09

Компактные источники инфракрасного излучения на основе пленок из углеродных нанотрубок

© Е.П. Кицюк,[1] А.В. Сыса,[1,2] А.В. Куксин,[3] Ю.О. Василевская,[1] С.Г. Моисеев,[2] Ю.П. Шаман[1,2]

[1]Научно-производственный комплекс „Технологический центр“,
124498 Зеленоград, Москва, Россия
[2]Ульяновский государственный университет,
432017 Ульяновск, Россия
[3]Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,
124498 Зеленоград, Москва, Россия
e-mail: kitsyuk.e@gmail.com

Поступило в Редакцию 18 октября 2024 г.
В окончательной редакции 18 октября 2024 г.
Принято к публикации 18 октября 2024 г.

Изготовлены миниатюрные источники инфракрасного излучения на основе пленок из разориентированных углеродных нанотрубок. Получены спектры излучения пленок на основе одностенных (в том числе с характерным металлическим и полупроводниковым типом проводимости) и многостенных углеродных нанотрубок в диапазоне длин волн $3-10\,\mu$m в интервале температур от 150 °C до 400 °C. Продемонстрирована возможность использования изготовленных источников излучения для измерения спектров пропускания тонких органических пленок.

Ключевые слова: сепарация, лазерная резка, углеродные нанотрубки, газовый сенсор, инфракрасное излучение.

DOI: 10.61011/JTF.2025.03.59865.328-24

Введение

Газовые сенсоры находят широкое применение в различных областях науки и техники [1–12], таких, как мониторинг вредных веществ на промышленных объектах [13,14], контроль качества воздуха в помещении [15,16] и медицинская диагностика [17]. Наиболее эффективным методом детектирования различных газов в составе воздуха, в том числе и опасных для здоровья человека, является оптическая спектроскопия в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне [18]. Недисперсионные ИК датчики мониторинга газовой среды обладают высокой чувствительностью и селективностью к обнаруживаемым компонентам газовой смеси, стабильностью параметров вне зависимости от концентрации кислорода и влаги в воздухе на протяжении всего срока службы. Однако для их эффективной работы требуется создание компактных источников ИК излучения в диапазоне длин волн $3-12\,\mu$m. Перспективным решением данной задачи является создание ИК излучателей с использованием пленок углеродных нанотрубок (УНТ) из-за их уникальных оптических и электрофизических свойств [19]. Такое покрытие способно обеспечивать коэффициент поглощения света, близкий к единице, что является хорошим приближением к абсолютно черному телу [20]. Поэтому в соответствии с законом излучения Кирхгофа создание излучателей на основе УНТ, где пленка нанотрубок выступает в качестве нагревателя и излучающей поверхности, является перспективным направлением с точки зрения технологии изготовления компактных ИК нагревателей, поскольку в таком случае отпадает необходимость формирования на поверхности МЭМС (микроэлектромеханических систем) нагревателя дополнительного слоя с высоким коэффициентом поглощения [21,22]. В работе [22] проведено исследование излучательной способности массива многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), осажденного на поверхность МЭМС нагревателя. Аналогично исследовалась излучательная способность сеток одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) [23], при этом комплексное сравнение излучательных способностей пленок МУНТ и ОУНТ представляет собой важную научную задачу.

1. Материалы и методы

Для сравнения спектров излучения пленок МУНТ и ОУНТ были сформированы ИК излучатели на поверхности подложки из слюды с использованием слоев с соответствующим типом УНТ. Изготовление тестовых структур было реализовано в едином технологическом цикле посредством формирования требуемого топологического рисунка пленки УНТ и последующей резкой с помощью наносекудного лазера полученных структур на образцы прямоугольной формы. Для удобства проведения измерений образцы ИК излучателей были разварены в корпус TO39-114.

Для анализа влияния на спектр излучения фракций УНТ с металлическим и/или полупроводниковым типом проводимости проводилась сепарация коммерче-

ских ОУНТ методом гель-хроматографии по методике, описанной в работе [24]. Сепарации подвергались ОУНТ торговой марки TUBALL 01RW03 производства OCSiAl диаметром 1.2–2 nm и длиной более 5 μm.

