

Луценко Е.В., Войнилович А.Г., Тарасюк Н.П., Гладышук А.А.

ДИЗАЙН ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ С АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ ИЗ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe В ZnSe МАТРИЦЕ И ИХ ФАКТОР ОПТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые лазеры, излучающие в зеленой области спектра, перспективны для самого широкого диапазона применений. Они могут применяться в системах локальной оптической связи, использующих пластиковые световоды, в новом поколении систем хранения цифровой информации на голографических носителях, лазерной локации и навигации, подводной связи, системах проекционного лазерного телевидения, лазерной печати, а также в других прикладных задачах, где требуется весь набор длин волн видимого диапазона.

Наиболее перспективными материалами для создания промышленных лазеров зеленого свечения являются гетероструктуры на основе CdSe/ZnSe. Однако до настоящего времени проблема медленной деградации этих структур в условиях инжекционной накачки не решена. Механизм медленной деградации лазерных структур на основе ZnSe объясняется прежде всего наличием точечных дефектов, диффундирующих в активную область в основном из легированной верхней р-области [1] и связанных с компенсирующими донорными центрами – атомами азота в междоузлиях, ответственными за нестабильность электрических характеристик ZnSe:N [2]. Вместе с тем, для полупроводниковых лазеров, использующих оптическую накачку, не требуется создание р-п перехода и омических контактов. Это позволяет предположить, что гибридные устройства, включающие “зеленый” лазер на основе CdSe/ZnSe гетероструктур, накачиваемый излучением “фиолетового” инжекционного лазера на основе GaN, будут иметь срок службы удовлетворительный для промышленных применений.

Перспективность подобного рода устройств была продемонстрирована в работе [3], когда впервые было получено лазерное излучение на длине волны 532 нм в ZnCdSSe/ZnMgSSe лазере с активной областью в виде квантовых точек (КТ) CdSe/ZnSe при накачке излучением InGaN/GaN гетероструктуры, излучающей на длине волны 456 нм.

Создание высокоэффективного лазерного InGaN/GaN – Cd(Zn)Se/ZnMgSSe конвертера требует решения ряда физических и технологических задач. В первую очередь, это оптимизация конструкции лазерной гетероструктуры с активной областью из квантовых точек CdSe в ZnSe матрице (улучшение оптического и электронного ограничения, обеспечение эффективного транспорта носителей в активную область), а также режима роста КТ (получение трехмерного квантового ограничения, уменьшение дисперсии размеров), что в совокупности приведет к снижению порога генерации и достижению высокой квантовой эффективности возбуждения. Снижение порога генерации до значений 500 – 100 Вт/см² является весьма актуальной задачей, поскольку при таких значениях порога, накачка лазеров может осуществляться излучением специально изготовленных сверхярких светодиодов. Это позволит кардинально снизить стоимость источников когерентного излучения в зеленой области спектра и, несомненно, приведет к коммерциализации данного направления научных исследований.

В настоящей работе представлены результаты расчетов фактора оптического ограничения Γ и внутренних оптических

потерь α_{GaAs} , обусловленных поглощением в подложке, для квантоворазмерных гетероструктур с активной областью в виде квантовых точек CdSe/ZnSe, излучающих в зеленой области спектра. Предложен дизайн гетероструктуры, когда соседние CdSe/ZnSe вставки разделены тонкими ZnS-слоями (дизайн А). Определены оптимальные толщины слоев сверхрешеток (СР) ZnSSe/ZnSe, соответствующих максимуму Γ , для гетероструктур дизайна А с одной, двумя и тремя CdSe/ZnSe вставками в случае симметричного и несимметричного волноводов. Проведено сравнение фактора Γ для гетероструктур А и гетероструктур традиционного дизайна, когда соседние CdSe/ZnSe вставки разделены слоями СР ZnSSe/ZnSe (дизайн В). Для сравнения с реальными структурами также рассчитаны волноводные параметры для идеализированной гетероструктуры (дизайн С), имеющей теоретический максимальный фактор Γ .

ДИЗАЙН ГЕТЕРОСТРУКТУР

Различные дизайны гетероструктур (А,В,С) отличаются лишь конструкцией волновода и активной области.

Схемы гетероструктур (дизайн А) с различным числом CdSe/ZnSe вставок в случае симметричного и несимметричного волноводов представлены на рисунках 1-6. Рассматриваемые гетероструктуры представляют собой гетероструктуры с раздельным оптическим и электронным ограничением, у которых волноводная область образована переменноподвижной ZnSSe/ZnSe короткопериодной СР, а слою четверного соединения ZnMgSSe выступают в качестве обкладочных слоев. Причем у части структур (рис. 1,3,5) верхний обкладочный слой отсутствует (в результате оптический волновод становится несимметричным).

Использование СР ZnSSe/ZnSe обусловлено рядом причин. Оставаясь в целом решеточно-согласованной с подложкой, она создает упругие напряжения, необходимые для саморазвития квантовых точек CdSe в процессе эпитаксиального роста. Кроме этого, сверхрешетка обеспечивает эффективный транспорт носителей заряда к активной области.

