

Расчет оптимальной конфигурации двухслойной пленки ITO для использования в составе отражающих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов

© А.С. Павлюченко[¶], Л.К. Марков, И.П. Смирнова, Д.А. Закгейм

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

(Получена 13 ноября 2014 г. Принята к печати 25 ноября 2014 г.)

В работе с использованием модели, основанной на применении метода матриц переноса, рассчитывалось отражение от многослойных покрытий, используемых в составе контактов в AlInGaN-светодиодах. Рассмотрены композиции ITO/SiO₂/Ag, в которых пленка ITO состояла из двух слоев с разными значениями показателя преломления. Толщины слоев материала ITO варьировались в заданном диапазоне. Рассчитывались угловые зависимости коэффициента отражения света обеих поляризаций, на основе которых была получена интегральная отражательная способность контакта. Проанализированы зависимости интегральной отражательной способности контакта и коэффициента отражения света при его падении по нормали к плоскости контакта от толщин слоев ITO. В результате предложена оптимизированная конфигурация отражающего контакта к области *p*-GaN светодиодных кристаллов на основе AlInGaN.

1. Введение

Применение прозрачных проводящих оксидов, в первую очередь оксида индия и олова (ITO), в технологии создания контактов для высокоэффективных светодиодов на основе AlInGaN-гетероструктур обеспечивает существенный прирост квантового выхода светодиодов и в последнее время стало одним из основных технологических приемов в их производстве (см., например, обзор [1]). При этом известно, что оптические, электрические и структурные особенности получаемых пленок существенным образом определяются технологией их нанесения. Так, например, склонность материала, получаемого электронно-лучевым напылением, к образованию кристаллитов вытянутой нитевидной формы позволила авторам работ [2,3] получить пленки меньшей плотности, характеризующиеся пониженными значениями показателя преломления *n*. С этой целью был применен метод напыления на наклонно расположенную подложку. Положительный эффект от применения пленок ITO с пониженным показателем преломления может быть получен при использовании их в составе контакта к области *p*-GaN светодиодов флип-чип конструкции, в которых свет отражается от контакта и выводится из кристалла через прозрачную подложку [4,5]. Увеличение контраста показателей преломления на границе между материалом GaN, показатель преломления которого относительно высок ($n = 2.4\text{--}2.5$ согласно [6,7]), и материалом контакта может обеспечивать дополнительный вклад в интегральное отражение контакта, поскольку при больших углах падения света на плоскость контакта реализуются условия, необходимые для полного внутреннего отражения света (ПВО). Подобный подход к увеличению отражающей способности кристалла рассматривается в патен-

те [8], где рассматриваются системы GaN/SiO₂/металл и GaN/воздух/металл.

Отражение света в контакте обеспечивается применением металлов с высоким коэффициентом отражения в диапазоне длин волн собственного излучения кристалла. Это, как правило, алюминий или серебро [9]. Поскольку создание отражающих покрытий непосредственно на поверхности пленок ITO не представляется возможным, слой металла отделяется от проводящего элемента слоем изолятора (в большинстве случаев SiO₂). В патенте [10] обсуждаются возможные варианты конструкции кристаллов с контактами, в которых отражающий элемент отделен от прозрачного проводящего слоя пленкой диэлектрика.

Использование слоев ITO в составе отражающего контакта к области *p*-GaN предъявляет ряд требований к качеству материала и соответственно к технологии его получения. Помимо максимальных прозрачности и электрической проводимости необходимо достичь минимальных значений контактных сопротивлений к *p*-GaN. Структура и морфология поверхности получаемых пленок должны обеспечивать возможность создания эффективно отражающих элементов на их основе. Следует также учитывать возможность деградации *p*-области светодиодной гетероструктуры при воздействии на нее частиц с высокой энергией [11–14] и избегать соответствующих методов напыления на начальной стадии формирования пленок.

