

Анизотропия электрических и оптических свойств металлполимерных композитов на основе нанопроволок FeNi в порах полимерных трековых мембран

© И.М. Долуденко¹, И.С. Волчков¹, В.В. Краснова¹, Д.Р. Хайретдинова^{1,2}, В.М. Каневский¹

¹ НИЦ „Курчатовский институт“,
Москва, Россия

² НИТУ „МИСИС“,
Москва, Россия

e-mail: doludenko.i@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.11.2025 г.

В окончательной редакции 16.01.2026 г.

Принята к публикации 03.06.2026 г.

Методом электрохимического заполнения получены металлполимерные композиты на основе трековых мембран с заполненными металлом порами. В качестве модельного заполняющего металла был выбран FeNi. Исследовали композиты с различной степенью заполнения пор матрицы — 10%, 25%, 50%, 100% от максимально возможного заполнения, что соответствовало временам роста в 20, 50, 100 и 200 с. Установлено направление оси легкой проводимости композитов и зависимости электрической проводимости от угла приложения зондов относительно направления легкой оси проводимости. Доказано существование анизотропии проводимости получаемых металлполимерных композитов. Исследована пропускающая способность металлполимерных композитов в диапазоне длин волн от 300 nm до 1100 nm, а также в зависимости от степени заполнения матрицы и при наложении двух композитов. Полученные результаты показывают возможность использования металлполимерных композитов на основе массивов нанопроволок в качестве прозрачных проводящих электродов и функциональных элементов.

Ключевые слова: трековые мембраны, электрохимическое осаждение, пермаллой, анизотропия проводимости, светопропускание.

DOI: 10.61011/OS.2026.08.63707.13-26

Введение

Синтез наноструктурированных материалов является одним из самых перспективных направлений развития в современной науке и промышленности ввиду огромного потенциала их возможных применений в различных областях. К таким перспективным наноматериалам можно отнести массивы одномерных наноструктур, а именно: нанопроволоки [1–7] или наностержни [8,9], а также металлполимерные композиты на их основе [10–13]. Такие объекты базируются как на металлических наноструктурах [2,4–6,11,12], в том числе из плазмонных металлов [4,5,12], так и на полупроводниковых [3,8,9] или диэлектрических [7] соединениях.

Так, металлполимерные композиты, включающие в себя массивы нанопроволок, за счет низкого порога перколяции обуславливают возникновение новых перспектив для их использования в качестве элементов гибких и растяжимых оптически прозрачных проводников [14,15]. Одновременное присутствие прозрачности в определенных диапазонах длин волн и гибкости электронных устройств позволяет рассматривать множество возможных приложений, таких как элементы гибкой кожи [16,17], взаимодействующие с кожей человека или тканями растений, а также различных устройств для фотокатализа [18] или фотоэлектронных приложений [19,20]. При этом геометрические особен-

ности массива металлических нанопроволок способны значительно влиять на свойства всего металлполимерного композита, например, механические [11,21], оптические [22] и электрические [2,23]. В результате за счет варьирования геометрии массива нанопроволок в композите возможно изменение оптоэлектронных характеристик как локально, так и всего массива [24]. Это также открывает широкие возможности масштабирования таких структур для оптоэлектронных приложений с различными диапазонами чувствительности и генерации электромагнитных излучений [25]. В связи с этим дальнейшие работы по исследованию оптических характеристик металлполимерных композитов на основе массивов нанопроволок, таких как оптическое пропускание, и особенно их связи с электрическими характеристиками представляют непосредственный интерес.

При этом стоит отметить, что как на геометрические параметры массивов нанопроволок, так и на их структуру, а также на общие свойства всего металлполимерного композита оказывают непосредственное влияние методы получения таких структур, а также типы используемых матриц, являющихся основой всего композита. В качестве основных методов получения одномерных наноструктур и нанопроволок можно выделить метод электрохимического осаждения в поры трековых мембран [2,4,11,25] или пористого оксида алюминия [5,6],

прямого химического синтеза [12], методы термического осаждения и молекулярно-лучевой эпитаксии [1,7,22], а также сложные производственные комплементарные металло-оксид-полупроводниковые процессы [3]. В случае синтеза массивов нанопроволок из ферромагнитных или плазмонных металлов предпочтительным может являться метод электрохимического осаждения за счет широких возможностей масштабируемости процесса, а также доступности, заключающейся в отсутствии воздействий высоких температур, применений сложных органических соединений, процессов литографии и т. п.

