18

Оптические и структурные характеристики полупрозрачных гибких тонких пленок AgNWs/PET

© Д.М. Уразкулова[1], И.Р. Бойназаров[1], А.Й. Тургубоев[1], Xin Li[2], Long Ye[2], Sunsun Li[3], Э.А. Захидов[1], Ш.К. Нематов[4], В.О. Кувондиков[1,¶]

[1] Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,
Ташкент, Узбекистан
[2] Школа материаловедения и инженерии, Совместный инновационный центр химической науки и инженерии Тяньцзиньского университета,
Тяньцзинь, Китай
[3] Лаборатория гибкой электроники Института передовых материалов и Школа гибкой электроники Нанкинского технического университета,
Нанкин, Китай
[4] Шахрисабзский государственный педагогический институт,
Шахрисабз, Узбекистан

¶e-mail: vahobjon87@gmail.com

Поступила в редакцию 15.04.2025 г.
В окончательной редакции 09.05.2025 г.
Принята к публикации 20.05.2025 г.

Изучены физические свойства серебряных нанопроволок AgNWs, синтезированных методом „полиол“ и нанесенных на полимерные пленки полиэтилентерефталата, PET, методом механического прессования для получения структуры AgNWs/PET. Показано, что таким путем можно получить нанопроволоки AgNWs диаметром 50 ± 10 nm, длиной $15-20\,\mu$m и плотностью $105-115$ mg/m^2 и тонкую пленку AgNWs/PET с сопротивлением 2.4 Ω/sq. Изученные оптические, электрические и структурные характеристики тонких пленок AgNWs/PET подтверждают, что они являются перспективным материалом в качестве электрода гибких органических солнечных элементов.

Ключевые слова: нанопроволоки AgNWs, PET-подложка, прозрачный гибкий электрод, спектр поглощения, спектр пропускания, комбинационное рассеяние.

DOI: 10.61011/OS.2025.08.61516.7812-25

Введение

В настоящее время обеспечение населения доступной, безопасной и экологически чистой энергией является одной из главных задач мирового сообщества. Тонкопленочные Органические Солнечные Элементы (ОСЭ), как перспективный вид фотовольтаических технологий нового поколения, могут служить эффективному решению этой проблемы. Благодаря ряду своих ключевых преимуществ, таких как низкий углеродный след, возможность обработки при низких температурах, простота производственного процесса и, самое главное, возможность изготовления в виде гибких структур, этот вид ОСЭ последнее время интенсивно изучается для дальнейшего повышения указанных конкурентных свойств с целью широкого практического применения [1–3].

В солнечных элементах материал электрода играет ключевую роль в достижении высокой эффективности преобразования световой энергии, так как степень попадания света в активный слой и эффективность сбора фотогенерированных зарядов в них зависят от оптических и фотоэлектрических свойств материала электрода. Использование полупрозрачных электродов с довольно высоким пропусканием света в широкой спектральной области и одновременно низким электрическим сопротивлением является ключевым решением данной проблемы [4–6].

Для обеспечения высокой функциональности гибких ОСЭ применяемые в них полупрозрачные электроды наряду с высоким светопропусканием, низким поверхностным электрическим сопротивлением должны обладать также оптимальной поверхностной функциональностью, механической гибкостью и термической стабильностью [7,8]. Одним из широко используемых материалов в фотовольтаике и оптоэлектронике, отвечающим большинству из этих требований, является оксид индия-олова, ITO. Среди оксидов металлов именно ITO демонстрирует наиболее подходящие к таким требованиям физические свойства: его тонкая (100 nm) пленка, нанесенная на стеклянную подложку, обладает поверхностным электрическим сопротивлением около 20 Ω/sq, а светопропускание — вплоть до 90% [9]. Однако при широком применении такого металлического оксида возникает ряд существенных сложностей, так как высокая стоимость материала, сложность производственно-технологического процесса обработки, необходимость работы в высоком вакууме и при высоких темпера-

турах, а также низкое пропускание в инфракрасном диапазоне [9]. Для разработки гибких ОСЭ важнейшей проблемой является то, что при использовании тонкой пленки ITO на гибкой подложке она быстро растрескивается под воздействием механических напряжений. Также следует заметить, что во многих случаях в ОСЭ с тонкой пленкой ITO на гибких подложках уровень светопропускания и электрического сопротивления зачастую не позволяет достичь оптимальные параметры устройства [4]. Исходя из этого в современных гибких ОСЭ в качестве прозрачных электродов часто начали применять углеродные и металлические наноструктуры. В частности, серебряные нанопроволоки, AgNWs, обладающие высокой электропроводностью и достаточной прозрачностью, активно исследуются как перспективный материал для использования в гибких ОСЭ [10,11]. Для использования в разработке ОСЭ AgNWs обладают рядом несомненных преимуществ: (i) высокая проводимость, благодаря низкому электрическому сопротивлению серебра; (ii) высокое светопропускание слоя нанопроволок AgNWs, нанесенных на полимерную пленку; (iii) возможность изготовления из них гибких электродов для гибких ОСЭ [12,13]. К тому же следует учитывать, что метод синтеза AgNWs довольно прост, для формирования соответствующих структур его можно обрабатывать с использованием растворов, причем с применением самого экологически чистого растворителя — воды [14]. Исходя из этого, AgNWs рассматриваются как наиболее доступное и альтернативное к ITO решение для создания гибких ОСЭ нового поколения. Для достижения необходимых качеств, структурных свойств и долговременной стабильности таких нановолокон в настоящее время проводятся активные исследования, в частности по выявлению природы агломерации в структуре AgNWs, вследствие чего нанопроволоки могут слипаться, что значительно снижает ее электропроводность [15].

Важное свойство AgNWs, которое открывает новые возможности для применения в разработке ОСЭ, — это способность сети таких нанопроволок рассеивать свет. Интенсивное рассеяние света и высокий уровень мутности — физического параметра, характеризующего такое явление, как это было показано в исследованиях [16], приводит к существенному повышению эффективности солнечного элемента; для этого содержание AgNWs на подложке из полиэтилентерефталата, PET, должно превышать 10 mg/m^2. При этом мутность определяет степень пропускания света в светопоглощающий активный слой. Кроме того, установлено, что увеличение уровня мутности нанопроволоки AgNWs не только удлиняет путь распространения света, но и способствует улучшению плотности тока короткого замыкания в ОСЭ [17]. Увеличение уровня мутности в тонких пленках AgNWs, вызывая значительное рассеяние света и удлиняя его оптический путь, обеспечивает более длительное удержание света внутри активного слоя. Такое удлинение светового пути играет ключевую роль в увеличение поглощения света, что способствует повышению эффективности его преобразования.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют, что эффективность работы ОСЭ зависит как от размеров нанопроволок AgNWs, так и их оптических параметров, таких как пропускание и поглощение света, а также уровень мутности. Учитывая это обстоятельство, в настоящей работе оптические и структурные характеристики AgNWs/PET исследованы для выявления возможностей применения такой структуры в качестве прозрачных электродов гибких ОСЭ.

