

Измерение коэффициента поглощения света, распространяющегося латерально в светодиодных структурах с квантовыми ямами $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$

© Ю.С. Леликов, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, И.А. Мартынов,
Ю.Т. Ребане, Д.В. Тархин, Ю.Г. Шретер[¶]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 28 декабря 2007 г. Принята к печати 16 января 2008 г.)

Предложена методика измерения коэффициента поглощения света, распространяющегося параллельно поверхности светодиодного чипа на основе GaN на сапфировой подложке. Метод основан на микроскопическом изучении свечения одного торца чипа при освещении противоположного торца светодиодом. Коэффициент поглощения вычислялся из отношения интенсивностей свечения торцов сапфира и эпитаксиального слоя. Из измерений на чипах на основе структур $p\text{-GaN}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/n\text{-GaN}$ получено значение латерального коэффициента поглощения света $(23 \pm 3) \text{ см}^{-1}$ на длине волны 465 нм. Анализируются возможные причины отличия полученного значения коэффициента поглощения от приводимых в литературе.

PACS: 78.20.Ci, 78.60.Fi, 78.66.Fd, 85.60.Jb

1. Введение

Разработка высокоэффективных светодиодов с квантовыми ямами InGaN/GaN для целей общего освещения связана с необходимостью повышения внешней квантовой эффективности, в значительной степени ограничивающейся эффективностью экстракции генерируемого света [1]. Эта проблема связана с полным внутренним отражением света, обусловленным высоким значением показателя преломления нитрида галлия ($n = 2.5$). В результате значительная часть генерированного света, способная выйти из структуры, латерально распространяется в слое GaN как в волноводе, испытывая при этом поглощение и в слое нитрида галлия, и на контактах. Даже при текстурировании поверхностей светодиодного чипа, нарушающем волноводный эффект и увеличивающем выход света, часть генерируемого света распространяется латерально. Поглощение генерируемого света в тонком эпитаксиальном слое нитрида галлия, призванным быть широкозонным окном для вывода излучения, обусловлено высокой плотностью дислокаций и примесных комплексов. Коэффициент поглощения в слоях GaN в голубых светодиодах достигает величины $70\text{--}90 \text{ см}^{-1}$ [2,3], что приводит к существенным оптическим потерям уже в маломощных индикаторных светодиодах, линейные размеры которых не превышают $\sim 340 \text{ мкм}$. С увеличением мощности и размеров светодиодных ламп проблема „латерального“ поглощения генерированного света приобретает решающее значение. В связи с этим для характеристики выращенных эпитаксиальных структур полезны прямые измерения поглощения света, латерально распространяющегося в структуре готового чипа.

Обычно поглощение света в эпитаксиальных слоях исследуется методами измерения пропускания [4–6] или

фоторефрактивной спектроскопии [2,7,8] при распространении света перпендикулярно слою. Работ, посвященных определению поглощения света при латеральном распространении в готовых светодиодных структурах, мало [9,3]. В методе, описанном в [9], для ввода света в эпитаксиальный слой необходима призма с размерами меньше размеров структуры. В [3] латеральное поглощение изучается на основе измерения интенсивностей электролюминесценции в двух взаимно перпендикулярных направлениях вдоль и поперек слоя.

В настоящей работе предложена простая экспериментальная методика измерения коэффициента поглощения света, распространяющегося латерально в тонком GaN-слое светодиодных структур, и приведены результаты измерений на чипе с квантовыми ямами $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ на длине волны $\lambda \approx 465 \text{ нм}$.

2. Эксперимент

В работе исследовались светодиодные чипы на основе структур $p\text{-GaN}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/n\text{-GaN}$ с квантовой ямой $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ толщиной 30 \AA , выращенных на сапфировой подложке. Структуры содержали полупрозрачный контакт Ni/Au к слою $p\text{-GaN}$ и контакт Al/Ti к слою $n\text{-GaN}$. Детали структуры приведены в [10]. Светодиодные чипы имели размеры $340 \times 340 \text{ мкм}$, суммарная толщина слоев $n\text{-GaN}$ и $p\text{-GaN}$ составляла $\sim 3 \text{ мкм}$, толщина сапфировой подложки 100 мкм . Длина волны в максимуме спектра излучения равнялась 465 нм при ширине спектра на половине высоты 20 нм .

