

Определение коэффициента ослабления света в тонких слоях светодиодных структур

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

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
194251 Санкт-Петербург, Россия

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

(Получена 29 августа 2005 г. Принята к печати 12 сентября 2005 г.)

Предложена методика определения коэффициента ослабления света в тонком GaN-слое на основе измерений интенсивности электролюминесценции вдоль и поперек слоя. Получена величина коэффициента ослабления света $90 \pm 15 \text{ см}^{-1}$ в GaN-слое светодиодной InGaN-структуры.

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

1. Введение

Исследованию голубых светодиодов на основе InGaN посвящено большое количество публикаций [1,2]. Однако ряд вопросов остается нерешенным, в том числе вопрос об увеличении выхода света из светодиодов. В связи с этим представляет интерес определение коэффициента ослабления света (α), генерируемого в этих структурах.

Под коэффициентом ослабления подразумевается суммарный коэффициент поглощения и рассеяния света. На данный момент нет ясности, какая доля световых потерь внутри материала приходится на рассеяние, а какая на поглощение света. В ряде работ говорится только о коэффициенте поглощения света внутри слоя GaN. Однако с учетом большого количества дефектов в пленках GaN, рассеяние света также может давать существенный вклад в общие потери света в светодиоде.

Так, в работе [3] методом фототоков в диапазоне длин волн 403–433 нм исследовался коэффициент поглощения InGaN/GaN-структуры. По результатам измерений, коэффициент поглощения света рассчитывается на основании двух моделей. В первой модели считалось, что основным механизмом потерь является рассеяние, а во второй — поглощение света внутри слоя GaN. Значения коэффициента поглощения света, полученные в этой работе, составили 4 см^{-1} для модели поглощения и 7 см^{-1} для модели рассеяния света. В работе также отмечается, что коэффициент поглощения света в данном диапазоне длин волн постоянен.

В работе [4] исследовалось поглощение в тонких пленках GaN, выращенных на сапфировых подложках, в диапазоне энергий фотонов 0.6–3.8 эВ. Согласно этой работе, коэффициент поглощения света на длине волны 465 нм составляет $\sim 40 \text{ см}^{-1}$.

В работе [5] исследовались InGaN/GaN-лазерные диоды, излучающие на длине волны $\sim 407 \text{ нм}$, и рассчитанное значение коэффициента ослабления света составило 54 см^{-1} .

В работе [6] приводятся рассчитанные значения коэффициента поглощения в пленке GaN на основе экспе-

риментов по пропусканию света. Полученное значение коэффициента поглощения света с длиной волны 465 нм равнялось $\sim 150 \text{ нм}^{-1}$. Помимо описанных работ различные значения коэффициентов поглощения и методики их измерения можно найти в работах [7,8].

Как видно, имеется сильный разброс значений коэффициента ослабления, определенных в различных работах. Стоит отметить, что приведенные в работах методики измерений достаточно трудоемки или требуют специального оборудования.

Нами разработана простая методика определения коэффициента ослабления света в тонких слоях светодиодных структур на основе измерения интенсивности света вдоль и поперек слоя. Определен коэффициент ослабления света для исследуемой светодиодной структуры.

2. Методика эксперимента

В работе исследовались неупакованные светодиодные структуры с InGaN/GaN-квантовой ямой шириной 30 Å, выращенные методом MOCVD на сапфировых подложках и люминесцирующие на длине волны 465 нм. Детали

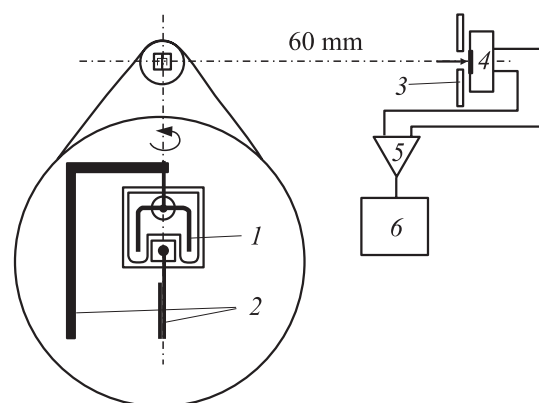


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — светодиодная структура, 2 — контактные распорки, 3 — диафрагма диаметром 1.8 мм, 4 — кремниевый фотодиод, 5 — усилитель, 6 — графопостроитель.

