

Перестраиваемый широкоапертурный полупроводниковый лазер с внешним волноводно-решеточным зеркалом

Б.Н.Звонков, К.Е.Зиновьев, Д.Х.Нурлигареев, И.Ф.Салахутдинов, В.В.Светиков, В.А.Сычугов

Предложена схема внешнего резонатора с волноводно-решеточным зеркалом (ВРЗ) для широкоапертурного полупроводникового лазера. Исследованы спектры излучения лазерного диода в резонаторе для случаев коллинеарного и неколлинеарного падения излучения на ВРЗ. Получено существенное (до 0.1 нм) сужение спектра излучения и показана возможность плавной перестройки длины волны излучения лазера в интервале 10–18 нм.

Ключевые слова: широкоапертурный лазерный диод, внешний резонатор, волноводно-решеточное зеркало.

В настоящее время мощные широкоапертурные полупроводниковые лазеры представляют большой интерес в связи с возможностью их широкого использования – от спутниковых информационных систем до устройств бытовой электронной техники. Однако достаточно сложный модовый состав и большая расходимость излучения таких лазеров в большинстве случаев серьезно затрудняют их применение. В связи с этим в последнее время исследователи акцентировали внимание на вопросах улучшения параметров излучения данных лазеров.

Главной причиной указанных недостатков широкоапертурных лазерных диодов (ЛД) является возникновение филаментации – поперечной пространственной модуляции интенсивности оптического потока, для подавления или стабилизации которой предложен ряд конструкций ЛД (см., напр., [1–3]). Однако реализация подобных конструкций связана с сильным усложнением технологического процесса изготовления полупроводниковых структур. В то же время представляется возможным подавить или существенно повысить порог филаментации в традиционных ЛД с широким полосковым контактом за счет построения внешнего резонатора специальной конструкции, например резонатора с выходным или внутренним селективным зеркалом, роль которого выполняет гофрированный волновод [4, с.89].

В настоящей работе исследуется лазер, построенный на основе полупроводникового широкоапертурного ЛД с внешним резонатором, внутри которого помещено волноводно-решеточное зеркало (ВРЗ) с аномальным отражением света. Суть эффекта аномального отражения света состоит в том, что при возбуждении гофрированного волновода пучком света он испытывает полное отражение [5, 6]. Наблюдаемое отражение возникает в очень узком спектральном диапазоне (при постоянном угле падения) или реализуется в узком угловом диапазоне (для заданной длины волны излучения). Следовательно, такое зеркало внутри резонатора может обеспечить генерацию в узком спектральном интервале. Кроме того, поскольку зеркало является волноводным, оно обеспечи-

вает геометрическое уширение отраженного пучка света, в результате чего внутри резонатора улучшается пространственная когерентность лазерного излучения и в конечном счете – условия для синфазной работы всей активной среды. Таким образом, применение ВРЗ способствует ослаблению модуляции оптического потока внутри ЛД.

При возбуждении моды волноводного зеркала диаграмма согласования волновых векторов (рис.1) описывается следующим уравнением:

$$|\mathbf{k}_m|^2 = |\mathbf{k}_i|^2 + |\mathbf{k}_g|^2 + 2|\mathbf{k}_i||\mathbf{k}_g| \cos \varphi, \quad (1)$$

где \mathbf{k}_m , \mathbf{k}_i , \mathbf{k}_g – вектор моды, проекция вектора падающей волны на решетку и вектор решетки соответственно; φ – угол между векторами \mathbf{k}_i и \mathbf{k}_g .

Решая это уравнение относительно длины волны возбуждаемой моды, получаем

$$\lambda = A [- \sin \theta \cos \varphi + (n^{*2} - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi)^{1/2}]. \quad (2)$$

Здесь θ – угол падения излучения на решетку; n^* – эффективный показатель преломления возбуждаемой волноводной моды; A – период гофра решетки. Уравнение (2) устанавливает связь между длиной волны возбуждаемой моды, углом падения излучения на решетку и углом

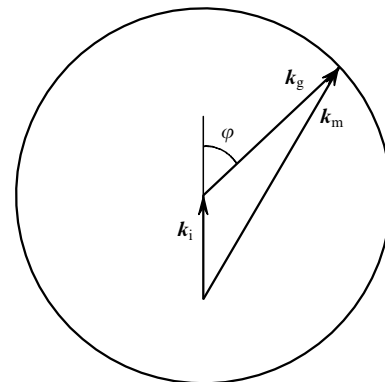


Рис.1. Диаграмма согласования волновых векторов при возбуждении ВРЗ; \mathbf{k}_m , \mathbf{k}_i , \mathbf{k}_g – вектор моды, проекция вектора падающей волны на решетку и вектор решетки соответственно.

