

МИКРОЛАЗЕР

Авторы: С. Я. Килин

МИКРОЛАЗЕР, лазер, размеры резонатора которого приближаются к предельно малым, равным половине длины волны оптич. излучения. (В микроволновой области спектра аналогом М. является микромазер.) При меньших размерах локализации мод фотонная структура становится неэффективной для создания обратной связи, необходимой для получения лазерной генерации. Существует неск. типов М., различающихся способом обеспечения локализации фотонов.

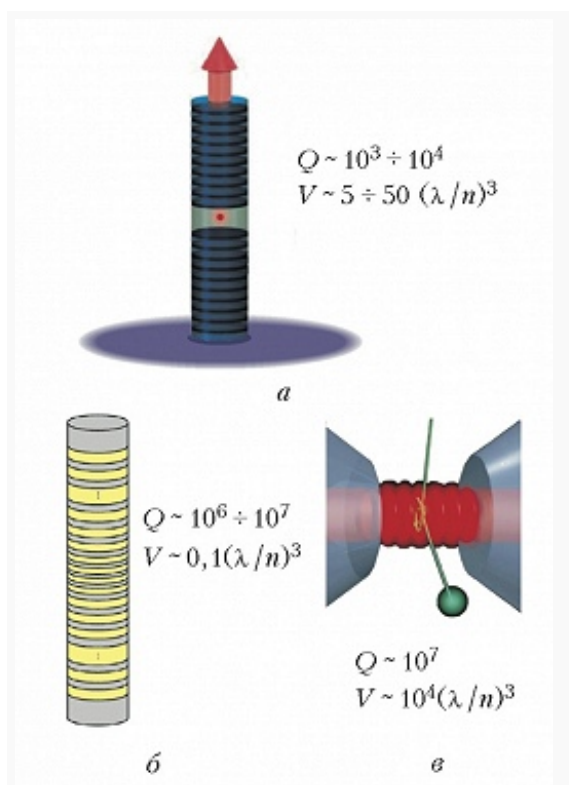


Рис. 1. Микрорезонаторы Фабри – Перо, используемые в микролазерах: а – вертикальный микроколонтчатый; б – микроколонтчатый с перетяжкой модового профиля; в – объёмный.

В поверхностно излучающих полупроводниковых М. с вертикальным микроколонтчатый резонатором (рис. 1, а) центральная активная область с квантовыми ямами или слоями с квантовыми точками окружена сверху и снизу периодич. полупроводниковыми планарными структурами, образующими вертикальные микрорезонаторы (МР) Фабри – Перо с высокоотражающими (коэф. отражения > 99%) зеркалами (т. н. распределённые брэгговские зеркала). В горизонтальном направлении свет локализуется за счёт полного внутр. отражения на границе воздух – полупроводник. В микроколонтчатом МР с перетяжкой модового профиля (рис. 1, б) локализация фотонов в горизонтальном направлении ещё больше увеличивается за счёт изменения периода между планарными структурами в центральной

