

AlGaInN-светодиоды с прозрачным p -контактом на основе тонких пленок ITO

© И.П. Смирнова[¶], Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин⁺

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

⁺ ЗАО Инновационная фирма „ТЕТИС“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 25 июля 2011 г. Принята к печати 1 августа 2011 г.)

Разработан способ получения прозрачных проводящих пленок ITO (indium tin oxide), предназначенных для использования в светодиодах синего спектрального диапазона. Максимальный внешний квантовый выход светодиодов с p -контактом на основе полученных пленок достигает 25%, в то время как для аналогичных светодиодов со стандартным полупрозрачным металлическим контактом он составляет $< 10\%$. Наблюдаемое увеличение прямого падения напряжения с 3.15 до 3.37 В не оказывает существенного влияния на возможность применения данных пленок в светодиодах, так как величина оптической мощности светодиодов с прозрачным p -контактом на основе пленок ITO почти в 2.5 раза превышает оптическую мощность кристаллов с металлическими полупрозрачными p -контактами при рабочем токе 20 мА. Светодиоды с p -контактами на основе пленок ITO успешно выдерживали токи накачки, в 5 раз превышающие их расчетный рабочий ток, не обнаруживая признаков деградации.

1. Введение

Одно из уникальных свойств тонких пленок оксида индия и олова (indium tin oxide, ITO), заключающееся в сочетании оптической прозрачности в высокой электрической проводимости, находит широкое применение в некоторых классах приборов там, где необходимо подвести или снять напряжение с оптического элемента, не перекрывая при этом пути распространения света. В первую очередь это жидкокристаллические дисплеи, сенсорные панели, солнечные элементы. В работе [1] мы обсуждали результаты экспериментов по использованию тонких пленок ITO в составе отражающего контакта к области p -GaInN синих светодиодов флип-чип конструкции. Нам удалось показать, что высокие значения работы выхода материала ITO обеспечивают возможность достижения контактного сопротивления к слоям p -GaInN, сравнимого с сопротивлением широко распространенных контактов на основе никеля. В то же время прозрачность пленки в синей области спектра значительно увеличивает коэффициент отражения контакта. В результате, с учетом фактора многопроходности света в кристалле, квантовая эффективность светодиодов возрастала на $\sim 15\%$ при сравнимых значениях их электрических характеристик.

В настоящей работе разработаны светоизлучающие кристаллы AlGaInN, в которых в качестве верхнего прозрачного контакта к области p -GaInN использовались пленки ITO, и исследованы характеристики светодиодов с такими кристаллами. Кристаллы указанной геометрии используются большинством производителей светодиодов в качестве наиболее простого и дешевого источника излучения. Как правило, в стандартных коммерческих

светодиодах свет выводится через полупрозрачный контакт, состоящий из комбинации тонких слоев Ni/Au или пленок Pt, Pd. Однако неполная прозрачность контакта приводит к потерям излучения в нем и соответственно ведет к падению внешнего квантового выхода светодиода. Использование пленок ITO с прозрачностью, близкой к 100% в видимой области спектра, существенно увеличивает эффективность вывода света из кристалла [2–6]. При этом технология получения пленок (условия нанесения, температуры отжига и т.д.) различна у различных авторов. Так, в работах [2,3] пленки наносились магнетронным напылением, а в [4,5] авторы останавливают свой выбор на системе Ni/ITO, в которой дополнительный слой Ni используется для снижения величин контактного сопротивления к p -GaInN. С этой же целью в работе [6] на поверхности p -GaInN выращивалась короткопериодная сверхрешетка InGaIn/GaInN, легированная кремнием.

