

УСЛОВИЯ ОДНОМОДОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ЛАЗЕРАХ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РЕЗОНАТОРОМ И ДВУМЕРНЫМ ФОТОННЫМ КРИСТАЛЛОМ

Введение

В работе [1] было проведено теоретическое исследование локализационных свойств дефектной области двумерного фотонного кристалла, образованного за счет отсутствия одного отверстия в общем массиве отверстий. Однако вопросы применимости данных результатов к резонаторам полупроводниковых лазеров, границы одномодовости и оптимальные параметры волноводной структуры остались за пределами рассмотрения в упомянутой работе. В настоящей статье мы затронем эти вопросы и попытаемся максимально полно на них ответить.

Напомним, что объектом наших исследований является полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором, в котором сквозь распределенные отражатели Брегга и активную область были сделаны отверстия параллельно направлению распространения излучения в резонаторе (рис. 1). В данной структуре отверстия расположены в виде гексагональной решетки, что создало структуру, известную как двумерный фотонный кристалл (далее ФК). В той части, в которой одно или несколько отверстий были пропущены (дефект), создаются условия для локализации излучения [1].

Для численного исследования мы выбрали группу структур, представленную в таблице и на рис. 2. На представленном рисунке сплошной и штриховой линиями соответственно обозначены изготовленные и пропущенные отверстия. В таблице, тип дефекта „а“ обозначает дефект, созданный пропуском одного отверстия в ФК (рис.2а), а тип „б“ обозначает дефект, созданный аналогичным пропуском отверстия и дополнительного круга отверстий (рис. 2б).

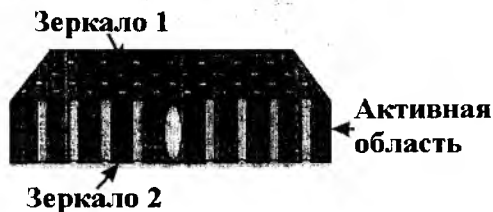


Рис. 1

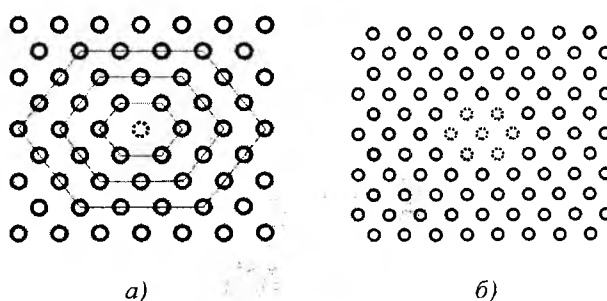


Рис. 2

Таблица

№ структуры	Тип дефекта	Расстояние между отверстиями, Λ , мкм	Диаметр отверстий, d , мкм	d/Λ
1	а	3,4	0,75	0,22
2	б	3,4	0,75	0,22
3	а	3,4	1,40	0,41
4	а	2,0	0,75	0,37
5	а	1,6	1,40	0,87
6	а	1,6	0,80	0,50

В соответствии с численной моделью [1] принимаем, что оптическое поле в резонаторе характеризуется ТЕ – поляризацией, оно многомодово для поперечных оптических мод, и в

нем поддерживается только одна продольная мода. Также предполагаем реальное и неизменное, в рассматриваемом диапазоне длин волн и в пространстве между зеркалами, значение показателя преломления.

1. Применимость подхода для моделирования лазеров с двумерными фотонными кристаллами

В работе [1] мы исследовали эффективный показатель преломления двумерного фотонного кристалла $\bar{n}_{clad}(\lambda)$ для излучения ТЕ – поляризации. Из рассчитанной в [1] зависимости и представленной на рис. 3 следует, что эффективный показатель преломления ФК практически равен по значению показателю преломления полупроводника при малых соотношениях d/Λ , а также при значениях длины волны λ , существенно меньших Λ . Применяя этот вывод к оптическому резонатору можно заключить, что при данных параметрах практически все излучение распространяется в среде полупроводника, и лишь малая его часть попадает в отверстия, где отсутствует отражение вследствие разрушенных зеркал резонатора (при производстве ФК). Таким образом, мы можем заключить, что упомянутые выше соотношения определяют параметры фотонного кристалла, при которых потери за счет попадания излучения в неотражающие области минимальны и результаты, полученные для

