

Г. Демеуова<sup>1</sup> , Б. Аманжулов<sup>1</sup> , М. Кайканов<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Национальная лаборатория Астана, Назарбаев Университет, г. Нур-Султан, пр. Кабанбай батыра, 53, 010000 Казахстан

<sup>2</sup>Назарбаев Университет, Школа естественных и социальных наук, департамент физики, г. Нур-Султан, пр. Кабанбай батыра, 53, 010000 Казахстан

e-mail: [marat.kaikanov@nu.edu.kz](mailto:marat.kaikanov@nu.edu.kz)

## ПОЛУЧЕНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА БАЗЕ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОПРОВОДОВ

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментального исследования параметров созданных прозрачных проводящих покрытий на базе синтезированных серебряных нанопроводов (AgNWs). Серебряные нанопровода синтезированы посредством разработанной модификации полиольного метода. Полученные нанопровода имеют диаметр 60-80 нм при длине 20-30 мкм. Посредством спин-коутинга AgNWs нанесены на прозрачные подложки (микроскопические стекла, 5x2.5 см<sup>2</sup>). В результате созданы покрытия с различной прозрачностью от 77 до 91%. Для улучшения проводимости перколяционной сети из AgNWs применены два метода пост-обработки покрытий: традиционный метод термического отжига (в течение 40 с при 220 °С), а также низкотемпературный метод - нанесение дополнительного покрытия PEDOT:PSS на поверхность токопроводящего слоя AgNWs. Получено, что при прозрачности проводящего покрытия 91% термический отжиг позволяет снизить поверхностное сопротивление с 380 до 43 Ом/кв. Нанесение дополнительного покрытия PEDOT:PSS без термической обработки позволило снизить поверхностное сопротивление покрытия до 19 Ом/кв, при этом прозрачность снижается незначительно – до 88%. Проводящие покрытия испытаны в качестве прозрачных нагревателей. Максимальная достигнутая температура при разности потенциалов 12 В составила 140 °С.

**Ключевые слова:** серебряные нанопровода, прозрачные нагреватели, прозрачные проводящие покрытия

G. Demeuova<sup>1</sup> , B. Amanzhulov<sup>1</sup> , M. Kaikanov<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> National Laboratory of Astana, Nazarbayev University, Nur-Sultan, Kabanbay batyrave., 53, 010000 Kazakhstan

<sup>2</sup> Nazarbayev University, School of Sciences and Humanities, Physics Department, Nur-Sultan, Kabanbay batyrave., 53, 010000 Kazakhstan

e-mail: [marat.kaikanov@nu.edu.kz](mailto:marat.kaikanov@nu.edu.kz)

## FABRICATION OF TRANSPARENT CONDUCTING COATINGS BASED ON SILVER NANOWIRES

**Abstract.** This paper demonstrates the results of the experimental investigation of transparent conducting coatings based on synthesized silver nanowires (AgNWs). Silver nanowires were synthesized using the developed modification of the polyol method. The obtained nanowires have a diameter of 60-80 nm and a length of 20-30 micrometers. With help of spin-coater, AgNWs were coated onto transparent substrates (microscopic glass slides, 5x2.5 cm<sup>2</sup>). As a result, coatings with various transparency ranging from 77 to 91% were fabricated. To improve the conductivity of the percolation network of AgNWs, two post-treatment methods for coatings were applied: the traditional method of thermal annealing (for 40 s at 220 °C) and the low-temperature method – deposition of additional PEDOT:PSS coating onto the surface of the conducting layer of AgNWs. It was discovered that at a transmittance of 91% thermal annealing allows decreasing sheet resistance from 380 to 43 Ohm/sq. Deposition of additional PEDOT:PSS coating without thermal treatment allowed to reduce the coating's surface resistance to 19 Ohm/sq, while transmittance decreased slightly – to 88%. Conducting coatings were tested as transparent heaters. The maximum temperature achieved in 2 min at applied potential difference of 12V was 140 °C.

**Keywords:** silver nanowires, transparent heaters, transparent conducting coatings

Г. Демеуова<sup>1</sup> , Б. Аманжулов<sup>1</sup> , М. Кайканов<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>Астана Ұлттық Лабораториясы, Назарбаев Университеті, Нұр-Сұлтан қаласы, Қабанбай батыр даңғылы, 53<sup>2</sup>Назарбаев Университеті, Жаратылыстану, әлеуметтік және гуманитарлық ғылымдар мектебі, Нұр-Сұлтан қаласы, Қабанбай батыр даңғылы, 53,[e-mail: marat.kaikanov@nu.edu.kz](mailto:marat.kaikanov@nu.edu.kz)

