

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ
ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ ПУТЕМ
НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПЛЕНОК АЛЮМИНИЯ

Смирнов А.Г.¹, Степанов А.А.¹, Жук С.Д.¹,
Безбородов В.С.², Черник А.А.², Жилинский В.В.²

¹Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск

²Белорусский Государственный Технологический Университет, Минск

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования оптически прозрачных проводящих покрытий путем наноструктурирования пленок алюминия, которые могут рассматриваться в качестве альтернативы легированным широкозонным полупроводникам типа In_2O_3 , ZnO_x и др., которые уже не отвечают всем требованиям современного массового производства устройств оптоэлектроники (дисплеи, солнечные элементы, сенсорные панели, «умные стекла» и др.).

Оптическое пропускание и поверхностное сопротивление являются наиболее важными параметрами независимо от их применения в элементах и устройствах оптоэлектроники. В зависимости от применения, поверхностное сопротивление прозрачных электродов может изменяться в диапазоне от $10 \text{ Ом}/\square$ до $10^6 \text{ Ом}/\square$, но оптическая прозрачность требуется на уровне 80% и выше. Поверхностное сопротивление $10^6 \text{ Ом}/\square$ является достаточным для антистатических применений, $400 \dots 1000 \text{ Ом}/\square$ – для различных типов сенсорных панелей, $15 \dots 90 \text{ Ом}/\square$ – для жидкокристаллических дисплеев и сопротивление менее $10 \text{ Ом}/\square$ требуется для органических светоизлучающих диодов и солнечных элементов [1].

Необходимо отметить, что наносетчатая алюминиевая пленка обладает электрической проводимостью за счет металла и оптической прозрачностью за счет пор.

Известно, что поверхностное сопротивление равномерной тонкой металлической пленки определяется как $R_{sh} = 1/(\sigma_0 h) = \rho_0/h$ с размерностью $\text{Ом}/\square$, где σ_0 и ρ_0 проводимость и сопротивление металла соответственно, h – толщина пленки. В случае двумерной наносетчатой алюминиевой пленки, в соответствии с перколяционной теорией, эффективная проводимость может быть записана в виде $\sigma_c = \sigma_o(\varphi_f - \varphi_{crit})^k$, где σ_c – проводимость наносетчатой алюминиевой пленки, σ_o – проводимость алюминиевой пленки, φ_f – объемная часть алюминиевой наносетки, φ_{crit} является перколяционным порогом протекания, при котором проводимость наносетчатой алюминиевой пленки равна нулю, k – критическая экспонента. Объемная

часть алюминиевой наносетки φ_f может быть найдена как $(1 - f)$, где f – коэффициент заполнения, определяемый как $f = \pi D_p^2 / 2\sqrt{3}D_c^2$ (отношение площади пор к площади ячейки). В случае гексагональной наносетчатой пленки $\varphi_{crit} = 1 - \pi/2\sqrt{3}$. Этот случай достигается, когда соседние поры находятся в контакте друг с другом при $D_p = D_c$. Нами было выбрано и подтверждено экспериментально значение $k = 2.1$.

Определим зависимость поверхностного сопротивления наносетчатой алюминиевой пленки R_{mesh} от времени ее формирования t . Удельное электрическое сопротивление алюминия ρ_0 примем равным 30 Ом·нм.

$$R_{mesh} = \frac{\rho_0}{h(t) \left(1 - f(t) - 1 + \frac{\pi}{2\sqrt{3}}\right)^k} = \frac{\rho_0}{\left(\frac{\sqrt{3}D_c}{6} - \frac{vt}{2}\right) \left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}} - \frac{2\pi\left(\frac{2}{\sqrt{3}}D_c vt - v^2 t^2\right)}{\sqrt{3}D_c^2}\right)^k} \quad (3.1)$$

Зависимость 3.1 не учитывает возможное увеличение удельного электрического сопротивления за счет рассеяния электронов на границах зерен и в местах наносетки с толщинами, меньшими длины свободного пробега электронов (~ 20 нм в алюминиевых пленках). Следует отметить, что для наносетчатых алюминиевых пленок с одинаковым коэффициентом заполнения f эффективное сопротивление уменьшается в два раза при увеличении в два раза размера ячейки наносетчатой алюминиевой пленки. Таким образом, из приведенных результатов следует, что существует теоретическая возможность получать наносетчатые алюминиевые пленки с заданным эффективным сопротивлением, варьируя промежутком времени ее формирования в зависимости от размера ячейки.