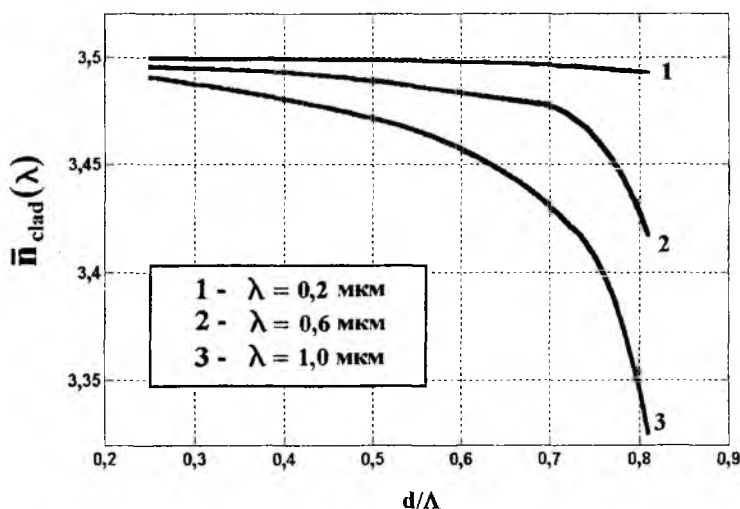


Рис. 3

волновода, образованного дефектом в ФК, должны вполне адекватно описывать поперечные моды лазерного резонатора.

В теории оптических волноводов модовый состав излучения можно описать, используя значение нормированной частоты V [2], которое меньше 2,4 для одномодового световода и больше для многомодового. В работах [1,3] были представлены нормированные BV -диаграммы для планарных оптических волноводов. При этом было показано, что граничное значение V на переходе из одномодового режима в многомодовый в таких структурах может отличаться от аналогичного параметра кремниевых волокон. Это является первой причиной, которая делает сомнительной оценку границ одномодового режима с использованием значения нормированной частоты для планарных световодов. Второй причиной является факт обширных дискуссий о способе определения эффективного радиуса сердцевин дырочного световода a , который является важным параметром при вычислении V [2]. Упомянутые дискуссии до настоящего момента не привели к единству способов определения a , что также приводит к множеству способов поиска граничных значений V и определения границ одномодового режима [4].

Для того, чтобы уйти от данных проблем, мы использовали расчет нормированной постоянной распространения волноводной моды:

$$B_j = \frac{\beta_j^2 - \beta_{clad}^2}{\beta^2 - \beta_{clad}^2}, \quad (1)$$

где β_j – постоянная распространения j -ой моды в волноводе; β_{clad} – постоянная распространения оптического излучения внутри фотонного кристалла; β – постоянная распространения в материале сердцевинки волновода (в полупроводнике).

Значения постоянных распространения, используемые в (1), находятся из численного решения уравнения Гельмгольца [1,2]. Следует отметить, что для любой волноводной моды значение B_j всегда будет больше нуля [1,2,3]. Таким образом, мы можем считать многомодовым тот световод, в котором для LP_{11} -моды соблюдается соотношение $B_j > 0$.

2. Условия одномодовой осцилляции

Используя вышеприведенное определение волноводной моды, была рассчитана „карта“ одномодового режима структуры типа „а“, приведенная на рис. 4. Данная характеристика была рассчитана для двух длин волн распространяющегося излучения 0,98 мкм 1,3 мкм. Волноводная структура с параметрами фотонного кристалла, соответствующими точкам, которые располагаются выше соответствующих кривых, проявляет многомодовые свойства, ниже – одномодовые. Следует отметить, что исходя из представленной зависимости, границы одномодовой осцилляции в основном зависят от соотношения между размером отверстий и расстояниями между ними. Одномодовый режим должен существовать даже при расстоянии между отверстиями, равном 10 мкм, что определяет размер сердцевинки волновода. Таким образом, такая конфигурация способна создать одномодовый лазер с размером активной области, во много раз превышающей типичные размеры активной области обычных лазеров с вертикальным резонатором, у которых одномодовость проявляется при радиусах активной области, меньших 2 мкм [5]. Это способно привести к значительному росту выходной мощности данного источника излучения при одномодовой генерации, а следовательно, увеличит дальность передачи информации.

