	МИНОБРНАУКИ РОССИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)
	БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-01

Факультет	<u>И</u> шифр	<u>Информационные и управляющие системы</u> наименование
Кафедра	<u>И4</u> шифр	<u>Радиоэлектронные системы управления</u> наименование
Дисциплина	<u>Устройства приема и преобразования сигналов</u>	

## КУРСОВАЯ РАБОТА

на тему

Квантовые генераторы, принцип работы, генератор на  
твердом диэлектрике

Выполнил студент  
 группы И4М31

Гаврилова Ю. И.

Фамилия И.О.

**РУКОВОДИТЕЛЬ**

Тарасов А. И.

Фамилия И.О.

Подпись

Оценка \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017г.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017 г.

## Оглавление

Введение.....	3
1. Квантовый генератор .....	4
1.1. История создания.....	4
1.2. Принцип работы.....	4
2. Схемы квантовых генераторов .....	7
2.1. Молекулярный генератор на пучке молекул .....	8
2.2. Генераторы с твердым активным веществом .....	13
3. Стабильность частоты генераторов оптического диапазона.....	18
3. Применение.....	19
Вывод.....	20
Список использованных источников .....	21

## Введение

Понятие «квантовый генератор» включает в себя название источников электромагнитного излучения, которые работают на основе вынужденного излучения атомов и молекул. В зависимости от излучаемой длины волны квантовые генераторы делятся на 4 вида: мазер и лазер. Квантовые генераторы позволяют генерировать колебания более высокой частоты и при этом высокой стабильности.

Поэтому, на базе таких генераторов удастся создать эталон частоты, по точности превышающий все существующие эталоны. Показания долговременной стабильности частоты оцениваются как  $10^{-9}$  –  $10^{-10}$ , а кратковременной –  $10^{-11}$ .

Особенностью квантовых генераторов является их способность эффективно работать на высоких частотах, практически до  $10^9$  МГц. Так же, генераторы оптического диапазона позволяют достигнуть высокой направленности излучения, плотности энергии в световом пучке и большой частотный диапазон, что позволяет передавать достаточно большой объем информации.

Квантовые генераторы обычно различают:

- 1) по характеру активного вещества, квантовые явления в котором определяют работу приборов.
- 2) по диапазону рабочих частот
- 3) по методу возбуждения активного вещества или разделению молекул по энергетическим уровням.

По диапазону рабочих частот квантовые генераторы делятся на мазеры (Microwave amplification by stimulated emission of radiation – усиление микроволн с помощью вынужденного излучения) и лазеры (light amplification by stimulated emission of radiation – усиление света с помощью вынужденного излучения).

# **1. Квантовый генератор**

## **1.1. История создания**

Впервые принцип вынужденного излучения предложил А. Эйнштейн в 1916 году. Он определил, что вероятность скачка системы на более низкий энергетический уровень повышается, если квантовая система находится в состоянии возбуждения, а так же присутствует излучение, соответствующее квантовому переходу.

В конце 40-х годов советский физик В. А. Фабрикант на основе предложенного принципа указал на возможность создания квантового генератора. В 1951 году он подал авторскую заявку на новый способ усиления электромагнитных волн, в который упирался на проведенные им в 1939 году эксперименты по регистрации вынужденного излучения.

В 1951 году американский физик Ч. Таунс предложил использовать вынужденное излучение для получения радиоволн миллиметрового диапазона, а так же составил принципиальную схему генератора.

Впервые, в 1954 году, был создан первый квантовый генератор (мазер) на молекулах аммиака Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым.

За разработку нового метода генерации и усиления электромагнитных волн Ч. Таунс, А.М. Прохоров и Н. Г. Басов были удостоены Нобелевской премии по физике в 1964 году.

## **1.2. Принцип работы**

Работа таких генераторов основана на явлении вынужденного излучения. Вынужденное излучение возникает в результате одновременного, согласованного по частоте и направлению испускания электромагнитных волн большим количеством атомов или молекул вещества под действием внешнего поля. Излучение может происходить в широком диапазоне длин волн.

Согласно квантовой механике, электроны в атомах могут занимать только определенные энергетические уровни (рис. 1). Основной уровень  $E_0$  –

соответствует наименьшей энергии, остальные уровни – возбужденные. Под действием кванта электромагнитного излучения электрон может перейти с одного уровня на другой. Если переход осуществляется с низкого уровня на более высокий, то происходит поглощение кванта энергии. Обратный переход сопровождается его испусканием – вынужденное излучение. При этом энергия поглощённого или испускаемого кванта равна:

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

где  $\nu$  – частота излучения, а  $h$  – постоянная Планка.

