

06

## Оптические, электрические и радиозэранирующие свойства тонких пленок на основе серебряных нанопроволок

© А.С. Воронин,<sup>1,2,3</sup> И.И. Бриль,<sup>2</sup> Ю.В. Фадеев,<sup>1,2</sup> А.Ю. Павликов,<sup>3</sup> М.М. Симунин,<sup>2,3</sup> М.Н. Волочаев,<sup>4</sup> И.В. Говорун,<sup>4</sup> И.В. Подшивалов,<sup>4</sup> М.О. Макеев,<sup>1</sup> П.А. Михалев,<sup>1</sup> Б.А. Паршин,<sup>1</sup> С.В. Хартон<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 105005 Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр „Красноярский научный центр СО РАН“, 660036 Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Россия

<sup>4</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 660036 Красноярск, Россия  
e-mail: a.voronin1988@mail.ru, ellajiah@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 июля 2024 г.

В окончательной редакции 30 октября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Описаны процесс получения серебряных нанопроволок (AgNW) и методика изготовления тонких пленок на их основе методом вакуумной фильтрации. Толщина пленок задавалась объемом базовой дисперсии. С целью улучшения физико-механических и адгезионных свойств пленок AgNW были интегрированы в полиуретановую подложку. Проведены комплексные исследования морфологии и структуры как единичных AgNW, так и их пленок. Исследование оптоэлектрических характеристик показало, что пленки AgNW обладают равномерным пропусканием в видимом диапазоне свыше 500 нм. Также были изучены радиозэранирующие свойства пленочных структур в К- и К<sub>a</sub>-диапазонах. Показано, что пленки AgNW имеют высокий коэффициент экранирования, составляющий более 25 dB во всем исследуемом частотном диапазоне, при этом оптическое пропускание на длине волны 550 нм составило 69.25%.

**Ключевые слова:** серебряные нанопроволоки, коэффициент экранирования, тонкие пленки, электрические свойства, оптические свойства.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59465.224-24

### Введение

Современный мир невозможно представить без повсеместного использования электронных устройств. Объем используемой электроники в военной, медицинской, коммерческой и гражданской отраслях растет по мере развития промышленности [1]. Однако вся электроника генерирует нежелательные электромагнитные помехи (ЭМП). Это паразитное излучение оказывает негативное влияние на стабильную работу электроники, вызывая как временные неисправности, так и критические проблемы в работе устройств [2,3]. Помимо этого, еще в прошлом веке была показана возможность перехвата побочного излучения с экрана монитора с его последующей расшифровкой [4]. Впоследствии этот канал утечки информации получил аббревиатуру TEMPEST (в России ПЭМИН) [5,6]. Учитывая то, что наиболее используемый канал взаимодействия электроники — визуальный [7], спрос на исследования в области оптически прозрачных покрытий, защищающих от ЭМП, растет с каждым годом [8]. В литературе чаще всего используются два типа прозрачных экранирующих покрытий. Первый — это металлические сетки с

периодом 500–1000  $\mu\text{m}$  и шириной дорожек 25–50  $\mu\text{m}$ . Они имеют высокий коэффициент экранирования (более 50 dB) на частотах ниже 1 GHz. Однако на частотах более 1 GHz коэффициент экранирования металлических сеток существенно уменьшается. Например, в [9] сообщается о том, что на частоте 26 GHz металлическая сетка с ячейкой размером 1.2 mm будет иметь коэффициент экранирования, не превышающий 10 dB. Второй тип — это прозрачные проводящие оксиды, в зарубежной литературе известны под аббревиатурой TCO (Transparent Conductive Oxides). Типичным представителем данного вида покрытий является оксид индия олова (ИТО), коэффициент экранирования которого практически не зависит от частоты и находится на уровне 20 dB в диапазоне от 1 до 40 GHz [10]. Отличным кандидатом для оптически прозрачного экранирующего материала являются серебряные нанопроволоки [11]. Например, в [12] сообщается о пленках AgNW, имеющих оптическую прозрачность около 85% при экранирующей способности в 20–25 dB в зависимости от рабочей частоты, что превосходит результаты, показанные в работах с пленками ИТО. Аналогичные результаты мы видим в работах [13–15]. Эти работы, а также нераскрытый

в современной литературе вопрос об экранирующих свойствах AgNW на частотах вне X-диапазона, побудили нас исследовать спектральные характеристики тонких пленок серебряных нанопроволок в широком диапазоне частот, соответствующих 5G, к которым относятся K- и Ka-диапазоны.

## 1. Материалы и методы

### 1.1. Синтез серебряных нанопроволок

Сверхдлинные серебряные нанопроволоки AgNW синтезировали сольвотермальным методом: сначала 0.3 г поливинилпирролидона (PVP) (M.W. — 1.3 MDa) и AgNO<sub>3</sub> (0.20 g, 1.18 mM) растворяли в 50 ml этиленгликоля. Затем добавляли раствор FeCl<sub>3</sub> (200 μl, 12.5 μM) и перемешивали при комнатной температуре. Полученную смесь затем переносили в автоклав с тефлоновым вкладышем емкостью 50 ml. Данная смесь реагентов выдерживалась при 130°C в течение 8 h до завершения реакции. После синтеза AgNW подвергались операции замены растворителя. Для этого полученный раствор в этиленгликоле центрифугировался со скоростью 10 000 rpm в течение 15 min при помощи лабораторной центрифуги ОПН 16 (Labtex, Россия). После центрифугирования надосадочная жидкость сливалась и добавлялось такое же количество изопропилового спирта. Такая операция повторялась 5 раз до полного удаления этиленгликоля, ионов NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> и Fe<sup>3+</sup> и остатков PVP.