Следует отметить, что роль пленки ITO принципиально различна в светодиодах флип-чип конструкции и в светодиодах с верхним прозрачным контактом. Если в первом случае она должна обеспечивать лишь приемлемые значения контактного сопротивления, то во втором необходимо дополнительно получить равномерное растекание тока по всей площади активной области кристалла. Причина различия в требованиях, предъявляемых к пленкам в кристаллах разной геометрии, заключается в том, что в флип-чип светодиодах растекание тока обеспечивается металлами следующих слоев многослойной системы контакта к слою p -GaInN, в то время как в светодиодах с верхним прозрачным контактом пленка ITO является единственным токонесящим элементом. При этом в обоих случаях, чем выше будет прозрачность пленки, тем больший выигрыш в выводе излучения из кристалла будет достигнут. Из

[¶] E-mail: irina@quantum.ioffe.ru

сказанного очевидно, что в случае флип-чип геометрии кристалла оптимизация параметров пленки идет по пути уменьшения ее толщины и ограничена снизу фактором ухудшения электрических характеристик контакта. В работе [1] было показано, что оптимальные толщины тонких пленок материала лежат в диапазоне 2.5–5.0 нм. В кристаллах же с верхним прозрачным контактом указанных значений явно недостаточно, для того чтобы обеспечить равномерное растекание тока. С этой точки зрения необходимы более толстые пленки. В то же время увеличение толщины пленки приводит к уменьшению ее прозрачности. Соответственно оптимальное значение будет определяться балансом двух вышеназванных факторов.

В настоящей работе мы опирались на основные технологические приемы и результаты, ранее полученные нами в [1]. В то же время следует отметить, что задача использования пленки ITO в качестве прозрачного контакта представляется нам более простой (по сравнению с задачей применения ее в составе отражающего контакта) в силу отсутствия взаимодействия пленки с металлами многослойной системы контакта.

Довольно часто деградация коэффициента отражения многослойного контакта происходит как в процессе отжига, так и при приложении токовой нагрузки к сформированным контактам. Таким образом, палитра технологических приемов получения пленок ITO прозрачного контакта значительно шире. В то же время, так как нанесение *p*-контактов методом магнетронного распыления может приводить к деградации светодиодной структуры [7,8], в данной работе, как и в [1], нанесение тонких пленок ITO проводилось методом электронно-лучевого испарения, позволяющим исключить негативное воздействие плазмы на структуру. Кроме того, с точки зрения коммерческого использования этот метод предпочтителен в силу того, что не требует использования дорогостоящих мишеней ITO.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Для изготовления светодиодов с прозрачными контактами на основе слоев ITO использовались гетероструктуры AlGaInN/GaN, выращенные методом MOCVD (газофазной эпитаксии из металло-органических соединений) на сапфировых подложках и содержащие в активной области 5 квантовых ям $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$, разделенных барьерами GaN. Конструкция светодиодного кристалла, представляющего собой квадрат с размерами 500×500 мкм в плоскости контактов, схематически изображена на рис. 1. На поверхности *p*-контакта по двум его сторонам проложены токопроводящие металлические шины для более равномерного растекания тока в плоскости контакта. На двух противоположных сторонах кристалла вытравлена меза до *n*-слоя и проложены шины *n*-контакта. Процесс изготовления включал

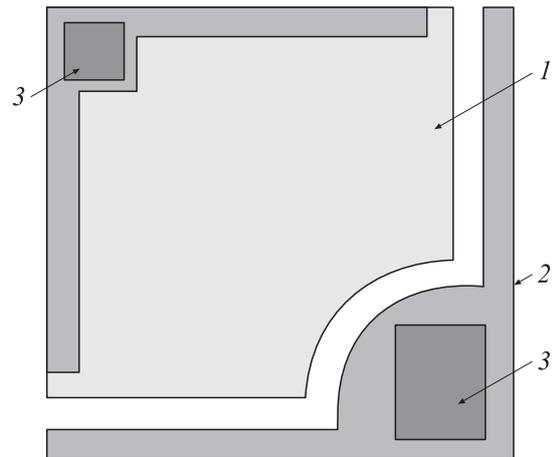


Рис. 1. Схематическое изображение светодиодного кристалла с верхним прозрачным контактом, вид сверху: 1 — прозрачный *p*-контакт, 2 — *n*-контакт, 3 — контактные площадки, усиленные гальваническим Au.

в себя вытравливание двухуровневой мезаструктуры методом реактивного ионного травления в атмосфере $\text{Cl}_2 : \text{BCl}_3 : \text{Ar}$. Первое травление на глубину 0.5 мкм проводилось для вскрытия площадок под нанесение *n*-контакта. Второе травление по всему контуру световылучающего кристалла до сапфировой подложки (на глубину 5–6 мкм) проводилось как с целью повышения эффективности вывода света из кристалла за счет дополнительного отражения света от боковых стенок мезаструктуры, так и для проведения последующей лазерной резки.

