

УДК 535:621.373.8; 535:621.375.8

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДГС РО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ AlGaAs ОТ ШИРИНЫ КВАНТОВОРАЗМЕРНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ *

С.И. Матюхин, З.Ж. Козил

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», г. Орёл, Россия

Методами компьютерного моделирования в пакете программ Sentaurus TCAD компании Synopsys исследована зависимость вольт-амперной и ватт-амперной характеристик полупроводникового AlGaAs лазера с двойной гетероструктурой и отдельным ограничением (ДГС РО) от ширины квантоворазмерной активной области. Изучено влияние этого параметра на коэффициент полезного действия (КПД) лазерного диода и вертикальную расходимость лазерного излучения. Показано, что при заданной длине волны излучения существует оптимальное значение ширины активной области, при котором пороговый ток лазерной генерации будет минимальным, а КПД лазера – максимальным.

Ключевые слова: полупроводниковый лазер на основе AlGaAs; двойная гетероструктура; отдельное ограничение; вольт-амперная характеристика; ватт-амперная характеристика; коэффициент полезного действия; длина волны излучения; компьютерное моделирование; Sentaurus TCAD.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время полупроводниковые лазеры находят применение в устройствах чтения и записи компакт-дисков (CD, DVD), телекоммуникации, в системах прецизионного измерения перемещений и спектроскопии высокого разрешения, для накачки твердотельных лазеров, а также в областях, связанных с обработкой материалов (резка, микросварка), и в медицине (лазерная хирургия, дерматология). При этом практически все промышленные образцы полупроводниковых лазеров являются инжекционными лазерами с двойной гетероструктурой и отдельным ограничением (ДГС РО) с квантоворазмерной активной областью [1, 2].

Как известно [3], длина волны таких лазеров, произведенных на основе AlGaAs, определяется, в основном, концентрацией алюминия в активной области – квантовой яме (КЯ) и шириной этой ямы. Вследствие этого при изменении ширины активной области ⁴ всегда можно подобрать такую концентрацию алюминия ⁴ в этой области, при которой длина волны лазерного излучения будет оставаться неизменной. Это позволяет исследовать зависимость

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Грант №12-02-97512.

от I_{th} порогового тока, наклона ВТAX S и других характеристик полупроводникового ДГС РО лазера, излучающего на заданной длине волны λ .

В настоящей работе эта задача решена путём компьютерного (имитационного) моделирования лазера на основе AlGaAs в пакете программ приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD компании Synopsys [4]. Этот пакет позволяет моделировать все основные процессы твердотельной электроники, объединять их в технологические маршруты, получать в результате произвольные приборные структуры и анализировать их электрофизические и схемотехнические параметры. Фактически он на практике реализует концепцию виртуального производства и позволяет существенно сократить расходы на проектирование и разработку технологических маршрутов изготовления полупроводниковых приборов. Кроме того, программы этого пакета позволяют исследовать физические явления и процессы, протекающие в объеме полупроводников, а также анализировать влияние этих процессов на характеристики приборов.

В работе исследована зависимость вольтамперной (ВАХ) и ватт-амперной (ВтAX) характеристик полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs от ширины активной области и изучено влияние этого параметра на коэффициент полезного действия (КПД) лазерного диода и вертикальную расходимость лазерного излучения. Показано, что при заданной длине волны излучения существуют оптимальные значения ширины активной области, при которых пороговый ток лазерной генерации будет минимальным, а КПД лазера – максимальным.

2. МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве прототипа для моделирования и прибора, предназначенного для калибровки компьютерной модели, был выбран мощный лазерный диод на основе двойной гетероструктуры AlGaAs/GaAs, излучающий на длине волны 808 нм. Такие лазеры, а также линейки и решетки на их основе производятся в ФГУП НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха (г.Москва) [5, 6] и широко используются для накачки твердотельных неодимовых лазеров, а также волоконных усилителей.

