

Применение двухслойных пленок ITO в составе отражающих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов

© Л.К. Марков[†], И.П. Смирнова⁺, А.С. Павлюченко⁺, М.В. Кукушкин^{*}, Д.А. Закгейм⁺, С.И. Павлов⁺

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

^{*} ЗАО «Инновационная фирма „ТЕТИС“»,
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 10 июня 2014 г. Принята к печати 18 июня 2014 г.)

Исследованы структурные и оптические свойства многослойных композиций ITO/SiO₂/Ag, в которых слой ITO (оксид индия и олова) был получен двумя различными методами: электронно-лучевым испарением и комбинированным способом, включающим электронно-лучевое испарение и последующее магнетронное напыление. Показано, что отражающая способность композиции на основе пленки ITO, полученной методом электронно-лучевого испарения, существенно ниже. Это можно объяснить значительным поглощением света на обеих границах слоя SiO₂, возникающим вследствие сложного рельефа поверхности пленок ITO, напыленных электронно-лучевым испарением. Образцы с пленкой, полученной методом комбинированного нанесения, имеют коэффициент отражения на уровне 90% при нормальном падении излучения, что в совокупности с их большей электропроводностью обеспечивает им преимущество для применения в качестве отражающих контактов к области p-GaN AlInGaN-светодиодов флип-чип конструкции.

1. Введение

Повсеместное использование оксида индия и олова (ITO) в технологии создания контактов для высокоэффективных светодиодов на основе AlInGaN-гетероструктур объясняется довольно редким сочетанием свойств этого материала: проводимостью при одновременной прозрачности. В то же время особенности материала p-области GaN в совокупности с необходимостью получения минимальных значений контактных сопротивлений к нему накладывают ряд существенных ограничений на выбор способов и режимов технологических операций нанесения пленок ITO.

В работе [1] мы провели сравнение электрических и оптических свойств пленок ITO, полученных электронно-лучевым испарением и магнетронным напылением. Как показало исследование, при близких значениях коэффициентов пропускания обеих пленок полученная методом магнетронного распыления пленка отличается пониженным удельным сопротивлением вследствие более высоких значений концентрации и подвижности носителей. Кроме того, она более плотная, не склонна к образованию кристаллитов нитевидной формы и имеет ровную внешнюю границу. Оценка показателя преломления пленки, нанесенной методом магнетронного напыления, в диапазоне длин волн 420–450 нм, полученная в данной работе, дает значения $n = 2.06–2.11$, в то время как для пленки, нанесенной методом электронно-лучевого испарения в силу ее пористости показатель преломления оказывается существенно ниже: $n = 1.34–1.36$. Несмотря на то что интегральная прозрачность пленки, полученной магнетронным распылением, незначительно меньше прозрачности пленки, полученной электронно-

лучевым испарением, в первом случае в пленках наблюдается конструктивная интерференция. В результате коэффициент пропускания пленки, полученной магнетронным распылением, может равняться или даже превышать коэффициент пропускания пленки, полученной электронно-лучевым испарением в конкретных (зависящих от толщины пленки) диапазонах длин волн излучения. Кроме того, для кристаллов с выводом света через прозрачный контакт высокое значение показателя преломления магнетронной пленки ITO обеспечивает ей преимущество для использования в составе контактов к светодиодным кристаллам на основе GaN, поскольку данный материал сам отличается высоким значением показателя преломления: $n = 2.4–2.5$ [2,3]. Меньший контраст показателей преломления на границе GaN/ITO способствует большему проникновению излучения в материал контакта, внешняя граница которого может содержать необходимый для подавления полного внутреннего отражения рассеивающий микрорельеф. Так, например, в работе [4] наблюдалось 1.5-кратное увеличение силы света светодиода при текстурировании поверхности прозрачного контакта, изготовленного на основе слоя ITO.

