

05

Взаимодействие терагерцового излучения с композитами на основе трековых мембран с ориентированными металлическими нанопроволоками

© Г.В. Горохов,¹ Д.Л. Загорский,² Н.И. Волынец,¹ А.В. Мельников,¹ И.М. Долуденко,²
В.М. Каневский,² С.А. Максименко¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, 220006 Минск, Беларусь

² Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники НИЦ „Курчатовский институт“, 123182 Москва, Россия
e-mail: glebgorokhov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 октября 2025 г.

В окончательной редакции 21 ноября 2025 г.

Принято к публикации 27 ноября 2025 г.

Электромагнитные свойства композитов, полученных методом матричного синтеза и состоящих из массивов ориентированных нанопроволок различной геометрии, расположенных внутри ростовых матриц — полимерных трековых мембран, — исследованы в терагерцовом диапазоне частот. Для данных композитов наблюдается зависимость коэффициента пропускания T поляризованного терагерцового излучения от угла между направлением наклона нанопроволок в матрице и вектором напряженности электрического поля E , а также от геометрических параметров нанопроволок. Показано, что данная зависимость обусловлена наклоном нанопроволок, а также развитием анизотропной перколяционной сети в композите. Предложена модель развития такой перколяционной сети в зависимости от геометрии массива нанопроволок.

Ключевые слова: композиционные материалы, трековые мембраны, металлические нанопроволоки, терагерцовое излучение, поляризация излучения.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62657.274-25

Введение

Получение и изучение новых наноматериалов, а также композитов и структур на их основе представляет большой теоретический и практический интерес. Перспективным типом наноматериалов являются металлические нанопроволоки (НП), имеющие малый диаметр и вытянутую форму. Одним из способов получения НП является матричный синтез — заполнение требуемым веществом пористой матрицы. Основным преимуществом данного метода является соответствие геометрических параметров получаемых наночастиц в форме пор матрицы, обеспечивающее высокую однородность и воспроизводимость геометрических параметров [1].

Наряду с пористым анодным оксидом алюминия (ААО, anodic aluminium oxide) [2,3], в качестве матрицы могут использоваться трековые мембраны (ТМ), представляющие собой тонкие полимерные пленки со сквозными стохастически распределенными порами, полученные путем их облучения тяжелыми ионами с последующим травлением образовавшихся скрытых (латентных) треков [4,5]. Путем заполнения пор требуемым веществом может быть получен как полимерный композитный материал (ПКМ), содержащий НП в качестве включений, так и отдельно стоящие НП для построения поляризаторов [6] и в качестве наноактуаторов [7].

Уникальная геометрия получаемых матричным методом массивов НП определяет широкий спектр возможных применений. Так, малый радиус кривизны концов НП позволяет использовать их в качестве холодных катодов для эмиссии электронов или тяжелых ионов. Развитая поверхность массива обуславливает возможность его использования в качестве катализаторов, теплоотводов, а также подложек для рамановской спектроскопии с поверхностным усилением (surface-enhanced raman spectroscopy, SERS) [8].

Возможность регулировать состав НП позволяет задавать электрические и магнитные свойства композита. Стохастический характер распределения пор ТМ позволяет использовать НП из ферромагнитных материалов для шифрования информации (наноидентификации, nanobarcoding) [9]. Создание внутри НП гетеропереходов путем поочередного электроосаждения тонких слоев магнитного и немагнитного материалов делает возможным изготовление датчиков поля, использующих эффект гигантского магнетосопротивления, а также генерацию ТГц-излучения при пропускании тока через массив НП, содержащих гетеропереходы между различными магнитными слоями [10]. Большой интерес вызывает и обратная задача — детектирование ТГц-излучения с помощью НП.

Особенностью ТМ является возможность регулирования геометрических параметров пор на этапе получе-

ния, тогда как поры ААО ограничены гексагональной симметрией и параллельностью [11]. Так, плотность пор и их пространственная ориентация (наклон и его разброс) может быть задана на этапе облучения, а форма (цилиндрическая, коническая, биконическая) — на этапе травления. Это позволяет создавать массивы ориентированных структур (НП, нанотрубок, наноконусов) с заданной геометрией и плотностью. Создаваемые таким способом НП и ПКМ обладают анизотропией электромагнитных свойств и, вследствие этого, интересны для ряда прикладных областей, включая СВЧ и терагерцовую технику [12,13].

Известно, что композитные материалы на основе хаотически распределенных электропроводных [12,14] и ферромагнитных наноразмерных включений представляют существенный интерес для широкополосного экранирования электромагнитного излучения. На их основе проводятся разработки масштабируемой технологии получения компактных СВЧ и THz-устройств.

Можно предположить, что определенное упорядочение структуры композита, достигаемое в ПКМ, откроет дополнительные возможности для создания таких устройств терагерцовой оптики как поляризаторы, аттенюаторы и фильтры. В этой связи представляется интересным изучение эффектов взаимодействия THz-излучения с массивом ориентированных нанопроволок (МОНП) различных типов, чему и посвящена настоящая работа.

