

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство чрезвычайных ситуаций Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chernobyl.mchs.gov.by/kontrol-radioaktivnogo-zagryazneniya/>. – Дата доступа: 02.09.2023.
2. Акцепт. Испытательная лаборатория, сертификационный центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://accept-lab.ru/opredelenie-udelnoj-effektivnoj-aktivnosti-radionuklidov/>. – Дата доступа: 28.08.2023.
3. Войцицкий, И. В. Активность Sr-90 и Cs-137 в почвах Курганской области / И. В. Войцицкий // Молодой ученый Международный научный журнал. – 2020. – № 2 (292). – С. 344–346.
4. Игнатов, П. А. Радиогеоэкология и проблемы радиационной безопасности : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / П. А. Игнатов, А. А. Верчеба. – Волгоград : Издательский Дом «Ин-Фолио», 2010. – 256 с.
5. Ильин, Л. А. Радиационная гигиена : учебник для вузов / Л. А. Ильин, В. Ф. Кириллов, И. П. Коренков. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 384 с.
6. Маргулис, У. Я. Радиационная безопасность. Принципы и средства ее обеспечения / У. Я. Маргулис, Ю. И. Брегадзе, К. Н. Нурлыбаев. – М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2010. – 320 с.
7. Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ) / под ред. А. Н. Мартынюк. – 2011. – № 2 (65). – М. : НПП "Доза", 2011. – 71 с.

ФАКТОР ОПТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ И ДАЛЬНЕЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ AlGaN

Н. П. Тарасюк

Учреждение образование «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь

Гетероструктуры на основе AlGaN перспективны для создания высокоэффективных источников излучения в ультрафиолетовой области спектра. Возможность изменения ширины запрещенной зоны гетероструктур AlGaN от 3.4 до 6.1 эВ [1] позволит создавать оптоэлектронные приборы, работающие в широком диапазоне длин волн ультрафиолетовой области спектра от 365 до 210 нм. Увеличение фактора оптического ограничения позволит понизить порог генерации оптически накачиваемых лазеров [2, 3] и осуществить развернутые исследования лазерных параметров гетероструктур, что важно для оптимизации ростовых параметров и создание эффективных ультрафиолетовых лазеров. Для эффективного применения полупроводниковых лазеров необходимо знание распределения излучения в дальней зоне. От излучения лазера в дальней зоне зависит способ ввода излучения в оптическое волокно.

В данной работе проводится оптимизация по фактору оптического ограничения толщин волноводных слоев гетероструктур с активной областью, содер-

Современные научные исследования в области физико-математических и технических дисциплин жащей одну, три и пять квантовых ям AlGa_N. Рассчитана полуширина лазерного излучения в дальней зоне для данных гетероструктур.

Для моделирования фактора оптического ограничения гетероструктур была использована модель одномерной планарной структуры.

Вычисления фактора оптического ограничения были проведены в приближении плоских волн для ТЕ поляризации излучения [4, 5]. Напряженность электрического поля в j -ом слое структуры представляется в виде:

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

Амплитуда напряженности электрического поля $\varepsilon_{y,j}(x)$ удовлетворяет волновому уравнению:

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

где β – проекция волнового вектора k_0 на плоскость гетероструктуры, \tilde{n}_j – комплексный показатель преломления j -го слоя.

Для нахождения β использовался алгоритм скоростного спуска [4].

Фактор оптического ограничения вычислялся по формуле [6, 7]:

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

где интегрирование в числителе происходит по координатам квантовых ям AlGa_N.

В дальней зоне отношение интенсивности излучения, распространяющегося в направлении, определяемом углом θ , к интенсивности излучения в направлении $\theta=0$, равно [8]:

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \frac{|E(\theta)|^2}{|E(0)|^2} = \frac{K^2(\theta) \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x, 0) e^{ik_0 x \sin(\theta)} dx \right|^2}{K^2(0) \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x, 0) dx \right|^2}, \quad \text{где } K(\theta) = \cos(\theta). \quad (4)$$

В качестве примера были выбраны гетероструктуры с активной областью, состоящей из одной, трех и пяти квантовых ям Al_xGa_{1-x}N шириной 1 нм с барьерами Al_yGa_{1-y}N шириной 10 нм, с характерными для MOVPE и MBE роста ширинами 1500 нм. Выбираем разность энергий запрещенных зон квантовых ям и волноводного слоя ΔE_g , равной 0,2 эВ. Большая разница в концентрации алюминия обкладочного и волноводного слоя приводит к генерации дислокаций за счет рассогласования постоянных решеток этих слоев. Поэтому выбираем концентрации алюминия волноводного и обкладочного слоев соответственно 46 % и 57 %.

Расчет фактора оптического ограничения был выполнен для длины волны 300 нм. Результаты моделирования приведены на рисунках 1–3.