В работе [15] нами был предложен метод получения комбинированных пленок ITO, суть которого заключалась в том, что на открытую поверхность области *p*-GaN гетероструктуры электронно-лучевым испарением наносился тонкий (10 нм) слой ITO, а затем поверх него методом магнетронного распыления формировалась основная пленка того же материала (толщиной 190 нм). Первый слой характеризовался меньшими значениями показателя преломления ($n = 1.3$) и удельной элек-

[¶] E-mail: alexey.pavluchenko@gmail.com

трической проводимости и использовался для защиты поверхности *p*-GaN от негативного воздействия плазмы, поэтому в дальнейшем будем условно называть его защитным. Второй слой имел показатель преломления $n = 2.04$ и удельную проводимость, в несколько раз превышающую удельную проводимость первого слоя, поэтому в дальнейшем будем так же условно называть его токопроводящим. Предложенная технология получения двухслойных пленок ITO позволяет получить покрытия с оптимизированными электрооптическими характеристиками на поверхности *p*-GaN.

В работе [16] было показано, что комбинированные пленки ITO, полученные по вышеупомянутой технологии, могут быть применены в составе многослойного отражающего контакта флип-чип светодиодов, поскольку коэффициент отражения изготовленного на их основе покрытия ITO(10 нм+190 нм)/SiO₂(420 нм)/Ag(250 нм) достигает значения 90% при нормальном падении света. В указанной работе методом матриц переноса [17] были рассчитаны спектры пропускания образца, состоящего из исследуемого покрытия, нанесенного на стеклянную подложку. Хорошее согласие расчетной кривой с экспериментальными данными (при одновременном совпадении показателя преломления, использовавшегося в качестве параметра расчета, с данными проведенных эллипсометрических измерений) дает основание применить используемую модель и ее параметры в процессе поиска оптимальной конфигурации отражающего контакта. Следует также учитывать, что в реальном светодиодном кристалле свет падает на контакт под разными углами. Поэтому модель должна учитывать угловую зависимость коэффициента отражения, которая в случае многослойных пленок имеет нетривиальный характер. В настоящей статье, опираясь на результаты работ [15,16], мы варьируем толщины защитного и токопроводящего слоев с целью нахождения оптимальных оптических характеристик контакта.

2. Результаты и их обсуждение

Для выполнения поставленной задачи были проведены расчеты коэффициента отражения многослойных пленок при разных углах падения света. Расчеты проводились в приближении плоскопараллельных слоев методом матриц переноса. На рис. 1 приведено схематическое изображение изучаемого нами контакта. В модели источник излучения предполагался изотропным (длина волны излучения в вакууме $\lambda = 450$ нм), расположенным в материале GaN, показатель преломления которого был выбран равным $n = 2.49$. В рамках данной работы исследовалось интегральное отражение контактом света, распространяющегося от источника. Контакт представлял собой многослойную пленку, образованную слоями материалов с известными величинами комплексных показателей преломления. Изучалось только излучение источника, выходящее в сторону контакта. Толщины

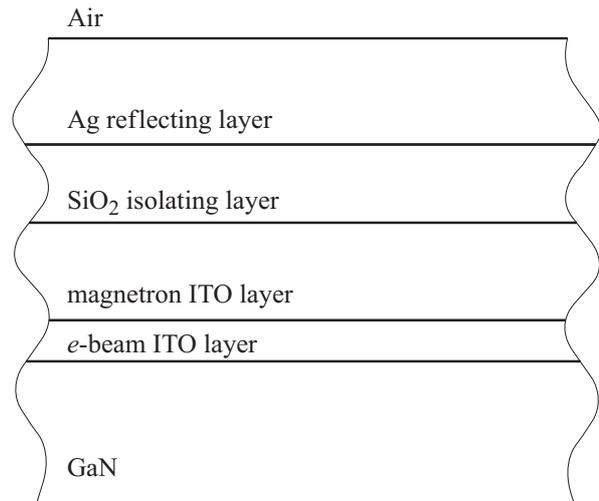


Рис. 1. Схема расположения слоев многослойного отражающего контакта.

защитного и токопроводящего слоев варьировались в пределах 0–200 нм и 100–300 нм соответственно. Толщина изолирующего слоя SiO₂ была зафиксирована на значении 360 нм.

