

Нурмиева М. В. Оптимальное распределение ресурсов в сети с разнородными потоками // Вестник МАИСУ. 2002. №6. С. 31-35. 5. Лемешко А.В. Особенности моделирования двухполюсной сети связи ортогональной сетью в рамках тензорного анализа // Радиотехника. 2002. Вып. 128. С.16-25. 6. КронГ. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. радио, 1978. 719с. 7. Свами М, Тхуласираман К. Графы, сети и алгоритмы. М.: Мир, 1984. 455 с.

Поступила в редколлегию 03.07.2005

Рецензент: д-р техн.наук,проф. Поповский В.В.

Лемешко Александр Витальевич, канд. техн. наук, доцент Харьковского университета Воздушных Сил.

Научные интересы: системный анализ сетей связи. Адрес: Украина, 61165, Харьков, ул. Клочковская, 228. Контактные телефоны: 330-82-19 (раб.).

Кравчук Александр Анатольевич, инженер Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: оптимизация сетей связи. Адрес: Украина, 61165, Харьков, ул. Клочковская, 228. Контактные телефоны: 330-82-19 (раб.).

Руденко Владислав Николаевич, канд. техн. наук, доцент Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: моделирование сложных систем. Адрес: Украина, 61165, Харьков, ул. Клочковская, 228. Контактные телефоны: 330-82-19 (раб.).

УДК 681.7.069.24:681.7.064.45

ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ БРЭГГОВСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В КОМПЛЕКСЕ С ОКСИДНЫМ ОКНОМ

КОВБАСА А.А., ЗИНЬКОВСКАЯ И.О.,
ЛЫСАК В.В., ШУЛИКА А.В.,
СУХОИВАНОВ И.А.

С позиций физических эффектов задержки отражения и дисперсии проводится анализ оптических свойств многослойных зеркал лазеров с вертикальным резонатором и оксидным окном. Получены спектральные зависимости коэффициента отражения и фазы отражения брэгговского зеркала с оксидным слоем и без него. Обсуждается влияние включения оксидного окна в распределенное брэгговское зеркало на спектр его отражения, фазовую глубину проникновения света и электромагнитное поле в резонаторе лазера.

1. Введение

В настоящее время периодические полупроводниковые структуры применяются для усовершенствования широкого спектра оптоэлектронных компонентов. Например, в таких устройствах как лазеры с вертикальным резонатором (ЛВР) [1], полупроводниковые зеркала с насыщающимся поглотителем [2] и резонансные фотодетекторы [3] успешно используются распределенные брэгговские отражатели (РБО). Особый интерес здесь представляют ЛВР — полупроводниковые лазеры, у которых направление лазерного излучения нормально к плоскости составляющих слоев. В этих лазерах используются как полупроводниковые [4], так и аморфные диэлектрические зеркала [5]. К основным преимуществам такой конструкции лазера относятся: высокая скорость модуляции (до 12 Гбит/с), малые рабочие токи (пороговые токи менее 1 мА), малые размеры резонатора (длина резонатора до 10 мкм, а диаметр — до 20 мкм), возможность устойчивой одномодовой генерации, круглое сечение светового пучка, высокие надежность и КПД [6]. Такие высокие показатели ЛВР достигаются за счет использования оксидного окна, назначение которого состоит в локализации и более равномерном

распределении носителей заряда в центре активной области резонатора ЛВР. Таким образом, применение оксидных окон позволяет в значительной степени снизить пороговый ток лазера и, кроме того, дает возможность получать одномодовое излучение в широком диапазоне изменения тока накачки за счет фокусировки электромагнитного поля в центре резонатора ЛВР. Типичная схема формирования оксидного окна состоит в следующем. При изготовлении РБО один из его периодов выращивают с повышенным содержанием арсенида алюминия. После завершения стадии роста следует процесс подготовки прибора, в котором структуру помещают в среду с высоким содержанием кислорода при температуре порядка 400°С [7]. При таких условиях арсенид алюминия окисляется до оксида алюминия. Соблюдая необходимый временной режим и зная скорость окисления [8], можно получить оксидное окно заданных размеров. Как правило, оксидные окна располагают со стороны движения дырок или с обеих сторон от активной области. Расстояние между активной областью и оксидным окном должно быть минимальным, чтобы обеспечить наилучшую фокусировку потока носителей. В то же время оксидное окно должно располагаться в минимуме интенсивности продольной моды, чтобы как можно меньше влиять на распределение светового поля вдоль резонатора ЛВР и уменьшить потери рассеяния излучения и дифракционные потери в резонаторе.

Из-за распределенного и периодического характера брэгговские отражатели вносят конечную задержку отражения [9] и дисперсию [10,11] в отраженный сигнал, которые зависят от параметров каждого слоя РБО. Поэтому внесение оксидного окна ведет не только к фокусировке носителей заряда и оптического поля, но и к изменению отражательных свойств как отдельно взятого РБО, так и резонатора ЛВР в целом. Дисперсия приводит к расширению импульса и его искажению [10], а задержка отражения влияет на время прохода импульса в резонаторе ЛВР, и определяет эффективную длину резонатора лазера. Таким образом, изменение фазовых условий распространения света в РБО с оксидным окном может привести как к иному распределению электромагнитной моды в резонаторе ЛВР, так и к сдвигу частоты лазерной

моды высокоскоростного лазера. Эти соображения формируют цель и задачи настоящей работы.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния оксидного окна на спектральные характеристики брэгговского зеркала ЛВР и выявлении механизмов влияния оксидного окна на лазерную моду ЛВР.