В работе при изучении поглощения света пренебрегается поглощением в квантовой яме $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, так как ее толщина много меньше толщины слоев GaN.

С целью установления вклада рассеяния света, распространяющегося латерально в слое GaN, в совокупное ослабление света в исследуемой светодиодной структуре

[¶] E-mail: Y.Shreter@mail.ioffe.ru

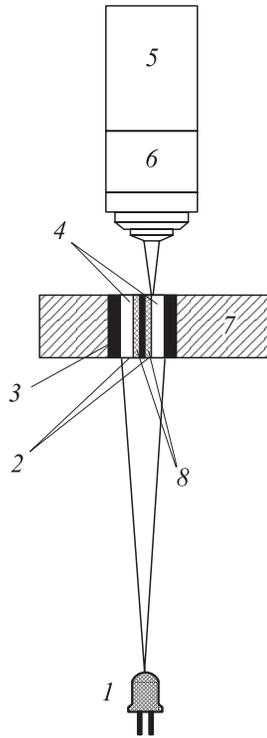


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — светодиод (источник света), 2 — исследуемые чипы, 3 — черный пиццин, 4 — сапфировые подложки, 5 — ПЗС-видеокамера, 6 — микроскоп со снятой окулярной частью, 7 — пластина-кристаллодержатель, 8 — слой GaN светодиодных структур.

был поставлен предварительный эксперимент. В эксперименте использовались два чипа из одной технологической партии, лежащие подложками на стекле и расположенные двумя торцами вплотную друг к другу. На один из чипов посредством зондовых контактов подавалось напряжение питания (активный чип), и он являлся источником света. Свет, выходя из торца активного чипа, входил через торец расположенного рядом с ним второго чипа (пассивный чип), распространяясь в слое GaN как в волноводе. Верхняя и две торцевые поверхности пассивного чипа, перпендикулярные входному торцу, изучались с помощью микроскопа METAM-P1. Наблюдения показали, что поверхности пассивного чипа не светятся, за исключением отдельных точек, в которых нарушается волноводный эффект слоя нитрида галлия. Следовательно, рассеяние света мало или происходит на малые углы, и ослабление света, распространяющегося латерально в слое нитрида галлия, в основном определяется поглощением света в этом слое.

С целью определения латерального коэффициента поглощения света в слое нитрида галлия светодиодного чипа был поставлен эксперимент, схема которого приведена на рис. 1. Источником света являлся светодиод 1 с квантовыми ямами $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}/\text{GaN}$, излучение которого вводилось в два исследуемых чипа 2 перпендикулярно отполированным торцам. Светодиод-источник помещал-

ся на расстоянии не менее 35 мм от торца исследуемого чипа. Это обеспечивало распространение света в слое GaN с отклонением от нормали не более 1.7° . Светодиод-источник был аналогичен исследуемым светодиодным чипам: длина волны в максимуме излучения светодиода ~ 465 нм, ширина спектра излучения на половине высоты 20 нм.

Для предварительной полировки торцов и последующего измерения исследуемые чипы клеивались черным непрозрачным пиццином (3) в прорезь кремниевой пластины-кристаллодержателя (7). Ширина прорези составляла 220 мкм и позволяла одновременно обрабатывать два чипа толщиной ~ 100 мкм, обеспечивая ортогональность торцов к поверхности чипа. Свободное пространство между чипами заполнено пиццином.

Излучение светодиода, прошедшее через образец (чип), регистрировалось с помощью ПЗС-видеокамеры СС8603. Для достижения необходимой разрешающей способности (~ 1 мкм) видеокамера была совмещена с микроскопом METAM-P1 со снятой окулярной частью.

Сравнивая интенсивности света, прошедшего через сапфировую подложку и слой GaN чипа, можно вычислить коэффициент поглощения света в слое GaN при латеральном распространении света по слою.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Фрагмент изображения светящегося торца чипа представлен на рис. 2, а. Неоднородность свечения связана со сложностью полировки поверхности, содержащей слой сапфира, нитрида галлия, пиццина и кремния, различных как по толщине, так и по твердости. При исследовании использовались только оптически качественные участки изображения, с четко видимой границей сапфир-GaN и GaN-пиццин.

