебаться вместе в одном и том же ритме и посылать в нужном направлении согласованный поток электромагнитной энергии, возникла сравнительно недавно. Огромный вклад в дело реализации этой замечательной идеи на практике, в развитие атомной радиотехники внесли советские ученые.

Атомную радиотехнику именуют еще и квантовой радиофизикой. Поясним, какая роль здесь отводится квантам.

Известно, что внутренняя энергия таких микросистем, как атом, квантованна, т. е. не может принимать произвольных значений, а имеет определенный набор этих значений.

Впервые понятие кванта было введено в науку немецким физиком М. Планком, который установил, что энергия переходит от поля к веществу и от вещества к полю порциями — квантами. В дальнейшем А. Эйнштейн создал квантовую теорию света, согласно которой энергия световой волны состоит из квантов света — фотонов. Представление о прерывистом, дискретном характере внутренней энергии атома было выдвинуто датским ученым Н. Бором.

Итак, в квантовой системе может быть вполне определенный набор энергетических состояний (уровней энергии). Получение согласованного потока электромагнитной энергии как раз и связано с переходом систем из одного состояния в другое, с излучением квантов энергии.

До недавнего времени понятием о квантах широко пользовались только в спектроскопии, химии, атомной и ядерной физике. Радиотехнику в прошлом кванты как бы не интересовали. В процессах, которые изучались радиотехникой, участвовало большое количество квантов

энергии электромагнитного поля, и практически не проявляли себя единичные акты взаимодействия отдельных квантов с отдельными атомами. Теперь же специалистам радиотехники для создания новых радиоустройств с принципиально новыми свойствами пришлось заинтересоваться индуцированными квантовыми переходами системы частиц (молекул, атомов, ионов).

Рождение новой отрасли науки и техники вызвано потребностями дальнейшего развития радиотехники, историческим выходом человека в космос и другими достижениями науки. Успехи квантовой радиофизики были подготовлены «совместными усилиями» современной радиоэлектроники, химии, физики. Особое значение имели исследования в области физики твердого тела.

«В настоящее время, — отмечал в одном из своих выступлений президент Академии наук СССР М. В. Келдыш, — начинается новый широкий прилив плодотворных идей из физики твердого тела в технику. Исследованиями тонких особенностей энергетической структуры твердых тел закладываются основы совершенно новых методов генерации электромагнитных волн. Особо следует подчеркнуть возможность создания остронаправленных пучков в оптическом диапазоне волн, что открывает новые возможности для связи на сверхдальние и космические расстояния. Важнейшие идеи, положившие начало этой отрасли техники, были высказаны советскими учеными».

Что же несет с собой будущий прогресс атомной радиотехники? Новые атомные радиостанции могут привести к подлинной революции в технике связи. С их помощью, по-видимому, удастся создать тонкие, как иголка, и вместе с тем чрезвычайно мощные пучки электромагнитных волн и световых лучей, пользуясь которыми можно будет передавать сигналы далеко за пределы солнечной системы, на многие миллиарды километров. Любителей научной фантастики, видимо, порадовало, сообщение о том, что игольчатые пучки атомных радиостанций представляют собой своеобразную реализацию идеи «гиперболоида инженера Гарина». В советской печати высказывалось предположение, о том, что уже в ближайшие 5—10 лет атомные радиостанции будут играть чрезвычайно большую роль в жизни человечества.

Разумеется, это лишь отдельные штрихи, показывающие возможности новой отрасли науки и техники. Эта отрасль поможет решить и целый ряд других задач, связанных с исследованием космического пространства. приемом слабых сигналов, получением усилителей с малым внутренним шумом и высоким коэффициентом усиления в сантиметровом и миллиметровом диапазонах электромагнитных волн, невиданных по стабильности генераторов, и т. д.

Для техники, использующей излучения атомов, характерно чрезвычайно стремительное развитие. Если вчера еще о квантовых устройствах говорили в порядке предположений, то сегодня уже созданы такие приборы. Сначала речь шла о создании квантовых приборов для работы лишь на самых коротких волнах ультракоротковолнового диапазона, теперь же их используют в оптическом диапазоне и инфракрасной части спектра электромагнитных волн.

С развитием науки и техники каждое новое достижение находит широкий отклик во все большем числе отраслей техники. Квантовые приборы, создававшиеся для связи и локации, становятся ныне незаменимым средством в астрономии, космонавтике и даже, как утверждают зарубежные специалисты, в решении проблем противоракетной обороны.

Трудно судить о том, как сложится дальнейшая судьба нового открытия, однако уже сейчас можно сказать, что создание атомных излучающих и усилительных устройств является революционным шагом в развитии многих отраслей техники, базировавшихся раньше лишь на возможности радиоэлектроники

ПЕРЕД НОВЫМИ ТРУДНЫМИ ЗАДАЧАМИ

Велик и многогранен прогресс современной радиоэлектроники. Она поистине вездесуща — ее методы используются и при исследовании необъятных просторов Вселенной и при изучении микромира и, в частности, атомного ядра. Радиоэлектронные устройства помогают людям водить корабли и самолеты в любых, самых сложных условиях, наблюдать за движущимися объектами, передавать изображения предметов и процессов не только на земные, но и космические расстояния (как это было с фотографией невидимой части Луны переданной на нашу планету советской автоматической межпланетной станцией).

Тому, кто со стороны следит за победным шествием радиоэлектроники в последние годы, может показаться, что эта отрасль науки и техники развивается беспрепятственно, не встречая трудностей и не требуя от ученых поисков новых путей. Однако это далеко не так.

Одной из коренных проблем радиоэлектроники считается необходимость обеспечить уверенный прием весьма слабых сигналов. Это важно во многих случаях и особенно при посылке сигналов к небесным телам и наблюдении отраженного сигнала, при улавливании радиоизлучений Солнца и звезд солнечной системы и т. д. Для того чтобы принимать слабые сигналы, нужны чрезвычайно чувствительные приемные устройства. Препятствуют созданию таких электронных устройств их собственные шумы. Дело в том, что наличие электрических флуктуаций во входных цепях и лампах радиоприемника принципиально ставит предел повышению его чувствительности. Эти флуктуации (так же как и принимаемые сигналы) усиливаются приемником, и, следовательно,

возможность приема сигналов определяется не их мощностью на выходе, а возможностью выделения этих сигналов на фоне усиленных электрических флуктуаций, которые обычно называют собственными шумами приемника.

Практически приходится считаться с шумами, возникающими в резонансных контурах, сопротивлениях, фидерных линиях, антеннах и радиолампах приемника. Во всех цепях, за исключением самих ламп, источником шумов служит тепловое движение заряженных частиц вещества. Это их беспорядочное движение равносильно электрическому току, меняющему свою величину и направление по сложному закону. Такой ток называют флуктуационным. Он создает на зажимах катушек индуктивности, сопротивлений и других элементов радиосхем флуктуационное напряжение даже при полном отсутствии внешних сигналов.

Шумы радиоламп появляются вследствие хаотичности вылета электронов с катода, что приводит к колебаниям величины тока в цепи лампы. При этом чем сложнее лампа, тем шумы больше. Так, уровень внутренних шумов в пятиэлектродной лампе в три—пять раз выше, чем в трехэлектродной. На очень высоких частотах начинает сказываться и такая причина шума, как влияние времени пролета электронов между электродами лампы. Чем больше частота колебаний и продолжительность пролета электронов, тем больший ток наводится в цепи сетки лампы, а он и вызывает шумы на выходе приемника.

В радиотехнике для характеристики уровня внутренних шумов усилителя используются два понятия: коэффициент шума и шумовая температура. Коэффициент шума показывает, во сколько раз реальный приемник ухудшает отношение уровня мощности полезного сигнала к уровню шумов по сравнению с воображаемым идеальным, совершенно не «шумящим» приемником. Величина коэффициента шума зависит от качества приемника и возрастает с частотой (или с укорочением длины волны). Так, если на частоте 200 Мгц коэффициент шума исчисляется несколькими единицами, то на частотах, превышающих $10\,000\text{ Мгц}$, он около 20. Очень часто коэффициент шумов выражают в логарифмических единицах измерения — децибелах (дб).

Оказалось, что коэффициентом шума пользоваться не всегда удобно, поэтому было введено понятие эффективной шумовой температуры. Смысл этого понятия состоит в том, что усилитель считается как бы бесшумным, а входному генератору приписывается эффективная температура, которая вызвала бы на выходе шум такой же величины. С какими уровнями шумов обычно имеет дело радиотехника, можно судить по тому, что шумы в обычных супергетеродинных приемниках на ультракоротких волнах составляют 6—7 дБ, а эффективная температура 1000°K. (Для характеристики шумов эффективная температура берется в градусах Кельвина. Это такая шкала температур, в которой за нуль принимается наинизшая возможная температура, лежащая на 273,16° ниже точки таяния льда.)

Так вот, электроника оказалась перед большими трудностями, когда встала задача дальнейшего повышения чувствительности усилителей. И трудности создавали собственные шумы. Казалось, помочь в этом деле конструкторам могли бы полупроводниковые приборы, получившие исключительно широкое применение в новейшей радиоэлектронике. Способствуют же они снижению расхода электроэнергии, повышению надежности, уменьшению габаритов радиоустройств. Но в отношении снижения шумов полупроводники оказались «бессильны». Чтобы заставить «замолчать» контуры и другие части приемников, необходимо их сильно охлаждать, но полупроводники, как и электронные лампы, не могут работать при низких температурах. Чтобы преодолеть возникшие трудности, потребовались принципиально новые устройства, которые дала, как мы увидим ниже, атомная радиотехника. Сейчас только отметим, что усилитель, основанный на индуцированном излучении атомов, может иметь шумы порядка 0,2 дБ ((эффективная температура всего 15°K). Сравните их с цифрами для обычного супергетеродина, и вы почувствуете колоссальную разницу.

Другая проблема, решение которой оказалось затруднительным для электроники, состояла в обеспечении высокой стабильности работы генераторов. Всем, у кого есть радиоприемники, знакомы явления «ухода» радиостанции с установленной волной, «наплыва» сигнала

лов одной станции на другую в результате недостаточной стабильности частоты генераторов передатчика. Это происходит от внешних воздействий на генератор, от изменений параметров деталей вследствие старения, от случайных изменений, вызываемых тепловыми флуктуациями. Весьма стабильными оказываются генераторы, у которых контуры обладают высокой добротностью, постоянством резонансной частоты. Наиболее ценными в этом отношении свойствами обладают некоторые кристаллы (кварц, турмалин). Их и используют в радиоэлектронике для стабилизации частоты генераторов. Разработаны схемы генераторов с кварцевыми кристаллами, частота которых изменяется за сутки не более, чем на одну миллиардную долю.

Но все дело заключается в том, что на сверхкоротких волнах, которые усиленно осваивает радиотехника сейчас, применение обычных схем стабилизации оказывается недостаточно эффективным.

И эту задачу позволяет успешно решать новая отрасль техники, исследующая и использующая кванты излучения атомов.

Насущной потребностью радиотехники является освоение наиболее высокочастотных участков электромагнитного спектра. Это диктуется необходимостью увеличения числа каналов связи, повышения направленности связи и постройки локаторов с возможно большей разрешающей способностью. Очень много новых требований возникло в результате начала освоения космоса (связь с космическими ракетами, слежение за их полетом, космическая навигация и т. д.).

Но если так нужны и полезны радиотехнике достижения квантовой радиофизики, то почему их не использовали раньше? Многие исследования, легшие в основу создания современных квантовых генераторов, парамагнитных и параметрических усилителей, были начаты в 20—30 годах нашего столетия. Так, в СССР в это время академики Л. И. Мандельштам, Н. Д. Папалекси и другие ученые подробно изучали параметрическое возбуждение и усиление электрических колебаний. В итоге была создана параметрическая машина Мандельштама и Папалекси, представлявшая собой генератор переменного тока и регенеративный усилитель.

Однако это и другие исследования не находили до последнего времени практического применения в радиотехнике. И вот почему. Для освоенных тогда диапазонов длинных, средних и коротких радиоволн не вставляли с такой остротой, как сейчас, проблемы снижения собственных шумов, увеличения чувствительности и др. Теперь же, когда радиотехника стала осваивать диапазон сверхвысоких частот, к которым относятся частоты, превышающие 30 Мгц, достижения квантовой радиофизики приходится ей как нельзя более кстати.

Для того чтобы уяснить себе, что это за новые радиодиапазоны, обратимся к спектру электромагнитных волн. На рис. 1 он показан в логарифмическом масштабе. Радиоволновая часть спектра охватывает волны длиной от 100 км до 0,5 мм. Волны длиной от 10 м до 0,5 мм называют ультракороткими. При этом волны от 1 до 10 м именуют метровыми, от 10 см до 1 м — дециметровыми, от 1 до 10 см — сантиметровыми и короче 1 см — миллиметровыми. За пределами радиоволнового диапазона начинается инфракрасный диапазон (0,5 мм — 0,76 мк). Затем идут оптический (0,76—0,38 мк) и ультрафиолетовый (0,38 мк — 50 Å) диапазоны. Вслед за этими диапазонами располагаются рентгеновые (50 Å 40 X) и гамма-лучи (40X—1 X).

Самые короткие волны электромагнитного спектра — это волны космического излучения. Они еще мало известны и сейчас усиленно изучаются.

Безусловно, переход к новым участкам электромагнитных волн был подготовлен всем ходом развития радиоэлектроники. Диапазон длинных волн был освоен в период с 1910 по 1925 год, а коротких и ультракоротких волн — с 1925 по 1940 год. С 1940 по 1960 год шли интенсивные работы, завершившиеся тем, что и диапазон ультракоротких волн был поставлен на службу радиотехнике. Теперь на повестке дня освоение миллиметрового, инфракрасного и оптического диапазонов, немыслимое без привлечения «сил» и возможностей атомной радиотехники.

Как известно, последовательное освоение радиотехникой все более коротких волн сопровождалось изменением конструкций радиопередатчиков, радиоприемников, усилителей, их узлов и деталей. Элементы радиоприемника

для длинных, средних и коротких волн мало похожи на такие же элементы для устройств ультракоротковолнового диапазона, а те в свою очередь — на квантовые приборы.

Уже при переходе на метровые волны были внесены конструктивные изменения в трех- и четырехэлектродные лампы: уменьшены размеры электродов; выводы сетки и анода разнесены — и все это для уменьшения «паразитных» межэлектродных емкостей. Для снижения индуктивности использовались широкие ленты с большой поверхностью или кольцевые выводы управляющей сетки. В качестве колебательных систем на метровых волнах применяются отрезки резонансных линий. Эти линии имеют большую добротность, чем контуры с сосредоточенными постоянными (с емкостью в виде конденсатора и индуктивностью в виде катушки).

В диапазоне дециметровых волн колебательными контурами часто служат отрезки коаксиальных линий или объемные резонаторы — замкнутые полости из хорошо проводящих материалов. Радиолампы конструктивно изменены, выводы у них — дисковые, электроды — плоскопараллельные, обеспечивающие круговое соединение элементов контура с лампой. Кроме того, на дециметровых волнах применяются специальные маячковые и металлокерамические лампы, магнетроны, клистроны, резонаторы. Для усилителей на дециметровом диапазоне также используются миниатюрные лампы типа желудь, маячковые, металлокерамические. На дециметровом и сантиметровом диапазонах начинают вместо ламп применять кристаллы.

Мы не будем объяснять особенности всех этих элементов радиоустройств ультракоротковолнового диапазона, так как они подробно описаны во многих книгах (см. список литературы в конце книги). Скажем только, что в устройствах, основанных на явлениях квантовой радиофизики, используются многие элементы обычной радиотехники — волноводы, резонаторы и т. д. Но есть у этих устройств и много нового, специфического, принципиально отличного. Особенно у тех из них, которые предназначены для получения усиления, преобразования и приема самых коротких радиоволн (миллиметровых), инфракрасных лучей и видимого света. Поэтому

создание молекулярных и атомных генераторов и усилителей можно считать новым этапом в развитии современной радиотехники.

Следует отметить, что излучение или поглощение волн разных участков электромагнитного спектра связано с различным характером движения частиц. Так, изменение энергии вращения молекулы приводит к излучению на ультракоротковолновом диапазоне. Движение электронов связано с излучением или поглощением видимого света, энергия колебаний атомов в молекуле соответствует инфракрасным волнам. Небольшая часть энергии вращательного и колебательного движений частиц связана с излучением коротких радиоволн (порядка сотен мегагерц).

Квантовые генераторы и усилители, работающие в диапазоне ультракоротких волн, получили за рубежом название мазеры. Мазер расшифровывают обычно так: устройство для усиления на СВЧ (сверхвысоких частотах) посредством индуцированного излучения. По аналогии, квантовые генераторы и усилители для инфракрасного диапазона стали именовать ирразерами и для светового диапазона — лазерами.

Квантовые приборы ультракоротковолнового диапазона по «возрасту» старше других своих «собратьев». История их возникновения такова. В 1951—1952 годах в итоге изучения процессов взаимодействия квантов электромагнитного поля с веществом была открыта принципиальная возможность применения квантовых систем для генерации и усиления электромагнитных волн (Физический институт им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР, Колумбийский университет в США).

1954—1955 годы ознаменовались созданием квантовых генераторов — молекулярных генераторов на пучке молекул аммиака (Физический институт им. П. Н. Лебедева — Н. Г. Басов и А. М. Прохоров; Колумбийский университет — Ч. Таунс, Дж. Гордон и Цайгер). В 1954 году пучок атомов цезия был использован для создания атомного стандарта частоты (Горвардский университет в США, Национальная физическая лаборатория в Англии). В том же году советские ученые предложили полупроводниковые параметрические усилители (Физический институт им. П. Н. Лебедева).

Принято, что квантовые усилители, основанные на использовании явления электронного парамагнитного резонанса, появились впервые в 1957—1958 годах (Физический институт им. П. Н. Лебедева, Горвардский университет и фирма «Белл-систем», США). В 1959 году были разработаны параметрические усилители (Институт радиотехники и электроники Академии наук СССР, фирма «Белл-систем», США).

Первым высказал идею использования энергии квантовых переходов для усиления и генерации колебаний советский физик В. А. Фабрикант в своей докторской диссертации, защищенной в Физическом институте Академии наук СССР в 1939 году и опубликованной в 1940 году.

Позднее, в 1951 году, В. А. Фабрикант, М. М. Вудинский и Ф. А. Бутаева разработали теорию оптических усилителей. В 1957 году Н. Г. Басов, Б. М. Вул и Ю. М. Попов исследовали возможность применения полупроводников для генерации инфракрасного излучения. В 1958 году А. М. Прохоров предложил новый тип резонатора, нашедший широкое применение для получения оптического и инфракрасного излучений. В конце 1960 и в начале 1961 годов были созданы первые квантовые генераторы в оптическом и инфракрасном диапазонах.

За выдающиеся работы в области квантовой радиопизики (создание молекулярных генераторов и усилителей) Н. Г. Басов и А. М. Прохоров удостоены Ленинской премии.

В настоящее время квантовые приборы ультракоротковолнового диапазона применяются уже на практике. Квантовые усилители, например, сантиметрового диапазона широко выпускаются промышленностью. В 1962 году в журналах появились сведения о выпуске промышленностью квантовых приборов оптического и инфракрасного диапазонов.

Следует ли считать, что квантовые генераторы и усилители инфракрасного и оптического диапазонов идут на смену соответствующим устройствам радиодиапазонов? Отнюдь нет. Квантовые генераторы и усилители, работающие на новых участках электромагнитного спектра, будут использоваться наряду с приборами ра-

диодиапазонов, умножая число эффективных технических средств в арсенале человечества.

РАДИОСПЕКТРОСКОПИЯ ВЕДЕТ РАЗВЕДКУ...

Советские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров как-то заметили, что «успехи квантовой радиофизики тесно связаны с достижениями радиоспектроскопии, которые послужили надежным фундаментом для развития этого нового раздела науки». То, что сделала радиоспектроскопия для возникновения и развития атомной радиотехники, можно определить как глубокую разведку, начатую задолго до того, как стали создаваться первые квантовые радиотехнические устройства.

В истории радиоспектроскопии ярко проявилась справедливость известных слов Ф. Энгельса о том, что «если у общества появляется техническая потребность, то она продвигает науку вперед больше, чем десяток университетов»¹.

Действительно, первые наблюдения и исследования в области радиоспектроскопии были выполнены еще до второй мировой войны. Так, более 30 лет назад было, например, высказано предположение о том, что спектральные линии аммиака (сейчас это вещество успешно используется в квантовой радиофизике) расположены в сантиметровом диапазоне. Но такие работы выглядели разрозненными и единичными. Резко возросшие потребности военного дела в развитии радиолокации двинули вперед и исследования в области радиоспектроскопии.

