

УДК 533.9.07

Ю.С. Жидик, П.Е. Троян

## Технология формирования покрытий на светодиодных гетероструктурах методом магнетронного распыления на примере нанесения пленок ITO

Приводится изучение эффективности отвода заряженных частиц от подложки и растущей плёнки ITO, наносимой методом реактивного магнетронного распыления, используя различные отклоняющие системы. Установлено, что применение магнитной отводящей системы позволило уменьшить энергию электронов, достигающих подложки в пять раз, а концентрацию заряженных частиц – в 13 раз. При этом показано, что плёнки ITO, напыляемые при таких условиях, растут без дефектов.

**Ключевые слова:** ITO, магнетронное распыление, электронная бомбардировка подложки.

На данном этапе разработки и производства полупроводниковых приборов светодиоды являются одними из быстроразвивающихся приборов оптоэлектроники. Но, несмотря на то, что они изучаются уже довольно длительное время, существует ряд проблем при их изготовлении, связанных с эффектами полного внутреннего отражения [1], стягивания тока вблизи металлических контактов и его неравномерного распределения по поверхности гетероструктуры [2], защитой поверхности полупроводника от неблагоприятных воздействий внешней среды [3] и т.д. Для решения этих проблем можно успешно применять вакуумные методы нанесения покрытий с различными физическими свойствами, позволяющими значительно увеличить эффективность светодиодов. Наиболее приемлемыми методами вакуумного нанесения покрытий на гетероструктуры являются термическое и электронно-лучевое испарение (ЭЛИ), в то время как при нанесении покрытий методом магнетронного распыления (МР) гетероструктура прибора подвергается значительной бомбардировке высокоэнергетичными заряженными частицами, что вызывает в ней появление радиационных дефектов. С другой стороны, метод нанесения материалов МР при изменении различных технологических параметров позволяет в очень широких пределах проводить модификацию получаемых покрытий. Более того, как показали результаты структурного анализа плёнок оксида индия, легированного оловом (indium tin oxide, или ITO), полученных методами ЭЛИ и МР и приведенных авторами в [4], структура пленки, сформированной ЭЛИ, состоит из кристаллитов нитевидной формы, и для нее характерна рельефная поверхность, в то время как пленка, полученная МР, более плотная, с ровной внешней границей и, как следствие, с меньшим поверхностным сопротивлением.

В связи с этим в данной работе проводилось исследование уменьшения влияния плазмы газового разряда на подложку и осаждаемую на её поверхность ITO плёнку, используя как метод нанесения плёнки реактивное магнетронное распыление мишени, выполненной из сплава индий-олово в кислородосодержащей атмосфере.

**Методика проведения эксперимента.** Уменьшение влияния плазмы газового разряда осуществлялось путем подачи отрицательного потенциала 100 В на подложку относительно анода во время напыления (рис. 1, а), использованием магнитной ловушки для локализации плазмы вблизи распыляемой мишени (рис. 1, б), а также комбинацией этих методов (рис. 1, в).

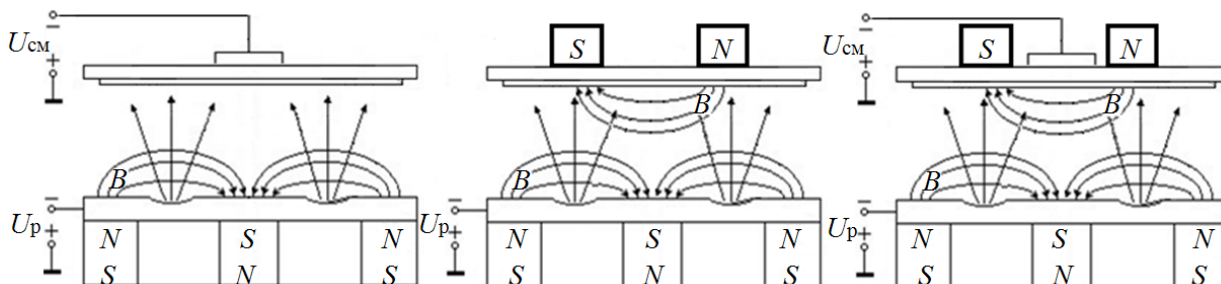


Рис. 1. Методы уменьшения влияния плазмы газового разряда на подложку и растущую пленку при магнетронном распылении