Однако основным препятствием на пути использования магнетронных пленок в технологии формирования p-контактов является негативное влияние плазмы магнетронного разряда на p-область GaN-гетероструктур. Так, неоднократно отмечалось [5–8], что при реактивном ионном травлении p-GaN не только в плазме диодного типа, но и в индуктивно-связанной плазме, обеспечивающей более „мягкое“ радиационное воздействие на материал, происходит деградация p-области светодиодной гетероструктуры, что обусловлено возникновением дефектов, а также вакансий азота, которые являются донорами в GaN. По этой же причине, как следует из нашего

[†] E-mail: l.markov@mail.ioffe.ru

опыта, нанесение p -контактов ионным пучком, методами магнетронного или даже лазерного распыления также приводит к необратимым изменениям светодиодной гетероструктуры в системе AlGaInN. Поэтому в [1] нами была предложена технология получения комбинированных пленок ITO, в которых на начальной стадии формирования контакта на открытую поверхность p -области гетероструктуры электронно-лучевым испарением наносился тонкий (10 нм) слой ITO, защищающий ее от негативного воздействия плазмы. Затем поверх него методом магнетронного распыления формировалась основная пленка того же материала (толщиной 190 нм). Было показано, что пленка, полученная по разработанной двухстадийной технологии, практически совпадает по своим электрооптическим свойствам с пленкой, нанесенной методом магнетронного напыления, что открывает широкие перспективы ее использования в составе контактов к p -области GaN.

Наибольшее распространение пленки ITO получили в кристаллах так называемой конструкции „face-up“ [9], предполагающей вывод света через слои гетероструктуры и слой ITO [10], который обеспечивает растекание тока по поверхности активной области кристалла при максимальной прозрачности (поскольку толщина и удельное сопротивление p -слоя GaN не обеспечивают нужных значений его проводимости).

Другой конструкцией кристалла, предпочтительной, с нашей точки зрения, для создания мощных светодиодов, является так называемая флип-чип конструкция, в которой контактные площадки расположены с одной (тыльной) стороны кристалла, а свет выводится через прозрачную сапфировую подложку [11,12]. В такой конструкции активная область находится в непосредственной близости от теплоотвода, что способствует снижению ее температуры. Для минимизации потерь излучения, генерируемого в кристалле, контакт к p -области флип-чип светодиодов должен включать металл с наибольшим коэффициентом отражения на длине волны собственного излучения светодиодов. Для светодиодов синей области спектра это, как известно, алюминий и серебро [13]. При этом наилучшие характеристики могут быть достигнуты при использовании серебра в качестве материала, обеспечивающего отражение в составе контакта к p -области GaN. Стандартный подход предполагает применение тонкого (несколько нанометров) полупрозрачного слоя контактного материала, роль которого, как правило, выполняет никель. В работе [14] была описана технология изготовления контакта к p -области GaN, в котором в качестве контактного материала вместо никеля были использованы тонкие слои ITO. Большая прозрачность слоя ITO по сравнению со слоем Ni обеспечивает более высокое отражение света от контакта и соответственно заметное увеличение квантового выхода светодиодов. В то же время известно, что ионы серебра обладают высокой подвижностью и склонны к миграции в электрических полях от анода к катоду с образованием дендритных структур в области

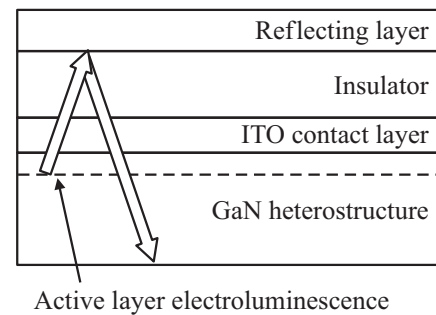


Рис. 1. Схематическое изображение контакта к p -области GaN с отражающим элементом, отделенным от проводящего слоя изолятором.

катода [15]. В светодиодах миграция ионов серебра может привести к замыканию n - и p -областей светодиода (утечкам) [13,16] и, как следствие, к потере эффективности или полному выходу их из строя. Поэтому одна из возможных альтернатив в кристаллах флип-чип конструкции предполагает использование относительно толстых слоев ITO для получения контакта к p -области и обеспечения необходимого растекания тока в пределах активной области кристалла. В этом случае отражение генерируемого света от контакта может быть достигнуто благодаря слою металла, отделенному от проводящего элемента слоем изолятора (как правило, SiO₂) и электрически развязанному с ним (рис. 1). Подобный подход рассматривается, например, в одном из исполнений патента [17], где предлагается использовать алюминий в качестве отражающего свет материала. Для контактов с отражающим элементом, отделенным от проводящего слоя изолятором, использование серебра не будет приводить к миграции его ионов, поскольку слои находятся под отрицательным потенциалом или же могут быть электрически нейтральны.

