**Мазеры**

Реферат студента пятого курса З/О Антонова Александра Михайловича

Донецкий национальный университет

Донецк, 2009

**Введение.**

Мазер (англ. maser) — квантовый генератор, излучающий когерентные радиоволны. Его название — сокращение фразы «Усиление микроволн с помощью вынужденного излучения» (microwave amplification by stimulated emission of radiation) — было предложено в 1954 году американцем Ч. Таунсом, одним из его создателей. Кроме Таунса к открытию непосредственного принципа работы квантового генератора причастны советские учёные А. М. Прохоров, Н. Г. Басов, а также американцы Дж. Вебер, Д. Гордон и Х. Цейгер. В 1964 г Прохорову, Басову и Таунсу была присуждена Нобелевская премия по физике «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию осцилляторов и усилителей, основанных на принципе лазера — мазера». Изначально, после изобретения, считалось, что мазер — чисто человеческое творение, однако позже астрономы обнаружили, что некоторые из далёких галактик работают как исполинские мазеры. В огромных газовых облаках, размером в миллиарды километров, возникают условия для генерации, а источником накачки служит космическое излучение. Мазеры используются в технике (в частности, в космической связи), в физических исследованиях, а также как квантовые генераторы стандартной частоты.

Басов Николай Геннадиевич (1922 г.р.), российский физик, один из основоположников квантовой электроники. В 1954 г. совместно с А.М.Прохоровым создал первый квантовый генератор на пучке молекул аммиака. В 1955 г. предложил трехуровневую схему для создания инверсного состояния в квантовых системах. В 1964 г. удостоен Нобелевской премии по физике за фундаментальную работу в области квантовой электроники.

Прохоров Александр Михайлович (1916 г.р.), российский физик, один из создателей квантовой электроники. В 1954 г. совместно с Н.Г.Басовым создал первый квантовый генератор на пучке молекул аммиака. В 1955-1960 гг. работал над созданием квантовых парамагнитных усилителей СВЧ-диапазона. В 1958 г. предложил в качестве резонатора квантового генератора использовать открытый резонатор. В 1964 г. за фундаментальные работы в области квантовой электроники удостоен Нобелевской премии по физике

Историю создания мазера следует начинать с 1917 г., когда Альберт Эйнштейн впервые ввел представление о вынужденном испускании. Это был первый шаг на пути к лазеру. Следующий шаг сделал советский физик В.А. Фабрикант, указавший в 1939 г. на возможность использования вынужденного испускания для усиления электромагнитного излучения при его прохождении через вещество. Идея, высказанная В.А. Фабрикантом, предполагала использование микросистем с инверсной заселенностью уровней. Позднее, после окончания Великой Отечественной войны В.А. Фабрикант вернулся к этой идее и на основе своих исследований подал в 1951 г. (вместе с М.М. Вудынским и Ф.А. Бутаевой) заявку на изобретение способа усиления излучения при помощи вынужденного испускания. На эту заявку было выдано свидетельство, в котором под рубрикой “Предмет изобретения” записано: “ Способ усиления электромагнитных излучений (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн), отличающийся тем, что усиливаемое излучение пропускают через среду, в которой с помощью вспомогательного излучения или другим путем создают избыточную по сравнению с равновесной концентрацию атомов, других частиц или их систем на верхних энергетических уровнях, соответствующих возбужденным состояниям”.

Первоначально этот способ усиления излучения оказался реализованным в радиодиапазоне, а точнее в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ диапазоне). В мае 1952 г. на Общесоюзной конференции по радиоспектроскопии советские физики ( ныне академики) Н.Г. Басов и А.М. Прохоров сделали доклад о принципиальной возможности создания усилителя излучения в СВЧ диапазоне. Они назвали его “молекулярным генератором” (предполагалось использовать пучок молекул аммиака). Практически одновременно предложение об использовании вынужденного испускания для усиления и генерирования миллиметровых волн было высказано в Колумбийском университете в США американским физиком Ч. Таунсом. В 1954 г. молекулярный генератор, названный вскоре мазером, стал реальностью. Он был разработан и создан независимо и одновременно в двух точках земного шара — в Физическом институте имени П.Н. Лебедева Академии наук СССР (группой под руководством Н.Г. Басова и А.М. Прохорова) и в Колумбийском университете в США ( группой под руководством Ч. Таунса). В последствии от термина “мазер” и произошел термин “лазер” в результате замены буквы “М” (начальная буква слова Microwave – микроволновой) буквой “L” (начальная буква слова Light – свет). В основе работы как мазера, так и лазера лежит один и тот же принцип – принцип, сформулированный в 1951 г. В.А. Фабрикантом. Появление мазера означало, что родилось новое направление в науке и технике. Вначале его назвали квантовой радиофизикой, а позднее стали называть квантовой электроникой.