Задачи: 1) вычислить спектры отражения для различных РБО с оксидным окном и определить основные закономерности полученных характеристик; 2) провести сравнительный анализ спектров коэффициента отражения, фазы, задержки отражения и дисперсии РБО с оксидным слоем и без него.

2. Модель

Эффективная длина резонатора непосредственно связана с фазовой глубиной проникновения излучения в глубь зеркала, которая обычно вычисляется с использованием теории связанных мод [12,13]. Однако этот подход хорош только для случаев, когда разница показателей преломления слоев в РБО сравнительно мала. Так как в ЛВР могут использоваться различные брэгговские зеркала, и учет в расчете оксидного слоя предполагает высокий контраст показателей преломления, то необходимо выбрать другую методику расчета.

Для расчета спектра отражения РБО и других оптических параметров можно использовать ряд методик в зависимости от целей вычислений и сложности структуры. В данной работе для исследования отражательных свойств РБО с оксидным окном выбран метод матрицы переноса [13,14]. Метод позволяет вычислить спектр отражения и оценить фазовую глубину проникновения света в РБО с произвольной вариацией показателей преломления и, следовательно, применим для исследования РБО с оксидным окном без дополнительных поправок в расчете. Так как метод матрицы переноса является полуаналитическим, то его использование позволяет уменьшить время расчета и необходимый минимум компьютерных ресурсов. Суть метода изложена ниже.

Рассмотрим распространяющийся под прямым углом к брэгговскому зеркалу с оксидным окном линейно-поляризованный пучок света единичной амплитуды. Такое приближение позволит выявить характер влияния оксидного слоя на отражательные свойства четвертьволнового зеркала без проведения трудоемких расчетов. Постановка задачи позволяет разделить исследуемый РБО на две структуры: структуру без оксидного слоя для центральной области РБО и структуру с оксидным слоем для области РБО с оксидом, и решать для них одномерные задачи. В каждой из этих структур электромагнитное поле может быть описано двумя линейно-независимыми скалярными величинами, например, нормальными по отношению к границам слоев компонентами электрического E_z и магнитного H_z полей, и значения этих величин в двух разных точках вдоль структуры будут связаны матрицей переноса. В случае одномерной задачи достаточно вычислить одну из выбранных линей-

но-независимых скалярных величин, например E_z . В каждом слое зеркала будет выполняться одномерное скалярное уравнение Гельмгольца [14], которое описывает электромагнитное поле в однородной среде:

$$\frac{\partial^2 E_z(z)}{\partial z^2} + \beta_j \cdot E_z(z) = 0,$$

где β_j — постоянная распространения волны в j слое, z — продольная координата. Это уравнение имеет решение в виде суммы обратной и прямой волн, которые описываются, соответственно, через комплексные амплитуды $a_j \cdot e^{i\beta_j z}$ и $b_j \cdot e^{-i\beta_j z}$, где a_j , b_j — комплексные коэффициенты, определяющие амплитуду волны в j слое. На границах раздела двух сред при отсутствии поверхностных токов выполняется условие непрерывности тангенциальных компонент поля:

$$E_t^j(z_j) = E_t^{j+1}(z_j), \quad H_t^j(z_j) = H_t^{j+1}(z_j).$$

Здесь индекс t определяет тангенциальные составляющие полей, а z_j — продольная координата границы раздела j и $j+1$ слоев. Это условие связывает решения в различных слоях и позволяет вычислить матрицу переноса для всей структуры, если заданы амплитуды входящих с двух сторон в структуру волн. Так как мы рассматриваем падающий только с одной стороны на зеркало пучок света единичной амплитуды, то начальная амплитуда прямой волны со стороны падения пучка равна единице, а с другой стороны зеркала — нулю: $b_1=1$, $a_N=0$.

Комплексный коэффициент отражения от зеркала представляет собой отношение амплитуды обратной волны, отраженной от брэгговского зеркала, к амплитуде прямой волны, падающей на него [15]. Спектр комплексного коэффициента отражения можно записать как функцию $\bar{R}(\omega) = R(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$, где $R(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ — действительные функции коэффициента отражения и фазы отражения от частоты.

3. Исследуемые структуры

Для изготовления эпитаксиальных РБО в ЛВР широко применяют двух-, трех- и четырехкомпонентные соединения элементов III и V групп. Использование полупроводниковых твердых растворов позволяет управлять основными параметрами эпитаксиальных слоев (показателем преломления, удельной теплопроводностью и др.), а также создавать на их основе ЛВР, работающие в широкой спектральной области. При изготовлении РБО для ЛВР чаще других применяются многослойные стеки AlAs/GaAs, GaAs/AlGaAs, AlGaAsSb/AlAsSb, AlGaAsSb/InP, AlGaInAs/InP, AlGaInAs/AlInAs, InGaAsP/InP [16, 17]. В данной работе мы исследуем РБО на основе трех различных комбинаций полупроводниковых растворов AlAs/GaAs, $Al_{0.65}Ga_{0.35}As/GaAs$ и $Al_{0.096}Ga_{0.376}In_{0.528}As/InP$