Материалы и методы

Синтез пленок AgNWs/PET. Нанопроволоки AgNWs были синтезированы методом „полиол“ и нанесены на подложку из полиэтилентерефталата, PET, с использованием двухэтапного механического прессования. При синтезе нанопроволок AgNW использовались следующие реагенты: нитрат серебра ($AgNO_3$, $\geq 99\%$, Sigma-Aldrich, США), поливинилпирролидон (PVP, Sigma-Aldrich, США), хлорид натрия (NaCl) и этанол (Sigma-Aldrich, США). В процессе получения нановолокон AgNW использовалась мембрана из поливинилиденфторида (PVDF). Приготовление раствора Ag нанопроволоки осуществлялось по следующей методике. 100 ml PVP растворили в этаноле в концентрации 0.1 mol/l и в колбе нагревали до 150 °C в течение 1 h при непрерывном магнитном перемешивании. Затем в колбу добавляли 100 μl раствора NaCl в этаноле с концентрацией 0.1 mol/l. Через 5 min в колбу вводили 150 ml раствора $AgNO_3$ в этаноле концентрации 0.1 mol/l со скоростью 10 ml/min. Была подготовлена растворенная в этаноле суспензия AgNWs с концентрацией 5 mg/ml. Полученный раствор охлаждали до комнатной температуры, фильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0.8 μm и разбавляли деионизированной водой. Затем собранные на мембранном фильтре AgNW повторно диспергировали в деионизированной воде с помощью ультразвука. В итоге получали раствор серебряной нанопроволоки с концентрацией 4 μg/ml в деионизированной воде. Полученный раствор фильтровали в течение 30 min через мембрану из поливинилиденфторида (PVDF), после чего этот процесс повторяли, создавая два идентичных образца AgNWs/PVDF. На следующем этапе мембрана PVDF с покрытия AgNWs была перенесена на подложку из PET с помощью механического прессования при давлении 2 MPa в течение 10 s, затем фильтровальная мембрана была осторожно удалена. После этого образцы с AgNWs/PET высушивали на воздухе в течение 10 min, а затем сверху таким же способом наносили второй слой AgNWs/PVDF. Основной целью двойного нанесения AgNWs на подложку из PET было обеспечение высокой электропроводности и низкого сопротивления, несмотря на некоторое снижение пропускания света. Для повышения плотности

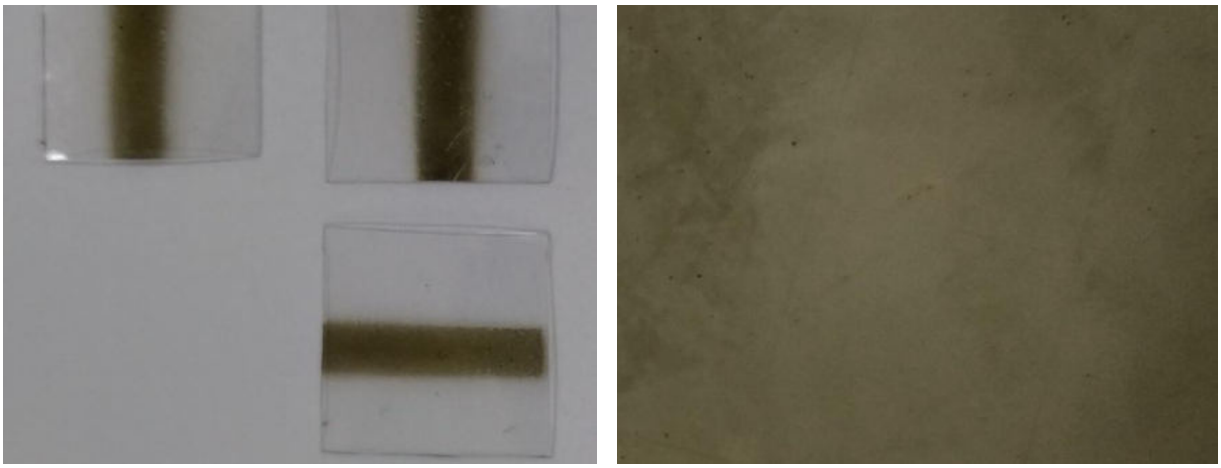


Рис. 1. Общий вид образцов AgNWs, нанесенных на подложки из PET.

нанопроволок в пленке AgNWs/PET и соответствующего улучшения электропроводимости проводили повторное механическое прессование при давлении 15 MPa в течение 25 s.

Подобные методы синтеза и формирования структуры AgNWs/PET применялись и в других исследованиях [18,19]. Однако в отличие от них мы использовали двухслойное покрытие для получения структуры AgNWs/PET с пониженным электрическим сопротивлением (рис. 1).

Характеризация пленок AgNWs/PET. Спектры поглощения и пропускания тонких пленок AgNWs/PET в области 190–1100 nm были измерены с помощью спектрофотометра Cary 60 (Agilent, США). Спектры фотолюминесценции (ФЛ) тонкопленочных образцов AgNWs/PET в диапазоне 400–800 nm были измерены с помощью спектрофлуориметра RF 6000 (Shimadzu, Япония) при возбуждении монохроматическим светом с длиной волны 380 nm. Изображения сканирующей электронной микроскопии нанопроволок AgNWs на подложке из PET были получены с помощью микроскопа SEM Zeiss EVO MA 15 (Carl Zeiss, Германия) при напряжении 5.00 kV, а изображения просвечивающей электронной микроскопии — с помощью микроскопа TEM H-7650 (Hitachi, Япония) при масштабе 500 nm. Спектры комбинационного рассеяния были измерены спектрометром InVia Raman 2000 (Renishaw, Великобритания) при возбуждении мощностью 10 mW на длине волны 532 nm с использованием 50-кратного микрообъектива. Для изучения рентгеновской дифракции использовался дифрактометр XRD-6100 (Shimadzu, Япония) при углах Брэгга 2θ от 5 до 80°. Поверхностное сопротивление тонкой пленки AgNW измерено методом четырехточечного зонда с помощью прибора Four-Point Probe Plus (Osilla, Великобритания).