Стандартная структура лазерных диодов, которая обеспечивает уверенное получение приборов указанного спектрального класса, описана в таблице 1 [6]. На основе этой структуры обычно изготавливаются чипы многомодовых лазеров, работающих в непрерывном режиме, с полосковыми контактами, сформированными мелким травлением. Ширина полоска W , как правило, равна 100 мкм, длина резонатора L лазеров обычно выбирается равной 1000 мкм.

Моделирование структуры описанного диода осуществлялось при помощи программы Mdraw, а его электрофизических характеристик – при помощи программы Dessis пакета Sentaurus TCAD компании Synopsys. Коэффициенты отражения граней резонатора выбирались равными 0.05 и 0.95; температура лазерного диода считалась равной 300 К. Для сокращения времени численного счета контактный *p*-слой, *n*-буфер и *n*-подложка заменялись эквивалентными сопротивлениями.

Таблица 1 – Стандартная структура ДГС РО лазера на основе AlGaAs

Номер слоя	Слой	Состав	Уровень легирования, см ⁻³	Толщина, мкм
1	<i>n</i> -подложка	<i>n</i> -GaAs (100)	$2 \cdot 10^{18}$	350
2	<i>n</i> -буфер	<i>n</i> -GaAs	$1 \cdot 10^{18}$	0.4
3	<i>n</i> -эмиттер	Al _{0.5} Ga _{0.5} As	$8 \cdot 10^{17}$	1.6
4	волновод	Al _{0.33} Ga _{0.67} As	не легирован ($n \approx 10^{15}$ см ⁻³)	0.2
5	активная область (КЯ)	Al _{0.08} Ga _{0.92} As	не легирован ($n \approx 10^{15}$ см ⁻³)	0.012
6	волновод	Al _{0.33} Ga _{0.67} As	не легирован ($n \approx 10^{15}$ см ⁻³)	0.2
7	<i>p</i> -эмиттер	Al _{0.5} Ga _{0.5} As	$8 \cdot 10^{17}$	1.6
8	контактный <i>p</i> -слой	<i>p</i> -GaAs	$4 \cdot 10^{19}$	0.5

Для лазеров указанного типа длина волны лазерного излучения $\lambda = 808$ нм, пороговое напряжение $U_T = 1.56$ – 1.6 В, дифференциальное сопротивление $r = 50$ – 80 мОм, пороговый ток $I_{th} = 290$ – 360 мА, наклон ВТАХ $S = 1.15$ – 1.25 Вт/А, вертикальная расходимость излучения в области дальнего поля $\theta = 42^\circ$ [5, 6]. Калибровка компьютерной модели позволила получить следующие значения этих величин при моделировании в Sentaurus TCAD: $\lambda_0 = 808.2$ нм, $U_{T0} = 1.61$ В, $r_0 = 77$ мОм, $I_{th} = 308$ мА, $S_0 = 1.25$ Вт/А, $\theta_0 = 40^\circ$.

В ходе проведенного моделирования изучалась зависимость U_T , r , I_{th} , S , КПД лазера η , равного отношению мощности лазерного излучения к электрической мощности, а также вертикальной расходимости θ лазерного излучения от ширины квантоворазмерной активной области d_a .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования зависимости порогового тока I_{th} и наклона ВТАХ S от ширины КЯ d_a представлены на рисунках 1 – 2.

Как показывают эти рисунки, для лазерных диодов, излучающих на заданной длине волны λ , функции $I_{th}(d_a)$ и $S(d_a)$ являются немонотонными разрывными функциями с разрывами в точках $d_a \approx 7.5, 12.5, 15.5, 17, 21.5$ и 24.5 нм. При этом, как показывают результаты моделирования, разрывы этих функций связаны с тем, что при указанных значениях ширины активной области d_a вблизи края КЯ появляются квантовые уровни электронов

и тяжелых дырок (рисунки 3 – 4), и вероятность излучательных переходов в КЯ резко понижается.