(рис. 1). Эти структуры имеют низкие барьерные напряжения, высокую теплопроводность, высокую электропроводность, необходимый контраст показателей преломления, малые потери поглощения излучения на свободных носителях и возможность использования существующих методов поперечного ограничения тока и оптического поля [16, 17]. Кроме того, каждая из указанных структур, подробно описанных ниже, ориентирована на определенное окно прозрачности оптического волокна:

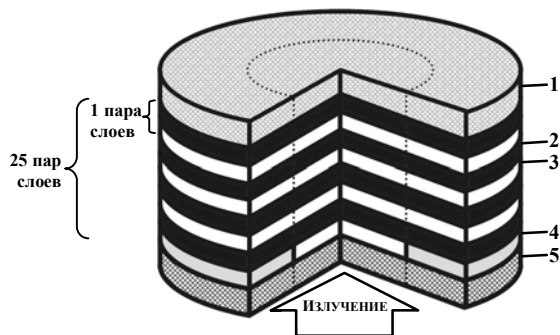


Рис. 1. Исследуемые четвертьволновые зеркала с оксидным окном

а) $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$, $\lambda_B = 0.98 \text{ мкм}$, $N = 52$;

б) AlAs/GaAs , $\lambda_B = 1.3 \text{ мкм}$, $N = 52$;

в) $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}/\text{InP}$, $\lambda_B = 1.55 \text{ мкм}$, $N = 52$.

1. Внешний слой:

а) $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ ($d = 100 \text{ нм}$, $n = 3.164$);

б) AlAs ($d = 100 \text{ нм}$, $n = 2.89$);

в) $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}$ ($d = 100 \text{ нм}$, $n = 3.5$).

2. Брэгговские слои:

а) GaAs ($d_l = 69.48 \text{ нм}$, $n_l = 3.526$);

б) GaAs ($d_l = 69.44 \text{ нм}$, $n_l = 3.37$);

в) InP ($d_h = 122.24 \text{ нм}$, $n_h = 3.17$).

3. Брэгговские слои:

а) $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ ($d_h = 77.43 \text{ нм}$, $n_h = 3.164$);

б) AlAs ($d_h = 112.46 \text{ нм}$, $n_h = 2.89$);

в) $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}$ ($d_l = 110.71 \text{ нм}$, $n_l = 3.5$).

4. Оксидная область:

а) Al_2O_3 ($d_{\text{oxid}} = 77.43 \text{ нм}$, $n_{\text{oxid}} = 1.55$);

б) Al_2O_3 ($d_{\text{oxid}} = 112.46 \text{ нм}$, $n_{\text{oxid}} = 1.55$);

в) Al_2O_3 ($d_{\text{oxid}} = 110.71 \text{ нм}$, $n_{\text{oxid}} = 1.55$).

5. Внешний слой:

а) GaAs ($d = 100 \text{ нм}$, $n = 3.526$);

б) GaAs ($d = 100 \text{ нм}$, $n = 3.37$);

в) InP ($d = 100 \text{ нм}$, $n = 3.17$).

I. Стекло из 25 пар слоев $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$, в первом слое которого (т.е. в слое $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$) расположено оксидное окно из Al_2O_3 . В качестве внешнего слоя со стороны падения луча используем GaAs , а с другой стороны - $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$, что позволит лучше оценить вклад в общий коэффициент отражения РБО, вносимый оксидным слоем. Брэгговская длина волны зеркала $\lambda_B = 0.98 \text{ мкм}$ и показатели преломления материалов соответствуют этой длине волны.

II. Стекло из 25 пар слоев AlAs/GaAs , в первом слое которого расположено оксидное окно из Al_2O_3 . В качестве внешнего слоя со стороны падения луча используем GaAs , а с другой стороны - AlAs , $\lambda_B = 1.3 \text{ мкм}$.

III. Стекло из 25 пар слоев $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}/\text{InP}$, с оксидным окном из Al_2O_3 . В качестве внешнего слоя со стороны падения луча используем InP , а с другой стороны - $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}$, $\lambda_B = 1.55 \text{ мкм}$.

Предполагается, что все РБО сформированы нелегированными полупроводниковыми слоями. Это позволяет нам пренебречь потерями на свободных носителях. Также в исследовании не рассматриваются нелинейные явления и дисперсия в полупроводниковых слоях РБО.

4. Результаты и обсуждение

Многokратное отражение оптического излучения в четвертьволновых слоях РБО определяет его распределенный характер. Эта особенность РБО сильно влияет на его спектры отражения и пропускания. В сложном спектре отражения РБО можно выделить, так называемую, антирезонансную частоту или брэгговскую частоту ω_B [13]. Антирезонанс обусловлен тем, что на брэгговской частоте многократно отраженные электромагнитные волны в каждом слое синфазны, и отраженные от зеркала волны при интерференции усиливают друг друга, а волны, прошедшие сквозь зеркало, гасят друг друга. Практически полезной частью спектра отражения зеркала является полоса частот в непосредственной близости от антирезонансной частоты. В этой области частот РБО почти полностью отражает падающее на него излучение. Спектр отражения периодический: области высокого отражения (ОВО) повторяются вблизи частот $\omega = (2m - 1)\omega_B$ для всех целых положительных значений m .