Рассмотрим более подробно процессы в волноводной структуре (рис.2) при переходе между одно- и многомодовыми условиями. Для этого проведем анализ зависимости нормализованной постоянной распространения B от постоянной распространения $k = 2\pi/\lambda$ излучения с длиной волны λ в вакууме (Bk - характеристик).

На рис. 5 представлена Bk - характеристика для волноводных структур с одинаковыми параметрами ФК, но различными размерами волноводной сердцевинки (структуры 1 и 2 из табл.). Расчет данной характеристики для структуры 1 показал, что на всем интервале длин волн существует только LP_{01} -мода, в то время как структура 2 создает условия для существования LP_{01} - и LP_{11} -мод.

Для объяснения этого эффекта рассмотрим уравнение для нормированной частоты V [2]:

$$V = a\sqrt{\beta^2 - \beta_{clad}^2}, \quad (2)$$

где a - эффективный радиус сердцевинки волноводной структуры. Из рис.2 и используя [2] получаем, что для образца 1 $a \approx \Lambda$, а для образца 2 $a \approx 2\Lambda$.

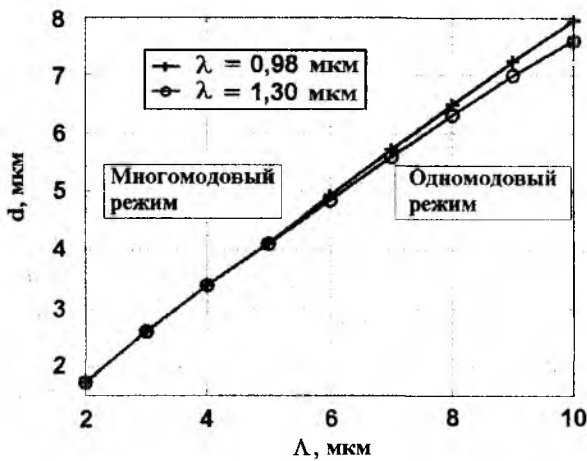


Рис. 4

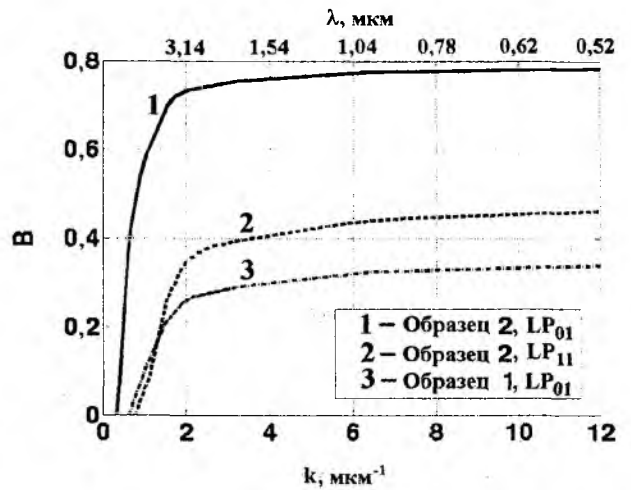


Рис. 5

Предположим, что границе одномодовости соответствует определенное граничное значение нормированной частоты V_c . Тогда с учетом того, что радиус сердцевинки образца 2 приблизительно в 2 раза больше этого параметра образца 1, а значение V_c одинаково для обеих структур, мы приходим к выводу, что одномодовой границе V_c обеим структурам будут соответствовать разные значения подкоренного выражения в уравнении (2). Следовательно, для структуры с большим размером сердцевинки необходимо, чтобы значение постоянной распространения в ФК $\beta_{clad} = 2\pi\bar{n}_{clad}(\lambda)/\lambda$ было таким, чтобы компенсировать увеличение размера сердцевинки при одном и том же значении V_c . Таким образом, мы приходим к выводу, что для структуры с большей сердцевинкой одномодовые условия могут быть созданы за счет дополнительного уменьшения эффективного показателя преломления фотонного кристалла, прежде всего путем дополнительного сокращения размеров отверстий, образующих ФК.