[¶] E-mail: eartm@mail.ru

структуры приведены в [9]. Размеры светодиодной структуры 340×340 мкм. К контактам светодиодной структуры, как показано на рис. 1, приваривались золотые проволочки диаметром $d = 20$ мкм. На этих проволочках структура закреплялась в подвешенном состоянии на контактных распорках и прикреплялась к синхронному двигателю таким образом, чтобы ось симметрии светодиодной структуры совпадала с осью вращения двигателя (рис. 1). При таком способе монтажа светодиодная структура подвешена в воздухе и лишена основного канала отвода тепла через кристаллодержатель. Для уменьшения влияния саморазогрева структуры измерения проводились на рабочем токе 4 мА. В качестве фотоприемника использовался кремниевый фотодиод (ФДУК-2У) с чувствительностью 0.2 А/Вт при длине волны $\lambda = 465$ нм и с диафрагмой диаметром 1.8 мм. Фотоприемник помещался на расстоянии 60 мм от исследуемого светодиода, что обеспечивало угловое разрешение 1.8° . Сигнал с фотоприемника через усилитель постоянного тока (Ф116/2) подавался на графопостроитель.

3. Результаты измерений

Из обзора литературы видно, что значение коэффициента ослабления имеет сильный разброс значений в пределах от 4 до 150 см^{-1} . Цель эксперимента состояла в определении коэффициента ослабления для генерируемого в светодиодной структуре света. Идея эксперимента основана на том, что свет при выходе из светодиодной структуры в разных направлениях проходит различное расстояние внутри светодиодной структуры. При выходе по нормали к активному слою через переднюю поверхность, свет проходит через слой p -GaN толщиной всего 250 нм, в то время как при прохождении света вдоль структуры по нормали к торцу расстояние, преодолеваемое светом, значительно больше. Основываясь на этом рассуждении, была поставлена задача в измерении интенсивности света, вышедшего по нормали к верхней поверхности и к торцу InGaN/GaN-светодиодной структуры, и на основании полученных данных рассчитать коэффициент ослабления света. В целях увеличения точности измерений снималось полное 4π -угловое распределение интенсивности света, из которого впоследствии брались искомые значения.

Результаты измерений угловой зависимости интенсивности электролюминесценции приведены на рис. 2.

Форма кривой, изображенной на рис. 2, легко объяснима. Вверх через слой p -GaN света выходит меньше, чем вниз через сапфир, так как сказывается поглощение света в полупрозрачных и усиленных контактах, нанесенных поверх GaN-слоя. Уменьшение интенсивности света к торцам структуры объясняется поглощением и рассеянием света при прохождении внутри GaN-слоя. Также стоит отметить, что торцы отдельных светодиодных структур имеют сколы и неровности различных размеров, возникающие при технологическом скайбировании исследуемых структур. Нами была произведена

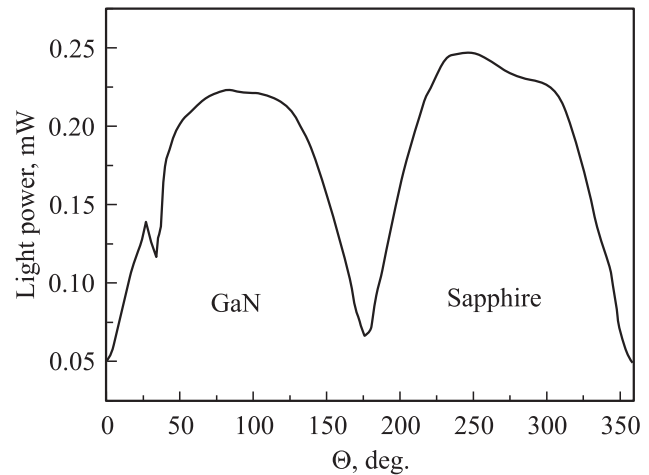


Рис. 2. Экспериментальная зависимость интенсивности выхода света из светодиодной структуры от угла Θ .