Распределенный характер РБО приводит к тому, что возникает задержка отражения излучения, проникающего внутрь РБО. Задержку отражения вводят, как $\tau(\omega) = -\partial\varphi(\omega)/\partial\omega$. С задержкой отражения чаще всего связывают реальную глубину проник-

новения излучения внутрь распределенного РБО. Однако такая трактовка глубины проникновения излучения в РБО не точна, так как, вообще говоря, излучение распределено внутри всего РБО и затухает при распространении вглубь него, претерпевая отражение от каждого слоя. Поэтому различают фазовую и энергетическую глубины проникновения [9]. Фазовая глубина проникновения является параметром, основанным на линейной аппроксимации фазы в области высокого отражения. Фазовая глубина проникновения соответствует расстоянию, на которое необходимо сместить зеркало от края РБО в модели с фиксированной фазой отражения [9], чтобы отражение, представленное этой моделью, было эквивалентно реальному отражению. Такое представление позволяет вычислить эффективную длину резонатора ЛВР, как сумму фазовой глубины проникновения излучения на двух РБО и реальной длины резонатора. Фазовая глубина проникновения определяется как

$$L_{\tau} = c \tau(\omega) \Big|_{\omega=\omega_B} / 2n_{\text{eff}},$$

где c – скорость света в вакууме; $n_{\text{eff}} = \sum d_i n_i / D$ – эффективный показатель преломления всей структуры РБО [13]; D – толщина всей структуры РБО; d_i и n_i – толщина и показатель преломления i -го слоя. Энергетическая глубина проникновения определяется как расстояние, на котором энергия поля уменьшилась в e раз от энергии падающего излучения. Дисперсия отраженного излучения вычисляется как [9] $\sigma(\omega) = \partial^2 \varphi(\omega) / \partial \omega^2$.

На рис. 2-4 представлены результаты расчета спектров коэффициента и фазы отражения исследуемых РБО.

Для всех структур наблюдается почти полное отражение излучения на частотах, близких к брэгговской частоте. В удалении от брэгговской частоты в спектре отражения наблюдаются периодически повторяющиеся максимумы и минимумы, что обусловлено многолучевой интерференцией электромагнитных волн, отраженных от различных слоев РБО. Число минимумов между соседними ОВО соответствует числу слоев РБО, как показано на рис. 5 для РБО $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$ с 4 и 8 четвертьволновыми слоями. Как следствие этой связи, увеличение числа слоев РБО ведет к возрастанию коэффициента отражения и, одновременно, к сужению ОВО и ширины других пиков отражения.

Для структур $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$ и AlAs/GaAs с оксидным слоем, как видно на рис. 2 и 3, коэффициент отражения больше по сравнению со структурами без оксида. Это обусловлено главным образом высоким контрастом показателя преломления на границах раздела оксид/полупроводник. Несимметричность спектра отражения относительно брэгговской частоты связана с несоблюдением четвертьволнового условия в оксидном слое.

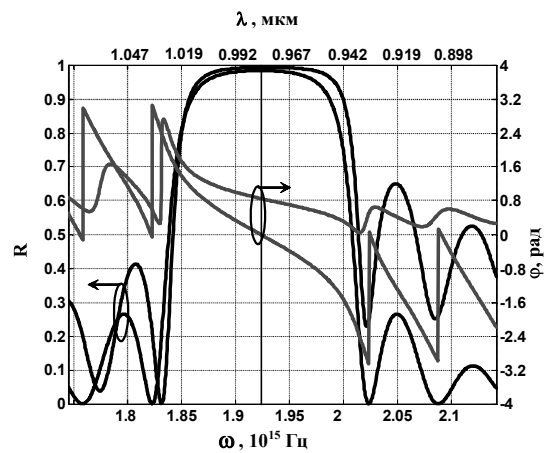


Рис. 2. Рассчитанные спектры коэффициента и фазы отражения излучения для РБО $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$. Вертикальной линией обозначена λ_B для структуры без оксидного слоя: – структура с оксидным слоем; — структура без оксидного слоя

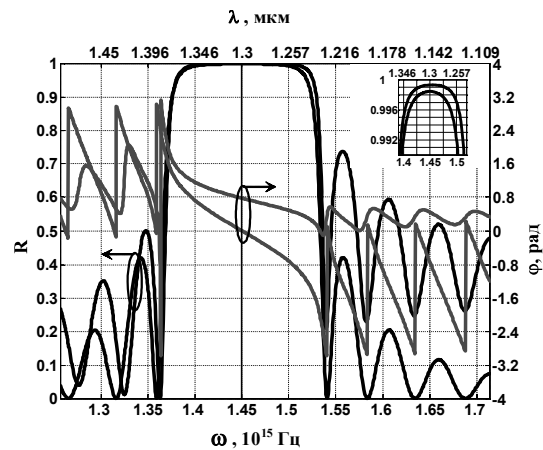


Рис. 3. Рассчитанные спектры коэффициента и фазы отражения излучения для РБО AlAs/GaAs . Вертикальной линией обозначена λ_B для структуры без оксидного слоя: – структура с оксидным слоем; — структура без оксидного слоя