## КҮМІС НАНОСЫМДАР НЕГІЗІНДЕ МӨЛДІР ӨТКІЗГІШ ЖАБЫНДЫЛАРДЫ ЖАСАУ

**Аннотация.** Мақалада синтезделген күміс наносымдар (AgNWs) негізінде жасалған мөлдір өткізгіш жабындылардың параметрлерін эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген. Күміс наносымдар полиол әдісінің құрастырылған модификациясы арқылы синтезделген. Алынған наносымдардың диаметрі 60-80 нм, ал ұзындығы 20-30 мкм. Мөлдір төсеніштерге (микроскопиялық әйнектер,  $5 \times 2,5 \text{ см}^2$ ) AgNWs спин-коутинг арқылы салынған. Нәтижесінде мөлдірлігі 77-ден 91% -ға дейінгі әртүрлі жабындар жасалынған. AgNW-дан тұратын перколяция желісінің өткізгіштігін жақсарту үшін жабындыларды кейінгі өңдеудің екі әдісі қолданылды: дәстүрлі термиялық қыздыру әдісі (220 °C температурасында 40 с), сондай-ақ төменгі температуралы әдіс - AgNWs-дың ток өткізгіш қабатының бетіне PEDOT:PSS қосымша жабындысын салу. Өткізгіш жабындысының 91% мөлдірлігінде термиялық қыздыру беттік электрлік кедергіні 380-нен 43 Ом/шаршыға дейін төмендетуге мүмкіндік беретіні анықталды. PEDOT:PSS қосымша жабындысын термиялық өңдеусіз жағу жабындының беттік кедергісін 19 Ом/шаршыға дейін төмендетуге мүмкіндік берді, бұл кезде мөлдірлігі 88%-ға дейін елеусіз төмендейді. Өткізгіш жабындылар мөлдір қыздырғыш ретінде сыналды. 12 В потенциалдар айырмасы кезінде жеткен максималды температура 140 °C болды.

**Түйін сөздер:** күміс наносымдар, мөлдір қыздырғыштар, мөлдір өткізгіш жабындылар.

### Введение

В настоящее время исследованиям прозрачных токопроводящих (проводящих) покрытий уделяется особый интерес во многих исследовательских центрах, поскольку современные технологии имеют тенденцию к широкому распространению приборов на базе прозрачных оптоэлектронных устройств: современные солнечные ячейки (органические и перовскитные), тач-скрины (touch-screens), прозрачные нагреватели и т.д. [1-2]. На сегодняшний день наибольшее распространение в качестве проводящего оптически прозрачного покрытия получил допированный индием оксид олова (Indiumdoped tin oxide - ITO), обладающий как высокой электрической проводимостью, так и прозрачностью. Однако, высокая стоимость необходимых компонентов (в частности, индия) и потребность в высоковакуумном осаждении и последующем высокотемпературном отжиге, делают производство ITO покрытий очень дорогостоящим процессом.

Вследствие этого, интенсивно ведутся исследования альтернативных материалов, которые могут быть применены для создания прозрачных проводящих покрытий. Анализируются, в частности, такие материа-

лы, как углеродные нанотрубки, графен, металлические нанопленки, металлическиенанопровода [3-6] и т.д. При этом наиболее привлекательным материалом для создания прозрачных проводников являются серебряные нанопровода- AgNWs, применение которых имеет ряд преимуществ: высокая электрическая проводимость серебра, высокая прозрачность наносимых покрытий, простота и низкая стоимость синтеза, простота нанесения покрытия на прозрачные подложки [1-2]. Характерный диаметр нанопроводов из серебра, при котором покрытие на их основе имеет высокую прозрачность, составляет не более 100-110 нм.

Наиболее распространенным и интенсивно исследуемым методом синтеза нанопроводов серебра является полиольный метод (polyolsynthesis), впервые описанный в 2002 г. [7-9]. Традиционный полиольный синтез является жидкофазным процессом, не требующим использования дорогостоящего вакуумного и высокотемпературного оборудования, что обуславливает его простоту и эффективность. Основные стадии традиционного полиольного синтеза нанопроводов серебра следующие. Нитрат серебра  $\text{AgNO}_3$  вводится в этиленгликоль, выступающий

одновременно как растворителем, так и восстановителем ионов серебра. В этиленгликоле предварительно растворен полимер поливинилпирролидон (PVP), выступающий в качестве капсулирующего агента. При растворении серебра и его восстановлении до атомарного состояния  $Ag^0$ , в растворе происходит нуклеация и образование анизотропных зародышей серебра - five-twinned silverseeds - тетраэдрических нанокластеров, имеющих форму пентагональных бипирамид, ограниченных гранями [111]. При последующем встраивании (осаждении) атомов  $Ag^0$  на данные наночастицы, помимо граней [111], образуются грани [100]. Присутствующий в растворе PVP селективно сорбируется на гранях [100], блокируя рост частиц в диаметральном направлении. В результате, осаждение атомов серебра происходит преимущественно на грани [111], что обуславливает рост нанопроводов.