### 1.2. Получение пленок AgNW

Тонкие пленки AgNW были изготовлены при помощи метода вакуумной фильтрации [16]. Толщина пленок AgNW задавалась объемом дисперсии. В работе использовались базовая дисперсия AgNW с концентрацией нанопроволок 4 mg/ml. Используемые в работе объемы базовой дисперсии для получения пленок составляли 25, 50, 100, 200, 400, 800 и 1600 μl. Указанные объемы базовой дисперсии разводили изопропиловым спиртом до объема 50 ml. Фильтрацию проводили через ацетат целлюлозные фильтры (МФАС-Б-3, Владипор, Россия) с диаметром пор 600 nm и рабочим диаметром 20 mm, после чего влажная пленка AgNW на фильтре прижималась к поверхности стекла с усилием 10 kg/cm<sup>2</sup> и сушилась при комнатной температуре в течение 30 min. В дальнейшем система погружалась в ацетон для растворения ацетат целлюлозного фильтра, в результате чего были получены тонкие пленки AgNW на стекле. Для получения износостойких пленок AgNW была проведена их интеграция в приповерхностный слой гибкой полиуретановой подложки по следующей методике: сначала форполимер из полиэфира диизоцианата-2,4 смешивался в бутилацетате вместе с метилен-бис-ортохлоранилин (МОСА) и дегазировался. Затем полученный раствор наносился поверх пленок AgNW и полимеризовался в сушильном шкафу при

многоступенчатом нагреве со следующим режимом: изначально шкаф прогревался до 50°C, затем температура доводилась до 100°C с шагом 10°C и выдержкой 1 h на каждом шагу. После достижения 100°C образцы выдерживались при этой температуре в течение 10 h.

### 1.3. Тестирование адгезионных свойств

Адгезионные свойства образцов пленок AgNW определялись методом решетчатого надреза (ASTM D4541) [17].

### 1.4. Оптическая и электронная микроскопия

Фотографии оптической микроскопии выполнялись на микроскопе Альтами104 (Альтами, Россия). Морфологию и геометрические характеристики единичных AgNW изучали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на HT 7700 (Hitachi, Япония) при ускоряющем напряжении 40–300 kV. Морфологию пленок AgNW исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе SU3500 (Hitachi, Япония) при ускоряющем напряжении 20 kV.

### 1.5. Рентгеноструктурный анализ

Съемка рентгенограмм образцов проводилась с помощью дифрактометра X'Pert Pro MPD (PANalytical, Netherlands) с высокоскоростным детектором PIXcel в угловом интервале 30–90° 2θ, с шагом 0.013°. Параметры кристаллической решетки Ag были определены и уточнены с применением полнопрофильного подхода Ритвельда методом минимизации разности производных (DDM).

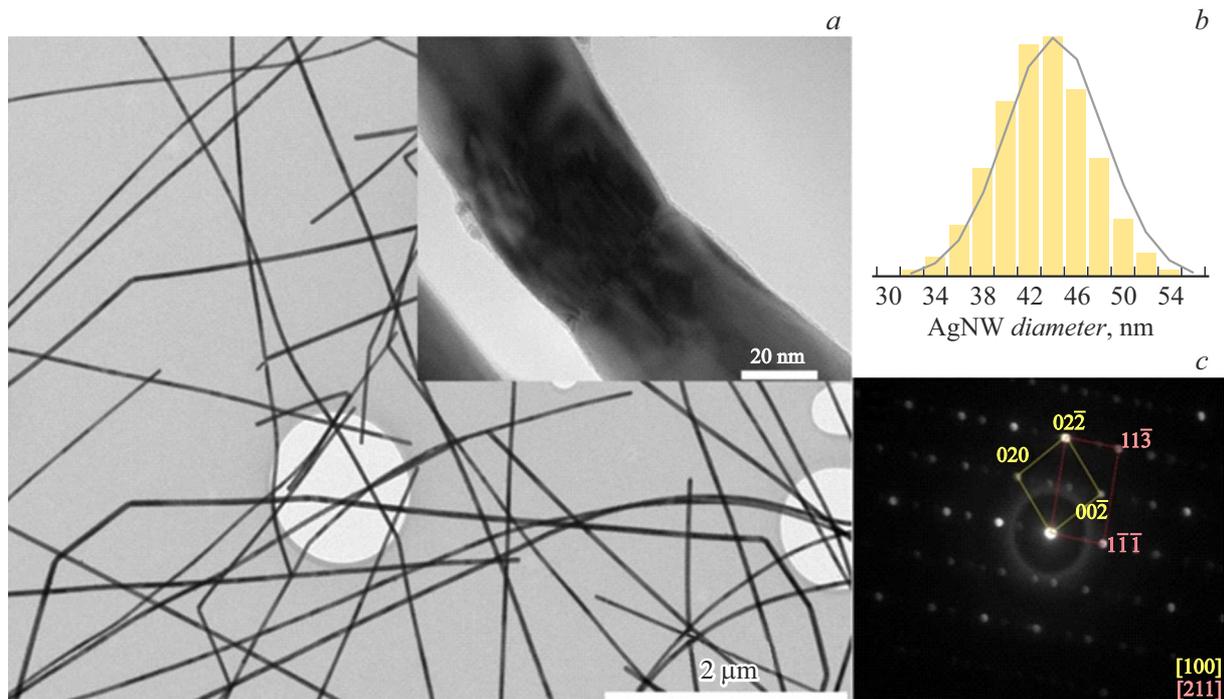
### 1.6. Измерение оптоэлектрических характеристик

Спектральные зависимости оптического пропускания пленок AgNW измеряли в диапазоне 380–780 nm на спектрофотометре UV-3600i Plus с интегрирующей сферой (Shimadzu, Япония). Рассеивающая способность пленок AgNW оценивалась по параметру Haze (мутности). Согласно стандарту D1003 — 13 „Standard Test Method for Haze and Luminous Transmittance of Transparent Plastics“, параметр Haze определяется согласно следующей формуле:

$$\text{Haze}[\%] = T_d/T_t \cdot 100, \quad (1)$$

где  $T_d$  — диффузное светопропускание,  $T_t$  — полное светопропускание.

Измерения проходят в два этапа: на первом этапе измеряется коэффициент пропускания образца напрямую — это  $T_r$ . На втором этапе измеряется коэффициент пропускания в сфере — это  $T_t$ ; затем вычисляется  $T_d = T_t - T_r$ ; по полученным данным вычисляется параметр Haze.



