

Министерство образования Республики Беларусь
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ П.М. МАШЕРОВА»
(ВГУ ИМЕНИ П.М. МАШЕРОВА)

УДК 536.12:537.322:
537.86.029.657:
621.315:541.16

Рег. № 20210326

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе,
д.п.н., профессор

_____ Е.Я. Аршанский
" " _____ 202 г.

О Т Ч Е Т
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка и исследование материалов с регулярной структурой резонансно туннельных диодов для детектирования и распознавания слабых электромагнитных потоков

(заключительный)

ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии»
n/n «Наноструктурные материалы, нанотехнологии,
нанотехника («Наноструктура»)» задание 2.01.
на 2021-2025 гг.

Научный руководитель,
кандидат физико-
математических наук,
доцент, старший научный
сотрудник

Ю.И.Бохан

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель,
кандидат физико-
математических наук, доцент,
старший научный сотрудник

Ю.И. Бохан
(введение, глава 2, заключение)

Исполнители:

Аспирант,
младший научный сотрудник

П.А. Разбаев
(глава 1)

кандидат физико-
математических наук,
старший научный сотрудник

_____ В.М. Лалетин
(глава 2)

Нормоконтроль

Т.В. Харкевич

РЕФЕРАТ

Отчет 36 с., 1 кн., 12 рис., 52 источник, 1 приложение

БАРЬЕР, ТУННЕЛИРОВАНИЕ, УГЛЕРОДНАЯ НАНОТРУБКА, РЕЗОНАНС, ДИОД, ТОК

Объект исследования: туннельные явления в углеродных нанотрубках для создания систем резонансно-туннельных диодов.

Предмет исследования: туннельный эффект в цилиндрическом барьере.

Цель работы: исследование туннельных явлений в углеродных нанотрубках для разработки новых сенсоров на терагерцовый диапазон частот.

Научная значимость полученных результатов: Рассмотрены особенности туннелирования заряженных частиц в цилиндрических барьерах. В качестве практической реализации цилиндрического барьера предложена углеродная нанотрубка. Построена модель цилиндрического барьера с отрицательной дифференциальной проводимостью. На основе проведенного моделирования предложена методика регистрации импульсов терагерцового диапазона частот. Получено, что в зависимости от величины приложенного потенциала к углеродной нанотрубке могут быть реализованы различные режимы работы цилиндрического барьера.

Основные результаты работы: Предложено использовать для реализации цилиндрического барьера углеродную нанотрубку. Получены основные соотношения величин спектра и тока проводимости в зависимости от внешнего воздействия на величину барьера. Показано, что на основе углеродной нанотрубки, как реализации цилиндрического барьера, можно построить систему резонансно-туннельных диодов для создания сенсоров терагерцового диапазона.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и производстве приемников и излучателей электромагнитных волн терагерцового диапазона для диагностики в медицине.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Глава 1 Туннельные явления.....	7
1.1 Резонансно-туннельные переходы.....	10
1.2. Углеродные нанотрубки – как модель цилиндрического барьера.....	13
Глава 2 Туннельные явления в цилиндрическом барьере.....	18
2.1 Квантовые состояния в цилиндрическом барьере.....	18
2.2 Токовые состояния в цилиндрическом барьере.....	22
Заключение	26
Список использованных источников.....	27
Приложение А.....	33

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. III. Квантовая механика (нерелятивистская теория). – 4-е изд. испр. – М.; Наука. Гл. ред. физ-мат. Лит., 1989. 768 с.
2. Туннельные явления в твердых телах. // Под редакцией Э.Бурштейна и С.Лунквиста. М.Мир. - 1973. – 422с.
3. Леггет Э.Дж. (ред.) Управляемое диссипативное туннелирование. Туннельный транспорт в низкоразмерных системах// М.: Физмат, - 2011. - 496 с.
4. Mohsen Razavy Quantum theory of tunneling// World Scientific Publishing Co.Pte. Ltd. 2nd Edition. - 2014.- 767 p.
5. Jian Ping Sun, George I. Haddad, Pinaki Mazumder, Joel N. Schulman Resonant Tunneling Diodes: Models and Properties //PROCEEDINGS OF THE IEEE, -1998-VOL. 86,- NO. 4,- p.641-661
6. Елесин В.Ф. К теории когерентной генерации резонансно-туннельного диода. //ЖЭТФ. -1999.- том 116.-вып.2(8).- с.704-716.
7. Елесин. В. Ф., Катеев И.Ю. Высокочастотный нелинейный отклик двухъямных наноструктур //ФТП. - 2006. -т.39. -вып.9. - с.1106 - 1110.
8. Андрианов А.В. Генерация терагерцового излучения в полупроводниках (Обзор) // ФТТ.-2023.-т.65.-Вып.10.- с.1633-1671.
9. Горбацевич А.А., Шубин Н.М. Квантовые логические вентили // УФН. — 2018. — Т. 188, № 11. — С. 1209–1225.
10. Давидович М. В. Нестационарное резонансное туннелирование в диодной двухбарьерной структуре //Письма в ЖЭТФ, -2019,- т. 110,- вып. 7, - с.465-473.
11. Thomas J. Slight and Charles N. Ironside Investigation Into the Integration of a Resonant Tunnelling Diode and an Optical Communications Laser: Model and Experiment //IEEE Journal of Quantum Electronics, -2007- VOL. 43,- NO. 7, - p.580-587