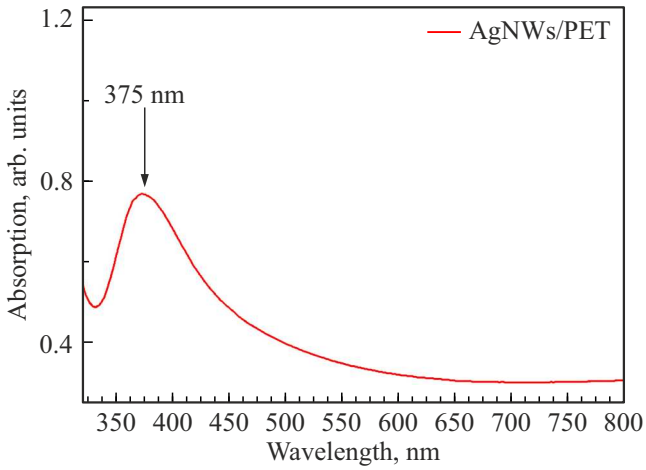


Рис. 2. Спектр поглощения структуры AgNWs/PET.

Результаты и обсуждение

Как известно, спектры поглощения структуры AgNWs/PET зависят от размеров нанопроволок, их структурных особенностей, а также метода и условий их синтеза. При этом в спектре имеются четко выраженные максимумы, связанные с локальным плазмонным резонансом (ЛПР). Поперечная мода ЛПР в нанопроволоках AgNWs зависит от их диаметра и морфологии поверхности и, как правило, в спектре поглощения проявляется в виде интенсивной полосы в области 380–400 nm [20]. Эта полоса может смещаться в „красную“ или „синюю“ области спектра в зависимости от диаметра нанопроволок. Например, при диаметре нанопроволок 40–60 nm пик поглощения наблюдается на 380 nm, тогда как при диаметре 70–100 nm полоса поглощения смещается ближе к 400 nm [21,22]. Продольная мода ЛПР в нанопроволоках AgNWs зависит от их

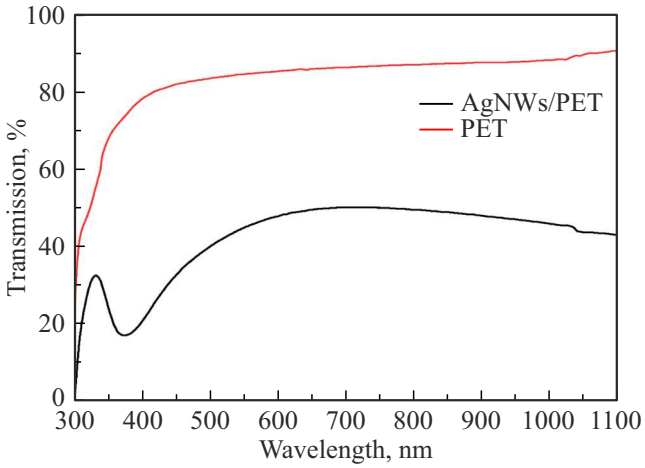


Рис. 3. Спектр пропускания полимерной пленки PET и структуры AgNWs/PET.

длины и упорядоченности, при этом соответствующая полоса поглощения должна находиться в ближней ИК области [21]. В спектре поглощения изученных нами образцов AgNWs/PET наблюдалась сравнительно широкая полоса поглощения в области 350–415 nm, с максимумом на 375 nm (рис. 2). Это свидетельствует о том, что диаметр исследуемых нанопроволок AgNWs находится в пределах 40–70 nm, причем основную их часть составляют нанопроволоки с диаметром около 50 nm. В большинстве случаев полоса поглощения нанопроволок AgNWs, синтезированных методом „полиол“ и связанные с ЛПР, наблюдалась в области 370–410 nm [23]. Отметим, что изученные в настоящей работе образцы нанопроволок AgNWs по структуре и характерным размерам могут заметно отличаться от образцов, полученных другими исследователями, так как физические условия синтеза могли существенно различаться.

Плотность и диаметр нанопроволоки, а также методы синтеза AgNWs являются факторами, оказывающими значительное влияние на их спектры пропускания. Известно, что увеличение плотности нанопроволоки повышает электропроводность, но при этом снижает оптическую прозрачность. Исходя из этого оптимальный баланс между оптическим пропусканием и электрической проводимостью играет решающую роль в применении таких гибких электродов. Xiang-Qian и его группа с помощью метода „Transfer-printing и вторичное прессование“ синтезировали AgNWs с оптимальными параметрами: при минимальном электрическом сопротивлении 11.5 Ω/sq пропускание света при 550 nm (T_{550}) составило 93.4% [18]. Wei Xu и его группа выяснили, что для AgNWs, синтезированной методом „полиол“ и нанесенной на подложку из PET с плотностью 16 mg/m^2, светопропускание T_{550} составило 82.3%, тогда как при увеличении плотности до 80 mg/m^2 T_{550} снизилось до 65.6% [24].

На рис. 3 показаны спектры пропускания полимерной пленки PET и структуры AgNWs/PET изученных нами образцов. Как видно из спектров, на длине волны 715 nm пропускание имеет максимальное значение — 50%, а при 550 nm — 45%. Из этих данных можно оценить, что плотность AgNWs в исследуемых образцах была довольно высокой — около 105–115 mg/m^2. По сравнению с результатами, представленными в работе [24], плотность AgNWs/PET в наших образцах в 7 раз выше, что снижает оптическую прозрачность, но значительно повышает электропроводность.

На спектр пропускания образцов AgNWs/PET сильно влияет также светопропускание самой подложки из PET. Значение $T_{550} = 84.6\%$ в PET указывает, что ее спектр пропускания не является идеальным. Коэффициент пропускания слоя AgNWs без подложки может быть рассчитан по формуле:

$$T_f = \frac{T_{f+s}}{T_s}, \qquad (1)$$

где T_f — коэффициент светопропускания слоя AgNWs, T_s — коэффициент светопропускания подложки из PET, T_{f+s} — коэффициент пропускания структуры AgNWs/PET [25]. Полученное значение $T_{550} = 53\%$ свидетельствует о высокой плотности нановолокон Ag, способной обеспечить минимальное сопротивление.

