

Заключение диссертационного совета МГУ.013.3
по диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Решение диссертационного совета от «04» апреля 2024 г. № 2

О присуждении Клещу Виктору Ивановичу, гражданину Российской Федерации,
ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Эмиссия электронов из углеродных наноструктур» по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния принята к защите диссертационным советом МГУ.013.3 «21» декабря 2023 г., протокол № 21.

Соискатель Клещ Виктор Иванович, 1984 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Автоэлектронная эмиссия из наноструктурированных материалов» защитил в 2010 году в диссертационном совете Д 002.063.02 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Соискатель работает старшим научным сотрудником на кафедре физики полимеров и кристаллов физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Диссертация выполнена на кафедре физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научный консультант – Образцов Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Шешин Евгений Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета),

Ельцов Константин Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий отделом технологий и измерений атомного масштаба Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,

Попов Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории функциональных наноматериалов Технологического института сверхтвердых и новых углеродных материалов

дали положительные отзывы на диссертацию.

Соискатель имеет 85 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 42 работы, из них 2 патента, приравненных к публикациям, в которых излагаются основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени доктора наук, и 39 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. Все статьи индексируются в базах данных Web of Science, Scopus и RSCI.

Перечень основных публикаций:

Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Kleshch V.I. Edge field emission of large-area single layer graphene / Kleshch V.I., Bandurin D.A., Orekhov A.S., Purcell S.T., Obratsov A.N. // Applied Surface Science. — 2015. —

Vol. 357, Part B. — P. 1967–1974. JIF=6,7 (WoS), 1,21 авт.л., вклад автора – 0,8.

2. Kleshch V.I. A nano-graphite cold cathode for an energy-efficient cathodoluminescent light source / Obraztsov A.N., Kleshch V.I., Smolnikova E.A. // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. — 2013. — Vol. 4. — P. 493–500. JIF=3,1 (WoS), 0,84 авт.л., вклад автора – 0,5.

3. Kleshch V.I. A comparative study of field emission from semiconducting and metallic single-walled carbon nanotube planar emitters / Kleshch V.I., Eremina V.A., Serbun P., Orekhov A.S., Lutzenkirchen-Hecht D., Obraztsova E.D., Obraztsov A.N. // *Physica Status Solidi (B)*. — 2018. — Vol. 255, no. 1. — P. 1700268(1-50). JIF=0,982 (WoS), 0,58 авт.л., вклад автора – 0,8.

4. Kleshch V.I. Breakdown of plane-wave-based theories of field emission from a subnanometer-radius tip / Kleshch V.I., Zestanakis P., Xanthakis J. // *Applied Surface Science*. — 2023. — Vol. 623. — P. 156990. JIF=6,7 (WoS), 0,9 авт.л., вклад автора – 0,5.

5. Kleshch V.I. Field emission of electrons by carbon nanotube twist-yarns / Zakhidov A.A., Nanjundaswamy R., Obraztsov A.N., Zhang M., Fang S., Kleshch V.I., Baughman R.H., Zakhidov A.A. // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. — 2007. — Vol. 88, no. 4. — P. 593–600. JIF=2,7 (WoS), 1,05 авт.л., вклад автора – 0,3.

6. Kleshch V.I. Modeling of field emission from nano-carbons / Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Obraztsova E.D. // *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*. — 2008. — Vol. 16, no.5-6 — P. 384–388. JIF=2,3 (WoS), 0,32 авт.л., вклад автора – 0,9.

7. Kleshch V.I. Field emission from single-wall nanotubes obtained from carbon and boron nitride mixtures / Kleshch V.I., Obraztsova E.D., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Obraztsov A.N. // *Physica Status Solidi (B)*. — 2008. — Vol. 245, no. 10. — P. 1990–1993. JIF=0,982 (WoS), 0,47 авт.л., вклад автора – 0,8.

8. Kleshch V.I. Cold and Laser Stimulated Electron Emission from Nanocarbons / Obraztsov A.N., Kleshch V.I. // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. — 2009. — Vol. 4, no. 2. — P. 207–219. JIF=0,6 (WoS), 1,67 авт.л., вклад автора – 0,7.