Перед сепарацией ОУНТ были приготовлены суспензии нанотрубок, содержащие 20 mg УНТ в 100 ml 1%-го водного раствора додецилсульфата натрия (ДСН), которые подвергались обработке гомогенизатором с интенсивностью ультразвукового воздействия 50 W/cm^2 в течение 2 h в термостатированном стакане при температуре не выше 15 °C. Полученные суспензии подвергали центрифугированию при помощи высокоскоростной центрифуги Avanti J-30I (Beckman Coulter) в течение 60 min при 90 000 g. После центрифугирования из пробирок отбирали 3/4 объема суспензии УНТ, которую использовали для дальнейшего разделения ОУНТ по типу проводимости.

В качестве наполнителя для разделения УНТ использовался Sephacryl S-200 в объеме 10 ml, которым заполнялась хроматографическая колонка. Перед проведением разделения ОУНТ по типу проводимости наполнитель промывался 1%-м водным раствором ДСН. Затем производилась загрузка в хроматографическую колонку суспензии ОУНТ в 1%-й водном растворе ДСН объемом 10 ml. Прошедшая через наполнитель S-200 суспензия ОУНТ собиралась, а наполнитель промывался 1%-м водным раствором ДСН от остатков суспензии. Очищенная суспензия ОУНТ содержала нанотрубки преимущественно с металлическим типом проводимости. Затем производили элюирование УНТ посредством промывки наполнителя раствором, содержащим 1% ДСН и 1% дезоксихолата натрия дезоксихолата в соотношении (1 : 1), который после прохождения через S-200 содержал УНТ преимущественно полупроводникового типа проводимости.

Для формирования суспензии МУНТ использовали нанотрубки, синтезированные по методике, описанной в работе [25]. Согласно данным растровой электронной микроскопии, характерный диаметр синтезируемых МУНТ находится в диапазоне от 6 до 30 nm. Полученный материал использовался для приготовления суспензии МУНТ в 1%-м водном растворе ДСН по описанной выше методике для ОУНТ.

Используя полученные суспензии, были сформированы пленки ОУНТ и МУНТ методом вакуумной фильтрации. В качестве фильтрующих элементов использовались мембранные нитроцеллюлозные фильтры диаметром 50 mm с размером пор 0.2 μm. Диаметр фильтрующей поверхности составлял 40 mm. Перед проведением процесса вакуумной фильтрации проводили измерение оптической плотности используемой суспензии УНТ на длине волны 400 nm в кювете с длиной оптического пути 10 mm. Оптическая плотность используемой суспензии приводилась к единице, что эквивалентно пропусканию суспензии 10%. После процесса фильтрации мембранный фильтр со слоем УНТ помещался в чашку Петри, заполненную 50 ml ацетона. После растворения фильтра 40 ml ацетона откачивали шприцом, далее добавляли 40 ml чистого ацетона и выдерживали 20 min. Данная операция повторялась дважды. Затем 40 ml ацетона откачивали шприцом и приливали 100 ml дистиллированной воды. Таким образом на поверхности раствора формировались пленки ОУНТ и МУНТ.

Методом аквапринта пленки УНТ переносились с поверхности раствора на поверхность конденсаторной слюды марки СНЧ толщиной 50 μm. Выбор слюды в качестве материала подложки был обоснован меньшим коэффициентом теплопроводности (0.4–0.5 W/(m·K)) [26] по сравнению с иными диэлектрическими подложками, такими, как ситалл (0.8–2.5 W/(m·K)) и кварц (1.4 W/(m·K)) [27], температурной стабильностью материала вплоть до 600 °C, достаточной оптической плотностью на длине волны 1064 nm для реализации процесса лазерной резки и минимальной толщиной доступных подложек (30–60 μm). РЭМ изображения поверхности пленки из исходных ОУНТ и МУНТ приведены на рис. 1, *a* и *b* соответственно.

Для формирования требуемого топологического рисунка по поверхности пленки УНТ использовался Yb-лазер с системой позиционирования луча, генерирующий излучение на основной гармонике с длиной волны в ИК диапазоне 1064 nm. Лазерное удаление УНТ в заданных областях пленки позволило сформировать массив прямоугольных участков УНТ размером 2.5 × 4 mm. Расстояние между прямоугольными областями по одному из направлений задавалось равным 1.1 mm, а по другому — 2.2 mm. Диаметр лазерного пятна при обработке составлял $\sim$ 35 μm, расстояние между центрами соседних пятен — $\sim$ 17 μm, а заданная скорость перемещения луча составляла 240 mm/s. Лазер работал в импульсном режиме с длительностью импульса 100 ns и частотой 30 kHz. Воздействие производилось с плотностью энергии 70 J/cm^2. Количество проходов составило 100. Обработка всей области 18.6 × 32.4 mm занимала около 2 min. После этого для дальнейшей сборки обработанную область вместе с подложкой вырезали тем же лазером, но при плотности энергии $\sim$ 100 J/cm^2.