Активная область гетероструктур состоит из одной, двух или трех CdSe/ZnSe вставок. Каждая CdSe/ZnSe вставка представляет собой массив квантовых точек CdSe, расположенный в квантовой яме ZnSe общей толщиной 15 нм. Реальный массив квантовых точек упрощенно представляется слоем CdSe толщиной 5 нм. В случае двух или трех CdSe/ZnSe вставок они разделяются узким слоем ZnS (5 нм). Такой слой создает упругое напряжение необходимое для качественного роста следующего массива квантовых точек над уже сформированным.

Гетероструктуры традиционного дизайна В отличаются от А лишь тем, что соседние CdSe/ZnSe вставки разделяются участками сверхрешетки ZnSSe/ZnSe различной толщины, которые выполняют ту же функцию, что и слою ZnS (создают необходимое упругое напряжение для саморазвития квантовых точек). Минимальная толщина такого участка СР, при которой формируются качественные КТ составляет 50 нм.

Луценко Евгений Викторович, к. физ.-мат.н., ст. научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Войнилович Алексей Геннадьевич, аспирант Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Беларусь, ИФ НАН Б, 220072, г. Минск, пр. Ф.Скорины, 68.

Тарасюк Николай Петрович, ст. преподаватель каф. физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

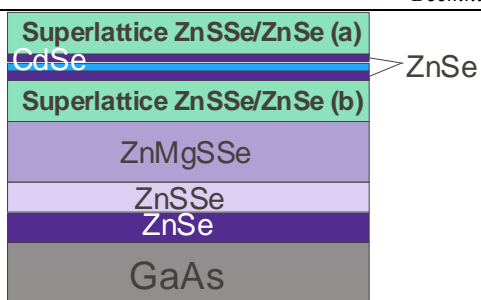


Рис. 1. Квантоворазмерная гетероструктура с несимметричным волноводом, содержащая один слой CdSe.

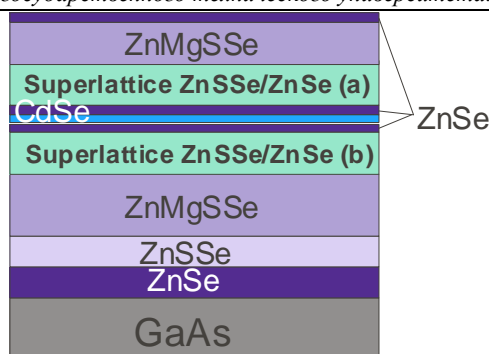


Рис. 2. Квантоворазмерная гетероструктура с симметричным волноводом, содержащая один слой CdSe.

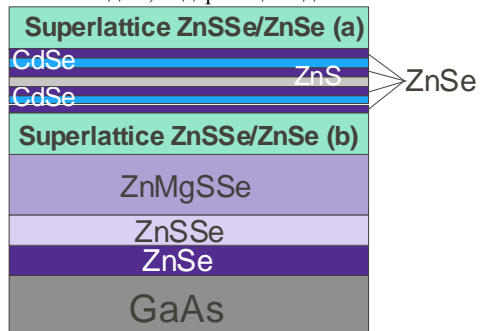


Рис. 3. Квантоворазмерная гетероструктура с несимметричным волноводом, содержащая два слоя CdSe.

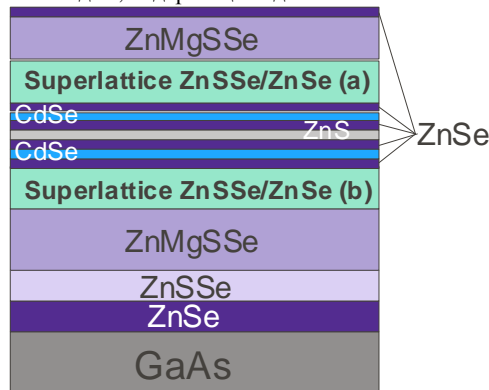


Рис. 4. Квантоворазмерная гетероструктура с симметричным волноводом, содержащая два слоя CdSe.

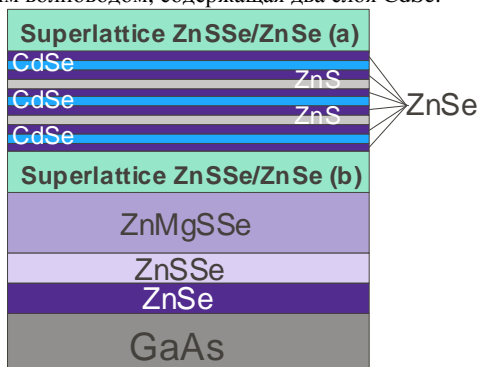


Рис. 5. Квантоворазмерная гетероструктура с несимметричным волноводом, содержащая три слоя CdSe.

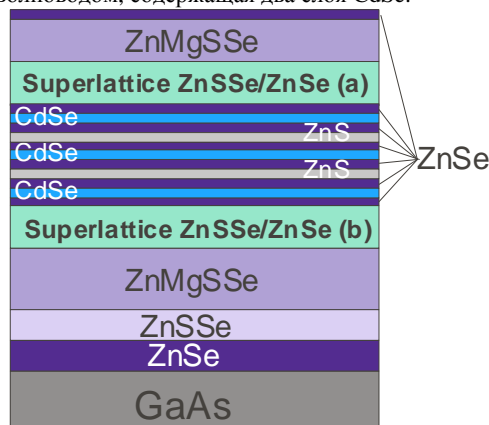


Рис. 6. Квантоворазмерная гетероструктура с симметричным волноводом, содержащая три слоя CdSe.