Рассмотрим влияние геометрических параметров фотонного кристалла на Bk -диаграммы одномодовых волноводных структур (структуры 1,3,4 из табл.). Рассчитанные

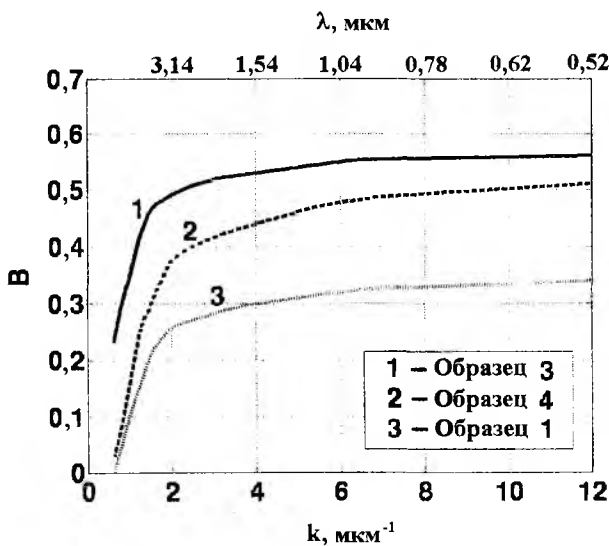


Рис. 6

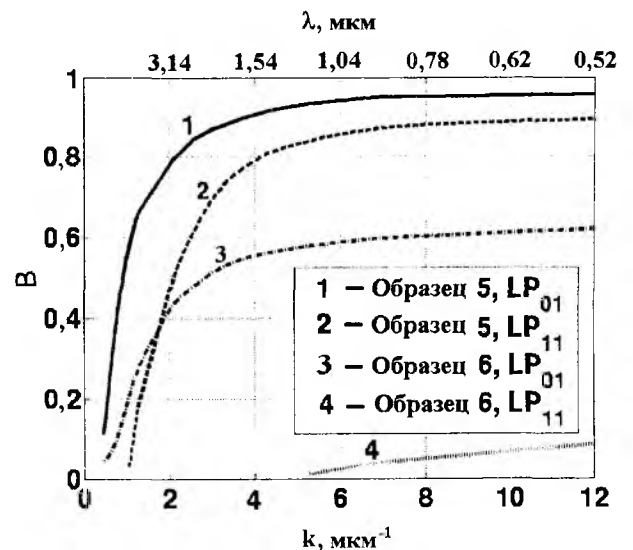


Рис. 7

характеристики приведены на рис. 6. Из данных характеристик следует, что увеличение отношения размера отверстий к расстоянию между ними приводит к большему уровню локализации волноводной моды в сердцевине волновода. Такое увеличение уровня локализации при одномодовых условиях происходит вплоть до граничного значения отношения d/Λ . Дальнейший рост этого отношения выше граничного значения увеличивает уровень локализации основной моды LP_{01} , но при этом LP_{11} -мода также начинает осциллировать в волноводе, и происходит переход оптического поля в многомодовый режим. Bk -диаграммы, соответствующие многомодовой осцилляции, представлены на рис. 7. Таким образом, образец 6, параметры которого соответствуют значениям вблизи границы одномодовости многомодовой области, характеризуется меньшим уровнем локализации LP_{11} -моды по сравнению с аналогичной характеристикой образца 5 и достаточно большей разницей в значениях B для мод, что также ведет и к большему расстоянию между колебаниями соответствующих мод в пространстве длин волн спектра излучения лазера [3]. Дальнейшее увеличение соотношения d/Λ , соответствующее образцу 5, приводит к еще более увеличенной локализации оптических мод и сокращению разницы между значениями B разных мод.

