



№ 6041



ИНЭП

Институт нанотехнологий,
электроники и приборостроения

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТОД ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО
ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ
ДЛЯ РОСТА УГЛЕРОДНЫХ
НАНОТРУБОК**

Учебно-методическое пособие

Таганрог
2023

УДК 621.38-022.532: 620.3(075.8)

ББК 30.68+24.816.1я73

М54

Составители:

О.И. Ильин, М.В. Ильина, Н.Н. Рудык

- М54 Метод плазмохимического осаждения из газовой фазы для роста углеродных нанотрубок : учебно-методическое пособие / сост. О.И. Ильин, М.В. Ильина, Н.Н. Рудык ; Южный федеральный университет. – Таганрог, 2023. – 36 с.

В учебно-методическом пособии представлено теоретическое описание метода химического осаждения из газовой фазы для роста углеродных нанотрубок, влияние параметров роста на свойства получаемых нанотрубок, а также даны методические указания по росту углеродных нанотрубок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы.

Пособие может быть использовано студентами, обучающимися по направлениям 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и 28.03.02 «Наноинженерия», при изучении курсов «Микро- и нанотехнологии», «Наноматериалы: свойства и применение», а также при самостоятельной подготовке и переподготовке специалистов в области нано- и микроэлектроники.

Табл. 1. Ил. 36.

УДК 621.38-022.532: 620.3(075.8)

ББК 30.68+24.816.1я73

© Южный федеральный университет, 2023

Содержание

Введение.....	4
Теоретическая часть.....	5
Метод плазмохимического осаждения из газовой фазы.....	5
Влияние режимов роста углеродных нанотрубок методом ПХОГФ на их свойства.....	7
Влияние толщины каталитического слоя.....	7
Влияние температуры роста.....	7
Влияние соотношения технологических потоков аммиака и ацетилена.....	9
Практическая часть.....	11
Назначение установки.....	11
Технические данные.....	13
Процесс выращивания УНТ на установке PECVD.....	14
Руководство к проведению экспериментальных исследований на установке PECVD.....	15
Контрольные вопросы.....	33
Заключение.....	33
Библиографический список.....	33

Контрольные вопросы

1. Что такое углеродные нанотрубки? Назовите основные ограничения для использования УНТ при создании устройств наноэлектроники.
2. Как влияет толщина каталитического слоя на параметры УНТ, выращенных методом PECVD?
3. Как влияет температура роста метода PECVD на параметры и дефектность УНТ?
4. Какие существуют способы легирования азотом УНТ? Какие типы дефектов может образовывать азот в УНТ?
5. Как влияет легирование азотом на свойства УНТ?
6. Как влияет соотношение технологических потоков аммиака и ацетилена на дефектность УНТ, выращенных методом PECVD?
7. Как влияет материал подложки на параметры и дефектность УНТ, выращенных методом PECVD?
8. Расскажите о механизме роста УНТ методом PECVD.
9. Назовите и кратко опишите основные этапы роста УНТ методом PECVD.
10. Какую роль выполняет аммиак на этапах нагрева, активации и роста?
11. Какие материалы используются в качестве каталитических центров роста УНТ методом PECVD?
12. Назовите достоинства и недостатки метода PECVD при выращивании УНТ.

Заключение

В настоящем учебном пособии рассмотрены вопросы выращивания углеродных нанотрубок методом плазмохимического осаждения из газовой фазы, а также влияния ряда технологических параметров на геометрические размеры и структурные параметры УНТ. Представлено руководство по работе на установке PECVD для выращивания УНТ на образцах с подготовленным каталитическим слоем на основе переходных металлов.

Библиографический список

1. Cruz-Silva E. et al. Electronic Transport and Mechanical Properties of Phosphorus- and Phosphorus-Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes // *ACS Nano*. 2009. Vol. 3, № 7. P. 1913–1921.
2. Wiggins-Camacho J.D., Stevenson K.J. Effect of nitrogen concentration on capacitance, density of states, electronic conductivity, and morphology of N-doped carbon nanotube electrodes // *J. Phys. Chem. C*. 2009. Vol. 113, № 44. P. 19082–

19090.

3. Bulusheva L.G. et al. Controlling pyridinic, pyrrolic, graphitic, and molecular nitrogen in multi-wall carbon nanotubes using precursors with different N/C ratios in aerosol assisted chemical vapor deposition // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015. Vol. 17, № 37. P. 23741–23747.

4. Sharifi T. et al. Nitrogen doped multi walled carbon nanotubes produced by CVD-correlating XPS and Raman spectroscopy for the study of nitrogen inclusion // *Carbon N. Y.* 2012. Vol. 50, № 10. P. 3535–3541.

5. Morjan I.P. et al. Effect of the manufacturing parameters on the structure of nitrogen-doped carbon nanotubes produced by catalytic laser-induced chemical vapor deposition // *J. Nanoparticle Res.* 2013. Vol. 15. № 11.

6. Liu K. et al. Sodium metal-assisted carbonization of pyrrole to prepare N-doped porous carbons for high-rate performance supercapacitors // *Carbon N. Y.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 153. P. 265–273.