Далее методом магнетронного напыления через твердую маску формировались алюминиевые контактные площадки шириной 3.2 mm. При этом непокрытая алюминием область пленки из УНТ имела размеры 2.5 × 3 mm. После того как контактные площадки были сформированы, производили резку лазером на рабочие кристаллы размером 6.2 × 3.6 mm при плотности энергии $\sim$ 100 J/cm^2.

Монтаж отдельных кристаллов в корпус TO39-114 производили алюминиевой проволокой толщиной 30 μm с помощью ультразвуковой сварки ES-4029. Длительность сварочного импульса — 100 ms, усилие прижатия — 70 g, сварочный ток — 62 mA. Монтаж производили таким образом, чтобы подложка была закреплена с воздушным зазором и находилась на расстоянии $\sim$ 2 mm от основания корпуса. Внешний вид компактного источника ИК излучения представлен на рис. 2, *a*.

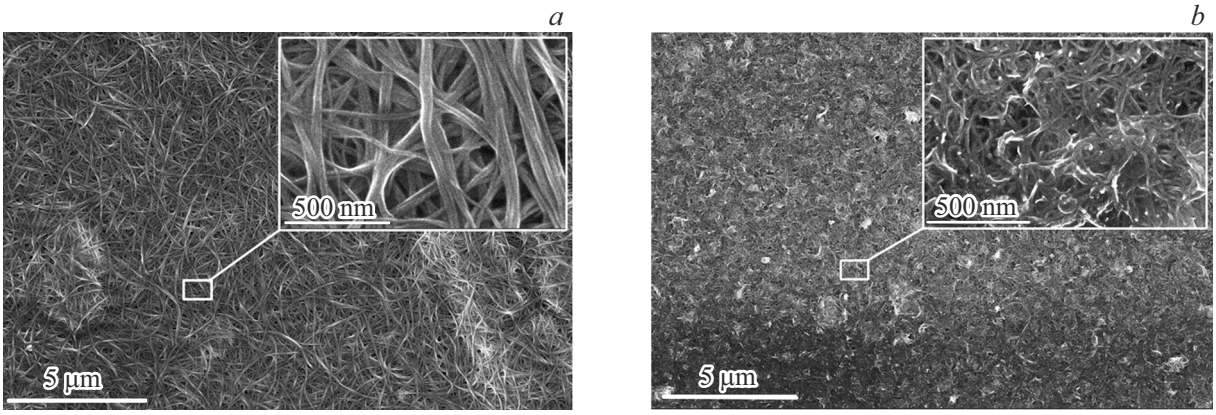


Рис. 1. РЭМ изображения сформированных на поверхности слюды пленок из: *a* — исходных ОУНТ; *b* — МУНТ.