В гетероструктурах дизайна С активная область представляет собой один, два или три слоя КТ CdSe, разделенных узким слоем ZnSe (5 нм). Но на практике формирование качественных слоев КТ CdSe, расположенных на таком малом расстоянии друг от друга, невозможно. Однако, очевидно, этот дизайн гетероструктур должен иметь теоретически максимально возможный фактор Г.

Ширина запрещенной зоны четверного соединения ZnMgSSe во всех исследуемых гетероструктурах была выбрана 2.98 эВ (при больших значениях ширины запрещенной зоны 3 эВ или более данное соединение находится в области неустойчивого роста).

РАСЧЕТ ФАКТОРА ОПТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ

В качестве физической модели гетероструктур была использована модель одномерной планарной структуры, состоящей из различного числа слоев с известными толщинами и показателями преломления. Значения показателей преломле-

ния соответствующие определенным значениям ширины запрещенной зоны или компонентного состава тройных и четверных соединений были взяты из работ [4,5].

Вычисления фактора оптического ограничения были проведены в приближении плоских волн для ТЕ поляризации электромагнитного излучения [6-8]. Напряженность электрического поля в j -ом слое структуры представляется в виде:

$$\epsilon_y(x, z, t) = \epsilon_{y,j}(x) \exp[i(\omega t - \beta z)]. \quad (1)$$

Амплитуда напряженности электрического поля $\epsilon_{y,j}(x)$ ТЕ

- волны удовлетворяет волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{y,j}(x)}{\partial x^2} - (\beta^2 - k_0^2 \bar{n}_j^2) \epsilon_{y,j}(x) = 0, \quad (2)$$

где $\beta = \beta_{re} + i\beta_{im}$ – проекция волнового вектора $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ на плоскость гетероструктуры, $\tilde{n}_j = n + ik$ – комплексный показатель преломления j -го слоя. Случай $k > 0$ соответствует усилению излучения, а $k < 0$ – поглощению.

Для нахождения β использовался алгоритм скоростного спуска [3].

Фактор оптического ограничения вычислялся с использованием выражения:

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^N x_{bi} \int E_y^2(x) dx}{x_{ai} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y^2(x) dx}, \quad (3)$$

где интегрирование в числителе происходит по координатам активного слоя (квантовые точки CdSe).

Внутренние потери, обусловленные поглощением в подложке, вычислялись с помощью выражения:

$$\alpha_{GaAs} = \alpha \cdot \frac{x_{GaAs} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} E_y^2(x) dx}. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структуры дизайна А. Фактор Γ для моды нулевого порядка гетероструктур дизайна А рассчитывался как функция толщины верхнего (а) и нижнего (б) слоев ZnSSe/ZnSe сверхрешетки. Результаты этих расчетов для различных схем гетероструктур, изображенных на рисунках 1-6, представлены на рисунках 7-12, соответственно. С их помощью можно определить наилучшую с точки зрения оптического ограничения геометрию волноводной области. Расчеты фактора Γ проведены для излучения с длиной волны 530 нм.

В таблице 1 указаны значения внутренних оптических потерь и максимальные значения фактора оптического ограничения, соответствующие оптимальным значениям толщины верхнего и нижнего слоев CP (а,б), для гетероструктур с симметричным и несимметричным волноводами и различным числом слоев CdSe.

Из таблицы видно, что применение несимметричного волновода для оптически накачиваемых лазеров повышает значение фактора оптического ограничения по сравнению с симметричным волноводом. При этом отсутствие верхнего обкладочного слоя позволяет упростить и ускорить рост гетероструктуры в случае несимметричного волновода.

Для обоих типов волноводов фактор оптического ограничения для структур с двумя и тремя CdSe/ZnSe вставками возрастает примерно на 90% и 171% по сравнению со структурами с одной CdSe/ZnSe вставкой. Однако увеличение числа вставок более двух может привести к неравномерной накачке квантовых точек в различных вставках. Поэтому представляется наиболее перспективной структура с двумя CdSe/ZnSe вставками. Профиль интенсивности нулевой моды в структурах с двумя CdSe вставками для несимметричного и симметричного волноводов, а также профиль показателя преломления этих структур изображены на рисунках 13,14.

Показатель преломления слоев ZnS, используемых в гетероструктурах дизайна А, существенно меньше, чем средний

показатель преломления ZnSSe/ZnSe CP. Поэтому использование в гетероструктурах дизайна А слоев ZnS несколько ухудшает их волноводные параметры (уменьшает фактор Γ и увеличивает потери энергии за счет поглощения в подложке).

Структуры дизайна В. Для выяснения насколько оправдано использование волновода со слоями ZnS, разделяющими CdSe/ZnSe вставки (дизайн А), были проведены расчеты волноводных параметров аналогичных гетероструктур, в которых CdSe/ZnSe вставки разделены участками CP ZnSSe/ZnSe (дизайн В). Однако при таком дизайне волновода расстояние между соседними CdSe/ZnSe вставками будет больше, чем в рассмотренном выше случае, поскольку толщина слоя CP ZnSSe/ZnSe, создающего необходимое для роста качественных КТ упругое напряжение, должна быть не менее 50 нм.

