

УДК 621.38

НОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И СПИНТРОНИКИ

С.Л. ПРИЩЕПА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220027, Беларусь*

Поступила в редакцию 24 января 2014

Кратко изложены основные результаты разработки и исследования новых элементов сверхпроводниковой электроники на основе пористых подложек и гетероструктур типа сверхпроводник–ферромагнетик. Приведены принципиальные аспекты оригинальных достижений в области сверхпроводниковой наноэлектроники, трактовки физики квантовых процессов в наноразмерных самоформирующихся сверхпроводниковых нанопроводах, существования сверхпроводимости и магнетизма.

Ключевые слова: сверхпроводимость, ферромагнетизм, пористая подложка, коэффициент квантовомеханической прозрачности, сетка нанопроводов.

Введение

Разработка и исследование элементов сверхпроводниковой электроники и наноэлектроники начаты в МРТИ-БГУИР в начале 1980-х гг. Работы проводились в НИЧ БГУИР в рамках Союзных программ и госбюджетных договоров. К середине 80-х гг. стало понятно, что повышение эксплуатационных характеристик элементов сверхпроводниковой электроники (плотности критического тока, критического магнитного поля, критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние) требует новых оригинальных подходов. К этому времени в МРТИ-БГУИР была сформирована научная школа академика В.А. Лабунова в области микроэлектроники, в рамках которой проводились активные исследования возможности применения подложек из пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) и пористого кремния (ПК) в различных отраслях электроники и техники. В лаборатории НИЧ, возглавляемой Л.М. Лыньковым, было впервые предложено применить разработанную в МРТИ-БГУИР технологию формирования ПАОА и ПК для целей сверхпроводниковой электроники. Кроме того, проводились исследования формирования субмикронных размеров активных элементов сверхпроводниковой электроники для улучшения их эксплуатационных свойств. Со 2-ой половины 80-х гг., после открытия высокотемпературной сверхпроводимости, в БГУИР начались активные работы по исследованию свойств высокотемпературных сверхпроводников. В результате, в середине 1990-х гг. были защищены 2 докторские диссертации в области сверхпроводниковой электроники: Лыньковым Л.М. (1994 г.) и Прищепой С.Л. (1996 г.). Дальнейшие исследования в области сверхпроводниковой электроники проводились в рамках проектов НАТО, INTAS, Государственных научных программ, договоров Фонда фундаментальных исследований РБ, Договоров о сотрудничестве между БГУИР и университетами и научными организациями Западной Европы, России, Молдовы, Украины. Как результат, в 1995 г. по данному направлению была защищена кандидатская диссертация С.В. Ждановичем, в 2000 г. – А.Ю. Петровым, в 2012 г. под руководством Прищепы С.Л. была защищена кандидатская диссертация в университете г. Салерно (Италия) гражданкой Италии М. Trezza.

Пористые подложки для элементов сверхпроводниковой электроники

Ключевым моментом, позволяющим рассматривать пористые подложки на основе ПАОА и ПК в качестве перспективных элементов для сверхпроводниковой электроники, является то, что длина когерентности в жестких сверхпроводниках второго рода составляет в рабочем диапазоне температур величину порядка 10-20 нм. Если попытаться промодулировать толщину сверхпроводниковой пленки с таким же периодом, то возникает ситуация, при которой, при определенных магнитных полях, решетка вихрей Абрикосова будет иметь тот же период, что и решетка пор. При этом, если период решетки пор можно менять технологическими параметрами, то период решетки вихрей Абрикосова зависит от внешнего магнитного поля. Оба периода совпадают в так называемых полях согласования. Значения полей согласования составляют порядка 0,1–2 Т. Однако для получения эффекта согласования необходимо было вначале провести тщательные исследования упорядоченности расположения пор в пористых подложках, разработать технологические режимы, позволяющие формировать треугольную решетку пор, разработать методику оценки и расчета степени упорядоченности расположения пор в различных подложках. После чего необходимо было разработать технологию получения тонких пленок сверхпроводников (толщиной не более 10 нм), чтобы рельеф пленки повторял морфологию подложки. Первая задача была успешно решена в работах [1-4], вторая – в работах [5-8]. В результате впервые было продемонстрировано увеличение критической температуры наноперфорированной пленки ниобия, осажденной на подложку из ПАОА с упорядоченной решеткой пор в магнитных полях согласования [9].