Свойства структур, получаемых электрохимическим осаждением, очень чувствительны к геометрии массива нанопроволок, как в случае осаждения в поры полимерных трековых мембран [2], так и в случае осаждения в поры пористого оксида алюминия [6]. Но если в случае осаждения в поры пористого оксида алюминия образуется массив из строго перпендикулярных к плоскости матрицы нанопроволок [5,6], то в случае электрохимического осаждения в поры полимерных трековых мембран возможно образование сплошной связанной структуры из нанопроволок, образующей непрерывную проводящую цепь [2]. Последнее расширяет возможности применения данных композитов в областях прозрачной гибкой электроники и сенсорики.

В связи с этим дальнейшие исследования влияния геометрии и структуры массива наноструктур на оптические характеристики металлполимерных композитов на основе нанопроволок, таких как оптическое пропускание и их связи с электрическими характеристиками, представляют непосредственный интерес.

Методы и материалы

Для синтеза металлполимерных композитов использовали метод матричного синтеза на основе электрохимического заполнения пор трековых мембран. В качестве матриц применяли промышленные трековые мембраны производства ОИЯИ (г. Дубна). Параметры матрицы: материал полиэтилентерефталат (ПЭТФ); диаметр пор — 100 nm; толщина пленки — 12 μm ; плотность пор — $1.2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$; угловое распределение пор в массиве по направлению протяжки матрицы в диапазоне $\pm 30^\circ$, и $\pm 0.5^\circ$. В качестве материала для заполнения пор был выбран сплав FeNi с соотношением элементов близким к пермаллою. Для этого применяли электролит следующего состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (16 g/L), $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (40 g/L), $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (8 g/L), H_3BO_3 (25 g/L), $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$ (0.5 g/L), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (1 g/L). Выбор данного состава обусловлен предсказуемостью его кинетики осаждения, а также высокой химической и физической стабильностью осадка [2,11]. Осаждение проводили при поддержании постоянного напряжения на ячейке в 1.5 V с использованием железного анода. Объем гальванической ячейки составлял 30 mL, площадь анода 6 cm^2 , расстояние между анодом и катодом 5.5 cm. В качестве катода

использовали пленки Cu, нанесенные на одну из сторон матрицы. Площадь образца матрицы, задействованная в реакции, составляла 2 cm^2 . Заполнение пор проводили с применением программируемого источника *Elins PS-50* (*Smart-Stat*, Россия).

Для определения максимального времени заполнения проводили тестовое осаждение без ограничения по времени с записью хроноамперограмм. Резкое увеличение тока свидетельствовало о начале осаждения материала вне матрицы. Данное значение времени было выбрано как максимальное время осаждения для максимального заполнения пор без выхода материала на поверхность мембраны. Для получения контрольных образцов время роста устанавливали в зависимости от максимального времени в процентном соотношении (10, 25, 50, 100 %), что соответствовало временам роста 20, 50, 100 и 200 s.

Для исследования морфологии и геометрических параметров образцов проводили исследования методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для этого с образца металлполимерного композита на медной подложке удалялась полимерная матрица. Удаление проводили в концентрированном (240 g/L) растворе NaOH при температуре 60 $^\circ\text{C}$. РЭМ-исследования проводили на приборе *JSM 6000 Plus* (*Jeol*, Япония) в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 15 kV.

Для получения итоговых образцов металлполимерных композитов с заготовок удаляли медный слой, выступавший катодом в процессе электрохимического осаждения. Для этого применяли селективный травитель на основе лимонной кислоты [2].

Электрические свойства металлполимерных композитов измеряли за счет снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) в диапазоне напряжений –20–20 V с шагом 0.1 V и хроноамперограмм при напряжениях 0.01, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 V в течение 300 s с шагом измерения в 1 s. Измерения проводили на лабораторном стенде, состоящем из пикоамперметра *Keithley 6487* (*Keithley*, США), зондовой станции *Everbeing* (*Everbeing*, Тайвань) и разработанного ПО. Использовали измерительные зонды из карбида вольфрама марки *WV* с радиусом скругления 10 μm и площадью контакта каждого зонда $\sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$, что приводило к контакту каждого зонда с массивом из ~ 3800 нанопроволок. Расстояние между измерительными зондами составляло 5 mm.