1. Эксперимент

В настоящей работе использовались три типа трековых мембран производства ОИЯИ (Дубна, Россия) с различными распределениями углов наклона пор, заданными на этапе облучения, параметры которых приведены в таблице. Все мембраны имели толщину $\sim 12 \mu\text{m}$. Первый тип матриц, так называемой „разнонаклонной“ или R (randomly inclined) геометрии (рис. 1, *a*) имеет разброс угла наклона пор в одной плоскости в диапазоне $\pm 30^\circ$, в то время как в перпендикулярном направлении угол варьируется не более чем на 0.5° . Второй тип — ТМ с параллельными друг другу порами, ориентированными нормально к плоскости мембраны (далее „вертикальные“ или V — vertical). Поры ТМ третьего типа (далее „однонаклонные“ или U — uniformly inclined) также параллельны друг другу, однако наклонены к поверхности мембраны под углом 43.5° (рис. 1, *b*). Кроме того, в таблице приведены значения диаметра пор d , плотности пор n (количество пор на единицу площади ТМ) и пористости $n_p = n\pi d^2/4$, рассчитанной для цилиндрических пор без учета их наклона и пересечения.

В дальнейшем будем обозначать мембраны как Xd , где X обозначает тип мембраны (R, V или U), d — диаметр ее пор в нанометрах. Композиты на основе таких ТМ

будем обозначать $Xd-H$, где H — высота МОНП в микронах.

С использованием вышеописанных мембран были получены ПКМ с НП из пермаллоя $\text{Fe}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}$, выращенными в порах ТМ. При выращивании НП использовался метод электроосаждения, стандартная процедура которого (двухкомпонентный электролит, гальванический процесс по двухэлектродной схеме) описана в [15]. Выбор магнитомягкого пермаллоя в качестве материала для НП был обусловлен перспективой воздействия на его электромагнитные свойства постоянным магнитным полем [2], выходящей, однако, за рамки настоящей работы.

Для изучения как исходных матриц, так и получаемых НП использовался метод растровой электронной микроскопии (РЭМ, микроскоп JEOL JSM), работавший в режиме вторичных электронов. Поровая структура исходных матриц изучалась на их металлизированном сколе (рис. 1, *a, b*), а сами МОНП были изучены после удаления матрицы. Примеры полученных изображений массивов НП для образцов R и U приведены на рис. 1, *d, e* соответственно. Сравнение изображений поровых каналов и массивов НП, полученных на их основе, показывает близость их параметров (диаметров и наклонов).

Длина НП в композитах L , определяемая временем электроосаждения, характеризовалась путем анализа оптического изображения торцевой поверхности среза композита с помощью микроскопа (рис. 1, *c*) с учетом предположения, что наблюдаемая на оптическом изображении высота массива НП для образцов серии R равна длине НП. Для образцов серии R длина НП варьировалась в диапазоне $1-8 \mu\text{m}$.

Спектральный коэффициент пропускания композитов с НП измерялся в диапазоне $0.1-1 \text{ THz}$ с помощью терагерцового спектрометра с временным разрешением EXPLA T-spec с линейной поляризацией излучения. Направление вектора напряженности электрического поля E прибора фиксировано, поэтому для измерения зависимости коэффициента пропускания T от поляризации падающего THz-излучения образец размещался на градуированной поворотной платформе в плоскости, нормальной направлению распространения излучения (ось z пленки, вокруг которой образец вращается во время измерений, совпадала с направлением k). На рис. 1, *f* представлена пространственная ориентация образца исследуемого композита с НП по отношению к направлению распространения THz-излучения, а также направление наклона НП: ось x в плоскости пленки соответствует направлению максимального наклона НП (± 30 или 43.5°), ось y — минимальному наклону.

Угловая зависимость коэффициента пропускания измерялась с шагом 10° . При вращении поворотной платформы постепенно менялся угол между направлением поляризации внешнего поля и направлением наклона НП. Значение T для каждого угла усреднялось по 32