На рис. 15 представлена зависимость фактора оптического ограничения для моды нулевого порядка от общей толщины сверхрешетки ZnSSe/ZnSe для 3-х случаев: когда участки CP, разделяющие CdSe/ZnSe вставки, а также верхний (а) и нижний (б) участки сверхрешетки имеют толщины 50, 100 и 150 нм, а также для случая, когда верхний и нижний участки CP имеют толщину 100 нм, а разделяющие CP – 50 нм. Во всех 4-х случаях используется более предпочтительный для оптической накачки несимметричный волновод. Как видно из рисунка с увеличением числа слоев CdSe рост фактора оптического ограничения замедляется, причем Γ “насыщается” медленнее для более тонких разделяющих CP и достигает для них наибольших значений, хотя для одной CdSe вставки структуры с 50 нм CP имеет наименьшее значение Γ .

На рис. 16 представлена зависимость фактора оптического ограничения в расчете на один слой CdSe от числа слоев CdSe. Видно, что эффективность использования отдельной CdSe/ZnSe вставки максимальна для структуры с 50 нм слоем CP для трех вставок, а для структуры с 100 нм верхним и нижним слоем CP – для двух вставок. С ростом числа вставок для всех структур эффективность использования отдельной CdSe/ZnSe вставки быстро уменьшается, причем чем толще прослойка CP между вставками, тем быстрее происходит это уменьшение. Это вызвано тем, что с ростом числа вставок их геометрическое положение все больше отдалается от положения максимума распределения электромагнитного поля.

В таблице 2 указаны значения фактора Γ и внутренних оптических потерь, обусловленных поглощением в подложке, для гетероструктур дизайна В с несимметричным волноводами и различным числом CdSe/ZnSe вставок, разделенных слоями CP ZnSSe/ZnSe. Максимальные значения фактора оптического ограничения в случае одной, двух и трех CdSe/ZnSe вставок составляют 0.01852, 0.03623, 0.04876, соответственно. Как видно, эти значения Γ на 11 и 16% меньше для соответствующих структур с двумя и тремя CdSe/ZnSe вставками дизайна А.

Структуры дизайна С. Для оценки максимально возможного фактора Γ были рассчитаны факторы оптического ограничения для идеализированных гетероструктур с волноводом без ZnS вставок, когда соседние слои CdSe максимально сближены (дизайн С). Результаты этих расчетов для различных схем гетероструктур дизайна С с несимметричным волноводом представлены на рисунках 17-22. Расчеты фактора Γ и α_{GaAs} проведены для излучения с длиной волны 530 нм.

Полученные результаты отражают наилучшую с точки зрения оптического ограничения геометрию волноводной области гетероструктур (дизайн С - ширина запрещенной зоны ZnMgSSe 2,98 эВ). В таблице 3 указаны значения внутренних оптических потерь и максимальные значения фактора Γ , соответствующие оптимальным значениям толщины верхнего и нижнего слоев CP (а,б), для гетероструктур с симметричным и несимметричным волноводами и различным числом слоев CdSe.

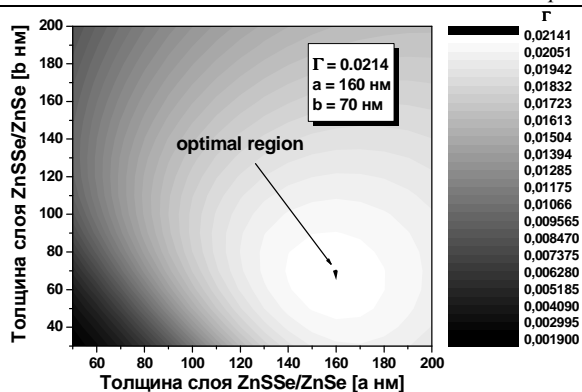


Рис. 7. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe несимметричного волновода с одним слоем CdSe.

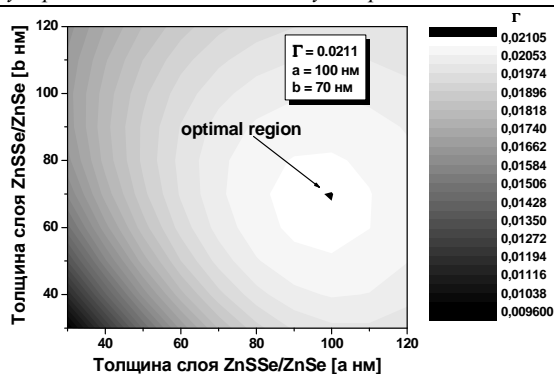


Рис. 8. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe симметричного волновода с одним слоем CdSe.

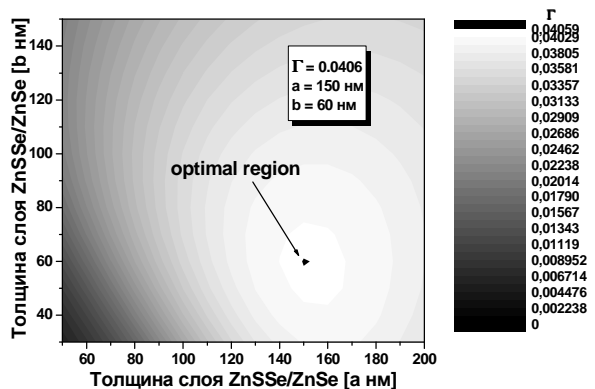


Рис. 9. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe несимметричного волновода с двумя слоями CdSe.