Принцип работы мазеров имеет много общего с работой лазеров. Главный процесс - вынужденное излучение возбужденных молекул - протекает в отличие от лазерного не в оптическом диапазоне, а в диапазоне СВЧ. Схематически мазер показан на рис. 1. Пучок молекул аммиака из источника 1 влетает в селектор 2, в котором происходит разделение молекул.

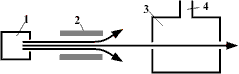


Рис. 1 - Принцип устройства мазера.

В качестве селектора большей частью применяют так называемый квадрупольный конденсатор, который состоит из четырех параллельных металлических стержней с разноименным зарядом, создаваемым напряжением 20-30 кВ (рис. 2). Внутри возникает неоднородное электрическое поле, причем на продольной (вдоль стержней) оси симметрии конденсатора поле отсутствует. В молекулярном пучке, поступающем в конденсатор, часть молекул находится в возбужденном состоянии, а другая часть в невозбужденном. Возбужденные молекулы имеют электроны на более высоких энергетических уровнях.

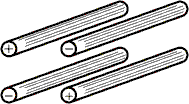


Рис. 2 - Взаимное расположение стержней в квадрупольном конденсаторе.

Электрическое поле квадрупольного конденсатора действует на молекулы так, что возбужденные молекулы собираются на оси конденсатора, а невозбужденные отклоняются от оси. В результате из квадрупольного конденсатора в объемный резонатор 3 попадает пучок возбужденных молекул. Объемный резонатор представляет собой колебательную систему в виде некоторой плоскости, ограниченной проводящими стенками. Такой резонатор в зависимости от размеров обладает обычно несколькими резонансными частотами. В квантовом генераторе резонатор настроен на частоту, соответствующую переходу возбужденных молекул в основное, невозбужденное состояние. Тогда поток молекул, в которых осуществляется такой переход, излучает электромагнитные волны, возбуждающие и поддерживающие колебания в резонаторе. Энергия этих колебаний отбирается через вывод 4 резонатора.

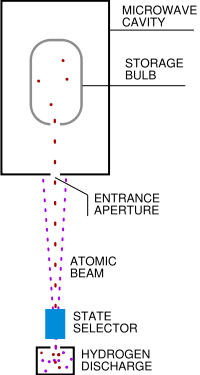
Молекулярный генератор на аммиаке создает колебания с частотой 23, 87 ГГц, что соответствует длине волны примерно 1, 25 см. Мощность такого генератора очень мала и составляет Вт. Главная особенность молекулярного генератора на аммиаке - высокая стабильность частоты. Относительная нестабильность частоты за несколько часов работы не превышает . Подобный генератор может быть использован в качестве стандарта частоты.



Ещё более высокую стабильность частоты имеет генератор на пучке атомов водорода. Он отличается от генератора на аммиаке тем, что для селекции возбужденных и невозбужденных атомов используется неоднородное магнитное поле, а не электрическое. Это объясняется наличием у атомов водорода некоторой намагниченности. Неоднородное магнитное поле прижимает к оси возбужденные атомы водорода и отклоняет от оси невозбужденные. Поэтому в объемный резонатор влетают возбужденные атомы водорода и, возвращаясь внутри резонатора в невозбужденное состояние, генерируют электромагнитные волны длиной 21 см. На такую волну настроен объемный резонатор. Относительная нестабильность частоты водородного генератора может быть . Мощность не превышает Вт. Аналогично водородному работает генератор на атомах цезия. Молекулярные и атомные квантовые генераторы применяются для точного отсчета времени - в молекулярных и атомных часах.



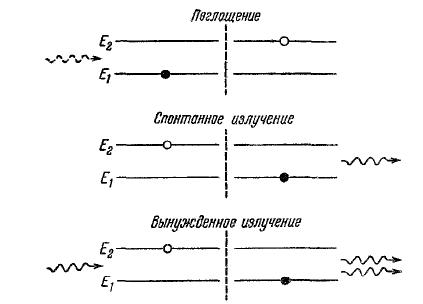
Рис.3 Водородный мазер.



В первоначальном мазере, созданном в 1954 г. Джеймсом Гордоном, Цайгером и Таунсом, использовались вибрации молекул аммиака для получения микроволновых колебаний точно определенной частоты.

Вслед за этим Николас Бломберген из Гарвардского университета наметил практический путь построения так называемого 3-уровневого твердого мазера для использования его в качестве микроволнового усилителя с низким уровнем шумов.