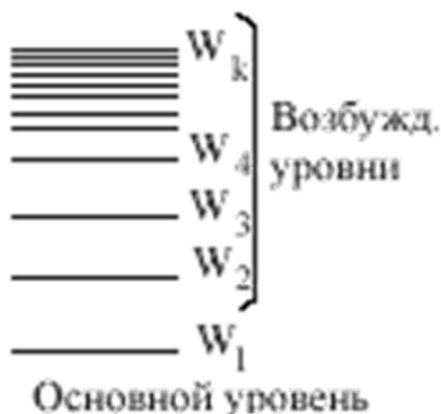


Рисунок 1 - Энергетические уровни

Таким образом, в результате вынужденного излучения каждый квант, который действует на возбужденный атом или молекулу, удваивается. Если при этом число возбужденных атомов вещества больше, чем число атомов в основном состоянии, вещество начинает усиливать проходящую сквозь него электромагнитную волну.

При отсутствии внешнего воздействия между молекулами вещества происходит обмен энергией. Часть молекул излучает электромагнитные колебания, другая часть – поглощает. Поэтому в таком состоянии система, состоящая из большого числа молекул, находится в состоянии динамического равновесия (количество излученной энергии равно количеству поглощенной). Населенность энергетических уровней определяется температурой вещества и подчиняется распределению Больцмана:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp \frac{-(E_2 - E_1)}{kT}$$

где  $T$  – температура вещества,  $k$  – постоянная Больцмана,  $N_2$  – число атомов на уровне  $E_2$ ,  $N_1$  – число атомов на уровне  $E_1$ .

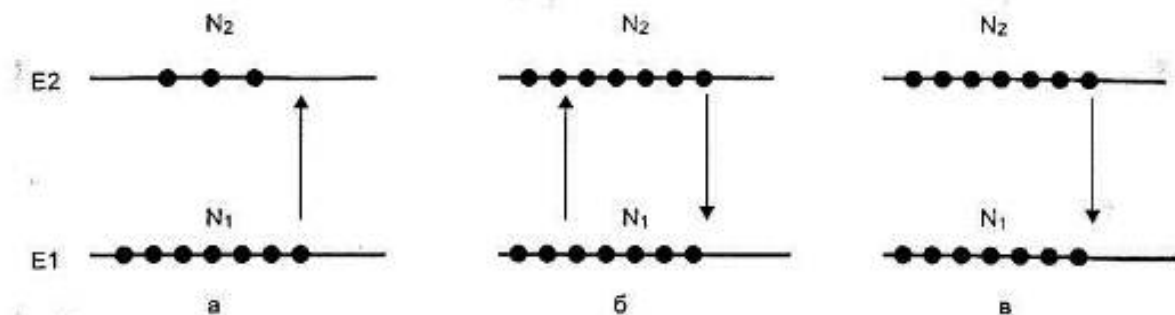


Рисунок 2 – Схема квантовых состояний вещества

В состоянии равновесия квантовые системы только поглощают энергию при внешнем излучении. Поэтому при создании квантовых генераторов необходимо создать искусственные условия, когда населенность более высокого уровня будет выше. В таком случае под влиянием внешнего высокочастотного поля, частота которого близка к частоте квантового перехода (резонансная частота), наблюдается интенсивное излучение – индуцированное. При этом осуществляется фазирование излучения отдельных молекул, что приводит к сложению колебаний и появлению эффекта усиления. Состояние высокой населенности верхних энергетических уровней называется инверсией населенности.

Инверсию населенности уровней можно получить, импульсно облучая высокочастотным полем резонансной частоты. При этом необходимо учитывать, что длительность импульса должна быть много меньше времени восстановления динамического диапазона. Но широко применяемым методом возбуждения является метод облучения высокочастотным полем с сильно отличающимся по частоте от генерируемых колебаний. Под действием такого поля происходит необходимое перераспределение молекул по энергетическим уровням.

Существует несколько различных схем энергетических уровней. Для работы большинства квантовых генераторов используют трех- или четырехуровневые схемы.

Например, для того, чтобы произошло генерирование за счет перехода с уровня  $E_3$  на уровень  $E_2$ , необходимо сделать населенность уровня  $E_3$  выше населенности уровня  $E_2$ . Для осуществления данного процесса используют вспомогательное высокочастотное поле, которое позволяет части молекул перейти с уровня  $E_1$  на уровень  $E_3$ .