Во всех случаях перед нанесением *p*-контакта (слой ITO или Ni/Au) проводилась химическая обработка поверхности *p*-GaN в растворе $\text{HCl} : \text{HNO}_3$ (3 : 1) в течение 10 мин для удаления поверхностных окислов и снижения потенциального барьера на границе контакт/полупроводник. В качестве *n*-контакта использовалась металлизация Ti/Au. Для получения низкоомного омического контакта поверхность *n*-GaN подтравливалась ионами аргона непосредственно перед напылением металлов.

Для токопроводящих шин обоих контактов использовалась комбинация металлов Ti/Au. В дальнейшем *n*- и *p*-контактные площадки усиливались гальваническим слоем золота, сапфировая подложка утончалась до 200 мкм и разрезалась с помощью лазерной резки на отдельные кристаллы. Кристаллы монтировались со стороны сапфира на подкристалльные платы, представляющие собой чипы из окисленного кремния с нанесенной разводкой контактных площадок. Затем контактные площадки кристаллов и подкристалльных плат приваривались друг к другу золотой проволокой диаметром 30 мкм. Полученные чипы приклеивались на медный теплоотвод корпуса и заливались эпоксидной смолой.

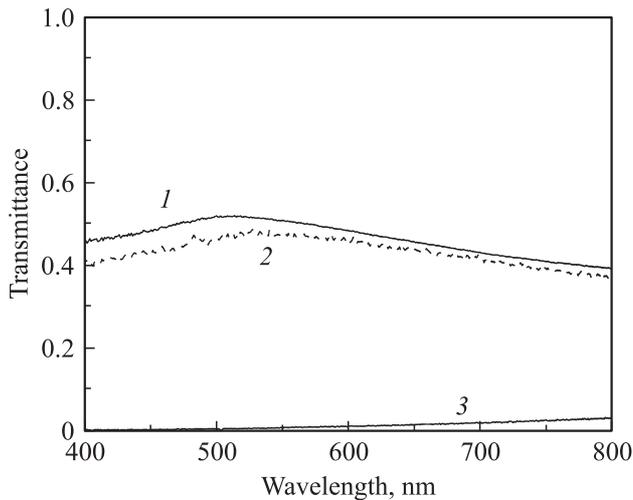


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны излучения для различных пленок: 1 — Ni(8 нм); 2 — Ni(4 нм)/Au(4 нм); 3 — ITO(200 нм), холодное напыление.

Определение оптимальной толщины и прозрачности пленок ITO проводилось на тестовых образцах, представляющих собой покровные стекла толщиной 0.17 мм, на одну сторону которых наносились исследуемые пленки. Коэффициент пропускания образцов в диапазоне длин волн 400–800 нм исследовался на спектро радиометре OL 770 производства фирмы Ortronic Laboratories с использованием интегральной сферы. Излучение падало на образец со стороны пленки нормально к его поверхности.

Для сравнения и оценки получаемых результатов были также изготовлены образцы с нанесенными металлическими слоями Ni(4 нм)/Au(4 нм) (эта комбинация наиболее часто используется в качестве полупрозрачного контакта к области *p*-GaN) и Ni(8 нм). Металлы, как и пленки ITO, наносились методом электронно-лучевого испарения. На рис. 2 изображены зависимости коэффициента пропускания света образцами от длины волны излучения. Как видно из рисунка, контакты с тонкими слоями металлов полностью оправдывают название „полупрозрачные“: более половины излучения поглощается образцами практически во всем видимом диапазоне длин волн. При этом оказалось, что для полученных пленок металлов слой Ni толщиной 8 нм слегка превосходит комбинацию Ni(4 нм)/Au(4 нм) по прозрачности. Однако удельное сопротивление золота приблизительно в 3 раза меньше сопротивления никеля и, чтобы обеспечить сравнимое поверхностное сопротивление исключительно слоем никеля, нам необходимо было бы увеличить его толщину до 16 нм, что значительно уменьшило бы прозрачность контакта. Попытка использовать комбинацию Ni/Au, в которой уменьшены толщины слоев металлов с целью увеличения прозрачности контакта, также не дала требуемого результата из-за недостаточной проводимости слоев. Для оценки