Использование подложек из ПК для целей сверхпроводниковой электроники позволило получить рекордные поля согласования, превышающие 1 Т [10]. Кроме того, использование подложек из пористого кремния впервые позволило наблюдать эффект согласования в дробных магнитных полях (рис. 1, а: синие точки соответствуют порам, розовые – вихрям Абрикосова). С ростом температуры диаметр вихрей растет. Причем эффект проявлялся не только в особенностях на зависимости критического магнитного поля от температуры, но и на кривых зависимости сопротивления от магнитного поля. В результате оказалось возможным построить новую фазовую диаграмму вихревых состояний в наноперфорированной пленке сверхпроводника с учетом дробного эффекта согласования (рис. 1, б: сплошные линии соответствуют целому и дробным полям согласования (слева направо) для межпорового расстояния 42 нм; штриховые линии означают вариации полей согласования при изменении межпорового расстояния на 10 %; точки – экспериментальные данные) [11].

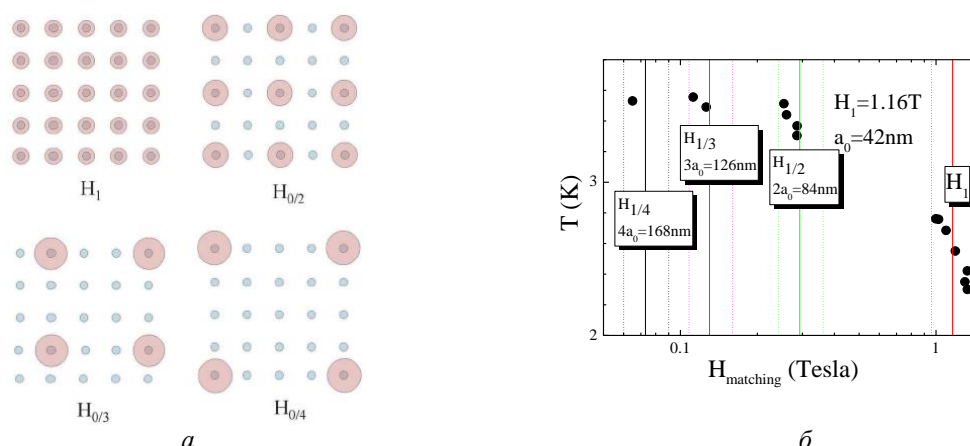


Рис. 1. Дробный эффект согласования в наноперфорированной пленке ниобия на подложке из ПК:
 а – конфигурация вихревой решетки в поле согласования и в дробных полях согласования;
 б – зависимость температуры, при которой наблюдается особенность на кривых зависимости сопротивления от магнитного поля, от поля согласования

С целью дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик пленок сверхпроводников с модулированным в пространстве параметром порядка было предложено формировать не наноперфорированные пленки, а осаждать пленку сверхпроводника на пористую подложку с заполненными ферромагнетиком порами. В этом случае модуляция параметра порядка осуществляется вследствие локального магнитного поля ферромагнитных

наностолбиков, инкорпорированных в пористую матрицу. С этой целью использовались подложки их ПАОА с осажденными электрохимическим методом никелевыми наностолбиками в порах [12]. В результате эффекты согласования наблюдались на пленках сверхпроводника до полей согласования, равных 3-м полям первого согласования [13].

Наноперфорированные пленки сверхпроводников могут найти еще одно интересное применение в современной электронике. Речь идет о наносетках из нанопроводов. В зависимости от соотношения толщины пленки сверхпроводника и диаметра пор можно получать различную морфологию поверхности пленок – от наноперфорированной до сплошной. На рис. 2 показаны примеры различной морфологии пленки ниобия на пористой подложке из ПК (верхние и нижние панели различаются увеличением; белая метка соответствует 100 нм) [14].