Пропускающую способность металлполимерных композитов измеряли с использованием спектрофотометра *Solar UV-Vis PB 2201* (ЗАО „СОЛАР“, Беларусь) в диапазоне длин волн 300–1000 nm. Измерения проводили в прямой геометрии от источника к образцу и после к детектору. Длина оптического пути составляла 100 mm, образец был расположен в специальном держателе в фокальной плоскости. Площадь задействованного образца составляла порядка 0.8 cm^2 .

Результаты и обсуждения

Для синтеза металлполимерных композитов с заданными значениями степени заполнения на первом этапе проводили тестовое осаждение без ограничения по времени с записью хроноамперограммы (рис. 1).

Исходя из полученных данных, было выбрано время заполнения пор матрицы, которое составило 20, 50, 100 и 200 с соответственно. Из РЭМ-изображений видно, что диаметр нанопроволок несколько больше диаметра пор, что, предположительно, может быть связано с окислением образцов на воздухе. Также оценивали среднюю длину массива нанопроволок, которая составила 0.73, 1.52, 2.64 и 5.61 μm для времени роста в 20, 50, 100 и 200 с соответственно. Максимальная длина нанопроволок меньше толщины матрицы по причинам неоднородности роста массива, возникающей из-за краевых эффектов, конвекции электролита и неоднородности распределения пор по поверхности матрицы [2,26]. Средняя длина массива нанопроволок для каждого образца нелинейно зависела от времени роста, что объясняется особенностями кинетики осаждения материала в ограниченном объеме порового канала. Данный эффект подробно описан в работе [27].

После получения и характеристики образцов проводили исследования их электрических свойств и сравнение числа пересечений согласно модели, приведенной в [2] и учитывающей граничные эффекты, и числа пересечений согласно модели, приведенной в [26], учитывающей все пересечения трековых каналов с электрическими характеристиками массива нанопроволок. Результаты приведены в таблице. Все дальнейшие измерения электрических характеристик проводили на образце с макси-

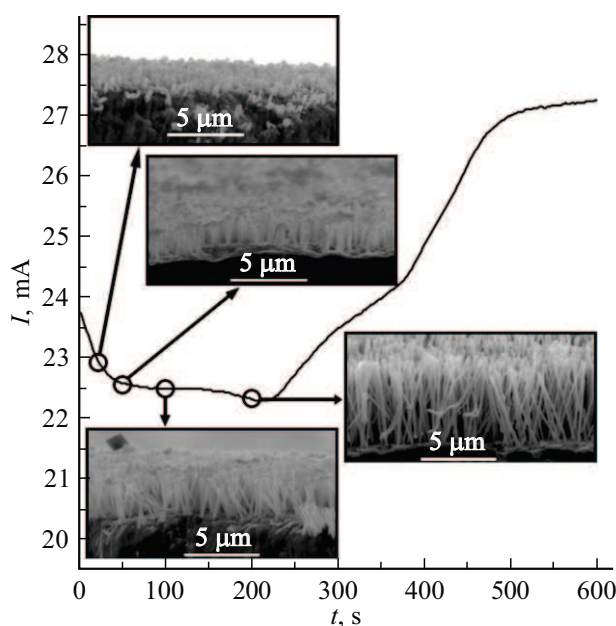


Рис. 1. Хроноамперограмма тестового образца и РЭМ-изображения массивов нанопроволок, выращенных в течение 20, 50, 100 и 200 с.

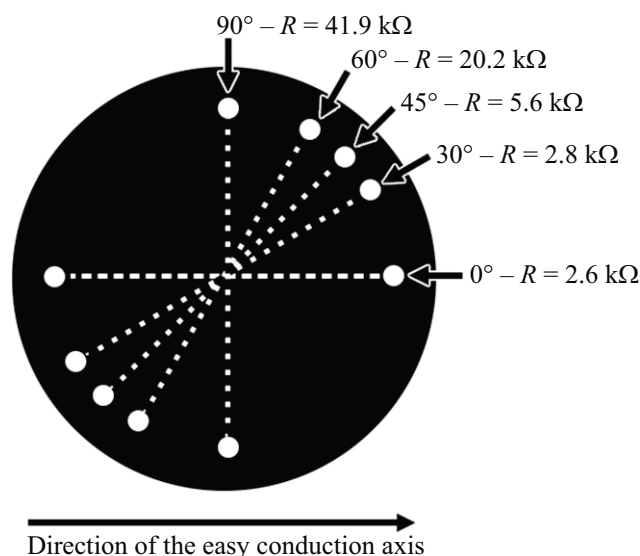


Рис. 2. Принципиальная схема проведения исследований электрических свойств металлполимерных композитов при различных углах расположения зондов относительно легкой оси проводимости.