Ключевым преимуществом наших AgNWs/PET-образцов является сохранение светопропускания выше 43% в ИК области, вплоть до 1100 nm, а также достижение минимального электрического сопротивления 2.4 Ω/sq. Эти параметры показывают, что в созданных на основе таких электродов ОСЭ можно одновременно реализовать как эффективный перенос зарядов с минимальными потерями, так и использовать свет в широком спектральном диапазоне. В спектре пропускания можно заметить резкий спад в области около 375 nm, что соответствует полосе поглощения, связанной с ЛПР и обусловленной нанопроволоками AgNWs. Спектры ФЛ нанопроволок AgNWs зависят от свойств ЛПР, морфологии, а также природы их взаимодействия с подложкой [26]. В большинстве случаев в зависимости от размерных характеристик нановолокон AgNWs, в диапазоне 350–600 nm, появляются полосы ФЛ, состоящие из различных мод плазмонного резонанса [26–28]. Другие исследователи также наблюдали полосы ФЛ в соответствующем спектральном диапазоне для нанопроволок диаметром 50–70 nm и объяснили это локализацией электронов на поверхности [29]. Если плотность нанопроволок AgNWs высока, то соответствующие плазмонные отклики в их спектрах ФЛ проявляются с высокой интенсивностью.

Нами также были исследованы спектры ФЛ образцов AgNWs при возбуждении с длиной волны 380 nm, в области соответствующего поглощения нанопроволок (рис. 4). В спектре ФЛ наблюдалась широкая полоса в области 400–650 nm с максимумом при 460 nm и связанный с поперечными плазмонными резонансами. Ширина этой полосы и его асимметричная форма с

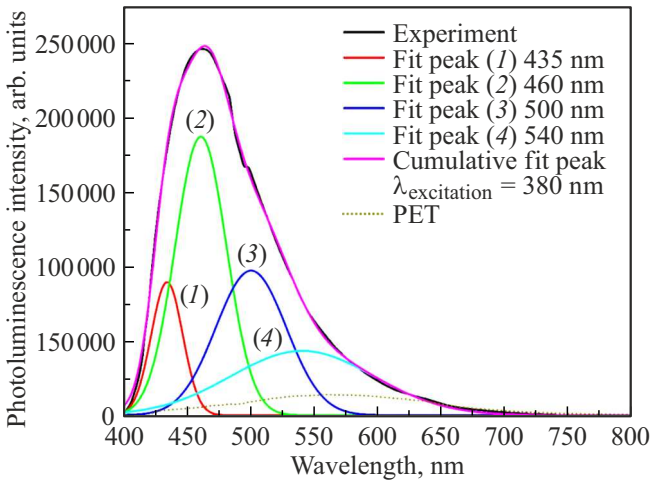


Рис. 4. Спектр ФЛ пленки AgNWs/PET и четыре гауссовы компоненты, на которые он разделен.

расширенным правым плечом указывают на присутствие в структуре значительного количества нановолокон с большими диаметрами [30]. Однако следует заметить, что спектры ФЛ AgNWs могли немного различаться также и в зависимости от условий синтеза, поверхностного состояния, окисления и типа полимерной подложки [27,29].

Для внесения ясности в преобладающий механизм фотолюминесценции мы разделили измеренные спектры ФЛ наших образцов AgNWs, представляющие собой асимметричную широкую полосу, на гауссовы составляющие. Это поможет определить ответственные за ФЛ электронные переходы, влияние на них дефектов и плазмонные эффекты, что в итоге позволит установить соответствующие оптические, электронные и морфологические характеристики AgNWs. В экспериментально измеренном спектре ФЛ исследованных образцов AgNWs были выделены четыре гауссовы компоненты (рис. 4) с максимумами на 435, 460, 500 и 540 nm, которые можно интерпретировать следующим образом:

1. Компонента (полоса) *1* с максимумом на 435 nm (2.85 eV) может быть связана с поперечными (перпендикулярными к оси нановолокон) поверхностными плазмонными резонансами AgNWs. Соответствующий электронный переход может быть связан со структурными дефектами нановолокон [31].

2. Компонента (полоса) *2* с максимумом на 460 nm (2.7 eV) может быть связана с поверхностными дефектами и рекомбинацией носителей зарядов в AgNWs со средним диаметром $\sim$ 50 nm [32,33].

3. Компонента (полоса) *3* с максимумом на 500 nm (2.48 eV) может быть связана с продольным (по оси нановолокна) поверхностным плазмонным резонансом, что указывает на наличие более длинных нановолокон. Этот резонанс зависит от соотношения длины и диаметра нановолокон [30,34].

4. Компонента (полоса) *4* с максимумом на 550 nm (2.3 eV) может быть связана с продольным поверхностным плазмонным резонансом в AgNWs с большим диаметром ($\sim$ 100 nm) и длиной $\sim$ 50 μm [30,35].

Поперечные поверхностные плазмонные резонансные полосы на меньших длинах волн в спектре ФЛ указывают на присутствие нановолокон с меньшим диаметром. Высокая интенсивность полосы *2* с максимумом на 460 nm на рис. 4 свидетельствует о большом процентном содержании нановолокон с диаметром около 50 nm в исследуемых образцах AgNWs. Также мы измерили спектр фотолюминесценции чистой пленки PET без нановолокон Ag (рис. 4). Интенсивность фотолюминесценции тонкой пленки PET оказалась очень низкой по сравнению с образцом AgNW/PET. Видно, что фотолюминесценция чистого PET практически не влияет на общий спектр фотолюминесценции структуры AgNW/PET.

Для изучения морфологии, разброса значений диаметра и длины, а также упорядоченности расположения нановолокон AgNWs наиболее информативной методикой является сканирующая электронная микроскопия, SEM [14,20]. SEM-изображение изученных образцов AgNWs/PET показало, что в такой структуре серебряные нанопроволоки расположены хаотично, переплетаясь в плотную структуру, напоминающую волокна волос (рис. 5). Из рисунка можно оценить среднюю длину нановолокон, которая оказалась довольно большой, 15–20 μm. Такое положение подтверждает, что структура AgNWs/PET, обладая высокой степенью гибкости, может быть подходящим материалом в качестве электрода гибких ОСЭ. На SEM-изображениях также наблюдаются белые точки и кластеры, которые, возможно, образованы в результате агломерации, окисления или неконтролируемыми остатками синтеза. Расположение нанопроволок, в целом, однородное, в некоторых областях они переплетаются и образуют кластеры.

Изображения SEM также свидетельствуют, что нанопроволоки AgNWs имеют высокую однородность и достаточную плотность, свидетельствующие об их высоком качестве для использования как гибкий электрод в различных направлениях гибкой электроники.