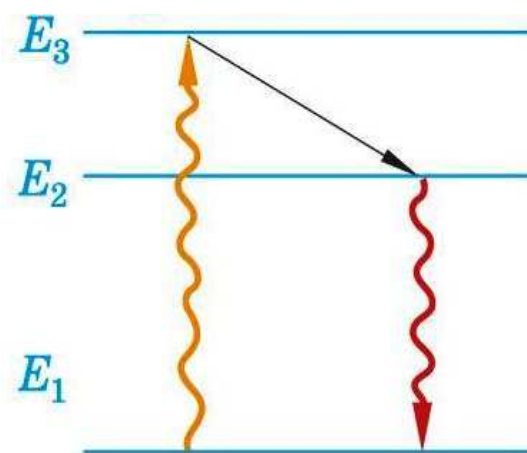


Рисунок 3 – Схема энергетических переходов

Такое вспомогательное высокочастотное поле позволяют создать генераторы подкачки.

В результате, для осуществления эффективной работы квантового генератора необходимо подобрать активное вещество, имеющее определенную систему энергетических уровней, и выбрать наиболее подходящий способ возбуждения.

## 2. Схемы квантовых генераторов

В основном квантовые генераторы различают по типу используемого в них активного вещества.

## 2.1. Молекулярный генератор на пучке молекул

Молекулярный генератор на пучке молекул проще всего рассматривать на примере генератора на пучке аммиака.

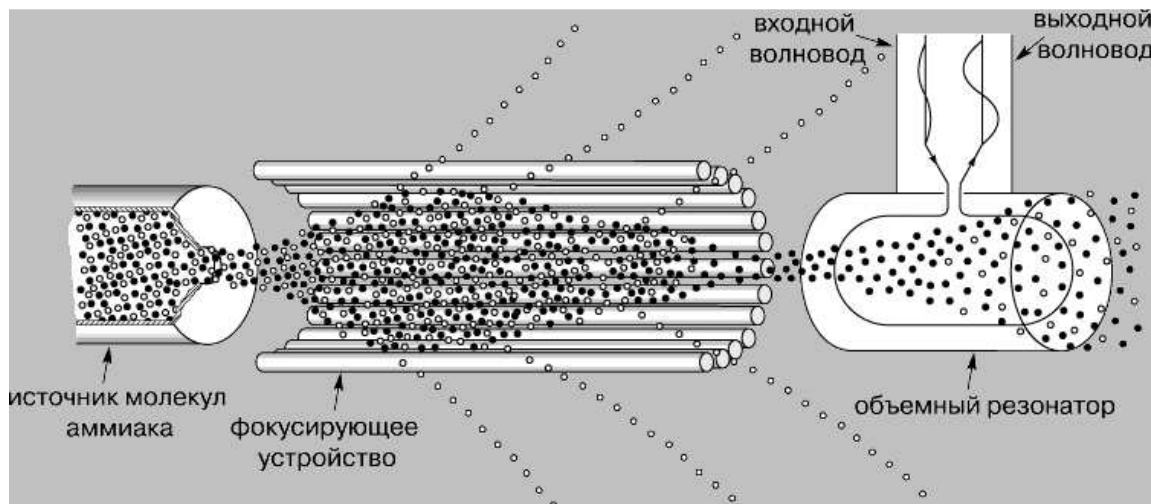


Рисунок 4 - Схема молекулярного генератора на пучке аммиака

Чаще всего в молекулярных генераторах используется газ аммиак. В диапазоне сверхвысоких частот наблюдается наиболее интенсивное излучение при энергетическом переходе, соответствующем частоте 23870 МГц. На рисунке 4 показана схема такого генератора. Для обеспечения высокой стабильности частоты генератора, а так же для получения низкого уровня шумов, основные элементы устройства размещаются в охлаждаемой жидким азотом системе. Благодаря чему, молекулы аммиака выходят из резервуара с низким давлением.

Для того чтобы получить молекулы аммиака, движущиеся вдоль системы, их необходимо пропустить через фокусирующее устройство. В качестве такого устройства может выступать диафрагма с большим числом узких каналов. Для уменьшения скорости молекул она охлаждается жидким азотом или гелием.



Но, использование газа в качестве активного вещества в генераторах возможно, только если увеличить количество молекул, которые находятся на более высоком энергетическом уровне.

В молекулярном генераторе это достигается за счет использования квадрупольного конденсатора, который отсортировывает из молекулярного пучка молекулы низкого энергетического уровня.