мальным заполнением пор металлом (время осаждения 200 с), так как у данного образца с наибольшей вероятностью образовывалась непрерывная проводящая цепь по всему массиву нанопроволок за счет наибольшей длины нанопроволок согласно [2].

На первом этапе определяли направление с минимальным сопротивлением — легкую ось проводимости, которое соответствовало плоскости наклона пор с наибольшим разбросом углов. Данное направление принималось за 0° . Принципиальная схема измерения электрических свойств приведена на рис. 2, указанные значения сопротивления (R) определялись по результатам ВАХ.

На втором этапе снимали ВАХ в зависимости от угла между линией зондов и осью легкой проводимости. ВАХ для всех углов имели линейную омическую зависимость, характерную для проводников. По полученным результатам рассчитывали средние значения электрического сопротивления металлполимерного композита в зависимости от угла измерения. Результаты измерений приведены на рис. 3, а.

Из результатов измерений электрического сопротивления при различных углах расположения зондов относительно легкой оси проводимости можно сделать вывод, что геометрические параметры пор матрицы и, соответственно, расположение нанопроволок внутри нее обеспечивают проводимость металлполимерного композита. При этом наблюдается ярко выраженная анизотропия проводимости, связанная с особенностями наклона пор используемых в качестве основы полимерных трековых мембран [2,26].

Далее для уточнения значений электрического сопротивления и оценки их стабильности проводили измерения в режиме съемки хроноамперограмм при различных

Сравнение числа пересечений согласно модели, приведенной в [2] и учитывающей граничные эффекты, и числа пересечений согласно модели, приведенной в [26], учитывающей все пересечения трековых каналов с электрическими характеристиками массива нанопроволок

Средняя длина массива нанопроволок, μm	Расчетное число пересечений 2, 3 и 4 нанопроволок в направлении проката с учетом граничных условий, согласно [2]	Среднее число пересечений поровых каналов в ПЭТФ-матрице в предельных случаях, согласно [26]		Среднее значение измеренного сопротивления $R_{\text{av}}(\text{k}\Omega)$
		Пересечения перпендикулярных пор (N_p)	Пересечения пор под углами $-30^\circ - +30^\circ$ (N_t)	
5.61	240300	3.6	7.8	2.6
4.14	136000	2.7	5.7	6.0
3.01	77000	1.9	4.2	$\sim 10^4$
2.64	61760	1.7	3.7	$\sim 10^7$
1.52	27590	1.0	2.1	$\gg 10^8$
0.73	14000	0.5	1.0	$\gg 10^8$