активной зоне МР. М. на основе

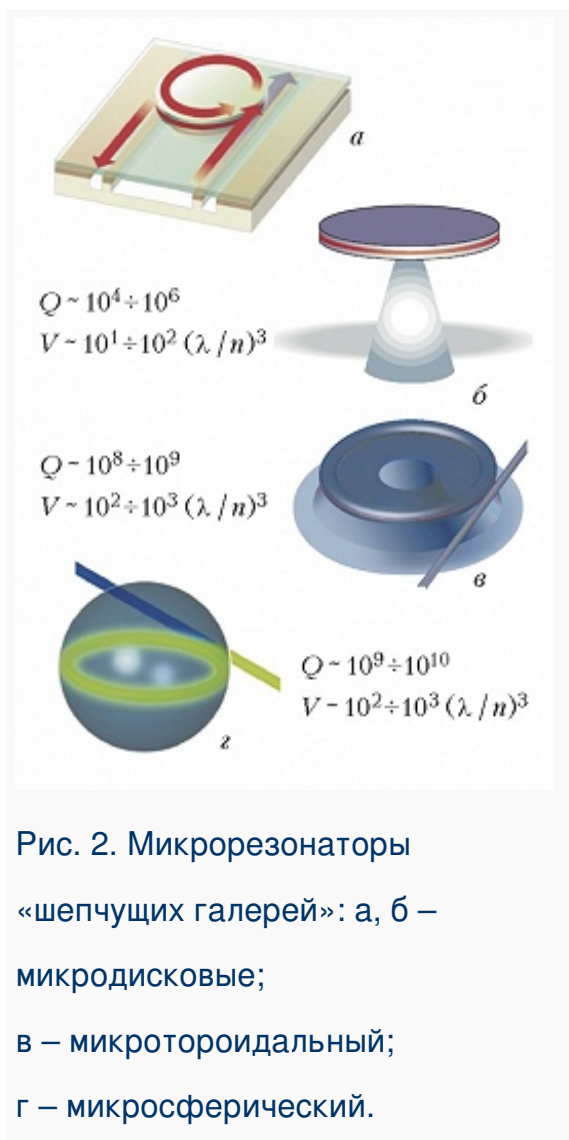
высокодобротных объёмных МР Фабри – Перо (рис. 1, в) локализуют фотоны продольных мод с помощью высокоотражающих зеркал сантиметрового диаметра, расположенных на расстояниях в неск. мкм друг от друга. В поперечном направлении локализация фотонов отсутствует. (На всех рисунках

Q – добротность резонатора,

V – объём усиливающей среды,

λ – длина волны излучения,

n – показатель преломления среды.)



В М. с модами «шепчущих галерей» (от назв. акустич. резонаторов, образующихся в замкнутых галереях, благодаря которым слышен шёпот, произносимый на противоположной стороне галереи) локализация фотонов происходит в приповерхностных областях при распространении волн вдоль периметра диска или экватора сферы. Активная область образуется при легировании материала диэлектрика или при создании в полупроводниках квантовых ям или точек.

Существует неск. видов таких МР:

микродисковый (рис. 2, а, б),

микротороидальный (рис. 2, в) и

микросферический (рис. 2, г). Для подвода и

отвода излучения в этих МР используется

оптич. волокно с перетяжкой.

В фотонно-кристаллич. М. фотоны локализируются в двумерном (рис. 3, а) или одномерном (рис. 3, б) фотонном кристалле, создаваемом с помощью наноразмерных отверстий в мембране из полупроводникового материала (напр., арсенида галлия). В местах, где отверстия отсутствуют, возникает МР для фотонов вследствие

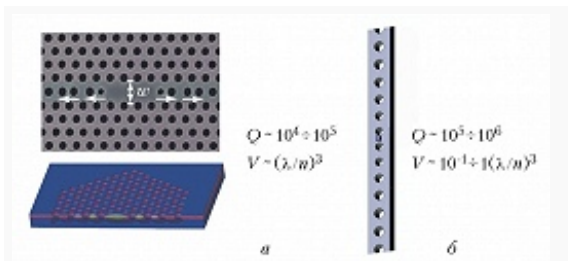


Рис. 3. Фотонно-кристаллические микрорезонаторы: а – двумерный; б – одномерный.

образования узкой области ненулевой плотности фотонных состояний в запрещённой зоне фотонного кристалла. При изменении в мембране размеров и положения ряда отверстий создаётся одномодовый волновод w для вывода излучения из резонатора (рис. 3, а). Центр мембраны содержит один или неск. слоёв с полупроводниковыми квантовыми ямами

или квантовыми точками, являющимися активной средой M . Накачка этого M . осуществляется оптич. излучением или электр. током. В последнем случае на поверхности мембраны создаются

n - и

p -слои и контактные слои.