Для отслеживания эффективности каждого метода отвода заряженных частиц от подложки вблизи нее был установлен одиночный лэнгмюровский зонд (рис. 2, а), с помощью которого измерялась зондовая ВАХ плазменного разряда. Перестраивая ее в полулогарифмическом масштабе (рис. 2, б) и пользуясь выражением, связывающим температуру электронов и угловой коэффициент наклона прямой, аппроксимирующей участок зависимости логарифма электронного тока от потенциала (CD) [5] [формула (1)], можно вычислить температуру электронов:

$$T = \frac{e}{k} \left[ \frac{\partial \ln I_3}{\partial U} \right]^{-1}, \tag{1}$$

где  $e$  – заряд электрона;  $k$  – постоянная Больцмана.

Зная температуру электронов, легко определить концентрацию заряженных частиц:

$$n_0 = 4 \cdot \frac{I_{e0}}{e \cdot S \cdot \sqrt{\frac{8kT}{\pi \cdot m}}}, \tag{2}$$

где  $I_{e0}$  – значение электронного тока на зонде при отсутствии на нем задерживающего потенциала;  $S$  – площадь поверхности зонда, введенной в плазму.

Следует сказать, что поскольку параметры плазмы измерялись в скрещенных электрических и магнитных полях, то вычисленные значения носят исключительно сравнительный характер.

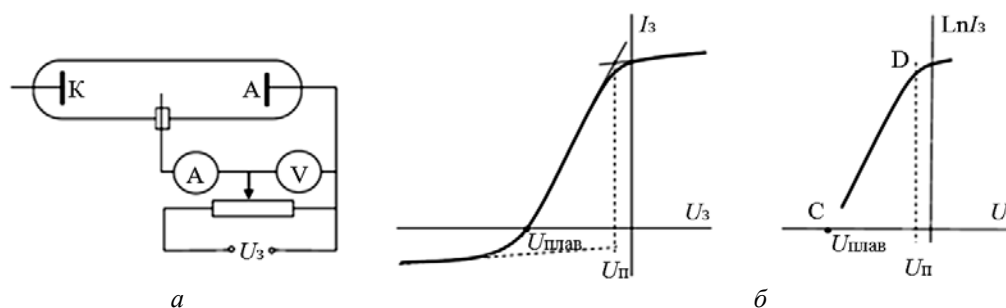


Рис. 2. Схема зондовых измерений (а) и зондовая вольт-амперная характеристика (б) в линейном (слева) и полулогарифмическом (справа) масштабах

Таким образом, эффективность того или иного метода можно определить путем измерения этих параметров плазмы вблизи подложки и их сравнения между собой.

**Результаты и обсуждение.** При формировании ИТО пленок важным моментом является получение соединений стехиометрического состава  $In_2O_3$  с легирующей добавкой Sn. Технология напыления ИТО-пленок стехиометрического состава методом магнетронного распыления нами ранее хорошо отработана и описана в [6]. Она позволяет целенаправленно управлять свойствами получаемых пленок и обеспечивает высокую воспроизводимость значения поверхностного сопротивления в  $10 \text{ Ом}/\square$  при прозрачности пленок, находящейся на уровне 87%. По этой технологии были напылены все образцы пленок. Разница состояла в применении того или иного из вышеописанных методов уменьшения влияния плазменного разряда на растущую пленку или применении их комбинации. Эффективность метода отвода заряженных частиц определялась путем измерения во время напыления зондовой ВАХ. Ее обработка по вышеописанной методике позволила вычислить основные параметры плазмы, которые занесены в таблицу.