**Рис. 1.** Морфологические характеристики синтезированных серебряных нанопроволок: *a* — ПЭМ изображения; *b* — нормальное распределение диаметров нанопроволок; *c* — дифракция электронов выбранной зоны (SAED).

Измерение поверхностного сопротивления AgNW осуществлялось четырехзондовым методом с использованием мультиметра Keithley 2000 (Keithley Instruments, США) и четырехзондовой головки Mill-Max 854-22-004-10-001101 (Mill-Max Mfg, США).

### 1.7. Методика измерения радиозэранирующих свойств пленок AgNW

Для оценки радиозэранирующих свойств пленок использовался волноводный метод. Для этого образец помещался в разрыв волноводной линии передачи, и производилось измерение коэффициентов прохождения  $S_{21}$  и отражения  $S_{11}$  электромагнитной волны. Измерения проводились в двух частотных диапазонах: К-диапазон (18–26.5 GHz) и  $K_a$ -диапазон (26.5–40 GHz). Волноводные окна имели прямоугольное сечение с размерами  $4.3 \times 10.65$  mm для К-диапазона и  $3.55 \times 7.1$  mm для  $K_a$ -диапазона. Измерения проводились на векторном анализаторе цепей R&S ZVA 50 (GmbH & Co. KG, Германия).

## 2. Результаты и обсуждение

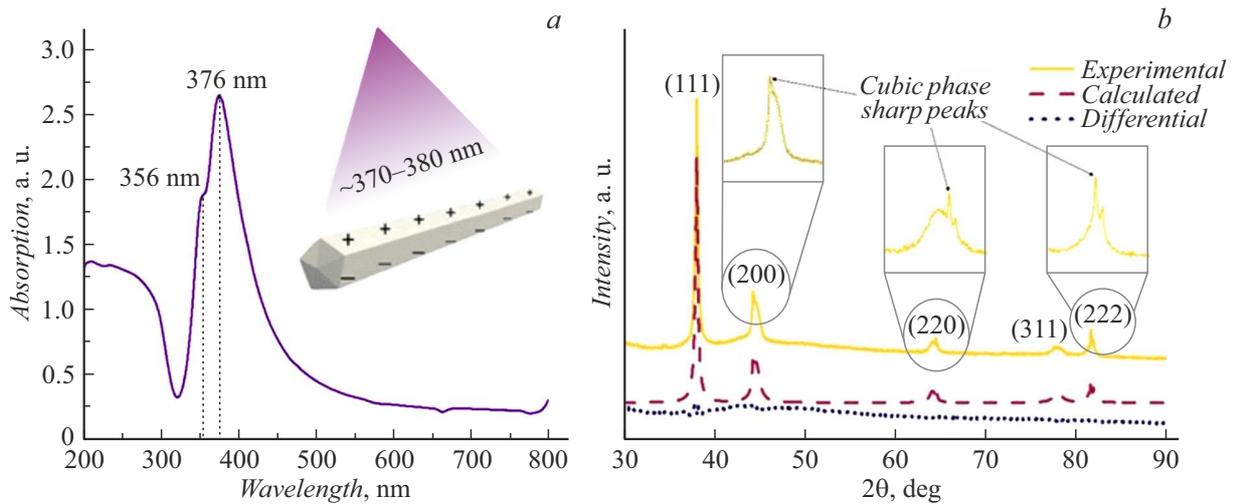
### 2.1. Морфология и структура AgNW и их пленок

Синтезированные AgNW обладают высоким аспектным соотношением. При среднем диаметре проволоки

$43.2 \pm 12.4$  nm их длины измеряются десятками микрометров (рис. 1, *a, b*). Адсорбированный слой макромолекул на поверхности нанопроволок представляет собой поливинилпирролидон (PVP), адсорбированный в процессе синтеза AgNW (рис. 1, *a*). В данном случае PVP выступает в роли стабилизирующего агента, предотвращая агрегацию нанопроволок и задавая преимущественную ориентацию в процессе роста [18]. Дифракция электронов из выбранной зоны (рис. 1, *c*) указывает на двойниковую структуру полученных AgNW, что встречается в литературе [19].

На UV-vis спектре (рис. 2, *a*) виден пик поглощения на длине волны 376 nm, связанный с плазмонным резонансом. Данный пик относится к поперечной плазмонной моде, и положение пика поглощения связано с диаметром нанопроволок. Так, согласно работе [20], положение пика поглощения для нанопроволок диаметром  $43.2 \pm 12.4$  nm лежит в диапазоне 370–380 nm, что подтверждает наши экспериментальные результаты. Наличие пика-сателлита на длине волны 356 nm согласуется с литературой и связано с возбуждением продольной плазмонной моды, длина волны которой близка к длине волны поверхностного плазмона для серебра [21,22].

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа AgNW, обнаружены две фазы серебра (рис. 2, *b*). Одна фаза — с нормальной, характерной для серебра, кубической решеткой с параметрами  $a = b = c = 4.0868(7)$  Å, относящейся к пространственной группе Fm3m (узкие пики). Другая фаза — с тетрагонально-искаженной решеткой, относящейся к пространственной группе



**Рис. 2.** Морфологические характеристики синтезированных серебряных нанопроволок: *a* — спектроскопия поглощения UV-vis (на вставке проиллюстрировано разделение зарядов в AgNW в процессе поглощения фотонов); *b* — результаты рентгеноструктурного анализа.

F4/mmm и параметрами решетки  $a = b = 4.058(3)$ ,  $c = 4.164(8)$  Å (асимметрично уширенные пики). Тетрагональное искажение AgNW обусловлено механическими напряжениями, возникающими в процессе роста. Эта особенность подробно описана в [23].

Далее мы исследовали морфологию пленок AgNW, интегрированных в реактопластичный полиуретан (RPU). Мы получаем перколированную структуру нанопроволок при любых используемых концентрациях (рис. 3) Наиболее заметное изменение в плотности укладки AgNW на единицу площади наблюдаем, когда увеличиваем концентрацию базовой дисперсии с 25 до 200  $\mu\text{l}$  (рис. 3, *a–d*). При этом количество нанопроволок на единицу площади в единичном слое остается визуально схожим (рис. 3, *e, f*). Это говорит о том, что при дальнейшем увеличении концентрации мы увеличиваем количество слоев AgNW в пленке.

