ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ПРОПУСКАНИЯ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Д.Л. Загорский[1)], И.М. Долуденко[1)], Г.В. Горохов[2)],
Н.И. Волынец[2)], О.Г. Поддубская[2)], Д.С. Быченок[2)]
[1)]*ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,*
Ленинский пр. 59, Москва, Россия, dzagorskiy@gmail.com
[2)]*Белорусский государственный университет, Институт ядерных проблем,*
ул. Бобруйская 11, Минск 220006, Беларусь

Методом матричного синтеза на основе трековых мембран получены массивы нанопроволок (НП) из магнитомягкого материала — пермаллоя. Синтезированы образцы различных типов, содержащие НП, как строго перпендикулярные поверхности, так и расположенные под различным наклоном. Во втором случае один из образцов содержал параллельные друг другу нанопроволоки, наклонённые под строго заданным углом 43.5° к поверхности. Другой тип образца содержал НП с произвольным наклоном, варьировавшимся в одной плоскости в диапазоне 10-20°. Во всех случаях нанопроволоки были оставлены в полимерной матрице и исследовался т.н. «металл-полимерный композит». Зависимость коэффициента пропускания тонких плёнок композита от поляризации падающего излучения исследовалась в диапазоне 0.1-1 ТГц. Показано, что для «перпендикулярных» нанопроволок, ориентированных вдоль падающего излучения, поляризационные эффекты не наблюдаются. Для образцов с «сильнонаклонными» НП (угол 43.5°) обнаружена слабо выраженная зависимость коэффициента пропускания от поляризации излучения. Для образцов плёнок с «разнонаклонными» НП наблюдалась наибольшая поляризационная активность. Полученные результаты могут послужить основой для создания поляризационных устройств на основе массивов НП, зафиксированных в полимерной матрице.

Ключевые слова: матричный синтез; нанопроволоки; пропускание электромагнитного излучения; поляризация; трековые мембраны.

THE OBTAINING OF METAL-POLYMER COMPOSITES AND INVESTIGATION OF THEIR TRANSMITTANCE IN MICROWAVE RANGE

D. Zagorskiy[1)], I. Doludenko[1)], G. Gorokhov[2)], N. Valynets[2)], A. Paddubskaya[2)], D. Bychanok[2)]
[1)]*FSRC "Crystallography and photonics", Russian Academy of Sciences,*
59 Leninsky Ave., Moscow, Russia, dzagorskiy@gmail.com
[2)]*Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,*
11 Bobruiskaya Str., 220006 Minsk, Belarus

Using the method of matrix synthesis on the basis of track membranes, arrays of nanowires (NWs) were obtained from a soft magnetic material, permalloy. Samples of various types containing NWs, both strictly perpendicular surfaces and located at various inclinations, were synthesized. In the second case, one of the samples contained NWs parallel to each other, inclined at a strictly specified angle of 43.5° to the surface. Another type of sample contained NWs with an arbitrary slope, which varied in one plane in the range of 10-20°. In all cases, the NWs were left in the polymer matrix and the so-called. "metal-polymer composite". The dependence of the transmittance of thin films of the composite on the polarization of the incident radiation was studied in the range of 0.1-1 THz. It is shown that no polarization effects are observed for "perpendicular" NWs oriented along the incident radiation. For samples with "strongly inclined" NWs (angle 43.5°), a weakly pronounced dependence of the transmittance on the radiation polarization was found. The highest polarization activity was observed for the film samples with "differently inclined" NWs.

Keywords: matrix synthesis; nanowires; transmission of electromagnetic radiation; polarization; track membranes.

Введение

Композитные материалы на основе проводящих [1] и ферромагнитных [2] наноразмерных частиц, распределённых в диэлектрической матрице, представляют существенный интерес для применений микроволновой и терагерцовой оптики. Специфика расположения протяжённых наноразмерных включений, а именно их хаотическое распределение в диэлектрической матрице, позволяет использовать композиты в качестве эффективных поглотителей (экранов) электромагнитного излучения в широком диапазоне частот [3]. Дальнейший рост эффективности экранирования электромагнитного излучения, а также возникновение дополнительных свойств, необходимых для практических применений, могут быть обеспечены путём создания упорядоченных наноструктур [4]. Данная работа посвящена созданию и изучению наноструктур, на основе проводящих нанопроволок, определённым образом ориентированных в диэлектрической матрице, обладающих специфическими оптическими свойствами при взаимодействии с поляризованным электромагнитным излучением терагерцового диапазона.

Основная часть

В настоящей работе изучались плёнки металл-полимерного композита на основе трековых мембран — пористых полимерных плёнок толщиной 12 мкм. В поры мембран методом гальванического осаждения из раствора электролита были внедрены нанопроволоки (НП) из сплава $Fe_{0,2}Ni_{0,8}$ (пермаллоя). Использовались четыре различных типа трековых мембран, (ОИЯИ, г. Дубна): с «вертикальными» (строго перпендикулярными поверхности) порами диаметром 100 и 200 нм, с параллельными порами одинакового наклона 43.5° и с «разнонаклонными» порами (с углами разориентации ±10-20° в определённой плоскости). Плотности пор лежали в пределах $5\cdot10^8$-$1.2\cdot10^9$ см$^{-2}$. Массивы НП были получены гальваническим способом путём электроосаждения железа и никеля из раствора. СЭМ исследования полученных НП, отделённых от матрицы после получения, показали, что их форма и ориентация соответствуют форме и ориентации пор в трековой мембране. Последующие измерения коэффициента пропускания T полученных образцов тонких плёнок на основе НП в матрице производились в диапазоне 0.1-1 ТГц с помощью терагерцового спектрометра TSPEC, использующего линейно поляризованное излучение. Для исследования поляризационных зависимостей образец плёнки размещался на вращающейся платформе нормально к падающему излучению. На рис. 1 приведены частотная и угловая зависимости коэффициента пропускания для двух образцов с НП, строго перпендикулярными поверхности (параллельными направлению облучения) с диаметрами 100 и 200 нм.