**Результаты экспериментов по влиянию плазмы на растущую пленку**

Метод влияния на плазму	Температура электронов, К	Концентрация плазмы, $\text{м}^{-3}$	Параметры пленки
Отсутствует	59763	$5,95 \cdot 10^{12}$	$\rho_s = 11,5 \text{ Ом}/\square$ $d = 80 \text{ нм}$ (рис. 3, а)
Подача напряжения на подложку –100 В	50877	$5,94 \cdot 10^{12}$	$\rho_s = 19 \text{ Ом}/\square$ $d = 80 \text{ нм}$
Использование магнитной ловушки	16738	$4,5 \cdot 10^{11}$	$\rho_s = 74 \text{ Ом}/\square$ $d = 55 \text{ нм}$
Комбинация обоих методов и увеличение времени напыления в 2 раза	11164	$4,47 \cdot 10^{11}$	$\rho_s = 60 \text{ Ом}/\square$ $d = 110 \text{ нм}$ (рис. 3, б)

Таким образом, подача отрицательного потенциала на подложку дало лишь небольшое снижение энергии электронов, не влияя на концентрацию заряженных частиц в плазме. Наиболее эффективным методом уменьшения влияния плазмы газового разряда на подложку и растущую пленку оказалась локализация плазмы в области распыления мишени магнитной отводящей системой. Это дало уменьшение энергии электронов, достигающих подложки более чем в 3,5 раза, однако их концентрация в этой области уменьшилась всего на порядок.

По всей видимости, более эффективное отведение электронного облака от подложки возникает при совместном применении отводящей системы и подачи отрицательного потенциала на подложку. В свою очередь, комбинация обоих методов позволила еще сильнее снизить энергию электронов, при этом концентрация заряженных частиц в плазме почти не изменилась. Таким образом, энергию электронов в целом удалось уменьшить в 5 раз, а концентрацию плазмы снизить более чем в 13 раз.

Кроме того, уменьшение влияния плазмы газового разряда на растущую пленку вызвало уменьшение скорости роста и увеличение сопротивления. При более детальном изучении поверхностей пленок было замечено, что полученные пленки с низким поверхностным сопротивлением, напыленные без отвода плазмы от подложки, обладают ровной однородной структурой (рис. 3, а) в то время как на пленках, напыленных с применением отводящей системы, обнаружены ярко выраженные трещины (рис. 3, б), которые, являясь дефектами пленок, несомненно, увеличили их поверхностное сопротивление.

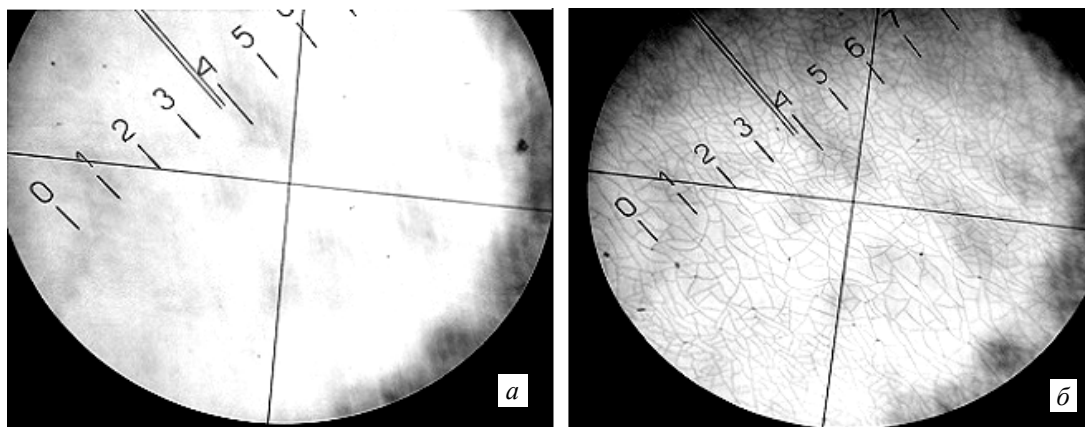


Рис. 3. Поверхности полученных образцов ИТО-пленок

Растрескивание пленки при ее напылении с применением отводящей системы, вероятно, обусловлено тем, что, отводя высокэнергетичные электроны от подложки, которые ее разогревали, была значительно уменьшена температура подложки во время напыления (ориентировочно на 100–150 °С). В результате в растущей пленке возникают сильные механические напряжения.