Таким образом, мы можем заключить, что максимальный уровень локализации моды при одномодовой осцилляции наблюдается при значениях размера отверстий и расстояния между ними, которым соответствует произвольная точка на рис. 3, которая немного ниже граничного отношения d/Λ . Из анализа рис. 6 и 7 дополнительно следует что максимально достижимый уровень локализации основной моды при одномодовых условиях соответствует значению $B \approx 0.57$.

3. Оптимальное число колец отверстий и размер пятна основной моды

Оптимальное число колец отверстий вокруг дефектной области фотонного кристалла (рис. 2а) и размер пятна основной LP_{01} -моды являются важными параметрами при производстве и оптимизации данных волноводных структур и лазеров. Так, например, недостаточный размер ФК способен свести к минимуму влияние ФК, а чрезмерно большой ФК приведет к необоснованному увеличению размеров всего устройства. Также и размер активной области, не согласованный с размером пятна основной моды, приведет к худшим свойствам конечного лазерного устройства.

Для поиска оптимального числа колец отверстий (оптимального размера ФК области) нами было решено уравнение Гельмгольца для ТЕ – поляризованной волны [1] при различном числе колец, геометрических параметрах ФК, для различных граничных значений и длины волны 0,98 мкм. При числе колец большем, чем 3, решение данного уравнения было полностью неизменным (как распределение моды, так и постоянная распространения моды) для разных граничных условий, что свидетельствует о достаточном влиянии области фотонного кристалла для целей локализации. Исследование размера оптического пятна основной моды затруднено из-за несимметричности радиального распределения данной моды в различных направлениях радиальной плоскости ввиду различных ограничивающих свойств (рис. 7). Поэтому для нашего случая мы определяем средний радиальный размер пятна моды $\bar{\omega}$ как среднее значение между размерами моды в направлениях осей X и Y соответственно ω_x и ω_y . При этом распределение моды было нормировано на максимальное значение, и размер моды был рассчитан на уровне $1/\exp(2)$.

На рис. 8 представлены результаты расчета среднего размера пятна, нормированного на значение расстояния между отверстиями Λ как функции отношения d/Λ . Данная характеристика была рассчитана для нескольких значений Λ при длине распространяющегося излучения, равной 0,98 мкм.