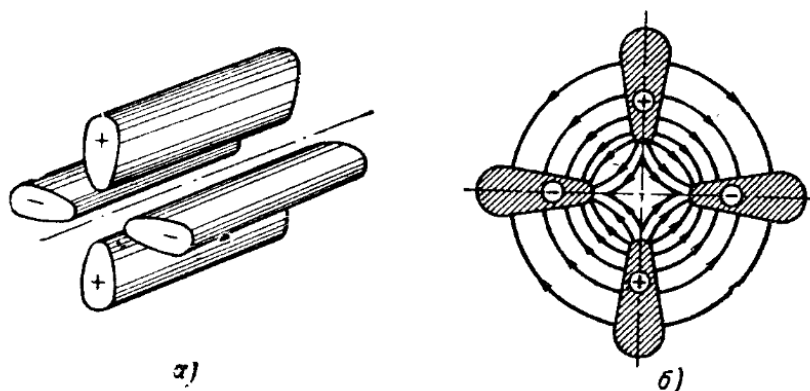


Рисунок 5 – Схема квадрупольного конденсатора

Квадрупольный конденсатор представляет из себя четыре металлических продольных стержня, соединенных попарно через один с высоковольтным выпрямителем. При этом стержни имеют одинаковые по величине, но разные по знаку потенциалы.

Процесс сортировки молекул опирается на изменение внутренней энергии с возрастанием напряженности электрического поля (эффект Штарка). Вследствие чего, молекулы аммиака при движении в поле квадрупольного конденсатора, стремясь приобрести более устойчивое состояние, разделяются: молекулы верхнего энергетического уровня смещаются к оси конденсатора (где поле равно нулю), а молекулы нижнего уровня перемещаются в область сильного поля (удаляются от оси конденсатора). В результате такого процесса молекулярный пучок становится освобожденным от молекул нижнего энергетического уровня.

После отсортровки молекул, пучок попадает в резонатор. Высокочастотное поле резонатора вызывает индуцированное излучение молекул. При этом, если излучаемая молекулами энергия равна расходуемой в резонаторе, то в системе устанавливается стационарный колебательный процесс.

Молекулы, которые поступают в резонатор и находятся на верхнем энергетическом уровне, спонтанно переходят на нижний уровень, при этом излучая квант энергии и возбуждая резонатор. Так как такой переход имеет случайный характер, то поначалу это возбуждение слабо. Но со временем поле резонатора, воздействуя на молекулы, вызывает индуцированные переходы, что и увеличивает поле резонатора. Постепенно возрастая поле резонатора будет в большей степени воздействовать на пучок молекул. Одновременно с этим, выделяемая энергия при энергетическом переходе будет усиливать поле резонатора. Такой процесс будет происходить до тех пор, пока энергия резонатора не станет настолько большой, что при прохождении через него молекул не начнут возникать обратные переходы. Вследствие этого, нарастание амплитуды колебаний становится невозможным, а значит устанавливается стационарный режим генерации.

Из вышесказанного следует, что в данном случае резонатор представляет собой автоколебательную систему, которая включает в себя обратную связь, осуществляемую через высокочастотное поле резонатора.

Мощность молекулярных генераторов на аммиаке обычно не превышает  $10^{-7}$  Вт, поэтому практически они используются в основном в качестве высокостабильных эталонов частоты. Стабильность частоты такого генератора оценивается величиной  $10^{-8} - 10^{-10}$ . В течение одной секунды генератор обеспечивает стабильность частоты порядка  $10^{-13}$ .

Одним из недостатков рассмотренной конструкции генератора является необходимость непрерывной откачки и поддержания молекулярного потока.

При квантовых переходах с более высокого энергетического уровня на более низкий, для отдельных изолированных молекул, свободных от внешних воздействий, происходит излучение электромагнитных колебаний чрезвычайно высокой стабильности. Однако в реальных молекулярных генераторах используются пучки молекул, в которых наблюдается заметное взаимодействие большого числа атомов и молекул, а также взаимодействие последних с электромагнитным полем резонатора, что неизбежно приводит к снижению стабильности частоты и, следовательно, к расширению спектра генерируемых колебаний.

Причины, влияющие на стабильность частоты:

- соударение молекул в результате хаотического движения, интенсивность которого возрастает по мере увеличения температуры, а также столкновение молекул со стенками резонатора
- разница в скоростях и направлении движения отдельных молекул, приводящая к появлению доплеровского смещения частоты колебаний
- конечность времени пролета молекул в резонаторе
- тепловые шумы в стенках резонатора и элементах, канализирующих высокочастотную энергию.