Изображение TEM-микроскопии дает возможность более точно определить морфологию слоя, диаметр, длину и аспектное соотношение (длина/диаметр) AgNWs [36]. Обычно, в зависимости от метода синтеза, диаметр серебрянных нанопроволок варьируется от 20 до 150 nm, а длина — от 5 до 50 μm. Например, в ряде работ с использованием метода „полиол“ были получены AgNWs диаметром 20 nm и длиной 40 μm, что соответствует аспектному отношению 2000 [37].

Анализ TEM-изображений изученных нами образцов AgNWs показал, что диаметр нанопроволоки в среднем составляет 50 nm, хотя в отдельных случаях встречались нанопроволоки диаметром и 40 nm, и 70 nm (рис. 6). Из рисунка видно, что, несмотря на прямолинейную форму нанопроволок в наномасштабе, в микромасштабе

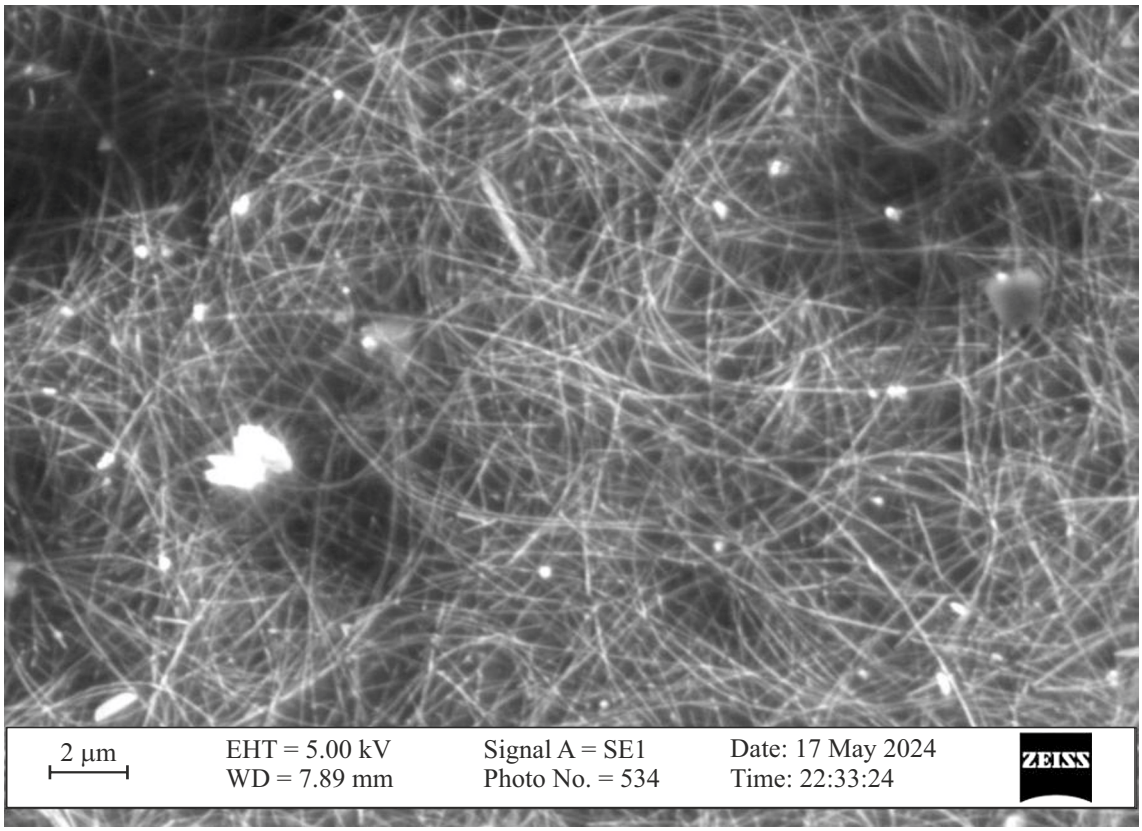


Рис. 5. SEM-изображение структуры AgNWs/PET.

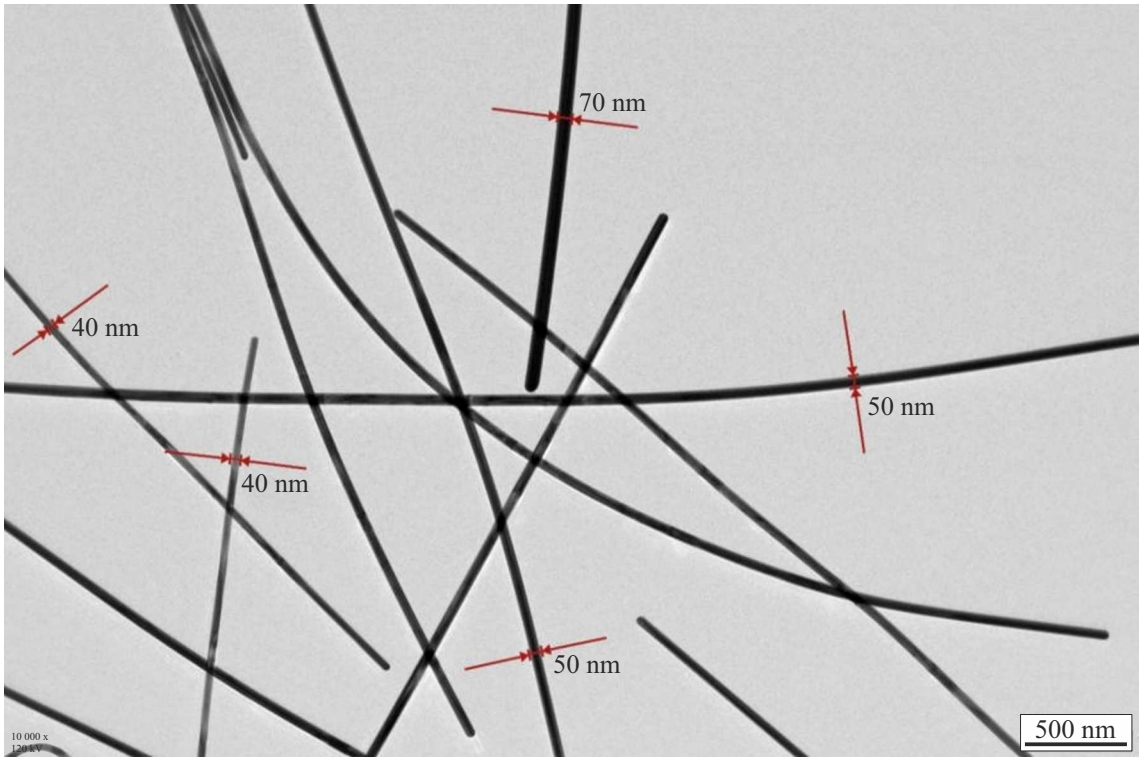


Рис. 6. TEM-изображение структуры AgNWs/PET.