### 3. Оптоэлектрические свойства пленок AgNW

Спектральная зависимость коэффициента пропускания в диапазоне 380–780 nm для всех полученных пленок AgNW приведена на рис. 4, *a*. Коэффициент пропускания демонстрирует тренд на снижение с увеличением концентрации AgNW в образце. Начиная с длины волны  $\sim 500$  nm мы наблюдаем наклон линии спектра, связанный с плазмонным поглощением, который мы также наблюдали при спектроскопии UV-vis AgNW в растворе. В целом коэффициент пропускания зависит от доли поверхности покрытой AgNW, которая растет не только при увеличении плотности слоев, но и при увеличении количества самих слоев в пленке [24]. Приемлемыми с точки зрения оптоэлектроники являются покрытия с

концентрацией базовой дисперсии 25, 50, 100  $\mu\text{l}$ , имеющие оптическое пропускание на длине волны 550 nm, равное 80.87, 73.81, 69.25% соответственно.

Величина мутности показывает отношение диффузного светопропускания к полному светопропусканию. Так как наши пленки представляют сетку хаотично расположенных AgNW, они легко рассеивают падающее излучение [25]. Показатель мутности, измеренный в нашей работе (рис. 4, *b*), не исключает мутности полиуретановой подложки из RPU, который, судя по литературным данным, составляет 3–5% [26]. Учитывая это, мы можем отметить, что образцы с концентрацией 25, 50 и 100  $\mu\text{l}$  обладают приемлемым показателем мутности для прозрачной проводящей пленки — на уровне 5–10%.

Поверхностное сопротивление находится в прямой зависимости от концентрации AgNW, что согласуется с литературными данными [27]. Двукратное увеличение концентрации базовой дисперсии дает примерно двукратное падение поверхностного сопротивления. Вышеупомянутые образцы с концентрацией базовой дисперсии 25, 50 и 100  $\mu\text{l}$  имеют поверхностное сопротивление в 18.247, 12.138 и 4.917  $\Omega/\text{sq}$  соответственно. При этом эффекта насыщения проводимости при переходе к максимальной исследуемой концентрации (1600  $\mu\text{l}$ ) мы не наблюдаем (рис. 4, *c*). Учитывая это, можем заметить, что в нашем случае не происходит перехода от квазидвумерной структуры к объемной [28].

Для прозрачных проводящих материалов целесообразно изучить взаимосвязь между величинами поверхностного сопротивления и пропускания в видимом диапазоне. Для того чтобы оценить взаимосвязь этих двух параметров, мы нанесли точки, соответствующие различным концентрациям AgNW в пленках, на график, на котором осями являются коэффициент пропускания и

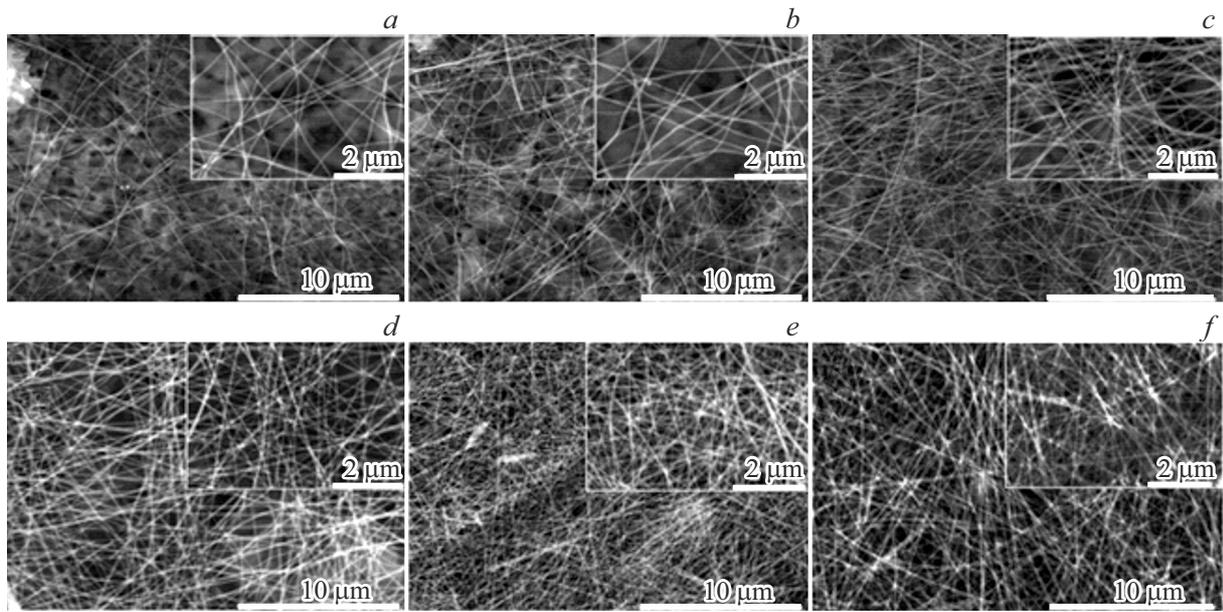


Рис. 3. Изображения сканирующей электронной микроскопии нанопроволок, интегрированных в реактопластичный полиуретан: *a* — 25, *b* — 50, *c* — 100, *d* — 200, *e* — 400, *f* — 800  $\mu\text{l}$ .