Позже протокол полиольного синтеза серебряных нанопроводов подвергся различным модификациям. Было предложено добавление в реакцию смесь различных хлорид-содержащих компонентов для эффективности нуклеации и кластерообразования зародышей нанопроводов, изменены температурные диапазоны синтеза и методы введения нитрата серебра в реакцию смесь, а также исследованы различные молярные соотношения реагирующих компонентов в реакционной смеси и т.д. [10-16]. Каждый новый метод, отличающийся от исходного варианта, предложенного в [7-9], принято называть «модифицированным». Модифицированные методы полиольного синтеза, в итоге, позволяют либо увеличить соотношение длины к диаметру нанопроводов (aspect-ratio), либо уменьшить количество синтезируемого в образце нежелательных компонентов – наночастиц серебра. Следует особо отметить, что и на данный момент предлагаются новые модификации полиольного метода синтеза AgNWs [1, 2]. Таким образом, исследование непосредственно синтеза серебряных нанопроводов является актуальной темой исследования.

Помимо относительной простоты синтеза AgNWs, их перспективность применения в создании прозрачных проводящих покрытий обусловлена простотой нанесения

на прозрачные подложки. Нанопровода диспергируют в жидкости (в этиловом либо изопропиловом спиртах, либо в дистиллированной воде), затем наносят на подложки. Полученное покрытие представляет собой разупорядоченную сеть. Проводимость покрытия зависит от контактного сопротивления между нанопроводами. Однако, после синтеза, поверхность серебряных нанопроводов покрыта тонким слоем диэлектрика (PVP), препятствующим протеканию тока и снижающим проводимость всего покрытия. Поэтому для снижения поверхностного сопротивления, необходима дополнительная обработка. Традиционным методом снижения поверхностного сопротивления является термический отжиг при температуре 200-400 °C [1,2]. Также предложены различные низкотемпературные методы снижения контактного сопротивления между пересекающимися нанопроводами [1, 17-21].

Одним из распространенных применений прозрачных проводящих покрытий являются прозрачные нагреватели, которые используются в системах анти-обледенения окон, лобовых стекол автомобилей, уличных электронных дисплеев [22-29]. Кроме того, прозрачные нагреватели могут использоваться в биомедицине, а также в лабораторных экспериментах, когда требуется разогрев системы с доступом света. Повышение температуры происходит за счет джоулева нагрева покрытия при протекании через него электрического тока.

В данной работе предложена одна из модификаций синтеза серебряных нанопроводов. На базе синтезированных AgNWs созданы прозрачные проводящие покрытия. В качестве метода пост-обработки полученных покрытий применены два подхода: первый - термический отжиг на плитке (220 °C в течение 40 с); второй – покрытие серебряных нанопроводов полимером PEDOT:PSS. Полученные покрытия использованы для создания прозрачных нагревателей.

### Детали эксперимента

#### Синтез серебряных нанопроводов

Серебряные нанопровода были синтезированы посредством модифицированного полиольного метода. Основные стадии синтеза следующие:

- 0,4 г поливинилпирролидона (PVP) добавлялось в 75 мл этиленгликоля (EG) в конической колбе с плоским дном (емкость колбы 100 мл). Полное растворение PVP происходило на плитке с магнитной мешалкой при температуре 130°C и скорости помешивания 500 об./мин в течение 30 мин. Далее растворенный в EG PVP перемещался на вторую магнитную мешалку при комнатной температуре и постоянном помешивании 500 об./мин на 30 мин до полного остывания раствора;

- после полного остывания, в раствор PVP в EG добавлялось 0,5 г  $\text{AgNO}_3$  (в виде исходного порошка).  $\text{AgNO}_3$  полностью растворялся в течении 10 мин при помешивании 500 об./мин при комнатной температуре;

- параллельнозаблаговременно готовился раствор NaCl и KBr в EG. 0,1 г NaCl и 0,015 г KBr растворялись в 20 мл EG в ультразвуковой ванне;

- Спустя 10 мин после растворения  $\text{AgNO}_3$  в смеси PVP в EG, в колбу добавлялось 200 мкл ( $\mu\text{L}$ ) раствора NaCl и KBr в EG. Полученная смесь смешивалась при комнатной температуре (500 об./мин) в течение 2 мин;

- Далее колба с растворенными реагентами помещалась на плитку при температуре 130 °C и помешивалась (500 об./мин). Спустя 10 мин. помешивание отключалось (температура, при этом, оставалась 130 °C). Нанопровода серебра образовывались в растворе спустя 5 часов синтеза.

После синтеза реакционная смесь снималась с плитки и остужалась до комнатной температуры. Далее в смесь добавлялось 100 мл этилового спирта. Очистка образцов от этиленгликоля и иных остаточных компонентов (включая наночастицы) проводилась посредством центрифугирования при 1500 об./мин в течение 10 мин, в результате которого серебряные нанопровода оседали на дно пробирок. Жидкофазная часть смеси аккуратно удалялась из пробирок. Оставшийся в пробирке осадок повторно заливался этиловым спиртом. Очистка посредством центрифугирования проводилась три раза. После очистки серебряные нанопровода помещались в этанол для хранения и дальнейшего использования.