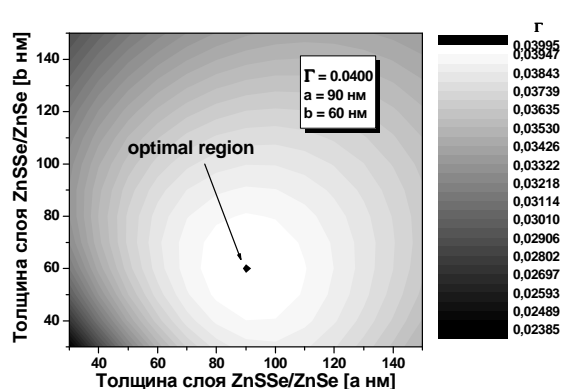


Рис. 10. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe симметричного волновода с двумя слоями CdSe.

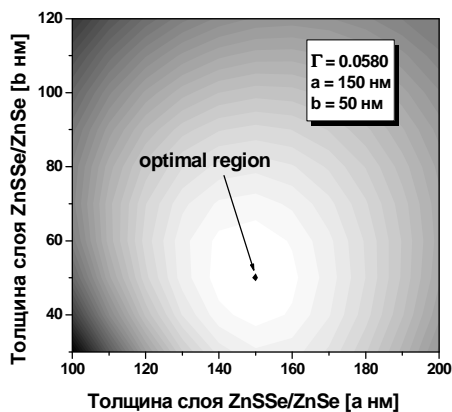


Рис. 11. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe несимметричного волновода с тремя слоями CdSe.

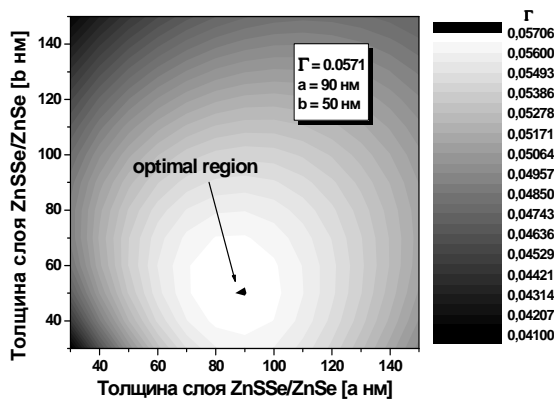


Рис. 12. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe симметричного волновода с тремя слоями CdSe.

Таблица 1. Фактор оптического ограничения и внутренние оптические потери, обусловленные поглощением в подложке, для гетероструктур дизайна А с симметричным и несимметричным волноводами и различным числом слоев CdSe на длине волны излучения 530 нм.

Количество слоев CdSe	Тип волновода							
	несимметричный				симметричный			
	Толщина ZnSSe/ZnSe, а нм	Толщина ZnSSe/ZnSe, b нм	Γ	α_{GaAs} , см ⁻¹	Толщина ZnSSe/ZnSe, а нм	Толщина ZnSSe/ZnSe, b нм	Γ	α_{GaAs} , см ⁻¹
1	160	70	0.0214	0.035	100	70	0.0211	0.031
2	150	60	0.0406	0.060	90	60	0.0400	0.052
3	150	50	0.0580	0.063	90	50	0.0571	0.054

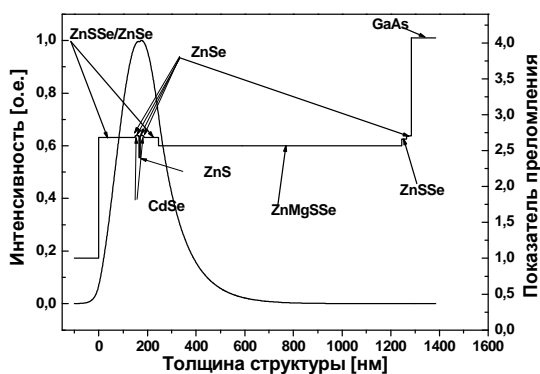


Рис. 13. Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка несимметричного волновода с двумя CdS/ZnSe вставками (дизайн А).

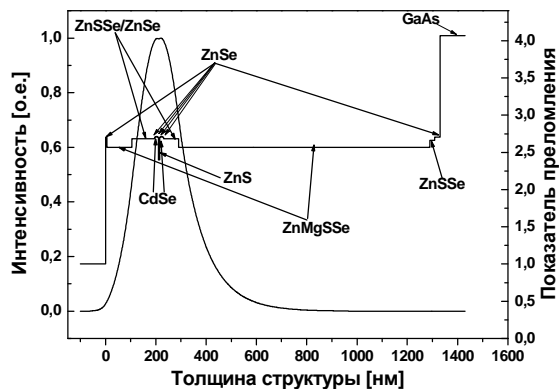


Рис. 14. Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка симметричного волновода с двумя CdS/ZnSe вставками (дизайн А).