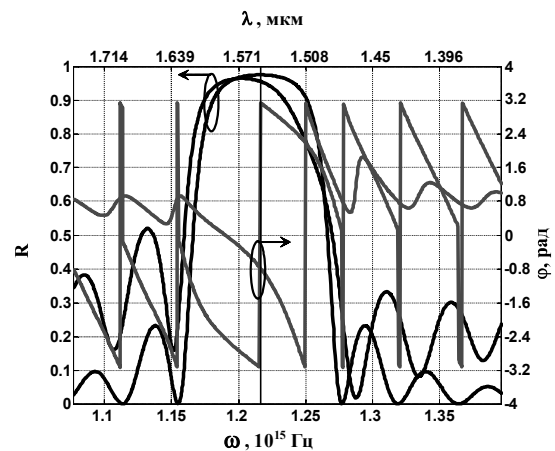


Рис. 4. Рассчитанные спектры коэффициента и фазы отражения излучения для РБО $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}/\text{InP}$. Вертикальной линией обозначена λ_B для структуры без оксидного слоя: – структура с оксидным слоем; — структура без оксидного слоя

Четвертьволновое условие в оксидном слое соблюдается на более высоких частотах

$$(\lambda_{B,oxid} = 4n_{oxid}d_{oxid} = 4 \cdot 77.43 \cdot 1.55 = 480.066 \text{ нм}$$

для $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$),

что приводит к увеличению коэффициента отражения РБО на частотах, выше брэгговской частоты зеркала, и снижению на частотах ниже ее. Этот эффект демонстрируется на рис. 6, где сплошной кривой представлен спектр отражения для всей структуры $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$ с оксидным слоем, а пунктирной кривой – спектр отражения структуры, состоящей из трех слоев $\text{GaAs}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$. Пунктирная кривая задает форму искривления спектра отражения всего зеркала, а максимум этой кривой расположен на $\lambda_{B,oxid} = 480.066 \text{ нм}$.

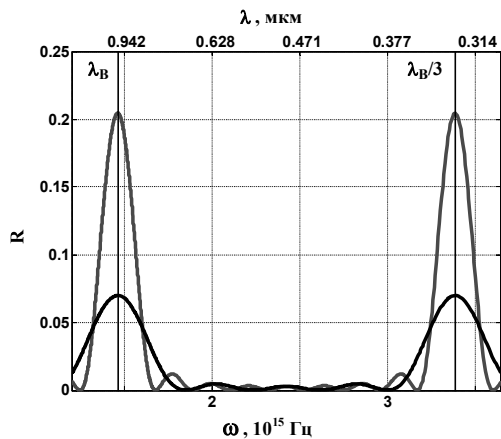


Рис. 5. Рассчитанные спектры отражения для РБО $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$ без оксидного окна: – РБО, состоящий из 4 четвертьволновых слоев; — — РБО, состоящий из 8 четвертьволновых слоев

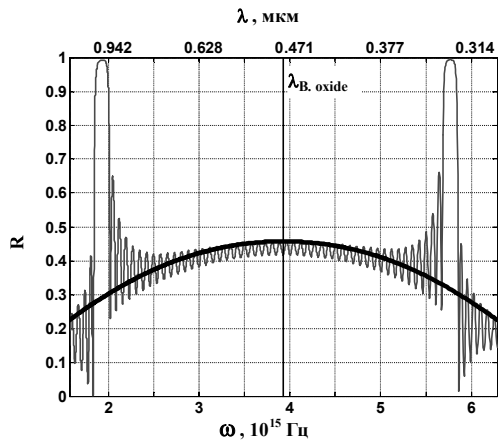


Рис. 6. Рассчитанные спектры отражения для структур с оксидным слоем: – структура $\text{GaAs}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$ (внешний слой GaAs и первые 2 слоя структуры РБО $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$); — — вся структура РБО $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$, состоящая из 52 слоев, включая внешние слои GaAs и $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$

Фазовые зависимости имеют почти линейный характер в области ОВО и пилообразную форму вне ее. Наблюдаемые фазовые сдвиги вне ОВО соответствуют минимумам коэффициента отражения и равны π для структур с только четвертьволновыми слоями и одинаковым контрастом показателя преломления на всех границах раздела слоев, т.е. для структур без оксидного слоя. Такие фазовые сдвиги наблюдаются при быстром перераспределении электромагнитных волн, участвующих в деструктивной интерференции.

Другая картина наблюдается на рис. 4 для РБО $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}/\text{InP}$, где фаза смещена на всех частотах на π в отличие от других структур. Это обусловлено тем, что излучение попадает в РБО из среды оптически менее плотной, чем первый слой РБО. Расположение Al_2O_3 в первом слое (вместо $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}$) приводит к небольшому смещению ОВО в сторону низких частот от брэгговской частоты из-за несинфазности электромагнитных волн, отраженных от второго и третьего слоев РБО. Также несинфазность волн приводит к уменьшению коэффициента отражения вблизи ОВО на высоких частотах и к увеличению на низких. Этот эффект не наблюдается, если оксидный слой расположить вместо второго слоя (вместо InP).