В результате беспорядочного движения молекул аммиака, происходит их столкновение, что приводит к смещению энергетических уровней молекул и, в конечном счете, к изменению генерируемой частоты. Это смещение уровня зависит от скорости сталкивающихся молекул и направления их движения. Вследствие случайного характера распределения скоростей

молекул отмеченное смещение энергетического уровня молекул приводит к шумовой модуляции генерируемых колебаний.

В оптическом диапазоне, где энергия квантов достигает больших значений, основную роль в расширении излучаемого спектра играет не тепловое движение, а дискретность переходов.

Со случайным распределением скоростей молекул связано расширение спектральной линии, обусловленное эффектом Доплера. Эффект Доплера проявляется наиболее сильно, если направление движения молекулы совпадает с направлением распространения электромагнитных волн в резонаторе. По этой причине в молекулярных генераторах используются резонаторы, в которых направление движения молекул совпадает с фронтом возбуждаемой в резонаторе волны, что позволяет существенно снизить доплеровское смещение частоты.

С целью уменьшения столкновения молекул и снижения влияния эффекта Доплера в молекулярных генераторах используются молекулярные пучки аммиака в вакууме и охлаждение пучка, формирующих его элементов и резонатора до весьма низких температур.

Одна из существенных причин, приводящая к расширению спектральной линии заключается в конечности времени пролета молекул через резонатор, т. е. времени взаимодействия молекул с полем резонатора. Вследствие очень высокой эквивалентной добротности молекул как колебательных систем время, которое молекулы взаимодействуют с резонатором, меньше периода полного установления, что приводит к некоторому снижению эффективной добротности и, следовательно, к расширению спектральной линии.

## 2.2. Генераторы с твердым активным веществом

Активным веществом твердотельных и жидкостных лазеров является диэлектрик, находящийся в конденсированной фазе. По сравнению с газами в конденсированных средах можно создать большие концентрации активных частиц в единице объема и тем самым достичь большей инверсии и большего удельного энергосъема. В то же время, единственным способом активного воздействия остается облучение светом. Поэтому в твердотельных и жидкостных лазерах на диэлектриках применяется только оптическая накачка.

Для возбуждения активного вещества применяются различные источники оптического излучения. Как и в квантовых генераторах сантиметрового и миллиметрового диапазонов, в лазерах обычно используются активные вещества, где осуществляется переход между тремя или четырьмя энергетическими уровнями.

Но следует учитывать, что по мере повышения рабочей частоты в генераторах необходимо использовать более высокую разность энергетических уровней.

В качестве твердого активного вещества широко используется искусственный рубин — кристаллы корунда с примесью ионов хрома. Помимо рубина широкое применение находят также стекла, активированные неодимом, кристаллы вольфрамата кальция с примесью ионов неодима, кристаллы фтористого кальция с примесью ионов диспрозия или урана и другие материалы.

Наиболее распространенным типом генератора являются генераторы, где в качестве активного вещества используется рубин с примесью хрома.