СЕКЦИЯ 3

Современные научные исследования в области физико-математических и технических дисциплин

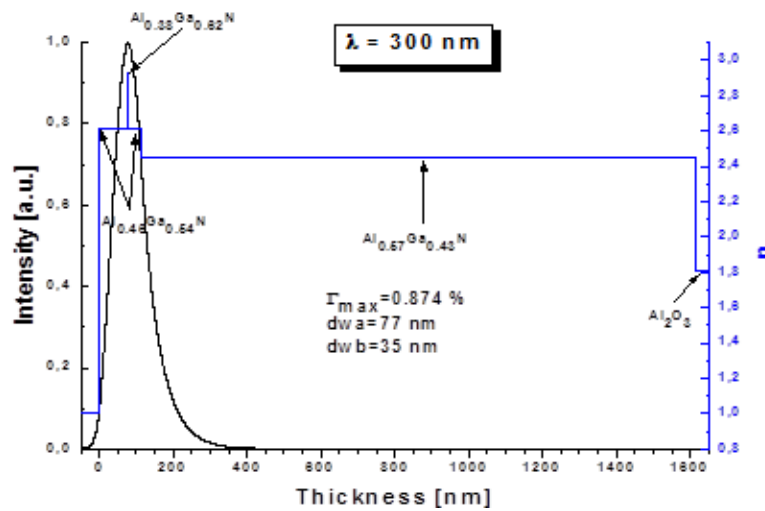


Рисунок 1 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 1 квантовую яму AlGaIn (d_{wa} и d_{wb} – толщина волноводных слоев соответственно слева и справа от квантовых ям)

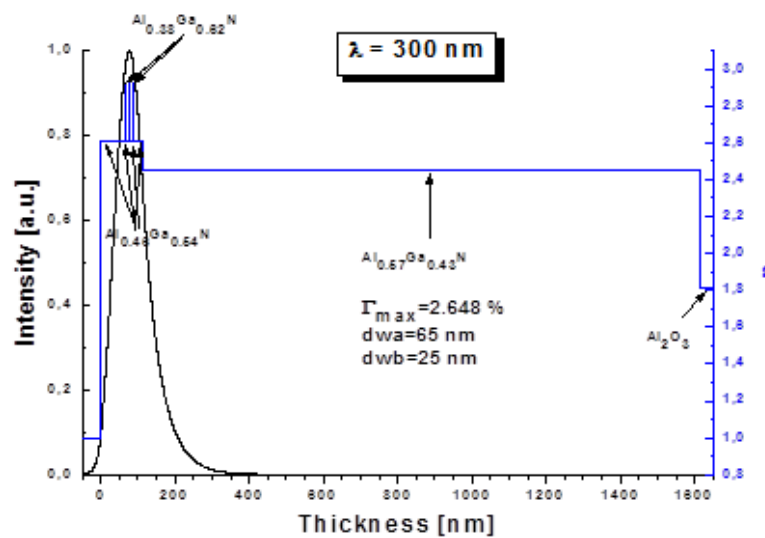


Рисунок 2 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 3 квантовых ям AlGaIn

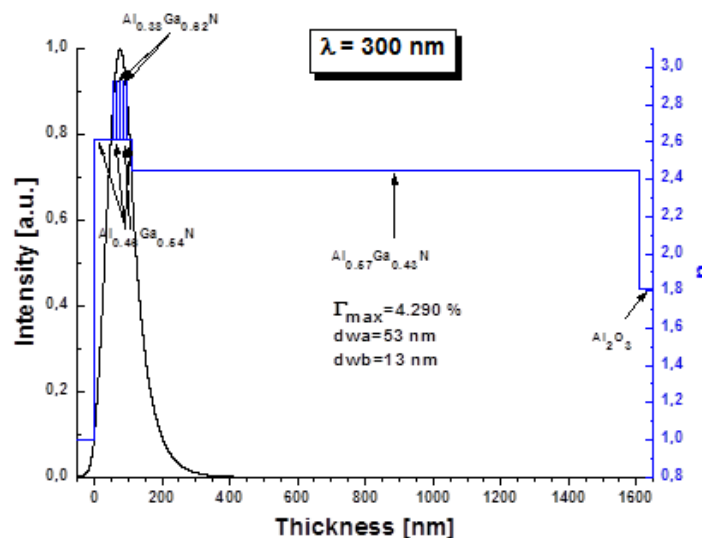


Рисунок 3 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям AlGaIn

Из рисунков 1–3 видно, что максимальное значение фактора оптического ограничения гетероструктур с одной, тремя и пятью квантовыми ямами AlGaIn соответственно равны 0.874 %, 2.648 % и 4.290 %. При этом толщина верхнего волноводного слоя меньше длины диффузии неравновесных носителей заряда, что позволяет использовать данные гетероструктуры для оптически накачиваемых лазеров.