9. Kleshch V.I. A novel method for metal oxide nanowire synthesis / Rackauskas S., Nasibulin A.G., Jiang H., Tian Y., Kleshch V.I., Sainio J., Obraztsova E.D., Bokova S.N., Obraztsov A.N., Kauppinen E.I. // *Nanotechnology*. — 2009. — Vol. 20, no. 16. — P. 165603(1-8). JIF=3,5 (WoS), 1,12 авт.л., вклад автора – 0,3.

10. Kleshch V.I. A comparative study of field emission from NanoBuds, nanographite and pure or N-doped single-wall carbon nanotubes / Kleshch V.I., Susi T., Nasibulin A.G., Obraztsova E.D., Obraztsov A.N., Kauppinen E.I. // *Physica Status Solidi (B)*. — 2010. — Vol. 247, no. 11-12. — P. 3051–3054. JIF=0,982 (WoS), 0,48 авт.л., вклад автора – 0,7.

11. Kleshch V.I. Surface structure and field emission properties of few-layer graphene flakes / Kleshch V.I., Vasilyeva E.A., Lyashenko S.A., Obronov I.V., Tyurnina A.V., Obraztsov A.N. // *Physica Status Solidi (B)*. — 2011. — Vol. 248, no. 11. — P. 2623–2626. JIF=0,982 (WoS), 0,49 авт.л., вклад автора – 0,7.

12. Kleshch V.I. Thermionic field electron emission from graphite-based nanomaterials / Lyashenko S.A., Kleshch V.I., Obraztsov A.N. // *Physica Status Solidi (B)*. — 2011. — Vol. 248, no. 11. — P. 2712–2715. JIF=0,982 (WoS), 0,44 авт.л., вклад автора – 0,4.

13. Kleshch V.I. Field Emission Properties of Metal Oxide Nanowires / Kleshch V.I., Rackauskas S., Nasibulin A.G., Kauppinen E.I., Obraztsova E.D., Obraztsov A.N. // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. — 2012. — Vol. 7, no. 1. — P. 35–40. JIF=0,6 (WoS), 0,72 авт.л., вклад автора – 0,8.

14. Клещ В.И. Влияние уровня вакуума на автоэлектронную эмиссию из нанографитных пленок / Васильева Е.А., Клещ В.И., Образцов А.Н. // *Журнал технической физики*. — 2012. — Т. 82, № 7. — P. 107–111.

Kleshch V.I. Effect of vacuum level on field emission from nanographite films / Vasil'eva E.A., Kleshch V.I., Obraztsov A.N. // *Technical Physics*. — 2012. — Vol. 57, no. 7. — P. 1003–1007.

JIF=0,7 (WoS), 0,57 авт.л., вклад автора – 0,7.

15. Kleshch V.I. Effect of Residual Gas Pressure on Field Electron Emission from Nanographite Films / Vasilyeva E.A., Kleshch V.I., A. N. Obrazsov // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. — 2012. — Vol. 7, no. 1. — P. 41–45. JIF=0,6 (WoS), 0,56 авт.л., вклад автора – 0,7.

16. Kleshch V.I. Scanning Anode Field Emission Microscopy of Nanocarbons / Bandurin D.A., Kleshch V.I., Smolnikova E.A., Obronov I.V., Nasibulin A.G., Kauppinen E.I., Obraztsov A.N. // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. — 2013. — Vol. 8, no. 1. — P. 114–118. JIF=0,6 (WoS), 0,61 авт.л., вклад автора – 0,5.

17. Kleshch V.I. Field Emission Properties of Single-Walled Carbon Nanotube Films / Obronov I.V., Kleshch V.I., Smolnikova E.A., Bandurin D.A., Obraztsov A.N. // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. — 2013. — Vol. 8, no. 1. — P. 71–74. JIF=0,6 (WoS), 0,43 авт.л., вклад автора – 0,6.

18. Kleshch V.I. Field emission spectroscopy evidence for dual-barrier electron tunnelling in nanographite / Bandurin D.A., Mingels S., Kleshch V.I., Lutzenkirchen-Hecht D., Muller G., Obraztsov A.N. // *Applied Physics Letters*. — 2015. — Vol. 106. — P. 233112(1-5). JIF=4,0 (WoS), 0,7 авт.л., вклад автора – 0,3.