*Создание прозрачных проводящих покрытий*

Нанопровода серебра, находящиеся после синтеза в этиловом спирте, наносились на прозрачные подложки (микроскопические стекла) размером  $5 \times 2,5 \text{ см}^2$  посредством спин-коутинга при скорости вращения 1000 об./мин в течение 2 мин. За 2 мин большая часть этанола удалялась с поверхности образцов естественным путем. После спин-коутинга подложки прогревались на плитке при 60 °C в течение 5 мин до полного испарения этанола с поверхности. Для создания покрытий с различной прозрачностью, в экспериментах варьировалось количество циклов спин-коутинга (количество слоев), наносимых на поверхность подложки: 1, 2, 4 и 7 циклов. В результате получены образцы покрытий с различной прозрачностью (детали полученных результатов представлены ниже)

После нанесения на подложки для повышения проводимости полученные покрытия обрабатывались двумя методами пост-обработки. Первый: отжиг на плитке при температуре 250 °C в течение 40 с. Второй: нанесение на поверхность нанопроводов дополнительного слоя PEDOT:PSS [24] (спин-коутинг, 2000 об./мин, 40 с).

#### *Создание прозрачных нагревателей*

Прозрачные проводящие покрытия были испытаны в качестве нагревателей. Нагрев подложек происходил за счет Джоулева разогрева при протекании через слой серебряных нанопроводов постоянного тока.

Для этого, к двум противоположным сторонам подложек, покрытых слоем нанопроводов, прикреплялись медные электроды (фиксация происходила посредством медного токопроводящего скотча и зажимов), к которым прикладывалась разность потенциалов от источника постоянного тока ВК Precision 1686А.

#### *Методы исследования*

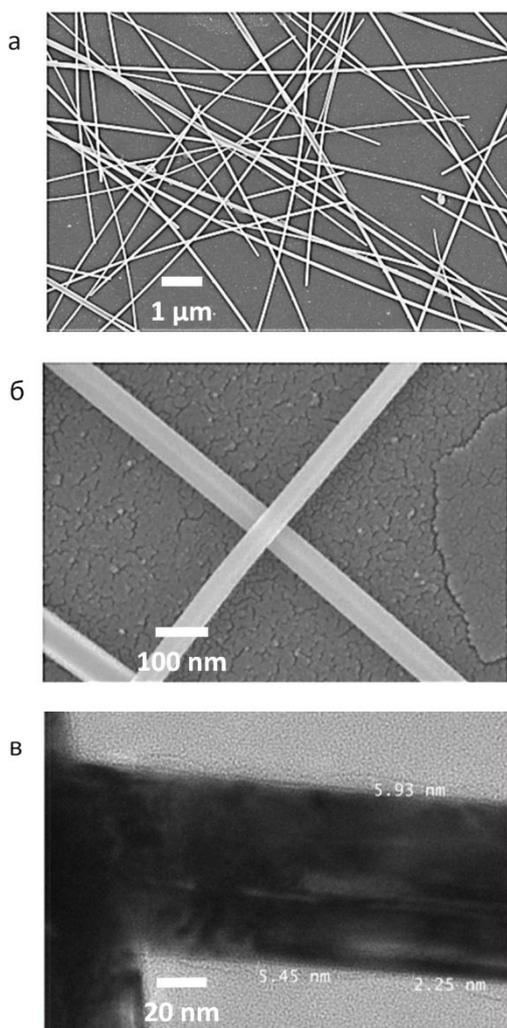
Морфология синтезированных нанопроводов исследовалась методами сканирующей (сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) CarlZeissCrossbeam 540) и просвечивающей (просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEOL JEM-1400 Plus) электронной микроскопии. Спектр пропускания (transmittancespectra, T) созданных покрытий исследовался с помощью спектрометра PerkinElmer UV-VIS-NIR

Spectrophotometer. Поверхностное сопротивление (sheetresistance) покрытий измерялась четырех-зондового метода на приборе Jandel RM3000. Температура прозрачных нагревателей фиксировалась с помощью ИК-тепловизораSKFThermalCameraTKTI31.

### Полученные результаты

На рисунке 1 представлены СЭМ и ПЭМ снимки синтезированных посредством предложенной нами модификации полиольного синтеза нанопроводов. Диаметр нанопроводов составил 60-80 нм при длине порядка 20-30 мкм (рисунки 1 а, б).

Поверхность нанопроводов, как видно на ПЭМ снимке (рисунок 1в), распределен остаточной слой полимера PVP, использованный при синтезе нанопроводов. Толщина диэлектрического слоя PVP составляет порядка 3-6 нм.