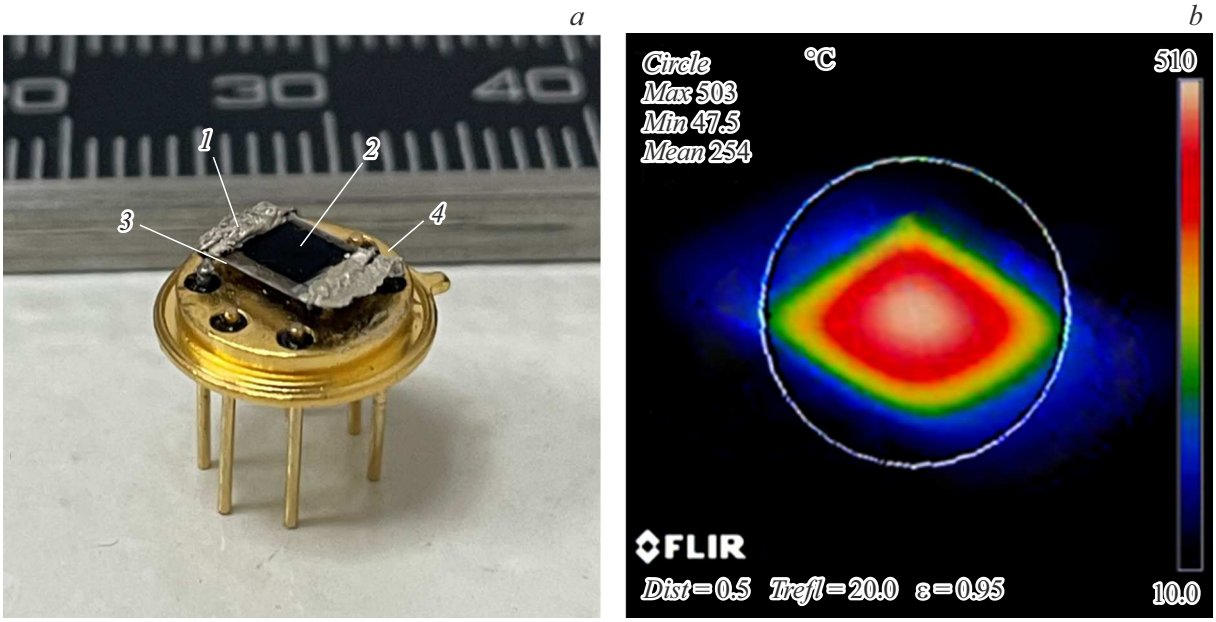


Рис. 2. Компактный источник ИК излучения на основе пленок из УНТ: *a* — фотография излучателя, *1* — алюминиевая проволока, *2* — рабочая область пленки УНТ, *3* — конденсаторная слюда марки СНЧ, *4* — корпус TO39-114; *b* — тепловизионное изображение рабочей области пленки УНТ, нагретой до 500°C.

Используя прецизионный источник-измеритель B2912A производства Agilent Technologies, на выводы корпуса подавали напряжение питания в диапазоне 5–15 V, силу тока ограничивали величиной 100 mA. Контроль температуры от величины напряжения осуществляли при помощи тепловизора Flir P640 в диапазоне до +500 °C. На рис. 2, *b* представлено тепловизионное изображение нагретой рабочей области пленки УНТ.

Для измерения оптических спектров излучения изготовленных прототипов ИК излучателей использовали спектральный комплекс на основе монохроматора iHR320 производства HORIBA Scientific. При измерениях использовался прерыватель, который обеспечивал модуляцию оптического сигнала с частотой 170 Hz. Измерения проводились в диапазоне длин волн 2–12 μm с шагом 20 nm с использованием дифракционной решетки 300 gr/mm и оптического фильтра, ограничивающего прохождение излучения с длиной волны до 1900 nm. В качестве детектора использовался твердотельный детектор DSS-MCT(14)020L (ртутно-кадмий-теллуридный) с азотным охлаждением. Встроенный предусилитель был отключен.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены спектры оптической плотности исходной суспензии ОУНТ, суспензии ОУНТ с полупроводниковым типом проводимости, суспензии ОУНТ с

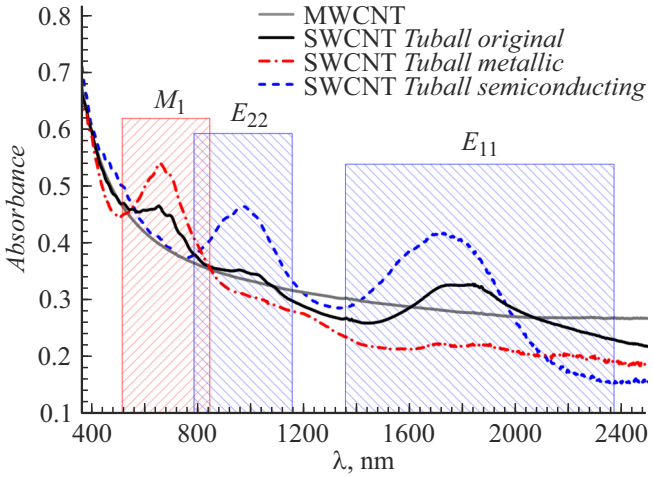


Рис. 3. Спектры оптической плотности различных суспензий УНТ.