Для создания эффективных светодиодов коэффициент отражения света от контакта должен быть максимальным. В то же время при реализации схемы отражающего контакта, представленной на рис. 1, свет дважды преодолевает дополнительную границу раздела сред ITO/SiO₂. Неоднократно было показано [1,18,19], что пленки электронно-лучевого напыления склонны к образованию кристаллов нитевидной формы. При этом поверхность пленок имеет развитый рельефный характер. Несмотря на то что характерные размеры рельефа в десятки нанометров существенно меньше длины волны падающего излучения, на границе раздела ITO/SiO₂ могут возникать центры поглощения, и это может привести к ее недостаточной прозрачности. В флип-чип светодиодах этот фактор может оказаться существенным, поскольку свет дважды преодолевает указанную границу.

В настоящей работе показано, что комбинированные пленки, полученные в работе [1], наряду с большими прозрачностью и проводимостью обеспечивают более эффективное отражение падающего света, что дает им преимущество при использовании в составе контакта к

p-GaN флип-чип светодиодов с отражающим элементом, отделенным от прозрачного проводящего слоя пленкой диэлектрика. Для этого было проведено сравнение оптических свойств пленок ITO/SiO₂ и ITO/SiO₂/Ag, в которых слой ITO был получен различными способами: электронно-лучевым испарением и комбинированным (электронно-лучевым + магнетронным) методом.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Для сравнения оптических свойств тонких пленок ITO/SiO₂, в которых слой ITO был нанесен различными методами, были изготовлены две серии тестовых образцов, представляющих собой покровные стекла толщиной 0.17 мм, на одну сторону которых наносились исследуемые комбинации пленок. Пленки ITO наносились на специализированной установке комбинированного электронно-лучевого и магнетронного напыления производства фирмы Torr Int., США. Рабочая камера откачивалась до давления 10⁻⁷ мбар, в камере предусмотрен нагрев подложкодержателя с образцами и напуск газов (Ar, N₂). Контроль толщины пленок проводился в процессе их нанесения с использованием кварцевого датчика, измеряющего массу наносимого материала. Поскольку калибровка датчика осуществлялась исходя из значений, измеряемых на сплошном плотноупакованном материале, реальная толщина пленок, содержащих нитевидные кристаллы и соответственно пустоты, отличалась от измеренной в процессе нанесения. Однако с целью сопоставимости получаемых результатов на образцы наносилось одинаковое количество материала (т.е. толщина пленки регистрировалась по показаниям кварцевого датчика).

Первоначально были нанесены пленки ITO двумя различными методами.

1) Пленка ITO толщиной 200 нм была нанесена методом электронно-лучевого испарения на подложку, предварительно нагретую до 500°C. Затем без выключения нагрева в вакуумную камеру был произведен напуск азота марки ОСЧ до давления, близкого к атмосферному (~ 800 мбар), и образец выдерживался в атмосфере азота в течение 10 мин. Подобный способ, подробно описанный в [10], позволяет получить пленки ITO для использования в светодиодах на основе AlInGa_N, оптимизированные по прозрачности, проводимости и контактному сопротивлению к *p*-области GaN.

2) Комбинированная двухслойная пленка ITO наносилась следующим способом: вначале электронно-лучевым испарением на нагретую до 500°C подложку была напылена пленка ITO толщиной 10 нм, после чего в камеру был произведен напуск азота (как в п. 1). После охлаждения образца до комнатной температуры в вакууме без вскрытия рабочей камеры была нанесена пленка ITO толщиной 190 нм методом магнетронного напыления. Полученный двухслойный образец отжигался при 500°C