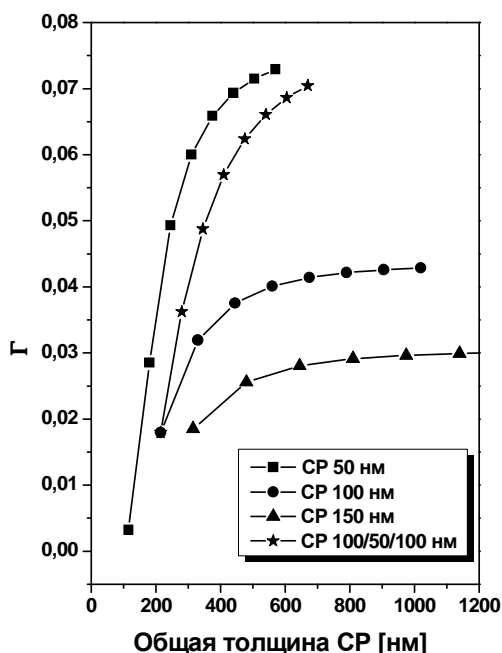


Рис. 15. Зависимость фактора Γ от общей толщины CP ZnSSe/ZnSe (дизайн В)

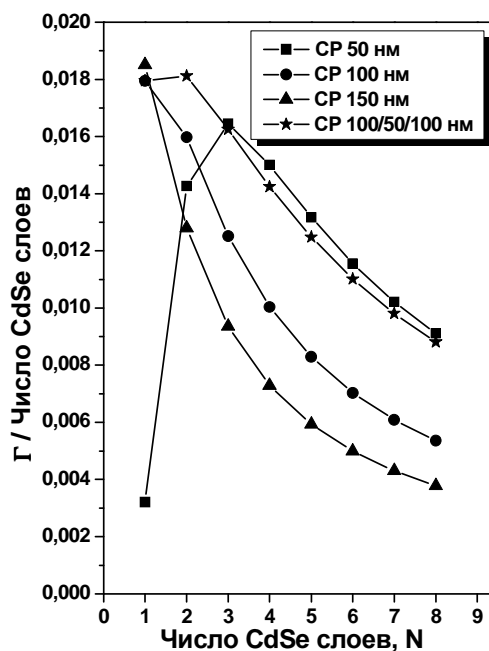


Рис. 16. Зависимость фактора Γ в расчете на один слой КТ CdSe от числа таких слоев (дизайн В)

Таблица 2. Фактор оптического ограничения и внутренние оптические потери, обусловленные поглощением в подложке, для гетероструктур дизайна В с несимметричным волноводом и различным числом CdSe/ZnSe вставок на длине волны излучения 530 нм.

Число вставок	Толщина слоев сверхрешеток ZnSSe/ZnSe, нм							
	50		100		150		100/50/100	
	Γ	$\alpha_{GaAs}, \text{см}^{-1}$	Γ	$\alpha_{GaAs}, \text{см}^{-1}$	Γ	$\alpha_{GaAs}, \text{см}^{-1}$	Γ	$\alpha_{GaAs}, \text{см}^{-1}$
1	0.00321	38.2213	0.01795	0.1646	0.01852	0.0027	0.01795	0.1646
2	0.02854	1.1927	0.03195	0.0016	0.02560	0.0001	0.03623	0.0075
3	0.04935	0.0279	0.03755	0.0001	0.02808	0.00002	0.04876	0.0010

Сравнивая данные таблиц 1 и 3, можно получить, что фактор Γ для оптимизированных гетероструктур дизайна А составляет 94 и 89% от своего максимально возможного значения для двух и трех слоев квантовых точек CdSe, соответственно. Таким образом, для гетероструктур дизайна А имеют место очень близкие к теоретически возможным значения фактора оптического ограничения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены расчеты максимального фактора оптического ограничения для традиционных волноводов для оптически накачиваемых лазеров с активной областью с одной, двумя и тремя CdSe/ZnSe вставками в зависимости от толщины сверхрешеток ZnSSe/ZnSe (рассмотрены случаи симметричного и несимметричного волноводов). Показано, что в случае несимметричного волновода можно получить больший фактор Γ .

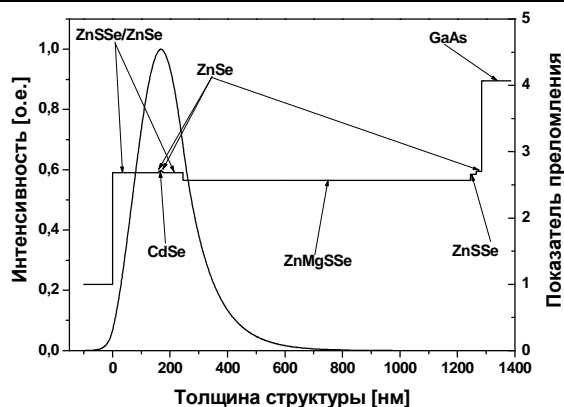


Рис. 17. Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка несимметричного волновода с одним слоем CdSe (дизайн С). $\Gamma = 0,02141$

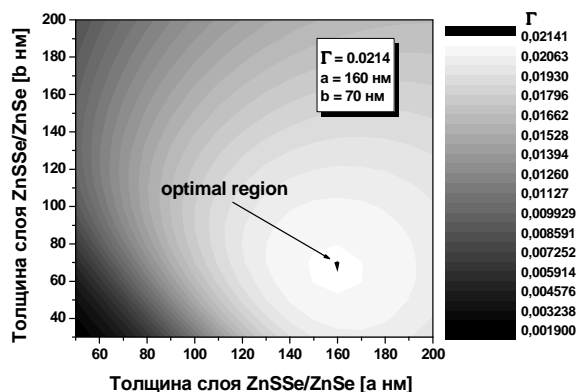


Рис. 18. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe несимметричного волновода с одним слоем CdSe.