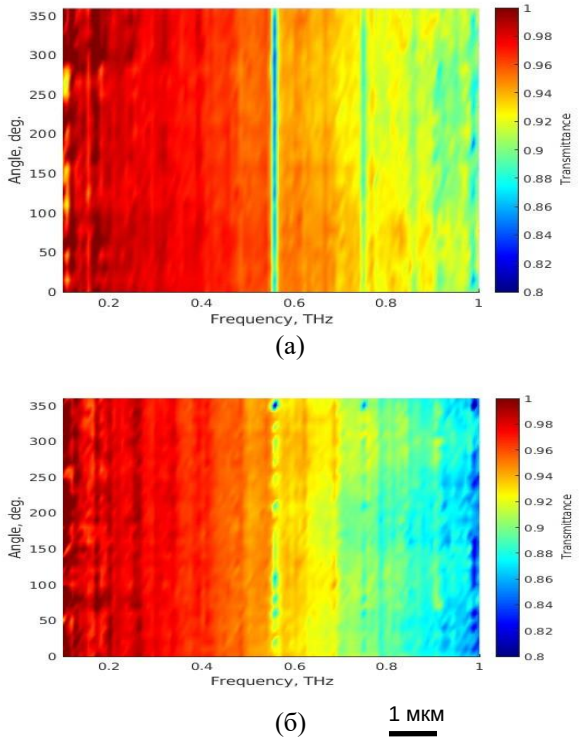
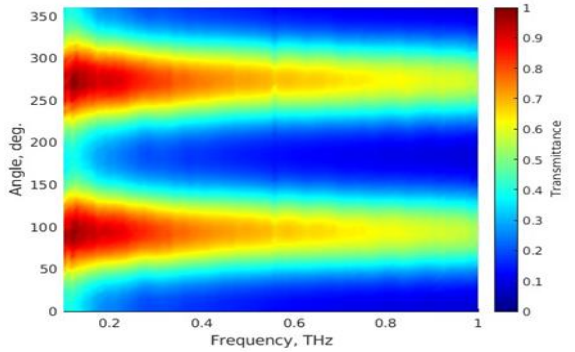


Рис. 1. Частотная и угловая зависимости коэффициента пропускания для образцов с НП параллельными направлению облучения: а) диаметр НП 100 нм, б) диаметр НП 200 нм

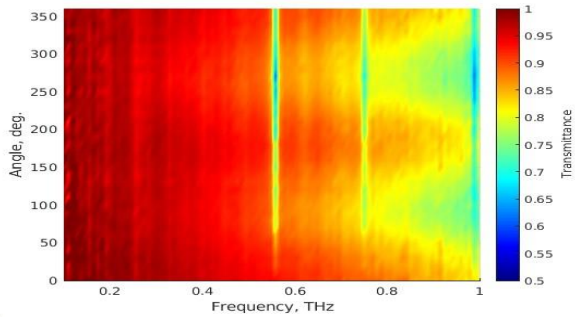
Выводы. Во-первых, увеличение диаметра нанопроволок ведёт к снижению способ-

ности образца пропускать электромагнитное излучение. Во-вторых, коэффициент пропускания структуры с вертикально ориентированными порами НП не зависит от поляризации падающего излучения.

Частотные и поляризационные зависимости коэффициента пропускания двух типов образцов с наклонными НП представлены на рис. 2.



(а)



(б)

Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания от частоты и ориентации падающего излучения: а - образец с параллельными НП, наклонёнными под углом 43; б – образец с «разнонаклонными» НП

Анализ результатов показывает, что образец с наклоном НП 43.5° показывает слабовыраженную поляризуемость, однако, характеризуется высокой прозрачностью. В образце с «разнонаклонными» НП, наклон которых варьируется вдоль одной из осей наноструктуры, наблюдается наиболее выраженная зависимость коэффициента пропускания от поляризации падающего излучения, характеризуемая величиной поляризуемости $P=(T_{max}-T_{min})/(T_{max}+T_{min})$, где T_{max} и T_{min} — коэффициенты пропускания в случаях параллельной и скрещенной поляризации излучения и образца, соответственно. В случае «разнонаклонных» НП поляризуемость достигает 0.7 на частоте 1 ГГц, тогда как для НП, расположенных под углом 43.5°, она не превышает 0.05.

Возникновение зависимости коэффициента пропускания от поляризации падающего излучения связано с наличием углового распределения пор в матрице по одной из осей. Направления поляризации в плёнке соответствуют преимущественным направлениям наклона НП.

Заключение

Полученные результаты показывают, что для использованных составов НП и типов ростовых матриц характерна существенная прозрачность в терагерцовом диапазоне, что делает их неэффективными для экранирования электромагнитного излучения. Вместе с тем, показано, что такие структуры могут быть использованы для разработки тонкоплёночных элементов микроволновой и терагерцовой оптики: поляризаторов, фильтров и т.п.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ 22-22-00983.

Библиографические ссылки

1. Ivanov E. et al. *Applied Sciences* 2019; 9(6): 1209.
2. Meisak D. et al. FANEM-2018. Minsk, Belarus, 2018: 48.
3. Kato Y. et al. *RSC Advances* 2017; 7(18): 10841–10847.
4. Gorokhov G.V. et al. *Nanotechnology* 2020; 31(25): 255703.