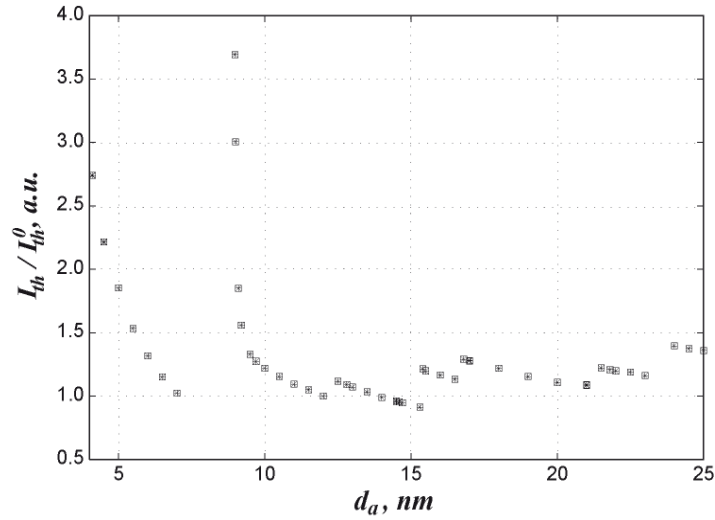


Рисунок 1 – Пороговый ток ДГС РО лазера с длиной волны $\lambda = 808$ нм в зависимости от ширины активной области d_a ($T = 300$ К)

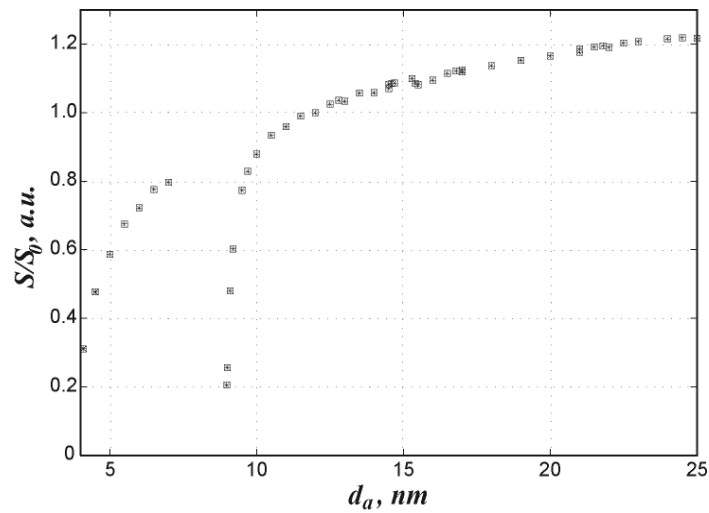


Рисунок 2 – Наклон ВтАХ ДГС РО лазера с длиной волны $\lambda = 808$ нм в зависимости от ширины активной области d_a ($T = 300$ К)

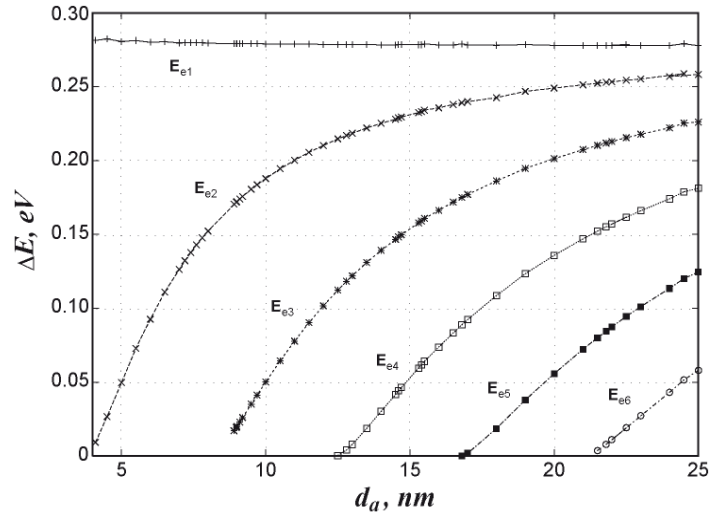


Рисунок 3 – Расстояние между краем ямы и квантовыми уровнями электронов в КЯ ДГС РО лазера с длиной волны $\lambda = 808$ нм в зависимости от ширины КЯ d_a при температуре $T = 300$ К