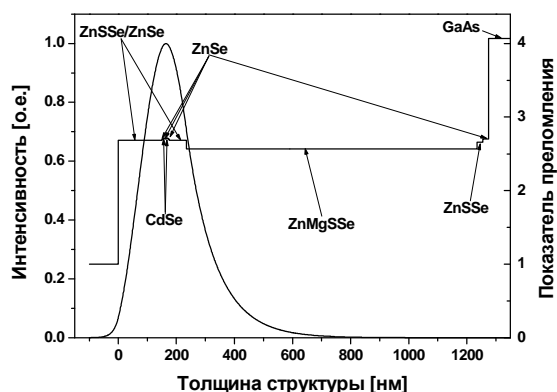


Рис. 19. Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка несимметричного волновода с двумя слоями CdSe (дизайн С). $\Gamma = 0,04324$

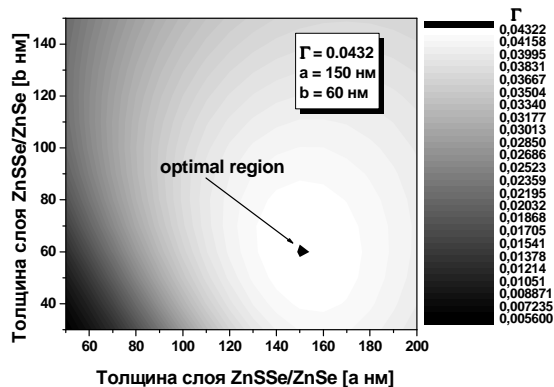


Рис. 20. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe несимметричного волновода с двумя слоями CdSe.

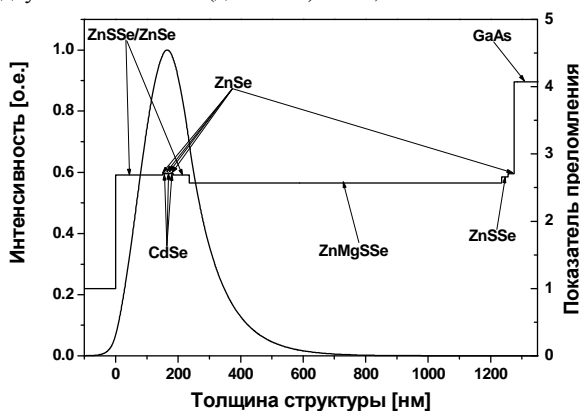


Рис. 21. Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка несимметричного волновода с тремя слоями CdSe (дизайн С). $\Gamma = 0,06527$

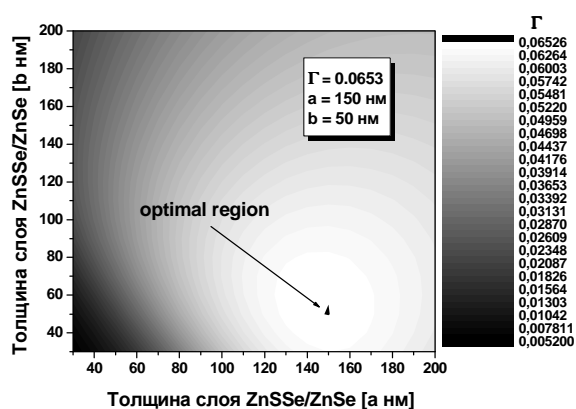


Рис. 22. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин слоев ZnSSe/ZnSe несимметричного волновода с тремя слоями CdSe.

Таблица 3. Фактор оптического ограничения и внутренние оптические потери, обусловленные поглощением в подложке, для гетероструктур дизайна С с симметричным и несимметричным волноводами и различным числом слоев CdSe на длине волны излучения 530 нм.

Количество слоев CdSe	Тип волновода							
	несимметричный				симметричный			
	Толщина ZnSSe/ZnSe, а нм	Толщина ZnSSe/ZnSe, b нм	Γ	α_{GaAs} , см^{-1}	Толщина ZnSSe/ZnSe, а нм	Толщина ZnSSe/ZnSe, b нм	Γ	α_{GaAs} , см^{-1}
1	160	70	0.0214	0,035	100	70	0.0211	0,031
2	150	60	0.0432	0,050	90	60	0.0425	0,043
3	150	50	0.0653	0,044	80	60	0.0642	0,037

Предложен дизайн гетероструктуры, когда соседние CdSe/ZnSe вставки разделены узким (5 нм) слоем ZnS. Предложенный дизайн гетероструктур в случае несимметричного волновода приводит к значительному увеличению фактора оптического ограничения примерно в 1.3 и 1.6 раз (для 2 и 3 CdSe вставок, соответственно) по сравнению с традиционным волноводом (СР, разделяющие CdSe/ZnSe вставки, а также верхний и нижний участки СР имеют толщины 100 нм). При этом фактор оптического ограничения для гетероструктур предложенного дизайна не очень сильно отличается от максимально возможного: проигрыш составляет 6 и 11% для структур с двумя и тремя CdSe/ZnSe вставками, соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Albert D., Nurberger J., Hock V., et al. // Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol. 74. – P.1957
2. Jmerik V.N., Sorokin S.V., Shubina T.V., et al. // Cryst. Growth. 2000. – Vol. 214/215. – P. 502. 3.
3. I.V. Sedova, S.V. Sorokin, A.A. Toropov, V.A. Kaygorodov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev E.V. Lutsenko, V.N. Pavlovskii, V.Z. Zubialevich, A.L. Gurskii, G.P. Yablonskii, Y. Dikme