Среди других проблем в 40-е годы нашего столетия решалась задача изучения поглощения радиоволн в атмосфере. И здесь радиоспектроскопия доказала свою жизненность. Американские специалисты без предварительной «разведки» построили радиолокационную аппаратуру на длину волны 1,25 см. Работы ученых, в частности советского исследователя В. Л. Гинзбурга и американского специалиста Ван-Флека, показали, что радиоволны сантиметрового диапазона сильно поглощаются в атмосфере главным образом парами воды. В США решили отказаться от попыток применить постро-

¹ К. Маркс и Ф. Энгельс. Избранные письма. М., Госполитиздат, 1953, стр. 469.

енные радиолокаторы на волне 1,25 см, и это оборудование в дальнейшем было использовано для радиоспектроскопии.

В первый послевоенный год было опубликовано свыше двадцати материалов теоретических и экспериментальных исследований в области радиоспектроскопии. Не случайно от этого рубежа многие отсчитывают возраст радиоспектроскопии как самостоятельной отрасли радиофизики.

Каковы же основные направления «разведки», ведущейся радиоспектроскопией? Одно из них заключается в исследовании спектров поглощения газсв при помощи радиоволн сантиметрового диапазона. Радиоспектроскопия занимается также изучением спектров поглощения в жидких и твердых телах. Специальным разделом радиоспектроскопии считаются резонансные исследования в молекулярных и атомных пучках.

Поскольку в квантовой радиотехнике широко используются достижения всех трех направлений радиоспектроскопии, остановимся на них подробнее.

Начнем с исследования спектров поглощения газов при помощи радиоволн сантиметрового диапазона. Как изучаются и что дают они современной технике? Прежде всего вспомним важнейшие особенности оптической спектроскопии. Как известно, оптический спектр *излучения* вещества создают раскаленные пары этого вещества. Излучаемый ими свет собирается линзой и разлагается призмой в спектр, который наблюдается на экране осциллоскопа или фиксируется на фотопластинке. Оптический спектр *поглощения* получается пропусканием света, испускаемого электрической дугой, через исследуемое вещество: по уменьшению яркости различных участков спектра судят о спектре поглощения вещества.

Радиоспектроскоп принципиально устроен по-иному (рис. 2). Берется генератор радиоволн, чаще всего отражательный клистрон, у которого очень удобно регулируется частота. Он дает колебания узкого спектра частот (по аналогии с оптическими колебаниями их называют монохроматическими или одноцветовыми). Колебания, вырабатываемые клистроном, направляются в поглощающую ячейку, наполненную исследуемым газом. Поглощающей ячейкой служит часть волновода,

закрытая с обоих концов слюдяными окошками. Длина волновода обычно колеблется от одного до нескольких метров.

Полупроводниковый детектор служит индикатором степени поглощения радиоволн данным газом. После детектора колебания усиливаются и подводятся к осциллографу, на экране которого можно видеть всю картину поглощения.

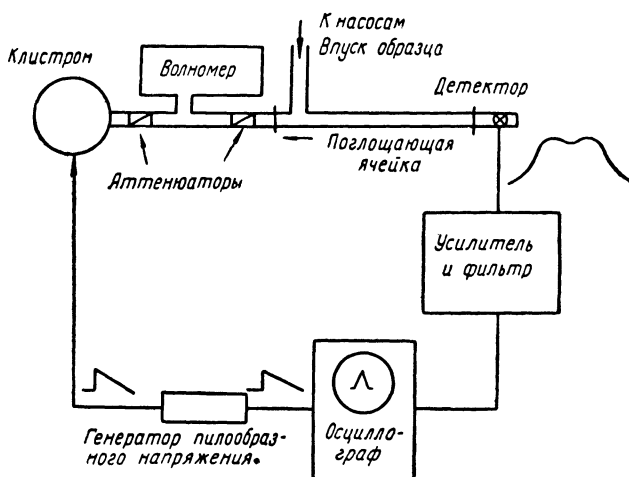


Рис. 2. Принципиальная схема радиоспектроскопа.

Управляют частотой клистрона подачей пилообразного напряжения. Оно же подводится и к горизонтальным пластинам осциллографа. Таким образом, каждой точке развертки соответствует определенная частота колебаний, генерируемых клистроном.

На экране наблюдается контур резонансной линии поглощения. Мощность излучения клистрона, подводящая к газу, регулируется с помощью аттенюатора (в переводе с латинского «аттенюатор» означает «ослабитель», в технике этим термином называют делитель напряжения, мощности). Величина подводимой мощности составляет обычно десятки и сотни микроватт. В случае применения больших мощностей наступает эффект насыщения, когда величина максимально поглощаемой

мощности остается постоянной, но происходит расширение наблюдаемой спектральной линии.

Пока частота колебаний клистрона далека от спектральной линии, поглощение мало. С приближением к этой линии оно резко возрастает и потом также резко падает, образуя своеобразный пик. На рис. 3 показана кривая зависимости мощности, попадающей на детектор, от частоты для случая, когда в качестве исследуемого газа взят аммиак. Это линия спектра поглощения аммиака. Всплески кривой с двух сторон пика объясняются влиянием ядер атомов на процесс поглощения. Эти всплески называют спутниками.

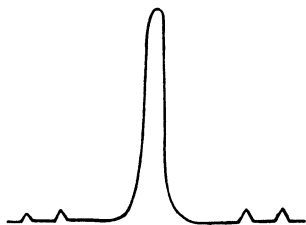


Рис. 3. Кривая резонансного поглощения аммиака.

Почему же кривая, именуемая спектральной линией, имеет значительную ширину? Казалось бы, речь идет о поглощении или излучении атомами (или молекулами) квантов энергии, которые имеют строго определенную величину и соответствуют строго определенной частоте. По идее должна была бы получиться предельно узкая спектральная линия.

Но на практике берут не отдельные изолированные атомы и молекулы, а большое число их, взаимодействующих друг с другом и с окружающими частицами. В результате этого взаимодействия, т. е. влияния теплового движения, происходит излучение различных квантов, проявляется известный разброс частот и спектральные линии уширяются. Этот разброс частот при атмосферном давлении так велик, что спектральные линии не удается рассмотреть отдельно. Требуется снизить давление до сотысячной доли атмосферы, чтобы добиться возможности такого наблюдения.

Может быть, снижая давление исследуемого газа, удастся избежать уширения спектральной линии? Оказывается, целиком избежать его нельзя. Во-первых, остается возможность столкновений атомов и молекул со стенками сосуда, в котором находится газ. Во-вторых, сказывается влияние так называемого эффекта Доплера.

Эффект Допплера проявляется в том, что на величину частоты электромагнитных волн, излучаемых или поглощаемых молекулами, влияют скорости их движения относительно наблюдателя. Вспомним классический пример с наблюдателем и паровозом: тон гудка приближающегося паровоза заметно повышается. При удалении же паровоза от наблюдателя тон понижается.

Частота электромагнитных колебаний также повышается при сближении источника и наблюдателя и понижается при удалении. Поскольку молекулы в газах движутся хаотически и все направления их движения одинаково вероятны, то уширение спектральных линий, вызванное эффектом Допплера, получается симметричным относительно частоты определяемой энергетическим спектром молекулы. Такое уширение не порождает систематических ошибок в определении частоты спектральной линии, но затрудняет измерения и может вызвать появление нежелательных случайных ошибок.

Безусловно, эффект Допплера сказывается тем сильнее, чем выше температура, а значит, и скорость движения молекул. Охлаждение испытываемых газов в определенной степени помогает сузить спектральные линии.

На ширине спектральной линии сказывается и эффект насыщения, о котором уже упоминалось. Этот эффект заключается в следующем. В результате поглощения монохроматического излучения сверхвысоких частот нарушается тепловое равновесие между различными энергетическими состояниями. При низких давлениях исследуемых газов и высоких плотностях энергии излучений отклонение от теплового равновесия настолько велико, что скорость поглощения газом энергии становится независимой от ее плотности. Это и есть эффект насыщения. В обычных условиях скорость поглощения пропорциональна плотности падающей энергии. Эффект насыщения ведет к уширению спектральной линии.

Изучение спектров газов позволяет сделать вывод, важный для квантовой радиофизики. Как известно, при создании генераторов необходимо обеспечить возможно более высокую стабильность их частоты. Для этого и используют газы, имеющие узкие спектральные линии.

Перейдем ко второй задаче радиоспектроскопии. Для ее решения используется явление парамагнитного резонанса.

Открыт парамагнитный резонанс в 1944 году советским ученым Е. К. Завойским, а предсказан он был еще раньше, в 1923 году, также советским ученым Я. Г. Дорфманом.

Прежде всего поясним, что такое парамагнетизм. Этим термином характеризуется совокупность магнитных свойств тел, имеющих положительную магнитную восприимчивость, т. е. магнитное поле вызывает в этих телах дополнительное поле, совпадающее с внешним полем. Парамагнитные тела притягиваются к магнитным полюсам. Стержень или игла из парамагнитного материала располагается вдоль силовых линий внешнего магнитного поля.

К парамагнитным относятся такие вещества, как молекулярный кислород (O_2), окись азота (NO), металлы (никель, кобальт, хром), щелочные металлы, соли железа и редких земель.

Как известно, микрочастицы парамагнитного вещества обладают магнетизмом за счет собственного движения. Характеристикой этого движения элементарной частицы может служить собственный момент количества движения, или, как говорят в ядерной физике, спин. Иногда спином характеризуют движение в целом атома и его ядра. Известный ученый Дирак в 1925 году установил, что спин электрона равен $1/2$. Оказалось, что таким же моментом количества движения обладают и другие частицы — протон, нейтрон, нейтрино, мю-мезон. Элементарной частице света — фотону — приписывают спин, равный единице. У пи-мезона спин равен нулю. С величиной спина частицы тесно связан, точнее пропорционален, ее магнитный момент.

В явлении парамагнитного резонанса наибольшую роль играют магнитные моменты электронов атома. Причем магнитный момент имеют лишь те атомы, которые содержат одну или две незаполненные оболочки. Именно такими и являются атомы вышеперечисленных парамагнитных веществ. Атомы, имеющие результирующий магнитный момент, могут располагаться либо против поля (в случае, если они имеют более высокий уровень энергии), либо по полю, когда они имеют меньшую энергию. Переход атома из первого положения во второе связан с излучением кванта энергии, а обратный переход — с поглощением кванта энергии. С подобным поглощением и связан парамагнитный резонанс.

Парамагнитный резонанс наблюдается при наложении на парамагнитное вещество двух взаимно-перпендикулярных магнитных полей: сильного постоянного и слабого переменного. Наступает он, когда величина квантов энергии переменного поля равна разности между соседними энергетическими уровнями атомов парамагнитного вещества в постоянном поле. Выражается это явление в резко возрастающем, как говорят, резонансном поглощении энергии переменного поля веществом.

Резонансное поглощение происходит, если выполняется соотношение

$$f_{\text{ч}} = g \frac{e}{4\pi m} B,$$

где $f_{\text{ч}}$ — частота высокочастотного поля, B — магнитная индукция постоянного поля, e — заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ кулонс), m — масса электрона ($9 \cdot 10^{-31}$ кг) и g — множитель, равный примерно 2. Если постоянное магнитное поле имеет индукцию $B \approx 0,3$ вебер/м², то частота $f_{\text{ч}}$ равна 10^4 МГц. Поглощение происходит не только строго на частоте $f_{\text{ч}}$, но и на частотах, близких к ней.

Линия парамагнитного поглощения расщепляется на несколько компонентов. Спектральные линии, обусловленные парамагнитным поглощением, имеют вид резонансной кривой, знакомый всем из основ электротехники и радиотехники.

Практически для наблюдения такой спектральной линии применяют спектроскопы, в которых меняется не частота настройки источника колебаний, а напряженность магнитного поля. Как уже отмечалось, частота парамагнитного резонанса пропорциональна магнитной индукции или напряженности магнитного поля. Менять напряженность поля легче, чем перестраивать, например, клистрон и объемный резонатор, в который помещают испытываемое парамагнитное вещество.

Спектроскоп (рис. 4) состоит из клистрона, объемного резонатора с кристаллом внутри и детектора как индикатора поглощения. Напряжение, возникающее в детекторе, усиливается и подводится к осциллографу. На горизонтальные пластины этого прибора подается напряжение, осуществляющее модуляцию магнитного поля. Магнитное поле, в котором помещен образец, в резуль-

тате модуляции меняется в пределах нескольких эрстед и на экране осциллоскопа можно видеть спектральную линию парамагнитного резонанса.

Изучение резонансных кривых поглощения дает возможность судить об основных состояниях атомов парамагнитного вещества, об электрических полях в кристалле, в котором расположены атомарные магниты, и о

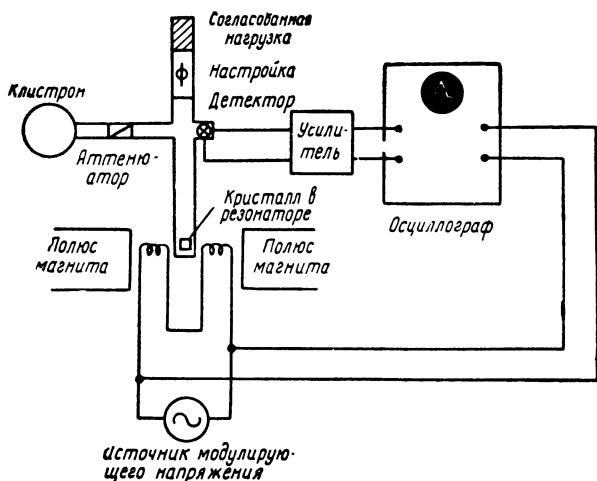


Рис. 4. Спектроскоп для исследования электронного парамагнитного резонанса.

поведении в этих полях электронных орбит. Исследование парамагнитного резонанса стало поистине мощным средством изучения твердого тела.

Особый интерес представляют тонкая и сверхтонкая структуры линий парамагнитного резонанса. Тонкая структура объясняется действием неоднородного внутреннего электрического поля кристаллов. Сверхтонкая структура является результатом взаимодействия электронного и ядерного спинов парамагнитных атомов и позволяет определять спины и магнитные моменты ядер. Наблюдается сверхтонкая структура при так называемом ядерном резонансе.

Оказалось, что не только электроны обладают собственным магнитным моментом. Его имеет и ядро — прав-

да, величина магнитного момента ядра в тысячи раз меньше, чем электрона. Но магнитный момент ядра оказывает свое влияние на картину парамагнитного резонанса: вершина резонансной кривой распадается на ряд максимумов. Это и есть сверхтонкая структура. Число максимумов не случайно, а на единицу больше удвоенного значения спина ядра. На рис. 5 показаны спектральные линии парамагнитного резонанса для водного раствора сернокислого марганца при комнатной температуре, на которых заметно влияние ядерных магнитных моментов. Кривые даются для различных концентраций раствора. Как можно видеть, с увеличением концентрации линии расширяются.

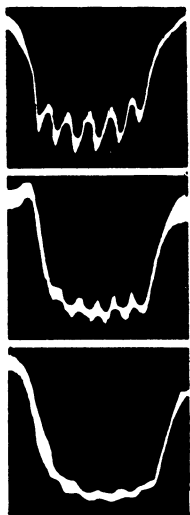


Рис. 5. Спектральная линия электронного парамагнитного резонанса для водного раствора сернокислого марганца (видны колебания, вызванные влиянием ядерных магнитных моментов).

Спектральные линии ядерного резонанса получаются с помощью спектрометров специальных конструкций. Дело в том, что этот резонанс наблюдается в коротковолновом диапазоне, поэтому не обязательно применять для его исследования объемные резонаторы, а можно использовать катушки индуктивности обычных радиотехнических контуров. Следует отметить, что спектральные линии ядерного резонанса имеют меньшую ширину, чем линии электронного парамагнитного резонанса. Исследование ядерного резонанса позволяет «заглядывать» внутрь атомов, исследовать их строение и создавать практически ценные методы и приборы.

Основная цель изучения парамагнитного резонанса — получение характеристик материалов, которые могут использоваться для создания квантовых усилителей и генераторов. Методика и приборы для исследований парамагнитного резонанса те же, что применяются и при исследовании квантовых усилителей и генераторов на твердом теле. А уже построенные квантовые усилители

обязательно проходят проверку на резонансное поглощение.

В качестве общего вывода можно сказать, что спектральные линии парамагнитного резонанса имеют весьма большую ширину, и это явление, как мы увидим далее, может быть положено в основу создания широкополосных усилителей.

Еще одно направление — радиоспектроскопия пучков молекул и атомов — отличается от радиоспектроскопии газов тем, что величина взаимодействия с электромагнитным полем определяется не по изменению этого поля, а по тому, какое количество частиц долетит до детектора. Это означает, что воздействуют на пучок молекул или атомов электромагнитным полем. По интенсивности потока частиц, доходящих до детектора, судят о спектре поглощения.

Установка для резонансного исследования, например, магнитного момента ядер в пучке частиц, представляет собой обычно трубу с выкачанным из нее воздухом. Желателен такой вакуум внутри трубы, чтобы давление в ней не превышало одной миллиардной доли атмосферы. Для получения частиц служит спектральная «печь», из которой частицы выпускаются в трубу и движутся, не сталкиваясь друг с другом. Попадая в трубу, частицы расходятся. Поэтому на их пути ставится щель, выхватывающая те из них, которые движутся в одном узком пучке. Только эти частицы и попадают в рабочую часть.

В рабочей части на частицы последовательно воздействуют сначала неоднородное магнитное поле, затем электромагнитное поле высокой частоты и, наконец, еще одно неоднородное магнитное поле. И лишь после этого те из них, которые остались в пучке, достигнут детектора. Количество частиц, достигающих детектора, зависит от частоты электромагнитного поля: если она далека от резонансной, частицы пучка не взаимодействуют с электромагнитным полем. С приближением частоты к резонансной начинается взаимодействие, достигающее максимума в момент резонанса. Спектральная линия цезия, полученная при помощи атомного пучка, даже когда частицы практически не взаимодействуют друг с другом, получается заметной ширины. Это зависит от того, что время взаимодействия частиц с полем невелико. Было предложено пропускать частицы дважды через одно и

то же электромагнитное поле, действующее не на одном участке полета частиц, а на двух. Этот метод способствует значительному сужению спектральных линий. Один из ученых наблюдал, например, спектральные линии, ширина которых равнялась двадцати миллиардным долям частоты.

Для резонансного исследования пучков атомов щелочных металлов создан оригинальный детектор с поверхностной ионизацией. Эта установка основана на том, что атом щелочного металла, попадая на раскаленную вольфрамовую нить, ионизируется и покидает эту нить в виде положительного иона, оставив ей электрон. Вблизи вольфрамовой нити помещается отрицательный электрод, собирающий положительные заряды. Если нить и электрод соединены в единую цепь, в ней при появлении атомов щелочного металла течет ток. Добавив к такому детектору электронный умножитель, можно обнаруживать даже единичные атомы щелочных металлов. Вот какую высокую точность может обеспечивать радиоспектроскопия пучков атомов!

При резонансном исследовании пучков молекул и атомов можно брать за основу не только магнитные моменты частиц, но и электрический дипольный момент. Речь идет в этом случае о молекулах электрически нейтральных, но имеющих смещенные в пространстве друг относительно друга положительный и отрицательный заряды. В неоднородном электрическом поле силы, действующие на заряды, могут оказаться неравными и молекула будет либо втягиваться в область более высокой напряженности, либо выталкиваться из нее. Значит, траектория полета молекулы, обладающей электрическим дипольным моментом, в таких условиях искривляется. Заменив соответственно магнитные поля электрическими, можно исследовать описанными здесь методами пучки частиц и получать их спектры.

Работы специалистов по радиоспектроскопии в области резонансного исследования пучков частиц имели чрезвычайно большое значение для квантовой радиофизики. Не случайно первый квантовый генератор был выполнен именно на пучке молекул одного из веществ (аммиака).

Но было бы ошибкой думать, что радиоспектроскопия «разведывает» новое исключительно в интересах кванто-

вой радиофизики. Данные, добываемые радиоспектроскопией, интересны и для физики элементарных частиц, химии (особенно для тех ее разделов, где изучаются закономерности образования химических соединений, структуры молекул), астрономии, космонавтики и многих других наук.

ВОЗБУЖДЕНИЕ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ

Рассказывая о радиоспектроскопии, мы говорили о резонансном поглощении квантов энергии. Но рассмотрением этого процесса ограничиться нельзя, так как в основе работы молекулярных генераторов и парамаг-

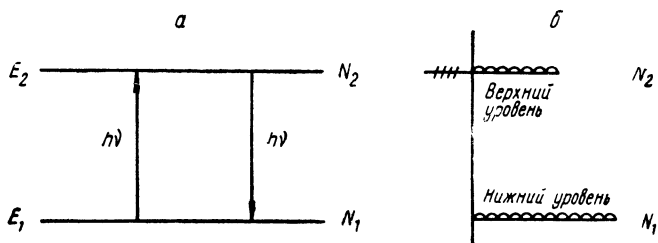


Рис. 6. Квантовая система с двумя энергетическими уровнями (а) и график распределения частиц по энергетическим уровням (б).