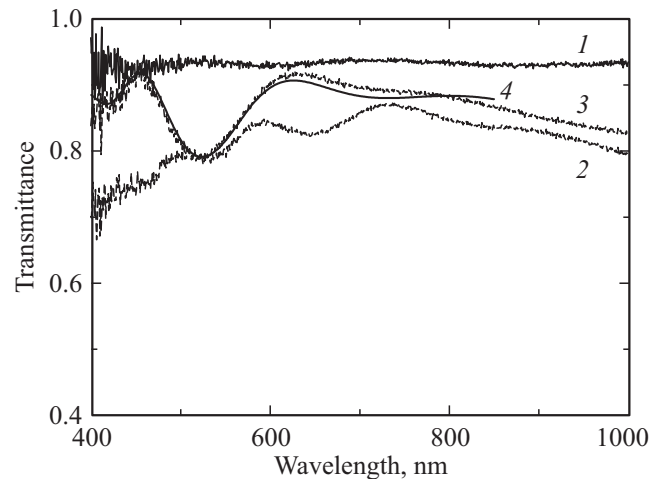


Рис. 2. Спектры пропускания стекол с пленками SiO₂ (1), а также ITO/SiO₂, в которых слой ITO получен различными методами: электронно-лучевым испарением (2) и комбинированным методом (3 — экспериментальные данные, 4 — результаты расчета).

в атмосфере азоте при давлении ~ 800 мбар в течение 10 мин. Электрооптические свойства пленок, получаемых этими методами, а также их структурные особенности подробно обсуждаются в [1], там же приведены детали процесса отработки технологии изготовления комбинированных пленок ITO.

Затем на обе серии полученных образцов в одном процессе методом PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) был нанесен слой SiO₂ толщиной 0.42 мкм. Для сравнения и оценки качества наносимого слоя SiO₂ в этом же процессе был изготовлен контрольный образец, в котором слой SiO₂ осаждался на чистое покровное стекло, без пленки ITO. Коэффициент пропускания образцов в диапазоне длин волн 400–800 нм исследовался на спектро радиометре OL 770 производства фирмы Optronic Laboratories с использованием интегральной сферы. Излучение падало на образец со стороны стекла нормально к его поверхности. На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов пропускания образцов от длины волны падающего излучения. Как видно из рисунка, прозрачность образцов существенным образом зависит от метода нанесения слоя ITO: практически в любой точке спектра система ITO/SiO₂ со слоем ITO электронно-лучевого напыления оказывается менее прозрачной, чем система с двухслойной пленкой ITO. Поскольку коэффициенты пропускания слоев ITO и SiO₂ разных образцов различаются несущественно, как и предполагалось выше, определяющий вклад вносит граница раздела ITO/SiO₂, различная для пленок разных методов нанесения.

Как обсуждалось в [1], методом эллипсометрии была получена оценка величины показателя преломления для пленки комбинированного напыления, которая составила $n = 1.9–2.0$ в диапазоне длин волн 420–450 нм. Для подтверждения применимости полученных результатов

методом матриц переноса [20] были рассчитаны спектры пропускания пленки ITO/SiO₂, нанесенной на стеклянную подложку. В качестве параметров расчета использовались дисперсионные кривые, полученные для пленок из эллипсометрических данных. Результаты расчета приведены на рис. 2 (сплошная кривая 4). Наилучшее согласие расчетной кривой с экспериментальными данными достигается при значении показателя преломления $n(450 \text{ нм}) = 1.93$, что согласуется с полученными ранее данными эллипсометрии. Наличие интерференционных эффектов в пленках приводит к тому, что при длинах волн в области 450–630 нм коэффициенты пропускания образцов с двухслойным покрытием ITO/SiO₂ и без ITO (контрольный образец) оказываются близкими.

Конечной целью настоящей работы было сравнение отражающих способностей контактов с изолированным зеркальным элементом, в которых слой ITO формировался двумя различными методами. Для этого на обе серии рассмотренных выше образцов был нанесен слой серебра толщиной 250 нм. Пленки серебра наносились в вакууме методом электронно-лучевого испарения при комнатной температуре подложкодержателя. Рабочая камера откачивалась до 10^{-7} мбар, для получения более равномерного покрытия напыление проводилось на вращающийся подложкодержатель с образцами. Для сравнения в этом же процессе был изготовлен контрольный образец, в котором слой Ag осаждался на чистое покровное стекло, без дополнительных слоев. Как и в предыдущем эксперименте, коэффициент отражения образцов исследовался на спектро радиометре OL 770 с использованием интегральной сферы. Излучение падало на образец со стороны стекла нормально к его поверхности, проходило через него, а также слои ITO и SiO₂, отражалось от металлической пленки и возвращалось обратно. Результаты измерения коэффициента отражения образцов изображены на рис. 3. Аналогично спектрам пропускания были рассчитаны спектры отражения комбинированной пленки ITO/SiO₂/Ag, нанесенной на стеклянную подложку. Результаты расчета с теми же параметрами приведены на рис. 3 (сплошная кривая 4). Как и в случае с прохождением, можно видеть хорошее соответствие расчетной кривой экспериментальным данным.