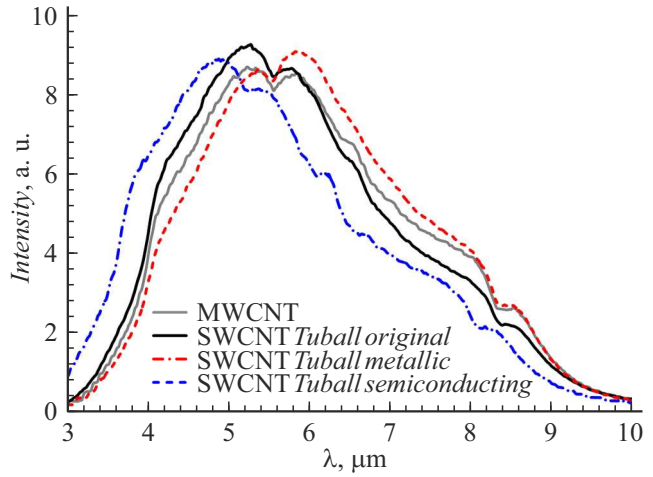


Рис. 4. Нормированные на спектральную чувствительность детектора спектры излучения прототипов ИК излучателей с УНТ различного типа проводимости, нагретых до температуры 250 °C.

металлическим типом проводимости и суспензии МУНТ после центрифугирования.

Оценка содержания доли ОУНТ с металлическим и полупроводниковым типом проводимости в различных суспензиях проводилась согласно методике, описанной в работе [28]. Для этого определялась величина площади пика (M_1) в диапазоне длин волн 500–900 nm для металлических ОУНТ и пика (E_{11}) в диапазоне длин волн 1300–2200 nm для полупроводниковых ОУНТ. Согласно формуле, представленной в работе [28], доля ОУНТ с металлическим типом проводимости может быть рассчитана следующим образом:

$$R_M = \frac{1}{1 + \frac{E_{11}}{M_{11}}} \cdot 100\,\%. \qquad (1)$$

Исходная суспензия ОУНТ содержит 62 % фракции нанотрубок с металлическим типом проводимости и 38 % — с полупроводниковым типом проводимости. Суспензия ОУНТ, полученная после элюирования, содержит 3 % металлических и 97 % полупроводниковых ОУНТ. Суспензия ОУНТ, полученная после прохождения через наполнитель S-200, напротив, содержит 92 % ОУНТ с металлическим типом проводимости и 8 % — с полупроводниковым.

Нормированные на спектральную чувствительность детектора спектры излучения прототипов ИК излучателей с различными пленками УНТ, нагретых до 250 °C, приведены на рис. 4. Полученные результаты показывают, что спектры излучения пленок, сформированных с использованием исходных ОУНТ или МУНТ, подобны. В случае пленок, сформированных с использованием ОУНТ с металлическим или полупроводниковым типом проводимости, наблюдается смещение максимумов излучения. Для пленки, сформированной из металлических ОУНТ, максимум излучения находится вблизи длины волны 5.9 μm, а для пленки, сформированной из преимущественно полупроводниковых ОУНТ, максимум излучения достигается вблизи 4.9 μm. Наблюдаемый эффект смещения максимума интенсивности излучения пленок полупроводниковых ОУНТ можно объяснить наличием плазмонного резонанса и увеличением оптической плотности пленок ОУНТ с металлическим типом проводимости при длинах волн более 4 μm по сравнению с пленками ОУНТ с полупроводниковым типом проводимости [29]. Нормированная сумма спектров излучения пленок ОУНТ с металлическим и полупроводниковым типами проводимости позволяет получить спектр, близкий к спектру излучения пленки из исходных ОУНТ.

Результаты измерений спектров излучения при различной температуре пленки на основе исходных ОУНТ Tuball в среде воздуха приведены на рис. 5. С ростом температуры наблюдается увеличение интенсивности излучения и смещение максимума излучения в коротко-

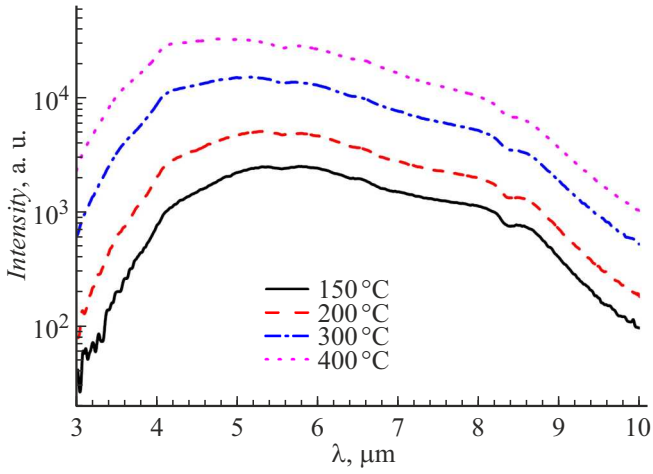


Рис. 5. Спектры излучения пленки исходных ОУНТ Tuball при различной температуре на воздухе.

