

Квантовая и оптическая электроника

Квантовые приборы и устройства изучает [квантовая электроника](#) – сравнительно молодая область физики и электроники, начало которой было положено в середине 50-х годов прошлого столетия работами российских ученых Н.Г. Басова, А.М. Прохорова и американских ученых из Колумбийского университета под руководством Ч. Таунса.

В основе работы квантовых приборов лежит [принцип квантового усиления электромагнитных волн](#), качественно отличный от известных способов генерирования и усиления когерентных колебаний. Реализация этого принципа позволила электронике сделать скачок по частоте сразу на 4 порядка – от 10^{11} Гц до 10^{15} Гц.

Оптоэлектронные приборы и устройства изучает оптоэлектроника – научно-техническое направление, основанное на использовании одновременно как оптических, так и электрических методов передачи, обработки, приема, хранения и отображения информации. Кроме сочетания оптических и электронных процессов для современной оптоэлектроники характерно стремление к миниатюризации и интеграции элементов на основе твердотельной технологии и усиливающаяся направленность на решение задач информатики.

Часто одни и те же устройства используют как принципы квантовой электроники, так и являются оптоэлектронными. Пример – полупроводниковые инжекционные лазеры, в которых излучательная рекомбинация электронов и дырок, осуществляемая в полупроводниковых $p-n$ переходах при пропускании электрического тока в прямом направлении, приводит к генерации когерентного оптического излучения. Именно такие лазеры используются в широко распространенных ныне лазерных *CD* и *DVD* устройствах.

Зачастую лишь использование квантовых приборов позволяет реализовать эффекты, не обязательно являющиеся квантовыми. Пример – нелинейная оптика, когда свойства оптической среды начинают зависеть от интенсивности света. Как правило, для этого световые поля должны быть сравнимы с внутрикристаллическими полями (для кристаллов) или с электрической прочностью среды.

Другой характерный пример – голография, развитие которой стало возможным только с созданием лазеров.

1.1. Принцип квантового усиления электромагнитных волн

- В основе принципа квантового усиления электромагнитных волн лежат процессы взаимодействия вещества с электромагнитным полем. Как известно, энергия элементов вещества, например, атомов или молекул, квантована. Частицы могут обладать лишь дискретными значениями энергии E_1, E_2, E_3 и т.д., образующими систему энергетических уровней (рис. 2.1). Когда мы имеем не одну частицу, а их совокупность, то они распределяются по системе уровней так, что на уровне E_1 оказывается N_1^e частиц, $E_2 - N_2^e$, и т.д.

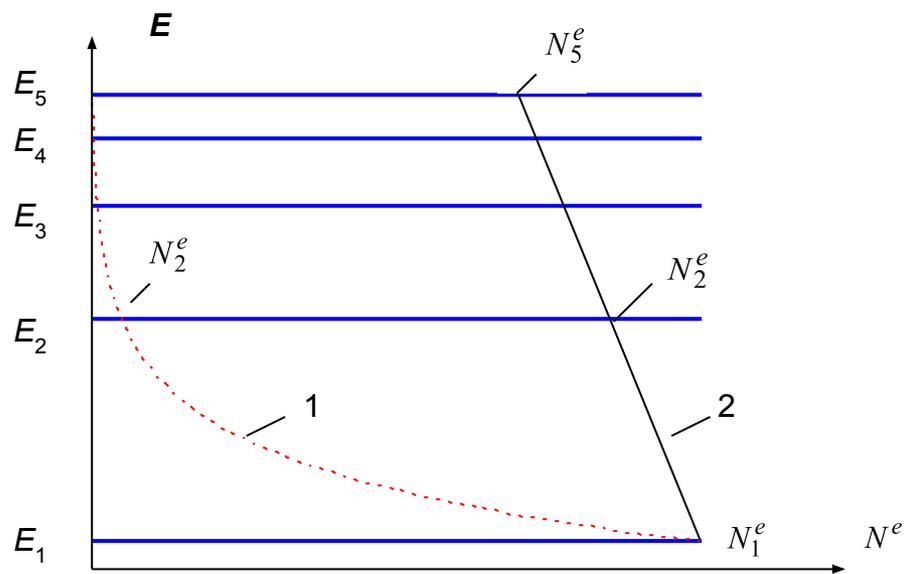


Рис. 2.1. Распределение частиц по энергетическим уровням для оптического (1) и СВЧ (2) диапазонов в условиях термодинамического равновесия.