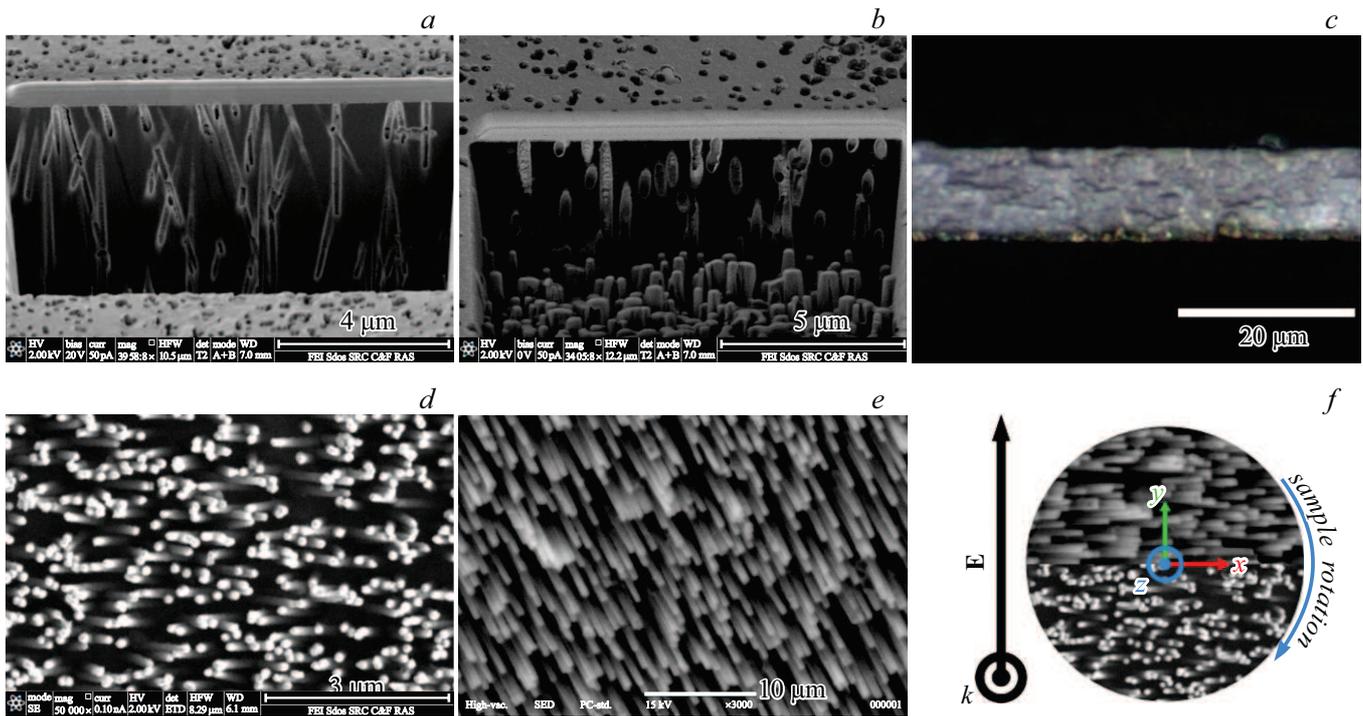


Рис. 1. РЭМ изображения срезов ТМ типов R (a) и U (b); c — оптическое изображение скола ПКМ с МОНП высотой ~ 1 μm; РЭМ изображения массивов НП диаметром 100 nm после удаления матриц типа R (d) и U (e); f — схема расположения образца в THz-спектрометре.

Типы использованных ТМ

Название ТМ	R30	R65	R100	V100	U500
Геометрия пор	$\pm 30^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 30^\circ$	0°	43.5°
d пор, nm	30	65	100	100	500
Плотность пор n , см^{-2}	$9.1 \cdot 10^9$	$4.5 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^8$	$4.8 \cdot 10^7$
Пористость n_p , %	6.4	14.9	9.4	3.9	9.4

измерениям с целью улучшения соотношения сигнал-шум.

2. Обсуждение результатов

На рис. 2 представлены угловые зависимости коэффициента пропускания линейно поляризованного THz-излучения в диапазоне 0.1–1 THz для образцов с тремя различными геометриями. Коэффициент пропускания T (рис. 2, a, c) композитов типа R и U существенно зависит от ориентации образца относительно поляризации THz-излучения, что связано с преимущественным наклоном НП в одном направлении, совпадающем с осью x на рис. 1, f. Как и для любых протяженных частиц, ЭМ отклик (токи, возбуждаемые в частицах внешним полем) НП на поле, направленное вдоль их оси, намного выше, чем на поле, направленное перпендикулярно. Поэто-

му при наклоне НП вдоль направления поляризации внешнего поля проекция внешнего поля на ось НП является ненулевой, что вызывает в них ощутимый электромагнитный отклик. В случае же, когда поляризация внешнего поля направлена перпендикулярно оси НП, отклик НП оказывается незначительным, что согласуется с наблюдением нулевой степени поляризации $P = (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} + T_{\min})$ образцов типа V. Результатом различия между продольным и поперечным ЭМ откликом НП на внешнее поле является существенно большее значение коэффициента пропускания T для образцов типа V по сравнению с образцами типов U и R.

Важно отметить, что для композита U500-4 зависимость T от поляризации излучения выражена значительно слабее (рис. 2, c), чем для образца типа R (рис. 2, a), значение степени поляризации P (рис. 2, d) для которого достигает 90%, тогда как для U не

