

Vlihanie dizajna geterostruktury na porog generacii lazera s mnozhestvennymi kvantovymi jamami InGaN/GaN na kremnii

Andryieuski, Andrei

Published in:
Vestnik

Publication date:
2008

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Andryieuski, A. (2008). Vlihanie dizajna geterostruktury na porog generacii lazera s mnozhestvennymi kvantovymi jamami InGaN/GaN na kremnii. Vestnik, 1, 45-48.

DTU Library

Technical Information Center of Denmark

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

УДК 535.374

А.В. АНДРИЕВСКИЙ

ВЛИЯНИЕ ДИЗАЙНА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ПОРОГ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРА С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaN/GaN НА КРЕМНИИ

This article is devoted to the investigation of the influence of heterostructure design on lasing characteristics of the InGaN/GaN multiple quantum well laser on silicon substrate, performed by computer modelling. It is shown that heterogeneity in a growth process can lead to different far-field patterns, that is related to the alteration of lasing threshold for different modes. It is shown that lasing threshold be reduced by variation of the layer thickness.

Квантоворазмерные полупроводниковые структуры на основе нитридов индия, галлия и алюминия привлекают к себе большое внимание ученых и производителей. На их основе были созданы высоко-эффективные светодиоды и лазеры зеленого – ультрафиолетового спектрального диапазона, которые перспективны для широкого применения в устройствах оптической записи – считывания информации.

К недостаткам синих – ультрафиолетовых лазеров стоит отнести их малый срок службы и высокую стоимость, что связано с использованием сапфировых подложек для выращивания лазерных структур. Альтернативой сапфиру может стать кремний, который намного дешевле, имеет высокую удельную теплопроводность, технология его обработки хорошо разработана. Кроме того, создание оптоэлектронных приборов на кремнии открывает возможности их интеграции с традиционными изделиями микроэлектроники.

Для использования кремния в качестве подложки для нитридных лазеров необходимо решить основные проблемы: образования большого количества дефектов при росте структуры и поглощения генерируемого излучения в подложке. Для уменьшения количества дефектов было предложено выращивать на кремнии дополнительные буферные слои нитридов алюминия и галлия [1], для решения проблемы поглощения излучения необходима разработка волноводов лазеров, обеспечивающих минимальную локализацию излучения в кремниевой подложке.

Данная работа посвящена изучению влияния дизайна гетероструктуры (т. е. толщины слоев полупроводников) на пороговый коэффициент усиления лазера с множественными квантовыми ямами (МКЯ) InGaN/GaN на кремниевой подложке.

Исследуемый образец

Для исследования была выбрана структура с десятью квантовыми ямами InGaN/GaN, выращенная в Институте полупроводниковой техники (Аахен, Германия) методом металлорганической газовой эпитаксии в реакторе серии АИХ. На рис. 1 изображен профиль показателя преломления структуры с указанием толщины слоев, которая определялась по скорости и времени роста и уточнялась при помощи рентгеновских измерений. Спектрально-угловые измерения производились при помощи спектрометра с ПЗС-линейкой. Для возбуждения образца применялось излучение азотного лазера (длина волны 337,1 нм), сфокусированное в полосу шириной 100 мкм. Пороговая плотность мощности

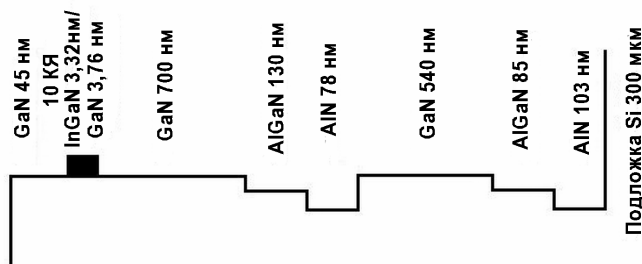


Рис. 1. Профиль показателя преломления исследуемой структуры

возбуждения составила 250 кВт/см² для резонатора длиной 125 мкм. Дальнее поле генерации изучалось при плотности мощности накачки 400 кВт/см², генерация происходила на длине волны 446 нм.

Угловые измерения интенсивности дальнего поля показали, что при возбуждении разных участков образца наблюдаются две различные картины генерации: в первом случае максимумы интенсивности расположены под углами 0° и ±35°, а во втором – под углами ±12° и ±43°. Для объяснения наблюдаемой зависимости было проведено математическое моделирование.