7. Wu X. et al. High-pressure pyrolysis of melamine route to nitrogen-doped conical hollow and bamboo-like carbon nanotubes // *Diam. Relat. Mater.* 2006. Vol. 15, № 1. P. 164–170.

8. Lim S.H. et al. Electronic and optical properties of nitrogen-doped multiwalled carbon nanotubes // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Phys.* 2006. Vol. 73, № 4. P. 1–6.

9. Chermnyak S.A. et al. Mechanism and kinetics of decomposition of N-containing functional groups in few-layer graphene nanoflakes // *Appl. Surf. Sci.* Elsevier, 2019. Vol. 484. № December 2018. P. 228–236.

10. Bulyarskiy S. V. et al. Nitrogen in carbon nanotubes // *Diam. Relat. Mater.* Elsevier, 2020. Vol. 109, № April. P. 108042.

11. Boncel S. et al. En route to controlled catalytic CVD synthesis of densely packed and vertically aligned nitrogen-doped carbon nanotube arrays // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2014. Vol. 5, № 1. P. 219–233.

12. Pawar S.P. et al. Critical insights into understanding the effects of synthesis temperature and nitrogen doping towards charge storage capability and microwave shielding in nitrogen-doped carbon nanotube/polymer nanocomposites // *RSC Adv.* Royal Society of Chemistry, 2016. Vol. 6, № 68. P. 63224–63234.

13. Eckert V. et al. Morphology of MWCNT in dependence on N-doping, synthesized using a sublimation-based CVD method at 750 °C // *Diam. Relat. Mater.* Elsevier, 2018. Vol. 86, № April. P. 8–14.

14. Il'in O.I. et al. Effect of the sublayer material on geometric dimensions and piezoelectric response of vertically aligned carbon nanotubes // *Fullerenes Nanotub. Carbon Nanostructures.* 2021.

15. Il'ina M. V. et al. Sublayer material as a critical factor of piezoelectric response in nitrogen-doped carbon nanotubes // *Diam. Relat. Mater. Elsevier B.V.*, 2022. Vol. 126, № April. P. 109069.

16. Ameli A. et al. Effects of synthesis catalyst and temperature on broadband dielectric properties of nitrogen-doped carbon nanotube/polyvinylidene fluoride nanocomposites // *Carbon N. Y.* 2016. Vol. 106. P. 260–278.

17. Рудык Н.Н. et al. Влияние параметров метода PECVD на рост углеродных нанотрубок для устройств нанопьезотроники // Журнал технической физики. 2021. Vol. 91, № 10. P. 1517.

18. Faisal S.N. et al. Pyridinic and graphitic nitrogen-rich graphene for high-performance supercapacitors and metal-free bifunctional electrocatalysts for ORR and OER // RSC Adv. Royal Society of Chemistry, 2017. Vol. 7, № 29. P. 17950–17958.

19. Arenal R. et al. Atomic Configuration of Nitrogen-Doped Single-Walled Carbon Nanotubes // Nano Lett. 2014. Vol. 14, № 10. P. 5509–5516.

20. Sumpter B.G. et al. Nitrogen-mediated carbon nanotube growth: Diameter reduction, metallicity, bundle dispersability, and bamboo-like structure formation // ACS Nano. 2007. Vol. 1, № 4. P. 369–375.

21. Inagaki M. et al. Nitrogen-doped carbon materials // Carbon N. Y. Elsevier Ltd, 2018. Vol. 132. P. 104–140.

22. Lee W.J. et al. Nitrogen-doped carbon nanotubes and graphene composite structures for energy and catalytic applications // Chem. Commun. 2014. Vol. 50, № 52. P. 6818.

23. Li X. et al. Bamboo-Like Nitrogen-Doped Carbon Nanotube Forests as Durable Metal-Free Catalysts for Self-Powered Flexible Li-CO₂ Batteries // Adv. Mater. 2019. Vol. 31, № 39. P. 1–9.

24. Louchev O.A. Formation mechanism of pentagonal defects and bamboo-like structures in carbon nanotube growth mediated by surface diffusion // Phys. Status Solidi Appl. Res. 2002. Vol. 193, № 3. P. 585–596.

25. Obradović M.D. et al. A comparative study of the electrochemical properties of carbon nanotubes and carbon black // J. Electroanal. Chem. 2009. Vol. 634, № 1. P. 22–30.

26. Ilina M. et al. Pyrrole-like defects as origin of piezoelectric effect in nitrogen-doped carbon nanotubes // Carbon N. Y. Elsevier Ltd, 2022. Vol. 190. P. 348–358.

Учебно-методическое издание

Ильин Олег Игоревич

Ильина Марина Владимировна

Рудык Николай Николаевич

**МЕТОД ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ
ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ДЛЯ РОСТА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК**

Подписано в печать 27.01.2023 г.

Бумага офсетная. Формат 60×84 ¹/₁₆. Тираж 30 экз.

Усл. печ. лист 2,09. Уч.-изд. л. 1,5. Заказ № 8894.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции

Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.