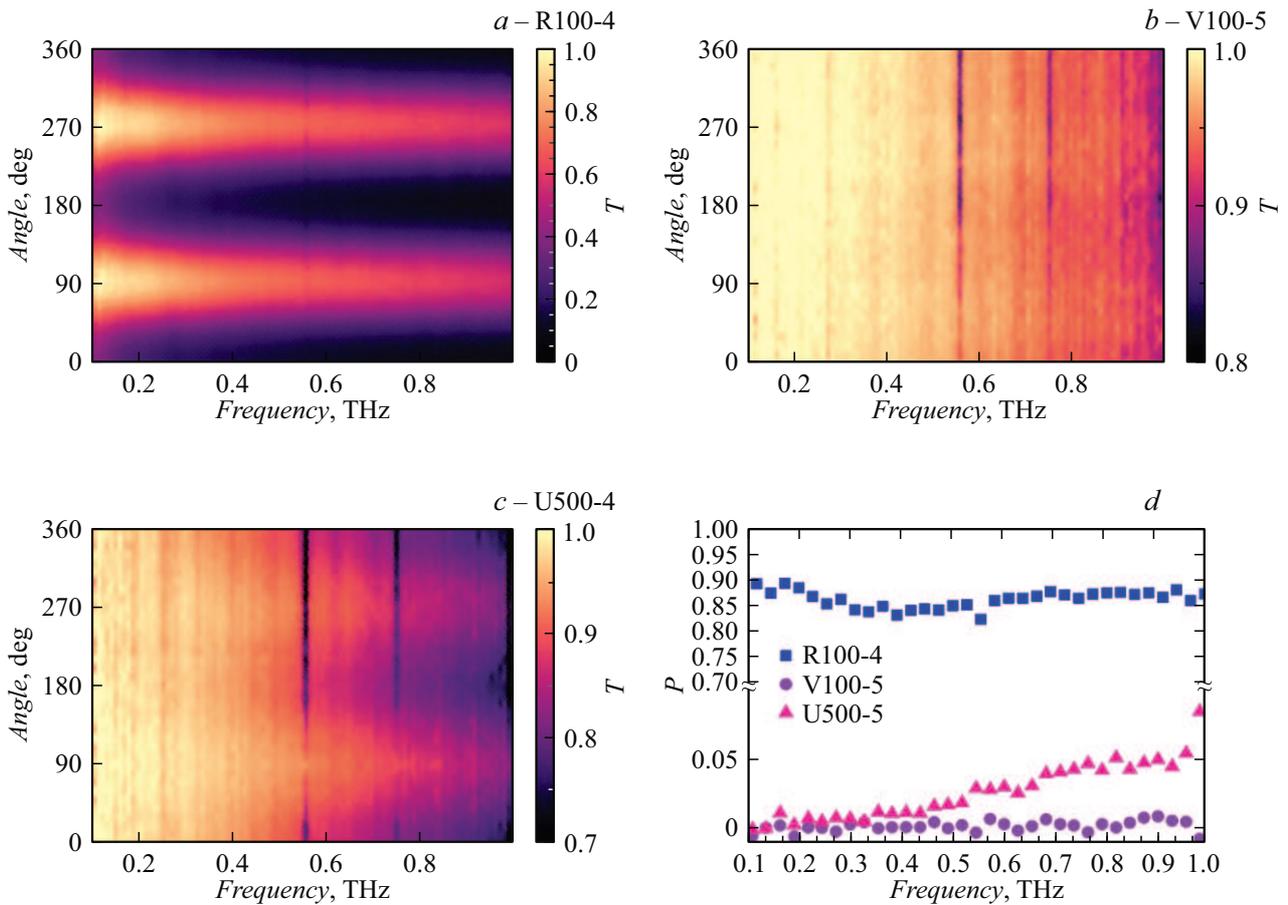


Рис. 2. $a-c$ — сравнение зависимости коэффициента пропускания композитов с металлическими НП различной пространственной ориентации от поляризации падающего излучения в диапазоне 0.1–1 THz; d — степень поляризации для соответствующих образцов. Углы 0° , 180° и 360° соответствуют поляризации внешнего поля $E \parallel x$, а углы 90° и 270° — поляризации $E \parallel y$.

превышает 5%. Такое различие в прохождении THz-излучения через образцы на основе ТМ типов R и U можно связать с их структурными различиями. Если для композитов типа R при достаточной длине НП между ними будут возникать пересечения (а, следовательно, электрические контакты — рис. 1, d), то в композитах типа U НП останутся изолированными вне зависимости от длины (рис. 1, e). Возникновение электрических контактов между включениями в композите, в свою очередь, приводит к образованию в нем перколяционной сети и возникновению статической электропроводности [16,17].

Значения коэффициента пропускания и степени поляризации, наблюдаемые для композита типа R, указывают на перспективы получения на их основе поляризаторов THz-излучения путем оптимизации как геометрических параметров композита, так и материалов, входящих в состав НП. Так, поляризаторы на основе нематических жидких кристаллов характеризуются сравнительно низким максимальным коэффициентом пропускания [18], что существенно ограничивает их применение, несмотря на высокие значения коэффициента подавления $ER = 10 \log(T_{\max}/T_{\min})$. Величина коэффициента подавления для рассматриваемых в настоящей работе ком-

позитов составляет $\sim 10-12$ dB в диапазоне 0.1–1 THz, что близко к значениям для поляризаторов на основе проволочной решетки (wire-grid), построенных из углеродных нанотрубок [19], однако изготовление поляризаторов такого типа для THz-диапазона сопряжено с определенными технологическими трудностями [20].