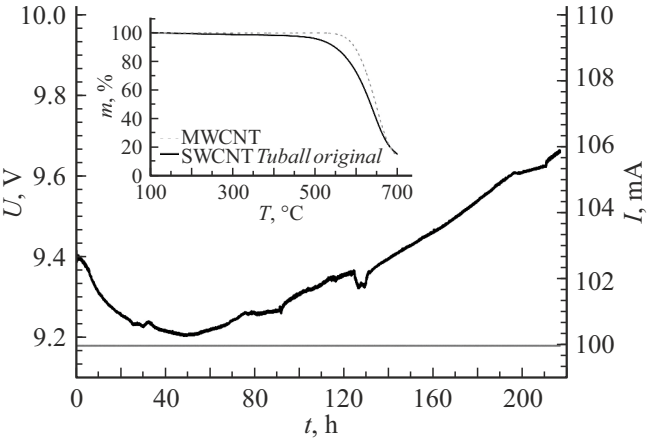


Рис. 6. Зависимость силы тока и напряжения прототипа ИК излучателя на основе пленки ОУНТ Tuball от времени. На вставке — зависимость массы пленки УНТ от температуры при нагреве в кислородсодержащей среде.

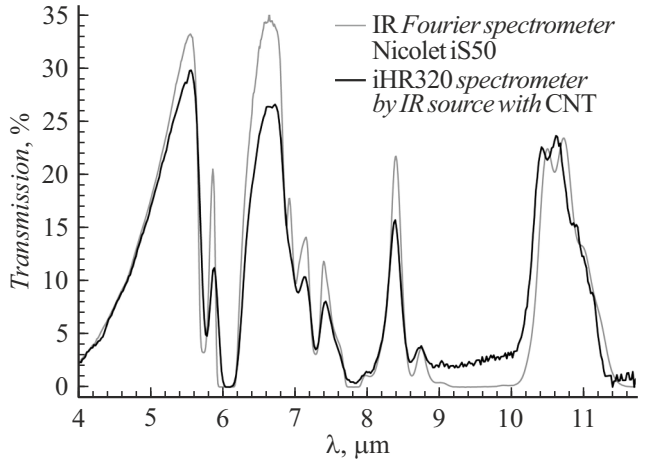


Рис. 7. Спектр пропускания пленки из нитроцеллюлозы.

волновую область, что согласуется с законом смещения Вина.

Зависимость электрофизических параметров прототипа ИК излучателя на основе пленки исходных ОУНТ от времени при температуре нагревателя 400 °C приведены на рис. 6. На первоначальном этапе наблюдается уменьшение напряжения с 9.4 до 9.2 V, а затем наблюдается монотонный рост напряжения до 9.6 V. Уменьшение напряжения питания на первоначальном этапе работы ИК излучателя можно объяснить уменьшением сопротивления пленки ОУНТ в результате удаления функциональных групп с поверхности УНТ, образовавшихся в процессе кислотной очистки ОУНТ от каталитических примесей [30,31]. Дальнейшее увеличение напряжения питания можно объяснить ухудшением электрического контакта между УНТ и алюминиевыми электродами вследствие окисления алюминия [32], так как, согласно данным термического анализа, УНТ стабильны в кислородсодержащей среде до 500 °C (вставка на рис. 6). Потеря веса пленки ОУНТ в процессе нагрева связана с удалением функциональных групп с поверхности стенок ОУНТ [31]. Для исключения влияния контактного сопротивления между металлическим электродом и УНТ на стабильность работы ИК излучателя необходимо использовать металлы, менее подверженные окислению при нагреве, либо использовать защитные покрытия, препятствующие окислению металла.