Изображение торца чипа подвергалось компьютерной обработке для получения профилей распределения интенсивности света вдоль линий сканирования, перпендикулярных границе сапфир-нитрид галлия. Один из профилей представлен на рис. 2, б.

Из профилей сканирования были получены: I_{GaN} — интенсивность света, прошедшего через нитрид галлия, I_{sap} — интенсивность света, прошедшего через сапфир, I_n — уровень фона. Измерения производились на 13 различных участках поверхности торца.

В качестве физической модели для анализа поглощения света в реальном светодиодном чипе последний рассматривается как двухслойная плоскопараллельная пластинка, состоящая из сапфировой подложки и слоя нитрида галлия и имеющая форму прямоугольного параллелепипеда.

Интенсивность I_k света, прошедшего сквозь сапфировый слой или сквозь слой GaN, при условии нормального падения света на один из отполированных плоскопа-

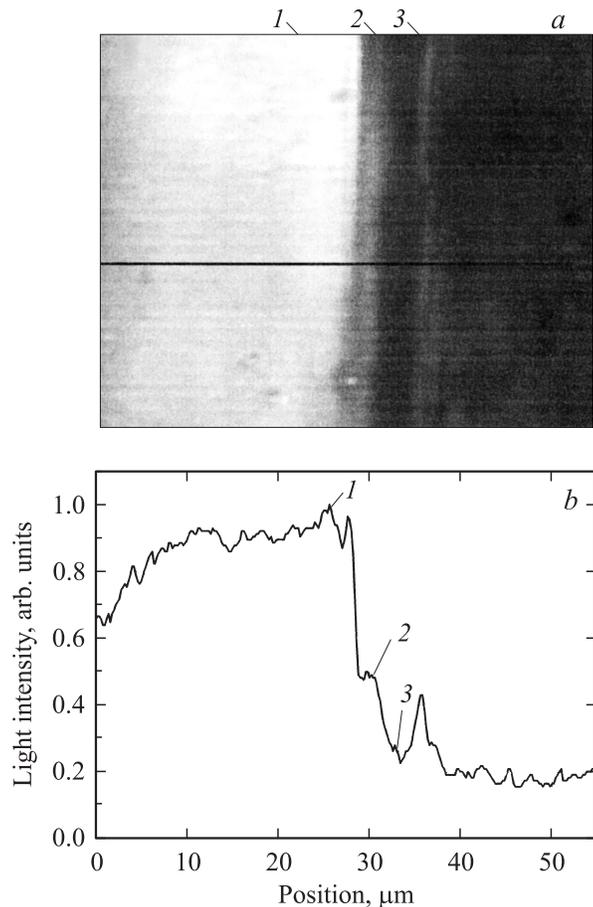


Рис. 2. *a* — фрагмент изображения торца светодиодного чипа: 1 — сапфировая подложка, 2 — слой GaN, 3 — черный пассив; показана одна из линий сканирования. *b* — профиль сканирования интенсивности излучения на торце светодиодного чипа; 1 — I_{sap} , 2 — I_{GaN} , 3 — I_n .

параллельных торцов слоя дается общим выражением

$$I_k = \frac{(1 - R_k)^2 \exp(-\alpha_k d_k)}{1 - R_k^2 \exp(-2\alpha_k d_k)} I_0, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на границу раздела слой–воздух, R_k — коэффициент отражения света на границе слой–воздух, α_k — показатель поглощения света в слое, d_k — длина слоя. Индекс k обозначает сапфир или GaN в зависимости от того, через какой слой рассматривается прохождение света. Использовались значения коэффициентов отражения сапфира $R_{\text{sap}} = 0.079$ и GaN $R_{\text{GaN}} = 0.18$ (справедливы при значениях показателя преломления сапфира и GaN 1.78 [11] и 2.5 [1,12] соответственно), длина слоя GaN $d_{\text{GaN}} = 340$ мкм, коэффициент поглощения сапфира $\alpha_{\text{sap}} = 0.04$ см⁻¹ [13]. Точное значение коэффициента поглощения света в слое GaN α_{GaN} получается при решении системы уравнений (1), однако, как легко показать, для приведенных выше параметров при $\alpha_{\text{GaN}} \gtrsim 9$ см⁻¹ с точностью выше 5% справедлива следующая прибли-