Двукратное прохождение границы ITO/SiO₂ в экспериментах на отражение должно приводить к еще большему разрыву в характеристиках образцов со слоем ITO, полученным разными методами, по сравнению с экспериментами на прохождение. Однако столь существенное падение отражательной способности образца со слоем ITO, полученным электронно-лучевым испарением (кривая 2 на рис. 3), по сравнению с образцом комбинированного нанесения ITO с трудом может быть обусловлено лишь двукратными потерями на границе. Объяснение наблюдаемого эффекта может быть получено при детальном изучении структуры обоих образцов с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 4). Согласно приведенным изображениям, границы ITO/SiO₂ и SiO₂/Ag образца с комбинированным нанесением ITO ровные,

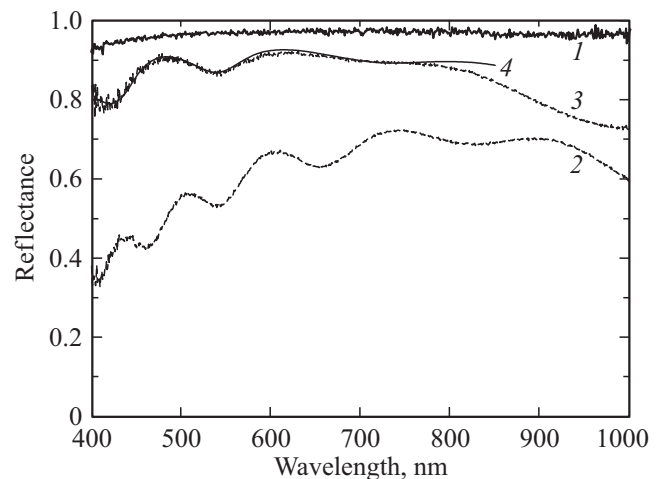


Рис. 3. Спектры отражения стекол с пленками Ag (1), а также ITO/SiO₂/Ag, в которых ITO получен разными методами: электронно-лучевым испарением (2) и комбинированным методом (3 — экспериментальные данные, 4 — результаты расчета).

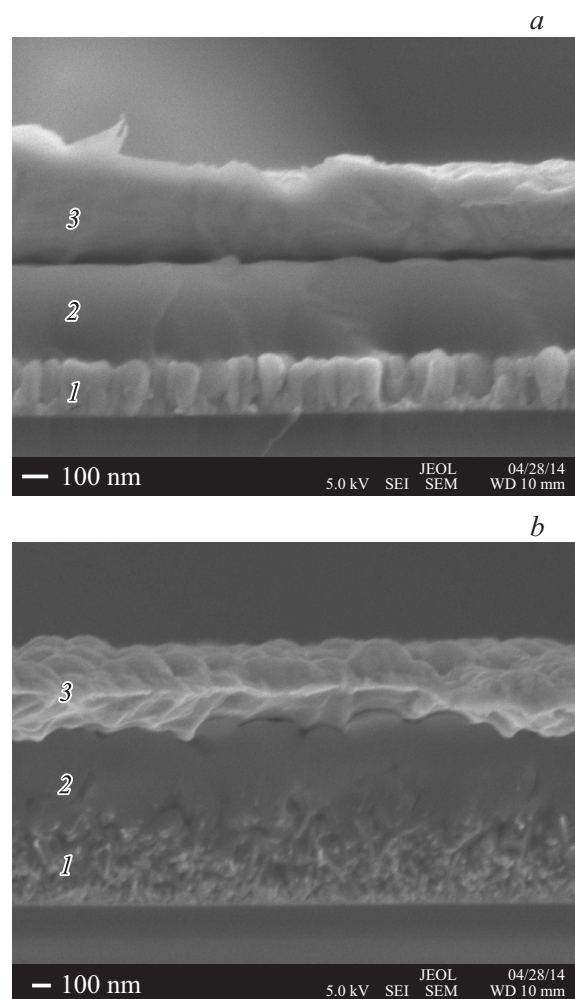


Рис. 4. Изображения в растровом электронном микроскопе пленок ITO/SiO₂/Ag, в которых слой ITO наносился разными методами: *a* — комбинированное напыление, *b* — электронно-лучевое испарение. Слои: 1 — ITO, 2 — SiO₂, 3 — Ag.