Методика математического моделирования

Расчеты производились для ТЕ-мод. С целью моделирования генерационных характеристик полупроводникового лазера (ближнее и дальнее поле генерации, пороговый коэффициент усиления, фактор оптического ограничения, фактор локализации излучения в подложке) необходимо прежде всего рассчитать собственные моды волновода и соответствующие им постоянные распространения. Для этого нужно решить уравнения Максвелла, которые в случае структуры с плоскими слоями приводят к одномерному уравнению Гельмгольца [2, 3] в пределах каждого слоя:

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} + n^2 k_0^2 \varphi(x) = 0. \quad (1)$$

Условие непрерывности тангенциальных составляющих электрической и магнитной напряженности на границах слоев дает характеристическое уравнение, из которого можно найти постоянные распространения мод β_n и по ним – распределение электрической напряженности мод в волноводе $\varphi_n(x)$.

Основной проблемой расчета мод волновода квантоворазмерных лазеров является большое количество слоев структуры, что не позволяет решить задачу аналитически. Для решения уравнения (1) нами был использован численный метод конечных элементов.

Зная постоянную распространения, можно определить эффективный показатель преломления для моды [4]

$$\bar{n}_n^{\text{эфф}} = \frac{\beta_n}{k_0}.$$

Его действительная часть дает собственно модовый показатель преломления \bar{n}_n , а мнимая – модовый коэффициент поглощения α_n (если $\text{Im} \bar{n}_n^{\text{эфф}} > 0$) либо усиления (если $\text{Im} \bar{n}_n^{\text{эфф}} < 0$).

На основании амплитудного условия генерации лазера пороговый материальный коэффициент усиления для моды номер n равен

$$k_n = \frac{1}{\Gamma_n} \left(\alpha_n + \ln \frac{1}{R_n} \right),$$

где Γ_n – фактор оптического ограничения, R_n – коэффициент отражения.

Фактор оптического ограничения Γ_n моды определяется как доля интенсивности излучения, входящего на активную область, и рассчитывается по формуле

$$\Gamma_n = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_n(x) \varphi_n^*(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_n(x) \varphi_n^*(x) dx},$$

причем в числителе интегрирование проводится только по активным слоям структуры. Знак звездочки обозначает комплексное сопряжение.

При падении волны на границу структура – воздух происходит ее частичное отражение волны. В полупроводниковых лазерах роль зеркала играет обрыв волновода. Поскольку толщина слоев гетероструктуры сравнима либо меньше длины световой волны и волна пространственно ограничена, пользоваться формулами Френеля для нахождения коэффициента отражения нельзя.

В таком случае решение для поля волны внутри и снаружи структуры находится в виде ряда (или интеграла) по собственным функциям [5]. Для определения коэффициентов трансформации мод r_{mk} необходимо решить систему линейных уравнений

$$\sum_{n=1}^N r_{mn} (A_{nk} + \beta_n \delta_{nk}) = a(\beta_m \delta_{mk} - A_{mk}), \quad m = \overline{1, N},$$

где матричный элемент $A_{nk} = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{\varphi}_k^*(\lambda) \sqrt{k_0^2 - \lambda^2} \tilde{\varphi}_n(\lambda) d\lambda$ ($\tilde{\varphi}_k(\lambda)$ – фурье-образ собственной функции $\varphi_k(x)$).

Коэффициент отражения моды по интенсивности равен

$$R_n = |r_{nn}|^2.$$

Результаты и их обсуждение

При помощи угловых измерений дальнего поля излучения при перемещении возбуждающего пучка вдоль образца было установлено, что наблюдаются две отличающихся картины генерации: в первом случае максимумы интенсивности расположены под углами 0° и $\pm 35^\circ$, а во втором – под углами $\pm 12^\circ$ и $\pm 43^\circ$. Для объяснения наблюдаемых различий в картине генерации проведено моделирование генерационных характеристик лазера. В результате выяснено, что максимумам под углами 0° и $\pm 35^\circ$ соответствует генерация на четвертой моде, а максимумам под углами $\pm 12^\circ$ и $\pm 43^\circ$ – на пятой.

Коэффициент отражения почти монотонно увеличивается с ростом порядка моды, что закономерно, поскольку возрастает угол падения моды на границу лазерная структура – воздух. Фактор оптического ограничения ведет себя немонотонно и принимает максимальное значение для четвертой и пятой мод. Зависимость порогового коэффициента усиления от номера моды представлена на рис. 2.