женная формула:

$$\alpha_{\text{GaN}} = \frac{1}{d_{\text{GaN}}} \ln \left[\frac{(I_{\text{sap}} - I_n)(1 - R_{\text{GaN}})^2}{(I_{\text{GaN}} - I_n)(1 - R_{\text{sap}})^2} \right]. \quad (2)$$

При обработке результатов эксперимента по формуле (2) было получено значение латерального показателя поглощения $\alpha_{\text{GaN}} = (23 \pm 3)$ см⁻¹. В использованных в работе чипах содержание основной легирующей примеси (Si), по данным вторично-ионной масс-спектрометрии, составило $N_{\text{Si}} \approx 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Используя значение коэффициента поглощения свободными носителями в инфракрасной области спектра, полученное в работе [2] для такой же концентрации Si в GaN и составляющее для длины волны 2.07 мкм $\alpha_f(2.07 \text{ мкм}) \approx 170$ см⁻¹, а также учитывая, что $\alpha_f \propto \lambda^2$ [14], можно оценить коэффициент поглощения для $\lambda = 465$ нм: $\alpha_f(465 \text{ нм}) \approx 8$ см⁻¹. Для этой длины волны значение коэффициента поглощения 8 см⁻¹, по-видимому, является минимально возможным в слоях с указанным уровнем легирования. Измеренное большее значение коэффициента поглощения может быть связано с примесями (например, кислород) и структурными дефектами. Косвенным подтверждением предположения о связи поглощения в голубой области спектра с кислородом является голубая фотолюминесценция, наблюдаемая в слоях *n*-GaN и обусловленная комплексами кислорода с гидрогенизированными вакансиями галлия [15]. Кроме того, голубая электролюминесценция на пиковой длине волны 430 нм при ширине пика 55 нм наблюдается в *p*-*n*-переходах на основе GaN, содержащих значительное количество кислорода [16]. Пренебрежение поглощением в квантовой яме In_{0.2}Ga_{0.8}N, сделанное выше с учетом малой толщины квантовой ямы по сравнению с толщинами слоев GaN, представляется тем более справедливым, что коэффициент поглощения в активном слое In_{0.2}Ga_{0.8}N на пиковой длине волны излучения света $\lambda = 465$ нм значительно меньше коэффициента поглощения на межзонных переходах, равного $\sim 10^4$ см⁻¹ [17], и составляет, как показывают измерения спектров фототока исследуемых структур [18], $\alpha_{\text{InGa}}(465 \text{ нм}) \approx 250$ см⁻¹.

В то же время величина коэффициента поглощения, определяемая в видимой области спектра плотностью дефектов и примесных комплексов, может меняться по толщине слоя GaN, уменьшаясь в направлении роста эпитаксиальной структуры. Так, в светодиодных структурах с квантовой ямой InGaN/GaN наблюдалось уменьшение плотности структурных дефектов в GaN в направлении роста, изменяющееся на толщине 2.5 мкм от 10^9 до 10^8 см⁻², причем наиболее резкое изменение происходило после выращивания активного слоя InGaN [19]. В предложенной методике используется пучок света, распространяющийся вдоль слоя GaN с угловым отклонением от параллельности не более 1.7°. При неоднородном, уменьшающемся от сапфира к внешней поверхности, распределении поглощающих центров

это может привести к меньшему значению латерального коэффициента поглощения по сравнению с поглощением света, распространяющегося в GaN-волноводе под большими углами.

4. Заключение

В работе предложена методика измерения коэффициента поглощения света, распространяющегося параллельно поверхности светодиода на основе GaN на сапфировой подложке. Метод основан на микроскопическом исследовании излучения, выходящего из торца чипа при освещении противоположного торца аналогичным светодиодом. Коэффициент поглощения вычислялся из отношения интенсивностей излучения, выходящего из торцов сапфира и эпитаксиального слоя. Измеренное значение латерального коэффициента поглощения света для чипов на основе структур $p\text{-GaN}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/n\text{-GaN}$ составило $(23 \pm 3) \text{ см}^{-1}$ на длине волны 465 нм. Предполагается, что уменьшение плотности дефектов и примесных комплексов в направлении роста эпитаксиальной структуры приводит к уменьшению коэффициента поглощения света, распространяющегося параллельно поверхности.