нитных усилителей лежит другой процесс — *индуцированное излучение* возбужденных квантовых систем, т. е. излучение, вызванное внешним электромагнитным полем.

Чтобы лучше уяснить этот процесс, вернемся еще раз к резонансному поглощению. Представим себе квантовую систему, имеющую два энергетических состояния, или, как еще говорят, два энергетических уровня (верхний и нижний на рис. 6,а). Рассмотрим частицу, находящуюся на нижнем энергетическом уровне E_1 . Пусть на систему действует внешнее электромагнитное поле. Система может поглотить квант энергии поля и перейти на верхний энергетический уровень E_2 . Это будет сопровождаться уменьшением энергии поля, т. е. произойдет резонансное поглощение.

Для большей наглядности рассмотрим этот процесс на примере самых легких атомов — атомов водорода.

Мы уже говорили, что магнитный момент электрона во много раз больше магнитного момента ядра. Поэтому будем вести речь только об электронном магнитном моменте атома водорода. Если на этот атом воздействовать магнитным полем, то он будет иметь лишь две ориентации в этом поле: «по полю» и «против поля», причем первая ориентация соответствует нижнему энергетическому уровню, а вторая — верхнему. При наличии излучения с резонансной частотой атом с ориентацией «по полю» поглотит энергию этого излучения и получит ориентацию «против поля», т. е. поднимется на верхний энергетический уровень.

Но возможен и обратный процесс: под действием того же излучения атом, ориентированный «против поля», т. е. находящийся на верхнем энергетическом уровне, перейдет на нижний энергетический уровень. При этом произойдет индуцированное испускание кванта, и энергия внешнего поля увеличится. Вот этот-то процесс и представляет особый интерес для атомной радиотехники.

Для квантовой системы с двумя энергетическими уровнями — верхним E_2 и нижним E_1 — частота, при которой совершаются переходы между энергетическими уровнями, определяется формулой

$$h\nu = E_2 - E_1,$$

где h — постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг.сек,
 ν — частота излучения, Мгц.

Вероятности резонансного поглощения и индуцированного излучения в процессе взаимодействия электромагнитного поля и вещества одинаковы. Следовательно, в среднем в природе нет процесса усиления электромагнитного поля.

Правда, при рассмотрении равновесия между молекулами и квантами поля надо учитывать и третий процесс — так называемое спонтанное (самопроизвольное) излучение, вызываемое самопроизвольным переходом частицы на нижний уровень. Оно происходит при отсутствии внешнего электромагнитного поля. Это излучение обуславливает свечение нагретых тел, люминесценцию и другие физические явления

Но вернемся к индуцированному излучению. Каким образом можно нарушить равновесие процессов излучения и поглощения в квантовой системе для усиления внешнего поля? Чтобы яснее представить себе, как это сделать, введем и поясним новое понятие — населенность энергетических уровней.

Для газа, имеющего два энергетических уровня, распределение молекул на них можно характеризовать простым соотношением, именуемым формулой Больцмана:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-h\nu/kT}$$

где N_1 — число молекул с энергией E_1 , N_2 — число молекул с энергией E_2 ;

k — постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град);

e — основание натурального логарифма, равное 2,7;

T — абсолютная температура газа.

Пусть теперь газ помещен в сосуд с отражающими излучение стенками. Стенки в зависимости от их температуры излучают определенное количество квантов, которые вызывают как индуцированное излучение, так и резонансное поглощение. Когда наступает равенство температур газа и стенок, количество излученных и поглощенных квантов становится одинаковым, т. е. в такой квантовой системе устанавливается динамическое равновесие. При этом, согласно формуле Больцмана, данной температуре будет соответствовать вполне определенная населенность уровней: на верхнем уровне она меньше, а на нижнем больше (см. рис. 6,б). Разница в населенности зависит от различия энергии уровней и от температуры. Для сантиметрового диапазона волн, например, разность числа молекул на уровнях очень мала и составляет тысячную долю общего количества частиц.

Поскольку при воздействии внешнего поля на нижнем уровне находится больше частиц, процесс резонансного поглощения преобладает над индуцированным излучением. Энергия поля полностью переходит в тепловое движение и устанавливается новое равновесное состояние, соответствующее более высокой температуре. В соответствии с формулой Больцмана увеличивается

число молекул на верхнем уровне и уменьшается на нижнем.

Если напряженность действующего на газ внешнего поля велика, то может произойти эффект насыщения. В отношении населенности энергетических уровней он будет означать, что число молекул на верхнем и нижнем уровнях станет одинаковым, а количество поглощенных квантов будет определяться числом столкновений молекул независимо от величины внешнего поля. Этот эффект легко достигается в радиочастотном диапазоне.

Итак, при тепловом равновесии квантовая система поглощает падающие на нее кванты излучения. Значит, надо нарушить это равновесие, добиться изменения населенности энергетических уровней, сделать так, чтобы на верхнем уровне было больше частиц, чем на нижнем. Тогда индуцированное испускание превысит резонансное поглощение, т. е. внешнее поле, приложенное к системе, усилится.

Как можно этого достичь, узнаем позже. Сейчас же опять воспользуемся формулой Больцмана и путем алгебраических действий из выражений для двух уровней получим значение температуры T

$$T = - \frac{E_2 - E_1}{k \ln \left(\frac{N_2}{N_1} \right)}$$

Займемся простым математическим анализом. Поскольку энергия верхнего уровня больше энергии нижнего, числитель дроби всегда будет положительным. В знаменателе натуральный логарифм отношения чисел частиц, находящихся на втором и первом уровнях, в обычных условиях отрицателен, так как населенность первого уровня больше второго.

Следовательно, температура при условии теплового равновесия положительна. Нам же надо, чтобы в системе N_2 было больше N_1 . Значит, знаменатель должен быть положительным, а температура отрицательной.

Создать квантовую систему с отрицательной температурой — это значит достичь в ней преобладания инду-

цированного излучения над поглощением. Разумеется, такие системы неустойчивы, время их существования при отсутствии взаимодействия частиц и влияния квантов для оптического диапазона составляет малые доли секунды ($10^{-8} \div 10^{-10}$ сек). Правда, для сантиметрового диапазона время существования квантовых систем с отрицательной температурой уже составляет миллион секунд или около 300 часов, а это свидетельствует уже о реальной возможности создания таких систем в сантиметровом диапазоне.

Теперь нам надо познакомиться с еще одним процессом, который имеет место в квантовых системах при нарушении их теплового равновесия. Предположим, мы повысили температуру стенок сосуда, куда заключены молекулы. Ударяясь о стенку, они будут больше получать энергии, чем отдавать. Средняя энергия молекул возрастает, и через некоторое время система придет к новому равновесному состоянию, соответствующему высшей температуре.

Оклонение системы от равновесия может быть достигнуто и при низменной температуре, когда тем или иным способом увеличивается энергия одних молекул за счет других. В дальнейшем и эта система в процессе обмена энергией между частицами вновь приходит к равновесному состоянию, так же как заряженный конденсатор через некоторое время разряжается. Известно, что процесс разряда конденсатора через сопротивление именуется релаксационным. По аналогии релаксационным называется и процесс возвращения квантовой системы с отрицательной температурой в равновесное состояние. Время, за которое наступает равновесие, называют временем релаксации. Понятно, что это время должно быть достаточно большим, чтобы процесс перехода частиц на верхний уровень преобладал над возвратом системы к равновесию.

Итак, микросистема будет излучать, если населенность верхнего энергетического уровня окажется больше, чем нижнего, и не просто больше, а на определенную величину. Кроме того, необходимо внешнее воздействие, вызывающее переход частиц на высший уровень, и достаточно большое время релаксации вещества, избранного для получения индуцированного излучения и называемого активным.

ПУЧОК—ГЕНЕРАТОР? ДА!

Пучок... Простое, знакомое нам с детства слово. Пучок травы. Пучок огненных искр, отлетающих от круглого наждачного камня при точке ножей... Постепенно это слово все чаще появляется на страницах научно-технических книг и журналов. С ним связано создание одного из замечательнейших устройств радиоэлектроники—электронно-лучевой трубки. Главной ее особенностью является наличие пучка электронов, который в телепередатчике преобразует элементы изображения в электрические сигналы, а в приемнике, наоборот, по полученным сигналам воссоздают изображение на экране. Нет необходимости перечислять работу, которую совершает пучок электронов в индикаторе радиолокатора, в замедляющей системе радиолампы с бегущей волной, в клистроне...

Когда перед учеными стал вопрос о том, как осуществить отделение возбужденных частиц — молекул, атомов — от невозбужденных и получить таким образом систему с отрицательной температурой родилась смелая мысль — воспользоваться свойством пучка. В самом деле, ведь удастся нам получить пучок электронов! Почему же нельзя получить пучок возбужденных молекул атомов?

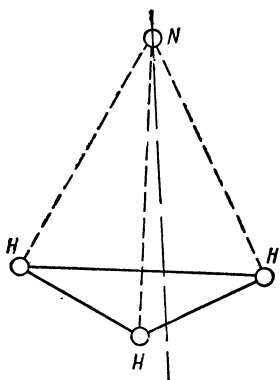


Рис. 7. Структура молекулы аммиака (NH_3).

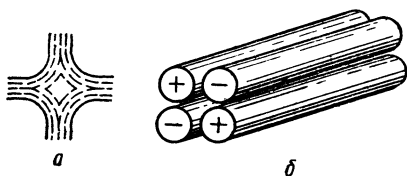


Рис. 8. Схема поля (а) и устройство (б) квадрупольного конденсатора.

Для создания первого квантового генератора был выбран аммиак. Его спектр давно хорошо изучен. Молекулы аммиака принадлежат к типу симметричного волчка. Структура такой молекулы схематично изображена

на рис. 7. Атомы водорода находятся в одной плоскости и вращаются каждый вокруг своей оси. Атом азота совершает колебательные движения вдоль линии, перпендикулярной плоскости атомов водорода.

Как же увеличить населенность молекулами аммиака верхнего энергетического уровня? Наиболее эффективным методом, осуществленным на практике, оказалось применение электрического поля определенной конфигурации для разделения молекул аммиака, движущихся в пучке и имеющих разные энергетические состояния. Дело в том, что молекулы, находящиеся на верхнем уровне, отклоняются в область с меньшей напряженностью, а молекулы, находящиеся на нижнем уровне, отклоняются в область поля большей напряженности.

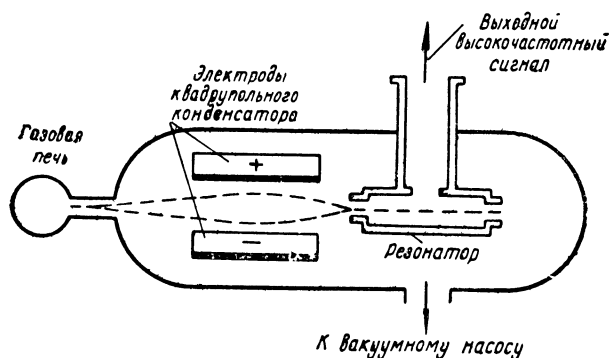


Рис. 9. Схема генератора на пучке молекул аммиака.

Для создания разделяющего поля применяют так называемый квадрупольный конденсатор, схема поля и устройство которого показаны на рис. 8. Напряженность создаваемого этим конденсатором электрического поля уменьшается от пластин к оси. Поэтому, проходя через такой конденсатор, молекулы, находящиеся на верхнем энергетическом уровне, собираются вдоль его оси, а находящиеся на нижнем уровне — отклоняются к электродам. Возбужденные молекулы «фокусируются» и направляются в объемный резонатор, настроенный на частоту их перехода с верхнего уровня на нижний (рис. 9).

Безусловно, нельзя думать, что в резонатор попадут только молекулы, находящиеся на верхнем энергетическом уровне. Один ученый подсчитал, что в резонатор попадает около шести процентов невозбужденных частиц, но в целом там оказывается достаточно молекул с верхним энергетическим уровнем, чтобы могло осуществляться усиление.

В объемный резонатор, куда поступают молекулы, находящиеся на верхнем энергетическом уровне, направляется радиоволна сантиметрового диапазона длиной около 1,25 см. Поскольку частота этой волны (23 870 Мгц) будет соответствовать частоте перехода молекул аммиака с верхнего уровня на нижний, она будет усиливаться, как бы «забирать» кванты индуцированного излучения. Следует отметить при этом, что квант энергии, испускаемый молекулой в начале ее пути в резонаторе, отразившись от стенок, может быть поглощен той же молекулой или другими частицами и вновь испущен, прежде чем они покинут пределы резонатора. Значит, за счет отражений квантов энергии от стенок резонатора здесь осуществляется процесс обратной связи. В этом отношении молекулярный усилитель напоминает обычные ламповые усилители, называемые регенеративными. У них тоже цепь обратной связи «отражает» часть энергии из анодной цепи в цепь сетки. Как известно, чрезмерное увеличение обратной связи переводит регенеративный ламповый усилитель в режим регенерации. Молекулярный усилитель также может стать генератором.

Как происходит самовозбуждение генератора на пучке молекул? Некоторые молекулы, влетев в резонатор, настроенный на резонансную частоту (23 870 Мгц, длина волны 1,25 см), под действием всегда имеющегося там теплового излучения совершают переход на нижний энергетический уровень, испуская при этом кванты энергии. В начальный момент могут сыграть свою роль и кванты спонтанного испускания. Все эти кванты, отражаясь от стенок резонатора, вызывают (индуцируют) переходы на нижний уровень других молекул. Поэтому появляются новые кванты энергии, которые в свою очередь отражаются от стенок, вызывают новые переходы с испусканием и так, что колебания в резонаторе лавинообразно нарастают. Происходит самовозбуждение ге-

нератора. Установившиеся колебания отводятся из объемного резонатора по волноводу.

Процесс самовозбуждения молекулярного генератора также можно сопоставить с привычным нам ламповым генератором. Вспомним, что в схеме с лампой колебания тоже начинались за счет тепловых флуктуаций, существующих в любом контуре. Эти колебания попадают на сетку лампы, усиливаются и по цепи обратной связи подаются на вход лампы. При коэффициенте усиления, большем единицы, и правильной подаче на сетку усиленного напряжения в схеме возникают колебания той частоты, на которую настроен контур.

В молекулярном генераторе роль лампы играет пучок молекул. Он же представляет собой и нечто вроде контура. А резонатор, как отмечалось выше, играет роль цепи обратной связи, возвращающей к пучку кванты, которые взаимодействуют с другими молекулами и вызывают новые переходы.

Процесс самовозбуждения возможен лишь при достаточной добротности резонатора (меньше потерь, лучше отражение энергии), при наличии необходимого количества молекул и соответствующей ориентации высокочастотного поля в резонаторе.

В одном из исследований применили генератор с такими исходными данными: диаметр резонатора около 1 см, длина 12 см, добротность 10^4 . Для генератора требовался пороговый поток молекул, при котором устанавливаются колебания 10^{13} молекул в секунду. Специалистам удалось создать источник, способный дать 10^{16} молекул в секунду. Это вполне обеспечивало генерирование энергии пучком молекул аммиака на частоте 23 870 Мгц.

Наблюдая за работой генератора, ученые установили, что с увеличением потока молекул по сравнению с тем, при котором начинается генерация, пропорционально растет выходная мощность генератора, но это происходит до некоторого предела, а затем рост мощности замедляется. Чтобы можно было представить себе, с какими величинами мощности имеют дело радиофизики, сошлемся на данные о квантовых генераторах, выпускаемых одной американской фирмой. Эти генераторы имеют выходную мощность 10^{-10} вт. Вообще же считаются достижимыми мощности порядка 1 мм квт. Огра-

ничивает возможности в этом отношении трудность получения молекулярных пучков с высокой плотностью.

Получить высокую интенсивность пучка сложно потому, что молекулам «запрещено» взаимодействовать друг с другом, чтобы обеспечить узкую спектральную линию и высокую стабильность частоты генератора. А для этого молекулы должны вылетать из отверстия источника независимо друг от друга. Значит, давление в источнике нельзя брать большим, иначе молекулы будут соударяться и пучок превратится в струю. Нецелесообразно повышать интенсивность пучка и за счет увеличения отверстия источника, так как это также может привести к соударениям молекул. Единственный путь увеличения интенсивности пучка — это замена одного отверстия решеткой из множества мельчайших отверстий, каждое из которых настолько мало, что из него вылетает не струя, а пучок молекул. Выбор наилучшей решетки — одна из наиболее важных задач при создании молекулярного генератора.

Современная конструкция источника ионов обеспечивает мощность пучка в миллиард миллиардов молекул в секунду. Поступление такого огромного количества газа ставит перед конструкторами трудную задачу по его удалению. Откачивать газ насосами — слишком сложное дело. Поэтому эффективное действие генератора обеспечивается поддержанием вакуума методом вымораживания отработанных молекул аммиака, который замерзает при температуре -78°C . Вымораживание производится с помощью жидкого азота (-196°C), причем отработанные молекулы собираются на поверхности металлического радиатора.

Замечательной особенностью квантового генератора на пучке молекул аммиака является чрезвычайно высокая стабильность частоты: по данным зарубежных специалистов относительная нестабильность ее не превышает 10^{-10} .

В СССР в Физическом институте им. П. Н. Лебедева построен молекулярный генератор на пучке молекул аммиака, показанный на рис. 10. Он состоит из трех частей: источника молекулярного пучка, устройства для сортировки молекул и объемного резонатора. В камеру источника вводится технический аммиак под давлением $0,1 \text{ мм рт. ст.}$ Пучок формируется с помощью решетки

из фольги с отверстиями размером $0,05 \times 0,05$ мм и охлаждаемой жидким азотом диафрагмы с 5-миллиметровым отверстием. Все части генератора заключены в кожух, где давление поддерживается около одной миллионной доли миллиметра ртутного столба.

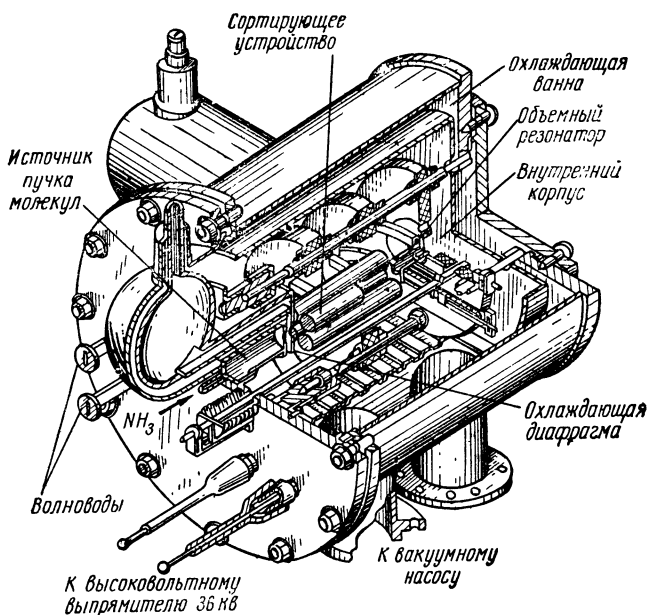


Рис. 10. Устройство генератора на пучке молекул аммиака, построенного в Физическом институте им. П. Н. Лебедева.

Стабильность генератора достигает нескольких единиц тринадцатого десятичного знака. Спектральная линия, используемая в этом генераторе, имеет весьма малую ширину — 1 кГц при частоте колебаний 24 000 МГц. Советские ученые установили, что на частоту квантового генератора влияют собственная частота объемного резонатора, интенсивность пучка молекул, напряжения на квадрупольном конденсаторе и другие факторы.

В отличие от устройств с пучком электронов (клистрон, лампа бегущей волны), создающих большой собственный шум из-за неравномерности вылета электронов и других причин, квантовые генераторы на пучке

молекул аммиака подобного шума не создают. Здесь прежде всего сказывается то, что пучок молекул аммиака не несет в себе зарядов. Что же может быть источником шума в квантовом устройстве? Это в основном спонтанное излучение, каким бы слабым оно ни было, влияние нагретых стенок резонатора и волноводов, поглощение энергии невозбужденными молекулами, находящимися в пучке.

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева разработан метод настройки генераторов, при котором частоты двух независимых генераторов могут быть сделаны равными друг другу с точностью до единицы десятого знака. Это означает, что если колебания генератора использовать в качестве стабильного элемента («маятника») часов, то ошибка таких часов будет не больше одной секунды за 300 лет непрерывной работы.

Аналогичную точность хода дают часы, использующие в качестве маятника не молекулярный, а атомный генератор, основанный на квантовых переходах атомов цезия. В нем используется пучок атомов, который позволяет генерировать колебания стабильной частоты. С этими колебаниями сравнивают частоты стабилизированных кварцем генераторов, с помощью которых получают сверхточные атомные часы.