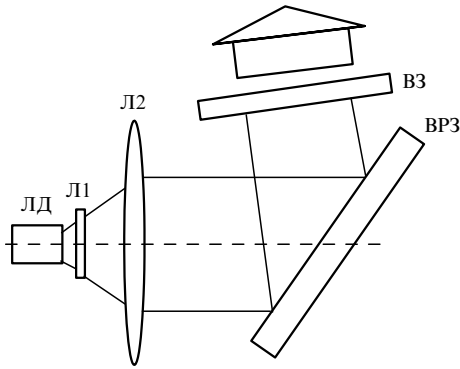


Рис.2. Схема резонатора, соответствующая коллинеарному взаимодействию излучения ТМ-поляризации с ВРЗ: ЛД – лазерный диод; Л1 – цилиндрическая линза; Л2 – собирающая линза; ВРЗ – волноводно-решеточное зеркало; ВЗ – 12%-ное выходное зеркало; плоскость p – n -перехода лежит в плоскости рисунка.

разворота штрихов решетки относительно плоскости падения. Таким образом, помещая внутрь резонатора селективное зеркало с заданным периодом гофра, можно за счет изменения угла падения и разворота штрихов решетки обеспечить условие резонанса для определенной длины волны излучения.

В исследованиях использовался полупроводниковый лазер с апертурой 360 мкм, максимумом спектра излучения на длине волны 1000.2 нм ($T = 27^\circ\text{C}$) и полушириной спектра люминесценции на полувысоте 30 нм. Одна из граней ЛД имела 100%-ное отражение, другая была просветлена для минимизации влияния грани на генерацию излучения лазера. Спектр генерации лазера с внешним 12%-ным зеркалом для тока, превышающего пороговый на 30% ($J = 1.3J_{\text{th}}$), имел ширину на полувысоте 2.5 нм, а для токов $J = 1.5J_{\text{th}}$ ширина на полувысоте возрастала до 3.6 нм.

Параметры излучения ЛД изучались в резонаторе, собранном по трехзеркальной схеме. Резонатор, в котором реализуется коллинеарное взаимодействие излучения ТМ-поляризации с ВРЗ, схематически изображен на рис.2. Внутри резонатора была помещена собирающая линза для коллимирования падающего на решетку излучения. Это позволило понизить порог генерации за счет увеличения коэффициента отражения от ВРЗ и уменьшения внутрирезонаторных потерь.

В соответствии с ориентацией штрихов решетки относительно плоскости падения излучения мы использовали два варианта внутрирезонаторного взаимодействия света с решеткой: коллинеарное ($\varphi = 0$) и неколлинеарное ($\varphi = 90^\circ$). Волноводно-решеточные зеркала изготавливались голографическим методом с последующим ионным травлением. В качестве волновода использовался напыленный на стеклянную подложку ($n = 1.512$ для $\lambda = 1$ мкм) слой Ta_2O_5 ($n = 2.05$). Толщина волноводного слоя, период решетки и глубина гофров рассчитывались для каждого случая отдельно.

Резонатор с коллинеарным падением излучения на ВРЗ

В резонаторе с коллинеарным падением излучения на решетку волноводного зеркала последнее было рассчитано так, что в нем волноводная мода возбуждалась излучением ТМ-поляризации в -1 -м порядке дифракции при угле падения, соответствующем углу Брюстера. В

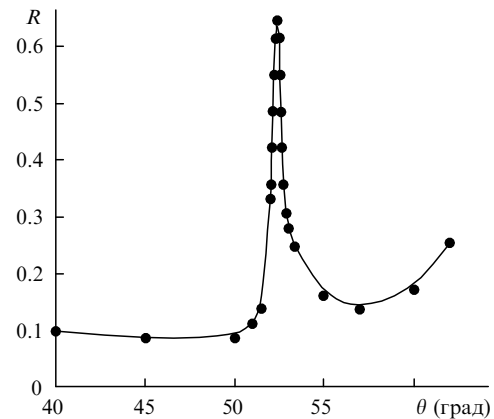


Рис.3. Зависимость коэффициента отражения излучения ТМ-поляризации от угла падения на ВРЗ в коллинеарном режиме (длина волны $\lambda = 998$ нм, период гофра решетки $\Lambda = 411$ нм).