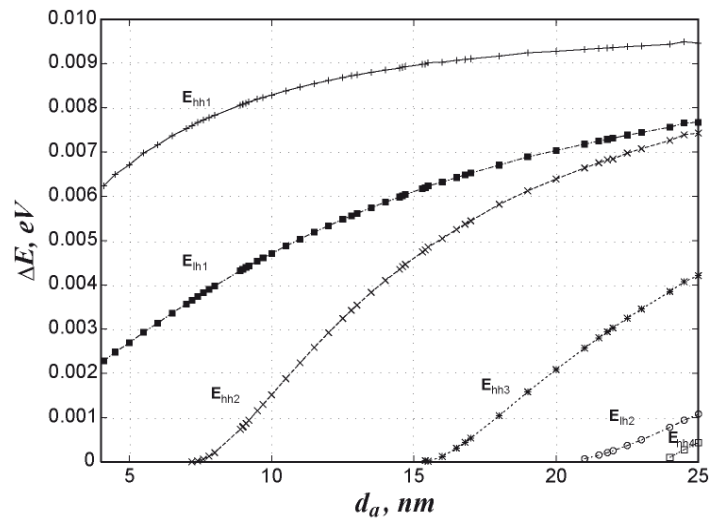


Рисунок 4 – Расстояние между краем ямы и квантовыми уровнями легких (lh) и тяжелых (hh) дырок в КЯ ДГС РО лазера с длиной волны $\lambda=808$ нм в зависимости от ширины КЯ d_a при температуре $T = 300$ К

Связь между разрывами функций $I_n(d_a)$ и $S(d_a)$ и появлением уровней квантования вблизи края КЯ становится еще более очевидной при низких температурах лазерного диода (рисунки 5 – 7). При этом сравнение рисунков 5 и 1 показывает, что тепловое движение носителей заряда вносит важный вклад в значительное увеличение порогового тока

вблизи точек разрыва. А именно, благодаря тепловому движению увеличивается вероятность «убегания» носителей, захваченных на верхние квантовые уровни, из КЯ, вследствие чего уменьшается их время пребывания в яме, и увеличивается вероятность переброса носителей через КЯ без излучательных переходов.

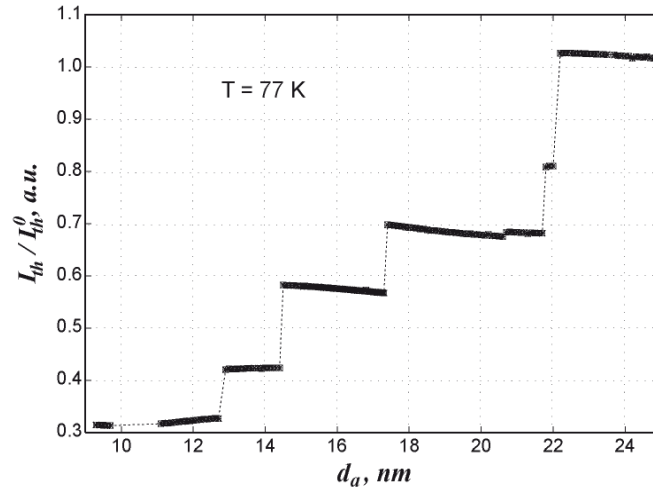


Рисунок 5 – Пороговый ток ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от ширины КЯ при температуре $T = 77$ К