визуальная выборка среди сотни образцов с целью выбора структуры с торцами, наиболее приближенными к правильной прямоугольной форме. Несмотря на выборку, присутствие небольшой асимметрии в распределении света со стороны сапфира обусловлено небольшими сколами и неровностями торцов исследуемой структуры. Влиянием сколов также объясняется различие интенсивностей выхода света через противоположные торцы исследуемой светодиодной структуры. Небольшой провал при $\Theta \approx 30^\circ$ определяется тенью от контактной распорки (рис. 1), к которой крепится светодиодная структура.

4. Обсуждение результатов

Рассмотрим упрощенную двумерную модель светодиодной структуры, состоящей из сапфировой подложки толщиной 100 мкм, слоя GaN толщиной 2.5 мкм со встроенным тонким активным слоем и полупрозрачного металлического контакта (рис. 3). Считаем, что сечение светодиодной структуры имеет идеальную прямоугольную форму. Генерация света происходит в активном слое, находящемся в 250 нм от верхней границы GaN.

Предполагая, что дырки находятся на дне основной подзоны в квантовой яме, и используя правила отбора для межзонных переходов [10], можно положить, что $3/4$ генерируемого света имеет ТЕ-поляризацию и сферическую диаграмму направленности, а $1/4$ генерируемого света имеет ТМ-поляризацию и следующую функцию распределения по углу:

$$I_{\text{ТМ}} = \frac{3}{16\pi} \cos^2 \Theta. \quad (1)$$

Угол Θ отсчитывается от нормали к активному слою, направления $\Theta = 90$ и 270° параллельны активному слою. Таким образом, поперек слоя распространяется свет с ТМ- и ТЕ-поляризациями и интенсивностью I_0 , а вдоль слоя только свет с ТЕ-поляризацией и интенсивностью $0.75 I_0$.

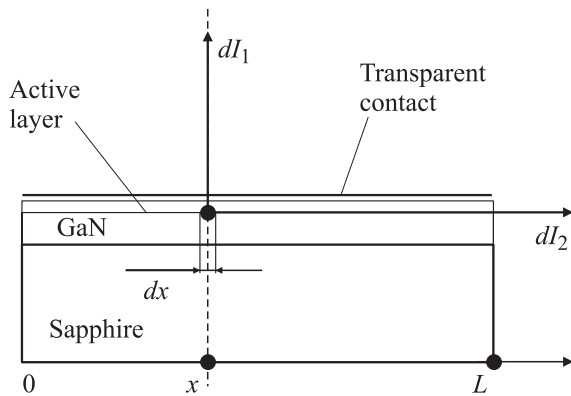


Рис. 3. Двумерная модель светодиодной структуры.

Пусть I_0 — поток излучения, приходящийся на бесконечно малый телесный угол, генерируемый в элементе dx активного слоя. Ограничимся рассмотрением двух потоков излучения I_1 и I_2 , выходящих по нормали через верхнюю и боковую поверхности нашей модели соответственно.

Пусть dI_1 — поток излучения, выходящий в единичном телесном угле по нормали через верхнюю поверхность. На своем пути dI_1 проходит через тонкий слой GaN, границу GaN с полупрозрачным металлическим контактом, которая имеет коэффициент отражения R , и сам полупрозрачный металлический контакт с коэффициентом пропускания κ . В силу малой толщины полупрозрачного контакта будем считать, что коэффициент отражения определяется отражением от границы GaN–воздух. Тогда для потока излучения dI_1 можно записать следующее выражение:

$$dI_1 = I_0(1 - R)\kappa \left(\frac{n_{\text{GaN}}}{n_{\text{air}}} \right)^{-2} dx. \quad (2)$$

В этом выражении мы пренебрегли ослаблением света в слое GaN в силу малой толщины слоя. Множитель $(n_{\text{GaN}}/n_{\text{air}})^2$ вводится как коэффициент пропорциональности между телесными углами выхода света в слое GaN и на воздухе. Поток I_1 , выходящий по нормали через верхнюю поверхность, находится интегрированием по длине структуры от $x = 0$ до $x = L$, где L — длина структуры. Итоговое выражение выглядит следующим образом:

$$I_1 = I_0(1 - R)\kappa \left(\frac{n_{\text{GaN}}}{n_{\text{air}}} \right)^{-2} L. \quad (3)$$