этом случае зеркальное отражение от ВРЗ формируется исключительно за счет излучательных потерь волноводной моды. Таким образом, ВРЗ одновременно играет роль узкополосного селективного фильтра и элемента, обеспечивающего увеличение площади отраженного потока одномодового излучения, что необходимо для подавления поперечной модуляции излучения лазера.

Проведенные для этого случая расчеты дали следующие параметры волноводного слоя: толщина слоя $h = 270$ нм, период гофра $\Lambda = 411$ нм, глубина гофра $2\sigma = 200$ нм. Расчетный коэффициент затухания α_{rad} моды с длиной волны $\lambda = 998$ нм составил 140 см^{-1} , следовательно, произведение $d\alpha_{\text{rad}}$ (где d – размер пятна облучения на поверхности волновода, в нашем случае $d \approx 0.3$ мм), известное как критерий существования аномального отражения [4], для нашей геометрии резонатора равно 4.2. Таким образом, условие наблюдения аномального отражения $d\alpha_{\text{rad}} > 1$ было выполнено. Экспериментальная кривая аномального отражения изготовленного зеркала с указанными выше параметрами для излучения с длиной волны $\lambda = 998$ нм представлена на рис.3.

Исследование излучения полупроводникового лазера в таком резонаторе показало, что использование ВРЗ внутри резонатора позволяет получить устойчивую генерацию лазерного излучения в диапазоне длин волн 994–1013 нм (рис.4) при ширине генерации на полувысоте

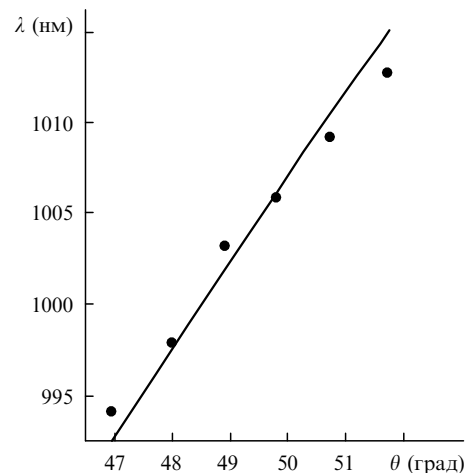


Рис.4. Зависимость длины волны ЛД от угла падения для резонатора с коллинеарным падением света на ВРЗ (точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет по уравнению (2)).

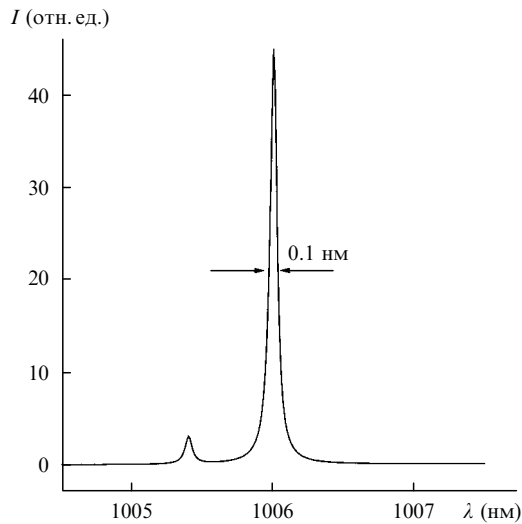


Рис. 5. Спектр генерации лазерного диода в резонаторе с неколлинеарным падением излучения ТМ-поляризации на ВРЗ.

около 0.1 нм (рис. 5). Расчетная зависимость длины волны от угла падения, найденная по уравнению (2), хорошо согласуется с экспериментальной. В расчете использовалось экспериментально измеренное значение $n^* = 1.684$. Различие в углах наклона кривых объясняется тем, что кривая люминесценции для данного лазерного диода имеет колоколообразную форму с максимумом на длине волны 1002 нм. Спектр отражения ВРЗ имеет такую же форму, но меньшую ширину. Таким образом, максимум спектра отражения и, следовательно, длина волны генерации лазера смещаются к максимуму люминесценции лазерного диода.