В литературе описано возможное устройство квантового генератора на пучке атомов рубидия-87, которые, как и атомы других элементов, обладают магнитным моментом благодаря наличию на внешней оболочке одного электрона. Для сортировки атомов, находящихся на верхнем и нижнем энергетических уровнях, используется неоднородное магнитное поле. Частицы, прошедшие неоднородное магнитное поле, попадают в резонатор, помещенный в постоянное магнитное поле. Здесь при правильном подборе необходимых условий происходит самовозбуждение генератора. Преимущество такого генератора состояло бы в возможности перестройки частоты изменением напряженности постоянного магнитного поля и размеров резонатора. Генератор имел бы весьма узкую полосу пропускания и малые шумы.

В качестве стандарта частоты предлагается также установка, в которой для изменения населенности энергетических уровней и создания систем с отрицательной температурой используется облучение некоторых газов

видимыми лучами. Схема одной из таких установок показана на рис. 11. В ней светом от натриевой лампы облучается кварцевый контейнер, где находятся пары натрия с аргоном. Аргон здесь играет роль буферного газа. Контейнер помещен внутри резонатора с резонансной частотой 1772 Мгц . В результате облучения при резонансе происходит изменение населенности уровней в молекулах натрия и уменьшается интенсивность прошедшего через пары света. Это отмечается фотоэлектрическим детектором.

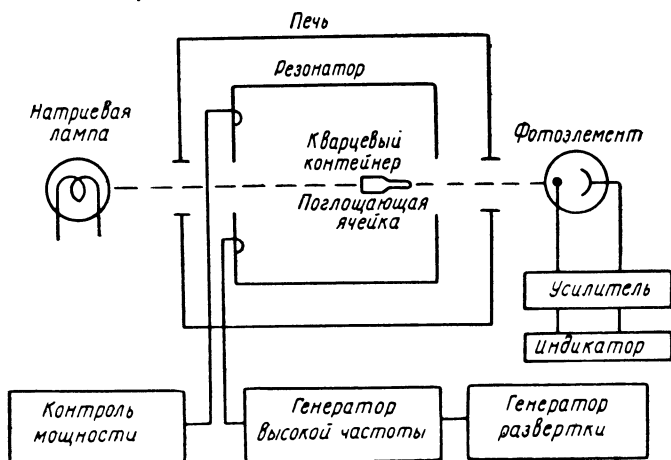


Рис. 11. Схема квантовой системы на смеси паров натрия с аргоном.

На основе схемы рис. 11 был спроектирован стандарт частоты (1772 Мгц). Эта установка обеспечивает долговременную стабильность частоты в 10^{-8} и выше.

Завершая рассказ о генераторах на пучках молекул и атомов, следует сказать, что работы по их совершенствованию продолжаются. В СССР в Физическом институте им. П. Н. Лебедева разработаны методы повышения стабильности частоты молекулярных генераторов путем использования пучков, в которых молекулы имеют малые скорости по сравнению с тепловыми скоростями при комнатной температуре. Расчет показывает, что с помощью таких систем можно в 10—100 раз повысить стабильность частоты молекулярных генераторов.

Мы ознакомились с квантовыми генераторами на пучках молекул и атомов. Что можно сказать об их возможностях? Значение создания на их основе сверхточных молекулярных и атомных часов далеко выходит за рамки метрологии. Эти часы позволяют значительно повысить точность радионавигационных устройств и радиолокаторов, в том числе и предназначенных для космических полетов.

Большие возможности открыли молекулярные и атомные часы перед астрономами. Ход этих часов не связан с движением небесных тел, что позволяет по-новому подойти к изучению этого движения. Уже достигнут первый результат такого изучения — удалось обнаружить неравномерность вращения Земли и приступить к детальному его исследованию. Стабильность молекулярных и атомных часов позволяет начать экспериментальную проверку общей теории относительности.

С ПОМОЩЬЮ ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Резонанс — это незаменимый спутник радиоэлектроники. Как говорится в «поте лица» он работает в усилителях высокой и промежуточной частот, в гетеродинах, выделяет нужные сигналы. И хотя речь идет о принципиально новой отрасли радиоэлектроники, явление резонанса и здесь служит нам хорошим помощником.

Для создания квантовых усилителей используется явление парамагнитного резонанса, поэтому такие усилители называют парамагнитными. В них в качестве рабочего вещества применяют парамагнитные кристаллы, содержащие трехуровневые квантовые системы. К таким кристаллам относятся этилсульфат гадолиния с добавкой церия, гексацианокобальт калия с ионами хрома, ярко-розовый рубин (окись алюминия с присадкой хрома), железный корунд.

Почему, спросит читатель, хром, гадолиний, железо и другие парамагнитные вещества не берут в чистом виде, а «растворяют» их ионы в кристаллах? Дело в том, что, находясь в кристалле, разделенные диамагнитным веществом атомы с магнитными моментами существуют независимо, не взаимодействуя друг с другом. Парамаг-

нитные атомы легко разводятся в процессе роста кристаллов. Для разведения требуется, чтобы атомы были примерно одинаковых размеров. Именно такими являются атомы хрома и алюминия. Поэтому при выращивании кристалла рубина (Al_2O_3) ионы хрома легко замещают ионы алюминия.

Наиболее широко в усилителях применяется сейчас рубин из-за его химической стабильности, хорошей теплопроводности, высокой диэлектрической проницаемости и малой величины диэлектрических потерь. Чрезвычайно высокая теплопроводность при низких температурах позволяет рассеивать в рубине большую мощность.

Рубин можно получить в различных формах и, в частности, в виде стержней. Существенно и то, что освоены промышленные методы получения длинных кусков рубина.

Кристалл рубина с присадкой хрома обладает необходимыми для применения в усилителях характеристиками квантовых систем. Эффект квантового усиления на этом материале уже практически достигался на частотах от $3 \cdot 10^3$ до $10 \cdot 10^3$ МГц. С помощью усилителей на рубине с добавкой хрома можно перекрыть весь диапазон сантиметровых волн. Эти системы содержат атомы, находящиеся на трех энергетических уровнях (рис. 12). В обычном состоянии, как это и обозначено длинами отрезков линий, пропорциональными населенности уровней, наибольшее число атомов находится на нижнем уровне, наименьшее — на верхнем.

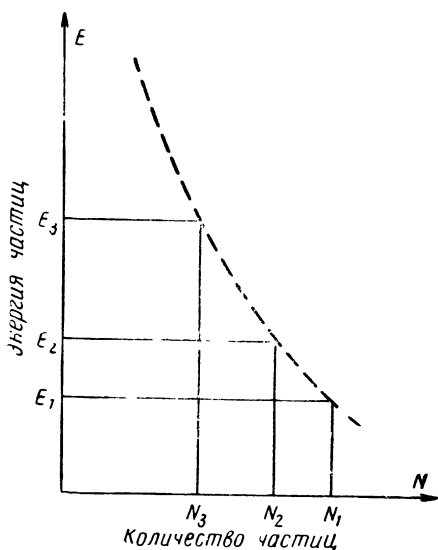


Рис. 12. Квантовая система с тремя энергетическими уровнями.

Как же эту систему превратить в систему с отрицательной температурой? Активизация кристалла, по предложению советских ученых Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, достигается облучением его вспомогательным электромагнитным полем частотой ν_{1-3} , иногда называемым полем возбуждения или накачки, которое вызывает переходы между первым и третьим уровнями (рис. 13,а).

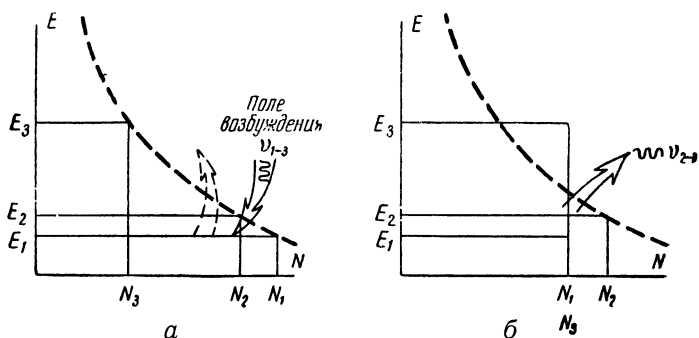


Рис. 13. Схема, иллюстрирующая процесс возбуждения квантового парамагнитного усилителя (а) и его действие (б).

При большой интенсивности поля может достигаться эффект насыщения этих уровней, т. е. количество частиц на них уравнивается (рис. 13, б). В результате на втором уровне может оказаться больше частиц, чем на первом, значит, они могут «падать» вниз с излучением квантов на частоте ν_{2-1} . А это и есть состояние возбуждения, или квантовая система с отрицательной температурой.

При обычных температурах создать такую систему трудно, так как тепловое движение мешает уменьшению количества частиц на нижнем уровне и выравнивает энергию частиц. При комнатной температуре работа парамагнитных усилителей пока невозможна, так как нет кристаллов с подходящими характеристиками. Поэтому парамагнитные кристаллы охлаждают до температур, близких к абсолютному нулю. Для этого резонаторы с кристаллами помещают в сосуды (криостаты) с жидким гелием и азотом. Под влиянием охлаждения выравнивающая тенденция теплового движения слабеет и падает уровень собственных шумов усилителя.

Необходимость охлаждения парамагнитных кристаллов делает такие усилители сложными и громоздкими. Для охлаждения используют двойной дьюаровый сосуд. Внешний дьюар заполняют жидким азотом, который защищает систему от излучений. Внутренний дьюар заполняют жидким гелием. Обычно требуется около литра жидкого гелия, который не испаряется, как правило, в течение нескольких часов.

Насколько усложняет дело применение жидкого гелия, видно хотя бы из того, как осторожно его приходится перекачивать. Для этого берут тонкую стеклянную или стальную трубку, состоящую из двух разделенных вакуумом секций. Один конец этой трубки должен касаться дна дьюара, другой — находиться ниже поверхности жидкого гелия в сосуде с запасом жидкого гелия. В этот сосуд впускают газообразный гелий и под его давлением жидкий гелий медленно перекачивают в дьюар, окружающий резонатор. Большим искусством надо обладать, чтобы заметить даже степень заполнения дьюара жидким гелием, поскольку показатели преломления света у него и воздуха почти одинаковы!

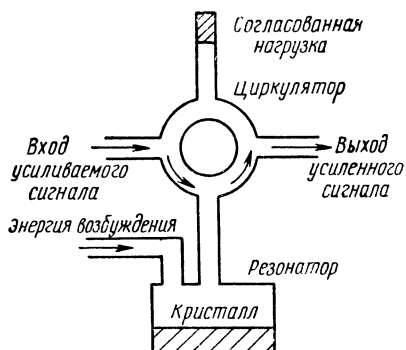
У персонала, обслуживающего квантовый усилитель с кристаллом, охлаждаемым жидким гелием, много и других забот. Если резонатор сообщается с дьюаром, надо, чтобы в попадающей в резонатор жидкости не образовывались пузырьки газа, иначе возможны флуктуации. Если же резонатор герметически закрыт, надо следить за тем, чтобы кристалл действительно имел температуру жидкого гелия.

На рис. 14 приведена принципиальная схема трехуровневого отражательного резонаторного усилителя (а) и показаны основные части системы возбуждения ионов хрома и охлаждения кристалла (б).

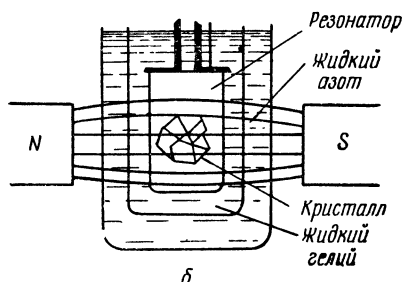
Усилитель с отражательным резонатором наиболее простой. Для подачи усиливаемого сигнала и отведения усиленного сигнала используется одна и та же линия. Падающая и отраженная волны разделяются циркулятором. Остановимся на этом подробнее.

Как известно, обычно ламповый усилитель имеет четко обозначенные вход (цепь сетки) и выход сигнала (анодная цепь). В регенеративном усилителе, т. е. усилителе с положительной обратной связью, грань между входом и выходом стирается. Он реагирует почти одина-

ково на сигналы, подводимые к входным и выходным цепям. Как мы только что установили, не имеет четко обозначенного различия входа от выхода и парамагнитный усилитель. Оказывается, можно обойтись одним каналом связи и волноводом для подведения и отвода



а



б

Рис. 14. Схема трехуровневого отражательного резонаторного усилителя (а) и устройство системы охлаждения кристалла и магнитной системы (б).

сигнала от усилителя. Здесь нам на помощь приходят ферритовые элементы, составляющие единое устройство — циркулятор. Феррит — один из видов железо-углеродистых сплавов, содержащий хром, кремний и другие добавки. Характерным свойством феррита является то, что он пропускает электромагнитные волны только в одну сторону, т. е. может служить в качестве вентиля. Включают ферритовые элементы в мостиковую схему, имеющую четыре зажима. При этом движение подводимой и усиленной электромагнитной энергии происходит только в определенных направлениях.

В усилителе с проходным резонатором (рис. 15) сигнал подводится по одной линии, а отводится по другой. Вентили, изображенные на схеме, служат для предотвращения собственных колебаний в системе. При одинаковом коэффициенте усиления проходной усилитель обладает вдвое меньшей полосой пропускания, чем отра-

жательный, или вдвое меньшим усилением по напряжению при одинаковой полосе пропускания.

Сейчас уже построен квантовый усилитель, рабочее вещество которого представляет собой кобальтово-синеродистый калий с добавлением парамагнитных ионов хрома. Это рабочее вещество помещено в цилиндрический

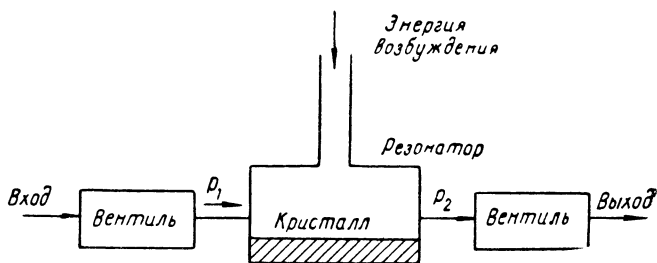


Рис. 15. Схема трехуровневого усилителя с проходным резонатором.

объемный резонатор, настроенный на две частоты: возбуждающего внешнего высокочастотного поля (9400 Мгц) и усиливаемого сигнала (2800 Мгц). Энергия возбуждения подводится по прямоугольному волноводу. Входной сигнал также подводится к объемному резонатору. По этой же цепи отводится и выходной усиливаемый сигнал.

Внутри дюара, где находится резонатор, поддерживается температура жидкого гелия (-269°C), а между стенками дюара — температура жидкого азота (-196°C). Всю эту систему располагают между полюсами сильного магнита, как это и было показано на рис. 14.

Как же работает такой усилитель? При воздействии на находящийся в резонаторе кристалл внешнего возбуждающего поля частотой 9400 Мгц начинается переход ионов с первого уровня на третий. Населенность третьего уровня становится больше, чем второго, и образуется квантовая система с отрицательной температурой. Если на вход усилителя, а значит в этот же резонатор, подать сигнал на частоте 2800 Мгц , соответствующей переходу с третьего на второй уровень, то начнется индуцированное

испускание энергии в фазе с усиливаемым сигналом и на той же частоте. Так происходит процесс усиления сигнала за счет энергии ионов, полученной от внешнего поля.

Возбуждение ионов поддерживается воздействием внешнего высокочастотного поля. Поскольку кристалл находится при температуре, близкой к абсолютному нулю, для перевода ионов с первого уровня на третий требуется небольшая мощность вспомогательного излучения. В качестве его источника можно использовать обычный отражательный клистрон.

Для парамагнитного усилителя характерны очень малые собственные шумы — несравненно меньшие, чем у ламповых усилителей. Объясняется это тем, что каждая частица в парамагнитном усилителе отдает усиляемому сигналу в тысячу раз меньше энергии, чем отдает нагрузке электрон лампового усилителя.

Сильно влияет на снижение шумов и низкая рабочая температура, ослабляя спонтанное излучение и тепловое движение. При очень низких температурах уменьшаются тепловые электрические флуктуации не только в самом резонаторе, но и в подходающих к нему цепях. Вот почему уровень при температуре жидкого гелия (-269°C) составляет всего 0,06 дб. Благодаря малым собственным шумам парамагнитный усилитель способен выделять весьма слабые сигналы — такие слабые, что о них до применения этих усилителей не имели представления, так как они «забывались» собственными шумами.

Однако, чтобы использовать все эти преимущества, нужно правильно включить парамагнитный усилитель в цепь приемника радиолокационной станции. Если использовать два волновода и подключить один из них к антенне, а другой к приемнику, то шумы приемника через второй волновод попадут в усилитель. Резко возросшие по величине, они вместе с сигналом вернутся в приемник. При такой схеме включения парамагнитного усилителя никакого выигрыша в смысле уменьшения шумов не получится.

Другое дело включение посредством циркулятора. Если один зажим циркулятора подключить к поглотителю шума, второй — к антенне, третий — к усилителю,

четвертый — к приемнику, то шумы приемника попадут не в усилитель, а в поглотитель. Сигнал от антенны поступит в усилитель, а оттуда в приемник радиолокатора.

На рис. 16 представлена схема включения парамагнитного усилителя трехсантиметрового диапазона, обеспечившего, по данным зарубежной печати, увеличение дальности радиолокатора в два раза. Ученые подсчитали, что без парамагнитного усилителя такое увеличение дальности потребовало бы повышения мощности передатчика примерно в 10 раз.

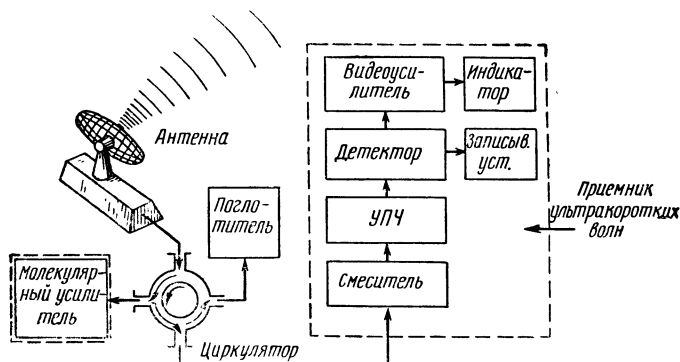


Рис 16. Схема включения парамагнитного усилителя в цепь радиолокационного приемника.

Нужно отметить, что при соответствующих условиях (большом усилении, малых потерях в резонаторе с высокой добротностью) парамагнитный усилитель может превратиться в генератор. Это происходит примерно так, как в регенеративном радиоприемнике обычного типа.

Полоса усиливаемых частот для данного активного вещества зависит от коэффициента усиления, добротности резонатора и характера взаимодействия частиц. Считается, что произведение полосы пропускания на коэффициент усиления в диапазоне перестройки усилителя остается постоянным. Для обеспечения большого коэффициента усиления при достаточной полосе необходимо применять весьма длинные кристаллы. В печати приводятся сведения о том, что для десятикратного усиления при ширине полосы 10 Мгц требуется кристалл длиной 1 м.

Но есть путь обеспечения высокого коэффициента усиления при широкой полосе пропускания. Это создание квантовых усилителей бегущей волны, о которых пойдет речь в следующем разделе, а сейчас укажем на использование новых активных веществ в парамагнитных усилителях, а также на создание двухуровневых квантовых усилителей.

Один из журналов США в 1961 году сообщил о разработке экспериментального парамагнитного усилителя трехсантиметрового диапазона на синтетическом изумру-

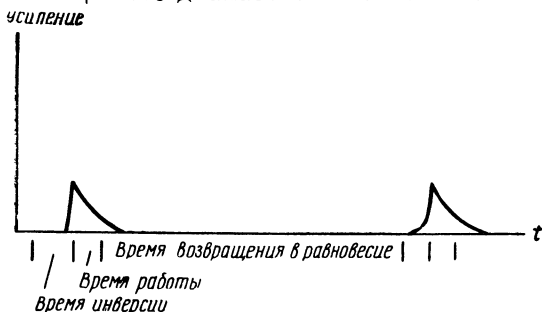


Рис. 17. График работы импульсного двухуровневого парамагнитного усилителя.

де. Это вещество представляет собой минерал берилл, имеющий химический состав: $3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, с примесью хрома. Объемный отражательный резонатор размерами $3,5 \times 7 \times 7$ см на 80% заполнен активным веществом. Через диафрагму и волновод он связан с согласующим трансформатором, а тот в свою очередь с циркулятором. При возбуждении на частоте 58 400 Мгц, магнитном поле 1900 гс и температуре 4,2°K усиление на частоте 10 000 Мгц составляет 16 дб (полоса пропускания 20 Мгц).

Теперь поговорим о возможностях квантовых усилителей с двумя энергетическими уровнями. Систему с двумя уровнями можно получить, взяв в качестве рабочего вещества кремний с примесями, кристаллы окиси магния, окиси кремния и др.