Расчет распределения интенсивности в дальней зоне был выполнен для длины волны 300 нм. Результаты моделирования приведены на рисунке 4.

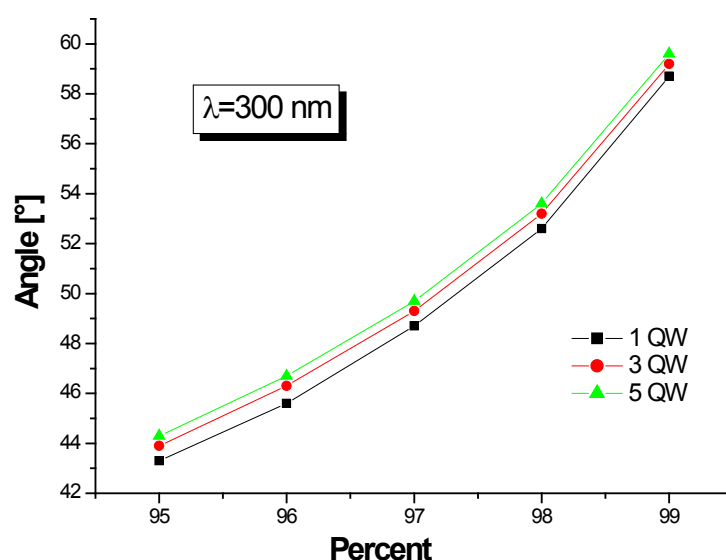


Рисунок 4 – Значения угла, при котором доля интенсивности изменяется от 95 до 99 % для гетероструктур, содержащих 1, 3 и 5 квантовых ям

Из рисунка 4 видно, что значения углов увеличиваются менее, чем на 1° с увеличением количества квантовых ям от 1 до 5.

Проведена оптимизация по фактору оптического ограничения толщин волноводных слоев гетероструктур с активной областью, содержащей одну, три и пять квантовых ям AlGaIn. Рассчитана полуширина лазерного излучения в дальней зоне для данных гетероструктур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Plasma-assisted molecular beam epitaxy of Al(Ga)N layers and quantum well structures for optically pumped mid-UV lasers on c-Al₂O₃ / S.V. Ivanov [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 2014. – Vol. 29, 084008.
2. Investigation of photoluminescence, stimulated emission, photorefectance and 2DEG properties of double heterojunction AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT heterostructures grown by ammonia MBE / E. V. Lutsenko [et al.] // Phys. Stat. Sol. A. V. 215 – 2018. – Iss. 9. 1700602.
3. Internal parameters and optical properties of green lasers with active region composed of multi-sheet electronically-coupled CdSe quantum dots / A. G. Vainilovich [et al.] // Phys. Stat. Sol. (c). – 2010. – Vol. 7, Iss. 6. – P. 1691–1693.

4. Bergmann, M. J. Optical-field calculations for lossy multiple-layer $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ laser diodes / M. J. Bergmann, Jr. H. C. Casey // J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 84, Iss. 3. – P. 1196–1203.
5. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – Москва : Наука, 1978. – 512 с.
6. Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов / М. Адамс. – Москва : Мир, 1984. – 512 с.
7. Тарасюк, Н. П. Фактор оптического ограничения и пороговые условия генерации оптически накачиваемых полупроводниковых лазеров на квантоворазмерных структурах InGaN/GaN , выращенных на кремниевых подложках / Н. П. Тарасюк, А. А. Гладышук, Е. В. Луценко // Вестник БГТУ. Физика, математика, химия. – 2002. – № 5. – С. 8–13.
8. Casey, H. C. Heterostructure Lasers. Part A. / H. C. Casey, M. V. Panish // Quantum Electronics Principles and Applications. N. Y., – 1978.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

А. Р. Федорец, Н. В. Вабищевич

*Учреждение образование «Полоцкий государственный университет имени
Евфросинии Полоцкой», г. Новополоцк, Витебская область,
Республика Беларусь*

Актуальной проблемой современной термодинамики является задача поиска оптимальных методов анализа процессов теплообмена, широко распространенных в природе и технике. Как правило, параметры, характеризующие указанные процессы, находятся в сложной взаимозависимости и являются функциями многих переменных. Подобные проблемы описания физических процессов решаются применением методик численного либо компьютерного моделирования. Выбор оптимальной методики позволяет получать результаты с достаточной достоверностью и точностью. Цель настоящей работы состояла в анализе возможности применения метода разделения переменных для решения двумерных термодинамических задач теплопроводности.

Известно [1–3], что путем решения дифференциального уравнения теплопроводности, которое устанавливает связь между пространственным и временным изменением температуры, в общем случае, может быть определено температурное поле внутри тела:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad a = \frac{\kappa}{\rho c},$$

где a – физический параметр вещества, характеризующую скорость изменения температуры в нестационарных процессах, который был назван коэффициентом температуропроводности; κ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность; c – удельная теплоемкость [1].