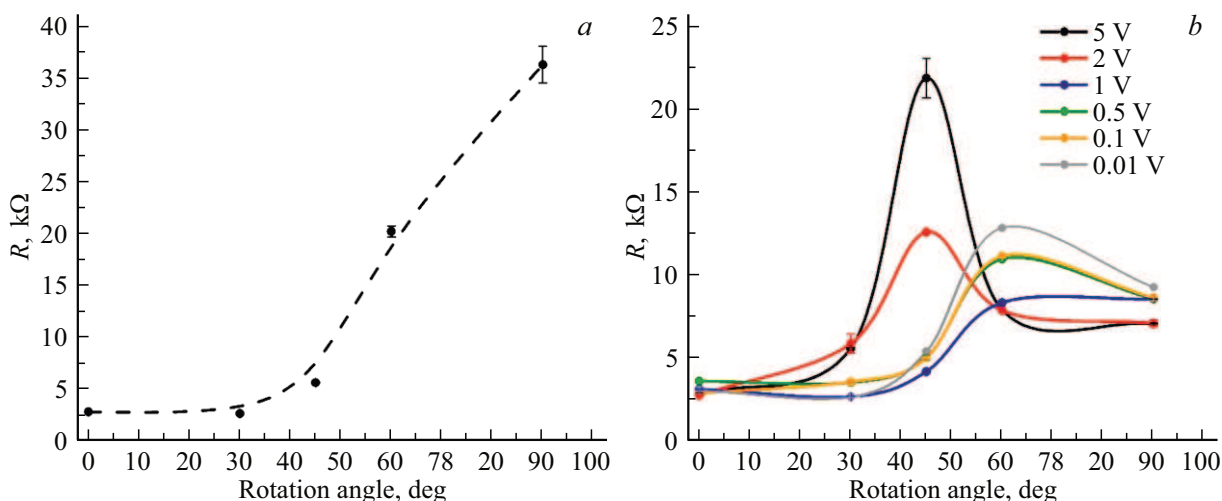


Рис. 3. Зависимости среднего электросопротивления (R) от угла измерения по результатам ВАХ (a) и при изменении напряжения от угла измерения по результатам съемки хроноамперограмм (b).

напряжениях. По полученным результатам рассчитывали средние значения электрических сопротивлений, представленные на рис. 3, b .

Полученные данные свидетельствуют о нарушении ярко выраженной анизотропии электрического сопротивления при высоких напряжениях. Подобный эффект может быть объяснен локальным нагревом металлполимерного композита в местах близкого расположения нанопроволок, что приводит к пробое полимера и возникновению участка высокого сопротивления с образованием последовательного подключения группы нанопроволок. Это может приводить к образованию каналов с нарушенной структурой в объеме полимера, что, в свою очередь, может оказать влияние на оптические свойства в локальной области пробоя за счет образования проплавленного канала в полимере. Учет данного эффекта необходим при использовании металлполимерных композитов в качестве прозрачных электродов и требует дальнейших исследований.

Полученные зависимости электрических характеристик исследуемых металлполимерных композитов говорят об образовании короткой цепи из нанопроволок вдоль направления оси легкой проводимости с множеством параллельных подключений. В свою очередь, в перпендикулярном направлении проводящая цепь нанопроволок образуется из-за случайного пересечения цепей вдоль оси легкой проводимости. Подобная структура может обеспечивать частичное пропускание электромагнитных волн между областями цепей нанопроволок легкой направления проводимости и в случае неполного перекрытия нанопроволок при образовании цепи. Оставшееся излучение будет поглощаться и рассеиваться нанопроволоками в матрице за счет развитой поверхности массива нанопроволок. Таким образом, можно выдвинуть предположение о том, что пропускание света композитом будет напрямую зависеть от степени заполнения матрицы.

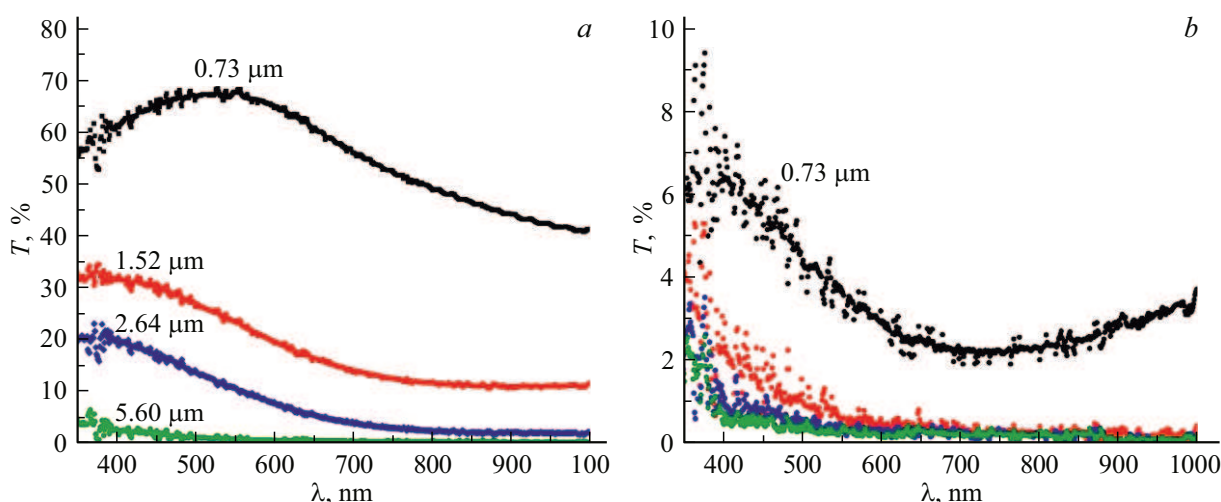


Рис. 4. Зависимости пропускания света металлполимерным композитом от степени заполнения матрицы для одного композита (*a*) и для системы из двух наложенных композитов (*b*).