12. Cimbri, D., Wang, J., Al-Khalidi, A. and Wasige, E. (2022) Resonant tunnelling diodes high-speed terahertz wireless communications - a review. //IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology,-2022-(doi: 10.1109 /TTHZ. 2022.3142965).
13. Schants, H.G. The Art and Science of Ultrawideband Antennas / H.G. Schants. – London: Artech House, -2015. – 593 p.
14. Chen, A., Chatterjee, S.,. Nanomaterials based electrochemical sensors for biomedical applications. //Chemical Society Reviews. 2013-42(12), p.5425–5438. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3CS35518G>
15. Дьячков П.Н. Электронные свойства и применение нанотрубок // П.Н.Дьячков. -М.: БИНОМ. Лаборатория знаний,2011. -488с.
16. Семененко В. Л., Лейман В. Г., Арсенин А. В., Стебунов Ю. В., Рыжий В. И. Система из двух углеродных нанотрубок как антенна и детектор терагерцевого излучения//Журнал радиоэлектроники. -2012. -№6.-с.2-15.
17. Запороцкова И. В., Борознина Н. П., Пархоменко Ю. Н., Кожитов Л. В. Сенсорные свойства углеродных нанотрубок// Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. -2017. - т.20, №1. с.5—21.
18. Abraham, J., Thomas, S., Kalarikkal, N., Handbook of Carbon Nanotubes. Springer Nature: Cham, Switzerland. 2022.-pp. 1–2112. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91346-5>
19. Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., et al., Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. //Nanoscale Research Letters. -2014.-9, p.393.
20. Babu, A.M., Prabu, N.M., Balasubramanian, K., Investigation on carbon nanotubes over review on other heat transfer nanofluids. //International Journal of Applied Engineering Research, -2015-.10(62),- p.112–117.
21. Amtate,D., Goro. G.,. Carbon nanotubes: syn thesis, properties and technological applications. //International Journal Advanced Research (IJAR).- 2017-5(3), pp.1549-1565 -DOI: <https://dx.doi.org/10.21474/ IJAR01/3664>

22. Narayanan, M.R., Logeshwaran, J., Synthesis and machining characterization of copper-multiwalled carbon nanotubes-graphene hybrid composite using SEM and ANOVA. //Journal of Nano Research. 2017.-50, p.105–115. DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.50.105>
23. Vigneau, F., Monsel, J., Tabanera, J., et al., Ultrastrong coupling between electron tunneling and mechanical motion.// arXiv preprint. -2022- DOI:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.15219>
24. Conle, K., Karttunen, A. J., Bridging the Junction: Electrical Conductivity of Carbon Nanotube. //The Journal of Physical Chemistry C. -2022-126(40), p.17266–17274. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c03904>.
25. Dyachkov, P.N., Bochkov, I.A., The energy-band structure of nanotubes with spiral and rotary symmetry axes. //Inorganic Materials: Applied Research. 2013.4, p.328–335. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075113313040023>
26. Wang, H., Song, Z., Liu, D., Energy band calculation of spiral single-walled carbon nanotubes. Advanced Materials Research. -2012.- 535, p.341–344. DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.341>
27. Belonenko, M.B., Lebedev, N.G., Zhukov, A.V., et al., Electron Spectrum and Tunneling Current of the Toroidal and Helical Graphene Nanoribbon-Quantum Dots Contact. //International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology. Article ID 161849, -2011.- 5 pages. DOI: <https://doi.org/10.5402/2011/161849>.
28. Charlier, J.-C., Blase, X., Roche, S., Electronic and transport properties of nanotubes. //Reviews of Modern Physics. -2007-79(2), p.677–732. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.79.677>
29. Ultrastrong coupling between electron tunneling and mechanical motion / F. Vigneau, J. Monsel, J. Tabanera [et al.] // Phys. Rev. Research. – 2022. – Vol. 4, issue 4. – P. 043168. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.4.043168
30. Chen, A. Nanomaterials based electrochemical sensors for biomedical applications / A. Chen, S. Chatterjee // Chemical Society Reviews. – 2013. – Vol. 42, no. 2. – P. 5425–5438. DOI: 10.1039/C3CS35518G