В ОВО для исследуемых РБО рассчитаны задержка отражения и дисперсия от частоты (рис. 7 - 9). Для структуры без оксидного слоя наблюдается нулевая дисперсия и минимальная задержка отражения на брэгговской частоте. Исследование задержки отражения и дисперсии для структуры с оксидным слоем показывает, что минимум задержки отражения и нулевая дисперсия сместится в область высоких частот для структур $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$ и AlAs/GaAs (рис. 8 и 9) и в область низких частот для $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}/\text{InP}$ (см. рис. 9), что свидетельствует о смещении брэгговской частоты в соответствующие области частот. При этом прослеживается изменение задержки отражения и, следовательно, фазовой глубины проникновения излучения для всех исследуемых структур и увеличение дисперсии для структуры $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}/\text{InP}$. Более сильный сдвиг брэгговской частоты и возникновение дисперсии излучения на РБО для структуры $\text{Al}_{0.096}\text{Ga}_{0.376}\text{In}_{0.528}\text{As}/\text{InP}$ также связан с несинфазностью отраженных волн, как было сказано ранее.

Рис. 7. Рассчитанные спектральные зависимости фазовой задержки отражения и дисперсии излучения для РБО $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$. Вертикальной линией обозначена λ_B для структуры без оксидного слоя: – структура с оксидным слоем; — — структура без оксидного слоя

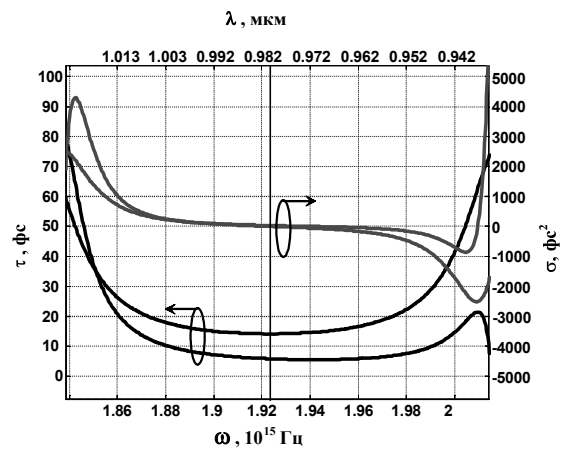


Рис. 7. Рассчитанные спектральные зависимости фазовой задержки отражения и дисперсии излучения для РБО $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$. Вертикальной линией обозначена λ_B для структуры без оксидного слоя: – структура с оксидным слоем; — — структура без оксидного слоя

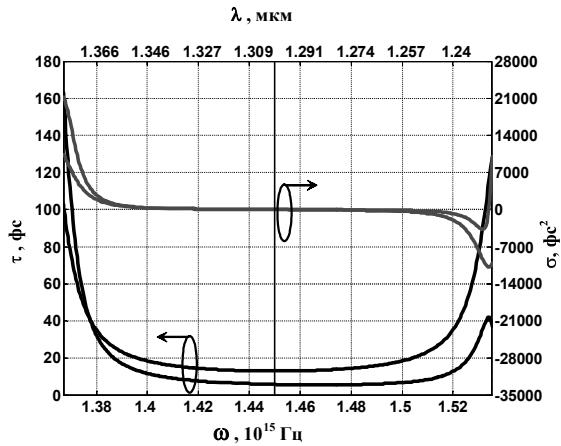


Рис. 8. Рассчитанные спектральные зависимости фазовой задержки отражения и дисперсии излучения для РБО AlAs/GaAs. Вертикальной линией обозначена λ_B для структуры без оксидного слоя: — структура с оксидным слоем; — структура без оксидного слоя

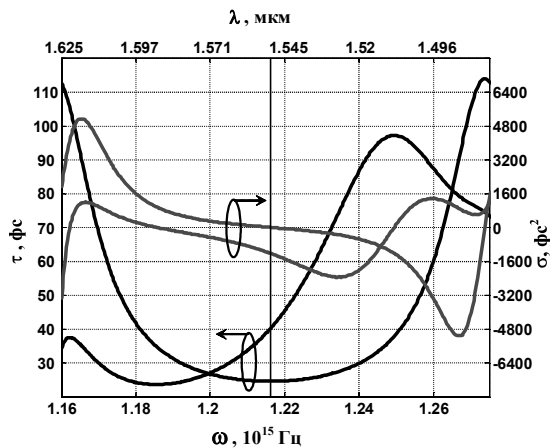


Рис. 9. Рассчитанные спектральные зависимости фазовой задержки отражения и дисперсии излучения для РБО $Al_{0.096}Ga_{0.376}In_{0.528}As/InP$. Вертикальной линией обозначена λ_B для структуры без оксидного слоя: — структура с оксидным слоем; — структура без оксидного слоя

Спектр излучения ЛВР значительно меньше типичной ширины ОВО РБО и, как правило, совпадает с брэгговской частотой. Для лазеров с РБО на $Al_{0.65}Ga_{0.35}As/GaAs$ и $AlAs/GaAs$ дисперсия излучения отраженного от РБО мала и почти не меняется на частотах, близких к брэгговской частоте, следовательно, для этих лазеров дисперсия на РБО не является ограничивающим параметром для генерации ультракоротких импульсов. Различная величина глубины проникновения излучения в разные области РБО объясняет следующее важное явление в ЛВР с оксидным окном.