а,б – СЭМ снимки при различных увеличениях (для демонстрации длины и диаметра синтезированных AgNWs),

в – ПЭМ снимок (отмечена толщина слоя PVPв различных областях)

### Рисунок 1 – Синтезированные нанопровода серебра

Как отмечалось ранее, нанесенные на поверхность стеклянной подложки серебряные нанопровода образуют перколяционную сеть (рисунок 1а). Изменяя количество циклов нанесения слоев серебряных нанопроводов (методом спин-коутинга) были получены покрытия с различной прозрачностью (рис. 2). В качестве прозрачности проводящего покрытия указывается значение при 550 нм[1-3]. В наших экспериментах прозрачность составила от 77 до 91%.

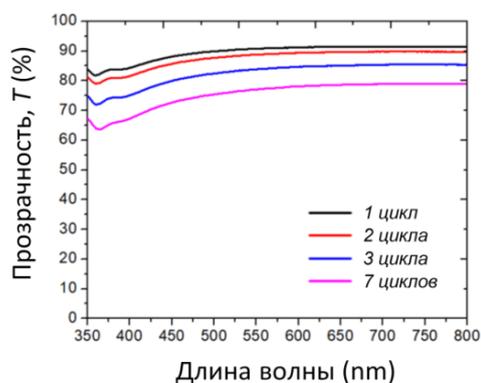


Рисунок 2 – Спектры пропускания созданных покрытий при различном количестве циклов нанесения серебряных нанопроводов методом спин-коутинга.

На рис. 3 показаны фотографии подложек после отжига и после нанесения дополнительного покрытия PEDOT: PSS.

Термический отжиг серебряных нанопроводов не привел к изменению спектра пропускания покрытия. В то же время, нанесение дополнительного слоя PEDOT:PSSснизило прозрачность покрытий на 3-5 % (рис. 4).

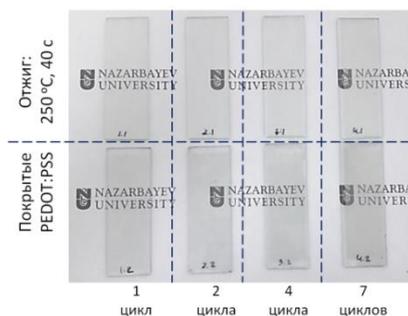


Рисунок 3 – Фотография образцов после термической обработки (верхний ряд) и после нанесения слоя PEDOT:PSS (нижний ряд)

Наименьшее поверхностное сопротивление после термической обработки составило 7 Ом/кв при прозрачности 77%. Исходное поверхностное сопротивление, при этом, составляло 32 Ом/кв. Нанесение дополнительного покрытия PEDOT: PSS при данной исходной прозрачности позволило снизить сопротивление до 5 Ом/кв, при этом прозрачность снизилась до 73 %.

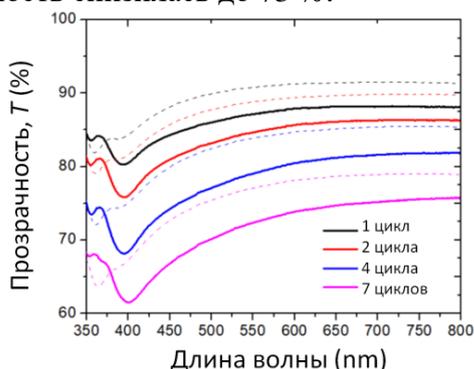


Рисунок 4 –Спектры пропускания покрытий после термической обработки и после нанесения слоя PEDOT:PSS(пунктирные линии – после термической обработки, сплошные линии – после с нанесенным PEDOT:PSS).

Оба примененных метода пост-обработки привели к существенному снижению поверхностного сопротивления пленок. В таблице 1 указаны значения  $R_{sh}$  пленок AgNWs до и после обработки.

Таблица 1. Поверхностное сопротивление покрытий до и после обработки в зависимости от количества циклов нанесения слоев AgNWs

К-во циклов-на-несения	Поверхностное сопротивление, $R_{sh}$ (Ом/кв)		
	Исходные	Терм.отжиг	Покрытые PEDOT:PSS
1	380	43	19
2	210	20	12
4	92	10	7
7	32	7	5

В то же время, нанесение дополнительного слоя PEDOT:PSS позволило снизить поверхностное сопротивление покрытия с 380 до 19 Ом/кв при несущественном снижении прозрачности с 91 до 89%. При этом термический отжиг позволил снизить поверхностное сопротивление до 43 Ом/кв, но без влияния на исходную прозрачность. Следует особо отметить, что поверхностное сопротивление нанесенного на подложки только слоя PEDOT:PSS без AgNWs составляет более  $200 \cdot 10^6$  Ом/кв.

Для оценки качества (добротности) прозрачных проводящих покрытий при данных значениях прозрачности и поверхностного сопротивления, используется безразмерный параметр “Figure-of-merit” (FoM), связывающий параметры покрытия соотношением:

$$FoM = T^{10} / R_{sh}$$

где  $T$  – прозрачность покрытия (в %) при 550 нм,  $R_{sh}$  – поверхностная проводимость (Ом/кв).