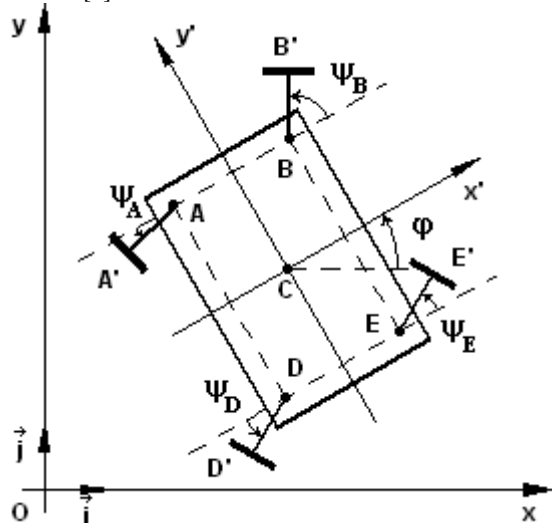
- H. Kalisch, A. Szymakowski, R.H. Jansen, B. Schineller and M. Heuken, Phys. Stat. Sol. (c), **1** (4), 1030 (2004).
4. U. Lunz, B. Jobst, S. Einfeict, C. R. Becker, D. Hommel, G. Landwehr. Optical properties of $Zn_{1-x}Mg_xS_ySe_{1-y}$ epitaxial layers for blue-green laser applications// J. Appl. Phys., 1995, v. 77, №10, p. 5377-5380.
5. H. H. Li. Refractive index of ZnS, ZnSe, and ZnTe and its Wavelength and Temperature Derivatives// J. Phys. Chem. Ref. Data, 1984, v. 13, №1, p. 103-150.
6. M. J. Bergmann and H. C. Casey, Jr. Optical-field calculations for lossy multiple-layer $Al_x Ga_{1-x} N/In_x Ga_{1-x} N$ laser diodes// J. Appl. Phys., 1998, v. 84, №3, p. 1196-1203.
7. Н.П. Тарасюк, А.А. Гладышук, Е.В. Луценко. Фактор оптического ограничения и пороговые условия генерации оптически накачиваемых полупроводниковых лазеров на квантоворазмерных структурах InGaN/GaN, выращенных на кремниевых подложках// Вестник БГТУ. Физика, математика, химия. – 2002. – №5(17). – С. 8-13.
8. М. Адамс. Введение в теорию оптических волноводов/ Москва, 1984.

УДК 531

Чопчиц И.Н., Чопчиц Н.И., Кандилян Г.С.

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ РОБОТА С МАКСИМАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Пусть некоторое тело, называемое основным, связано голономными или неголономными связями с другими твердыми телами, которые могут совершать заданные управляемые движения относительно основного тела (такая система называется кусочно-твердым телом). При этом и основное твердое тело, и связанные с ним тела могут находиться в контакте с опорой. При заданных характеристиках взаимодействия тел с опорой движение основного твердого тела определяется управляемыми движениями связанных с ним тел, и если управляются все степени свободы этих тел, то управление называется максимальным. В этой общей исходной постановке могут быть поставлены различные задачи оптимизации управления [1].



В качестве одной из простейших реализаций такого типа систем рассмотрим модель плоского робота с четырьмя колесами. На рисунке показан вид сверху робота с платформой прямоугольной формы, на которой в точках **A, B, D, E** находятся перпендикулярные плоскости рисунка оси поворота осей вращения колес **AA', BB', DD', EE'**; длины указанных отрезков предполагаются одинаковыми и равными l , $AB = DE = 2a$, $AD = BE = 2b$, радиусы колес обозначим R , угловые скорости буквами Ω с соответствующими индексами, например, $\Omega_{A'}$ – угловая скорость колеса с центром в точке A' ; угловые скорости считаются положительными, если соответствующие векторы образуют с осью Cx' тупой угол; μ – коэффициент трения в модели Кулона-Амонтона. Управление движением робота осуществляется путем задания набора функций $\{\Omega_{A'}(t), \Omega_{B'}(t), \Omega_{D'}(t), \Omega_{E'}(t), \Psi_A(t), \Psi_B(t), \Psi_D(t), \Psi_E(t)\}$, из которых первые четыре могут быть выражены через мощностные и моментные характеристики двигателя и характеристики трансмиссии, а остальные являются, так сказать, рулевыми характеристиками. Из уравнений моментов относительно осей Cx', Cy' и условия равновесия в проекции на ось Oz имеем:

$$N_{A''}(l \cos \Psi_A + a) + N_{D''}(l \cos \Psi_D + a) = N_{B''}(l \cos \Psi_B + a) + N_{E''}(l \cos \Psi_E + a),$$

Чопчиц Игнатий Николаевич, студент 2-го курса ф-та электронно-информационных систем Брестского государственного технического университета.

Чопчиц Николай Игнатьевич, доцент каф. физики Брестского государственного технического университета.

Кандилян Генрик Сергеевич, доцент каф. физики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.