Поток излучения I_2 на своем пути проходит вдоль слоя GaN и через границу GaN — воздух. Выделим участок dx (рис. 3), из которого в направлении по нормали к боковой поверхности в единичном телесном угле генерируется поток света I_0 . Учитывая ослабление света при прохождении расстояния $(L - x)$ вдоль слоя GaN до боковой стенки структуры, а также отражение на границе GaN — воздух, можно записать следующее

выражение:

$$dI_2 = 0.75I_0 \exp(-\alpha(L - x))(1 - R) \left(\frac{n_{\text{GaN}}}{n_{\text{air}}} \right)^{-2} dx. \quad (4)$$

Числовой коэффициент указывает на то, что в направлении по нормали к боковой поверхности свет распространяется только с ТЕ-поляризацией. Тогда выход излучения I_2 через боковую поверхность структуры находится интегрированием выражения (4) с пределами интегрирования от 0 до L . Итоговое выражение для I_2 выглядит следующим образом:

$$I_2 = 0.75I_0(1 - \exp(-\alpha L))(1 - R) \left(\frac{n_{\text{GaN}}}{n_{\text{air}}} \right)^{-2} \alpha^{-1}. \quad (5)$$

Далее запишем отношение I_2/I_1 :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{0.75(1 - \exp(-\alpha L))}{\kappa \alpha L}. \quad (6)$$

Полученное выражение является функцией коэффициента ослабления света. Строго говоря, этот коэффициент ослабления определен для света, распространяющегося вдоль слоя светодиодной структуры. В принципе, коэффициент ослабления света поперек слоя может отличаться от коэффициента ослабления вдоль слоя, например, из-за анизотропии в распределении дислокаций.

Рассмотрим два предельных случая слабого ($\alpha L \ll 1$) и сильного ($\alpha L \gg 1$) ослабления. В случае $\alpha L \ll 1$ из (6) следует, что отношение потоков $I_2/I_1 = 0.75/\kappa$. Это значит, что при малом ослаблении света для рассмотрения в дальнем поле без учета поляризации и поглощения света в полупрозрачном металлическом контактном слое потоки I_1 и I_2 должны быть равны. В случае $\alpha L \gg 1$ отношение $I_2/I_1 = 0$, что означает отсутствие выходящего через боковую поверхность света.

Несложно заметить, что полученное выражение применимо и для аналогичной трехмерной модели. Теоретическая зависимость I_2/I_1 , рассчитанная по формуле (6),

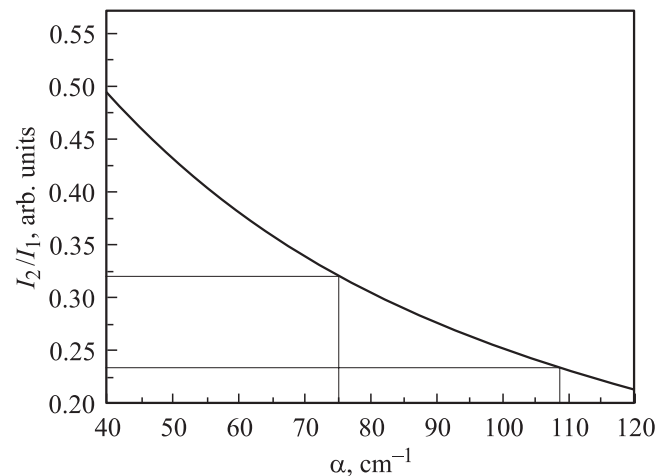


Рис. 4. Теоретическая зависимость I_2/I_1 от коэффициента ослабления света, рассчитанная по формуле (6).

представлена на рис. 4. Длина структуры в нашем случае равнялась 340 мкм. Значение для коэффициента пропускания света в полупрозрачном металлическом контакте светодиода было измерено и составило 0.81.

Данное выражение может быть применено для определения коэффициента ослабления реальной структуры при условии оценки неточностей, допущенных при его получении.

