

КВАНТОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Авторы: А. А. Маненков

КВАНТОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ, устройство, в котором электромагнитные колебания усиливаются при взаимодействии с квантовой системой частиц (атомов, молекул, ионов) за счёт *вынужденного излучения*. Взаимодействие квантовой системы с внешним электромагнитным полем приводит к переходам частиц между энергетич. состояниями \mathscr{E}_i и \mathscr{E}_j , сопровождаемым поглощением или испусканием кванта энергии $h\nu$ с частотой ν , удовлетворяющей условию $h\nu = \mathscr{E}_i - \mathscr{E}_j$, где h – постоянная Планка. Переход из нижнего j -го состояния в верхнее i -е соответствует поглощению, а из верхнего состояния в нижнее – испусканию. В термодинамически равновесной системе больше заселены нижние уровни энергии, а поскольку вероятности обоих процессов одинаковы, система поглощает проходящее через неё излучение. В системе с *инверсией населённостей*, при которой больше заселён верхний уровень энергии, преобладает вынужденное (индуцированное) излучение.

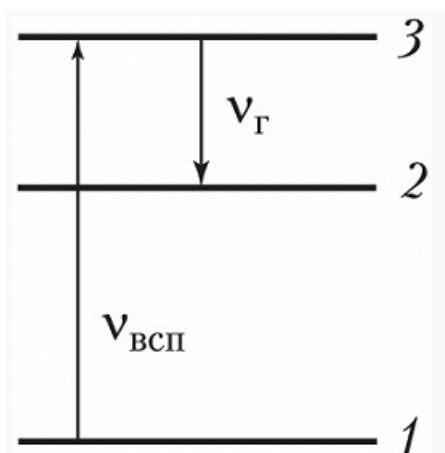


Схема метода накачки для трёхуровневой системы.

Термодинамически неравновесные состояния с инверсией населённостей можно создать разл. методами в зависимости от типа атомной системы. Один из таких методов основан на использовании вспомогательного электромагнитного излучения (*накачки*) в многоуровневых квантовых системах. Метод был предложен Н. Г. *Басовым* и А. М. *Прохоровым* в 1955 и оказался пригодным для разл. квантовых систем. Весьма эффективен он для инверсии спиновых уровней парамагнитных ионов в кристаллах и создания на их основе К. у. СВЧ-диапазона (Н. *Бломберген*, 1956). Одна из схем метода накачки для трёхуровневой системы приведена на рисунке. Вспомогательное излучение внешнего источника частотой $\nu_{\text{всп}}$, резонансной переходу между уровнями 1 и 3, индуцирует переходы атомов с нижнего энергетич. уровня 1 на верхний уровень 3, при этом возникает инверсия населённостей уровня 3 по отношению к 2, и,

следовательно, появляются условия усиления (или генерации) излучения на частоте $\nu_{\text{Г}}$ перехода между уровнями 3 и 2. И если теперь пропускать через эту систему частиц излучение с частотой $\nu_{\text{Г}}$, то оно будет индуцировать переходы с уровня 3 на 2 и усиливаться. Важным свойством квантового усиления излучения является его когерентность: кванты электромагнитного поля, излучённые при индуцированных переходах, тождественны первичным квантам поля, вызвавшего эти переходы, т. е. имеют одинаковую частоту, фазу и направление распространения. Это свойство обуславливает фазовую стабильность усилителей.

Спонтанные переходы атомов из верхнего энергетич. состояния в нижнее не зависят от внешнего поля.

Спонтанное излучение некогерентно по отношению к внешнему полю и играет роль внутр. шумов усилителей. В радиодиапазоне эти шумы очень малы, а в оптическом уже существенны.

Релаксационные переходы определяют возможность получения и удержания неравновесных состояний с инверсной населённостью и влияют на разл. характеристики К. у., такие, напр., как насыщение усиления при сильных сигналах, переходные процессы. Безызлучательные релаксационные переходы атомов с одного энергетич. уровня на другой стремятся вернуть атомы в термодинамически равновесное состояние (тепловая релаксация) либо приводят к перераспределению населённостей разл. уровней, когда атомы не находятся в равновесии с термостатом (кроссрелаксация). Механизмы этих двух типов релаксационных процессов различны: тепловая релаксация возникает вследствие взаимодействия атомов с тепловыми движениями (напр., в парамагнитных кристаллах благодаря спин-фононным взаимодействиям), а кроссрелаксация – вследствие взаимодействия атомов.

К. у. представляет собой электродинамич. систему (напр., резонатор), заполненную активной средой, атомы которой находятся в термодинамическом неравновесном состоянии с инверсной населённостью энергетич. уровней. Осн. характеристики К. у. (коэф. усиления, полоса пропускания и др.) определяются свойствами активной среды и электродинамич. системы.

К. у. можно разделить на два класса, различающихся гл. обр. диапазоном частот, а следовательно, и типами активных сред и электродинамич. систем, а также областями применения, – это К. у. СВЧ-диапазона (мазеры) и усилители оптич. диапазона (лазеры). Оба термина (лазер и мазер) используются как для К. у., так и для квантовых генераторов.

Квантовые усилители СВЧ-диапазона

Активной средой в таких К. у. являются диэлектрич. кристаллы с примесями парамагнитных ионов. Уровни энергии парамагнитных ионов в кристаллах определяются как внутрикристаллич. электрич. полями, так и внешним магнитным полем, изменение величины которого позволяет создавать усилители в заданном диапазоне частот. Переходы между такими уровнями соответствуют частотам электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), и обычно для частот СВЧ-диапазона требуются внешние магнитные поля умеренной напряжённости (до десятков килоэртэд). Наиболее эффективным для создания К. у. СВЧ-диапазона оказался рубин – кристалл корунда Al_2O_3 с примесью ионов Cr^{3+} , обладающий уникальным сочетанием спектральных, релаксационных и диэлектрич. свойств, позволяющих создавать высокоэффективные К. у. в диапазоне длин волн от дециметрового до миллиметрового.