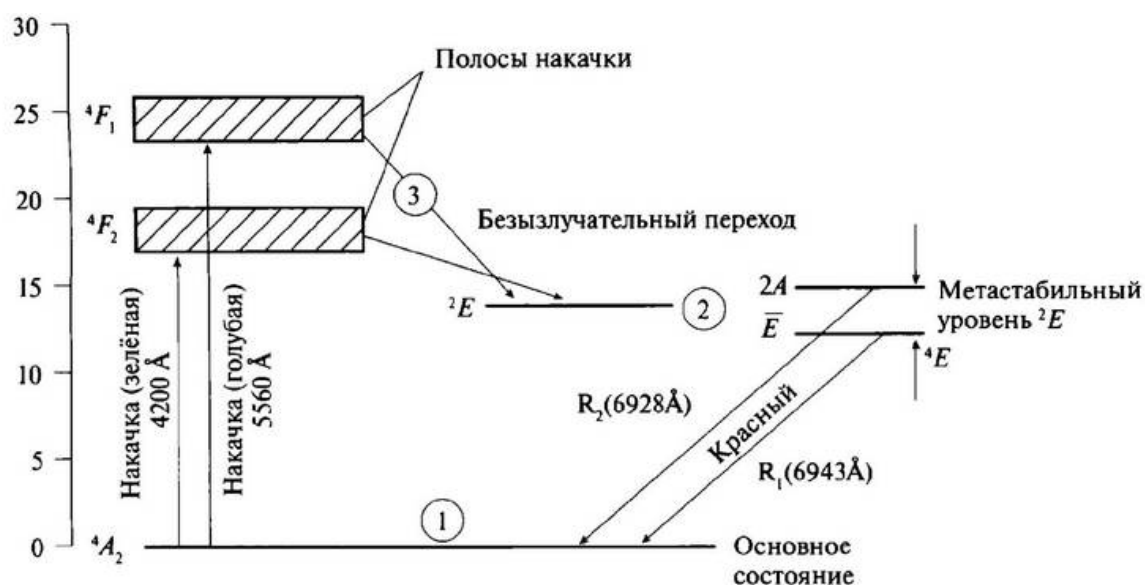


Рисунок 6 – Схема расположения энергетических уровней хрома в рубине

Полосы поглощения, на которых необходимо осуществлять подкачку, соответствуют зеленой и синей части спектра. Это осуществимо, если использовать для подкачки газоразрядные ксеноновые лампы, спектр излучения которой близок к солнечному.

Ионы хрома, поглощая фотоны зеленого и синего света, с уровня 1 переходят на уровни 3. Часть возбужденных ионов с этих уровней возвращается в основное состояние, а большая часть переходит без излучения энергии на метастабильный уровень 2, увеличивая его населенность.

Ионы хрома, перешедшие на 2 уровень, длительное время остаются в этом возбужденном состоянии. Поэтому на втором уровне можно накопить большее количество активных частиц. Когда населенность уровня 2 превысит населенность уровня 1, вещество способно усиливать электромагнитные колебания на частоте перехода 2-1.

Если вещество помещено в резонатор, то становится возможным генерирование когерентных монохроматических колебаний в красной области видимого спектра. В качестве резонатора используются параллельные друг другу отражающие поверхности.

Процесс самовозбуждения лазера протекает так же, как и в молекулярном генераторе. Часть возбужденных ионов хрома спонтанно переходит на уровень 1. При этом происходит излучение фотонов. Те из них, которые распространяются перпендикулярно к отражающим поверхностям, многократно проходят через активную среду и усиливаются в ней. За счет этого происходит нарастание интенсивности колебаний до стационарной величины.

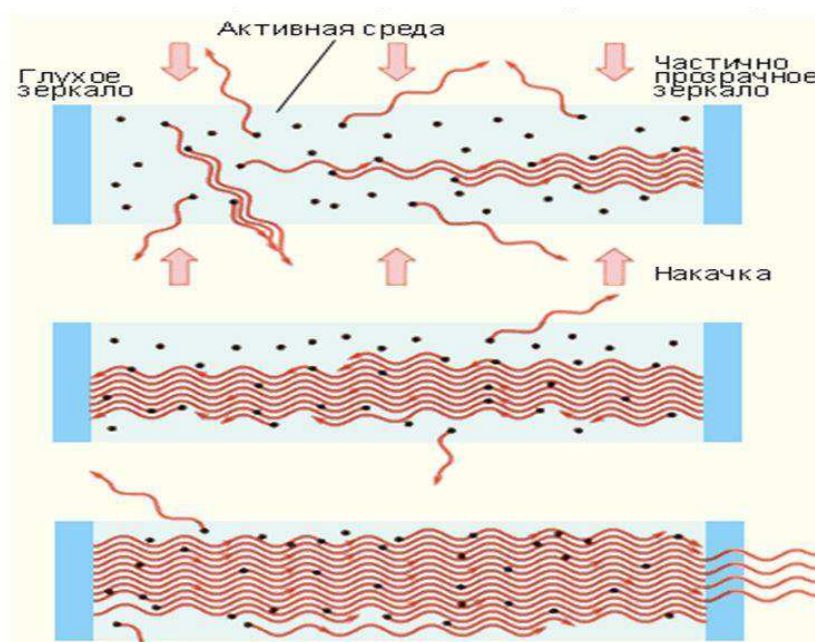


Рисунок 7 – Процесс самовозбуждения лазера

В импульсном режиме огибающая импульса излучения рубинового генератора носит характер кратковременных вспышек длительностью порядка десятых долей микросекунды. Из-за различия скоростей поступления ионов на 2 уровень и уменьшении их числа при переходах 2-1, излучение генератора имеет прерывистый характер.

Помимо рубина, в генераторах оптического диапазона применяются и другие вещества, например кристалл вольфрамата кальция и стекла, активированные неодимом.