- В условиях термодинамического равновесия распределение числа частиц по уровням, или по энергиям, подчиняется закону Больцмана:

$$N_m^e(E_m) = C \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right)$$

где C – константа, T – абсолютная температура, $k=1.3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Эту зависимость изобразим на рис. 2.1 для двух характерных диапазонов – оптического и СВЧ. Для этого найдем из постулата Бора расстояние между уровнями с номерами m и n :

$$E_m - E_n = \hbar \omega_{mn}$$

Здесь \hbar – постоянная Планка, ω_{mn} - частота перехода между уровнями.

$$\hbar \omega_{mn} \gg kT$$

- В оптическом диапазоне выполняется условие

Поэтому практически все частицы находятся на нижнем уровне с энергией E_1 (кривая 1 на рис. 2.1).

- В диапазоне СВЧ выполняется обратное условие,

$$\hbar \omega_{mn} \ll kT$$

Здесь населенность уровней изменяется по линейному закону

$$N_m^e \cong C \left(1 - \frac{E_m}{kT} \right)$$

- Во всех случаях при термодинамическом равновесии число частиц на любом верхнем уровне меньше, чем на любом нижнем.

- Представим, что рассматриваемая система частиц находится в электромагнитном поле с частотой

$$\omega = \omega_{21}$$

Это вызовет переходы между энергетическими уровнями 1 и 2.

- Тогда, как известно из физики, между полем и веществом будет происходить эффективное резонансное взаимодействие. Во-первых, поле будет индуцировать переходы частиц, находящихся в состоянии 1, в состояние 2. При этом переходе частица «отбирает» у поля квант энергии, то есть происходит поглощение электромагнитной энергии веществом.

Найдем поглощаемую веществом мощность P_{abs} , считая, что вероятность индуцированного полем перехода одной частицы в единицу времени из состояния 1 в состояние 2 равна W . Тогда общее число переходов, совершенное в единицу времени, будет $N_1 W$, а общая поглощаемая веществом мощность составит

$$P_{abs} = N_1 W \hbar \omega$$

- Одновременно с этим электромагнитное поле будет вынуждать частицы, находящиеся в состоянии 2, к переходу в состояние 1. При каждом переходе частиц сверху вниз излучается квант энергии $\hbar \omega$

- Главная особенность этого процесса в том, что **излученное поле при таком вынужденном переходе сверху вниз является точной копией поля, вызвавшего переход. Оно совпадает с ним по частоте, фазе, поляризации и направлению распространения.** Рассмотренный процесс излучения электромагнитных волн носит название **индуцированного или вынужденного излучения и является основой работы квантовых устройств.**

Заметим, что переход частицы с верхнего уровня на нижний может быть и **самопроизвольным (спонтанным)**, при котором частица сама по себе совершает переход. Излученный при таком переходе квант не согласован с исходным ни по фазе, ни по поляризации, ни по направлению распространения. Частота спонтанного излучения может быть произвольной в некотором спектральном интервале вблизи ω_{21}

- Зададимся вопросом: **будет ли усиливаться исходное электромагнитное поле при переходах частиц с уровня 2 на уровень 1? За счет индуцированного излучения – да, за счет спонтанного – нет!** Каков **аналог спонтанного излучения** в традиционной электронике? Это некоторый **шум**.
- Подсчитаем теперь мощность, излучаемую частицами при вынужденных переходах $2 \rightarrow 1$, учитывая, что вероятности индуцированных переходов одной частицы сверху вниз и снизу вверх, в единицу времени, одинаковы:

$$P_{rad} = \hbar \omega W N_2$$

- Суммарная мощность, поглощаемая частицами вещества, равна:

$$P_{\Sigma} = P_{abs} - P_{rad} = \hbar \omega W (N_1 - N_2)$$

- В условиях термодинамического равновесия всегда $N_1^e > N_2^e$

Это соответствует поглощению электромагнитных волн обычными средами, то есть $P_{\Sigma} > 0$.

- А если создать состояние вещества, при котором выполняется условие

$$N_2 > N_1?$$

В этом случае среда не поглощала бы, а усиливала электромагнитное поле!

В создании ситуации, соответствующей данному неравенству, и состоит основная идея получения квантового усиления. Оказывается, существует достаточно много способов достижения такого состояния вещества, при котором энергетически более высоко лежащие уровни имеют большую заселенность, чем низко лежащие. ***Эта ситуация носит название состояния инверсии населенностей энергетических уровней.***

- Приборы квантовой электроники, генерирующие оптическое излучение, принято называть лазерами (**laser**), по первым буквам английского словосочетания “**light amplification by stimulated emission of radiation**” – усиление света посредством индуцированного излучения.

Таким образом, *принцип квантового усиления электромагнитных волн заключается в создании в веществе состояния инверсии населенностей и в использовании индуцированных переходов.*

Задача 1_1

Для трехуровневой системы частиц с эквидистантным спектром и частотой перехода между соседними уровнями $\omega_{32} = \omega_{21} = kT / \hbar$, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, найдите населенности первого и второго уровней, если на третьем уровне находится 10^{18} частиц.