Как же в случае двух уровней получают системы с отрицательной температурой? Один из способов называется импульсной инверсией на 180°. Он заключается в том, чтобы коротким воздействием внешнего поля за-

ставить вектор намагниченности кристалла повернуться на 180° и увеличить этим населенность верхнего уровня. И тут же после инверсии надо использовать кристалл как усилитель, что возможно на весьма короткое время, так как система вскоре приходит в равновесие. Значит в этом случае усилитель может работать только в импульсном режиме. На рис. 17 показаны импульсы работы двухуровневого усилителя (генератора). После окончания работы в режиме усиления или генерации целесообразно быстрее вернуть систему в равновесие. Для этого рекомендуется сразу же после окончания процесса усиления осветить кристалл.

Безусловно, в практическом использовании двухуровневых усилителей еще немало непреодоленных недостатков. К ним относят и неизбежность импульсного характера работы, и необходимость синхронизации режимов усиления и периодов инверсии, и др. Тем не менее работы в этой области продолжаются. Внимание ученых, в частности, привлекает возможность создания импульсного двухуровневого генератора миллиметровых и еще более коротких волн.

ПАРАМАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Стремление получить большой коэффициент усиления, широкую полосу пропускания и малые шумы руководит конструкторами в поисках путей совершенствования трехуровневых парамагнитных усилителей. Для подобных целей можно было бы применить целый каскад квантовых усилителей. Но в результате пришлось бы серьезно усложнять конструкцию устройства, а значит, сделать его громоздким, практически неудобным.

Тогда ученые поставили вопрос так: не лучше ли удлинить путь взаимодействия сигнала с кристаллом в одном усилителе и таким образом увеличить его эффективность? Это не значит, что надо просто увеличивать размеры кристаллов и резонаторов. Видимо, более уместно применить замедляющие системы, подобные системам в лампах бегущей волны. По аналогии с ними такие устройства называют усилителями бегущей волны.

Оказалось, что квантовые усилители бегущей волны имеют более широкую полосу пропускания частот, чем

резонаторные усилители. На рис. 18 показаны для сравнения кривые зависимости полосы пропускания от усиления квантового резонаторного усилителя 1 и усилителя бегущей волны 2.

Как же действует квантовый усилитель бегущей волны?

Вспомним процесс замедления электромагнитного поля в лампе бегущей волны, служащей, как известно, усилителем электромагнитных колебаний сверхвысоких частот. В баллоне лампы имеются два основных устройства:

электронная пушка «выстреливающая» поток электронов, и проводочная спираль, служащая для замедления электромагнитных волн, которые подводятся к входу в лампу и должны усиливаться. Вдоль проводника, согнутого в спираль, электромагнитное поле распространяется со скоростью света, а значит, вдоль оси спирали — в несколько раз медленнее. Скорость дви-

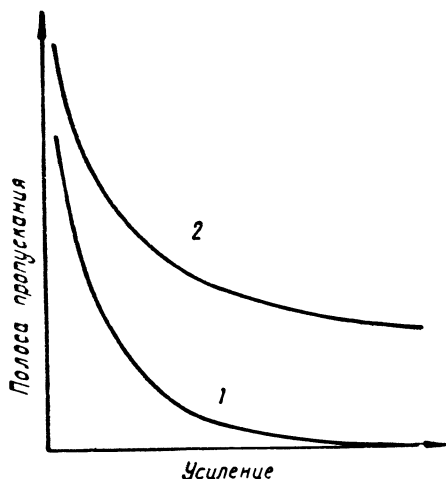


Рис. 18. Кривые зависимости полосы пропускания резонаторного усилителя (1) и усилителя бегущей волны (2).

жения волны вдоль оси спирали может быть определена как произведение скорости света на дробь, в числителе которой — шаг намотки, а в знаменателе — длина витка.

Можно сделать так, что электроны в пучке будут двигаться со скоростью распространения волны вдоль оси. Тогда группа электронов будет весь путь проходить в одной и той же полуволне электромагнитного поля. В процессе взаимодействия электронов с полем их кинетическая энергия передается волне и увеличивает ее амплитуду.

Конечно, мы нарисовали упрощенную картину процессов в лампе с бегущей волной. Можно было бы добавить, например, что в лампе возникает сложное электромагнитное поле, состоящее из четырех волн: трех «прямых», распространяющихся в том же направлении, что и электроны, и «обратной», распространяющейся в противоположном направлении. Амплитуда одной из трех «прямых» волн растет по мере подхода к концу лампы, в результате чего и происходит усиление. «Обратная» волна вредна, она как бы устанавливает обратную связь и уменьшает устойчивость работы усилителя. С ней борются. Одним из методов ее преодоления является применение двухлучевой лампы бегущей волны — пучок электронов служит замедляющей системой: внутри него имеется еще основной пучок электронов. В такой лампе обратная волна отсутствует. Характерно, что двухлучевая лампа обеспечивает коэффициент усиления 80 дб, тогда как обычная — порядка 30 дб.

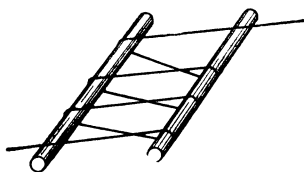


Рис. 19. Упложенная замедляющая система квантового усилителя бегущей волны.

Проволочная спираль, аналогичная рассмотренной выше, может быть использована и в квантовых усилителях. Ее именуют в этом случае геометрической системой замедления. Но сложность здесь состоит в том, что переменное поле должно быть все время перпендикулярно постоянному — только в этом случае возможен парамагнитный резонанс. Если же имеется спираль, то переменное поле вращается по ней. Конструкторы предложили видоизменить проволочную замедляющую систему: уflattenить ее и подобрать наиболее подходящие шаги обмотки. Упложенная спиральная система (рис. 19) считается широкополосной замедляющей структурой.

Более четко ограничена полоса пропускания у резонансных замедляющих структур. Эффект замедления в них достигается отражением волны в серии связанных друг с другом резонансных контуров. Для этого используют, например, волновод, внутрь которого помещают резонаторы из полосок.

Существует также диэлектрическая замедляющая система. Она, как это видно из ее названия, обеспечивает замедление с помощью соответствующего диэлектрика. Эту систему обычно применяют в сочетании с первыми двумя системами.

Познакомимся с некоторыми замедляющими системами, получившими практическое применение. Одной из них является «изитрон» — волновод с рядом параллельных проволок, каждая размером в половину длины

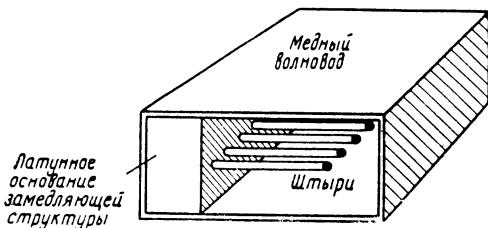


Рис. 20. Гребенчатая замедляющая система квантового усилителя бегущей волны.

волны. Расширить полосу пропускания такой системы можно перекашиванием витков или заполнением волновода диэлектриком. Как уже отмечалось, замедление обратно пропорционально шагу — здесь расстояние между проволоками. Это расстояние можно сделать малым, а значит, замедление получится большим.

Парамагнитный кристалл усилителя располагается с одной стороны проволок, с другой размещается вентиль (изолирующий кристалл), предназначенный для поглощения обратной волны. Как видно из конструкции «изитрона», требование взаимной перпендикулярности постоянного и переменного полей может быть легко выполнено.

Предложена также гребенчатая замедляющая система (рис. 20). Ее «гребенка» набрана из ряда полуволновых стержней (штырей), укрепленных на боковых стенках волновода. Здесь также достигается необходимая ориентировка полей. С гребенчатой замедляющей системой построены два типа усилителей, причем в одном используется кристалл этилсульфата гадолиния, в другом — рубина. В усилителе с гадолинием в качестве

вентилia служит иттриевый гранат. Поперечный разрез усилителя показан на рис. 21. Окись алюминия выталкивает поле возбуждения в усиливающий материал. Парамагнитный кристалл помещен в пластмассовую ампулу. Вентиль состоит из ферромагнитных сфер, связанных воедино пластмассой.

Лабораторный образец усилителя бегущей волны на гадолинии имеет коэффициент усиления порядка 12 дБ. При этом частота сигнала находится в диапазоне $(6,0 \div 6,3) \cdot 10^3$ МГц, а полоса пропускания составляет 30 МГц.

Практика показала, что использование соли гадолиния позволяет получить

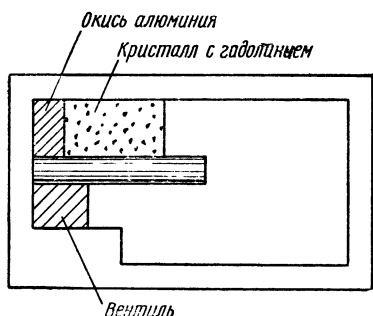


Рис. 21. Разрез квантового усилителя бегущей волны с этилсульфатом гадолиния в качестве активного вещества.

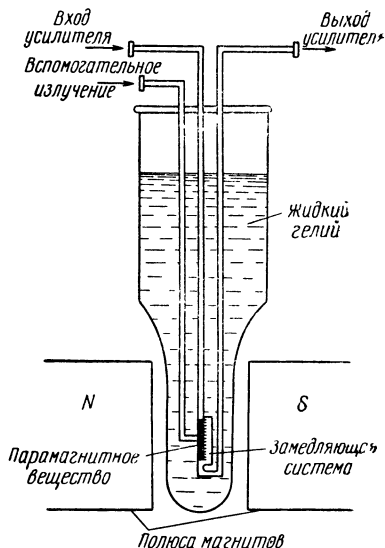


Рис. 22. Схема устройства квантового усилителя бегущей волны на рубине

сравнительно большую выходную мощность и малое время восстановления после насыщения. Но в целом это парамагнитное вещество мало пригодно для широкого применения. Более ценными свойствами обладает рубин с ионами хрома.

На рис. 22 показана схема устройства квантового усилителя бегущей волны на рубине. В одном из образцов такого усилителя был применен усиливающий материал — рубин с 0,05%-ной концентрацией хрома; вен-

тиль представлял собой также рубин с содержанием хрома 1%. В усилителе были получены коэффициент усиления 23 дб и полоса пропускания 25 Мгц. Система имела диапазон перестройки 350 Мгц. Вспомогательное излучение подавалось импульсами. Путем совершенствования усилителя удалось довести полосу пропускания до 67 Мгц при снижении коэффициента усиления до 13 дб.

В качестве примера практического применения парамагнитного усилителя бегущей волны можно привести разрабатываемую в США «сверхчувствительную» радиоприемную систему для дальней космической связи. Усилитель работает на частоте 5500 Мгц и имеет ширину полосы пропускания 30 Мгц и усиление 30—40 дб.

Создатели этой системы рассчитывают, что общая эффективная шумовая температура всей приемной системы, включая температуру атмосферы, антенны и усилителя на частоте 5500 Мгц, не превысит 18,5°К. Из них собственные шумы атмосферы принимаются за 2,5°К, шумы от излучения Земли 2°К, потери в антенне и соединениях 1,5°К, в волноводе и ответвителе 2°К и шумы усилителя 10,5°К.

В заключение можно сказать, что парамагнитные усилители открыли семафор для увеличения чувствительности приемников, перед которой долгое время горел красный свет. Уже сейчас созданы приемники с парамагнитными усилителями, дающие выигрыш в чувствительности по сравнению с обычными в 100 раз. Это трех- и двухуровневые системы в диапазоне частот от 300 до 10 000 Мгц. Коэффициент усиления получился равным 1000 (30 дб) при полосах пропускания в несколько мегагерц. Шумовая температура, как показали измерения на одном из усилителей, составляет всего около 2°К. Вызывалось предложение помещать антенны таких приемников на искусственные спутники Земли, что еще больше поднимет их чувствительность.

Повышение чувствительности приемников позволяет в несколько раз увеличить дальность действия радиолокаторов. Но это при том условии, если уровень шумов на входе парамагнитных усилителей, т. е. на выходе антенной системы, достаточно мал. Здесь приходится учитывать и шумы атмосферы, и собственные шумы антенных систем. Следовательно, особое внимание следу-

ет уделять правильному выбору диапазона частот и типа приемной антенны.

Для усилителя на рубине считается приемлемым в ближайшем будущем диапазон от нескольких мегагерц до 10 000—15 000 *Мгц*. Он наиболее подходит для локационных систем и систем связи «Земля—Космос», «Земля—Земля» с использованием спутников, а также для радиоастрономических и радиолокационно-астрономических устройств. При этом может достигаться почти неограниченная дальность действия.

Успешно преодолеваются учеными и некоторые эксплуатационные неудобства парамагнитных усилителей. Необходимость охлаждения кристалла, наличие тяжелых постоянных магнитов делали эти усилители громоздкими, повышали их вес. Сейчас в ряде стран предложены компактные криостаты (регуляторы понижения температуры) с замкнутым циклом, обеспечивающим повторное использование охладителей. Подобные устройства разрабатываются за рубежом для наземных, а также для бортовых самолетных и ракетных установок. Один из предложенных криостатов сначала имел объем 35 *дм³* и вес 27 *кг*. При дальнейшем совершенствовании были получены гораздо лучшие показатели — объем от 9 до 68 *дм³* и вес — от 4,5 до 20 *кг*. Созданы и более компактные постоянные магниты, которые можно располагать не снаружи, а внутри криостата.

Такие небольшие габариты магнита отличают компактный парамагнитный усилитель трехсантиметрового диапазона на рубине. Вместо обычных нескольких сотен килограммов его магнит весит 250 *г*. Он помещается внутри криостата вместе с объемным резонатором, содержащим рубин. Размеры резонатора также невелики (0,7×0,7×0,35 *см*). Усилитель работает при температуре 4,2°*К*. Его размеры — высота 75 *см*, диаметр 12,5 *см*. Объем усилителя 9 *дм³*, вес 11 *кг*.

Проводятся большие работы по защите квантового усилителя от попадания в него энергии передатчика. При обычных усилителях в приемники радиолокатора просачивается примерно 1—10 *мвт* энергии передатчика, при квантовых эта величина должна быть резко уменьшена, иначе возможно насыщение усилителя и резкое уменьшение коэффициента усиления. Ведь время восстановления у рубина достигает 0,1 *сек*. Для защиты кван-

тового усилителя от попадания энергии передатчика созданы специальные ферритовые переключатели, принимаются и другие меры.

Применение парамагнитных усилителей позволяет увеличить дальность действия радиотелескопов, а это открывает новые возможности для изучения, например, космического пространства и имеющихся там веществ, весьма слабые излучения которых доходят до нас. Считается, что более подробного изучения заслуживает излучение межзвездного водорода, лежащее в диапазоне 21 см.

Парамагнитные усилители, таким образом могут успешно применяться в радиоастрономии, в исследованиях, в частности, парамагнитного резонанса, в системах связи, основанных на рассеянии радиоволн атмосферой, в радиолокации и для наблюдения за полетами в космосе спутников, ракет и космических кораблей.

С внедрением парамагнитных усилителей стали возможны и такие эксперименты, как передача телефонного сообщения, например, из Калифорнии (полигон в Голд-стоне) в Австралию (полигон в Вумере) с использованием Луны для ретрансляции радиосигналов. Радиоволны прошли путь в 734 000 км за 2,5 сек. Сигналы мощностью 7,5 квт излучались на частоте 960 Мгц. В приемном устройстве имелся парамагнитный усилитель на рубине.

Что касается расширения сферы применения парамагнитных усилителей, то, согласно сообщениям печати, они могут служить для усиления не только электромагнитных, но и ультразвуковых колебаний. В устройствах для этой цели также используется индуцированное излучение парамагнитных ионов, например ионов хрома в рубине. Возбуждение их осуществляется высокочастотным электромагнитным полем при наличии постоянного магнитного поля и температуре 1,5°K.

Что же происходит в рубине? Под воздействием ультразвуковых колебаний изменяются электрические поля атомов хрома, что влияет на энергетические уровни их электронов. В итоге появляются электромагнитные колебания, которые затем преобразуются в усиленные ультразвуковые.

При возбуждении рубина электромагнитным полем частотой 23 000 Мгц и напряженностью 3700 гс при тем-

пературе $1,5^{\circ}\text{K}$ было получено значительное усиление ультразвукового луча в стержне. При этом получалось 18-кратное отражение от стенок рубинового стержня. Предполагается, что такой парамагнитный ультразвуковой прибор может быть использован для генерации ультразвуковых сигналов гораздо более высоких частот, чем с помощью других методов. Большую пользу подобные устройства способны принести также при исследованиях по физике твердого тела.

Расширению области применения парамагнитных усилителей способствует использование новых активных веществ. В США построены усилители на рутиле (диоксида титана) с примесью хрома или железа для диапазонов $1,25\text{ см}$ и 8 мм . При частоте поля возбуждения $70\,000\text{ Мгц}$ удалось получить усиление сигналов в диапазоне частот от $26\,000$ до $40\,000\text{ Мгц}$ в импульсном режиме и в диапазоне от $33\,100$ до $36\,100\text{ Мгц}$ — в непрерывном режиме. Использование рутила позволило, таким образом, применить парамагнитные усилители не только в дециметровом, но и в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Конструкторы рассчитывают построить усилитель на рутиле с примесью железа в четырехмиллиметровом диапазоне.

УВЕРЕННЫЕ ШАГИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Одним из новых направлений в развитии приборов с малыми внутренними шумами является создание параметрических усилителей. По принципу действия эти усилители отличаются от парамагнитных, но их сближает то, что последовательное рассмотрение действия параметрических усилителей требует также привлечения законов квантовой механики. Это касается, в частности, уровня шумов, вызываемого в параметрических усилителях, как и в парамагнитных, спонтанным излучением.

Уже из названия параметрического усилителя можно понять, что усиление колебаний в нем происходит в результате периодического изменения его параметров. Речь может идти об изменении либо емкости, либо индуктивности контура.

Как же это происходит? Допустим, в контур, содержащий индуктивность и емкость, поступает слабый сиг-

нал. Если в момент, когда заряд на конденсаторе достигает наибольшего значения, быстро уменьшить емкость (например, раздвинув, пластины конденсатора), то напряжение на его обкладках возрастет. Это возрастание происходит за счет механической энергии, расходуемой на увеличение расстояния между пластинами. Через четверть периода, когда напряжение будет проходить через нулевое значение, надо, напротив, уменьшить расстояние между пластинами, и тогда напряжение снова возрастет. Таким попеременным уменьшением и увеличением емкости в нужные моменты можно обеспечить эффект усиления.

Работа системы, которая увеличивает или уменьшает параметр контура, напоминает действия людей, раскачивающих качели. В верхних точках движения качелей люди приседают, меняя параметр системы (момент ее инерции).

На практике емкость конденсатора меняют не механически, а электрически. Для этого с помощью специального генератора в контур как бы накачивают электрические колебания. Этот вспомогательный генератор служит своеобразным источником питания усилителя или источником накачки. Аналогичным образом достигается эффект и при изменении индуктивности контура.

Параметрические усилители делят на три группы: полупроводниковые, ферромагнитные (ферритовые) и электронно-лучевые.

В полупроводниковом параметрическом усилителе используются свойства нелинейной емкости диода при подаче обратного (запирающего) смещения. Это означает, что диод упрощенно можно рассматривать как емкость, величина которой меняется под действием приложенного напряжения. Устройство одного из типов полупроводникового параметрического усилителя показано на рис. 23. В нем используется германиевый плоскостной диод, помещенный в прямоугольный объемный резонатор проходного типа. Настройка входа и выхода резонатора на частоту 2300 или 1200 *Мгц* осуществляется регулировкой зондов. Накачка производится на частоте 3500 *Мгц* при мощности 100 *мвт*. Коэффициент усиления на частотах 2300 или 1200 *Мгц* достигает 40 *дб*. При коэффициенте усиления 16 *дб* коэффициент шумов составляет около 5 *дб*.

Кроме описанного, существуют параметрические полупроводниковые усилители бегущей волны и других типов.

В ряде стран полупроводниковые параметрические приборы выпускаются промышленностью. Их применение в радиорелейных линиях и линиях связи, работающих на диффузном отражении, позволяет увеличи-

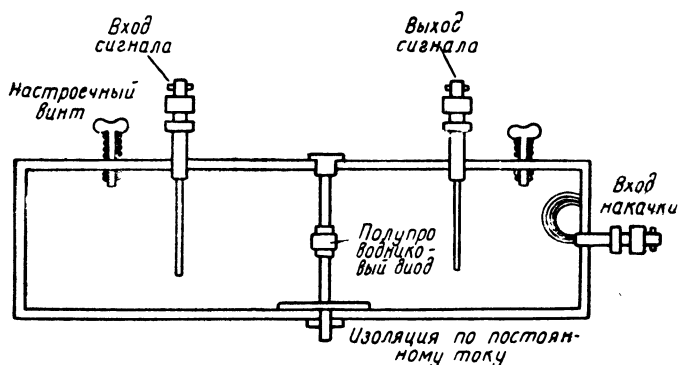


Рис. 23. Конструкция полупроводникового параметрического усилителя.