Исследуемые образцы изготавливали по методике, описанной в [2] с коэффициентом заполнения f от 0 до 0,8. Эффективное сопротивление наносетчатых алюминиевых пленок измеряли 2-х зондовым методом с помощью мультиметра MAS-345. Типичные зависимости для наносетчатых алюминиевых пленок, полученных в 0,04 М щавелевой кислоты при напряжении анодирования 80 В представлены на рис. 1.

Результаты измерений для наносетчатых алюминиевых пленок, полученных в 0,3 М серной кислоты при напряжении анодирования 20 В, представлены на рисунке 2.

Установлено, что эффективное сопротивление пленок полученных при напряжении анодирования 20 В может варьироваться в пределах от 10 до 2000 Ом/□, а при напряжении анодирования 80 В – от 4,5 до 300 Ом/□.

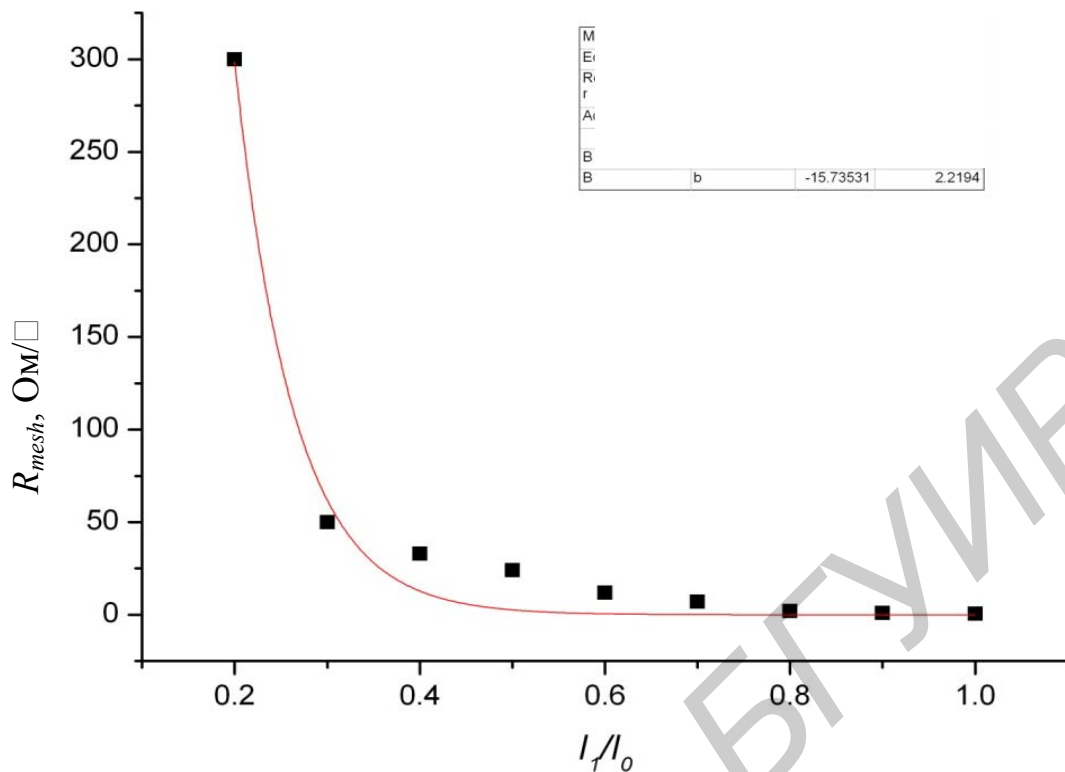


Рисунок 1 – Зависимость эффективного сопротивления R_{mesh} от коэффициента заполнения f наносетчатых алюминиевых пленок с размером ячеек D_c 200 нм