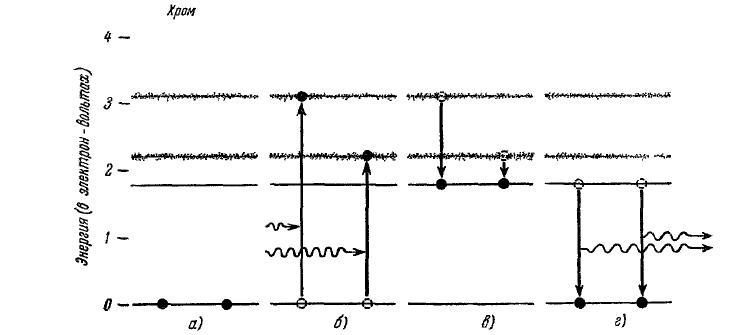
Первый мазер такого типа был построен в лаборатории компании Bell Telephone Laboratories Джорджем Фехером, Сковилом и Зайделем, и затем было сконструировано много других. Радиоастрономы нашли их особенно ценными для усиления очень слабых радиосигналов из космоса.



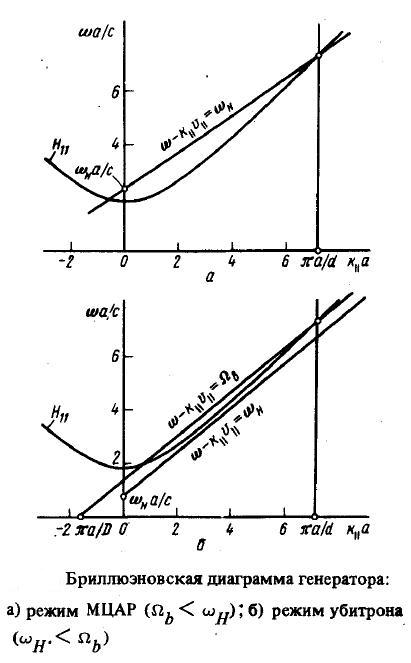
На этом рисунке процесс индуцированного излучения (внизу), являющийся основой действия мазера, сопоставляется с поглощением (наверху) и спонтанным излучением (в середине). Если атом в основном состоянии (черный кружок слева вверху) поглощает фотон (волнистая пунктирная стрелка), то он возбуждается или переходит в более высокое возбужденное состояние (белый кружок справа вверху). Возбужденный атом (в середине слева) может излучить затем энергию спонтанно, эмитируя фотон и возвращаясь в основное состояние (справа в середине). Возбужденный атом (слева внизу) может также быть вынужден к эмиссии фотона, если он испытает удар фотона, пришедшего со стороны. Таким образом, в дополнение к вынуждающему фотону теперь имеется второй фотон той же самой длины волны (справа внизу), и атом возвращается в основное состояние.

Индуцированное излучение, представляющее собой основу действия мазера, является обратным процессом по отношению к поглощению электромагнитных волн или фотонов атомными системами. Когда фотон поглощается атомом, энергия фотона переходит во внутреннюю энергию атома. Атом в этом случае переходит в возбужденное квантовое состояние. Позднее он может спонтанно излучить эту энергию, эмитируя фотон и возвращаясь в основное или в некоторое иное промежуточное состояние. В продолжение периода, когда атом еще возбужден, он может быть вынужден эмитировать фотон, если этот возбужденный атом испытает соударение с фотоном, имеющим в точности энергию фотона, который был бы испущен атомом спонтанно. В результате пришедший со стороны фотон или волна получают приращение за счет фотона от данного возбужденного атома. Наиболее важным и примечательным является то, что волна после ее испускания находится точно в той же фазе, что и первоначальная волна, обусловившая испускание вторичной. Это явление — наиболее существенный момент самого принципа мазера.

Основной задачей при проектировании мазера является создание активной среды, в которой большинство атомов может быть приведено в возбужденное состояние, так что электромагнитная волна соответствующей частоты, проходящая через нее, обусловит целую лавину фотонов. Для того чтобы вынужденное излучение доминировало над поглощением, должен быть обеспечен избыток возбужденных атомов. Атомы приводятся возбужденное состояние путем впуска в систему электромагнитной энергии с длиной волны, отличающейся от наведенной волны; процесс активации называется подкачкой. Коль скоро активная среда приготовлена, она может быть заключена в зеркальный ящик или полый резонатор. Тогда волна, начавшаяся у одной из стенок ящика, будет расти по амплитуде, пока не достигнет другой стенки, где она отразится обратно, в массу возбужденных атомов. На стенках неизбежны потери вследствие неидеального отражения. Если усиление вследствие вынужденного излучения достаточно велико для перекрывания этих отражательных потерь, в ящике установится стоячая волна. В сантиметровом диапазоне нетрудно построить ящик, имеющий размеры длины волны и спроектированный таким образом, что установится волна лишь одного определенного вида. Каждый вид колебаний соответствует выходной частоте; добавочные типы колебаний обусловливают дополнительные частоты, или шум, и конкурируют с желаемым типом колебаний, отнимая энергию от источника, возбуждающего атомы.