Для подтверждения выдвинутой гипотезы проводили исследования спектров пропускания электромагнитных волн ближнего ИК и видимого диапазонов в зависимости от степени заполнения металлполимерного композита, результаты которых приведены на рис. 4.

Полученные результаты подтверждают выдвинутое предположение. При достаточном заполнении пор матрицы пропускание света практически не наблюдается, что говорит об образовании сплошного массива нанопроволок, непрозрачного для электромагнитного излучения выбранного диапазона длин волн. Однако в диапазоне длин волн 300–700 нм у всех образцов наблюдается пик пропускания. Эта особенность связана со свойствами полимерной матрицы [28].

При этом особенности случайного распределения пор в используемых трековых мембранах определяют малую вероятность полного совпадения цепей легкой проводимости при наложении двух и более металлполимерных композитов. Это позволяет предположить, что при наложении двух металлполимерных композитов пропускание системы будет стремиться к нулю. Стоит также отметить, что расположение двух и более пленок относительно друг друга в таком случае не будет иметь ощутимого значения. Так, при наложении двух металлполимерных композитов наблюдается падение пропускания системы более чем на порядок (рис. 4, *b*), при этом на графиках приведены значения для пленок направления легкой проводимости которых совпадало. Стоит учитывать, что наблюдаемое падение связано именно с неоднородностями распределения пор в используемых трековых мембранах, а не с увеличением средней длины массива нанопроволок при наложении двух композитов.

Иной результат наблюдается у системы, состоящей из двух металлполимерных композитов, средняя длина нанопроволок в которых составляет 0.73 мкм, что может быть связано с малым количеством пересечений при

такой длине, в результате чего не образуется сплошной массив пересекающихся нанопроволок [2], препятствующий пропусканию электромагнитного излучения в исследуемых длинах волн. Количество пересечений при данной степени заполнения матрицы с учетом условий математической модели, представленной в [2], составляет порядка 14000 см^{-2} , в то время как использование математической модели, представленной в [26], дает значения $N_p \sim 0.5$ и $N_t \sim 1.0$. То есть в случае использования обеих известных математических моделей количество пересечений крайне мало и недостаточно для образования проводящей цепи, что подтверждают измерения электрических характеристик: непрерывной цепи при данной длине нанопроволок не образуется даже на расстояниях менее 1 мм между зондами. Стоит также учитывать, что подключение измеряющих контактов происходит не по одной нанопроволоке, а по группе, тогда как образование проводящей цепи идет преимущественно по оси легкой проводимости, что увеличивает вероятность образования цепи.

Полученные результаты подтверждают возможность применения металлполимерных композитов на основе массивов нанопроволок, выращенных в полимерных трековых мембранах, в качестве оптически прозрачных электродов и устройств на их основе.

Выводы

В работе были получены металлполимерные композиты на основе трековых мембран с порами, заполненными сплавом FeNi. Была определена зависимость степени заполнения пор от времени роста массива нанопроволок. Было выдвинуто предположение о наличии анизотропии проводимости подобных металлполимерных композитов, связанной с особенностями геометрии пор матрицы. Данное предположение было подтверждено

экспериментально. Установлена взаимосвязь между углом измерения и электросопротивлением композита. Это позволяет рассматривать подобные структуры для применения в виде функциональных элементов сенсорики, микроэлектроники, радиоэлектроники и фотоники. В частности, подобные структуры могут найти применение в качестве оптически прозрачных электродов. Для подтверждения возможностей применения в данных областях была исследована светопроницаемость подобных структур в видимом и ближнем ИК-спектре в зависимости от степени заполнения матрицы материалом. Доказано, что структуры из пересекающихся нанопроволок внутри поровых каналов могут создавать непрерывные проводящие цепи с сохранением пропускающей способности из-за присутствия зазоров между подобными цепями. Полученные значения светопропускания сильно зависят от степени заполнения матрицы. Исследования системы из комбинации двух металлполимерных композитов показали, что вероятность точного совпадения областей светопропускания при наложении двух и более металлполимерных композитов крайне мала, что делает такую структуру непрозрачной практически на любой степени заполнения пор матрицы. Данные особенности открывают и другое применение подобных структур, а именно: использование в качестве светопоглотителей и светорассеивающих устройств, которые могут найти применение в солнечной энергетике и сенсорике.