Ниже продемонстрирована возможность использования пленки УНТ в качестве нагревателя и излучающей поверхности для проведений спектральных исследований в ИК диапазоне. С помощью разработанного прототипа источника ИК излучения был получен спектр пропускания нитроцеллюлозы в диапазоне длин волн $3-12\,\mu$m. Напряжение питания ИК излучателя на основе пленки из исходных ОУНТ Tuball составляло 9.7 V, сила тока — 106 mA, а температура ИК излучателя, согласно данным тепловизионных измерений, была равна 400 °C. Спектр пропускания приведен на рис. 7. Для сравнения на рис. 7 также приведен спектр пропускания нитроцеллюлозы, измеренный с помощью ИК фурье-спектрометра Nicolet iS50. Сравнение измеренных спектров показывает, что в диапазоне длин волн $4-9\,\mu$m наблюдается полное совпадение спектров по количеству пиков и их положению. В диапазоне длин волн $9-12\,\mu$m наблюдается расхождение по положению пиков на величину не более 120 nm.

Заключение

Предложена оригинальная конструкция источника ИК излучения, работающего в диапазоне длин волн от 3 до $12\,\mu$m, где в качестве нагревателя и излучающей поверхности используется пленка УНТ. По анализу свечения изготовленных ИК излучателей на основе пленок МУНТ и ОУНТ с различным типом проводимости показано, что спектры излучения МУНТ и исходных ОУНТ схожи, однако для пленок ОУНТ с полупроводниковым и металлическим типом проводимости наблюдается разнонаправленное смещение максимумов интенсивности излучения по спектру на величину до 1000 nm относительно пиков в спектре излучения исходных нанотрубок. Проведенные измерения электрофизических параметров от времени показали возможность долговременного использования изготовленных ИК излучателей при температуре нагрева пленки до 400 °C в случае формирования надежного контакта между металлическим электродом и пленкой УНТ посредством использования коррозионностойких металлов и/или защитных покрытий, исключающих воздействие внешней среды.

Финансирование работы

Разработка концепции источника инфракрасного излучения, разработка технологии нанесения пленок ОУНТ,

измерения спектров излучения и электрофизических параметров изготовленных структур выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-19-00880. Технология сепарации УНТ по типу проводимости разработана при поддержке проекта FNRM-2024-0001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M.K. Rabchinskii, V.V. Sysoev, O.E. Glukhova, M. Brzhezinskaya, D.Yu. Stolyarova, A.S. Varezhnikov, M.A. Solomatin, P.V. Barkov, D.A. Kirilenko, S.I. Pavlov, M.V. Baidakova, V.V. Shnitov, N.S. Struchkov, D.Yu. Nefedov, A.O. Antonenko, P. Cai, Z. Liu, P.N. Brunkov. Adv. Mater. Technol., **7** (7), 2101250 (2022). DOI: 10.1002/admt.202101250

[2] Z. Meng, J. Zhuang, X. Xu, W. Hao, S.X. Dou, Y. Du. Adv. Mater. Interfaces, **5**, 1800749 (2018). DOI: 10.1002/admi.201800749

[3] D. Fan, X. Yang, J. Liu, P. Zhou, X. Zhang. Compos. Commun., **27**, 100887 (2021). DOI: 10.1016/j.coco.2021.100887

[4] X. Yang, J. Liu, D. Fan, J. Cao, X. Huang, Z. Zheng, X. Zhang. Chem. Eng. J., 389, **124448** (2020). DOI: 10.1016/j.cej.2020.124448

[5] W.C. Tan, K.-W. Ang. Adv. Electron. Mater., **7**, 2001071 (2021). DOI: 10.1002/admt.202101250

[6] S. Orzechowska, A. Mazurek, R. Swisłocka, W. Lewandowski. Materials, **13**, 80 (2020). DOI: 10.3390/ma13010080

[7] C. Anichini, W. Czepa, D. Pakulski, A. Aliprandi, A. Ciesielski, P. Samori. Chem. Soc. Rev., **47**, 4860 (2018). DOI: 10.1039/C8CS00417J

[8] F. Schedin, A.K. Geim, S.V. Morozov, E.W. Hill, P. Blake, M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov. Nat. Mater., **6**, 652 (2007). DOI: 10.1038/nmat1967

[9] K. Deshmukh, T. Kovarik, S.K.K. Pasha. Coord. Chem. Rev., **424**, 213514 (2020). DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213514

[10] M. Donarelli, L. Ottaviano. Sensors, **18**, 3638 (2018). DOI: 10.3390/s18113638

[11] N. Joshi, T. Hayasaka, Y. Liu, H. Liu, O.N. Oliveira Jr., L. Lin. Microchim. Acta, **185**, 213 (2018). DOI: 10.1007/s00604-018-2750-5