Так как резонансная частота резонатора ЛВР связана с эффективной длиной резонатора, а следовательно, с глубиной проникновения излучения в зеркало, то в центре ЛВР резонансная частота электромагнитного поля отличается от резонансной частоты, которая соответствует области в удалении от центра структуры ЛВР (т.е. в области с оксидным слоем). Это означает, что в резонаторе ЛВР волны, распространяющиеся в центральной области структуры, не

будут распространяться в области с оксидом, так как в этих областях не совпадают резонансные частоты и область усиления расположена преимущественно в центральной части ЛВР. Таким образом, наблюдается поперечное оптическое ограничение электромагнитного поля. С учетом этого эффекта сильная частотная зависимость дисперсии излучения отраженного от РБО в области оксида для $Al_{0.096}Ga_{0.376}In_{0.528}As/InP$ не будет влиять на рабочий режим и спектр излучения лазера. В свою очередь поперечное ограничение приводит к изменению направления волнового вектора электромагнитной моды резонатора ЛВР и, соответственно, приводит к сдвигу рабочей частоты лазера [14].

На рис. 10 представлены зависимости фазовой глубины проникновения излучения в структуру РБО от числа слоев. Фазовая глубина проникновения излучения в РБО растет с увеличением числа слоев, так как в интерференции участвуют волны отраженные от всех слоев, независимо от того, где они расположены. Однако вклад слоя в величину фазовой глубины проникновения тем меньше, чем он дальше от первого слоя со стороны падения электромагнитной волны. Следовательно, имеет место предельная величина фазовой глубины проникновения излучения, которая не изменяется при дальнейшем росте числа слоев РБО. В структуре с оксидным слоем для $Al_{0.65}Ga_{0.35}As/GaAs$ и $AlAs/GaAs$ фазовая глубина проникновения излучения меньше, чем для соответствующих структур без оксидного окна, а для РБО $Al_{0.096}Ga_{0.376}In_{0.528}As/InP$ - наоборот. Величина глубины проникновения зависит, прежде всего, от фаз интерферирующих волн и в зависимости от их соотношения может либо увеличиваться, либо уменьшаться для различной толщины и положения оксидного слоя. Поэтому перед выращиванием лазера необходимо провести расчет и выбрать размеры и положение оксидного окна. Отрицательное значение глубины проникновения соответствует обратному наклону кривой спектра фазы отражения на брэгговской длине волны и означает, что эффективная длины резонатора лазера меньше, чем сумма толщин слоев, расположенных между РБО.

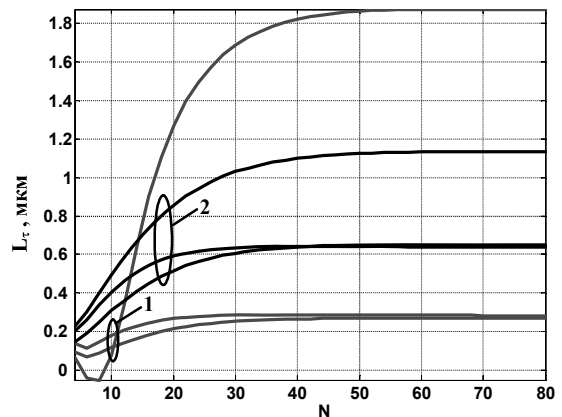


Рис. 10. Зависимость фазовой глубины проникновения излучения в брэгговское зеркало от числа слоев: --- — $Al_{0.65}Ga_{0.35}As/GaAs$; — $AlAs/GaAs$; — — $Al_{0.096}Ga_{0.376}In_{0.528}As/InP$; 1 — структура с оксидным слоем; 2 — структура без оксидного слоя

5. Заключение

Моделирование брэгговского отражателя с оксидным окном для ЛВР показало следующее.

1. Использование оксидного окна в выходном РБО ЛВР главным образом приводит к поперечному ограничению оптического поля в центральной области ЛВР благодаря различию величин задержки отражения излучения, проходящего через сердцевину и оксидную область.
2. Поперечное ограничение поля приводит к сдвигу резонансной частоты резонатора ЛВР.
3. Наличие оксидного окна в РБО не вносит дополнительной дисперсии отраженного излучения от РБО на брэгговской частоте, так как почти весь оптический поток сосредоточен в центральной области ЛВР, которая не содержит оксидного слоя.

Научная новизна работы состоит в том, что анализ полученных результатов выявил не отмеченную в ранних работах связь уменьшения диаметра выходного пучка света в ЛВР с оксидным окном с различными величинами задержки отражения разных областей РБО. Понимание механизмов влияния оксидного окна на электромагнитную моду в ЛВР имеет *практическую значимость* при создании новых и оптимизации существующих конструкций ЛВР.

Нужно отметить, что для более точной оценки оптических свойств брэгговского отражателя с оксидным окном в приложении к ЛВР необходимо провести двухмерное моделирование поля для всего резонатора сложной структуры, учитывая электрические и тепловые эффекты, после чего возможно осуществление оптимизации зеркал для лазеров с микрорезонаторами для современных оптических систем.