Атомы хрома (черные кружки) в кристалле рубинового мазера закачиваются на более высокие энергетические уровни и затем вынуждаются к эмиссии фотонов, образующих мазерный луч Атомы в основном состоянии (а) поглощают фотоны (волнистые стрелки), которые накачивают их на одну из двух энергетических полос (б) Атомы отдают часть своей энергии кристаллической решетке и переходят на метастабильный энергетический уровень (в) Под действием фотонов от других атомов хрома они излучают фотоны характерной длины волны и переходят в основное состояние (г).



Предложение об использовании доплеровского преобразования частоты излучения электронов-осцилляторов, перемещающихся с релятивистской поступательной скоростью породило несколько классов когерентных и квазикогерентных источников электромагнитных волн в диапазоне см. Соответствующие источники когерентного излучения – лазеры и мазеры на свободных электронах (ЛСЭ и МСЭ)- обеспечивают излучене с импульсной мощностью порядка 10000 Вт на волне 3, 4 мкм и Вт на волнах от 1см до 0, 4 мм. Однако ЛСЭ и МСЭ, использующие в качестве инжекторов сильноточные электронные ускорители из-за отсутствия или несовершенства систем обратной связи обладали до сих пор низкой эффективностью и низкой степенью когерентности сигнала.



Основная трудность в создании электродинамических систем, адекватных сильноточным МСЭ и ЛСЭ заключается в необходимости одновременно удовлетворить требованиям, чтобы такая система обеспечивала селективное возбуждение моды, образованной потоком лучей, которые распространялись бы под малым углом к поступательной скорости частиц : и могла бы транспортировать интенсивный электронный поток. Решением проблемы может служить использование высокоселективных резонаторов в виде отрезка металлического волновода с гофрированной боковой стенкой, где при брэгговском условии:



реализуется резонансное рассеяние волн.

Наряду с совершенствованием электродинамических систем развитие МСЭ и ЛСЭ должно включать в себя и совершенствование активного вещества. Каждому типу инжекторов и каждому частотному диапазону должен соответствовать свой наиболее удобный способ придания электронам осцилляторного движения. Пока же в качестве осцилляторов используют электроны, колеблющиеся с баунс-частотой в периодическом магнитном поле. МСЭ и ЛСЭ соответствующего типа – убитроны – весьма перспективны для продвижения в оптической, а возможно и в более коротковолновые диапазоны. Что же касается относительно длинных волн, то здесь наиболее привлекателен мазер на циклотронном авторезонансе (МЦАР), где электроны, вращающиеся с частотой в однородном магнитном поле взаимодействуют с волной, фазовая скорость которой близка к скорости света. В таких условиях, близких к авторезонансу, отклонение частиц от синхронизма с волной, вызванные изменением их энергий и поступательных скоростей, почти полностью компенсируют друг друга: . Благодаря этому МЦАР, согласно теории, должен обладать более высоким КПД и быть менее чувствительным (адаптивным) к начальному разбросу скоростей электронов, чем другие МСЭ и ЛСЭ.



Для проверки изложенных соображений была рассчитана на основе нелинейной теории конструкция, в которой изменением параметров ускорителя и электронно-оптической системы можно было реализовать как режим убитрона, так и режим МЦАР. Трубчатый электронный пучок имел диаметр 6 мм, энергию частиц 350-600 кэВ, ток 0, 4-1, 0 кА и длительность 100 нс. Для уменьшения разбросов поперечных скоростей частиц и радиусов их ведущих центров использовался двойной катод, помещённый в магнитное поле той же величины, что и на участке взаимодействия. Накачка осцилляторной энергии в пучок производилась пространственно- модулированным магнитным полем с периодом D=2 cм. Модуляция осуществлялась вытеснением поля импульсного соленоида системой медных колец, имеющих радиальные разрезы. Такая конструкция отличается от широко применяемых систем сплошных колец тем, что не приводит к снижению продольного поля. В МЦАР использовались 3 кольца, в убитроне 12 колец.



Резонатор МСЭ представляет собой отрезок цилиндрического волновода кругового сечения с двумя брэгговскими зеркалами- периодически гофрированными участками, разделёнными гладким участком. В качестве рабочей была выбрана волна с фазовой скоростью 0, 97с; коэффициэнты отражения волны от гофрированных участков составляют 0, 9. Излучение выводится дифракционным способом.



Частота излучения определялась полосовыми фильтрами. Идентификация моды проводилась на основе диаграммных и поляризационных измерений. Мощность измерялась полупроводниковыми датчиками на горячих носителях, к которым излучение поступало по калиброванному тракту, образованному выходным волноводом, приемным рупором и участком волновода сечением 3, 6\*1, 8 мм.