Измерения спектров генерации при разных токах накачки показали, что с увеличением тока происходит уширение спектра генерации по уровню $0.1I_{out}$ (I_{out} – интенсивность основной излучательной моды), обусловленное появлением дополнительных поперечных мод. Выходная мощность лазера монотонно увеличивается с возрастанием тока накачки вплоть до $1.5J_{th}$. При этом расходимость излучения в плоскости $p-n$ -перехода практически не меняется и равна 0.15° . Это связано с тем, что во всем исследованном диапазоне токов спектр выходного излучения достаточно узок, и даже при возникновении филаментации фильтрующие свойства внутрирезонаторного волнового зеркала способствуют тому, что на выходе резонатора имеет место узкополосное излучение.

Резонатор с неколлинеарным падением излучения на ВРЗ

Схема резонатора с неколлинеарным падением излучения на ВРЗ в целом аналогична схеме резонатора с коллинеарным падением излучения ТМ-поляризации (см. рис. 2); были изменены лишь ориентация штрихов относительно плоскости падения и ориентация плоскости решетки, так, чтобы они соответствовали условию неколлинеарного падения излучения ТЕ-поляризации на ВРЗ. Выбор взаимодействия излучения ТЕ-поляризации с ВРЗ был обусловлен меньшими диссипативными потерями для волноводной моды этого типа.

Угловые распределения коэффициентов аномального отражения излучения ТЕ- и ТМ-поляризации от изготовленного ВРЗ с толщиной слоя $h = 182$ нм, периодом

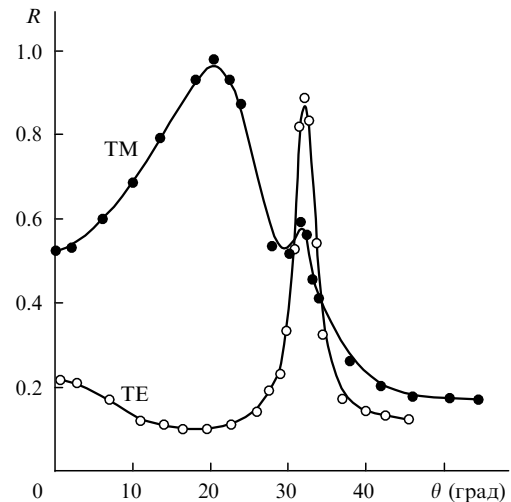


Рис. 6. Зависимости коэффициента отражения излучения ТЕ- и ТМ-поляризации от угла падения на ВРЗ в неколлинеарном режиме (длина волны $\lambda = 998$ нм, период гофра решетки $L = 642$ нм).

гофра $L = 642$ нм, глубиной гофра $2\sigma = 206$ нм показаны на рис. 6. Вид кривых свидетельствует о том, что при падении излучения ТМ-поляризации на волноводную решетку в последней могут возбуждаться моды двух типов – ТМ и ТЕ [4], падающее же излучение ТЕ-поляризации возбуждает в решетке только моду ТЕ-типа. Как и следовало ожидать, суммарные потери при возбуждении волновода ТМ-излучением оказались больше, чем при возбуждении ТЕ-излучением.

Внутри резонатора, как и в случае коллинеарного падения, для уменьшения расходимости и, следовательно, увеличения коэффициента отражения от ВРЗ была помещена фокусирующая линза.

Эксперименты показали, что данная схема реализации резонатора позволяет получить устойчивую генерацию лазерного излучения в диапазоне длин волн 997–1005 нм при ширине спектра генерации на полувысоте 0.7–1.2 нм. На рис. 7 представлены экспериментальная зависимость длины волны генерации от угла падения излучения на ВРЗ, а также расчетная кривая, полученная из уравнения (2). В расчете использовалось экспериментально измеренное значение эффективного показателя

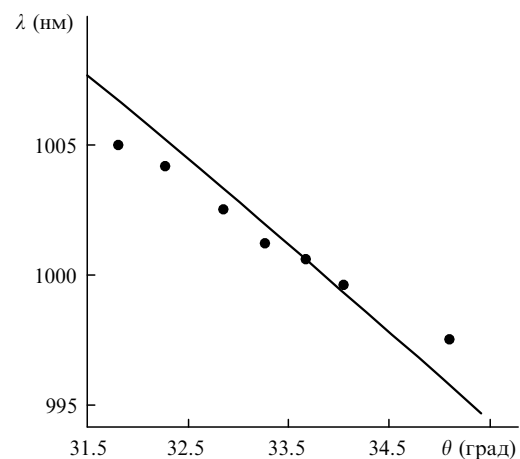


Рис. 7. Зависимость длины волны лазера от угла падения для резонатора с неколлинеарным падением света на ВРЗ (точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – расчет по уравнению (2) при $n^* = 1.656$, $\varphi = 89.8^\circ$).