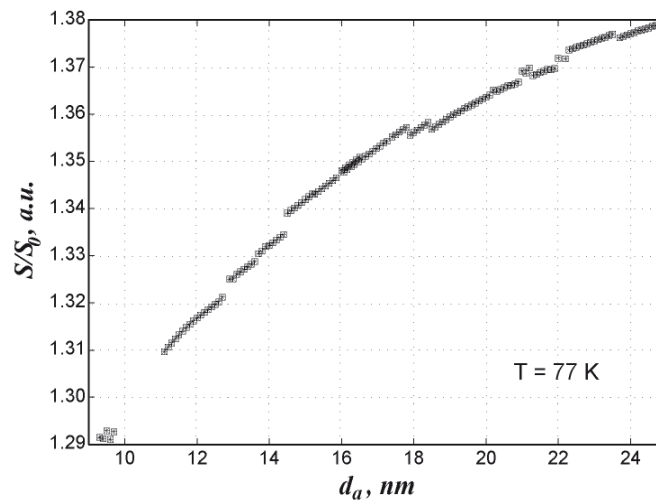


Рисунок 6 – Наклон S/S_0 ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от ширины КЯ при температуре $T = 77$ К

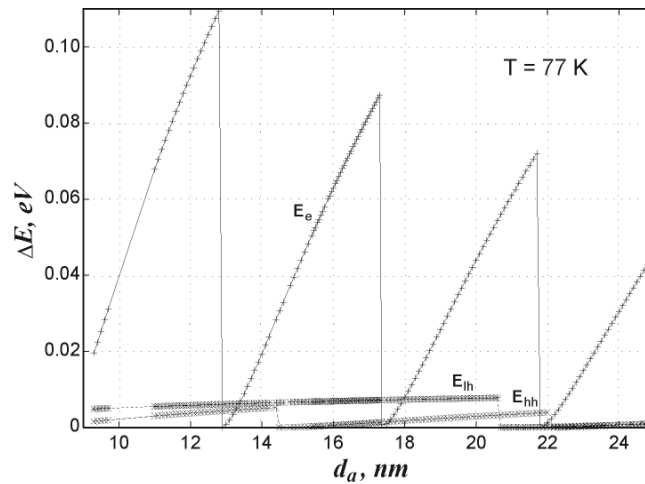


Рисунок 7 – Расстояние между краем ямы и верхними квантовыми уровнями электронов и дырок в КЯ ДГС РО лазера на основе AlGaAs в зависимости от ширины ямы d_a при температуре $T = 77$ К

Как показывают результаты моделирования, изменение ширины активной области практически не сказывается на таких характеристиках лазерного диода, как пороговое напряжение U_T , дифференциальное сопротивление r и вертикальная расходимость лазерного излучения θ . Это связано с тем, что величина U_T определяется, в основном, контактной разностью потенциалов в области p^+ - p -, p - n - и n^+ - n -переходов и, в конечном итоге, – уровнем легирования волновода и эмиттеров, а сопротивление r – шириной запрещенной зоны полупроводника в области слабо легированного волновода, то есть мольной концентрацией алюминия в волноводе. Вертикальная же расходимость θ определяется, главным образом, шириной волновода и скачком показателя преломления на его границах.

Исходя из постоянства порогового напряжения и сопротивления лазерных диодов, трудно сделать вывод, что их КПД η , определяемый выражением

$$\eta = \frac{(I - I_{th})S}{U_T I + I^2 r}, \quad (1)$$

в котором I – это протекающий через диоды ток, при изменении ширины активной области будет иметь разрывы в тех же точках, что и функция $I_m(d_a)$. При этом, как показывают рисунки 1 и 2, КПД лазеров с шириной активной области $d_a \approx 15$ нм при нормальных температурах будет максимальным.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывают полученные в ходе проведенного моделирования результаты, для ДГС РО лазеров на основе AlGaAs, излучающих на заданной длине волны λ , существуют

значения ширины активной области, оптимальные с точки зрения понижения порогового тока и повышения КПД лазерных диодов. В частности, для лазеров с квантоворазмерной активной областью, работающих на длине волны $\lambda = 808$ нм, оптимальной шириной КЯ, при которой пороговый ток лазерной генерации достигает своего минимального значения (рисунок 1), является величина $L = 15$ нм, которая оказывается несколько больше величины 12 нм, используемой при изготовлении лазеров по стандартной технологии [6].