19. Kleshch V.I. CVD nanographite films covered by ALD metal oxides: structural and field emission properties / Ismagilov R.R., Tuyakova F.T., Kleshch V.I., Obraztsova E.A., Obraztsov A.N. // *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*. — 2015. — Vol. 12, no. 7. — P. 1022–1027. SJR=0,21 (Scopus), 0,76 авт.л., вклад автора – 0,5.

20. Kleshch V.I. Nano-graphite cold cathodes for electric solar wind sail / Kleshch V.I., Smolnikova E.A., Orekhov A.S., Kalvas T., Tarvainen O., Kauppinen J., Nuottajarvi A., Koivisto H., Janhunen P., Obraztsov A.N. // *Carbon*. — 2015. — Vol. 81. — P. 132–136. JIF=10,9 (WoS), 0,62 авт.л., вклад автора – 0,6.

21. Kleshch V.I. Atomic layer deposition of TiO₂ and Al₂O₃ on nanographite films: structure and field emission properties / Kleshch V.I., Ismagilov R.R., Smolnikova E.A., Obraztsova E.A., Tuyakova F., Obraztsov A.N. // *Journal of Nanophotonics*. — 2016. — Vol. 10. — P. 012509(1-12). JIF=1,5 (WoS), 1,01 авт.л., вклад автора – 0,5.

22. Kleshch V.I. Field emission from single-walled carbon nanotubes modified by annealing and CuCl doping / Kleshch V.I., Tonkikh A.A., Malykhin S.A., Redekop E.V., Orekhov A.S., Chuvilin A.L., Obraztsova E.D., Obraztsov A.N. // *Applied Physics Letters*. — 2016. — Vol. 109. — P. 143112(1-4). JIF=4,0 (WoS), 0,53 авт.л., вклад автора – 0,5.

23. Kleshch V.I. Field Electron Emission From CVD Nanocarbon Films Containing Scrolled Graphene Structures / Kleshch V.I., Bandurin D.A., Serbun P., Ismagilov R.R., Lutzenkirchen-Hecht D., Muller G., Obraztsov A.N. // *Physica Status Solidi (B)*. — 2018. — Vol. 255, no. 1. — P. 1700270(1-4). JIF=0,982 (WoS), 0,49 авт.л., вклад автора – 0,6.

24. Kleshch V.I. Nano-graphite field-emission cathode for space electric propulsion systems / Kleshch V.I., Ismagilov R.R., Mukhin V. V., Orekhov A.S., Filatyev A.S., Obraztsov A.N. // *Nanotechnology*. — 2022. — Vol. 33, no. 41. — P. 415201. JIF=3,5 (WoS), 1,05 авт.л., вклад автора – 0,8.

25. Kleshch V.I. Single crystal diamond needle as point electron source / Kleshch V.I., Purcell S.T., Obraztsov A.N. // *Scientific Reports*. — 2016. — Vol. 6. — P. 35260(1-7). JIF=4,6 (WoS), 0,84 авт.л., вклад автора – 0,9.

26. Kleshch V.I. Photoinduced effects in field electron emission from diamond needles / Porshyn V., Kleshch V.I., Obraztsova E.A., Chuvilin A.L., Lutzenkirchen-Hecht D., Obraztsov A.N. // *Applied Physics Letters*. — 2017. — Vol. 110. — P. 182101(1-5). JIF=4,0 (WoS), 0,55 авт.л., вклад автора – 0,5.

27. Kleshch V.I. Effect of laser illumination on the electrical conductivity of single-crystal diamond needles / Arnoldi L., Borz M., Blum I., Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Vella A. // *Journal of*

Applied Physics. — 2019. — Vol. 126, no. 4. — P. 045710(1-8). JIF=3,2 (WoS), 0,95 авт.л., вклад автора – 0,3.

28. Kleshch V.I. Photoassisted and multiphoton emission from single-crystal diamond needles / Borz M., Mammez M.H., Blum I., Houard J., Costa G., Delaroche F., Idlahcen S., Haboucha A., Hideur A., Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Vella A. // *Nanoscale*. — 2019. — Vol. 11. — P. 6852–6858. JIF=6,7 (WoS), 0,9 авт.л., вклад автора – 0,3.