Для изучения влияния перколяционных явлений на прохождение THz-излучения через исследуемые композиты было рассмотрено влияние частотной зависимости T для композитов типа R при варьировании диаметра и длины НП. На рис. 3 приведены частотные зависимости максимального и минимального T , соответствующего случаям $E \parallel y$ и $E \parallel x$ (рис. 1, f) для композитов серий R30, R65 и R100 с различной длиной НП.

С увеличением длины НП для всех рассмотренных серий композитов наблюдаются две закономерности: 1) резкое снижение T во всем диапазоне; 2) уменьшение зависимости T от частоты (частотной дисперсии). Наблюдение данных закономерностей связано с развитием в разнонаклонных образцах перколяционных явлений по мере увеличения длины НП.

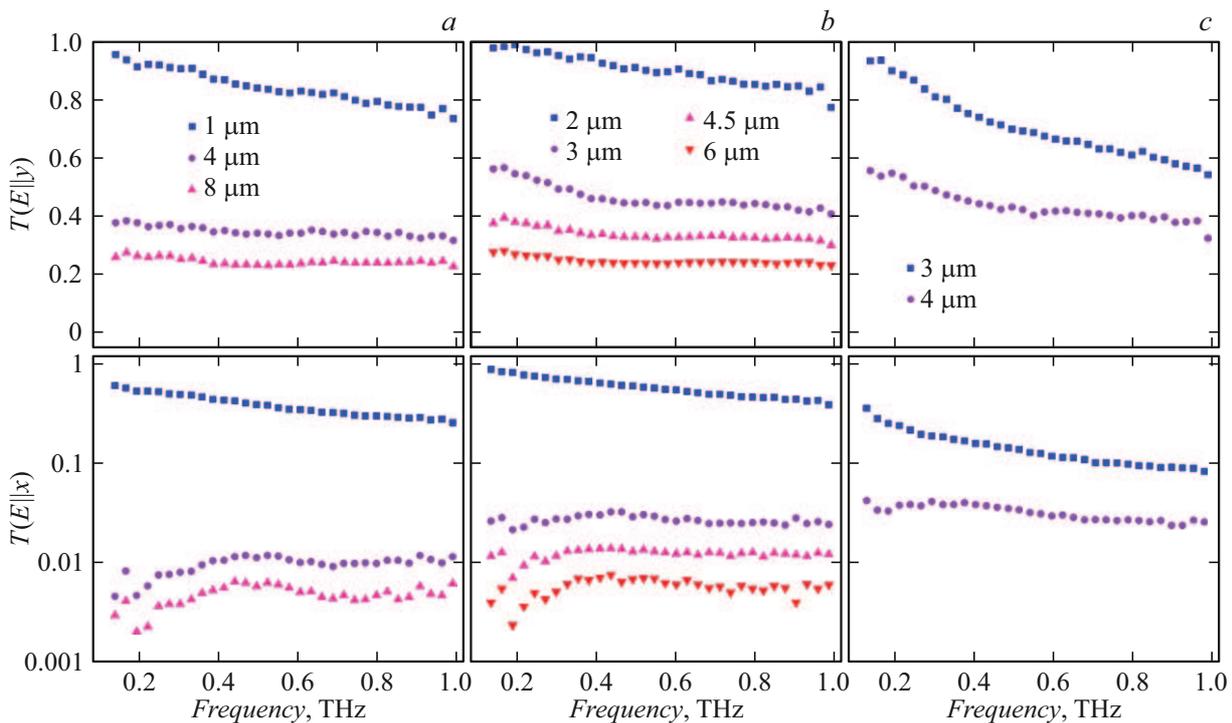


Рис. 3. Коэффициенты пропускания композитов с НП различной длины диаметром 30 (a), 65 (b), 100 nm (c). Верхний и нижний ряды соответствуют максимальному и минимальному пропусканию излучения ($E \parallel y$ и $E \parallel x$ соответственно).

Феномен перколяции заключается в том, что наличие физических контактов между проводящими частицами в композите приводит к формированию в композите протяженной проводящей сети. При этом между любыми двумя НП, входящими в перколяционную сеть, возможен перенос заряда через сеть контактов между НП.

Для коэффициента пропускания T образцов R30-1, R65-2 и R100-3 (рис. 2), содержащих короткие НП, сильно выражена частотная дисперсия, связанная с эффектами конечной длины в одиночных НП. Эффект конечной длины заключается в поляризации частиц во внешнем поле [21] — под воздействием внешнего поля в частицах возникают токи, приводящие к накоплению на противоположных сторонах (в продольном или поперечном направлении) частицы разноименных зарядов. Эти заряды создают так называемое деполаризующее поле, направленное противоположно внешнему полю, что в итоге приводит к подавлению полного поля внутри частиц по сравнению с внешним полем. В результате токи, текущие в частице под действием внешнего поля, ослабевают, что приводит к падению электромагнитного отклика частиц и выражается в увеличении коэффициента пропускания T электромагнитного излучения через образец. Поскольку эффект уменьшения токов в частицах является частотнозависимым и усиливается при уменьшении частоты внешнего поля, электропроводность такого композита характеризуется реактивным емкостным откликом, аналогичным последовательной RC-цепи [22,23]. Это объясняет уменьшение T с ро-

стом частоты (частотную дисперсию), наблюдаемое для композитов типов V и U (рис. 2, b, c), НП в которых не соприкасаются, а также для композитов типа R с малой длиной НП. Таким образом, наличие частотной дисперсии электромагнитного отклика, а также высокие значения T во всех рассмотренных пространственных ориентациях, указывают, что длины НП в образцах R30-1, R65-2 и R100-3 недостаточно для формирования непрерывной перколяционной сети.