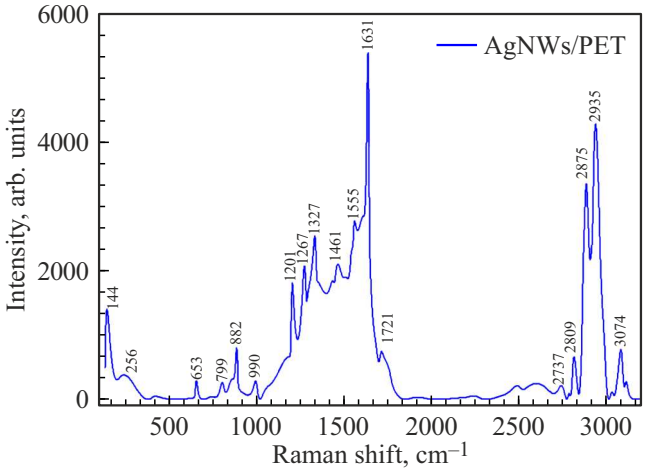


Рис. 7. Спектры комбинационного рассеяния структуры AgNWs/PET.

нанопроволоки демонстрируют сильную изогнутость и достигают нескольких микрон в длину. Кроме того, по диаметру нановолокна не сильно различаются друг от друга, что указывает на высокую их однородность. Большое значение аспектного отношения таких нанопроволок также подтверждает их перспективность для применения в качестве гибкого электрода в соответствующих приложениях.

Спектроскопия комбинационного рассеяния является важным инструментом для изучения структурных характеристик нанопроволок AgNWs [38,39]. Учитывая такое положение, нами были измерены спектры комбинационного рассеяния образцов AgNWs/PET (рис. 7). В спектре комбинационного рассеяния структуры AgNWs/PET были идентифицированы важнейшие колебательные частоты серебряных нанопроволок, они приведены в таблице. Отметим, что из-за невозможности жесткой фокусировки всего лазерного излучения только на AgNWs при ее толщине менее $1\,\mu$m подложка из PET толщиной в миллиметры также освещалась этим излучением, и поэтому в спектре также наблюдались интенсивные полосы, соответствующие колебаниям PET. Обычно для достижения высокого пропускания света плотность нанопроволок AgNWs делают низкой. Чтобы выдерживать такие условия, т. е. контролировать плотность нанопроволок, в качестве индикатора можно использовать пик комбинационного рассеяния при 256^{-1} cm, связанный с колебаниями AgNWs на рис. 7 [40]. В спектре комбинационного рассеяния также имеется полоса при 1721 cm^{-1}, связанная с колебаниями Эстера и C=O, которая позволяет оценивать потенциальное взаимодействие между AgNWs и PET [25]. Таким образом, указанные характерные пики в спектре комбинационного рассеяния могут служить информативными индикаторами плотности нанопроволок и из взаимодействия с пленкой, на которую они нанесены.

Структурные характеристики и степень кристалличности AgNWs можно определить с помощью рентгеновской дифракции (XRD) [23]. Обычно в спектрах XRD AgNWs можно четко видеть характерные для серебра дифракционные пики (111) и (200) [25]. Эти пики отображают взаимное расположение, деформацию и термическую стабильность кристаллов. Рентгеновская дифрактограмма структуры AgNWs/PET была получена в диапазоне значений угла Брэгга 2θ от 10 до 80° (рис. 8). Анализ дифрактограммы структуры AgNWs/PET, представленной на рис. 8, дает следующую интерпретацию значений угла Брэгга 2θ: (i) широкая полоса в диапазоне 10–30° указывает на аморфную структуру подложки PET; (ii) пики с высокой интенсивностью на 37.6, 43.8, 64.2 и 77.3° связаны с кристаллической природой нанопроволок AgNWs [42]; и (iii) другие пики с низкой интенсивностью могут указывать на фазовое взаимодействие между AgNWs и подложкой PET, а также окисление, загрязнение или наличие небольших количеств других фаз. Нанопроволоки AgNWs обычно имеют структуру FCC (face-centered cubic), и сильные дифракционные пики соответствуют ориентации Ag (111), Ag (200), Ag (220), Ag (311). В этом случае значения угла Брэгга 2θ соответствуют следующим ориентациям: (111) — 37.6°, (200) — 43.8°, (220) — 64.2°, (311) — 77.3° [25,42]. Размеры, плотность и условия синтеза серебряных нановолокон могут также приводить к изменению значений угла Брэгга 2θ или изменению средней ширины пика [43]. Кроме того, наблюдавшийся при 56.2° в дифрактограмме пик связан с оксидом серебра (Ag–O), который может образоваться при частичном окислении AgNWs [25,37]. Хотя полимерная подложка из PET обычно имеет аморфную структуру, в некоторых случаях она также может проявлять определенные кристаллические свойства за счет упорядоченных полимерных цепей. В наших образцах пики, наблюдавшиеся при значениях угла Брэгга 2θ при 16.4° и при 22.6°, указывают на возможность появления кристаллической

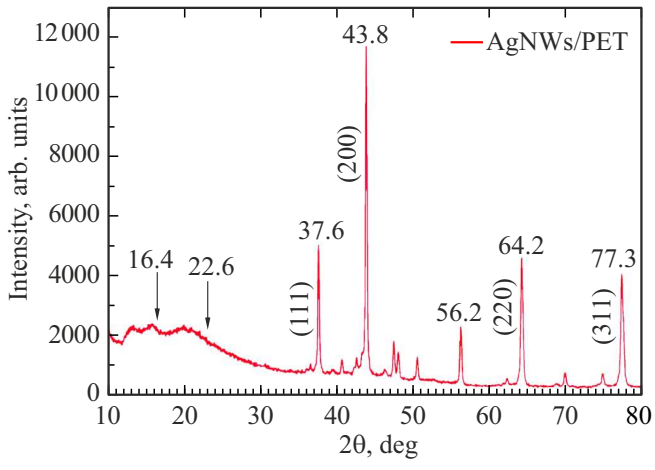


Рис. 8. Рентгеновская дифрактограмма структуры AgNWs/PET.