[12] R.A. Potyrailo, V.M. Mirsky. Chem. Inform., **39** (19), (2008). DOI: 10.1002/chin.200819271

[13] C.S. Goldenstein, R.M. Spearrin, J.B. Jeffries, R.K. Hanson. Progr. Energy Combustion Sci., **60**, 132 (2017). DOI: 10.1016/j.pecs.2016.12.002

[14] U. Willer, M. Saraji, A. Khorsandi, P. Geiser, W. Schade. Opt. Lasers Engineer., **44** (7), 699 (2006). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2005.04.015

[15] A. Schieweck, E. Uhde, T. Salthammer, L.C. Salthammer, L. Morawska, M. Mazaheri, P. Kumar. Renewable and Sustainable Energy Rev., **94**, 705 (2018). DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.057

[16] A. Ortiz Perez, B. Bierer, L. Scholz, J. Wöllenstein, S. Palzer. Sensors, **18** (12), 43445 (2018). DOI: 10.3390/s18124345

[17] M. Metsälä. J. Breath Research, **12** (2), 027104 (2018). DOI: 10.1088/1752-7163/aa8a31

[18] J. Hodgkinson, R.P. Tatam. Measurement Sci. Technol., **24** (1), 012004 (2012). DOI: 10.1088/0957-0233/24/1/012004

[19] H.-S.P. Wong, D. Akinwande. *Carbon Nanotube and Graphene Device Physics* (Cambridge University Press, 2010), DOI: 10.1017/CBO9780511778124

[20] Z.-P. Yang, L. Ci, J.A. Bur, S.-Y. Lin, P.M. Ajayan. Nano Lett., **8** (2), 446 (2008). DOI: 10.1021/nl072369t

[21] N. Li, H. Yuan, L. Xu, Y. Zeng, B. Qiang, Q.J. Wang, S. Zheng, H. Cai, L.Y.T. Lee, N. Singh, D. Zhao. Opt. Express, **29** (12), 19084 (2021). DOI: 10.1364/oe.422204

[22] D. Popa, R. Hopper, S.Z. Ali, M.T. Cole, Y. Fan, V.-P. Veigang-Radulescu, R. Chikkaraddy, J. Nallala, Y. Xing, J. Alexander-Webber, S. Hofmann, A. De Luca, J.W. Gardner, F. Udrea. Scientific Reports, **11** (1), 22915 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-02121-5

[23] L. Lai, P. Liu, D. Zhou, Q. Li, S. Fan, W. Lu. Adv. Functional Mater., **33** (4), 2208891 (2023). DOI: 10.1002/adfm.202208891

[24] H. Liu, D. Nishide, T. Tanaka, H. Kataura. Nature Commun., **2** (1), 309 (2011). DOI: 10.1038/ncomms1313

[25] A.A. Pavlov, A.V. Sysa, Yu.P. Shaman, M.I. Bazarova, I.M. Gavrilin, A.A. Polokhin. Russ. Microelectron., **46** (2), 82 (2017). DOI: 10.1134/s1063739717020068

[26] Н.П. Богородский, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. *Электротехнические материалы* (Энергоатомиздат, Л., 1985)

[27] Л.А. Новицкий, И.Г. Кожевников. *Теплофизические свойства материалов при низких температурах* (Машиностроение, М.,1975)

[28] Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura. J. Phys. Chem. C, **112** (34), 13187 (2008). DOI: 10.1021/jp804006f

[29] K. Oi, J. Komoto, T. Kawai, Y. Nonoguchi. Synthetic Metals, **282**, 116958 (2021). DOI: 10.1016/j.synthmet.2021.116958

[30] M.R. Predtechenskiy, A.A. Khasin, A.E. Bezrodny, O.F. Bobrenok, D.Yu. Dubov, V.E. Muradyan, V.O. Saik, S.N. Smirnov. Carbon Trends, **8**, 100175 (2022). DOI: 10.1016/j.cartre.2022.100175

[31] A. Yaya, C.P. Ewels, Ph. Wagner, I. Suarez-Martinez, A.G. Tekley, L.R. Jensen. Europ. Phys. J. Appl. Phys., **54** (1), 10401 (2011). DOI: 10.1051/epjap/2011100482

[32] L.P.H. Jeurgens, W.G. Sloof, F.D. Tichelaar, E.J. Mittemeijer. Thin Solid Films, **418** (2), 89 (2002). DOI: 10.1016/s0040-6090(02)00787-3