Увеличение длины НП приводит к росту числа физических контактов между ними и постепенному формированию сплошной перколяционной сети НП во всем объеме образца. Число изолированных НП, способных поляризоваться во внешнем поле, при этом снижается до пренебрежимо малого. В то же время токи, текущие в НП, встроенных в перколяционную сеть, больше не подавляются за счет эффекта конечной длины, так как наличие пересечений между НП позволяет зарядам перетекать между нанопроволоками.

Это приводит к многократному уменьшению значений T для обоих направлений поляризации внешнего поля, причем эффект сильнее проявляется для $E \parallel x$ поляризации. Резкое уменьшение значений T сопровождается значительным уменьшением или даже исчезновением частотной дисперсии, что также может свидетельствовать о подавлении эффектов конечной длины в НП. Исходя из экспериментальных данных, приведенных на рис. 3, мы предполагаем, что перколяционный переход для образцов R30 и R65 наблюдается при длине НП,

лежащей в диапазоне $1\text{--}4\ \mu\text{m}$ и $2\text{--}3\ \mu\text{m}$ соответственно. А малая частотная дисперсия T , наблюдаемая для образца R100-4, позволяет предположить, что он или достиг перколяции, или для ее достижения необходимо незначительное увеличение длины НП. Для подтверждения того, что для изменения спектров T на качественном уровне для рассматриваемых образцов при увеличении длины НП в них связаны именно с формированием в них проводящей перколяционной сети, далее мы проводим моделирование МОНП методом Монте–Карло с целью определения длины НП, при которой достигается перколяция.

3. Моделирование

Как показано выше, существование перколяционной сети в рассматриваемых композитах обусловлено плотностью НП, их угловым распределением, диаметром и длиной, причем все параметры, кроме последнего, фиксированы на этапе производства ТМ. Поэтому развитие перколяционных явлений в рассматриваемых композитах целесообразно изучать, прежде всего, в зависимости от длины НП — именно она будет являться для рассмотренного случая аналогом порога перколяции. Для теоретического изучения перколяционных явлений в композитах с МОНП методом Монте–Карло были смоделированы образцы пленки, включающие 5000 НП. Цилиндрические НП длиной L и диаметром d генерировались таким образом, что один из их концов имел координату $z = 0$ и располагался на площадке $x \in [0, x_0]$ и $y \in [0, y_0]$ случайным образом. Образец имел площадь $S = x_0 \cdot y_0 = N/n$, где n — плотность пор, N — количество НП в образце. НП были сгенерированы со случайным наклоном вдоль оси x в диапазоне $\varphi \in [-30^\circ, 30^\circ]$ и нулевым наклоном в направлении оси y , что соответствует экспериментальной серии образцов типа R.

Условием наличия электрического контакта между двумя НП считалось пересечение их цилиндрических объемов, что соответствует случаю, когда расстояние между осями НП меньше их диаметра. За условие достижения в образце электрической перколяции принималось наличие непрерывного проводящего пути, связывающего нанопроволоки, расположенные на противоположных по оси x краях образца, через сеть контактов между НП. Более подробно используемый метод расчета описан в работе [24]. При моделировании рассматривались образцы, вытянутые вдоль оси x с аспектным отношением $x_0/y_0 = 10$, поскольку перколяционная сеть в моделируемой системе имеет преимущественное направление развития в направлении наклона НП [25]. Для каждого набора геометрических параметров композита — диаметра и длины НП и плотности пор — было сделано по 10 случайных генераций, перколяция для данных параметров считалась достигнутой, если она наблюдалась в 9 из 10 случаев.

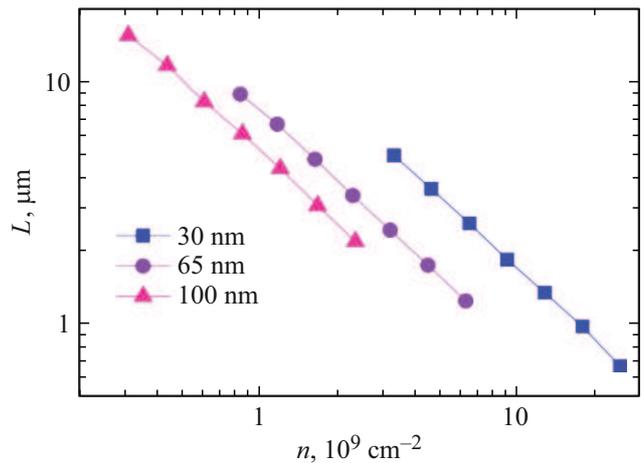


Рис. 4. Зависимости длин НП L_p , при которых достигается перколяция, от плотности пор при разных диаметрах НП.