Вклад авторов

И.М. Долуденко: разработка концепции, проведение исследований, обсуждение результатов, написание текста. И.С. Волчков: разработка концепции, проведение исследований, обсуждение результатов, написание текста. В.В. Краснова: проведение исследований. Д.Р. Хайретдинова: проведение статистического анализа, обработка результатов. В.М. Каневский: постановка задачи, разработка концепции, обсуждение результатов, написание текста.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Zhuo, L. Wen, J. Wang, X. Dou, L. Liu, X. Hou, D. Liao, B. Sun, D. Pan, J. Zhao. *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, **67** (12), 127311 (2024). DOI: 10.1007/s11433-024-2467-9
- [2] I.M. Doludenko, I.S. Volchkov, B.A. Turenko, I.O. Koshelev, P.L. Podkur, D.L. Zagorskiy, V.M. Kanevskii. *Mater. Chem. Phys.*, **287**, 126285 (2022). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126285
- [3] Y. Zhang, J. Wu, Y. Yang, Y. Qu, L. Jia, B. Jia, D.J. Moss. *Micromachines*, **13** (5), 756 (2022). DOI: 10.3390/mi13050756
- [4] E. Kozhina, D. Panov, N. Kovalets, P. Apel, S. Bedin. *Nanotechnology*, **35** (3), 035601 (2023). DOI: 10.1088/1361-6528/ad0247
- [5] I.V. Malysheva, I.A. Kolmychek, A.M. Romashkina, A.P. Leontiev, K.S. Napolskii, T.V. Murzina. *Nanotechnology*, **32** (30), 305710 (2021). DOI: 10.1088/1361-6528/abf691
- [6] M.I. Sobirov, A.Y. Samardak, S.A. Satsuk, K.A. Rogachev, N.A. Ognev, G.A. Leyko, A.O. Lembikov, S.M. Pisarev, S.V. Komogortsev, A.V. Ognev, A.S. Samardak. *J. Supercond. Nov. Magn.*, **38** (1), 41 (2025). DOI: 10.1007/s10948-024-06890-8
- [7] J.S. Lee, N. Farmakidis, C.D. Wright, H. Bhaskaran. *Sci. Adv.*, **8** (24), eabn9459 (2022). DOI: 10.1126/sciadv.abn9459
- [8] С.С. Курбанов, Ш.З. Уролов, З.Ш. Шаймарданов. *Опт. и спектр.*, **124** (2), 202 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.02.45524.198-17 [S.S. Kurbanov, S.Z. Urolov, Z.S. Shaymardanov. *Opt. Spectr.*, **124** (2), 198 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X1802011X].
- [9] I.D. Venevtsev, A.P. Tarasov, A.E. Muslimov, E.I. Gorokhova, L.A. Zadorozhnaya, P.A. Rodnyi, V.M. Kanevsky. *Materials*, **14** (8), 2001 (2021). DOI: 10.3390/ma14082001
- [10] S.R.C. Vivekchand, K.C. Kam, G. Gundiah, A. Govindaraj, A.K. Cheetham, C.N.R. Rao. *J. Mater. Chem.*, **15** (46), 4922 (2005). DOI: 10.1039/b511429b
- [11] I.M. Doludenko, I.S. Volchkov, P.L. Podkur, I.O. Koshelev, D.R. Khairtdinova, V.M. Kanevskii. *Cryst. Rep.*, **69** (7), 1150 (2024). DOI: 10.1134/S1063774524601576
- [12] Д.М. Уразкулова, И.Р. Бойназаров, А.Й. Тургубоев, X. Li, L. Ye, S. Li, Э.А. Захидов, Ш.К. Нематов, В.О. Кувондилов. *Опт. и спектр.*, **133** (8), 887 (2025). DOI: 10.61011/OS.2025.08.61516.7812-25 [D.M. Uraskulova, I.R. Boynazarov, A.I. Turgunboev, X. Li, L. Ye, S. Li, È.A. Zakhidov, Sh.K. Nematov, V.O. Kuvondikov. *Opt. Spectr.*, **133** (8), 887 (2025). DOI: 10.61011/OS.2025.08.61516.7812-25].
- [13] X. Yang, J. Hu, S. Wang, P. Meng, X. Zhao, S. Peng, Z. Yuan, C. Yuan, Q. Li, J. He. *Nano Lett.*, **22** (13), 5167 (2022). DOI: 10.1021/acs.nanolett.2c00887
- [14] D. Huo, M.J. Kim, Z. Lyu, Y. Shi, B.J. Wiley, Y. Xia. *Chem. Rev.*, **119** (15), 8972 (2019). DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00745
- [15] Y. Chen, T. Liang, L. Chen, Y. Chen, B.R. Yang, Y. Luo, G.S. Liu. *Nanoscale Horiz.*, **7** (11), 1299 (2022). DOI: 10.1039/D2NH00313A
- [16] W. Wu. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **20** (1), 187 (2019). DOI: 10.1080/14686996.2018.1549460
- [17] Z. Li, Y. Liu, O. Hossain, R. Paul, S. Yao, S. Wu, J.B. Ristaino, Y. Zhu, Q. Wei. *Matter*, **4** (7), 2553 (2021). DOI: 10.1016/j.matt.2021.06.009
- [18] Y. Zhu, Z. Xu, Q. Lang, W. Jiang, Q. Yin, S. Zhong, S. Bai. *Appl. Catal. B*, **206**, 282 (2017). DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.01.035
- [19] D.J. Peña, J.K. Mbindyo, A.J. Carado, T.E. Mallouk, C.D. Keating, B. Razavi, T.S. Mayer. *J. Phys. Chem. B*, **106** (30), 7458 (2002). DOI: 10.1021/jp0256591
- [20] R.S. Chen, W.C. Wang, C.H. Chan, M.L. Lu, Y.F. Chen, H.C. Lin, K.H. Chen, L.C. Chen. *Appl. Phys. Lett.*, **103** (22), 223107 (2013). DOI: 10.1063/1.4833538