преломления волноводной моды $n^* = 1.656$, угол φ между вектором решетки и проекцией плоскости падения излучения на решетку был выбран равным 89.8° . Наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Отклонение угла φ от 90° находится в пределах точности приборной установки этого угла. Различия в углах наклона кривых то же, что и для резонатора с коллинеарным падением света на решетку.

Исследование мощности и спектра генерации при разных токах накачки показало, что вплоть до тока $J = 1.8J_{th}$ мощность возрастает монотонно (рис.8); при этом она примерно равна мощности лазера без ВРЗ. При токах $J \leq 1.3J_{th}$ спектр генерации состоял из трех узких пиков, каждый шириной не более 0.15 нм, расположенных эквидистантно с общей шириной на полувысоте не более 0.7 нм. При $J = 1.8J_{th}$ спектр расширялся до 1.2 нм за счет появления паразитных продольных мод, возникающих при отражении на выходном торце полупроводникового лазера (рис.9). Расходимость излучения при исследованных токах накачки в плоскости $p - n$ -перехода

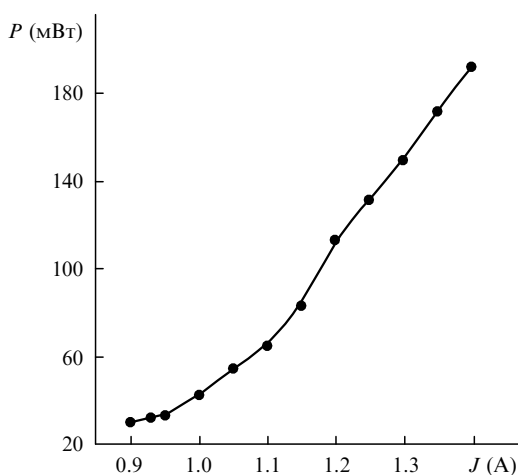


Рис.8. Зависимость мощности лазерного излучения от тока накачки ЛД для резонатора с неколлинеарным падением света на ВРЗ.

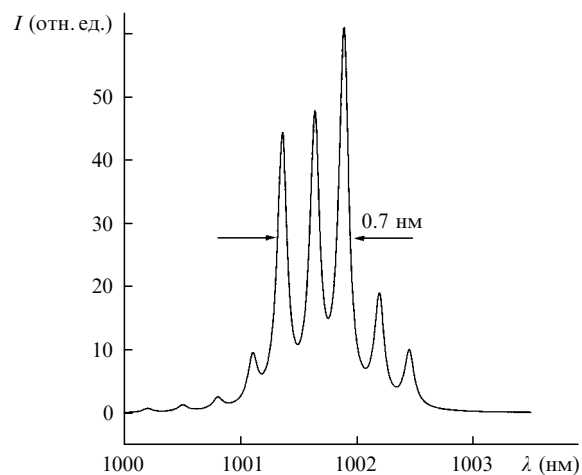


Рис.9. Спектр генерации ЛД в резонаторе с неколлинеарным падением излучения ТЕ-поляризации на решетку.

составила 0.15° .

Таким образом, применение внешнего резонатора с наклонным падением излучения на ВРЗ позволяет существенно (до 0.1 нм) сузить спектр генерации широкоапертурного полупроводникового лазера, а также реализовать перестройку длины волны излучения в пределах линии люминесценции лазерного диода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 99-02-82000 и № 00-02-17442), а также программы «Интеграция» (проект № А0103/99).

1. Parke R. et al. *IEEE Phot.Technol.Letts*, **5**, 297 (1993).
2. Guel-Sandoval S. et al. *Appl.Phys.Letts*, **66**, 2048 (1995).
3. Демидов Д.М. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 789 (1998).
4. *Труды ИОФАН* (М., Наука, 1991, т.34).
5. Голубенко Г.А., Свахин А.С., Сычугов В.А., Тищенко А.В. *Квантовая электроника*, **12**, 1334 (1985).
6. Кондратьюк В.А., Михайлов В.А., Лындин Н.М., Сычугов В.А., Парье О. *Квантовая электроника*, **26**, 175 (1999).