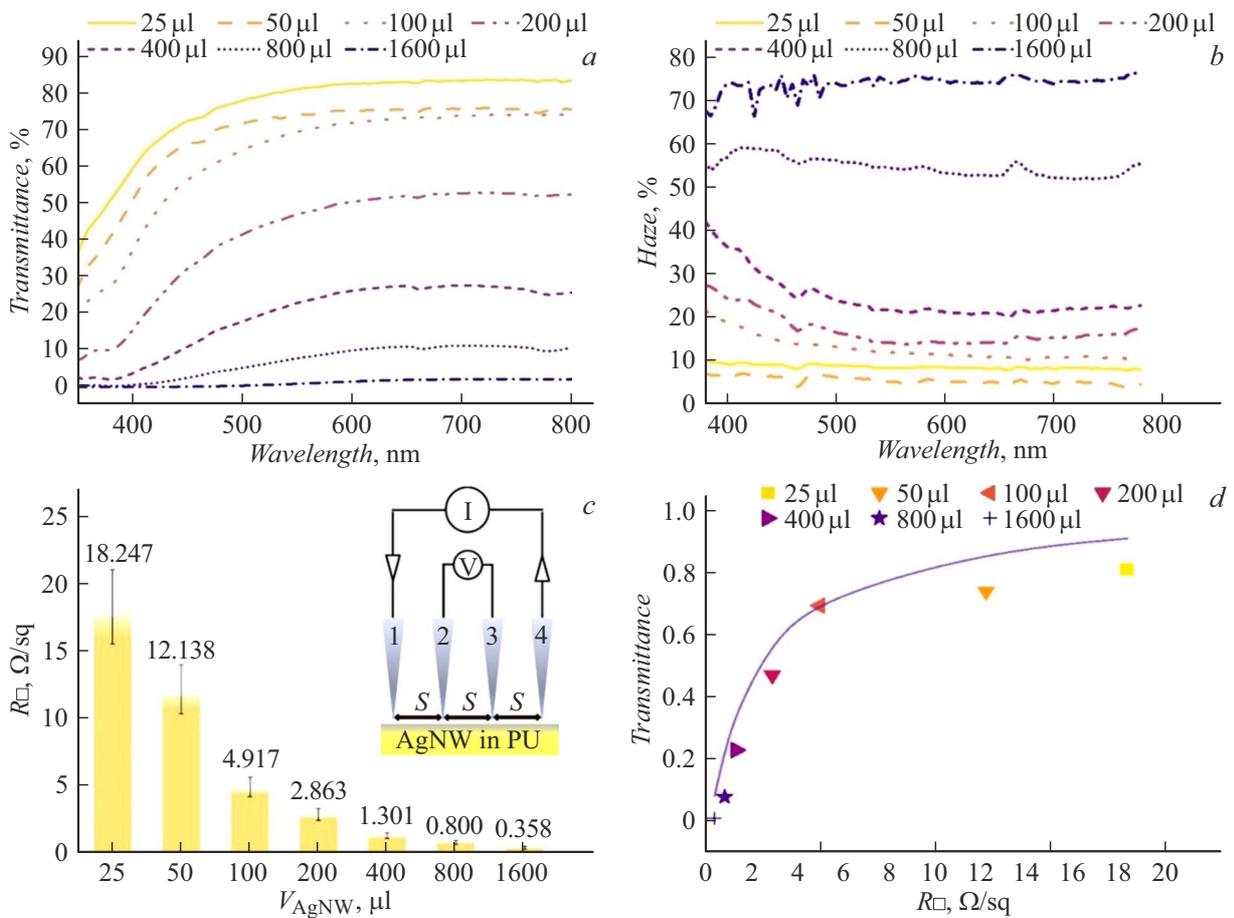
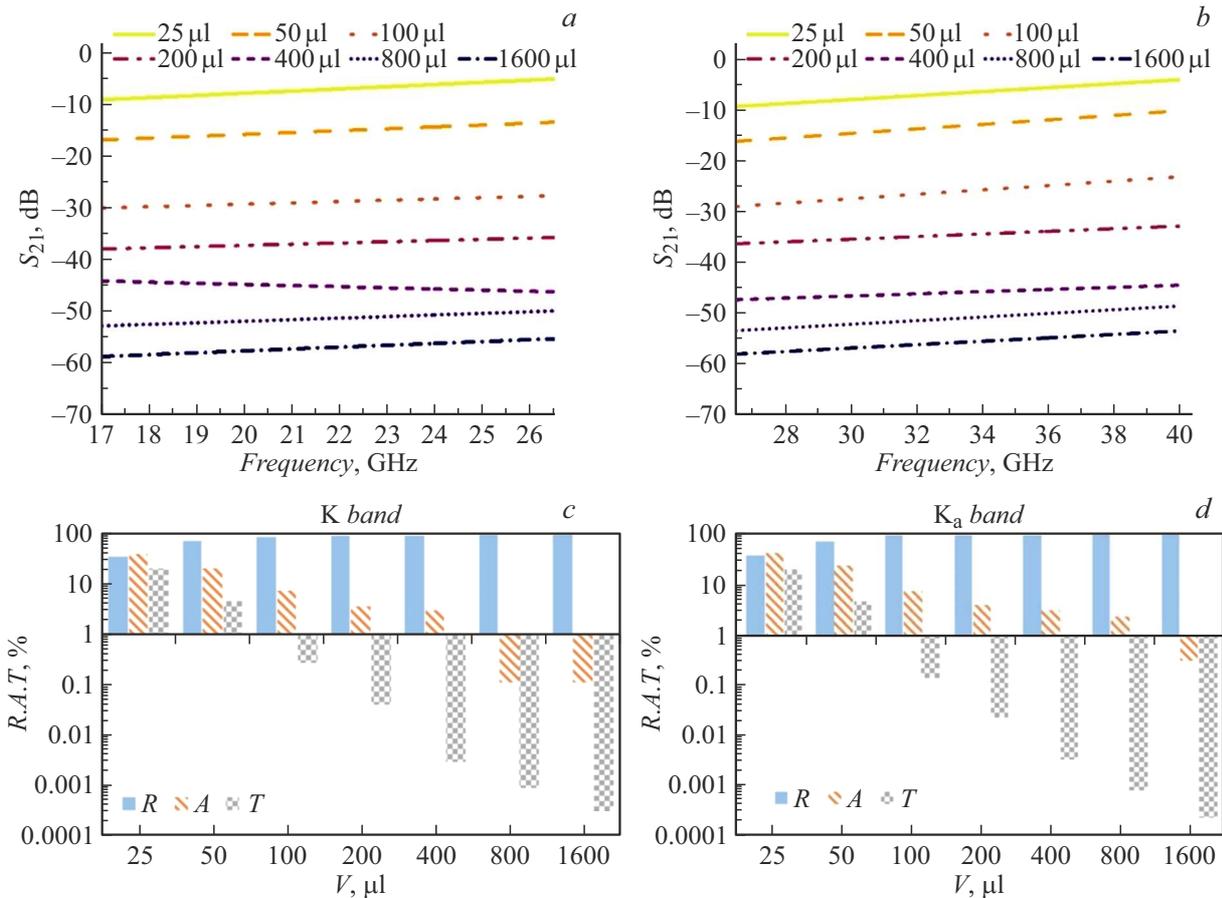