Под действием подкачки ионы с 1 уровня переходят в возбужденное состояние. Затем они переходят на 3 уровень без излучения. Так как уровень 3 является метастабильным, на нем происходит накопление возбужденных ионов. При переходе с уровня 3 на уровень 2 происходит когерентное излучение в инфракрасном диапазоне, что облегчает возбуждение генератора.

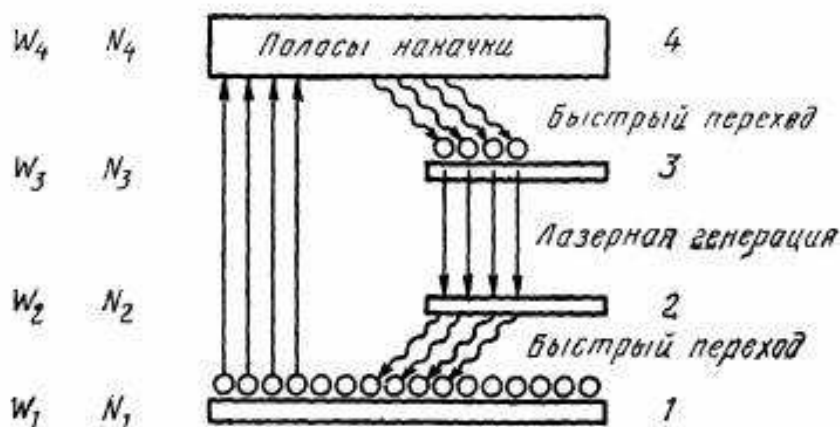


Рисунок 8 – Схема переходов ионов неодима в кристалле вольфрамата кальция

Населенность 2 уровня намного меньше 3, поэтому для достижения порога возбуждения на 3 уровень необходимо меньшее число ионов, то есть затрачивается меньшая энергия подкачки.

Твердые активные вещества обычно выполняют в виде длинных цилиндрических стержней. На тщательно полированные концы стержней наносятся отражающие покрытия в виде специальных диэлектрических многослойных пленок. Благодаря этому, торцы образуют резонатор, в котором происходит многократное отражение излучаемых колебаний, что способствует усилению индуцированного излучения и обеспечивает его когерентность. Так же, резонатор может быть образован и внешними зеркалами.



Достоинства многослойных диэлектрических зеркал заключается в малом собственном поглощении, что позволяет получить наиболее высокую добротность резонатора. Такие зеркала сложнее в изготовлении, но превосходят металлические по стойкости.

Недостатком конструкции генератора с импульсной подкачкой ксеноновыми лампами спиральной формы (внутри лампы располагается стержень активного вещества) является низкий коэффициент использования световой энергии источника подкачки. Для устранения этого недостатка в генераторах осуществляют фокусировку световой энергии источника подкачки с помощью специальных линз или рефлекторов, выполняющихся в виде эллиптического цилиндра.

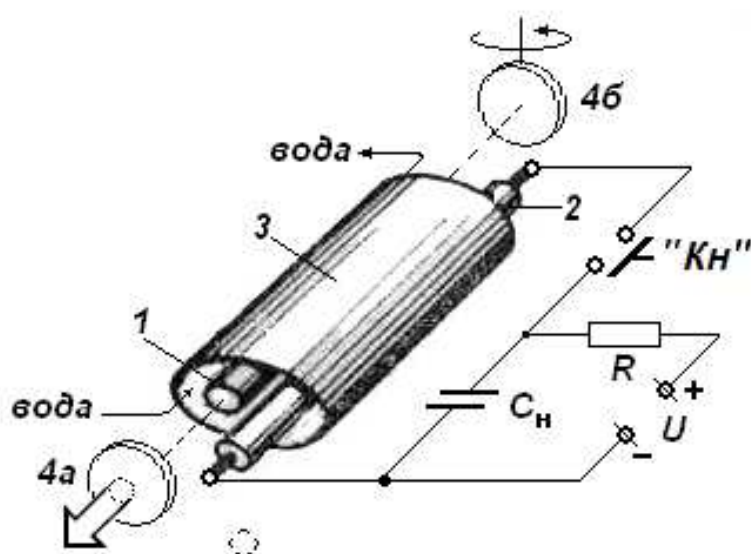


Рисунок 9 – Схема рубинового генератора

Как видно из схемы, изображенной на рисунке 9, лампа для подсветки 2, работающая в импульсном режиме, располагается внутри эллиптического рефлектора 3, который осуществляет фокусировку света лампы на рубиновом стержне. Для увеличения мощности можно использовать несколько ксеноновых ламп, установленных вокруг рубинового стержня.