Очевидно, что в реальном светодиодном кристалле вследствие высокого значения показателя преломления материала GaN свет оказывается запертым в волноводе, состоящем из эпитаксиальных слоев, и может распространяться в нем, испытывая многократные отражения. Указанные соображения могут внести диспропорцию в угловое распределение реально падающего на контакт света (с учетом отражения от противоположной поверхности). Кроме того, для оценки внешнего квантового выхода кристалла необходимо оценивать поглощение лучей различного направления в кристалле конкретной конструкции. Однако в последнее время большинством производителей эффективных светодиодов используются ростовые подложки с заранее сформированной профилированной поверхностью, что позволяет существенно снизить потери, связанные с многократным отражением света в кристалле. Указанное соображение дает возможность использовать в роли оценочного параметра качества контакта его интегральную отражательную способность для изотропного излучения.

Расчет отражения для многослойных пленок показывает наличие в угловой зависимости интерференционных минимумов и максимумов, положение которых определяется толщинами отдельных слоев пленки. На рис. 2 представлена расчетная угловая зависимость коэффициента отражения для одного из вариантов исполнения многослойной пленки ITO(25 нм+190 нм)/SiO₂(360 нм)/Ag(250 нм).

Как отмечалось выше, применение пленок ITO, полученных методом электронно-лучевого напыления, представляет возможность создания высокого контраста показателей преломления на границе с GaN, что может

обеспечить дополнительный вклад в интегральную отражательную способность контакта за счет эффекта ПВО. Однако для наблюдения классического эффекта ПВО необходима пленка достаточной толщины, поскольку характер взаимодействия излучения с границей раздела сред в случае условно бесконечных сред и в случае тонких пленок различен и определяется толщиной пленки. Так, например, по данным работы [8], выраженный эффект ПВО на границе раздела GaN/SiO₂ начинается с толщин пленок SiO₂, превосходящих половину длины волны излучения в материале SiO₂ (рассматривалось поведение системы GaN/SiO₂/Al).

Толщина защитного слоя ИТО с малым показателем преломления, использованного нами в работах [15,16], составляла 10 нм, что недостаточно для наблюдения эффекта ПВО. Тем не менее интересным становится

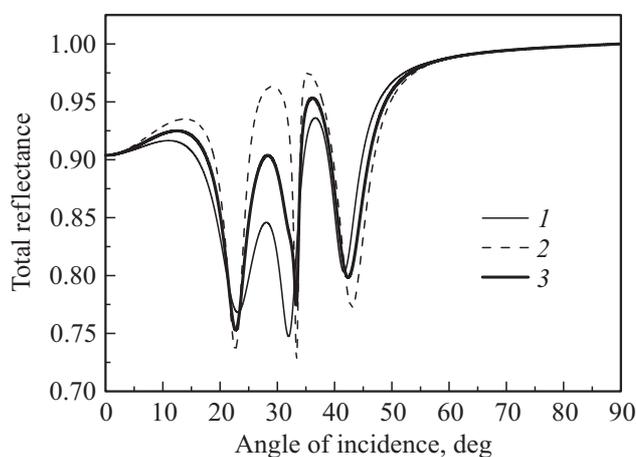


Рис. 2. Расчетные угловые зависимости коэффициента отражения многослойной пленки ИТО(25 нм+190 нм)/SiO₂(360 нм)/Ag(250 нм) на подложке GaN: 1 — *p*-поляризация, 2 — *s*-поляризация, 3 — неполяризованное излучение.

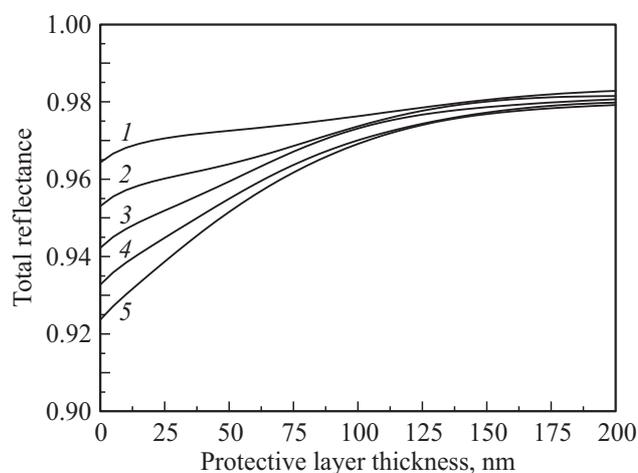


Рис. 3. Зависимости интегральной отражательной способности контакта от толщины защитного слоя при различных толщинах токопроводящего слоя, нм: 1 — 100, 2 — 150, 3 — 200, 4 — 250, 5 — 300 нм.