Рис. 4. Оптоэлектрические свойства пленок AgNW: *a* — коэффициент пропускания; *b* — показатель мутности; *c* — поверхностное сопротивление (на вставке проиллюстрировано положение измерительных зондов при измерении четырехзондовым методом, расстояние между зондами  $S = 2 \text{ mm}$ ); *d* — Figure of Merit полученных пленок AgNW.



**Рис. 5.** Радиоэкранирующие свойства пленок AgNW: *a, b* — коэффициент пропускания *T*; *c, d* — гистограммы энергетического баланса.

поверхностное сопротивление (рис. 4, *d*). Соотношение между этими двумя параметрами, критически важными для прозрачных проводников, носит название Figure of Merit (FoM). Уравнение для расчета FoM описано в [29] и имеет следующий вид:

$$FoM = \frac{Z_0}{2R \left( \frac{1}{\sqrt{T}} - 1 \right)}, \quad (2)$$

где,  $Z_0$  — импеданс вакуума,  $R$  — поверхностное сопротивление покрытия,  $T$  — коэффициент пропускания.

Полученные точки мы аппроксимировали кривой, согласно уравнению (2), наилучшее согласие получили для величины FoM, равной 210. Для сравнения тонкая пленка ИТО на гибкой подложке из полиэтилентерефталата характеризуется величиной FoM, равной 115 [30].

### 3.1. Радиоэкранирующие свойства пленок AgNW

Радиоэкранирование — ослабление электромагнитной волны с помощью экрана с высокой электрической проводимостью [31]. Оно происходит за счет потерь на

поглощение и отражение падающей волны [32]. Коэффициенты отражения ( $R$ ), пропускания ( $T$ ) и поглощения ( $A$ ) можно выразить, как

$$R[\%] = \frac{P_r}{P_i} = 10^{0.1S_{11}} \cdot 100, \quad (3)$$

$$T[\%] = \frac{P_t}{P_i} = 10^{0.1S_{21}} \cdot 100, \quad (4)$$

$$A[\%] = 100 - T - R, \quad (5)$$

где  $P_i$ ,  $P_r$ ,  $P_t$  — мощности падающей, отраженной и прошедшей волн, а  $S_{21}$  и  $S_{11}$  — параметры матрицы рассеяния.

Оценить экранирующую способность можно с помощью величины коэффициента экранирования  $SE$  (shielding efficiency). Значение коэффициента экранирования связано с коэффициентом пропускания  $T$  следующим уравнением:

$$SE = -10 \log_{10}(S_{21}). \quad (6)$$

На рис. 5, *a, b* видно, что коэффициент экранирования образцов зависит от концентрации AgNW. Во всех исследуемых диапазонах мы наблюдаем слабый тренд

на снижение экранирующей способности с увеличением частоты. Учитывая это, мы можем охарактеризовать пленки AgNW в исследуемых диапазонах усредненным значением коэффициента пропускания. Например, оптимальным образцом с точки зрения соотношения оптической прозрачности и радиоэкранирующих способностей является пленка из 100 μl базовой дисперсии с коэффициентом оптического пропускания 69.25% и коэффициентами экранирования SE в K-диапазоне 28.7 dB и в Ka-диапазоне 26.0 dB соответственно.

Механизм экранирования напрямую связан с поверхностным сопротивлением пленки, а, следовательно, с концентрацией AgNW в образце. На рис. 5, c, d приведены гистограммы баланса отражения, прохождения и ослабления для всех исследуемых пленок AgNW в K- и Ka-диапазонах. Например, в случае пленок с концентрацией AgNW 25 μl доминирующим механизмом экранирования является поглощение (величина коэффициента поглощения равна 41.63% в K-диапазоне и 36.9% в Ka-диапазоне), а пленка AgNW представляет собой двумерную перколированную металлическую сетку. Наличие поглощения, характерное для низкопроводящих структур, схоже с описанными в литературе [33] результатами на металлических сетках. С возрастанием концентрации базовой дисперсии AgNW мы наблюдаем тренд на увеличение вклада отражения в общий коэффициент экранирования, так как растет плотность упаковки AgNW в пленках, а количество слоев увеличивается, что способствует сильному снижению поверхностного сопротивления. Так, в образце с концентрацией AgNW 1600 μl мы видим следующие результаты: в K-диапазоне отражение составляет 99.7%, а в Ka-диапазоне — 99.9%.

Для сравнения радиоэкранирующих свойств полученных пленок AgNW решили воспользоваться моделью сплошного слоя [34], которая описывается уравнением

$$SE[dB] = 20 \log_{10} \left( 1 + \frac{Z_0}{2R} \right), \quad (7)$$

где  $Z_0$  — импеданс вакуума,  $R$  — поверхностное сопротивление покрытия.

На рис. 6 приведено сравнение данных, полученных экспериментально с моделью сплошного слоя. Она показывает высокий уровень согласия для пленок AgNW с высокой концентрацией базовой дисперсии (200–1600 μl). Это связано с тем, что на таких образцах большая плотность упаковки и меньше шансов появления дефектов в виде крупных пустот, представляющей собой апертуру, сквозь которую может наблюдаться дифракция волны. При снижении концентрации базовой дисперсии мы видим расхождение с моделью сплошного слоя, так как с уменьшением концентрации AgNW вероятность сквозных дефектов увеличивается.