без видимых дефектов. В то же время для образца с ИТО электронно-лучевого испарения сложный характер границы ИТО/SiO₂ приводит к возникновению рельефа на поверхности раздела SiO₂/Ag, где, по всей видимости, и происходит дополнительное поглощение падающего излучения.

Как следует из рис. 3, максимум зависимости коэффициента отражения образца с двухслойной пленкой ИТО находится на уровне 90%. Несмотря на то что это значение немного меньше, чем отражение непосредственно от серебряной пленки (кривая 1), с точки зрения применения в качестве контакта к *p*-области GaN полученная пленка может иметь дополнительные преимущества вследствие следующих обстоятельств. В нашем эксперименте свет распространялся по нормали к плоскости образца, в то время как в светодиодном кристалле излучение падает на границу раздела сред под разными углами. Вследствие высокого показателя преломления материала GaN на его границе с материалом, имеющим меньшее значение показателя преломления, при малых углах падения излучения к плоскости границы наблюдается явление полного внутреннего отражения (ПВО) света. Известно, что характер взаимодействия излучения с границей раздела сред в случае условно бесконечных сред и в случае тонких пленок различен и определяется толщиной пленки. Если рассматривать поведение системы GaN/(оптически прозрачная пленка)/(металлический отражатель), то начиная с некоторых толщин прозрачной пленки, имеющей меньшее значение показателя преломления по отношению к GaN (как и в случае условно бесконечной среды), может наблюдаться эффект ПВО. Так, например, согласно данным патента [21], где предложены различные способы увеличения отражающей способности контактов к светодиодам и рассматривается поведение системы GaN/SiO₂/Al, толщина пленки SiO₂, превосходящая половину длины волны излучения в материале SiO₂ (λ), достаточна для наблюдения значительного эффекта ПВО на границе раздела GaN/SiO₂. При этом, согласно [21], увеличение толщины пленки свыше 1.75λ не оказывает влияния на характер угловой зависимости отражения исследуемой системы, т.е., по всей вероятности, начиная с этих значений излучение воспринимает границу пленки так же, как условно бесконечную среду. В случае флип-чип светодиодов эффект ПВО на границе, предназначенной для размещения контактных площадок, может играть позитивную роль, поскольку полностью исключает поглощение света при отражении его от этой поверхности. При этом препятствовать возникновению волновода в материале GaN, ограничивающего вывод света из кристалла, можно созданием рельефа на противоположной поверхности: например, с помощью выращивания на профилированном сапфире.

Задача поиска максимального интегрального отражения света от контакта с комбинированным слоем ИТО может решаться как посредством дальнейшей оптимизации толщин прозрачных слоев (ИТО и SiO₂), так

и модификацией показателя преломления слоя ИТО с целью повышения контраста показателей преломления и соответственно повышения отражения на границе GaN/ИТО. Комбинированная пленка ИТО включает слой материала, полученный электронно-лучевым испарением. Склонность материала к образованию кристаллов вытянутой нитевидной формы позволяет варьировать показатель преломления, изменяя параметры процесса нанесения материала. Так, например, в [18,19] с этой целью был применен метод напыления на наклонно расположенную подложку. Увеличивая толщину слоя ИТО электронно-лучевого напыления с пониженным значением показателя преломления, можно повысить отражение на границе GaN/ИТО. Однако следует помнить, что применение пленок в контактах к светодиодам требует от них одновременно максимально возможной электрической проводимости.