Накачкой активной среды (для получения инверсии населённостей уровней энергии) обычно является излучение клицтрона или магнетрона. В качестве электродинамич. системы К. у. используется объёмный резонатор либо система бегущей волны. Резонаторные системы (обычно применяемые в К. у. дециметрового диапазона) представляют собой комбинацию полосковых и объёмных резонаторов, настраиваемых соответственно на частоты сигнала и накачки. В К. у. бегущей волны (миллиметровый диапазон) используются волноводные замедляющие системы штыревого типа.

Для достижения необходимой инверсии населённостей и получения эффективного усиления и низких собственных шумов активный кристалл и элементы электродинамич. системы охлаждаются до низких темп-р (обычно темп-р жидкого гелия – ок. 4 К). При этом в качестве источника внешнего магнитного поля, необходимого для расщепления уровней энергии парамагнитных ионов активного кристалла, применяются электромагниты со

сверхпроводящими обмотками. Это обеспечивает высокую стабильность магнитного поля и связанную с ним стабильность частоты, а также компактность конструкции квантового усилителя.

К. у. СВЧ-диапазона успешно применяются в космич. исследованиях – радиоастрономии, планетной радиолокации, дальней космич. связи. Было исследовано излучение галактич. водорода на длине волны 21 см, открыты новые линии излучения высоковозбуждённых атомов водорода в 8-мм диапазоне длин волн, что дало ценные сведения о распределении и характеристиках водорода в Галактике. Использование К. у. в планетной радиолокации позволило получить новые данные о характеристиках планет Меркурий, Венера, Марс, Юпитер.

Оптические квантовые усилители

К. у. этого типа имеют весьма широкий диапазон – от инфракрасного до ультрафиолетового. В качестве активной среды в них используются атомарные и молекулярные газы, диэлектрич. кристаллы, полупроводники, жидкие растворы органич. красителей, полимеры, активированные красителями, и др.

Лазерный усилитель (ЛУ) представляет собой по существу лазер, в котором создана инверсия населённостей, но не достигнуты условия самовозбуждения, т. е. лазер работает ниже порога генерации. В качестве электродинамич. системы могут быть использованы резонаторы и системы бегущей волны, но принимаются меры для исключения генерации, т. е. исключается или ослабляется обратная связь прямых и отражённых волн. Для создания инверсии населённостей применяются разл. методы в зависимости от типа среды – электрич. разряд в газовых средах, вспомогательное излучение в твердотельных средах, электрич. ток (инжекция электронов) в полупроводниках и др. В качестве источников накачки используется излучение газоразрядных ламп или др. лазеров (напр., диодных).

В соответствии с функциями и областью применений различают ЛУ слабых оптич. сигналов (ЛУС) и ЛУ мощности (ЛУМ). ЛУС используются в системах связи и обработки информации, ЛУМ – для создания мощных лазерных систем. В системах дистанционной оптич. связи наиболее подходящими оказались ЛУС, в которых в качестве активной среды применяются кварцевые волоконные световоды, активированные ионами Er^{3+} . Переходы между уровнями Er^{3+} лежат в области длин волн 1,5 мкм (где кварцевые волоконные световоды имеют низкие потери) и при накачке излучением с длиной волны 980 нм обеспечивают высокоэффективное усиление.

Осн. назначение ЛУМ – усиление мощности лазерного излучения до необходимого уровня с сохранением (или миним. искажениями) характеристик входного лазерного пучка. При этом возникают проблемы, связанные с наведённой оптич. неоднородностью активных сред, нелинейными эффектами (самофокусировка) и разрушением активных сред под действием усиливаемого лазерного излучения. Это ограничивает предельно достижимые мощности лазерных систем. Для минимизации этих проблем предложены и реализованы разл. методы. В частности, в мощных лазерных системах для коррекции однородности лазерного пучка между каскадами вводят пространственные фильтры, а конечные каскады выполняют в форме широкоапертурных пластин (дисков) для снижения плотности мощности излучения, что устраняет самофокусировку и уменьшает риск разрушения элементов.

Сверхкороткие лазерные импульсы пикосекундной и фемтосекундной длительности испытывают сильные искажения, обусловленные нелинейными эффектами в усиливающей среде и широким спектром импульса. Поэтому для исключения этих искажений применяется принцип усиления т. н. чирпированных импульсов

(импульсов с частотной модуляцией). Этот принцип заключается в предварительном расширении входного лазерного импульса до его усиления в ЛУМ и последующем сжатии уже усиленного импульса на выходе. Расширение и сжатие лазерных импульсов осуществляют на дифракционных решётках или др. оптических дисперсионных элементах. Таким образом в лазерных системах получают очень высокие (ок. 1 ПВт = 10^{15} Вт) мощности лазерного излучения сверхкороткой длительности. С использованием такого подхода в ряде лабораторий (США, Япония и др.) создаются мощные лазерные системы, позволяющие проводить исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом при экстремальных интенсивностях ($>10^{21}$ Вт/см²), что открывает новые перспективы для фундам. физики и её приложений, в частности для решения проблем управляемого термоядерного синтеза.

Литература

Лит.: Маненков А. А. О роли электронного парамагнитного резонанса в становлении и развитии квантовой электроники // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 6. См. также лит. при статьях [Квантовая электроника](#), [Лазер](#) и [Мазер](#).

Processing math: 0%