### 3.2. Адгезионная прочность

Ранее мы указали, что интегрировали пленки AgNW в RPU. Для того чтобы показать степень устойчивости

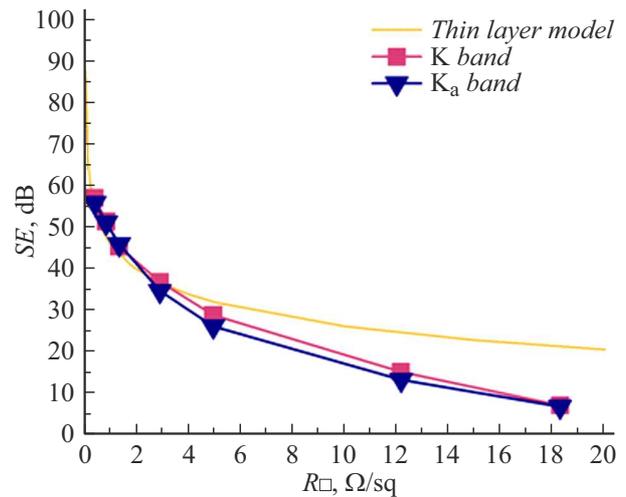


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных с моделью сплошного слоя.

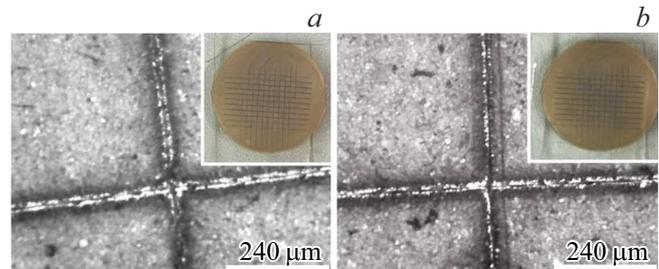


Рис. 7. Снимки образца при тесте адгезионных свойств: a — до отрыва клейкой ленты, b — после отрыва клейкой ленты.

к механическому износу, мы прибегли к тесту на адгезионную прочность согласно ASTM D4541. Для этого мы нанесли решетчатые надрезы и провели тейп-тест. Адгезионная прочность в этом тесте оценивается в рамках бальной системы: от 0 (почти полное расслоение, множественные дефекты) до 5B (неизменное состояние). На рис. 7 мы видим результаты теста по ASTM D4541. Мы не наблюдаем отслоений, обрывов по краям надреза и прочих дефектов, пленки сохранили свой изначальный вид, что соответствует уровню адгезионной прочности 5B (максимально возможный) [17].

### Заключение

В работе мы синтезировали AgNW с высоким аспектным соотношением и охарактеризовали их морфологические и структурные характеристики. Из нанопроволок мы получили пленки методом вакуумной фильтрации, которые затем интегрировали в полиуретановую подложку для улучшения адгезионной прочности. Были определены зависимости оптических характеристик, а именно коэффициента пропускания и показателя мутности, от объема базовой дисперсии AgNW. Получено

прозрачное проводящее покрытие с поверхностным сопротивлением в  $4.917 \Omega/\text{sq}$  при оптическом пропускании 69.25%, что делает его потенциально применимым для использования в оптоэлектронных приложениях. Проведено исследование радиоэкранирующих свойств в широком диапазоне частот 18–40 GHz. Оптимальным с точки зрения оптоэлектрических и экранирующих параметров является образец с концентрацией базовой дисперсии, равной  $100 \mu\text{l}$ , с коэффициентом экранирования более чем 25 dB в К- и К<sub>a</sub>-диапазонах при оптическом пропускании в 69.25%. Также проведена оценка доминирующего вклада в механизм экранирования для всех типов пленок AgNW. Показано, что при увеличении концентрации происходит смена доминирующего механизма экранирования с поглощения на отражение.

### Финансирование работы

Работа по синтезу, очистке и характеристике AgNW и исследованию радиоэкранирующих свойств пленок AgNW в RPU выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSN-2024-0016). Работа по исследованию оптоэлектрических свойств пленок AgNW в RPU выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWES-2024-0026).