29. Kleshch V.I. A Comparative Study of Field Emission From Pristine, Ion-Treated and Tungsten Nanoparticle- Decorated p-Type Silicon Tips / Kleshch V.I., Serbun P., Lutzenkirchen-Hecht D., Orekhov A.S., Ivanov V.E., Prommesberger C., Langer C., Schreiner R., Obraztsov A.N. // *Physica Status Solidi (B)*. — 2019. — Vol. 256, no. 9. — P. 1800646(1-6). JIF=0,982 (WoS), 0,71 авт.л., вклад автора – 0,6.

30. Kleshch V.I. Field emission microscopy pattern of a single-crystal diamond needle under ultrafast laser illumination / Mammez M.H., Borz M., Blum I., Moldovan S., Arnoldi L., Idlahcen S., Hideur A., Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Vella A. // *New Journal of Physics*. — 2019. — Vol. 21. — P. 113060(1-10). JIF=3,3 (WoS), 1,05 авт.л., вклад автора – 0,3.

31. Kleshch V.I. Conduction mechanisms and voltage drop during field electron emission from diamond needles / Torresin O., Borz M., Mauchain J., Blum I., Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Vella A., Chalopin B. // *Ultramicroscopy*. — 2019. — Vol. 202. — P. 51–56. JIF=2,2 (WoS), 0,72 авт.л., вклад автора – 0,3.

32. Kleshch V.I. Surface graphitization of diamond nanotips induced by field-emission current / Kleshch V.I., Porshyn V., Serbun P., Orekhov A.S., Ismagilov R.R., Lützenkirchen-Hecht D., Obraztsov A.N. // *Applied Physics Letters*. — 2022. — Vol. 120, no. 14. — P. 141601(1-5). JIF=4,0 (WoS), 0,61 авт.л., вклад автора – 0,8.

33. Kleshch V.I. Carbon single-electron point source controlled by Coulomb blockade / Kleshch V.I., Porshyn V., Orekhov Ant.S., Orekhov And.S., Lützenkirchen-Hecht D., Obraztsov A.N. // *Carbon*. — 2021. — Vol. 171. — P. 154–160. JIF=10,9 (WoS), 1,06 авт.л., вклад автора – 0,8.

34. Kleshch V.I. Coulomb blockade and quantum confinement in field electron emission from heterostructured nanotips / Kleshch V.I., Porshyn V., Lützenkirchen-Hecht D., Obraztsov A.N. // *Physical Review B*. — 2020. — Vol. 102. — P. 235437(1-7). JIF= 3,7 (WoS), 0,79 авт.л., вклад автора – 0,9.

35. Kleshch V.I. Coulomb blockade in field electron emission from carbon nanotubes / Kleshch V.I., Porshyn V., Serbun P., Orekhov A.S., Ismagilov R.R., Malykhin S.A., Eremina V.A., Obraztsov P.A., Obraztsova E.D., Lutzenkirchen- Hecht D. // *Applied Physics Letters*. — 2021. — Vol. 118. — P. 053101(1-6). JIF=4,0 (WoS), 0,54 авт.л., вклад автора – 0,8.

36. Клещ В.И. Автоколебания в электромеханической системе с полевым эмиттером / Клещ В.И., Образцов А.Н., Образцова Е.Д. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2009. — Т. 90, № 6. — С. 510–514.

Kleshch V.I. Self-oscillations in an electromechanical system with a field emitter / Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Obraztsova E.D. // *JETP Letters*. — 2009. — Vol. 90, no. 6. — P. 464–468. JIF=1,3 (WoS), 0,57 авт.л., вклад автора – 0,9.

37. Kleshch V.I. Self-oscillations of carbon nanotube twist-yarn during field emission / Kleshch V.I., Zakhidov A.A., Obraztsov A.N., Obraztsova E.D., Baughman R.H. // *Physica Status Solidi (B)*. — 2009. — Vol. 246. — P. 2658–2661. JIF=0,982 (WoS), 0,49 авт.л., вклад автора – 0,7.