В одномерном фотонно-кристаллич. M . (нанопучковом M .) MP образуется фотонно-кристаллич. зеркалами на краях MP и центральной областью с перетяжкой модового профиля за счёт изменяющегося диаметра нанотверстий (рис. 3, б).

За счёт сильной локализации фотонов M . обладают большой добротностью: высокой, в диапазоне

$Q = 10^3 - 10^6$ (рис. 1, а; 2, а, б; 3, а), и сверхвысокой, в диапазоне

$Q = 10^6 - 10^{10}$ (рис. 1, б, в; 2, в, г; 3, б).

Использование MP малого модового объёма

V для создания M . обусловлено рядом причин. Во-первых, в таких резонаторах увеличена разность частот соседних осн. мод, что приводит к уменьшению числа продольных мод, участвующих в лазерной генерации. (В предельном случае в MP с размерами порядка длины волны

λ из всех таких мод остаётся одна.) Во-вторых, вблизи этих частот увеличена плотность фотонных состояний, что приводит к увеличению скорости

Γ спонтанного испускания излучателя в MP по сравнению со скоростью

Γ_0 спонтанного испускания в свободное пространство. В-третьих, увеличивается доля

$\beta = \Gamma / (\Gamma + \Gamma_0)$ спонтанного испускания

Г в лазерную (резонаторную) моду в общем спонтанном испускании

$\Gamma + \Gamma_0$ (

Γ_0 – спонтанное испускание в нерезонаторные моды).

В предельном случае малых объемов МР и больших добротностей фактор β стремится к единице (по сравнению со значением 10^{-4} – 10^{-5} в обычных полупроводниковых лазерах), приводя к беспороговому характеру возникновения лазерной генерации. Отсутствие явного порога генерации обеспечивает возможность быстрого переключения М. и улучшает его когерентные свойства, особенно в лазерах с токовой накачкой.

Предельным размером активного элемента, используемого в М., является одиночный атом или одна квантовая точка. При этом для работы М., в отличие от обычного лазера, достаточно двух рабочих уровней. Статистика лазерного излучения такого М. (а также беспорогового) более упорядочена по сравнению с обычным многоатомным лазером. Одноатомный М. может генерировать излучение с субпуассоновской статистикой фотонов.

М. следует отличать от микрочип-лазеров – твердотельных компактных лазеров с монокристаллическим резонатором толщиной порядка 1 мкм, который возбуждается сильно сфокусированным излучением диодного лазера. Пиковая мощность микрочип-лазеров может достигать нескольких десятков кВт, в отличие от М., мощность которых в импульсном режиме

< 1 Вт, а в непрерывном

< 100 мВт в зависимости от типа МР и активной среды.

М. могут использоваться в устройствах нанопотоники, интегрированных оптоэлектронных и оптомеханических системах, а также в системах квантовой информации. Объединение М. с микроэлектронными устройствами невозможно из-за их различия в размерах. Размер транзистора в совр. микросхемах меньше 45 нм, что на порядок меньше длины волны оптич. излучения, т. е. самого малого М. Однако микроэлектронные устройства можно объединять с наноразмерными устройствами – нанолазерами (спазерами), в которых для возбуждения излучения вместо фотонов

используются поверхностные плазмоны. Спазеры [от англ. Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление поверхностных плазмонов вынужденным излучением)] уже реализованы (М. А. Ногинов и др., авг. 2009, США) на наноразмерных частицах золота (диаметром ок. 40 нм), превращающих когерентно-усиленные плазмоны в когерентное излучение с помощью красителя, нанесённого на поверхность этих частиц.

Литература

Лит.: Килин С. Я., Карлович Т. Б. Одноатомный лазер // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2002. Т. 11. С. 1–16; Vahala K. J. Optical microcavities // Nature. 2003. Vol. 424. № 6950; Могилевцев Д. С., Килин С. Я. Методы квантовой оптики структурированных резервуаров. Минск, 2007.