Работа частично поддержана грантом Президента РФ НШ-2951.2008.2

Список литературы

- [1] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E.L. Hu, S.P. DenBaars, S. Nakamura. *Appl. Phys. Lett.*, **84**(6), 855 (2004).
- [2] O. Ambacher, W. Rieger, P. Ansmann, H. Angerer, T.D. Moustakas, M. Stutzmann. *Sol. St. Commun.*, **97**(5), 365 (1996).
- [3] А.Е. Ефремов, Д.В. Тархин, Н.И. Бочкарева, Р.И. Горбунов, Ю.Т. Ребане, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **40**(3), 380 (2006).
- [4] J.F. Muth, J.H. Lee, I.K. Shmagin, R.M. Kolbas. *Appl. Phys. Lett.*, **71**(18), 2572 (1997).
- [5] H. Teisseyre, P. Perlin, T. Suski, I. Grzegory, S. Porowski, J. Jun. *J. Appl. Phys.*, **76**(4), 2429 (1994).
- [6] R. Dingle, D.D. Sell, S.E. Stokowski, M. Ilegems. *Phys. Rev. B*, **4**(4), 1211 (1971).
- [7] A.C. Voccara, D. Fournier, J. Badoz. *Appl. Phys. Lett.*, **36**(2), 130 (1979).
- [8] W.B. Jackson, N.M. Amer, A.C. Voccara, D. Fournier. *Appl. Optics*, **20**(8), 1333 (1981).
- [9] Z. Jiwei, Y. Xi, Z. Liangying. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 3013 (2000).
- [10] Y.T. Rebane, N.I. Bochkareva, V.E. Bougrov, D.V. Tarkhin, Y.G. Shreter, E.A. Girnov, S.I. Stepanov, W.N. Wang, P.T. Chang, P.J. Wang. *Proc. SPIE*, **4996**, 113 (2003).
- [11] B.S. Pafel, Z.H. Zaidi. *Meas. Sci. Technol.*, **10**, 146 (1999).
- [12] Kug-Seung Lee, Eun-Jeong Kang, Seong-Ju Park. *J. Appl. Phys.*, **93**(11), 9383 (2003).
- [13] S. Nakamura, M. Senon, N. Iwasa, S. Nagahama. *Appl. Phys. Lett.*, **70**(11), 1417 (1997).
- [14] H.Y. Fan, W.G. Spitzer, R.J. Collins. *Phys. Rev.*, **101**, 566 (1956).

- [15] M. Toth, K. Fleisher, M.R. Phillips. *Phys. Rev. B*, **59**(3), 1575 (1999).
- [16] S. Nakamura, G. Fasol. *The Blue Laser Diode: GaN Based Light Emitters and Lasers* (Springer, 1998) p. 343.
- [17] В.Ю. Давыдов, А.А. Клочихин. *ФТП*, **38**(8), 897 (2004).
- [18] Н.И. Бочкарева, Д.В. Тархин, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, Ю.С. Леликов, И.А. Мартынов, Ю.Г. Шретер. *ФТП*, **41**(1), 88 (2007).
- [19] K.S. Ramaiah, Y.K. Su, S.J. Chang, C.H. Chen, F.S. Juang, H.P. Liu, I.G. Chen. *Appl. Phys. Lett.*, **85**(3), 401 (2004).

Редактор Л.В. Шаронова

Absorption coefficient measurement of light spreading laterally through LED structures with $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ quantum wells

Y.S. Lelikov, N.I. Bochkareva, R.I. Gorbunov, I.A. Martynov, Y.T. Rebane, D.V. Tarkin, Y.G. Shreter

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The method for determining the absorption coefficient of light propagating in parallel direction to the surface of GaN-based light-emitting diode chip on the sapphire substrate is suggested. The method is based on microscopic investigation of light intensity from the side face of the chip whereas the opposite side face is lighting with light-emitting diode. The absorption coefficient is calculated from the ratio of light intensities from sapphire and epitaxial layer side faces. A lateral light absorption coefficient of $(23 \pm 3) \text{ cm}^{-1}$ at the wavelength of 465 nm has been obtained from the measurements of chips based on $p\text{-GaN}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/n\text{-GaN}$ structures. The possible reasons for difference between values of the absorption coefficient obtained and published in the literature are analyzed.