Для покрытий ИТО, имеющих поверхностное сопротивление порядка 15-20 Ом/кв при прозрачности 85-90%, добротность составляет порядка  $FoM = 13 \cdot 10^{-3}$ . На рисунке 4 представлены рассчитанные значения FoM для созданных нами покрытий до и после пост-обработки в зависимости от количества циклов нанесения AgNWs на исходные образцы.

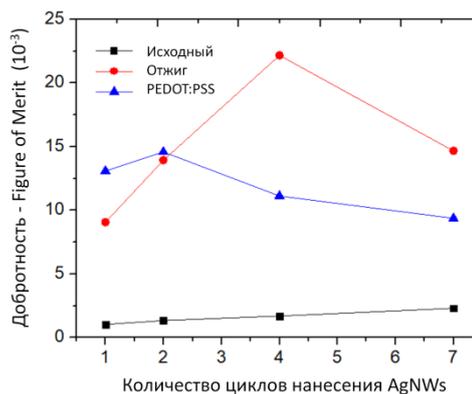


Рисунок 5 –Добротность (Figure of Merit) полученных прозрачных проводящих покрытий на базе AgNWs: до обработки, после термического отжига, после нанесения дополнительного покрытия PEDOT:PSS

Как видно из рисунка 5, созданные покрытия имеют параметры, сопоставимые с

ITO. При этом, как отмечалось ранее, пленки ITO имеют высокую стоимость производства, в отличие от жидкофазного синтеза AgNWs.

Полученные пленки были далее использованы для создания прозрачных нагревателей. Для этого к покрытиям AgNWs прикладывалась разность потенциалов 12 В, наиболее часто используемое в низковольтной электронике (в частности, двигателях автомобилей). Регистрировалась максимальная температура, достигаемая нагревателями в течение 2 минут. На рисунке 6 представлены полученные результаты.

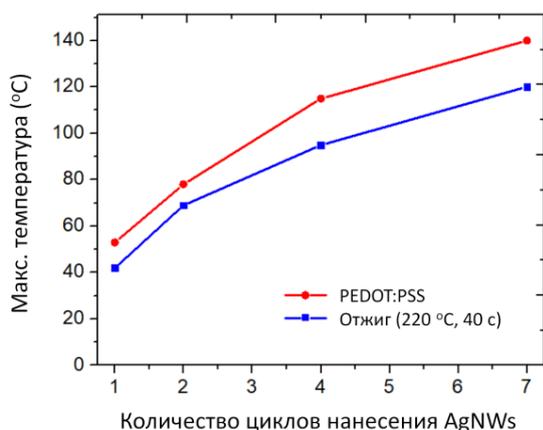


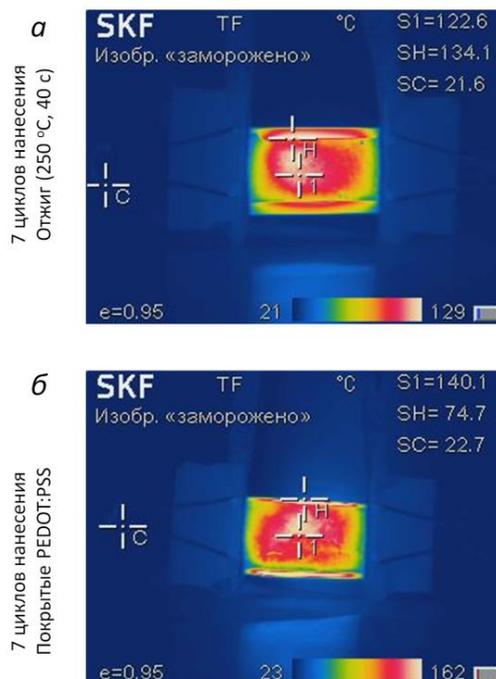
Рисунок 6 – Максимальная температура прозрачных нагревателей в зависимости от количества циклов нанесения AgNWs (после термической обработки и после нанесения дополнительного покрытия PEDOT:PSS)

Поскольку работа нагревателей основана на джоулевом разогреве покрытий при протекании через них тока, наибольшую температуру достигают покрытия с меньшим сопротивлением. В наших экспериментах, максимально достигнутое значение температуры покрытий, обработанных после нанесения AgNWs термически, составило 120 °C (прозрачность 77%). С увеличением прозрачности увеличивается поверхностное сопротивление покрытия, поэтому максимальное значение температуры нагревателя при заданном напряжении уменьшается. Тем не менее, образцы с прозрачностью 91% достигли температуры 40 °C.

Покрытия, полученные посредством нанесения дополнительного слоя PEDOT:PSS на AgNWs, достигают больших

температур за счет меньшего поверхностного сопротивления (но прозрачность, при этом, ухудшается на 3-5% по сравнению с отожженными покрытиями). Максимальная достигнутая температура прозрачного нагревателя составила 140°C для образца с прозрачностью 73%. Покрытие с прозрачностью 88% достигло температуры порядка 50°C.