вать дальность действия на 25—30%. В устройствах для регулирования воздушного движения новые усилители дают возможность увеличивать вдвое дальность обнаружения, благодаря чему облегчаются вывод самолетов в район аэродрома и их посадка. Полупроводниковые параметрические усилители использовались для приема эхо-сигнала при облучении планеты Венера на американских станциях слежения за космической ракетой, а также на локаторе, предназначенном для слежения за снарядами, возвращающимися в атмосферу. В Японии полупроводниковый параметрический усилитель используется для военной связи в диапазоне 2000 Мгц. Интересно, что внедрение нового усилителя и принятие некоторых других мер позволило снизить мощность передатчика в 1000 раз по сравнению с обычными передатчиками, применяемыми на линиях связи.

Одна из зарубежных фирм проводила пробную эксплуатацию полупроводниковых параметрических усилителей на радиолокационных станциях. Характерно, что

дальность действия станций с новым усилителем повысилась на 50%, а общий коэффициент шумов радиолокационного приемника снизился. Повысилась также амплитуда сигнала по отношению к шумам на экране индикатора.

Время работы полупроводникового параметрического усилителя превысило тысячу часов, а он продолжал действовать надежно без выгорания диодов. Настройка усилителя оказалась простой — с помощью двух выведенных наружу ручек.

Приведем некоторые данные, полученные за рубежом во время экспериментов с образцами усилителей для разных диапазонов.

Диапазон	Частота, <i>Мгц</i>	Полоса частот при усилении 17 дб, <i>Мгц</i>	Коэффициент шумов, <i>дб</i>
Дециметровый	500	15	2,2
30-сантиметровый	1330	15	2,2
10-сантиметровый	2900	14	2,4
5,7-сантиметровый	4300	90	3,0
3-сантиметровый	9125	60	4,8

Ферромагнитные, или ферритовые параметрические усилители основаны на использовании нелинейных явлений в ферритах. В ферромагнитных веществах наблюдается ферромагнитный резонанс — сильное поглощение энергии высокочастотного поля на определенных частотах. Но кроме обычного пика, на резонансной частоте появляется ряд небольших добавочных пиков. Соответствующие этим пикам колебания называются магнито-статическими. Если феррит поместить в высокочастотное поле накачки, то в нем возникает связь между магнито-статическими колебаниями, которая меняется с частотой колебаний накачки. Получаются как бы контуры с

переменной связью, т. е. схема, представляющая собой схему параметрического усиления.

Один из зарубежных усилителей имел железиттриевый феррит структуры граната. Рабочая частота его — 4630 *Мгц*, частота накачки — 9260 *Мгц*. При мощности импульсной накачки 5 *квт* коэффициент усиления сигналов был от 500 до 1000.

Параметрическое усиление с использованием электронного луча основывается на двух возможностях. Первая заключается в том, что изменение плотности луча приводит к изменению емкости в резонаторе. Вторая возможность параметрического усиления состоит в воздействии переменных электрических полей на движение электронов, подобно тому как человек, приседая, раскачивает качели. Таким образом, в этом втором случае усиление осуществляется за счет непосредственной накачки энергии в электронный поток. Наиболее перспективным считается параметрический усилитель, у которого передача энергии от генератора накачки в электронный поток осуществляется с помощью неоднородного поперечного поля. В этом усилителе используется быстрая циклотронная волна, которая характеризуется движением электронов в однородном магнитном поле по спирали.

Примером электронно-лучевого параметрического усилителя с быстрой циклотронной волной может служить построенный за рубежом усилитель, рассчитанный на диапазон 4000 *Мгц*. Частота накачки его 8280 *Мгц*. На входе и выходе усилителя применены одинаковые объемные резонаторы. Данные усилителя таковы: мощность накачки 107 *мвт*, напряженность магнитного поля 1480 *гс*, полосу пропускания 67 *Мгц*, усиление — 19,5 *дб*.

Считается, что для получения параметрического усиления можно применять и лампы бегущей волны. Это позволит расширить их частотный диапазон. Так, применив накачку сигналом высокого уровня в лампе бегущей волны, рассчитанной на волну 10-сантиметрового диапазона, ученые получили усиление на частоте 6000 *Мгц*. Это означало выход на волны короче 10-сантиметрового диапазона.

Параметрические усилители в эксплуатации проще парамагнитных, так как они не требуют охлаждения до сверхнизких температур. В отношении же уровня внут-

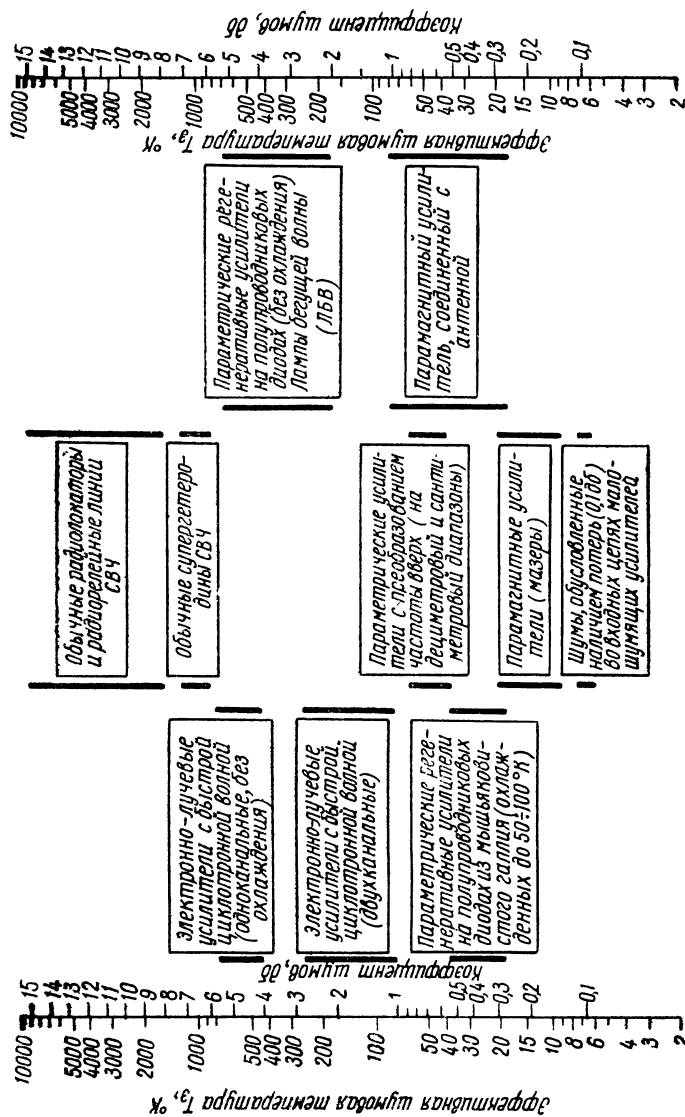


Рис. 24 Сравнительная характеристика шумов параметричного и параметрического усилителей и обычных радиоустройств.

ренных шумов параметрические усилители уступают парамагнитным, но, как это видно из рис. 24, они намного превосходят лампы бегущей волны без накачки и другие приборы обычной радиоэлектроники, применяемые за рубежом на сверхвысокочастотном диапазоне.

В принципе действия параметрического усилителя можно обнаружить сходство с трехуровневым парамагнитным усилителем. И здесь, и там регенерация осуществляется за счет энергии электромагнитной волны, вносимой в усилитель. В параметрическом усилителе частота этой волны вдвое выше рабочей частоты. В парамагнитном усилителе это возможно в том случае, если средний уровень энергии в системе находится посередине между двумя крайними энергетическими уровнями.

Параметрические усилители делают уверенные шаги в различных областях радиотехники, открывая возможности покорения все более коротких волн и позволяя повышать эффективность существующих радиосистем и создавать новые.

РОЖДЕНИЕ КРАСНОГО ЛУЧА

Для радиоэлектроники первостепенное значение приобретает освоение новых диапазонов волн — оптического и инфракрасного. Частота световых волн примерно в сто тысяч раз выше, чем частота радиоволн сантиметрового диапазона. В остальном световые волны и радиоволны идентичны. Значит, к ним одинаково приложимы законы индуцированного излучения и резонансного поглощения. Именно на основе использования этих законов и были созданы первые квантовые системы с отрицательной температурой для генерации и усиления инфракрасных и оптических волн.

Как же устроен квантовый генератор света? Известно, что источниками света являются и лампа накаливания, и вольтова дуга, и люминесцентная лампа. Но их свечение вызвано излучением квантов разной частоты и всевозможного направления. По понятиям радиотехники, это генераторы светового «шума». Диапазон частот их поистине огромен. И если задаться целью передать с помощью них сигнал на одной какой-то частоте, то каким слабым он будет!

Другое дело — квантовый генератор. Он излучает кванты определенной частоты в одном направлении. Поэтому-то так велика мощность излучаемых им колебаний, т. е. яркость пучка, и остра направленность этого пучка.

В качестве источника световых колебаний можно использовать тот же рубин с добавкой ионов хрома, о котором мы уже говорили. Принцип действия генератора такой же, что и в сантиметровом диапазоне. Берут стерженек рубина длиной несколько сантиметров и диаметром полсантиметра. Его торцы делают строго параллельными, полируют и серебруют, т. е. превращают в зеркала, причем одно из покрытий (зеркал) делают полупрозрачным.

Превращение кристалла в квантовую систему с отрицательной температурой достигается облучением его светом мощной газоразрядной лампы-вспышки. Лампу выполняют в виде спирали, внутри которой в резонаторе и располагают кристалл рубина. При освещении его лампой на верхнем уровне оказывается больше частиц, чем на нижнем, и достаточно появиться одному кванту, движущемуся вдоль кристалла, чтобы возникла генерация. Начинаются переходы частиц с одного уровня на другой, сопровождаемые инициированным испусканием. Излученные кванты, отражаясь от зеркальных стенок кристалла, многократно пролетают возле возбужденных атомов хрома, вызывая появление все новых и новых квантов энергии. Мощность излучения бурно нарастает, и через полупрозрачный торец наружу устремляется луч красного света.

На рис. 25 показаны энергетические уровни ионов хрома в рубине. Как можно заметить, кристалл рубина имеет две полосы поглощения в зеленой и синей частях видимого спектра. Чтобы возбудить ионы хрома и обеспечить генерирование световых волн, нужна значительная мощность лампы-вспышки, или, как ее еще называют, генератора накачки. Поскольку у активных веществ есть лишь определенные линии поглощения, нужны по возможности узкополосные источники их подсвета или накачки. Но, как уже отмечалось, на практике применяются лампы-вспышки с широким спектром световых волн. Используется же лишь крохотная часть этого спектра, а остальная пропадает бесполезно, вызывая

сильный нагрев лампы. Чтобы лампы не перегревались, они должны работать в импульсном режиме.

При работе устройства в режиме усиления в среднем не менее половины ионов должны с нижнего уровня перейти на верхний. Верхний же уровень нестабилен и с него ионы совершают переход без излучения на два

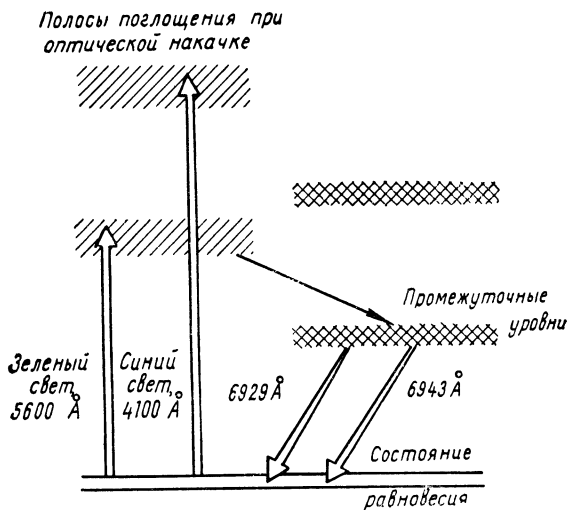


Рис. 25. Энергетические уровни ионов хрома в рубине.

промежуточных, более стабильных уровня. При воздействии на кристалл слабого излучения соответствующей частоты ионы, переходя с промежуточных уровней на нижний, индуцируют излучение в красном участке видимого спектра, главным образом на волне 6943 Å . Благодаря многократному отражению от стенок резонатора и прохождению излучения через активное вещество его мощность увеличивается, так как в процесс излучения вовлекается все большее количество ионов.

Квантовый усилитель оптического диапазона имеет в резонаторе не одну, а две полупрозрачные пластины. Через одну входит сигнал, подлежащий усилению, а через другую выходит усиленный сигнал. Необходимо, чтобы частота сигнала на входе точно соответствовала резонансной частоте усилителя. Это достигается подбо-

ром активного вещества и расстояния между отражательными пластинами. Кроме того, направление падающего излучения должно быть параллельно оптической оси отражательных пластин, иначе луч уйдет наружу раньше, чем усилится.

Приемное устройство, содержащее оптический усилитель, может принимать сигнал даже при условии нежелательного светового фона. Если сигнал поступает вдоль оси прибора, то его усилению не помешает даже яркое солнечное освещение. Оптическому усилителю свойственны малые шумы, так как активный материал при нормальных температурах не создает значительного излучения в видимой части спектра.

В процессе создания квантовых приборов на оптическом и инфракрасном диапазонах выявились серьезные трудности. Главная из них, как утверждают специалисты, состоит в получении когерентного излучения, т. е. такого излучения, когда излучатели «действуют» в одной фазе и в узкой полосе частот.

Еще один вопрос — как обеспечить перестройку частоты квантового генератора света? Практика показала, что изменение напряженности внешнего магнитного поля, смещающего положение энергетических уровней, позволяет достигнуть лишь небольшого изменения частоты. Известный эффект дает изменение температуры и давления. Для достижения большего диапазона перестройки частоты ищутся новые активные материалы.

Для постройки источников красного луча в качестве активного вещества могут быть использованы, кроме рубина, пары металлов, благородные газы, твердые (кристаллические) вещества, а также, вероятно, отдельные сорта стекол и некоторые жидкости.

Устройство резонатора из двух параллельных пластин оказалось очень подходящим для квантовых генераторов света. Впервые эту конструкцию резонатора предложил советский ученый А. М. Прохоров. В таком резонаторе световые волны претерпевают многократные отражения от пластин. Поскольку размеры пластин выбираются небольшими по сравнению с расстоянием между ними, обеспечивается хорошее выделение колебаний только того вида, направление распространения

которого близко совпадает с направлением оси резонатора. В подобном резонаторе обеспечивается выделение десяти видов колебаний из нескольких сот. Из выделенных колебаний и формируется красный луч. Колебания же других видов быстро уходят за пределы резонатора, не получив должного усиления. Отвод луча может быть осуществлен, как уже отмечалось, через полупрозрачную пластину. Если берется непрозрачная пластина, то луч отводится через щель.

Выше, при описании резонаторов, применяемых на радиоволновом диапазоне, мы имели в виду замкнутые полости из проводящих материалов. А в оптических и инфракрасных генераторах мы говорим о двух параллельных зеркалах и тоже называем их резонатором. В чем же дело? В оптическом и инфракрасном диапазонах размеры резонаторов значительно превышают длину волны излучения. Дифракция, т. е. нарушение прямолинейности распространения света, сказывается очень мало, и получается плоская волна, т. е. луч света. Поэтому и нет необходимости применять замкнутые резонаторы, а можно обойтись двумя отражающими пластинами (зеркалами), расположенными одна против другой, строго параллельно.

Выполнение условий самовозбуждения квантового генератора оптического диапазона означает, что энергия излучения квантовой системы перекрывает все возможные энергетические потери в резонаторе. Тогда часть возникающего в системе излучения будет вновь возвращаться в нее и система перейдет на режим монохроматического излучения. Полной монохроматичности, правда, добиться практически невозможно, так как этому мешает спонтанное излучение, дающее кванты с произвольной поляризацией, направлением движения и различной частоты. Кроме того, влияет несовершенство конструкции резонаторов, неоднородность оптических свойств применяемых материалов и другие причины.

Генератор света и без дополнительных оптических устройств дает высокую направленность, так как условия самовозбуждения наиболее легко выполняются для волн, которые распространяются перпендикулярно к поверхности зеркал. Эти волны сильнее всего задерживаются внутри резонатора и претерпевают наибольшее количество отражений. В то же время волны, распро-

страняющиеся не под прямым углом к пластинам, быстро покидают систему, не успев вызвать индуцированного излучения.

В квантовом генераторе света, таким образом, получается почти совершенный луч, образуемый 400 триллионами волн в секунду. Один зарубежный ученый сравнил его по размеру со световым источником, равным ногтю на пальце, а по яркости — миллиону электрических лампочек мощностью 100 *вт* каждая.

Излучение генератора света можно характеризовать эквивалентной температурой. Это такая температура, до которой надо нагреть черное тело, чтобы оно излучало энергию, равную энергии генератора света в том же спектральном интервале. Так вот, в описанном выше генераторе света на рубине эквивалентная температура излучения составляет около 10^{10}°C , что намного превосходит температуру центра Солнца.

КАК УСТРОЕНЫ ГЕНЕРАТОРЫ СВЕТА?

Начнем с устройства квантовых генераторов света на рубине. В одном из практически осуществленных приборов кристалл синтетического рубина имеет форму куба с длиной ребра около 2,5 *см*. Объемный резонатор состоит из двух тонких пленок серебра, покрывающих противоположные стороны кристалла. В каждой из этих пленок имеются отверстия для входных и выходных сигналов.

В другом образце прибора кристалл был взят в форме стержня (рис. 26). Отражательные пластины располагались на его торцах.

Самым распространенным генератором накачки считается спиральная лампа-вспышка (см. рис. 26). Эта лампа и применялась в упомянутом выше приборе. Мощность накачки в ней составляла около 1 *Мвт*, а к. п. д. был равен 1%. Зеленое свечение поглощалось кристаллом рубина на волне 5600 Å. Выходной сигнал представлял собой красный луч на волне 6943 Å. Луч имел ширину 0,1—0,2° и импульсную мощность около 10 *квт*. Другие показатели прибора таковы: полоса частот излучения — менее 1 Å, колебания усиливаются в четыре-пять раз. Длина волны может перестраиваться в преде-

лах 3 \AA под воздействием постоянного магнитного поля.

Несколько позже импульсный квантовый прибор оптического диапазона был создан другой зарубежной фирмой. Он содержит рубиновый стержень длиной 37 мм и диаметром 5 мм , помещенный внутри спиралеобразной лампы накачки. Ширина луча этого генератора меньше, чем предыдущего прибора, и не превосходит $0,1^\circ$. Яркость луча превышает яркость Солнца в миллион раз. Длина волны излучения генератора равна 6943 \AA , полоса излучения занимает менее 1 \AA .

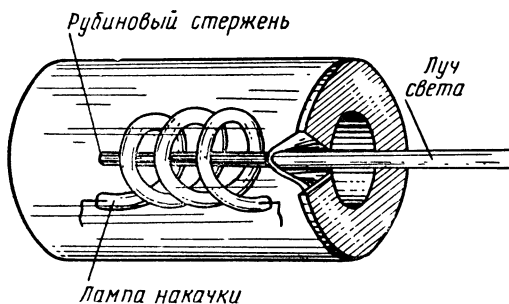


Рис. 26. Конструкция квантовых генераторов оптического диапазона со спиральной лампой-вспышкой и кристаллом рубина в виде стержня.

В настоящее время в печати публикуется много сообщений о создании квантовых генераторов света самых различных назначений. Много проводится исследований, направленных на улучшение их конструкции.

В одном из американских институтов разработана новая конструкция генератора накачки для квантового генератора оптического диапазона на рубине. Обычно в таких устройствах используется лампа-вспышка с цилиндрическим отражателем. Но ее недостаток состоит в том, что лишь небольшая часть света падает на рубин. Чтобы вызвать излучение, приходится подводить к лампе большую энергию (до 2000 дж) при импульсах длительностью 3 мсек . В институте предложено сделать лампу-вспышку карандашного типа с диаметром 6 мм и расстоянием между электродами 37 мм . Лампа располагается параллельно рубиновому стержню на расстоя-

нии 1 мм от него. Лампа и стержень обертываются алюминиевой фольгой. Величина энергии, необходимой для получения излучения при такой конструкции, снизилась до 200 дж.

Предложено также использовать лампы П-образного типа, расположенные вокруг рубина так, что их цилиндрическая рабочая часть параллельна оси стержня. В этом случае к лампам надо подводить энергию 320 дж. Чем больше ламп, тем легче получить нужную величину энергии возбуждения. Но зато требуется позаботиться уже о системе охлаждения.