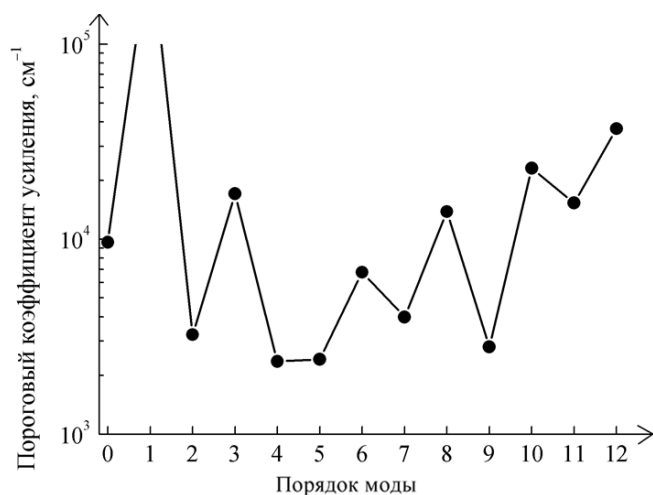


Рис. 2. Пороговый коэффициент усиления для первых 13 мод

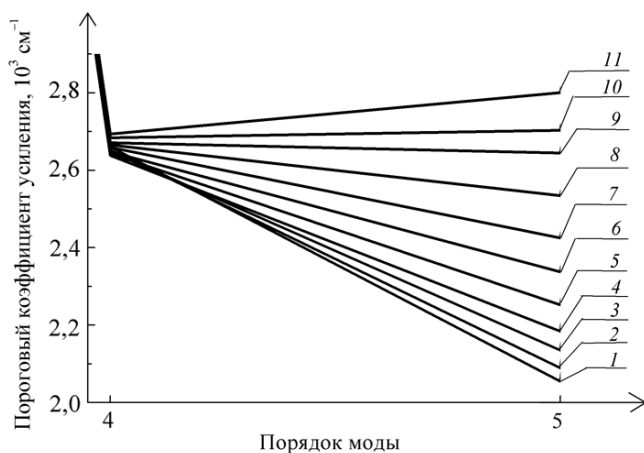


Рис. 3. Пороговый коэффициент усиления для структуры, растянутой на $\pm 10\%$: 1 – -10% , 2 – -8% , 3 – -6% , 4 – -4% , 5 – -2% , 6 – -0% , 7 – $+2\%$, 8 – $+4\%$, 9 – $+6\%$, 10 – $+8\%$, 11 – $+10\%$

Пороговый коэффициент усиления минимален для четвертой и пятой мод. Генерация на низших модах не происходит из-за малого коэффициента отражения, а на высших – в связи с сильным поглощением в кремниевой подложке.

Возможной причиной различий картины генерации в зависимости от участка образца мог стать неоднородный рост структуры в плоскости подложки. Для проверки этого предположения были промоделированы генерационные характеристики той же исследуемой структуры, но сжатой или растянутой на $\pm 10\%$ с шагом 2% . Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Растяжение и сжатие всей структуры как целого значительно сказывается на четвертой моде, а для пятой моды пороговый коэффициент усиления изменяется сильно. При пропорциональном увеличении толщины всех слоев приблизительно в 1,06 раза пороговые коэффициенты усиления для четвертой и пятой мод становятся равными и происходит перескок генерации с четвертой на пятую моду. Результаты моделирования подтверждают предположение о влиянии неравномерности роста на генерационные характеристики лазерной структуры.

Кроме того, компьютерное моделирование показывает, что, варьируя в допустимых пределах толщину слоев гетероструктуры, можно уменьшить пороговый коэффициент усиления до 1000 см^{-1} за счет увеличения фактора оптического ограничения мод.

Исследуемая структура с квантовыми ямами InGaN/GaN на кремниевой подложке весьма перспективна для создания рентабельных полупроводниковых лазеров синего свечения. Наблюдаемые различия углового распределения интенсивности излучения в дальнем поле при возбуждении разных участков образца могут быть объяснены неоднородным ростом структуры. В частности, при пропорциональном увеличении толщины всех слоев на 6 % происходит перескок генерации с четвертой на пятую моду, что подчеркивает необходимость прецизионного контроля толщины слоев в процессе роста.

Автор благодарит старшего научного сотрудника лаборатории физики и техники полупроводников НАН Беларуси Е.В. Луценко за предоставленные структурные данные и угловое измерение интенсивности дальнего поля генерации, а также за обсуждение результатов исследования.

1. Feltin E., Beaumont B., Laügt M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79. № 20. P. 3230.
2. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. М., 1984.
3. Kawano K., Kitoh T. Introduction to optical waveguide analysis: solving Maxwell's equations and Schrödinger equation. New York, 2001.
4. Bergmann M. J., Casey H. C. Jr. // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. P. 1196.
5. Гончаренко А.М., Карпенко В.А. Основы теории оптических волноводов. М., 2004.

Поступила в редакцию 10.12.07.

Андрей Вацлавович Андриевский – магистрант факультета радиофизики и электроники.