На рисунке 7 представлены ИК-снимки нагревателей при максимальном разогреве.



(а) после термической обработки покрытий  
(б) после нанесения дополнительного слоя PEDOT:PSS

Рисунок 7 – ИК-изображения прозрачных нагревателей на базе AgNWs после термической обработки покрытий и после нанесения дополнительного слоя PEDOT:PSS

Таким образом, созданные прозрачные нагреватели имеют высокую эффективность.

### Заключение

Таким образом, посредством предложенной модификации полиольного синтеза получены нанопровода диаметром 60-80 нм при длине 20-30 мкм. Нанесением синтезированных нанопроводов на стеклянные подложки методом спин-коутинга, созданы проводящие покрытия с различной прозрачностью от 77 до 91 %. После термической

обработки при температуре 220 °С в течение 40 с поверхностное сопротивление покрытия снизилось с 380 до 43 Ом/кв (прозрачность 91%), и с 32 до 7 Ом/кв (прозрачность 77 %). В качестве альтернативного низкотемпературного метода повышения проводимости пленок на базе AgNWs, нами исследован метод нанесения дополнительного покрытия проводящего полимера PEDOT:PSS. Нанесение PEDOT:PSS при незначительном снижении прозрачности на 3-5% привело к снижению поверхностного сопротивления прозрачных пленок с 380 Ом/кв до 19 Ом/кв при изменении прозрачности с 91 до 88%. При прозрачности 73 % поверхностное сопротивление Экспериментально продемонстрировано, что созданные на базе покрытий прозрачные нагреватели имеют высокую эффективность. Максимальные значения температур, достигнутые нагревателями, составили 120 и 140 °С для термически отожженных и с дополнительным покрытием PEDOT:PSS, соответственно.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РК в рамках проектов AP05132270 и AP05135686.

### Список литературы

- 1 Li W., Zhang H., Shi S., Xu J., Qin X., He Q., Yang K., Dai W., Liu G., Zhou Q., Yu H., Silva S. R. P., Fahlman M. Recent progress in silver nanowire networks for flexible organic electronics// *Journal of Materials Chemistry C*. – 2020. – V.8. – P. 4636–4674.
- 2 Shi Y., He L., Deng Q., Liu Q., Li L., Wang W., Xin Z., Liu R. Synthesis and Applications of Silver Nanowires for Transparent Conductive Films // *Micromachines*. – 2019. – V. 10. – P. 330-339.
- 3 Juhua Liu, Yaohua Yi, Yihua Zhou, and Huafei Cai. Highly Stretchable and Flexible Graphene/ITO Hybrid Transparent Electrode// *Nanoscale Research Letters*. – 2016. – V.11. – articleID 108
- 4 Paeng D., Yoo J.-H., Yeo J., Lee D., Kim E., Ko S.H., Grigoropoulos C.P. Low-cost facile fabrication of flexible transparent copper electrodes by nanosecond laser ablation// *Advanced Materials*. – 2015. – V. 27. – P. 2762–2767.

- 5 Qi D., Paeng D., Yeo J., Kim E., Wang L., Chen S. Grigoropoulos C.P. Time-resolved analysis of thickness-dependent dewetting and ablation of silver films upon nanosecond laser irradiation// *Applied Physics Letters*. – 2016. – V.108. – P. 211602.
- 6 W. Aloui, A. Ltaief, A. Bouazizi. Transparent and conductive multi walled carbon nanotubes flexible electrodes for optoelectronic applications/ *Superlattices and Microstructures*. – 2013. V.64. – P. 581-589
- 7 Y. Sun, B. Gates, B. Mayers and Y. Xia. Crystalline Silver Nanowires by Soft Solution Processing/ *Nano Letters*. – 2002. – V.2. – №2. – P. 165-168
- 8 Y. Sun, Y. Yin, B. T. Mayers, T. Herricks and Y. Xia. Uniform Silver Nanowires Synthesis by Reducing AgNO<sub>3</sub> with Ethylene Glycol in the Presence of Seeds and Poly(Vinyl Pyrrolidone)/ *Chemistry of Materials*. – 2002. – V.14. – №11. – P. 4736–4745.
- 9 Sun, Y. G. & Xia, Y. N. Large-scale synthesis of uniform silver nanowires through a soft, self-seeding, polyol process/ *Advanced Materials*. – 2002. – V.14. – №11. – P. 833-837.
- 10 E.-J. Lee, Y.-H. Kim, D. K. Hwang, W. K. Choi and J.-Y. Kim. Synthesis and optoelectronic characteristics of 20 nm diameter silver nanowires for highly transparent electrode films/ *RSC Advances*. – 2016. – V.6. – №14. – P. 11702–11710.
- 11 M. Tsuji, K. Matsumoto, N. Miyamae, T. Tsuji and X. Zhang. Rapid Preparation of Silver Nanorods and Nanowires by a Microwave-Polyol Method in the Presence of Pt Catalyst and Polyvinylpyrrolidone/ *Crystal Growth & Design*. – 2006. – V.7. - №2. – P. 311–320.
- 12 Wiley B, Sun Y, Xia Y. Polyol synthesis of silver nanostructures: control of product morphology with Fe(II) or Fe(III) species// *Langmuir*. – 2005. – V.21. – N18. – P.8077–8080
- 13 Y. Liu, Y. Chen, R. Shi, L. Cao, Zh. Wang, T. Sun, J. Lin, J. Liu and W. Huang. High-yield and rapid synthesis of ultrathin silver nanowires for low-haze transparent conductors// *RSC Advances*. – 2017. – V.7 – P. 4891-4895
- 14 Zh. Kaili, D. Yongguo, Ch. Shimin. Sub 30 nm silver nanowire synthesized using KBr as co-nucleant through one-pot polyol method for