были изготовлены светодиоды по технологии, описанной выше (рис. 1), с контактом Ni(1.5 нм)/Au(1.5 нм). Действительно, максимальный квантовый выход светодиодов в области малых токов вырос по сравнению со светодиодами с контактом Ni(4 нм)/Au(4 нм) на ~ 40%, однако светимость активной области под *p*-контактом была неоднородной и быстро уменьшалась при удалении от контактных шин металлического усиления. Соответственно внешний квантовый выход приборов резко уменьшался с ростом тока накачки. Таким образом, мы рассматриваем комбинацию Ni(4 нм)/Au(4 нм) как оптимальную для создания полупрозрачного контакта к области *p*-GaN светоизлучающих кристаллов описанной геометрии и считаем корректным сравнение характеристик светодиодов на основе пленок ITO с характеристиками светодиодов с полупрозрачным металлическим контактом состава Ni(4 нм)/Au(4 нм).

Оптимизация процесса получения прозрачных и проводящих слоев ITO отрабатывалась на пленках толщиной 200 нм, так как применение пленок с меньшей толщиной не обеспечивало приемлемого растекания тока по площади *p*-контакта вследствие более низкой удельной проводимости материала ITO. Напыление на холодную подложку приводило к получению пленок малой прозрачности (кривая 3 на рис. 2), увеличить которую наиболее эффективно можно было последующим отжигом при атмосферном давлении на воздухе, в азоте или смеси газов аргона (50%) с кислородом (50%). Как было показано в [1], отжиг приводит к кристаллизации пленок и росту размеров кристаллитов с повышением температуры отжига. В то же время проведенные эксперименты показали, что наибольшая прозрачность достигается напылением на горячую подложку с после-

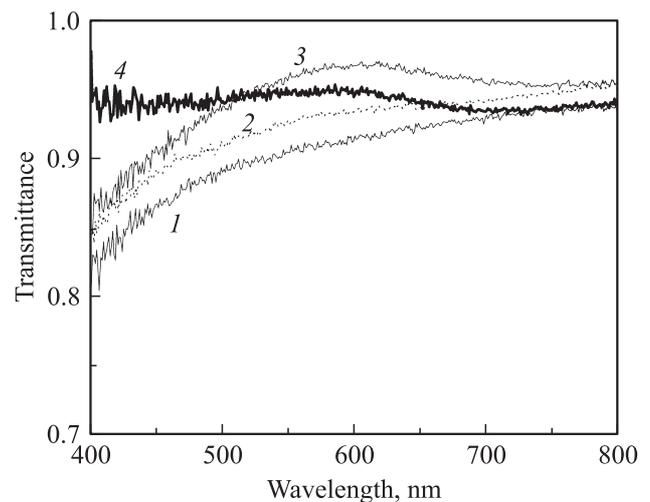


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания образцов от длины волны излучения для различных режимов нанесения пленок ITO(200 нм): 1 — температура напыления 350°C, без напуска газов; 2 — температура напыления 350°C, напуск азота; 3 — температура напыления 450°C, напуск азота. 4 — стекло без пленки.

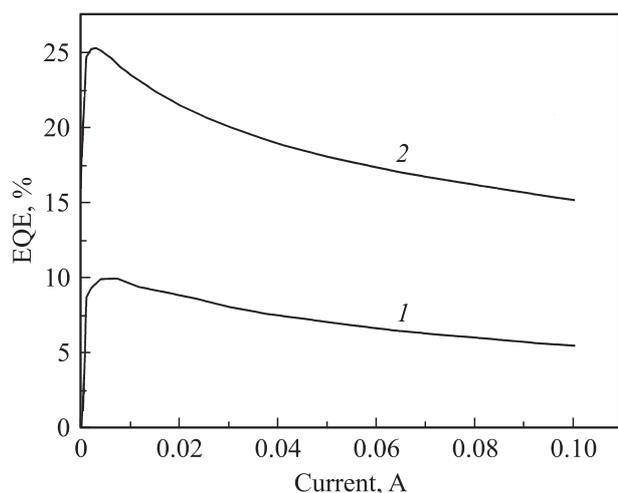


Рис. 4. Зависимость внешней квантовой эффективности от тока накачки для AlGaInN-светодиодов с *p*-контактами на основе полупрозрачных металлических слоев (1) и прозрачных пленок ИТО (2).