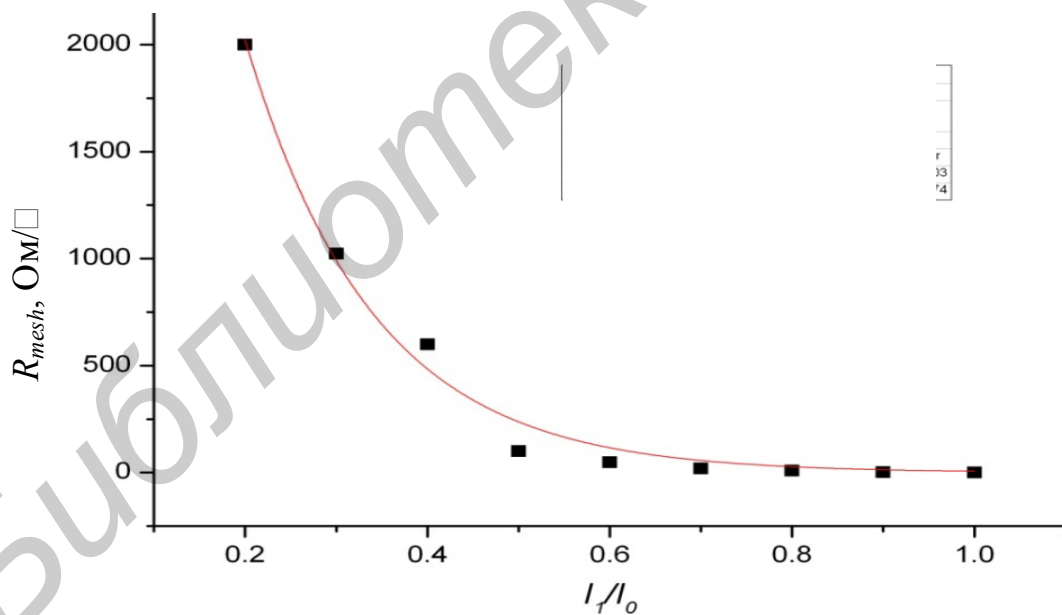


Рисунок 2 – Зависимость эффективного сопротивления R_{mesh} от коэффициента заполнения f наносетчатых алюминиевых пленок с размером ячеек D_c 50 нм

Для того чтобы качественно и количественно оценить зависимость оптической прозрачности наносетчатых алюминиевых пленок в видимом диапазоне длин волн (380 – 780 нм) от ее характеристических параметров, допустим, что все оптическое излучение проходит через поры наносетча-

той пленки и не проходит сквозь алюминий. Данное допущение позволяет рассчитать интегральное пропускание в указанном спектральном диапазоне, но не дает возможности вычислить рассеяние света от наносетчатой алюминиевой пленки и ее пропускание для каждой длины волны.

Из нашего допущения следует линейная зависимость между оптическим пропусканием T и коэффициентом заполнения f наносетчатых алюминиевых пленок, то есть можно записать следующее соотношение:

$$T(f) = \frac{S_p}{S_c} \cdot 100\% = f \cdot 100\%.$$

Так как максимально возможное значение коэффициента заполнения для наносетчатых алюминиевых пленок составляет 0,9, то максимальное значение интегрального оптического пропускания может достигать 90%.

Определим зависимость интегрального оптического пропускания T от времени формирования наносетчатой алюминиевой пленки t в виде:

$$T(t) = \frac{S_p(t)}{S_c} = \frac{2\pi \left(\frac{2}{\sqrt{3}} D_c v t - v^2 t^2 \right)}{\sqrt{3} D_c^2} \cdot 100\%.$$

Таким образом, варьируя время формирования наносетчатых алюминиевых пленок с размером ячеек 200 нм в промежутке от 10 до 90 с, возможно получать пленки с интегральным коэффициентом пропускания от 10 до 90%.

Литература

1. D.S. Hecht, L.B. Hu, G. Irvin, Adv. Mater. 23, 1482 (2011)
2. А.Г.Смирнов, А.А.Степанов, Структура, морфология и электрофизические свойства прозрачных наносетчатых пленок алюминия // Доклады БГУИР, № 5 (67), 2012, С. 21-29.

FABRICATION OF TRANSPARENT CONDUCTIVE COATINGS DUE TO ALUMINUM NANOSTRUCTURING

Smirnov A.G.¹, Stepanov A.A.¹, Zhuk S.D.¹,
Bezborodov V.S.², Chernik A.A.², Zhilinskiy V.V.²

¹Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk
²Belarusian State Technological University (BSTU), Minsk

Theoretical and experimental results on transparent conductive coatings fabricated due to aluminum nanostructuring are presented. These coatings could replace the wide band doped semiconductors like In_2O_3 , ZnO_x , which do not suit anymore to all demands of modern optoelectronic devices mass production (displays, solar cells, sensors, smart windows e.t.c).