

УСЛОВИЕ ГЕНЕРАЦИИ СВЕТА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРАХ

Сиддиқов Рустамжон Ўктамович,

Набихонов Саиджалол Лазизхон угли

Кокандский филиал Ташкентского государственного
технического университета имени Ислама Каримова

sidrus1073@mail.ru, nabixonovsaidjalolxon@gmail.com

Аннотация:

В статье приведены рассуждения о генерации когерентного излучения и об условиях генерации света в полупроводниковых лазерах.

Ключевые слова: полупроводник, лазер, когерент, квазиуровни Ферми, функция распределения Ферми-Дирака, валентная зона, генерация.

CONDITION OF LIGHT GENERATION IN SEMICONDUCTOR LASERS

Siddiqov Rustamjon O'ktamovich,

Nabixonov Saidjalolxon Lazizxon o'g'li

"Kokand Branch of Tashkent State Technical University"

sidrus1073@mail.ru, nabixonovsaidjalolxon@gmail.com

Abstract:

The article presents arguments about the generation of coherent radiation and the conditions for generating light in semiconductor lasers.

Keywords: semiconductor, laser, coherent, quasi-Fermi levels, Fermi-Dirac distribution function, valence band, generation.

Полупроводниковый лазер – устройство, на основе кристаллического полупроводникового материала, генерирующее интенсивный когерентный световой поток в узком диапазоне частот или длин световых волн в определенном направлении при приложении электрического напряжения смещения к его внешним электродам.

Наиболее известное применение лазеров осуществляется в оптических системах передачи информации на большие расстояния. Имеется огромное количество других применений лазерных излучающих диодов: в системах записи и считывания информации, хранящихся на CD и CDRW дисках; высокоскоростная печать (лазерные принтеры); локальные сети обмена информацией; доплеровские оптические радары; оптическая обработка сигналов; медицинское, технологическое применение и многие другие практические приложения.

В полупроводниковом лазере, скорость рассмотренных переходов зависит не только от степени населенности электронами более высоких энергетических уровней (зона проводимости), но и от вероятности того, что электронные состояния в валентной зоне отсутствуют, что позволяет электронам в состоянии 2 спонтанно переходить в состояние 1. В этом случае темп спонтанной фотонной эмиссии можно записать в виде:

$$r_{sp} = AD(E_2)f(E_2, T)D(E_1)(1 - f(E_1)), \quad (1)$$

где A – коэффициент пропорциональности, $D(E_2)$ – плотность электронных состояний в зоне проводимости, $D(E_1)$ – плотность электронных состояний в валентной зоне,

$$f(E_2, T) = \frac{1}{e^{\frac{E_2 - E_{Fc}}{kT}} + 1} \quad (2)$$

функция распределения Ферми-Дирака, дающая вероятность того, что состояние 2 занято электроном,

$$f(E_1, T) = \frac{1}{e^{\frac{E_1 - E_{Fv}}{kT}} + 1} \quad (3)$$

функция распределения Ферми-Дирака, дающая вероятность того, что состояние 1 занято электроном, E_{Fc} , E_{Fv} – квазиуровни Ферми для электронов и дырок.

Т.к. стимулированная эмиссия фотонов зависит от плотности фотонных состояний, то, вводя плотность фотонов в рабочей области лазера $\rho(\hbar\omega) = u(\nu)/\hbar\omega$, где $u(\nu)$ определяется из (6) для скорости переходов из состояния 2 в состояние 1 имеем:

$$r_{21} = B_{21}\rho(\hbar\omega)D(E_2)f(E_2, T)D(E_1)(1 - f(E_1)). \quad (4)$$

Наконец, в процессе поглощения фотона, имеем электронно-дырочную пару. Скорость таких переходов зависит от плотности электронов в валентной зоне и от плотности незанятых состояний в зоне проводимости, так же как и от плотности фотонов:

$$r_{12} = B_{12}\rho(\hbar\omega)D(E_1)f(E_1, T)D(E_2)(1 - f(E_2)). \quad (5)$$

Отношение скорости стимулированной эмиссии и поглощения света является критерием; будет ли световое поле в активной области затухать или усиливаться. Используя (4), (5) совместно с (2), (3) дает следующее соотношение, не зависящее от плотности фотонных состояний:

$$\frac{r_{12}}{r_{21}} = \frac{f_v(E_1)(1 - f_c(E_2, T))}{f_c(E_2, T)(1 - f_v(E_1, T))} = e^{\frac{\hbar\omega - (E_{Fc} - E_{Fv})}{kT}} \quad (6)$$

Поэтому фундаментальное условие для усиления светового потока в рабочей области лазера ($r_{21} \gg r_{12}$) является:

$$E_{Fc} - E_{Fv} - \hbar\omega > E_g \gg kT, \quad (7)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны активной зоны полупроводника.

С другой стороны, коэффициент поглощения света (α) и коэффициент усиления света (g) в рассматриваемой области равняются

$$\alpha = \frac{r_{12}}{N_{ph}v_{gr}} = \frac{r_{12}n}{N_{ph}c}, \quad g = \frac{r_{21}}{N_{ph}v_{gr}} = \frac{r_{21}n}{N_{ph}c} \quad (8)$$

Поэтому условие (6) можно переписать в виде:

$$\frac{r_{12}}{r_{21}} = \frac{\alpha}{g} = e^{\frac{\hbar\omega - (E_{Fc} - E_{Fv})}{kT}} \quad (9)$$

и условие $g \gg \alpha$ имеет тот же самый вид, как и выражение (7).