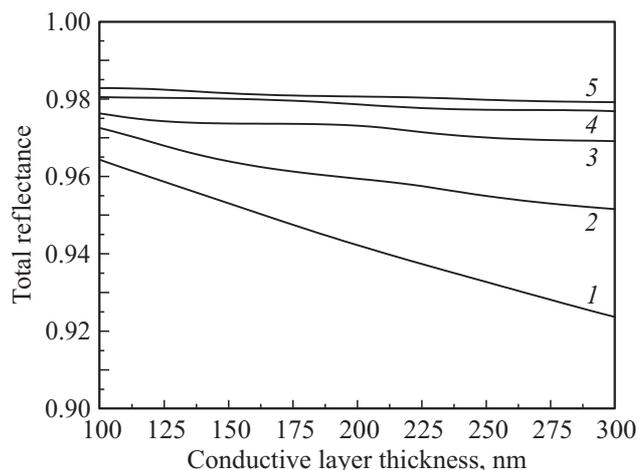


Рис. 4. Зависимости интегральной отражательной способности контакта от толщины токопроводящего слоя при различных толщинах защитного слоя, нм: 1 — 0 (без защитного слоя), 2 — 50, 3 — 100, 4 — 150, 5 — 200.

проследить зависимость интегральной отражательной способности контакта от толщины этого слоя. Результаты расчета приведены на рис. 3, где изображены зависимости интегральной отражательной способности контакта от толщины защитного слоя при различных толщинах токопроводящего слоя, полученного магнетронным напылением. Как видно из рис. 3, в диапазоне толщин 0–200 нм зависимость имеет монотонный характер, незначительно возрастающая по мере увеличения толщины защитного слоя с малым показателем преломления. Поэтому для получения максимального отражения от контакта целесообразно увеличивать толщину защитного слоя. Ограничением здесь могут стать проблемы технологического характера: например, при определенных значениях толщины пленки электронно-лучевого напыления может проявиться рельеф, способствующий появлению центров поглощения, как это наблюдалось в [16].

Поскольку отражение света от многослойных покрытий имеет сложный характер, с целью достижения максимальных его значений необходимо смоделировать различные сочетания толщин обоих слоев. На рис. 4 приведены зависимости отражения контакта от толщины токопроводящего слоя при различных толщинах защитного слоя. Как видно из рис. 4, величина интегральной отражательной способности снижается по мере увеличения толщины токопроводящего слоя ИТО. Такое снижение обусловлено поглощением света в слое. Расчеты показывают, что наличие токопроводящего слоя снижает отражательную способность многослойного контакта, однако его наличие необходимо для обеспечения более однородного растекания тока по *p*-контакту светодиода, а также формирования гладкой поверхности, пригодной для напыления отражающего металлического слоя.

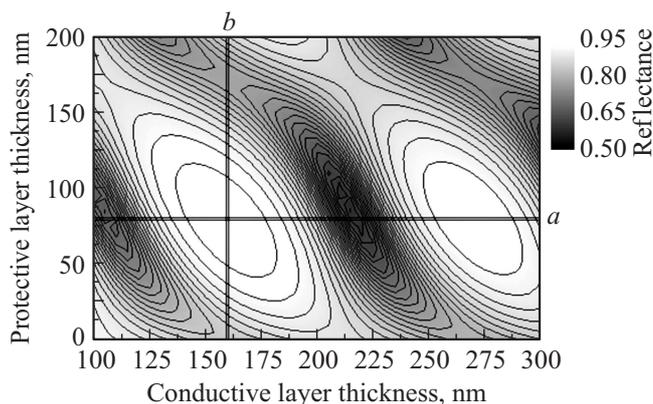


Рис. 5. Контурная диаграмма зависимости коэффициента отражения контакта от толщин защитного и токопроводящего слоев ИТО при нормальном падении излучения на контакт.