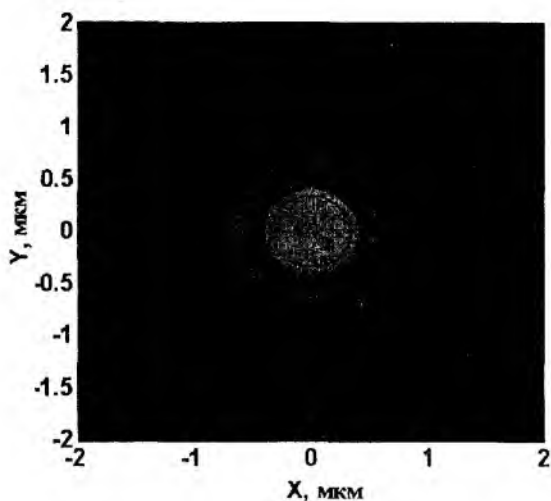


Рис. 7

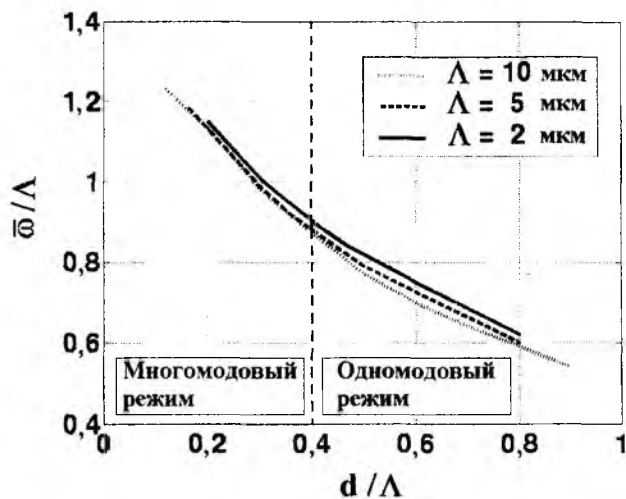


Рис. 8

Из приведенных зависимостей видно, что нормированный размер пятна не зависит существенно от значения Λ , но зависит от отношения d/Λ . Главным образом это происходит из-за сокращения активного размера сердцевинки с увеличением размера отверстий, что также влечет за собой более высокий уровень локализации. В одномодовой области, при малых размерах отверстий, происходит распространение излучения в область фотонного кристалла [1]. Таким образом, мы можем заключить, что наибольший уровень локализации при одномодовых условиях наблюдается вблизи границы перехода из одномодовых условий во многомодовые.

Заключение

В данной работе были теоретически исследованы условия поперечной одномодовой осцилляции в волноводных структурах, встроенных в полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором и образованных дефектной областью фотонного кристалла. Для данных расчетов было использовано численное решение уравнения Гемгольца для ТЕ – поляризованной волны, в результате которого были вычислены постоянные распространения в фотонном кристалле и дефектной области. На основании этих данных проводился расчет и анализ значения нормированной постоянной распространения B , что позволило миновать сложности, связанные с многообразием способов определения значения нормализованной частоты V , и одномодовых условий.

Мы также показали принципиальную возможность одномодовой устойчивой генерации в лазере, где дефект в фотонном кристалле был создан за счет пропуска одного отверстия при изготовлении фотонного кристалла. При этом было установлено, что трех колец отверстий вокруг сердцевинки должно быть достаточно для создания одномодового волноводного эффекта при длинах волн 0,98 мкм и 1,3 мкм. Согласно расчетным данным условием одномодовой осцилляции излучения в резонаторе лазера является отношение между диаметром отверстий в фотонном кристалле и расстоянием между ними, которое должно быть меньшим 0,4...0,48 в зависимости от длины волны и параметров фотонного кристалла.

Изменение локализационных свойств основной моды, для поиска максимального уровня локализации при одномодовой осцилляции, было исследовано за счет расчета Bk - диаграмм. Для данного случая было показано, что максимальный уровень локализации наблюдается вблизи перехода к многомодовой осцилляции излучения в резонаторе лазера. Дальнейшее

увеличение уровня локализации, связанное с появлением LP_{11} – моды, также приводит к сокращению размера пятна моды.

Таким образом, для создания одномодового источника излучения наиболее привлекательным является изготовление двумерного фотонного кристалла с соотношением $d/\Lambda = 0,38$. В результате будут достигнуты одновременно и одномодовость устройства и наивысший уровень локализации моды в центральной области. Однако такая структура будет иметь малую эффективность, поскольку не весь инжектируемый ток попадает в центральную часть волновода из-за эффектов поперечного растекания тока. Выход из этой ситуации может быть найден в поперечном ограничении апертуры инжектируемого тока за счет использования, например, оксидного ограничения. Подобная модификация резонатора способна существенно изменить природу оптического резонатора и привести к трехмерной вычислительной задаче.

Список литературы: 1. *Ivanov P.S., Unold H.J., Michalzik R., Maehns J., Ebeling K.J., Sukhoivanov I.A.* Single-Mode Conditions in Photonic Crystal Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers // Proceedings of 4-th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. 2002. Pp. 141 – 144. 2. *Birks T.A., Knight J.C., Russell P.St.J.* Endlessly single-mode photonic crystal fiber // Optics Letters. 1997. Vol. 22, No 13. Pp. 961 – 963. 3. *Michalzik R., Ebeling K.J.* Generalized BV Diagrams for Higher Order Transverse Modes in Planar Vertical-Cavity Laser Diodes // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1995. Vol. 31, No 8. Pp. 1371 – 1379. 4. *Koshiba M.* Full-Vector Analysis of Photonic Crystal Fibers Using the Finite Element Method. // IEICE Transactions Electronics. 2002. Vol. E85-C, No 4. Pp. 881 – 887. 5. *Unold H.J.* Single-Mode VCSELs // Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 4649. Pp. 218 – 229.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 03.09.2002