Устранить данное явление позволил нагрев подложки непосредственно во время напыления индивидуальным нагревателем. Для этого был изготовлен фотонный нагреватель, нагревательным элементом в котором явились галогенные лампы общей мощностью 200 Вт. Нагреватель позволил поддерживать температуру подложки во время напыления на уровне 200–250 °С, что необходимо для получения кристаллитов больших размеров в ИТО-пленке. При таком поддержании температуры рост пленки происходит без образования дефектов, что явилось причиной снижения ее поверхностного сопротивления в среднем до 25 Ом/□.

Таким образом, проведенное исследование позволило откорректировать технологию и разработать оснащение магнетронной распылительной системы, позволяющее наносить прозрачные электропроводящие ИТО покрытия методом магнетронного распыления на светодиодные гетероструктуры при отсутствии бомбардировки заряженными частицами плазмы подложки и растущей пленки.

**Заключение.** Исследование методов отвода высокоэнергетичных заряженных частиц от подложки и растущей пленки при нанесении покрытий методом реактивного магнетронного распыления позволило получить следующие результаты:

1. Оснащение магнетронной системы распыления магнитной отводящей системой позволило предотвратить бомбардировку подложки и растущей на ней пленки. При этом энергию электронов удалось уменьшить в 5 раз, а концентрацию плазмы – более чем в 13 раз.

Выявлено, что отвод от предварительно нагретой подложки высокоэнергетичных частиц во время напыления ИТО ведёт к её быстрому остыванию и, как следствие, росту количества дефектов в плёнке и увеличению поверхностного сопротивления. Данную проблему удалось разрешить, обеспечив поддержание температуры подложки на уровне 200 °С с помощью дополнительно установленного галогенного нагревателя. Установлено, что плёнки, напыляемые при таких условиях, растут без дефектов и, как следствие, без существенного изменения параметров.

#### *Литература*

1. Данилина Т.И. Создание микрорельефных поверхностей в просветляющих оптических покрытиях для повышения внешней квантовой эффективности синих светодиодов на основе GaN / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, И.А. Чистоедова // Доклады ТУСУРа. – Томск, 2011. – № 2(24), ч. 2. – С. 64–67.
2. Effect of ITO spreading layer on performance of blue light-emitting diodes / M.V. Bogdanov, K.A. Bulashevich, O.V. Khokhlev, I.Yu. Evstratov, M.S. Ramm, S.Yu. Karpov // Phys. stat. solid. – 2010. – № 7–8. – P. 2127.
3. Hard Carbon Coating (DLC: «Diamond-Like Coating») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tydexoptics.com/materials1/coatings/dlccoatings/>, свободный (дата обращения: 04.08.2014).
4. Оптимизация технологии нанесения тонких пленок ИТО, применяемых в качестве прозрачных проводящих контактов светодиодов синего и ближнего ультрафиолетового диапазонов / И.П. Смирнова, Л.К. Марков, А.С. Павлюченко, М.В. Кукушкин, С.И. Павлов // Физика и техника полупроводников (Санкт-Петербург). – 2014. – Т. 48, вып. 1. – С. 61–66.
5. Битнер Л.Р. Вакуумная и плазменная электроника: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 148 с.
6. Троян П.Е. Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУРа. – Томск, 2014. – № 1(31). – С. 99–102.

---

#### **Жидик Юрий Сергеевич**

Студент каф. физической электроники (ФЭ) ТУСУРа

Тел.: 8-923-414-12-32

Эл. почта: Zhidikyur@mail.ru

#### **Троян Павел Ефимович**

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. ФЭ

Тел.: 8 (383-2) 41-39-36

Эл. почта: P.E.Troyan@mail.ru

Zhidik Y.S., Troyan P.E.

#### **Formation technology of LED heterostructure coating by magnetron sputtering on the example of ITO film application**

The article provides a study of the effectiveness removal of charged particles from the substrate and the growing ITO film deposition by reactive magnetron sputtering using different deflection system. It is found that the use of magnetic outlet system has reduced the energy of electrons reaching the substrate up to five times, and the concentration of charged particles to thirteen times, while it is shown that ITO film, sprayed under these conditions grow without defects.

**Keywords:** ITO, magnetron sputtering, electron implantation of the substrate.