Так как спектр источника подкачки намного шире полосы поглощения кристалла, приходится значительно повышать мощность источника. Это приводит к повышению температуры кристалла. Для предотвращения нагрева использовать фильтры, полоса пропускания которых приблизительно совпадает с полосой поглощения активного вещества. Так же можно использовать систему принудительного охлаждения кристалла.

Лазеры на рубине работают преимущественно в импульсном режиме. Переход в непрерывный режим ограничивается возникающим при этом перегревом кристалла рубина и источников подкачки, а также прогоранием зеркал.

### **3. Стабильность частоты генераторов оптического диапазона**

Ширина спектральной линии излучения молекул или атомов в оптическом диапазоне намного больше, чем в диапазоне СВЧ и может составлять от сотен до десятков тысяч мегагерц. Если учесть, что используемые в оптическом диапазоне открытые резонаторы, работают на очень высоких типах колебаний и имеют добротность порядка  $10^6$ , то в пределы спектральной линии вещества попадает большое число собственных частот резонатора. Вследствие этого, в оптическом квантовом генераторе может одновременно возбуждаться множество типов колебаний (мод). Стабильность отдельной моды и стабильность спектра излучаемых частот существенно отличаются и зависят от различных факторов.

Стабильность частоты моды в первую очередь определяется стабильностью параметров резонатора и в меньшей мере спектральной линией излучения. Ширина спектральной линии моды оценивается величинами порядка единиц мегагерц. Относительная стабильность частоты моды составляет  $10^{-9}$  —  $10^{-6}$ . При этом ширина всего спектра излучения составляет до десятков тысяч мегагерц для твердотельных лазеров.

### **3. Применение**

Практический интерес к оптическим квантовым генераторам обусловлен тем, что они, в отличие от других источников света, излучают световые волны с очень высокой направленности и высокой монохроматичности. Квантовые генераторы радиоволн отличаются высокой стабильностью частоты генерируемых колебаний.

Благодаря своим преимуществам генераторы оптического диапазона широко применимы в системах связи, локации и навигации. Позволяют повысить дальность и надежность связи, а так же создать навигационные системы высокой точности.

Лазеры находят множество применений в медицине (хирургия, офтальмология и т. д.) и технологии. Так же лазеры используются для создания и управления высокотемпературной плазмы, в том числе для целей термоядерного синтеза. Лазеры широко используются в системах оптической связи и обработки информации, в которых сочетаются принципы волоконной и интегральной оптики.

Так же, квантовые генераторы находят применение при научных исследованиях и исследованиях в промышленности.

## **Вывод**

В настоящее время очень сложно найти такую область науки и техники, где не применялись бы квантовые генераторы.

Мазеры позволили улучшить чувствительность и стабильность работы радиоустройств, что нашло применение в радиоастрономии и космической связи.

Лазеры позволяют достичь напряженностей электрического поля, сравнимых с внутриатомными, при которых свойства вещества начинают зависеть от интенсивности световой волны: проявляются эффекты нелинейной оптики. Они позволяют исследовать вещество и управлять характеристиками светового пучка.

Монохроматичность лазерного излучения дает возможность селективного воздействия на вещество, что находит применение в фотохимии и фотобиологии, лазерной очистке и лазерном разделении изотопов. Высокая степень когерентности лазерных источников позволила осуществить идею голографии и голографических приборов.

Использование квантовой электроники в метрологии для создания квантовых стандартов частоты и времени, лазерных дальномеров, систем дистанционного химического анализа, лазерной локации.

## **Список использованных источников**

1. М. С. Шумилин, О. В. Головин, В. П. Севальнев, Э. А. Шевцов «Радиопередающие устройства: учебник для техникумов» – М.: Высш. школа, 1981;
2. А. Н. Пихтин «Оптическая и квантовая электроника: Учебник для вузов» – М.: Высш. школа, 2001;
3. С. А. Дробов, С. И. Бычков «Радиопередающие устройства: Учебник для вузов» – М.: Советское радио, 1969;
4. А. М. Прохоров, «Квантовая электроника, Успехи физических наук», 1965;
5. Ч. Таунс, «Получение когерентного излучения с помощью атомов и молекул», 1966;
6. Н. В. Карлов. «Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления». Книга 2. Под ред. проф. В. В. Солодовникова. М: «Машиностроение», 1975;