Характерные колебательные частоты, выявленные в спектре комбинационного рассеяния структуры AgNWs/PET

№	Сдвиг по частоте (cm^{-1})	Тип молекулярного колебания	Причина возникновения колебания (AgNWs или PET)
1	256	Ag-симметричные колебания	Связано с низкочастотными поверхностными плазмонными колебаниями AgNWs [40]
2	653	Колебания, связанные с C−C- и C−O-связями	Одна из характерных колебательных полос PET [25]
3	799	C−H-колебания	
4	882	C−C-колебания	
5	990	C−H-колебания	
6	1201	C−O−C-деформационные колебания	Связано с молекулярным скелетом PET [25,41]
7	1267	C−H-колебания	
8	1327	C−C-симметричные колебания	
9	1461	C−H-колебания	Связаны с характеризующими PET колебаниями бензольного кольца [25]
10	1555	Ароматические C=C-колебания	
11	1631	C=O-карбонильные колебания	
12	1721	Эстерные C=O-колебания	Колебания, свойственные PET [25]
13	2737, 2809, 2875, 2935, 3074	C−H-симметричные асимметричные колебания	Колебания относятся к метиленовым и метиловым группам PET [25,41]

фазы PET, состоящей из упорядоченных полимерных цепей [43].

Заключение

В работе исследованы нанопроволоки AgNWs, синтезированные методом „полиол“ и нанесенные на подложку из PET с использованием механического прессования, образуя двухслойную структуру AgNWs/PET с сопротивлением 2.4 Ω/sq и плотностью нанопроволок 105−115 mg/m^2. Несмотря на низкое пропускание света в видимой области ($T_{550} = 45\%$), полученные образцы AgNWs/PET продемонстрировали довольно высокое для ИК области пропускание света ($T_{550} = 43\%$) на длинах волн вплоть до 1100 nm. Анализ спектра ФЛ структуры AgNWs/PET с разделением на гауссовы компоненты показал, что интенсивная полоса с максимумом на 460 nm, связанная с поперечным поверхностным плазмонным резонансом, показывает преобладание в такой структуре нанопроволок с небольшими значениями диаметра. С помощью анализа SEM- и TEM-изображений и оптических спектров синтезированных образцов AgNWs получены важные данные о размерах и морфологии нановолокон. Согласно этим данным, основная часть таких нанопроволок характеризуются диаметром около 50 nm, а их длина достигает 15−20 μm. Аспектное соотношение (длина/диаметр) таких нанопроволок на уровне 300−400, характерная морфология и беспорядочно, но плотно расположенные AgNWs обеспечивают широкие возможности для использования такой структуры в качестве гибкого электрода в новых, гибких ОСЭ с возможностью использования активного слоя в широком спектре света.

Благодарности

Автор выражает благодарность докторам Xin Li и Long Ye, ученых из Школы материаловедения и инженерии Тяньцзиньского университета, за их тесное сотрудничество и помощь в получении TEM-изображений структуры AgNW/PET.

Финансирование работы

Настоящая работа была выполнена при поддержке проекта AL-8724053065, выделенного Агентством инновационного развития Республики Узбекистан.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] X. Sun, F. Wang, G. Yang, X. Ding, J. Lv, Y. Sun, T. Wang, C. Gao, G. Zhang, W. Liu, X. Xu, S. Satapathi, X. Ouyang, A. Ng, L. Ye, M. Yuan, H. Zhang, H. Hu. Energy Environ. Sci., **18**, 2536 (2025). DOI: 10.1039/D4EE05533K

[2] D. Qiu, C. Tian, H. Zhang, J. Zhang, Z. Wei, K. Lu. Adv. Mater., **36**, 2313251 (2024). DOI: 10.1002/adma.202313251