В полученном выражении не учтено многократное отражение от границ структуры, которое в действительности имеет место. По нашим оценкам, оно существенно не влияет на выход света, так как большая часть отраженного света поглощается и рассеивается в слое GaN. Также стоит отметить, что в эксперименте интенсивность измерялась в телесном угле с углом при вершине 1.8° . По нашим оценкам, это приводит к погрешности в несколько процентов. В модели также не учтено наличие контактной сетки (усиленных контактов), однако в исследуемых нами образцах под контактами генерация света отсутствовала, и, следовательно, наличие усиленных контактов не вносило погрешности в наш эксперимент. Наличие сколов и неровностей, имеющих место на торцах реальных структур, также вносило погрешность в исходные данные. Исходя из набранной статистики эксперимента данная погрешность может быть в пределах 10–15%. Учитывая вышеописанное, выражение (6) применимо для оценки коэффициента ослабления света реальной светодиодной структуры, исследуемой в нашем эксперименте, с допустимой погрешностью.

Отношение I_2/I_1 определяется из эксперимента. Как уже отмечалось выше, несмотря на визуальную выборку, наличие сколов и неровностей привело к различию в интенсивностях света, выходящих через противоположные торцы исследуемого образца, и вследствие этого к двум различным значениям отношения I_2/I_1 . В нашем случае эти значения лежат в пределах 0.23–0.32. Из этого следует, что коэффициент ослабления для света с длиной волны 465 нм, распространяющегося вдоль слоя исследуемой светодиодной структуры, равен $90 \pm 15 \text{ см}^{-1}$. Полученное значение лежит в пределах значений, приведенных в работах [3–6]. Стоит добавить, что погрешность эксперимента, возникающая из-за сколов и неровностей, может быть полностью устранена полировкой торцов. В этом случае точность представленного выше метода значительно увеличивается.

5. Заключение

В данной работе описана методика определения коэффициента ослабления света в светодиодной структуре на основе измерений интенсивности электролюминесценции вдоль и поперек слоя. Измеренный коэффициент ослабления света на длине волны 465 нм в GaN-слое InGaN/GaN-структуры составил $90 \pm 15 \text{ см}^{-1}$.

Работа частично поддержана грантом Президента РФ НШ-2223.2003.2.

Список литературы

- [1] S. Nakamura, S.F. Chichibu. *Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes* (N.Y., Taylor & Francis, 2000).
- [2] H. Morkoc. *Nitride Semiconductors and Devices* [Springer Ser. Mater. Sci., 32] (Springer, Berlin, 1999).
- [3] S. Schad, B. Neubert, C. Eichler, M. Scherer, F. Habel, M. Seyboth, F. Scholz, D. Hofstetter, P. Unger, W. Schmid, C. Kamutsch, K. Streubel. *J. Lightwave Technol.*, **22**, 2323 (2004).
- [4] O. Ambacher, W. Rieger, P. Ansmann, H. Angerer, T.D. Moustakas, M. Stutzman. *Sol. St. Commun.*, **97** (5), 365 (1996).
- [5] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1568 (1996).
- [6] D. Brunner, H. Angerer, E. Bustarret, F. Freudenberg, R. Hopler, R. Dimitrov, O. Ambacher, M. Stutzmann. *J. Appl. Phys.*, **82**, 5090 (1997).
- [7] J.F. Muth, J.H. Lee, I.K. Shmagin, R.M. Kolbas, H.C. Casey, jr., B.P. Keller, U.K. Mishra, H. Amano, N. Watanabe, N. Koide, I. Akasaki. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2572 (1997).
- [8] H. Amano, N. Watanabe, N. Koide, I. Akasaki. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32**, L1000 (1993).
- [9] 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).
- [10] Л.Е. Воробьев, Л.Е. Голуб, С.Н. Данилов, Е.Л. Ивченко, Д.А. Фирсов, В.А. Шальгин. *Оптические явления в полупроводниковых квантово-размерных структурах* (СПб., изд-во СПбГТУ, 2000).

Редактор Л.В. Беляков

Determination of the optical loss coefficient in thin layers of light-emitting diodes

A.A. Efremov*, D.V. Tarkhin, N.I. Bochkareva, R.I. Gorbunov, Y.T. Rebane, Y.G. Shreter

* St. Petersburg State Polytechnical University, 194251 St. Petersburg, Russia
 loffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The technique for determination of optical loss coefficient in thin layers of light-emitting structures has been developed. The technique based on measurements of the light intensity along and across to the layer. The coefficient of optical loss $90 \pm 15 \text{ cm}^{-1}$ has been measured in GaN-layer of light-emitting structure.