Именно изменение конструкции источника накачки, отказ от спиральной лампы-вспышки помог специалистам создать портативный генератор оптического диапазона на рубине. Этот генератор имеет малые размеры и вес. В качестве генератора накачки используется U-образная ксеноновая лампа-вспышка. Она помещается на одной из фокальных линий эллиптического отражателя-кожуха, в то время как на другой фокальной линии расположен рубиновый стержень длиной 50 мм и диаметром 5 мм. Одна из пластин объемного резонатора — рубинового стержня — полупрозрачна (для отвода луча), другая имеет две щели. Излучения, выходящие из этих щелей, используются для контроля за их когерентностью. Генератор работает в импульсном режиме с десятисекундными перерывами и не требует никакого охлаждения.

Благодаря своеобразной конструкции генератора (рис. 27) удастся снизить энергию накачки с 1500 дж, что характерно для ряда стационарных генераторов, до 128 дж. Блок питания лампы накачки имеет размеры $22,5 \times 22,5 \times 7,5$ см и вес до 4 кг.

Портативный генератор по мнению зарубежных специалистов может быть применен для демонстрационных целей, а также в тех случаях, когда необходимы малые габариты и вес.

На рис. 28 показана конструкция квантового усилителя оптического диапазона на рубине, работающего при пониженной мощности накачки. В качестве генератора используется лампа-вспышка карандашного типа длиной 7,5 см. Как видно на рисунке, рубин и лампа помещены на двух фокальных линиях отражателя, выполненного в форме эллиптического цилиндра. Благода-

ря фокусировке лучистой энергии на рубине получается более эффективное использование света, чем в случае применения спиральной лампы-вспышки. Применение рубинового стержня длиной 6,3 см способствует получению большого усиления на каждый пробог луча. Как

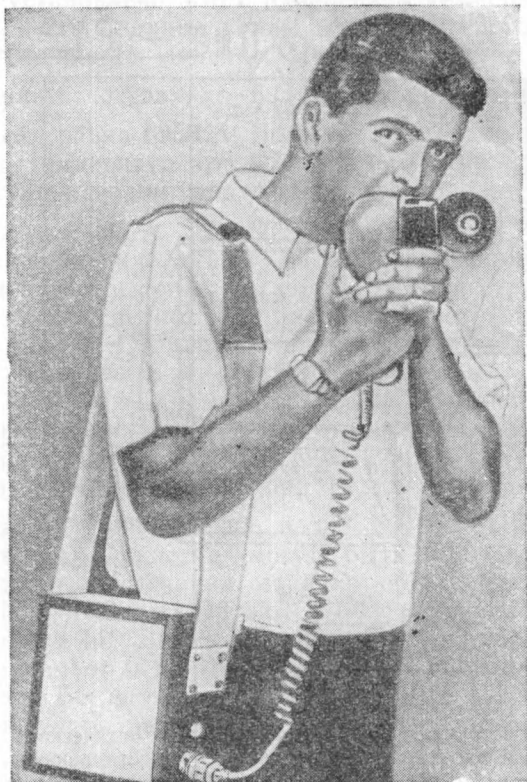


Рис. 27. Переносный квантовый генератор оптического диапазона.

показано на рисунке, питание лампы-вспышки осуществляется от батареи конденсаторов емкостью 400 мкф. Предварительная ионизация ее достигается с помощью вспомогательной цепи, где происходит колебательный разряд конденсатора через первичную обмотку транс-

форматора. Повышенное во вторичной обмотке до 15 кВ напряжение подается на внешний электрод. С лампой карандашного типа усилитель работает при мощности накачки 150 дж, со спиральной лампой — при мощности до 2300 дж, т. е. большей в 15 раз.

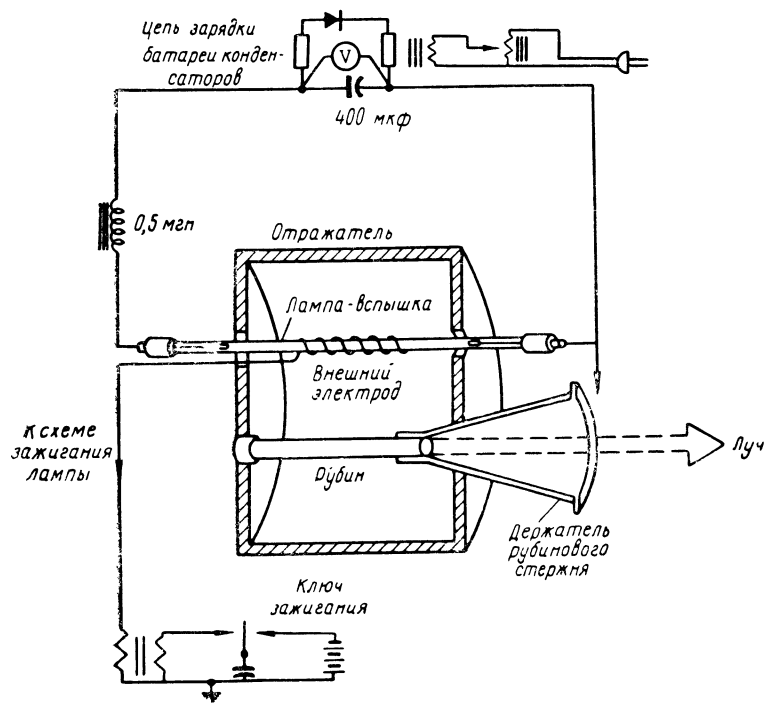


Рис. 28. Конструкция квантового усилителя оптического диапазона для работы при пониженной мощности накачки.

Ученые ряда стран занимаются и вопросами регулировки частоты квантовых генераторов света. Их внимание привлекает, в частности, термическая настройка, основанная на изменении положения энергетических уровней (а следовательно, и частот излучения) с температурой. Для осуществления на практике такого метода настройки взяли генератор, имеющий рубиновый стержень с примесью 0,05% хрома, длиной 19 мм и попереч-

ным сечением $6,3 \times 63$ мм. Спиралеобразная лампа-вспышка обеспечивала энергию накачки в 2000 дж. Интервалы в работе лампы исчислялись минутами. Измерялась длина волны спектрометром, работающим с точностью $\pm 0,02$ Å.

Было установлено, что с изменением температуры от -180 до $+210^\circ\text{C}$ длина волны излучения светового генератора меняется линейно. При температуре -180°C длина волны составляла 6934 Å, а при температуре $+210^\circ$ была равна 6953 Å. Более обстоятельно изучался диапазон температур от $+20$ до $+80^\circ$, где изменение температуры на один градус вызывало приращение длины волны на $0,065$ Å.

Для изменения длины волны излучения применяются и такие методы, как смена пластин отражателя. Именно так это делается у генератора светового диапазона на рубине. Он обеспечивает в импульсе мощность 1 квт. В генераторе используется рубиновый стержень длиной $11,3$ см и диаметром $1,25$ см. В одном фокусе цилиндрическо-эллиптического отражателя помещается рубин, а в другом — цилиндрическая лампа-вспышка. Диаметр объемного резонатора 19 мм.

Генератор работает на волне 6943 Å. При замене отражательных пластин могут быть получены волны другой длины. Источники накачки обеспечивают энергию в 400 и 880 дж. Питаются оба источника от сети напряжением 115 в и способны отдавать постоянный ток напряжением от 0 до 1800 в. Время заряда источников 20 — 30 сек. Вес источников накачки 10 и $13,5$ кг. Генераторная часть весит $6,5$ кг и имеет размеры $8 \times 16 \times 34$ см.

Поскольку наиболее приемлемым материалом для генераторов света оказался рубин, изыскиваются все возможности улучшения его производства. Как сообщает английская печать, в Великобритании разработан метод получения кристаллов синтетического рубина для световых генераторов из раствора окиси алюминия в двухфтористом свинце. Этот раствор помещают в платиновый тигель и нагревают в печи. Форма получаемых кристаллов — шестигранные пластинки диаметром 2 — 3 см и толщиной 1 см. В устройствах для получения световых

лучей они применяются в виде прутков длиной 4 см и диаметром 5 мм.

Совершенствование производства рубина не означает отказа от поисков других материалов для приготовления активного вещества. В последнее время на страницах технических журналов появились сообщения о контуренте рубина — фтористом кальции с добавкой ионов урана или самария. Его достоинство состоит в 500—1000 раз меньшей мощности генератора накачки и возможности создания генераторов, работающих не только в импульсном, но и непрерывном режиме. Но (как всегда, в таких случаях есть и «но») для работы приборов на фтористом кальции нужно охлаждать их до температуры жидкого гелия.

Ионы урана или самария возбуждаются, поглощая энергию источника накачки. Поднявшись на верхний энергетический уровень, они затем совершают, не излучая энергии, переходы сначала на один а потом на другой промежуточные уровни, и лишь затем, при переходе на нижний уровень, возникает индуцированное излучение.

На практике были созданы и испытаны квантовые генераторы с использованием как ионов урана, так и самария. Один предназначался для инфракрасного диапазона (волна 2,5 мк), другой — для оптического диапазона (7080 Å).

В последнее время в качестве «соперников» рубина и фтористого кальция в печати стали называть различные газообразные вещества. Здесь следует в первую очередь назвать пары калия. Они уже служат активным веществом в реальном приборе инфракрасного диапазона. Частицы паров калия имеют три энергетических уровня. Под воздействием излучения на волне 4047 Å они совершают переход на верхний уровень, а после быстро затухающего перехода без излучения «падают» на нижний уровень, вызывая индуцированное излучение на волне 7700 Å.

Конструкция квантового генератора на парах калия более сложна, чем на рубине, так как пары калия должны находиться при температуре 435°C и давлении 10^{-3} мм рт. ст. Пары калия помещают в резонатор, представ-

ляющий собой трубку, на концах которой находятся сапфировые пластинки, покрытые тонким слоем золота. Генератор накачки — батарея калиевых ламп трубчатого или спирального типа. Прибор может усиливать сигнал в 1000 раз. Луч, который испускает такой генератор, настолько узок и когерентен, что, направив его на Луну, можно получить там освещенность, равную той, которую

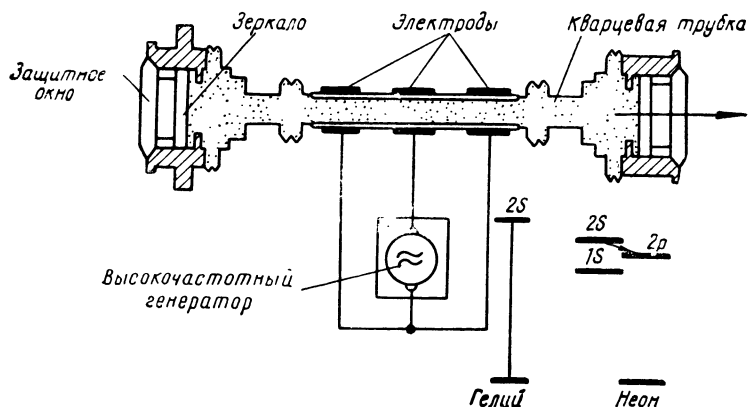


Рис. 29. Схема генератора на смеси газов неона и гелия.

бы создала рядом находящаяся лампа. Недостаток этого генератора состоит в том, что регулировать длину волны у приборов на парах калия еще труднее, чем у приборов на рубине. Тем не менее работы в этой области за рубежом активно продолжаются.

Сообщается, в частности, о создании квантового генератора, использующего в качестве активного вещества смесь гелия и неона. Генератор предназначен для работы на пяти различных частотах инфракрасного диапазона (от 1,1 до 1,2 мк).

Как видно из рис. 29, основную часть генератора на смеси газов составляет кварцевая трубка. Ее длина 80 см, диаметр 1,5 см. В ней находится смесь гелия (под давлением 1 мм рт. ст.) и неона (под давлением 0,1 мм рт. ст.). С обеих сторон концов трубки установлены плоские зеркала, выполняющие функции резонатора. Одно из зеркал полупрозрачно — через него отводится генерируемое излучение.

Возбуждение смеси газов производится высокочастотным полем. Для этого к электродам подводится напряжение, благодаря чему создается обычный газовый разряд, сопровождающийся свечением газовой смеси. Генератор работает в непрерывном режиме.

Что же происходит в смеси газов? В газовом разряде электроны сталкиваются с атомами, которые переходят на более высокие энергетические уровни. В качестве «рабочего» газа выбрали неон и в качестве «вспомогательного» гелий, потому что энергии их возбуждения совпадают, а значит, атомы и того и другого газов переходят на высшие уровни энергии. Время жизни атомов гелия на высшем уровне достаточно велико. Поэтому в газовом разряде присутствует значительное количество возбужденных атомов гелия, находящихся на уровне $2s$ (см. рис. 29). Они сталкиваются с атомами неона и передают им энергию, те в свою очередь переходят на уровень $2s$, очень близкий по энергии к уровню $2s$ гелия. Перейдя с уровня $2s$ на низкий уровень $2p$, атомы неона излучают кванты в инфракрасном диапазоне. На волне длиной $1,153 \text{ мк}$ мощность излучения генератора 15 мвт , а угол расходимости луча меньше одной минуты.

Итак, в процессе газового разряда атомы гелия возбуждаются, при столкновении с ними возбуждаются и атомы неона, совершающие переход на один из четырех верхних уровней. Переход атомов неона с верхнего уровня возможен на десяти промежуточных, и при этом он сопровождается инфракрасным излучением. При наличии у неона четырех верхних уровней и десяти возможных промежуточных оказывается возможным получить 30 комбинаций, т. е. 30 частот инфракрасного диапазона.

Прибор вырабатывает исключительно узкий луч. Если его направить на Луну, он создаст там пятно диаметром всего $1,6 \text{ км}$, тогда как обычный прожектор осветил бы круг больше самой Луны и имеющий диаметр $40\,000 \text{ км}$. Кстати, один из основоположников квантовых генераторов в США доктор Чарльз Таунс, по данным печати, недавно с помощью квантового генератора оптического диапазона осветил Луну ярким световым лучом.

Следует предполагать, что использование квантовых приборов, работающих на твердых и газообразных веществах, будет способствовать расширению сферы применения принципиально новых устройств.

КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И „ЛУЧИ СМЕРТИ“

Рождение красного луча, означающее создание монохроматического генератора оптических волн, открывает замечательные перспективы для развития связи, локации, навигации. В печати приводится пример: канал связи в оптическом диапазоне способен пропустить в принципе до десяти тысяч телевизионных программ!

Ученые подсчитали, что с помощью генераторов света можно перекрывать такие расстояния, которые свет преодолевает за несколько лет. Это означает возможность установить связь Земли с ближайшими к нашей планете звездами.

Создание монохроматических источников света позволяет получать остро направленные, как иглы, пучки излучения. Эффективная температура таких источников равна 10^{10}°C , т. е. больше чем на Солнце в миллион раз. Опытом доказано, что на расстоянии 70 км с помощью монохроматического источника можно получить световое пятно размером около 60 м. Это пятно днем отчетливо видно невооруженным глазом.

То, что в оптическом диапазоне становится реальным создание остро направленных пучков света, говорит о больших возможностях применения их для радиолокации небесных тел. Так, локация Луны с помощью генератора световых волн позволит разглядеть на поверхности естественного спутника Земли такие детали, которые нельзя увидеть с помощью других средств.

Если говорить о перспективах развития квантовых приборов оптического диапазона, то, по предположениям зарубежных специалистов, образцы радиолокационных систем и систем связи будут введены в действие в ближайшие три-четыре года. Уже сейчас найдено 20 различных подходов к осуществлению таких систем.

Наиболее вероятным считается применение квантовых приборов оптического диапазона в космической навигации, для измерения расстояния между космическими кораблями и определения их скорости. Оптические устройства дадут гораздо лучшую точность по сравнению с радиосистемами и в иностранной прессе высказывается предположение о том, что в будущем оптические приборы вытеснят радиотехнические.

Расчеты, например, показали, что оптический лока- тор с рефлектором диаметром 60 см при средней мощно- сти 66 вт позволит определять местоположение косми- ческого корабля диаметром 6 м с точностью 1,6 км на рас- стоянии до 160 тыс. км. Характерно и то, что в полете ко- рабля над гористой местностью оптический локаатор, благодаря узкому лучу, будет измерять истинную высоту, а не среднюю высоту над большой площадью, как это де- лает обычный локаатор.

За рубежом уже сообщалось о попытках создания локаторов и дальномеров в оптическом диапазоне. На

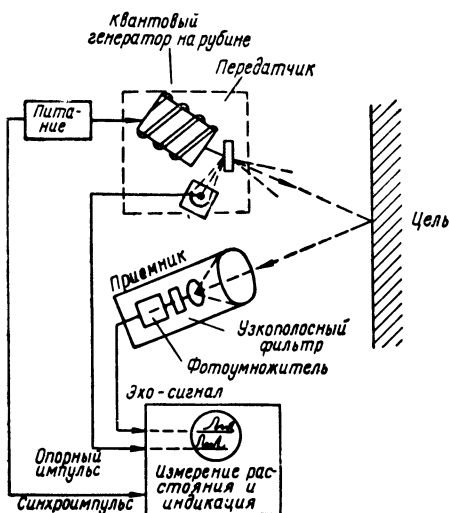


Рис. 30. Схема оптического локатора.

рис. 30 показана схема устройства оптического локатора. Он состоит из передатчика, включающего квантовый генератор, источников питания и коллиматорной оптической системы для сужения луча, выходящего из генератора.

Квантовый генератор представляет собой рубиновый стержень длиной 37 мм и диаметром 10 мм, окруженный спиральной лампой-вспышкой. Заклю- чен генератор в ре- зонатор из двух па-

раллельных пластин, одна из которых полупрозрачна. Луч через эту полупрозрачную пластину попадает в коллиматор и суживается там. Световой клапан, управляемый импульсным генератором, предназначен для «срезания» заднего, пологого фронта светового импульса, чтобы он был прямоугольным. Кроме того, на пути луча установлена под определенным углом редкая сетка, отражающая часть энергии передатчика для получения хронизирующих и опорных импульсов. Хрони- рующие импульсы управляют зажиганием лампы-вспыш-

ки. Опорные импульсы необходимы для отсчета расстояний на индикаторе по сдвигу по отношению к ним отраженных импульсов.

Световой поток, отражающийся от объекта, собирается с помощью зеркала телескопа, направляется на меньшее зеркало, и, пройдя через отверстие в боковой стенке телескопа, попадает на третье зеркало, а затем — в радиоэлектронный блок. Узкополосный фильтр снижает «шум», сопровождающий сигнал. Фотоумножитель преобразует световой сигнал в электрический, который и используется в индикаторе (двулучевом осциллографе) для отсчета расстояния. На один луч подается отраженный, а на другой — опорный сигналы.

Дальность действия лоатора в атмосфере 10 км, в космосе — несколько сотен километров. Ввиду того что используется весьма узкий луч, лоатор на расстоянии 10 км способен различать объекты длиной 3 м. Таким образом, разрешающая способность оптического лоатора в сотни раз выше, чем радиолокатора.

Оптический лоатор работает импульсно на волне длиной 6943 Å. Длительность импульса 3 мсек, частота повторения из-за возможности перегрева рубина взята всего 1 имп/сек.

Зарубежные специалисты связывают применение квантовых приборов оптического диапазона для локации с задачей создания модуляторов для них. В качестве модулятора предложено, например, использовать кристалл кислой фосфорнокислой соли аммония $\text{NH}_4 \cdot \text{H}_2\text{PO}_4$. Этот кристалл устанавливают в проходном резонаторе, а перед ним и после него располагают призмы. На луч действуют электрическим полем сверхвысокой частоты. Плоскость поляризации света, проходящего через кристалл, поворачивается в соответствии с мгновенным значением напряженности поля. В результате интенсивность света, проходящего через вторую поляризационную призму, меняется. Так осуществляется модуляция. Частота модуляции при этом получается 850 Мгц, глубина модуляции 30%, потребляемая мощность — 8 вт.

Кроме оптических лоаторов в США разрабатываются дальномеры с квантовым генератором на рубине. Характеристики дальномера: длина волны генератора 6943 Å, выходная мощность в импульсе 0,3—2 квт, ши-

рина луча генератора $0,7^\circ$, ширина луча после прохождения через сужающую оптическую систему $1,4'$. При испытаниях прибора по наземным целям была получена дальность 3 км при дневном свете и 11,2 км — ночью.