- optoelectronic applications// Organic Electronics. – 2015. – V.26. – P. 380–385
- 15 Bo Li, Sh. Ye, I. E. Stewart, S. Alvarez, and B. J. Wiley. Synthesis and Purification of Silver Nanowires To Make Conducting Films with a Transmittance of 99%// Nano Letters. – 2015. – V.15. – P. 6722–6726
- 16 J. Ma and M. Zhan. Rapid production of silver nanowires based on high concentration of AgNO<sub>3</sub> precursor and use of FeCl<sub>3</sub> as reaction promoter// RSC Advances. – 2014. – V.4. – Issue 40. – P. 21060-21071
- 17 Phillip Lee, Jinhyeong Kwon, Jinhwan Lee, Habeom Lee, Young D. Suh, Sukjoon Hong, and Junyeob Yeo. Rapid and Effective Electrical Conductivity Improvement of the Ag NW-Based Conductor by Using the Laser-Induced Nano-Welding Process// Micromachines. – 2017. – V.8. - №8. – article #164, doi:10.3390/mi8050164
- 18 Garnett, E. C. et al. Self-limited Plasmonic Welding of Silver Nanowire Junctions// Nature Materials. – 2012. – V.11. – P. 241-256
- 19 Spechler, J. A. & Arnold, C. B. Direct-Write Pulsed Laser Processed Silver Nanowire Networks for Transparent Conducting Electrodes// Applied Physics A. – 2012. – V.108. – P.25-32.
- 20 Nian, Q. et al. Crystalline Nanojoining Silver Nanowire Percolated Networks on Flexible Substrate// ACS Nano. – 2015. – V.9. – article ID 1001860.
- 21 Jisoo Kim, Yun Seok Nam, MyoungHoon Song, and HyungWook Park. Large Pulsed Electron Beam Welded Percolation Networks of Silver Nanowires for Transparent and Flexible Electrodes// ACS Applied Materials and Interfaces. – 2016. – V. 8. – pp. 20938–20945
- 22 Cai Y.Piao X., Yao X.,Nie E., Zhang Z., Sun Z. A facile method to prepare silver nanowire transparent conductive film for heaters//Materials Letters. –2019. – V. 249 – P. 66–69
- 23 Lee S. M., Lee J. H., Bak S., Lee K., Li Y., Lee H. Hybrid windshield-glass heater for commercial vehicles fabricated via enhanced electrostatic interactions among a substrate, silver nanowires, and an over-coating layer// Nano Research. – 2015.- V.8. – P. 1882–1892
- 24 Ji S., He W., Wang K., Ran Y., Ye C. Thermal Response of Transparent Silver Nanowire/PEDOT:PSS Film Heaters// Small. – 2014. – V.10. – P. 4951–4960.
- 25 Kiruthika, S.; Gupta, R.; Kulkarni, G. U. Large area defrosting windows based on electrothermal heating of highly conducting and transmitting Ag wire mesh// RSC Advances. - 2014. V.4. - Issue 91. - P. 49745–49751.
- 26 Kwon N., Kim K., Heo J., Yi I., Chung I. Study on Ag mesh/conductive oxide hybrid transparent electrode for film heaters// Nanotechnology. - 2014. - V.25. - 265702.
- 27 Gupta R., Rao K. D. M., Srivastava K., Kumar A., Kiruthika S., Kulkarni G.U. Spray Coating of Crack Templates for the Fabrication of Transparent Conductors and Heaters on Flat and Curved Surfaces// ACS Applied Materials and Interfaces. - 2014. - V.6. - Issue 16. - P. 13688–13696
- 28 Zhang X., Yan X., Chen J., Zhao J. Large-size graphenemicrosheets as a protective layer for transparent conductive silver nanowire film heaters// Carbon. - 2014. - V.69. - P.437-443
- 29 Cheong, H.-G.; Song, D.-W.; Park, J.-W. Transparent film heaters with highly enhanced thermal efficiency using silver nanowires and metal/metal-oxide blankets// Microelectron. Eng. - 2015. - V.146. - P. 11–18.

**Принято к печати 7.06.2021**