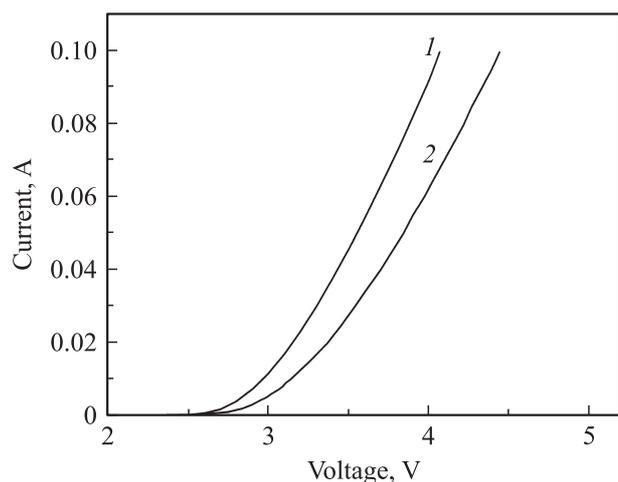


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики AlGaInN-светодиодов с *p*-контактами на основе полупрозрачных металлических слоев (1) и прозрачных пленок ИТО (2).

дующим напуском газов до атмосферного давления в одном процессе сразу по завершению напыления. Эксперименты выполнялись при температурах 350 и 450°C с использованием азота или смеси газов аргона (50%) с кислородом (50%). Влияние состава газа оказалось незначительным, в то время увеличение температуры приводило к лучшим результатам. На рис. 3 приведены кривые зависимости коэффициента пропускания света от длины волны излучения для образцов с различными режимами нанесения пленок. Как видно из рисунка, максимальная прозрачность пленки соответствует режиму 450°C с напуском азота. Кривая 4 на рис. 3 показывает зависимость коэффициента пропускания стекла без пленки. Как видим, на длинах волн выше 520 нм пленка

дает заметный просветляющий эффект. Обсуждать коэффициент пропускания пленки, не существующей вне образца, не представляется корректным, в то же время следует подчеркнуть, что коэффициент пропускания образцов с пленкой в диапазоне длин волн 450–470 нм (наиболее часто используемом для синих светодиодов) был на уровне 98% от коэффициента пропускания образцов без пленки. Такая высокая прозрачность пленок особо важна для увеличения квантового выхода светодиодных кристаллов.

Полученный оптимизированный режим нанесения пленок ИТО был использован при создании прозрачного контакта к области *p*-GaIn в синих светодиодах. На рис. 4 и 5 приводятся зависимости внешнего квантового выхода (external quantum efficiency, EQE) от тока накачки и вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных светодиодов и светодиодов с полупрозрачным металлическим контактом Ni(4 нм)/Au(4 нм). Как видно из рис. 4, замена металлического контакта слоем ИТО приводит к значительному увеличению квантового выхода светодиода: при рабочем токе 20 мА его значения составляют 21.4 и 8.8% соответственно для контактов ИТО и Ni/Au. В то же время ВАХ испытывают небольшой сдвиг вправо и величина прямого падения напряжения на токе 20 мА возрастает с 3.15 до 3.37 В. Безусловно, увеличение прямого падения напряжения само по себе является негативным фактором, приводящим к повышенным джоулевым потерям в кристалле, что в конечном счете дает отрицательный вклад в коэффициент полезного действия. С другой стороны, дополнительный разогрев кристалла приводит к его эксплуатации при повышенных температурах, что может вызвать ускоренную деградацию светодиода. Однако, как нам представляется, столь значительный прирост квантовой эффективности светодиодов, полученный в настоящей работе, оправдывает сопровождающее его увеличение прямого падения напряжения на светодиоде. В пользу данного утверждения служит тот факт, что оптическая мощность светодиодов с контактами на основе пленок ИТО при рабочем токе 20 мА превышала оптическую мощность светодиодов с металлическими полупрозрачными контактами в 2.5 раза (11.6 и 4.6 мВт соответственно). Более того, среди основных вопросов использования контактов на основе пленок ИТО в светодиодах необходимо обсуждать их стабильность и способность работать при повышенных токовых нагрузках. Как видно из приведенных в настоящей работе данных, светодиоды с контактами на основе пленок ИТО успешно выдерживали токи накачки, в 5 раз превышающие их расчетный рабочий ток (20 мА), и при этом не обнаруживали признаков деградации. Напротив, наблюдалось уменьшение прямого падения напряжения на несколько процентов после нагрузки током, заметно превышающим рабочий.