При такой ширине активной области полупроводниковые лазеры будут обладать максимально возможным КПД при низкой вертикальной расходимости излучения в области дальнего поля. При этом следует иметь в виду, что функции $I_m(d_a)$ и $S(d_a)$ являются немонотонными и разрывными, что должно учитываться при оптимизации конструкции лазерных диодов путём варьирования ширины КЯ L .

ЛИТЕРАТУРА

1. Alferov Zh.I. The Double Heterostructure Concept and Its Applications in Physics, Electronics, and Technology // Rev. Mod. Phys. 2001. V.73. No.3. P.767-782.
2. Елисеев П.Г. Полупроводниковые лазеры – от гомопереходов до квантовых точек // Квантовая электроника. 2002. Т.32. С.1085-1098.
3. Матюхин С.И., Козил З.Ж., Магомедов Г.Р., Малый Д.О., Ромашин С.Н. Длина волны полупроводникового ДГС РО лазера на основе AlGaAs с квантоворазмерной активной областью // Ученые записки Орловского государственного университета. 2011. №3 (41). С.74-83.
4. Sentaurus TCAD User Guide, - Synopsys, 2005
(<http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx>).
5. Андреев А.Ю., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Налет Т.А., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Сабитов Д.Р., Симаков В.А., Слипченко С.О., Хомылев М.А., Тарасов И.С. Мощные лазеры ($\lambda = 808 - 850$ нм) на основе асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения // ФТП. 2006. Т.40. Вып.5. С.628-632.
6. Андреев А.Ю., Зорина С.А., Лешко А.Ю., Лютецкий А.В., Мармалюк А.А., Мурашева А.В., Налет Т.А., Падалица А.А., Пихтин Н.А., Сабитов Д.Р., Симаков В.А., Слипченко С.О., Телегин К.Ю., Шамахов В.В., Тарасов И.С. Мощные лазеры ($\lambda = 808$ нм) на основе гетероструктур раздельного ограничения AlGaAs/GaAs // ФТП. 2009. Т.43. Вып.4. С.543-547.

Матюхин Сергей Иванович

Доктор физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел
Декан Естественнонаучного факультета
Тел. (4862) 41-98-81
E-mail: sim1@mail.ru

Козил Збигнев Жозеф

Ph.D.
ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК», г. Орел
Ведущий инженер-физик лаборатории приборно-технологического моделирования в микро- и нано-электронике
Тел. (4862) 41-98-89
E-mail: softquake@gmail.com

INFLUENCE OF THE ACTIVE REGION WIDTH ON CHARACTERISTICS OF AlGaAs SEMICONDUCTOR LASER WITH SEPARATE CONFINEMENT HETEROSTRUCTURES

S.I. Matyukhin, Z. Koziol

State University – Educational, Research and Industrial Complex, Orel, Russia

I-V- and light-current-curves of an AlGaAs semiconductor laser with separate confinement heterostructures (SCH) as functions of the active region width are investigated by the methods of computer simulation in the Synopsys' Sentaurus TCAD software. Influence of these parameter on optical efficiency of the laser and vertical divergence of laser radiation is studied. It's shown that at the set wavelength there are optimal values of the active region width when the threshold current of lasing is minimal and the optical efficiency is maximal.

Keywords: *semiconductor laser on the base of AlGaAs; double heterostructure; separate confinement; I-V-curve; light-current-curve; optical efficiency; radiation wavelength; computer simulation; Sentaurus TCAD.*