38. Kleshch V.I. Electromechanical self- oscillations of carbon nanotube field emitter / Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Obraztsova E.D. // *Carbon*. — 2010. — Vol. 48, no. 13. — P. 3895–3900. JIF=10,9 (WoS), 0,46 авт.л., вклад автора – 0,9.

39. Kleshch V.I. Electromechanical resonances and field-emission- induced self-oscillations of single crystal diamond needles / Kleshch V.I., Ismagilov R.R., Mukhin V.V., Orekhov A.S., Poncharal P., Purcell S.T., Obraztsov A.N. // *Applied Physics Letters*. — 2023. — Vol. 122, no. 14.

Патенты:

1. Образцов А.Н., Клещ В.И., Диодная катодолюминесцентная лампа. Патент на изобретение № 2382436 Российская Федерация, заявл. 2008141395/09, 21.10.2008; опубл. 20.02.2010 бюлл. № 5. 0,8 авт.л., вклад автора – 0,5.

2. Бочаров А.Ю., Клещ В.И., Образцов А.Н., Образцов П.А., Электронная пушка с автоэмиссионным катодом. Патент на изобретение № 2718693 Российская Федерация, заявл. 2019113748, 07.05.2019; опубл. 13.04.2020 бюлл. № 11. 1,76 авт.л., вклад автора – 0,6.

На диссертацию и автореферат поступили 9 дополнительных отзывов, все положительные.

Выбор официальных оппонентов обосновывался их профессиональной квалификацией и наличием публикаций в области физики конденсированного состояния, физической электроники и материаловедения.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований получены научные результаты и решены важные научные проблемы, имеющие большое значение для развития физики поверхности, физики углеродных наноструктур и эмиссионной электроники.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

– В процессе автоэлектронной эмиссии в системе, содержащей наноразмерный эмиттер, отделенный от тела катода туннельным переходом, при определенных условиях возникают эффекты, обусловленные явлением кулоновской блокады, которые проявляются в виде периодических изменений в зависимости энергетического спектра эмитированных электронов от напряжения и соответствующей ей волнообразной форме вольтамперной характеристики. Разработанная модель автоэлектронной эмиссии в режиме кулоновской блокады и проведенное на ее основе численное моделирование объясняют особенности в экспериментально наблюдаемых характеристиках катодов на основе алмазных микроигл и углеродных нанотрубок, полученных в результате структурной модификации их поверхности, происходящей при эмиссии электронов.

– В системе, представляющей собой вакуумный диод с холодным катодом, обладающим свойствами механической гибкости и упругости, возможно возбуждение электромеханических автоколебаний. Разработанная модель процессов, происходящих в такой системе, и проведенное численное моделирование позволяют определить условия, необходимые для возникновения автоколебательного режима. Результаты расчетов, выполненные в соответствии с разработанной моделью, находятся в согласии с характеристиками автоколебаний, зарегистрированных экспериментально для катодов на основе углеродных нанотрубок и алмазных микроигл.

– Увеличение эмиссионного тока из алмазного иглоподобного холодного катода, возникающее под действием лазерного излучения, в зависимости от условий освещения и приложенного напряжения происходит вследствие процессов фотостимулированной автоэлектронной эмиссии или многофотонной фотоэлектронной эмиссии, а также вследствие увеличения электропроводности алмазной иглы за счет фотопроводимости и нагрева,

происходящих в результате процессов однофотонного и многофотонного поглощения в объеме иглы.

– Величина автоэмиссионного тока, определяемая прямыми экспериментальными измерениями, для углеродных структур, имеющих радиус кривизны окончания менее одного нанометра, на несколько порядков ниже расчетных значений, получаемых с помощью теории Фаулера-Нордгейма. Согласие с экспериментом по порядку величины достигается в рамках теории, учитывающей квантовый размерный эффект в эмиттере, который приводит к значительному снижению плотности потока электронов, падающих изнутри объема эмиттера на потенциальный барьер на его поверхности.

На заседании 04.04.2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Клещу Виктору Ивановичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 5 докторов наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 14, «против» – 0, недействительных бюллетеней – нет.

Зам. председателя диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор,

Уваров А.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент

Малышкина И.А.

04 апреля 2024 г.