31. Burke, P.J. Quantitative Theory of Nanowire and Nanotube Antenna Performance / P.J. Burke, Sh. Li, Z. Yu // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2006.– Vol. 5, no. 4. – P. 314–334. DOI:10.1109/TNANO.2006.877430
32. Ватсон Г.Н. Теория Бесселевых функций. - Из-во Иностран. Лит. - М.: - 1949.- 797с.
33. Arkadiy S. Baltentkov and Alfred Z. Msezane Electronic quantum confinement in cylindrical potential well //Eur. Phys. J. D -2016- 70:- 81- 9 p. DOI: 10.1140/epjd/e2016-60728-2
34. Бохан Ю.И Регулярная система резонансно туннельных диодов для анализа сигналов.// Материалы 73-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов. Витебск. - 2021. С.11-12.
35. Бохан Ю.И. Квантовые состояния в нанотрубках //XXVI Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2021. С.116-118.
36. Bokhan Yu.I. Quantum states in a cylindrical quantum hole and a barrier // IX International science conference “Actual Problems of Solid State Physics”. Minsk. 2021.Book of abstract. P.226-227.
37. Бохан Ю.И Рассеяние фотонов при туннелировании через нанотрубку. // Материалы 74-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов. Витебск. - 2022. С.16-18.
38. Бохан Ю.И. Регулярная система резонансно туннельных диодов для анализа сигналов //XXVII Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2022. С.158-160.
39. Бохан Ю.И. Система углеродных нанотрубок для приема терагерцевого излучения // Материалы 75-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов. Витебск. - 2023. С.25-28.

40. Бохан Ю.И. Система углеродных нанотрубок для приёма терагерцевового излучения // X International science conference “Actual Problems of Solid State Physics”. Minsk. 2023. Book of abstract. P.310.

41. Bokhan, Yu.I. / System carbon nanotube for reception terahertz radiations // Actual Problems of Solid State Physics: [Electronic resource]: proc. book X Intern. Scient. Conf., Minsk, 22-26 May, 2023 / Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus; ed.: V.M. Fedosyuk (chairman) [et al.]. – Minsk: Publisher A.Varaksin, 2023. – P. 494–496.

42. Бохан Ю.И Система углеродных нанотрубок для приёма терагерцевового излучения.// X International science conference “Actual Problems of Solid State Physics”. Minsk. 2023. Book of articles. P.494-496.

43. Бохан Ю.И. Проводимость при туннелировании через цилиндрический барьер //XXVIII Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2023. С.187-188.

44. Бохан Ю.И. Туннелирование через цилиндрический барьер // Проблемы инфокоммуникаций. – 2023.- №2(8). – с. 61-65.

45. Бохан Ю.И. Особенности протекания тока в цилиндрическом барьере //Материалы 76-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов, Витебск, 1 марта 2024 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е.Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2024. с.19-21

46. Bokhan Yu.I. Магнитные особенности УНТ как туннельного диода //Материалы Международной научно-практической конференции «Мультиферроики: получение, свойства, применение»: Витебск, 24-27 сентября 2024г./под ред. В.В.Рубаника. – Минск: ИВЦ Минфина, 2024,- с.101-104.

47. Бохан Ю.И. Токовые состояния при туннелировании через углеродную нанотрубку //XXIX Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2024. С.164-166.

48. Bokhan Y.I. Resonance Transitions in the Cylindrical Barrier as Related Carbon Nanotube States // *New Environmentally-Friendly Materials*.- 2025.- Vol. 04.-Issue 01.-p.67-73. <https://doi.org/10.55121/nefm.v4i1.388>

49. Бохан Ю.И. Наноантенна на основе цилиндрического резонансно-туннельного диода // *Наука – образованию, производству, экономике : материалы 77-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов, Витебск, 28 февраля 2025 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е.Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2025. – С.13-15.*

50. Bokhan Y.. Resonance transitions in the cylindrical barrier as related carbon nanotube states // XI International science conference “Actual Problems of Solid State Physics”. Minsk, 19–23 May 2025 / «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus»; ed.: V. M. Fedosyuk (chairman) [et al.]. – Minsk : «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus», Minsk. 2025. Book of articles. P.382-385.