Литература: 1. *Soda H., Iga K., Kitahara C., Suematsu Y.* GaInAsP/InP surface emitting injection lasers // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1979. Vol. 18, № 12. P. 2329-2330. 2. *Keller U., Weingarten K.J., Kartner F.X., Kopf D., Braun B., Jung I.D., Fluck R., Honninger C., Matuschek N., and Juerg A. et al.* Semiconductor Saturable Absorber Mirrors (SESAM's) for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in Solid-State Lasers // *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.* 1996. Vol. 2, №3. P. 435-453. 3. *Knodl T.* RCE photodetectors based on VCSEL structures // *Dipl. Thes., Dept. of Optoelectronics, University of Ulm*, 1998. P. 1374. 4. *Ohiso Y., Okamoto H., Iga R., Kishi K., Tateno K., and Amano Ch.* 1.55- μ m Buried-Heterostructure VCSELs With InGaAsP/InP-GaAs/AlAs DBRs on a GaAs Substrate // *IEEE Journal of Quantum Electronics.* 2001. Vol. 37, №9. P. 1194-1202. 5. *Wilmsen C.W., Temkin H., and Coldren L.A.* Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Cambridge University press. 1997. P. 303-333. 6. *Сухоиванов И.А.* Исследование ближнего поля и динамического поведения полупроводниковых лазеров поверхностного излучения с учетом пространственного выжигания дыр // *Радиотехника.* 1999. Вып. 110. С. 69-79. 7. *Choquette K. D., Geib K. M., Chui H. C., Hammons B. E., Hou H. Q. and Drummond T. J.* Selective oxidation of buried AlGaAs versus AlAs layers // *Appl. Phys. Lett.* 1996. Vol. 69, № 10. P. 1385-1387. 8. *Choquette K. D., Hou H. Q.* Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers // *Moving from Research to Manufacturing, proceedings of the IEEE.* 1997. Vol. 85, № 11. P. 1730-1739. 9. *Babic D. I. and Corzine S.W.* Analytic Expressions for the Reflection Delay, penetration depth, and absorptance of quarter-wave dielectric mirrors // *IEEE J. of Quantum Electronics.* 1992. Vol. 28, № 2. P. 514-524. 10. *Laporta P. and Magni V.* Dispersive effects in the reflection of femtosecond optical pulses from

broadband dielectric mirrors // *Appl. Opt.* 1985. Vol. 24, №13. P. 2014-2020. 11. *Silvestri S. De., Laporta P., and Svelto O.* Analysis of quarter-wave dielectric-mirror dispersion in femto-second dye-laser cavities // *Opt. Lett.* 1984. Vol. 9, №8. P. 335-337. 12. *Agrawal G.P. and Dutta N.K.* Long-Wavelength Semiconductor Lasers. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986. P.473. 13. *Matuschek N., Kartner F.X., and Keller U.* Exact coupled-mode theories for multilayer interference coatings with arbitrary strong index modulations // *IEEE J. Quantum Electron.* 1997. Vol.33, № 3. P.295 – 302. 14. *Noble M. J., Loehr J. P., Lott J. A.* Analysis of Microcavity VCSEL Lasing Modes Using a Full-Vector Weighted Index Method // *IEEE J. Quantum Electron.* 1998. Vol. 34, №10. P. 1890-1903. 15. *Лысак В.В., Ковбаса А.А., Сухоиванов И.А., Кублик А.В.* Расчет электромагнитного поля в лазерах с вертикальным резонатором с использованием векторного метода с весовыми коэффициентами // *Вестник ХНУ им. В. Н. Каразина.* 2002. № 570. С.240-243. 16. *Reddy M.H.M., Asano T., Koda R., Buell D.A. and Coldren L.A.* Molecular beam epitaxy-grown AlGaInAs/InP distributed Bragg reflectors for 1.55 μ m VCSELs // *Electronics letters* 26th September 2002. Vol. 38, № 20. P.1181-1182. 17. *Малеев Н.А., Егоров А. Ю., Жуков А.Е., Кови А.Р., Васильев А.П., Устинов В.М., Леденцов Н.Н., Алфёров Ж.И.* Сравнительный анализ длинноволновых (1.3 μ m) вертикально-излучающих лазеров на подложках арсенида галлия // *Физика и техника полупроводников.* 2001. Вып. 7. Т. 35. С.881-888.

Поступила в редколлегия 05.07.2005

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Дзюбенко М.И.

Ковбаса Александр Александрович, аспирант кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором, математические методы моделирования оптоэлектронных устройств, компьютерная реализация оптических моделей фотонных кристаллов. Член IEEE LEOS. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, e-mail: kovbasa@kture.kharkov.ua.

Зиньковская Ирина Олеговна, соискатель кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: волоконно-оптические системы передачи данных, компьютерная реализация оптических моделей фотонных кристаллов. Член IEEE LEOS. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, e-mail: iozinkovska@ieee.org.

Лысак Владимир Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, ст. пр. кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: волоконно-оптические системы передачи данных, фотонные кристаллы, системы формирования сверхкоротких импульсов, методы моделирования динамического поведения полупроводниковых лазеров на основе наноразмерных структур. Член IEEE LEOS с 2002 г. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, lysak@kture.kharkov.ua.

Шулика Алексей Владимирович, ассистент кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: физика низкоразмерных структур, эффекты переноса носителей заряда в низкоразмерных гетероструктурах, моделирование активных и пассивных фотонных компонентов. Член IEEE LEOS. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, shulika@ieee.org.

Сухоиванов Игорь Александрович, д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Руководитель международной научно-учебной лаборатории "Фотоника". Почетный член и руководитель Украинского отделения общества лазерной и оптоэлектронной техники международного института инженеров электронной техники (IEEE LEOS). Научные интересы: волоконная и интегральная оптика, нанофизика и нанотехнологии квантоворазмерных структур, фотонных кристаллов и устройств на их основе. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, e-mail: i.sukhoivanov@ieee.org.