3. Заключение

Таким образом, сравнение оптических свойств пленок ИТО/SiO₂ и ИТО/SiO₂/Ag, в которых слой ИТО получен различными способами, показало, что при нормальном падении света пленки ИТО, сформированные комбинированным методом, обеспечивают значительно большее отражение света. Данное различие объясняется существенным поглощением света на обеих границах слоя SiO₂, возникающим вследствие сложного рельефа поверхности пленок ИТО, нанесенных электронно-лучевым испарением. Коэффициент отражения пленок ИТО комбинированного метода получения находится на уровне 90%, что в совокупности с более высокой проводимостью слоя ИТО дает им преимущество при использовании в составе контакта к *p*-GaN флип-чип светодиодов с отражающим элементом, отделенным от проводящего слоя пленкой диэлектрика.

Список литературы

- [1] И.П. Смирнова, Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, С.И. Павлов. ФТП, **48**, 61 (2014).
- [2] R. Goldhahn, S. Shokhovets, J. Scheiner, G. Gobsch, T.S. Cheng, C.T. Foxon, U. Kaiser, G.D. Kipshidze, W. Richter. Phys. Status Solidi A, **177**, 107 (2000).
- [3] B. Santic, F. Scholz. Meas. Sci. Technol., **19**, 1 (2008).
- [4] Haibo Gong, Xiaopeng Hao, Yongzhong Wu, Bingqiang Cao, Wei Xia, Xiangang Xu. Mater. Sci. Engin B, **176**, 1028 (2011).
- [5] S.J. Pearton, J.C. Zolper, R.J. Shul, F. Ren. J. Appl. Phys., **86**, 1 (1999).
- [6] S.A. Smith, C.A. Wolden, M.D. Bremser, A.D. Hanser, R.F. Davis. Appl. Phys. Lett., **71**, 3631 (1997).
- [7] R.J. Shul. In: *GaN and Related Materials II*, ed. by S.J. Pearton (Gordon and Breach, N. Y., 1998).
- [8] 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).
- [9] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama. Jpn. J. Appl. Phys., **34**, L797 (1995).

- [10] И.П. Смирнова, Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин. *ФТП*, **46**(3), 384 (2012).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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, V. Peres. *Proc. SPIE*, **4996**, 195 (2003).
- [14] Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина. *ФТП*, **43**(11), 1564, (2009).
- [15] R.W. Cahn, P. Haasen. E.J. Kramer. *Materials Science and Technology* (Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000) v. 2, p. 451.
- [16] Hyunsoo Kim, Jahee Cho, Yongjo Park, Tae-Yeon Seong. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 092 115 (2008).
- [17] M. Donofrio, J. Ibbetson, Z.J. Yao. Patent US 8,368,100 B2, Feb. 5, 2013.
- [18] Jong Kyu Kim, Thomas Gessmann, E. Fred Schubert, J.-Q. Xi, Hong Luo Jahee Cho, Cheolsoo Sone, Yongjo Park. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 013 501 (2006).
- [19] J.K. Kim, S. Chhajed, M.F. Schubert, E.F. Schubert, A.J. Fischer, M.H. Crawford, J. Cho, H. Kim, C. Sone. *Adv. Mater.*, **20**, 801 (2008).
- [20] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (М., Наука, 1970).
- [21] F.T. Shum, W.W. So, S.D. Lester. Patent US 7,573,074 B2, Aug. 11, 2009.

Редактор Л.В. Шаронова

Application of two-layers ITO films in the composition of reflective contacts in the blue and near ultraviolet LEDs.

L.K. Markov⁺, I.P. Smirnova⁺, A.S. Pavluchenko⁺, M.V. Kukushkin*, D.A. Zakheim⁺, S.I. Pavlov⁺

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

* ZAO „Innovation Firm «TETIS»“,
194156 St. Petersburg, Russia

Abstract In this paper, structural and optical properties of the multi-layer compositions ITO/SiO₂/Ag are studied. ITO layers in the system were obtained by two different ways: electron-beam evaporation and combined method including electron-beam evaporation and following magnetron sputtering deposition. It is shown that the reflectivity of the composition based on ITO film obtained by electron-beam evaporation is much less. It can be explained by considerable light absorption at both interfaces of SiO₂ layer due to the complicated rough surface relief of the ITO films deposited by electron-beam evaporation. The samples with the film obtained by the combined method demonstrated a reflection coefficient as high as 90% at normal incident of light. This fact together with higher conductivity of these films ensures them advantages for application as reflective *p*-contacts in AlInGaN flip-chip LEDs.