Исследования надежности полученных светодиодов не выявили существенных отклонений по деградации в сравнении со светодиодами, имеющими полупрозрачные металлические контакты.

3. Заключение

В настоящей работе разработана технология получения высокопрозрачных, проводящих пленок ITO для использования в светодиодах синего спектрального диапазона. Замена стандартного полупрозрачного металлического контакта слоем ITO толщиной 200 нм приводит к значительному увеличению внешнего квантового выхода светодиодов. Наблюдающееся увеличение прямого падения напряжения от 3.15 до 3.37 В не оказывает существенного влияния на возможность использования пленки в светодиодах, поскольку не приводит к повышенной деградации ни контакта, ни светодиода в целом. Величина оптической мощности светодиодов с прозрачным контактом на основе пленок ITO превышает в 2.5 раза оптическую мощность аналогов, использующих металлические полупрозрачные контакты.

Авторы выражают благодарность ЗАО „Эпицентр“, лично Д.А. Закгейму и Д.А. Бауману за предоставленные гетероструктуры.

Список литературы

- [1] Л.М. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина. ФТП, **43**, 1564 (2009).
- [2] T. Margalith, O. Buchinsky, D.A. Cohen, A.C. Abare, M. Hansen, S.P. DenBaars, L.A. Coldren. Appl. Phys. Lett., **74**, 3930 (1999).
- [3] C.S. Chang, S.J. Chang, Y.K. Su, Y.C. Lin, Y.P. Hsu, S.C. Shei, S.C. Chen, C.H. Liu, U.H. Liaw. Semicond. Sci. Technol., **18**, L21 (2003).
- [4] Y.C. Lin, S.J. Chang, Y.K. Su, T.Y. Tsai, C.S. Chang, S.C. Shei, C.W. Kuo, S.C. Chen. Solid-State Electron., **47**, 849 (2003).
- [5] Y.C. Lin, S.J. Chang, Y.K. Su, C.S. Chang, S.C. Shei, J.C. Ke, H.M. Lo, S.C. Chen, C.W. Kuo. Solid-State Electron., **47**, 1565 (2003).
- [6] C.H. Kuo, S.J. Chang, Y.K. Su, R.W. Chuang, C.S. Chang, L.W. Wu, W.C. Lai, J.F. Chen, J.K. Sheu, H.M. Lo, J.M. Tsai. Mater. Sci. Engin. B, **106**, 69 (2004).
- [7] И.П. Смирнова, Д.А. Закгейм, М.М. Кулагина, Л.К. Марков. Тез. докл. 4-й Всерос. конф. Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“ (СПб., 2005) с. 134.
- [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).

Редактор Л.В. Шаронова

AlGaInN LEDs with a transparent *p*-contact based on ITO thin films

I.P. Smirnova, L.K. Markov, A.S. Pavlyuchenko, M.V. Kukushkin⁺

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
⁺ ZAO Innovation Firm „TETIS“
194156 St. Petersburg, Russia

Abstract In this paper, the way to fabricate transparent conducting ITO films intended for use in blue LEDs has been developed. The maximum external quantum efficiency for LEDs with a *p*-contact based on the films obtained reaches 25%, while it is less than 10% for similar LEDs with a standard semitransparent metallic *p*-contact. The registered increase in the forward voltage from 3.15 to 3.37 V is not important for possible application of the films in LEDs since the optical power of the LEDs with a transparent ITO based *p*-contact is almost in 2.5 times higher than that for the chips with a metallic semitransparent *p*-contact at operating current of 20 mA. The LEDs with ITO based *p*-contacts operate successfully without any degradation at pumping currents 5 times higher than the rated operating current.