### Благодарности

Исследования методом сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии выполнены на оборудовании Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КИЦ СО РАН. Мы благодарим Л.А. Соловьева за помощь в проведении рентгеноструктурного анализа.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S.M. Zachariah, Y. Grohens, N. Kalarikkal, S. Thomas. *Polym. Compos.*, **43**, 2507 (2022). DOI: 10.1002/pc.26595
- [2] Z. Chen, C. Xu, C. Ma, W. Ren, H.-M. Cheng. *Adv. Mater.*, **25**, 1296 (2013). DOI: 10.1002/adma.201204196
- [3] W. Sihai, D.D.L. Chung. *Cem. Concr. Res.*, **34**, 329 (2004). DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.08.014
- [4] W. van Eck. *Comput. Secur. Comput. Secur.*, **4**, 269 (1985). DOI: 10.1016/0167-4048(85)90046-X
- [5] I. Kubiak, A. Boitan, S. Halunga. *Adv. Sci. Inst. Ser. E Appl. Sci.*, **10**, 2828 (2020). DOI: 10.3390/app10082828
- [6] А.С. Воронин, Ю.В. Фадеев, И.В. Говорун, А.С. Волошин, И.А. Тамбасов, М.М. Симуни, С.В. Хартов. *Письма в ЖТФ*, **47** (5), 31 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.05.50674.18496
- [7] G.M. Olson, J.S. Olson. *Annu. Rev. Psychol.*, **54**, 491 (2003). DOI: 10.1146/annurev.psych.54.101601.145044
- [8] D. Tan, C. Jiang, Q. Li, S. Bi, X. Wang, J. Song. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **32**, 25603 (2021). DOI: 10.1007/s10854-021-05409-4
- [9] Z. Liang, Z. Zhao, M. Pu, J. Luo, X. Xie, Y. Wang, Y. Guo, X. Ma, X. Luo. *Opt. Mater. Express*, **10**, 796 (2020). DOI: 10.1364/OME.386830
- [10] H. Wang, C. Ji, C. Zhang, Y. Zhang, Z. Zhang, Z. Lu, J. Tan, L.J. Guo. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11** (12), 11782 (2019). DOI: 10.1021/acsami.9b00716
- [11] Z. Wang, B. Jiao, Y. Qing, H. Nan, L. Huang, W. Wei, Y. Pen, F. Yuan, H. Dong, X. Hou, Z. Wu. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12** (2), 2826 (2019). DOI: 10.1021/acsami.9b17513
- [12] H. Yang, S. Bai, X. Guo, H. Wang. *Appl. Surf. Sci.*, **483**, 888 (2019). DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.04.034
- [13] D.H. Kim, Y. Kim, J.-W. Kim. *Mater. Des.*, **89**, 703 (2016). DOI: 10.1016/j.matdes.2015.09.142
- [14] R. Sahoo, R. Sundara, V. Subramanian. *Mat. Today: Proceed.*, **94**, 29 (2023). DOI: 10.1016/j.matpr.2023.05.329
- [15] L.-C. Jia, D.-X. Yan, X. Liu, R. Ma, H.-Y. Wu, Z.-M. Li. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10** (14), 11941 (2018). DOI: 10.1021/acsami.8b00492
- [16] И.А. Тамбасов, А.С. Воронин, Н.П. Евсевская, Ю.М. Кузнецов, А.В. Лукьяненко, Е.В. Тамбасова, М.О. Горнаков, М.В. Дорохин, Ю.Ю. Логинов. *ФТТ*, **62** (6), 960 (2020). [I.A. Tambasov, A.S. Voronin, N.P. Evsevskaya, Y.M. Kuznetsov, A.V. Luk'yanenko, E.V. Tambasova, M.O. Gornakov, M.V. Dorokhin, Yu.Yu. Loginov. *Phys. Solid State*, **62**, 1090 (2020). DOI: 10.1134/S1063783420060311]
- [17] *Standard Test Method for Pull-off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*. <https://www.astm.org/d4541-22.html>
- [18] K.S. Lau, S.X. Chin, S.T. Tan, F.S. Lim, W.S. Chang, C.C. Yap, M.H. Hj Jumali, S. Zakaria, S.W. Chook, C.H. Chia. *J. Alloys Compd.*, **803**, 165 (2019). DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.258
- [19] C.J. Johnson, E. Dujardin, S.A. Davis, C.J. Murphy, S.J. Mann. *Mater. Chem.*, **12**, 1765 (2002). DOI: 10.1039/B200953F
- [20] C.S. Todd, X. Chen. *Appl. Spectrosc.*, **74** (2), 204 (2019). DOI: 10.1177/0003702819891060.
- [21] Y. Gao, P. Jiang, L. Song, L. Liu, X. Yan, Z. Zhou, D. Liu, J. Wang, H. Yuan, Z. Zhang. *J. Phys. D Appl. Phys.*, **38**, 1061 (2005). DOI: 10.1088/0022-3727/38/7/015
- [22] Y. Gao, L. Song, P. Jiang, L.F. Liu, X.Q. Yan, Z.P. Zhou, D.F. Liu, J.X. Wang, H.J. Yuan, Z.X. Zhang, X.W. Zhao, X.Y. Dou, W.Y. Zhou, G. Wang, S.S. Xie, H.Y. Chen, J.Q. Li. *J. Cryst. Growth*, **276**, 606 (2005). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2004.11.396
- [23] Y. Sun, Y. Ren, Y. Liu, J. Wen, J.S. Okasinski, D.J. Miller. *Nat. Commun.*, **3**, 1 (2012). DOI: 10.1038/ncomms1963
- [24] G. Khanarian, J. Joo, X.-Q. Liu, P. Eastman, D. Werner, K. O'Connell, P.J. Trefonas. *Appl. Phys.*, **114**, 024302 (2013). DOI: 10.1063/1.4812390
- [25] X. Li, J. Zhou, D. Yan, Y. Peng, Y. Wang, Q. Zhou, K. Wang. *Materials*, **14**, 2219 (2021). DOI: 10.3390/ma14092219
- [26] N.H. Mudri, L.C. Abdullah, M.M. Aung, M.Z. Salleh, D.R. Awang Biak, M. Rayung. *Polymers*, **12**, 1494 (2020). DOI: 10.3390/polym12071494
- [27] S. Sorel, P.E. Lyons, S. De, J.C. Dickerson, J.N. Coleman. *Nanotechnology*, **23**, 185201 (2012). DOI: 10.1088/0957-4484/23/18/185201

- [28] S. De, T.M. Higgins, P.E. Lyons, E.M. Doherty, P.N. Nirmalraj, W.J. Blau, J.J. Boland, J.N. Coleman. *ACS Nano*, **3** (7), 1767 (2009). DOI: 10.1021/nn900348c
- [29] R.M. Mutiso, M.C. Sherrott, A.R. Rathmell, B.J. Wiley, K.I. Winey. *ACS Nano*, **7** (9), 7654 (2013). DOI: 10.1021/nn403324t
- [30] A.S. Voronin, F.S. Ivanchenko, M.M. Simunin, A.V. Shiverskiy, A.S. Aleksandrovsky, I.V. Nemtsev, Y.V. Fadeev, D.V. Karpova, S.V. Khartov. *Appl. Surf. Sci.*, **364**, 931 (2016). DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.12.182
- [31] *IEC 60050 — International Electrotechnical Vocabulary*. <https://www.electropedia.org/>
- [32] H. Wang, S. Li, M. Liu, J. Li, X. Zhou. *Macromol. Mater. Eng.*, **306**, 2100032 (2021). DOI: 10.1002/mame.202100032
- [33] S.H. Ryu, Y.K. Han, S.K. Kwon, T. Kim, B.M. Jung, S.-B. Lee, B. Park. *Chem. Eng. J.*, **428**, 131167 (2022). DOI: 10.1016/j.ccej.2021.131167
- [34] Y. Han, Y. Liu, L. Han, J. Lin, P. Jin. *Carbon NY.*, **115**, 34 (2017).