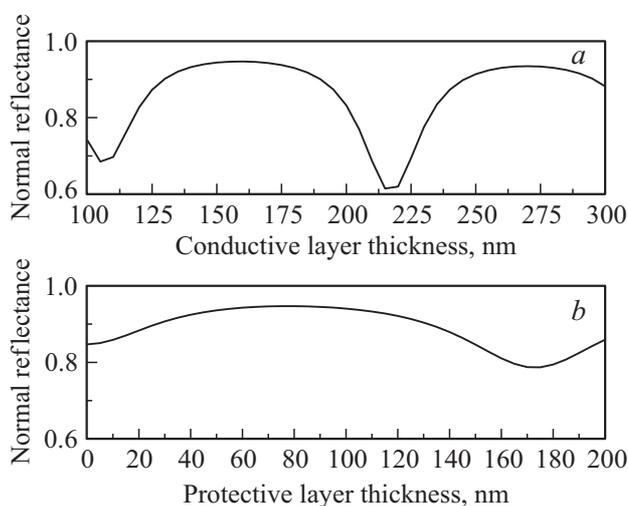


Рис. 6. Профили диаграммы зависимости от толщин слоев коэффициента отражения контакта по линиям *a, b* на рис. 5 при фиксированных значениях толщин защитного слоя 80 нм (*a*) и токопроводящего слоя 160 нм (*b*).

Подчеркнем еще раз: выше мы исходили из предположения, что оценка интегрального отражения контакта хорошо коррелирует с величиной внешнего квантового выхода светодиода. В то же время в силу различных конструктивных особенностей кристалла вклад лучей различного направления может быть различен. Так, вероятность выхода для лучей с малыми углами падения оказывается выше, чем для лучей с большими углами падения. Рассмотрим возможности использования конструктивной интерференции для лучей, нормальных к плоскости контакта. На рис. 5 приведена контурная диаграмма зависимости коэффициента отражения контакта от толщин защитного и токопроводящего слоев ИТО при нормальном падении излучения на контакт. Профили диаграммы при фиксированных толщинах защитного (80 нм) и токопроводящего (160 нм) слоев показаны на рис. 6. Из рисунков видно, что в исследованном

диапазоне толщин слоев наблюдаются два максимума. Наибольшее значение коэффициента отражения контакта достигается при значениях толщин защитного и прозрачного токопроводящего слоев 80 и 160 нм соответственно.

Как видно из рис. 6, полученная зависимость более чувствительна к изменению толщин слоев в исследованном диапазоне, чем зависимость интегральной отражательной способности контакта (рис. 3, 4). Поэтому с учетом большей вероятности выхода лучей нормального и близких к нему направлений можно считать толщины, соответствующие максимуму коэффициента отражения при нормальном к плоскости контакта падении света, оптимальными, особенно в кристаллах, выращенных на непрофилированных подложках.

3. Заключение

Таким образом, моделирование оптических свойств контактов к *p*-GaN на основе композиции ИТО/SiO₂/Ag, где пленка ИТО получена комбинированным методом и состоит из слоя с меньшим показателем преломления, поверх которого нанесен слой с более высоким значением показателя преломления, показывает, что интегральная отражательная способность контакта имеет тенденцию к монотонному незначительному росту с увеличением толщины первого и уменьшением толщины второго слоев. Толщины слоев варьировались в диапазоне 0–200 и 100–300 нм для первого и второго слоев соответственно. В то же время зависимость коэффициента отражения контакта в направлении, нормальном к плоскости контакта, обнаруживает явно выраженный максимум при толщинах слоев 80 и 160 нм соответственно для первого и второго слоев. Указанные величины можно считать оптимальными для использования в светоизлучающих кристаллах флип-чип конструкции.