На рис. 4 приведены зависимости теоретической оценки длины НП L_p , при которой достигается перколяция (порога перколяции), от плотности пор n для трех различных диаметров НП. Зависимости для диаметров 30, 65 и 100 nm построены для диапазона плотности пор, соответствующего пористости ТМ от 2.5% до 20%. Необходимо отметить, что, хотя полная толщина ТМ неизменна, весь электромагнитный отклик композита формируется в слое толщиной L_p , заполненном МОНП, пористость которого постоянна вдоль оси z . Таким образом, непосредственно по пористости судить о наступлении перколяции нельзя. Однако ее величина тождественно равна объемной доле НП в композите и может быть использована для сопоставления полученных результатов с композитами, полученными иными методами, поскольку, как правило, именно объемная концентрация включений ассоциируется с определением порога перколяции.

Из рис. 4 видно, что длина НП L_p , при которой достигается перколяция, обратно пропорциональна: 1) плотности пор для образцов с одинаковым диаметром НП; 2) диаметру НП для образцов с одинаковой плотностью пор. Меньшая требуемая для достижения перколяции длина НП L_p означает, что для таких образцов с практической точки зрения проще достигается перколяционный переход (требуется меньшее время роста НП и накладываются меньшие ограничения на минимальную толщину мембраны), по достижении которого резко улучшаются поляризационные характеристики МОНП. Теоретическая модель предсказывает для серий экспериментальных образцов R30-1, R65-2 и R100-3 достижение перколяции при $L_p = 1.85$, 1.75 и $4.4\ \mu\text{m}$ соответственно. Таким образом, теоретические оценки длины достижения перколяции хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает гипотезу, объясняющую изменение на качественном уровне спектральных зависимостей T композитов с разна-

клонными НП (уменьшение абсолютного значения T и исчезновение его частотной дисперсии) развитием в них анизотропной перколяционной сети.

Выводы

На основе трековых мембран были получены композиты с металлическими нанопроволоками, коэффициент пропускания T которых зависит от поляризации падающего терагерцового излучения. Путем сопоставления спектров пропускания образцов с НП различной геометрии в диапазоне 0.1–1 THz было показано, что данная зависимость связана с анизотропией распределения НП в композите, а именно с характером их углового распределения. Так, для композитов, содержащих НП, наклонные к плоскости мембраны, характерна зависимость электромагнитного отклика от поляризации THz-излучения, тогда как отклик композитов с НП, ориентированными строго нормально к плоскости мембраны, от поляризации не зависит. При этом зависимость от поляризации излучения наиболее выражена для композитов на основе промышленно выпускаемых трековых мембран геометрии R, поскольку дисперсия наклона НП в диапазоне $\pm 30^\circ$ вдоль одной из осей в плоскости мембраны приводит к формированию электрических контактов между НП и постепенному развитию в композите проводящей перколяционной сети. Гипотеза о том, что именно электрическая перколяция в R-образцах ответственна за уменьшение абсолютного значения коэффициента пропускания и увеличения степени поляризации для таких образцов подтверждается согласованием экспериментально наблюдаемых и теоретически полученных значений длин НП, при которых наблюдается перколяционный переход. В исследованном диапазоне частот значения степени поляризации для таких композитов достигают 90 %, тогда как для композитов, содержащих параллельные НП, ориентированные строго под углом 43.5° к поверхности мембраны, степень поляризации существенно зависит от частоты и не превышает 6 %.

Результаты работы позволяют говорить о перспективах создания на основе композитов с ориентированными нанопроволоками поляризаторов, аттенюаторов и иных оптических элементов для генерации, преобразования и детектирования излучения терагерцовой частоты.

Благодарности

Авторы благодарят П.Ю. Апеля (ОИЯИ, г. Дубна) за предоставление образцов мембран различных типов и В.В. Артемова (КИ, г. Москва) за РЭМ исследования.

Финансирование работы

Синтез экспериментальных образцов был выполнен в рамках госзадания НИЦ „Курчатовский Институт“, экспериментальная часть работы была выполнена при

поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф24М-013, численные модели для расчета перколяционных явлений в композиционных материалах были разработаны при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф26РНФ-043.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.A. Mashentseva, D.S. Sutekin, S.R. Rakisheva, M. Barsbay. *Polymers*, **16** (18), Art. N 18 (2024). DOI: 10.3390/polym16182616
- [2] N. Parsa, R.C. Toonen. *IEEE Nanotechnology Magazine*, **12** (4), 28 (2018). DOI: 10.1109/MNANO.2018.2869234
- [3] J. Xu, J. Zhang, J. Wang, Bo Hong, X. Peng, X. Wang, H. Ge, J. Hu. *J. Magn. Magn. Mater.*, **499**, 166207 (2020). DOI: 10.1016/j.jmmm.2019.166207
- [4] P. Apel. *Radiation Measurements*, **34** (1–6), 559 (2001).
- [5] F. Liu, M. Wang, X. Wang, P. Wang, W. Shen, S. Ding, Yu. Wang. *Nanotechnology*, **30** (5), 052001 (2018). DOI: 10.1088/1361-6528/aaed6d
- [6] S.J. Boehm, L. Kang, D.H. Werner, C.D. Keating. *Adv. Funct. Mater.*, **27** (5), 1604703 (2017). DOI: 10.1002/adfm.201604703
- [7] E.E. Evans, A.R. Shields, R.L. Carroll, S. Washburn, M.R. Falvo, R. Superfine. *Nano Lett.*, **7** (5), 1428 (2007). DOI: 10.1021/nl070190c
- [8] E. Kozhina, S. Bedin, A. Martynov, S. Andreev, A. Piryazev, Yu. Grigoriev, Yu. Gorbunova, A. Naumov. *Biosensors*, **13** (1), 46 (2022). DOI: 10.3390/bios13010046
- [9] M.R.Z. Kouhpanji, B.J.H. Stadler. *Sensors*, **21** (13), Art. N 13 (2021). DOI: 10.3390/s21134573
- [10] D.L. Zagorskiy, I.M. Doludenko, S.G. Chigarev, E.A. Vilkov, V.M. Kanevskii, A.I. Panas. *IEEE Trans. Magn.*, **58** (2), 1 (2022). DOI: 10.1109/TMAG.2021.3083407
- [11] C. Mijangos, R. Hernández, J. Martin. arXiv:1706.08069. DOI: 10.48550/arXiv.1706.08069
- [12] D.S. Bychanok, M.V. Shuba, P.P. Kuzhir, S.A. Maksimenko, V.V. Kubarev, M.A. Kanygin, O.V. Sedelnikova, L.G. Bulusheva, A.V. Okotrub. *J. Appl. Phys.*, **114** (11), 114304 (2013). DOI: 10.1063/1.4821773
- [13] X. Jiang, H. Yu, H. Lu, Y. Si, Yu. Dong, Ya. Zhu, Ch. Qian, Ya. Fu. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **5** (6) 4400 (2023). DOI: 10.1021/acscapm.3c00518
- [14] M.V. Shuba, D.I. Yuko, G. Gorokhov, D. Meisak, D.S. Bychanok, P.P. Kuzhir, S.A. Maksimenko, P. Angelova, E. Ivanov, R. Kotsilkova. *Mater. Res. Express*, **6** (9), 095050 (2019). DOI: 10.1088/2053-1591/ab2edf
- [15] D. Zagorskiy, I. Doludenko, O. Zhigalina, D. Khmelenin, V. Kanevskiy. *Membranes*, **12** (2), 195 (2022). DOI: 10.3390/membranes12020195
- [16] A.B. Елецкий, А.А. Книжник, Б.В. Потупкин, Х.М. Кенни. *УФН*, **185**, 225 (2015). DOI: 10.3367/UFNr.0185.201503a.0225 [A.V. Eletsckii, A.A. Knizhnik, B.V. Potapkin, J.M. Kenny. *Physics-Uspeski*, **58** (3), 209 (2015). DOI: 10.3367/UFNe.0185.201503a.0225]

- [17] M.A. Kazakova, G.V. Golubtsov, A.G. Selyutin, A.V. Ishchenko, A.N. Serkova, G.V. Gorokhov, Ph.Y. Misiyuk, N.I. Valynets. *Mater. Chem. Phys.*, **307**, 128176 (2023). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128176
- [18] T. Sasaki, H. Okuyama, M. Sakamoto, K. Noda, H. Okamoto, N. Kawatsuki, H. Ono. *J. Appl. Phys.*, **121** (14), 143106 (2017). DOI: 10.1063/1.4981244
- [19] J. Kyoung, E.Yu. Jang, M.D. Lima, H.-R. Park, R.O. Robles, X. Lepró, Yo.H. Kim, R.H. Baughman, D.-S. Kim. *Nano Lett.*, **11** (10), 4227 (2011). DOI: 10.1021/nl202214y
- [20] B. Chen, X. Fu, X. Liu, Yo. Pan, S. Dong, B. Wang, Zh. Lin, H. Jiang. *Photonics*, **12** (11), 1046 (2025). DOI: 10.3390/photonics12111046
- [21] M.V. Shuba, A.V. Melnikov, A.G. Paddubskaya, P.P. Kuzhir, S.A. Maksimenko, C. Thomsen. *Phys. Rev. B*, **88** (4), 045436 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.88.045436
- [22] G.Ya. Slepyan, M.V. Shuba, S.A. Maksimenko, C. Thomsen, A. Lakhtakia. *Phys. Rev. B*, **81** (20), 205423 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.81.205423
- [23] D. Zhu, M. Bosman, J.K.W. Yang. *Opt. Express*, **22** (8), 9809 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.009809
- [24] H. Gu. *AM*, **5** (1), 1 (2016). DOI: 10.11648/j.am.20160501.11
- [25] P.Y. Apel. *Mater. Chem. Phys.*, **339**, 130681 (2025). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2025.130681