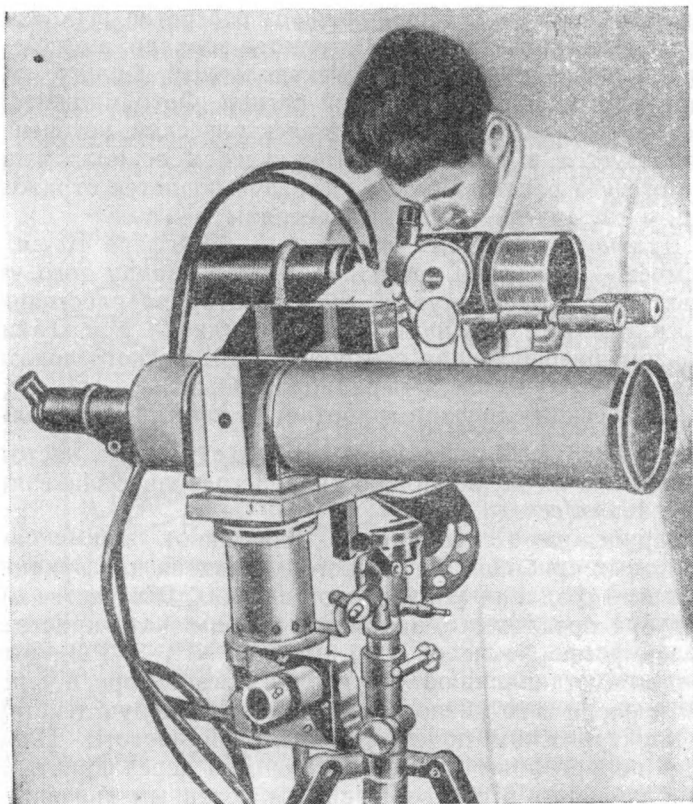


Рис. 31. Общий вид оптического дальномера.

Прибор для измерения дальности с использованием квантового генератора на рубине обеспечивает точность 7,5 м на расстоянии 45 км. Внешний вид прибора показан на рис. 31.

По подсчетам зарубежных ученых, космический дальномер, основанный на квантовом генераторе и имеющий

мощность импульса 66 вт , может обеспечить точность измерения расстояния до 10^{-5} на дальности $160\,000 \text{ км}$.

Разработана также экспериментальная установка для наземной связи с использованием квантового генератора на рубине. Частота излучения 200 Мгц . Луч, выходящий из генератора, модулируют. Для этого его пропускают через кристалл кислой фосфорнокислой соли натрия. Принимается излучение устройством — прообразом обычного телескопа. Изображение удаленного передатчика фокусируется на фотокатоде умножителя. В печати отмечается исключительно высокая пропускная способность световых систем связи. По ним можно передавать в 10^4 раз большее количество информации за единицу времени, чем при использовании радиоволн.

О возможностях квантовых генераторов в иностранной печати высказываются различные, подчас противоречивые мнения, порой даются преувеличенные оценки. К которым следует относиться критически. Особенно усердно обсуждаются в последнее время за рубежом возможности военного применения квантовых приборов. Так, один из сотрудников Мичиганского университета (США) заявил, что наиболее реальные применения этих приборов могут быть обусловлены их «фантастической» плотностью энергии, а не свойствами когерентности или возможностью использования для связи. В доказательство он привел пример, как с помощью луча квантового генератора, дававшего пятно с плотностью энергии 10^8 вт/см^2 , удавалось прожигать закаленные стальные лезвия. В одном из опытов луч прожег десять лезвий. Как сообщает газета «Нью-Йорк джорнэл Америкэн», даже маломощные квантовые генераторы могут создавать световой луч, способный прожигать отверстие в листовой стали.

Во время одного из экспериментов луч генератора инфракрасного диапазона за $0,5 \text{ мксек}$ нагрел точку на куске угля, куда он был направлен, до температуры 8000°C . Этот луч особенно опасен для глаз, так как способен их разрушать, причем опасен не только прямой, но и отраженный луч.

Такое высказывание американского специалиста по истине симптоматично. О том, для чего прежде всего предполагается использовать генераторы световых волн в США, можно судить по сообщению корреспондента

агентства «Ассошиэйтед Пресс» от 9 декабря 1961 г. Американские ученые разрабатывают оружие, представляющее собой «лучи смерти». В нем будто бы будет использоваться атомная энергия для создания лучей с температурой $100\,000^{\circ}\text{C}$ и выше, вплоть до миллиона градусов. Главным в оружии будет концентрация лучей и направление их на объект. Оружие будет иметь высокую стоимость, поэтому американские военные планируют использовать его для действий в космосе. Размер образцов светового оружия примерно такой же, как и крупных военных прожекторов. Дальность действия этого нового вида оружия в космосе будто бы составит 90—360 км, а на Земле — меньше 2 км. Вес его будет около 13,6 т. Предполагают, что испытания оружия начнутся в 1963 г.

Это сообщение подтверждают и другие органы печати. Журнал «Электроникс» за 13 октября 1961 г. сообщил, например, что военные круги США рассматривают вопрос об использовании остронаправленного инфракрасного излучения квантового генератора для борьбы с межконтинентальными снарядами. Известно, что эти лучи способны вызывать чрезвычайно высокую температуру. При фокусировании луча на угольную пластинку за доли миллисекунды удастся разогреть ее до 8000°C . Для этого уже применялись мощные импульсные генераторы с охлаждением.

Американские специалисты с особым вниманием отнеслись к идее использования квантовых приборов с их остронаправленными излучениями для противоракетной обороны. Дело в том, что работы по созданию противоракеты типа «Найк-Зевс» идут очень медленно и стоят очень дорого. Создание системы, основанной на этой противоракете, ориентировочно оценивается в 50 млрд долларов. Были выдвинуты другие предложения, например, обороняться против ракет с помощью тысяч спутников. Но это обойдется еще дороже. Так что «лучи смерти» оказались сейчас в центре внимания военных специалистов США.

Для борьбы со снарядами считается необходимым разработать сверхмощный квантовый генератор оптического диапазона. Пока в печати есть данные о создании в США подобного генератора, обеспечивающего в течение нескольких микросекунд мощность 1 млн. вт. Счи-

тается, что для получения радиационного оружия нужно добиться несравненно большей мощности.

В американских военных журналах приводится схема противоракетной обороны, основанная на использовании квантового генератора оптического диапазона (рис. 32). В ее состав входят центр управления, радиолокатор грубого слежения, система опознавания «свой — чужой», оптический локатор, мощный квантовый генератор и источник питания.

Центр управления системой имеет электронную вычислительную машину, пульт подачи команд и оборудование для связи с радиолокатором дальнего обнаружения, от которого поступают данные о появлении цели. Ориентировочные данные о положении приближающегося снаряда дает радиолокатор грубого слежения. По его данным, наводится на цель оптический локатор точного слежения с квантовым генератором, измеряющий расстояние до цели. Луч, призванный сразить снаряд, вырабатывается мощным квантовым генератором. Этот генератор установлен на специальной платформе вместе со средствами автоматического слежения и фокусировки луча высокой интенсивности на уязвимой точке приближающегося снаряда. Действовать луч должен в течение времени, необходимого для поражения.

О том, что работы в этой области интенсивно ведутся за рубежом, можно судить хотя бы по тому, что одна американская фирма по заказу военно-воздушных сил США разрабатывает квантовый генератор, луч которого создавал бы эквивалентную температуру около 1 млн. °С. Специалисты высказывают мнение, что реализация этого проекта позволила бы поражать снаряды на расстоянии 64—320 км. Генератор предполагают устанавливать на ракете, снабженной атомным источником энергии и экранировкой для защиты космонавта.

Приводятся данные и об устройстве разрабатываемого генератора. В нем используется водород, переходящий из «пара»-состояния в «орто»-состояние¹.

¹ Молекулы водорода, как известно, могут иметь два состояния: орто и пара. Различаются эти молекулы физическими свойствами, но состав их один и тот же. Различие в свойствах модификаций водорода объясняют тем, что два протона, входящие в состав молекулы ортоводорода, вращаются вокруг своей оси в одном направлении, а в молекуле параводорода — в различных направлениях.

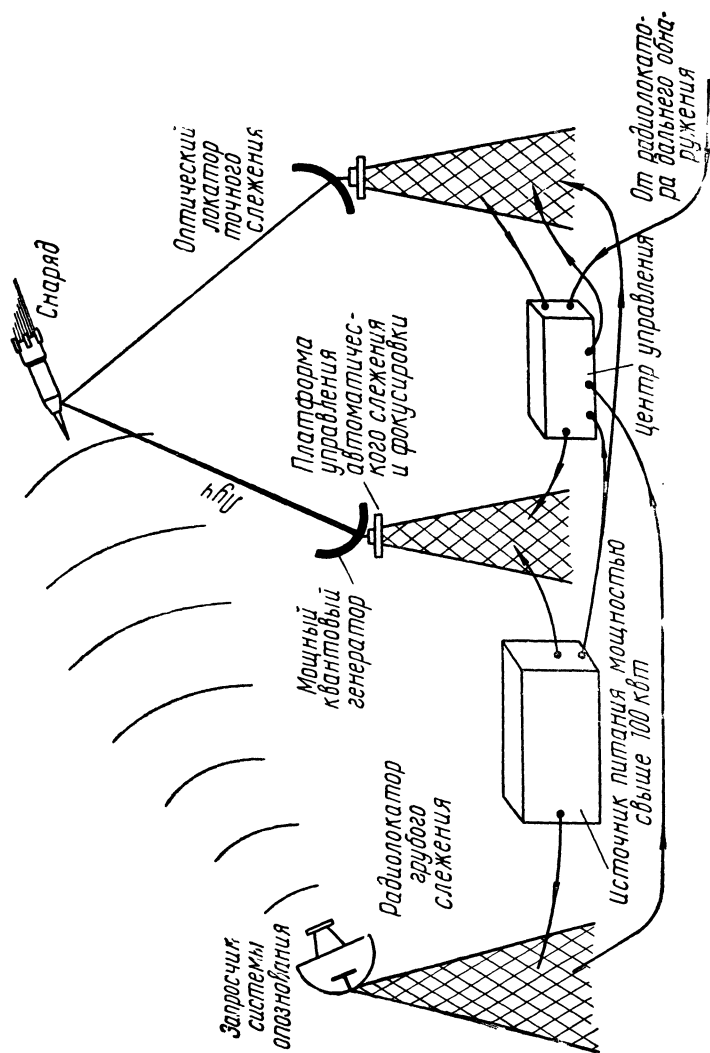


Рис. 32. Схема противоракетной обороны с использованием «лучей смерти».

При этом, как известно из химии, два параллельных ядерных спина молекулы водорода, направленных в разные стороны, получают одинаковое направление. Генератор рассчитывается на работу при сверхнизкой температуре. Внешняя оптическая система должна оказаться способной фокусировать луч диаметром 85 мк в пятно диаметром 1 см. Мощность генератора в импульсе может достигнуть нескольких миллионов ватт. Считается, что этот генератор начнет действовать в 1970 г.

Уже в течение полугода создаются квантовые генераторы на меньшую эквивалентную температуру луча, а именно на 500°C. Их предполагают изготовить и начать испытывать в 1963 г.

Изучается еще одна возможность использования квантовых приборов для борьбы со снарядами с помощью сфокусированного пучка плазмы, способного отклонить снаряд или разрушить его боевую часть.

Применению мощных генераторов света против ракет препятствует влияние облаков на распространение луча. Специалисты считают, что эту «помеху» можно убрать, т. е. рассеять облака в нужном районе с помощью ракет. Другой способ — это предварительно пробивать облака вспышками направленного света.

О размахе в США работ над квантовыми генераторами света можно судить по таким цифрам: исследуются 20 путей усовершенствования генераторов, причем в этой деятельности занято 400 компаний и фирм.

Создаваемые квантовыми генераторами световые лучи американские правящие круги планируют применить для борьбы с искусственными спутниками. Считают, что эти лучи могут сбивать спутники с орбиты и нагревать бортовые электронные устройства выше критической температуры.

Предусматривается также возможность нарушения управления спутником в результате воздействия на него мощными импульсами света.

Иностранные специалисты обсуждают также возможность создания зенитных световых пушек, лучи которых были бы способны замедлять скорость полета самолетов, изменять их курс или воспламенять баки с горючим.

Предполагается, что особенно эффективными новые средства могут оказаться в борьбе с самолетами, летящими на бреющем полете.

Заокеанских «любителей» военного шпионажа особенно прельщает то обстоятельство, что искусственные спутники, запускаемые ими для разведывательных целей, имея на борту квантовые генераторы света, могли бы освещать определенные объекты на земле и делать чрезвычайно точные снимки даже в ночное время. В США считают особенно привлекательным применение для разведки со спутника невидимого инфракрасного луча, который позволит сделать так, что население даже не узнает, что его фотографировали. Существуют также проекты оснащения спутников источниками радиоактивных лучей, с помощью которых, как пишет иностранная печать «можно терроризировать целые районы земли». Уже сейчас в США «проводятся эксперименты по изучению воздействия на людей рентгеновых и гамма-лучей при концентрированном облучении ими объектов с высоты в несколько сотен миль».

Для управления работой квантовых генераторов, установленных на спутниках и противоракетах, намечается применять радиолокационные средства. Для уменьшения поглощения луча в нижних слоях атмосферы квантовые генераторы инфракрасных волн предполагается также устанавливать на горных вершинах.

Как же действует инфракрасный луч на объект? Он вызывает, по данным зарубежных специалистов, местное нарушение целостности, например, снаряда, в результате чего возникают вибрации, приводящие к его разрушению.

Согласно другим сообщениям, квантовые генераторы оптического диапазона весьма перспективны в системах наведения ракет по лучу. Известно, что сейчас радиотропу, определяющую путь движения ракеты к цели, «прокладывают» с помощью радиолокаторов. Так вот, предлагается заменить радиолокаторы квантовыми генераторами света. Утверждается, что оптические устройства обеспечат получение чрезвычайно высокой точности наведения и затруднят создание помех.

Труднейшей проблемой современной радиотехники является обеспечение связи в воде. Однако освоенные диапазоны никакого облегчения не принесли. Радиоволны практически не распространяются в воде. Волны же видимого диапазона позволяют кардинально решить проблему связи в воде, так как они способны проникать на

значительную глубину. Значит, возможна связь под водой на световых волнах. Так, в зарубежной печати уже имеются сообщения о разработке оптической установки для обнаружения подводных целей, основанной на принципе «бегающего» луча и использующей квантовые приборы. Основную часть установки составляет квантовый генератор оптического диапазона. Его узкий луч будет «бегающим», т. е. он предназначается для того, чтобы освещать малые участки цели поочередно в течение короткого времени. Благодаря такому устройству уменьшается мешающее действие рассеяния света, возникающее при освещении больших масс воды одновременно.

Предполагается, что оптическая установка с бегающим лучом позволит повысить в миллион раз способность различать цели по сравнению, например, с телевизионной подводной камерой. Если последняя при естественном освещении дает возможность «видеть» объект на расстоянии 140 м, то квантовый прибор обеспечивает дальность в несколько километров. Одна из фирм предложила конструкцию квантового генератора, создающего излучение в сине-зеленой части спектра, для которой вода наиболее прозрачна. В качестве активного вещества в нем предполагается применить кристалл фтористого кальция с примесью самария.

Одним из важных применений квантовых приборов можно считать создание сверхбыстродействующих «оптических» вычислительных машин. Для иллюстрации того, как в этом случае могут быть использованы квантовые системы, сошлемся на «оптические» запоминающие устройства. Энергетические уровни атомов — верхний и нижний — можно рассматривать как два различных состояния памяти — «да» и «нет». Если с помощью подсвета вынуждать частицы совершать переходы с одного уровня на другой, то это даст возможность записывать и считывать информацию.

Предложен, например, элемент «газообразной» памяти, представляющий собой наполненный смесью двух газов небольшой сосуд с двумя электродами внутри. При подаче на электроды электрического напряжения один из газов ионизируется. В результате образуются электроны, которые возбуждают атомы другого газа и переводят их на высшие энергетические уровни. Эти атомы переходят на промежуточные уровни, а под дей-

ствием считывающего импульса — и на нижний уровень. Процесс перехода сопровождается излучением света. Значит, запоминание связано с переходом частиц на верхние уровни, а считывание — с переходом на нижний уровень. Вместо газов можно взять твердые вещества, устройства с ними получаются проще.

Генераторы света станут у нас верными помощниками ученых в развитии физики, химии, биологии, медици-

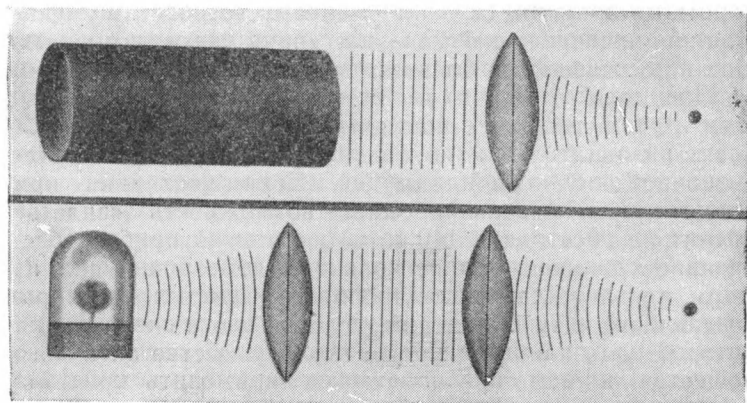


Рис. 33. Возможности фокусировки света от квантового генератора и от обычной лампы

ны. Чтобы представить себе возможности, которые они в себе несут, достаточно привести один пример. Известно, что выдающийся русский ученый П. Н. Лебедев в конце XIX века открыл явление давления света. Это давление в обычных условиях очень мало и отмечается лишь весьма чувствительными приборами. Мощный же пучок света от монохроматического источника можно сфокусировать на очень маленькую площадку — величиной около миллионной доли квадратного миллиметра (рис. 33). Получается огромная концентрация светового потока, вызывающая колоссальное давление, измеряемое миллионом атмосфер. Такой световой «нож» можно применять для точной обработки различных материалов, создания ускорителей заряженных частиц, управ-

ления химическими реакциями, исследований свойств веществ в сильных электрических полях.

Одним из мирных применений светового луча было использование его для выполнения функций хирургического инструмента — скальпеля. Такие «лучевые скальпели» уже испытывались при глазных хирургических операциях на животных и людях.

Кроме перечисленных возможностей, квантовые приборы оптического и инфракрасного диапазонов открывают пути к фотографированию астрономических объектов, имеющих малую яркость. Они помогут человеку исследовать свойства материи, повысить точность оптических спектроскопов и интерферометров, чувствительность детекторов инфракрасного излучения, облегчат стерилизацию металлических поверхностей. Как сообщают зарубежные специалисты, с помощью остронаправленных лучей света за счет развиваемого ими давления можно управлять движением спутников по орбитам.

Безусловно, у новой отрасли радиофизики есть и свои трудности. Сложной задачей, в частности, является получение чистых и однородных кристаллов различных веществ, обеспечивающих работу генераторов на разных частотах видимого и инфракрасного диапазонов. Но усилиями ученых эти трудности будут преодолены в течение ближайших пяти — десяти лет. Это будет означать гигантский шаг вперед в развитии всех применений радиоизлучений.

Выполняя исторические решения XXII съезда КПСС, советские ученые полны решимости сделать все для быстрейшего развития новой отрасли науки и техники в интересах прогресса народного хозяйства, быстрейшего создания материально-технической базы коммунизма.



ЛИТЕРАТУРА

1. Горди В., Смит В., Трамбаруло Р. Радиоспектроскопия. М., Гостехиздат, 1955.
 2. Зингер Дж. Мазеры. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
 3. Квантовые парамагнитные усилители. Сборник статей. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
 4. Радунская И. Л. Радиоспектроскопия. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
 5. Басов Н. Г., Прохоров А. М. Квантовая радиофизика. В кн.: «Новые проблемы физики». М., Изд-во «Знание», 1961.
 6. Жаботинский М. Е. Молекулярные генераторы и усилители. М., Госэнергоиздат, 1958.
 7. Сергованцев Б. В. Параметрические усилители СВЧ. М., Изд-во «Советское радио», 1961.
-

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Перед новыми трудными задачами	7
Радиоспектроскопия ведет разведку	16
Возбуждение квантовых систем	27
Пучок-генератор? Да!	32
С помощью парамагнитного резонанса	40
Парамагнитные усилители бегущей волны	49
Уверенные шаги параметрических усилителей	57
Рождение красного луча	63
Как устроены генераторы света?	68
Квантовые генераторы и «лучи смерти»	77
Литература	90

Петр Тимофеевич Асташенков

АТОМНАЯ РАДИОТЕХНИКА

Редактор *Э. Д. Андреевко*

Художник *В. Г. Прохоров*

Худож. редактор *А. С. Александров*

Техн. редактор *Н. А. Власова*

Корректор *Э. А. Кузнецова*

Сдано в набор 8/VIII 1962 г.

Подписано в печать 13/XI 1962 г.

Бумага 84×108/32 Физич. печ. л. 2,75

Привед. п. л. 4,51 Уч.-изд. л. 4,56

Заказ изд. 804 Тираж 20500 экз

T-10985 Цена 14 коп

Заказ тип 2157

Госатомиздат, Москва, Центр.

ул. Кирова, 18

100 М. П. 173
ЦЕНА 14 коп.