51. Бохан Ю.И. Наноантенна на основе цилиндрического резонансно-туннельного диода // *Веснік ВДУ. – 2025.- №3(128). – с. 11-17.*

52. Бохан Ю.И. Резонансные туннельные состояния углеродной нанотрубки в терагерцовом диапазоне частот // *XXX Международная конференция «Современные средства связи». –30 – 31 октября 2025 года, Минск, Республика Беларусь – 2025. С.163-164*

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень публикаций исполнителями НИР за 2016–2020 годы

Публикации в изданиях из перечня ВАК Республики Беларусь и зарубежных изданиях

1. Бохан Ю.И. Туннелирование через цилиндрический барьер / Бохан Ю.И. // Проблемы инфокоммуникаций. – 2023.- №2(8). – с. 61-65.
2. Бохан Ю.И Система углеродных нанотрубок для приёма терагерцевого излучения. /Бохан Ю.И // X International science conference “Actual Problems of Solid State Physics”. Minsk. 2023. Book of articles. P.494-496.
3. Bokhan Y. Resonance transitions in the cylindrical barrier as related carbon nanotube states // XI International science conference “Actual Problems of Solid State Physics”. Minsk, 19–23 May 2025 / «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus»; ed.: V. M. Fedosyuk (chairman) [et al.]. – Minsk : «Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus», Minsk. 2025. Book of articles. P.382-385.
4. Bokhan Y.I. Resonance Transitions in the Cylindrical Barrier as Related Carbon Nanotube States / Bokhan Y.I. // New Environmentally-Friendly Materials.- 2025.-Vol. 04.-Issue 01.-p.67-73. <https://doi.org/10.55121/nefm.v4i1.388>
5. Бохан Ю.И. Наноантенна на основе цилиндрического резонансно-туннельного диода / Бохан Ю.И. // Веснік ВДУ. – 2025.- №3(128). – с. 11-17.

Публикации в сборниках материалов международных научно-практических конференций

1. Бохан Ю.И Регулярная система резонансно туннельных диодов для анализа сигналов. // Материалы 73-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов. Витебск. - 2021. С.11-12.
2. Бохан Ю.И. Квантовые состояния в нанотрубках //XXVI Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2021. С.116-118.

3. Bokhan Yu.I. Quantum states in a cylindrical quantum hole and a barrier // IX International science conference “Actual Problems of Solid State Physics”. Minsk. 2021. Book of abstract. P.226-227.
4. Бохан Ю.И. Рассеяние фотонов при туннелировании через нанотрубку. // Материалы 74-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов. Витебск. - 2022. С.16-18.
5. Бохан Ю.И. Регулярная система резонансно туннельных диодов для анализа сигналов //XXVII Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2022. С.158-160.
6. Бохан Ю.И. Система углеродных нанотрубок для приема терагерцевого излучения // Материалы 75-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов. Витебск. - 2023. С.25-28.
7. Бохан Ю.И. Система углеродных нанотрубок для приёма терагерцевого излучения // X International science conference “Actual Problems of Solid State Physics”. Minsk. 2023. Book of abstract. P.310.
8. Bokhan, Yu.I. / System carbon nanotube for reception terahertz radiations // Actual Problems of Solid State Physics: [Electronic resource]: proc. book X Intern. Scient. Conf., Minsk, 22-26 May, 2023 / Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus; ed.: V.M. Fedosyuk (chairman) [et al.]. – Minsk: Publisher A.Varaksin, 2023. – P. 494–496.
9. Бохан Ю.И. Проводимость при туннелировании через цилиндрический барьер //XXVIII Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2023. С.187-188.
10. Бохан Ю.И. Особенности протекания тока в цилиндрическом барьере //Материалы 76-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов, Витебск, 1 марта 2024 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е.Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2024. с.19-21

11. Bokhan Yu.I. Магнитные особенности УНТ как туннельного диода //Материалы Международной научно-практической конференции «Мультиферроики: получение, свойства, применение»: Витебск, 24-27 сентября 2024г./под ред. В.В.Рубаника. – Минск: ИВЦ Минфина, 2024,- с.101-104.

12. Бохан Ю.И. Токовые состояния при туннелировании через углеродную нанотрубку //XXIX Международная конференция «Современные средства связи». – Минск. – 2024. С.164-166.

13. Бохан Ю.И. Наноантенна на основе цилиндрического резонансно-туннельного диода //Наука – образованию, производству, экономике : материалы 77-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов, Витебск, 28 февраля 2025 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е.Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2025. – С.13-15.

14. Бохан Ю.И. Резонансные туннельные состояния углеродной нанотрубки в терагерцовом диапазоне частот //XXX Международная конференция «Современные средства связи». –30 – 31 октября 2025 года ,Минск, Республика Беларусь – 2025. С.163-164