Другое полезное соотношение – отношение спонтанной и стимулированной эмиссии можно получить из (1) и (4):

$$\frac{r_{21}}{r_{spont}} = \frac{B_{21}}{A}\rho(\hbar\omega) = \frac{h^3}{\pi^2\hbar^3c^3}(\hbar\omega)\rho(\hbar\omega) \quad (10)$$

Из (10) следует, что условие $r_{21} \gg r_{spont}$ выполняется в том случае, когда большая плотность фотонов присутствует в рабочей области лазера. В оптических квантовых генераторах, плотность фотонов в рабочей области огромна, а спектральный состав очень узкий, поэтому $\rho(\hbar\omega)$ очень велика, и вынужденное (стимулированное) излучение является преобладающим и играет основную роль в генерации фотонов. Условие (6) означает, что в рассматриваемой энергетической системе имеется большое количество неравновесных электронов в состоянии (2), с одной стороны, и большое количество пустых состояний (дырок) в состоянии (1). Такая ситуация называется инверсной по заселенности энергетических уровней отношению равновесной и обеспечение инверсной заселенности энергетических уровней является необходимым условием работы полупроводниковой лазерной системы.

Инверсное состояние обеспечивается, если лазерная диодная структура смещена в прямом направлении и приложенное напряжение удовлетворяет условию $V = E_{Fc} - E_{Fv} > E_g$, где E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, в котором происходит процесс световой генерации и V – напряжение смещения диода в энергетических единицах (эВ).

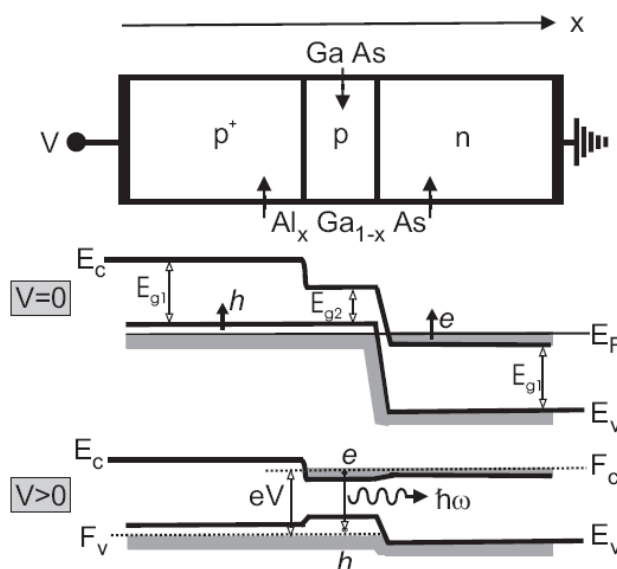


рис.1. Схематическое представление необходимого условия возникновения лазерной генерации.

Если световое поле имеет достаточную интенсивность, чтобы сделать стимулированную эмиссию фотонов доминирующим процессом, то генерируемый фотон в процессе излучательной рекомбинации электрона и дырки, порождает стимулированную эмиссию другого фотона с теми же параметрами, что и исходный. Теперь оба фотона вызывают появление ещё двух других и т.д. (рис.1).

Это означает, что единственный фотон порождает лавинообразный процесс генерации фотонов в активной области лазера. При этом интенсивность световых волн в процессе их распространения в активной области лазера возрастает. Происходит усиление светового потока в этой области лазера и формулировка закона Буггера-Ламберта-Бера теперь принимает вид:

$$I(\nu, z) = I(\nu, 0)e^{(g(\nu) - \alpha(\nu))z} \quad (11)$$

где $g(\nu)$ – коэффициент усиления световой волны, а $\alpha(\nu)$ – коэффициент поглощения света в рассматриваемом материале, z – продольная координата распространения светового потока. Имеется несколько особенностей полупроводниковых лазеров, отличающих их от лазеров других типов или от светоизлучающих диодов:

- Компактность. Полупроводниковые лазеры изготавливаются на одном чипе. Это позволяет легко встраивать их в различные более сложные конструкции.
- Высокая эффективность (КПД), достигающая 50 %. Это позволяет изготавливать лазеры с низким потреблением электрической энергии по сравнению с другими типами лазеров.
- Непосредственное преобразование электрической мощности в световой поток. Возможность встраивания лазерных конструкций в современные интегральные схемы.
- Возможность непосредственной модуляции светового потока внешним напряжением смещения.
- Малые световые потери в активной области. Возможность функционирования при комнатных и более высоких температурах.

К недостаткам следует отнести крайнюю чувствительность к изменениям температуры, что нежелательно во многих приложениях. Другим недостатком является сильная расходимость светового пучка лазерного диода даже на небольших расстояниях от излучающей свет грани лазерного диода.

Литературы

1. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высш. школа, 2001.
2. Сиддиқов, Рустамжон Ўктамович. "ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР НА ГОМОПЕРЕХОДЕ." Conferencea (2023): 123-125.
3. Сиддиқов, Рустамжон Ўктамович. "СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ И ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК ХАЛЬКОГЕНИДОВ КАДМИЯ." Science and Education 2.3 (2021): 221-225.
4. Сиддиқов, Рустамжон Ўктамович. "Люминесценция в полупроводниках." Science and Education 4.2 (2023): 810-815.
5. Siddiqov, Rustamjon O'ktamovich, and Abror Qahramonovich Asqarov. "Blox funksiyasining hisoblash usullari." Science and Education 3.4 (2022): 22-26.