Список литературы

- [1] Huiyong Liu, V. Avrutin, N. Izyumskaya, Ü. Özgür, H. Morkoç. *Superlat. Microstr.*, **48**, 458 (2010).
- [2] J.K. Kim, T. Gessmann, E.F. Schubert, J.-Q. Xi, H. Luo, J. Cho, C. Sone, Y. Park. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 013 501 (2006).
- [3] J.K. Kim, S. Chhajed, M.F. Schubert, E.F. Schubert, A.J. Fischer, M.H. Crawford, J. Cho, H. Kim, C. Sone. *Advanced Mater.*, **20**, 801 (2008).
- [4] J.J. Wierer, D.A. Steigerwald, M.R. Krames, J.J. O'Shea, M.J. Ludowise, G. Christenson, Y.C. Shen, C. Lowery, P.S. Martin, S. Subramanya, W. Gotz, N.F. Gardner, R.S. Kern, S.A. Stockman. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3379 (2001).
- [5] Д.А. Закгейм, И.П. Смирнова, И.В. Рожанский, С.А. Гуревич, М.М. Кулагина, Е.М. Аракчеева, Г.А. Онушкин, А.Л. Закгейм, Е.Д. Васильева, Г.В. Иткинсон. *ФТП*, **39** (7), 885 (2005).
- [6] R. Goldhahn, S. Shokhovets, J. Scheiner, G. Gobsch, T.S. Cheng, C.T. Foxon, U. Kaiser, G.D. Kipshidze, W. Richter. *Phys. Stat. Solidi A*, **177**, 107 (2000).

- [7] B. Santic, F. Scholz. *Meas. Sci. Technol.*, **19**, 1 (2008).
- [8] F.T. Shum, W.W. So, S.D. Lester. Patent US 7,573,074 B2, Aug. 11, 2009.
- [9] H.S. Venugopalan, A. DiCarlo, X. Gao, S. Libon, B.S. Shelton, E. Stefanov, T. Zhang, I. Eliashevich, S.E. Weaver, M. Hsing, B. Kolodin, T. Soules, D. Florescu, S. Guo, M. Pophristic, B. Peres. *Proc. SPIE*, **4996**, 195 (2003).
- [10] M. Donofrio, J. Ibbetson, Z.J. Yao. Patent US 8,368,100 B2, Feb. 5, 2013.
- [11] S.J. Pearton, J.C. Zolper, R.J. Shul, F. Ren. *J. Appl. Phys.*, **86**, 1 (1999).
- [12] S.A. Smith, C.A. Wolden, M.D. Bremser, A.D. Hanser, R.F. Davis. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3631 (1997).
- [13] R.J. Shul. In: *GaN and Related Materials II*, ed. by S.J. Pearton (Gordon and Breach, N. Y., 1998).
- [14] X.A. Cao, S.J. Pearton, A.P. Zhang, G.T. Dang, F. Ren, R.J. Shul, L. Zhang, R. Hickman, J.M. Van Hove. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2569 (1999).
- [15] И.П. Смирнова, Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, С.И. Павлов. *ФТП*, **48**, 61 (2014).
- [16] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, Д.А. Закгейм, С.И. Павлов. *ФТП*, **48**, 1713 (2014).
- [17] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (М., Наука, 1970).

Редактор Л.В. Шаронова

Calculation of optimal architecture of a two-layer ITO film intended for application in the reflective contacts in blue and near ultraviolet LEDs

A.S. Pavluchenko, L.K. Markov, I.P. Smirnova, D.A. Zakheim

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract In this paper, the reflection from multilayer coatings applied as contacts in the AlInGaN LEDs was calculated with a use of the model based on the transfer matrix method. The ITO/SiO₂/Ag compositions, in which ITO (indium–tin oxide) film consisted of two layers with different refractive indices, were considered. Thicknesses of the ITO material varied in the preset range. The contact total reflection was obtained from the calculated angle dependences of reflectance of light with both polarizations. The dependences of contact total reflectance as well as of contact reflectance at light normal incident as a function of the ITO layer thickness were analyzed. As a result, the optimized architecture of a reflective *p*-GaN contact in the AlInGaN LED chips was suggested.