- [21] J. Jung, H. Cho, R. Yuksel, D. Kim, H. Lee, J. Kwon, P. Lee, J. Yeo, S. Hong, H.E. Unalan, S. Han. *Nanoscale*, **11** (43), 20356 (2019). DOI: 10.1039/c9nr04193a
- [22] J. Xiong, S. Li, Y. Ye, J. Wang, K. Qian, P. Cui, D. Gao, M.F. Lin, T. Chen, P.S. Lee. *Adv. Mater.*, **30** (36), 1802803 (2018). DOI: 10.1002/adma.201802803
- [23] R. Bian, L. Meng, C. Guo, Z. Tang, H. Liu. *Adv. Mater.*, **31** (18), 1900534 (2019). DOI: 10.1002/adma.201900534
- [24] J. Han, J. Yang, W. Gao, H. Bai. *Adv. Funct. Mater.*, **31** (16), 2010155 (2021). DOI: 10.1002/adfm.202010155
- [25] Ю.В. Гуляев, С.Г. Чигарёв, А.И. Панас, Е.А. Вилков, Н.А. Максимов, Д.Л. Загорский, А.С. Шаталов. *Письма в ЖТФ*, **45** (6), 27 (2019). DOI: 10.21883/PJTf.2019.06.47495.17641 [Yu.V. Gulyaev, S.G. Chigarev, A.I. Panas, E.A. Vilkov, N.A. Maksimov, D.L. Zagorskii, A.S. Shatalov. *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 271 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019030271].
- [26] P.Y. Apel. *Mater. Chem. Phys.*, **339**, 130681 (2025). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2025.130681
- [27] И.М. Долуденко. *Перспек. Мат.*, **8**, 74–80 (2021). DOI: 10.30791/1028-978X-2021-8-74-80 [I.M. Doludenko. *Inorg. Mater.: Appl. Res.*, **13** (2), 531 (2022). DOI: 10.1134/S2075113322020125].
- [28] J. Majling, P. Šimon, V. Khunová. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **67**, 201–206 (2002).