[3] J. Lv, X. Sun, H. Tang, F. Wang, G. Zhang, L. Zhu, J. Huang, Q. Yang, S. Lu, G. Li, F. Laquai, H. Hu. InfoMat **6**, e12530 (2024). DOI: 10.1002/inf2.12530
[4] M.R. Azani, A. Hassanpour, T. Torres. Adv. Energy Mater., **10**, 2002536 (2020). DOI: 10.1002/aenm.202002536
[5] Y. Fang, Z. Wu, J. Li, F. Jiang, K. Zhang, Y. Zhang, Y. Zhou, J. Zhou, B. Hu. Adv. Funct. Mater., **28**, 1705409 (2018). DOI: 10.1002/adfm.201705409
[6] E. Zakhidov, A. Kokhkharov, V. Kuvondikov, S. Nematov, R. Nusretov. J. Korean Phys. Soc., **67**, 1262 (2015). DOI: 10.3938/jkps.67.1262
[7] Y. Bae, D. Kim, S. Li, Y. Choi, S.Y. Son, T. Park, L. Ye. Prog. Polym. Sci., **159**, 101899 (2024). DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2024.101899
[8] S. Zeng, H. Li, S. Liu, T. Xue, K. Zhang, L. Hu, Z. Cai, Y. Cui, H. Wang, M. Zhang, X. Hu, L. Ye, Y. Song, Y. Chen. Energy Environ. Sci., **18**, 2318 (2025). DOI: 10.1039/D4EE02963A
[9] S. De, J.N. Coleman. MRS Bull., **36**, 774 (2011). DOI: 10.1557/mrs.2011.236
[10] K. Yang, Z. Wang, J. Zhang. Opt. Laser Technol., **164**, 109533 (2023). DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109533
[11] S. Nam, M. Song, D.H. Kim, B. Cho, H.M. Lee, J.D. Kwon, S.G. Park, K.S. Nam, Y. Jeong, S.H. Kwon, Y.C. Park, S.H. Jin, J.W. Kang, S. Jo, C.S. Kim. Sci. Reports., **4**, 1 (2014). DOI: 10.1038/srep04788
[12] W. Li, H. Zhang, S. Shi, J. Xu, X. Qin, Q. He, K. Yang, W. Dai, G. Liu, Q. Zhou, H. Yu, S.R.P. Silva, M. Fahlman. J. Mater. Chem. C., **8**, 4636 (2020). DOI: 10.1039/C9TC06865A
[13] F. Basarir, F.S. Irani, A. Kosemen, B.T. Camic, F. Oytun, B. Tunaboylu, H.J. Shin, K.Y. Nam, H. Choi. Mater. Today Chem., **3**, 60 (2017). DOI: 10.1016/j.mtchem.2017.02.001
[14] L. Zhang, T. Song, L. Shi, N. Wen, Z. Wu, C. Sun, D. Jiang, Z. Guo. J. Nanostructure Chem., 2021 113 **11**, 323 (2021). DOI: 10.1007/s40097-021-00436-3
[15] X. Yu, X. Yu, L. Chen, J. Zhang, Y. Long, L. Zhe, J. Hu, H. Zhang, Y. Wang. Opt. Mater., **84**, 490 (2018). DOI: 10.1016/j.optmat.2018.07.048
[16] B.Y. Wang, T.H. Yoo, J.W. Lim, B.I. Sang, D.S. Lim, W.K. Choi, D.K. Hwang, Y.J. Oh. Small., **11**, 1905 (2015). DOI: 10.1002/smll.201402161
[17] C. Preston, Y. Xu, X. Han, J.N. Munday, L. Hu. Nano Res., **6**, 461 (2013). DOI: 10.1007/s12274-013-0323-9
[18] M. xiang Jing, M. Li, C. yu Chen, Z. Wang, X. qian Shen. J. Mater. Sci., **50**, 6437 (2015). DOI: 10.1007/s10853-015-9198-3
[19] M. Li, M. Jing, Z. Wang, B. Li, X. Shen. J. Nanosci. Nanotechnol., **15**, 6088 (2015). DOI: 10.1166/jnn.2015.10283
[20] M. Oh, W.Y. Jin, H. Jun Jeong, M.S. Jeong, J.W. Kang, H. Kim. Sci. Reports., **5**, 1 (2015). DOI: 10.1038/srep13483
[21] B. Park, I.G. Bae, Y.H. Huh. Sci. Reports., **6**, 1 (2016). DOI: 10.1038/srep19485
[22] S. Fahad, H. Yu, L. Wang, Y. Wang, T. Lin, B.U. Amin, K.U.R. Naveed, R.U. Khan, S. Mehmood, F. Haq, Y. Xing, M. Usman. J. Electron. Mater., **50**, 2789 (2021). DOI: 10.1007/s11664-021-08770-6
[23] B.A. Kale, S.N. Birajdar, P.U. More, P.V. Adhyapak. J. Mater. Sci. Mater. Electron., **35**, 1 (2024). DOI: 10.1007/s10854-024-12087-5
[24] W. Xu, Q. Xu, Q. Huang, R. Tan, W. Shen. W. Song, J. Mater. Sci. Technol., **32**, 158 (2016). DOI: 10.1016/j.jmst.2015.12.009
[25] A. Voronin, I. Bril., A. Pavlikov, M. Makeev, P. Mikhalev, B. Parshin, Y. Fadeev, M. Khodzitsky, M. Simunin, S. Khartov. Polymers (Basel), **17**, 321 (2025). DOI: 10.3390/polym17030321
[26] S. Dong, W. Zhang, M. Qi, A. Wei, G. Zhang, R. Chen, J. Hu, M. Bai, Z. Yang, X. Liu, L. Xiao, C. Qin, S. Jia. ACS Photonics., **12**, 1 (2025). DOI: 10.1021/acsphotonics.4c01886
[27] V. Kravets, Z. Almemar, K. Jiang, K. Culhane, R. Machado, G. Hagen, A. Kotko, I. Dmytruk, K. Spendier, A. Pinchuk. Nanoscale Res. Lett., **11**, 1 (2016). DOI: 10.1186/s11671-016-1243-x
[28] M. Hamzah, M. Khenfouch, V.V. Srinivasu. J. Mater. Sci. Mater. Electron., **28**, 1804 (2017). DOI: 10.1007/s10854-016-5729-1
[29] J. Jiu, T. Sugahara, M. Nogi, K. Suganuma. J. Nanoparticle Res., **15**, 1 (2013). DOI: 10.1007/s11051-013-1588-3
[30] J.J. Mock, M. Barbic, D.R. Smith, D.A. Schultz, S. Schultz. J. Chem. Phys., **116**, 6755 (2002). DOI: 10.1063/1.1462610
[31] J. Niedziółka-Jönsson, S. Mackowski. Mater., **12**, 1418 (2019). DOI: 10.3390/ma12091418
[32] S. Link, M.A. El-Sayed. J. Phys. Chem. B., **103**, 8410 (1999). DOI: 10.1021/jp9917648
[33] D.D. Evanoff, G. Chumanov. J. Phys. Chem. B., **108**, 13957 (2004). DOI: 10.1021/jp0475640
[34] P.K. Jain, M.A. El-Sayed. Chem. Phys. Lett., **487**, 153 (2010). DOI: 10.1016/j.cplett.2010.01.062
[35] V.O.Bolshakov, K.V. Prigoda, A.A. Ermina, D.P. Markov, Yu.A. Zharova. Opt. Spectrosc., **132** (12), 1240−1243, (2024). DOI: 10.61011/OS.2024.12.59801.6451-24
[36] Y.-H. Hsueh, A. Ranjan, L.-M. Lyu, K.-Y. Hsiao, Y.-C. Chang, M.-P. Lu, M.-Y. Lu, M.-Y. Lu. Adv. Electron. Mater., **9**, 2201054 (2023). DOI: 10.1002/aelm.202201054
[37] M.B. Gebeyehu, T.F. Chala, S.Y. Chang, C.M. Wu, J. Y. Lee. RSC Adv., **7**, 16139 (2017). DOI: 10.1039/C7RA00238F
[38] X. Zhu, A. Guo, Z. Yan, F. Qin, J. Xu, Y. Ji, C. Kan. Nanoscale., **13**, 8067 (2021). DOI: 10.1039/D1NR00977J
[39] E.A. Zakhidov, M. A. Zakhidova, A. M. Kokhkharov, S.K. Nematov, R.A. Nusretov, V.O. Kuvondikov, A.A. Saparbaev. Opt. Spectrosc., **122**, 607 (2017). DOI: 10.1134/S0030400X1704021X
[40] F. Wu, H. Shi, Y. Gao, L. Cheng, T. Gu, T. Liu, Z. Chen, W. Fan. Sci. Reports., **14**, 1 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-80655-0
[41] L. Zhou, Y. Peng, N. Zhang, R. Du, R. Hübner, X. Wen, D. Li, Y. Hu, A. Eychmüller, L. Zhou, Y. Hu, R. Du, Y. Peng, X. Wen, D. Li, N. Zhang, A. Eychmüller, R. Hübner Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Adv. Opt. Mater., **9** (17), 2100352 (2021). DOI: 10.1002/adfm.202100352
[42] D. Kumar, Kavita, K. Singh, V. Verma, H. S. Bhatti. Appl. Nanosci., **5**, 881 (2015). DOI: 10.1007/s13204-014-0386-2
[43] L. Bardet, H. Roussel, S. Saroglia, M. Akbari, D. Muñoz-Rojas, C. Jiménez, A. Denneulin, D. Bellet. Nanoscale., **16**, 564 (2024). DOI: 10.1039/D3NR02663A