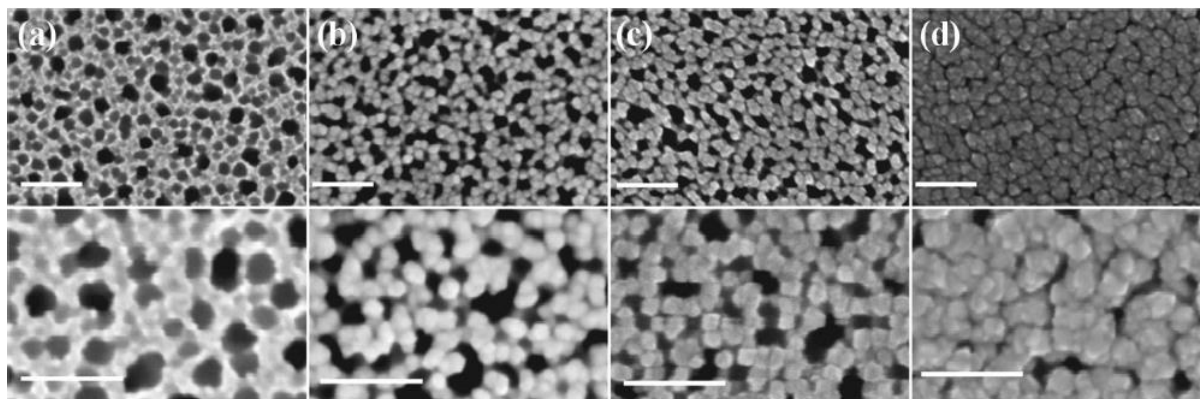


Рис. 2. Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности ПК (а) и сформированной наносетки ниобиевых нанопроводов при различной толщине пленки ниобия: 3,5 нм (b), 7,0 нм (c), 15,0 нм (d)

В результате исследования транспортных свойств наноперфорированных образцов в нулевом магнитном поле было установлено присутствие как термических, так и квантовых флуктуаций параметра порядка. Причем оба типа флуктуаций проявляются в макроскопическом масштабе, что открывает принципиально новые возможности в конструировании новых приборов метрологии, в частности, квантового стандарта тока. Для усиления роли квантовых флуктуаций было предложено искусственно уменьшить количество нанопроводов в образце. С этой целью методом электронной литографии были сформированы сужения шириной порядка 1 микрона, что снижает количество нанопроводов в образце до 20–30. В результате была сформирована топология наноперфорированной пленки ниобия, показанная на рис. 3. Как результат, роль тепловых флуктуаций была сведена к минимуму и существенно увеличена роль квантовых эффектов, определяющих транспорт тока в таких образцах. В частности, было получено доказательство квантового туннелирования центров проскальзывания фазы сверхпроводящего параметра порядка [15].

Гетероструктуры типа сверхпроводник – нормальный металл и сверхпроводник – ферромагнетик

Для успешного функционирования современных интегральных микросхем на основе сверхпроводников необходимо иметь полную информацию о том, как растет пленка сверхпроводника не только на подложке, но и на промежуточных слоях как нормального (несверхпроводящего), так и ферромагнитного металлов. При этом важный вопрос – как осуществляется взаимная диффузия сверхпроводящих и несверхпроводящих электронов в соседние слои. Этому актуальному вопросу в БГУИР был посвящен ряд исследований. В частности, оказалось, что практически отсутствуют современные экспериментальные и теоретические исследования квантовомеханического коэффициента прозрачности границы сверхпроводник – несверхпроводник. Работы в этом направлении в БГУИР были начаты в 1-ой половине 2000-х гг.

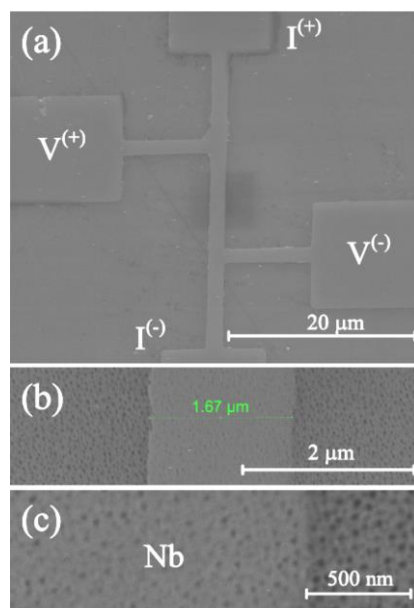


Рис. 3. Изображение топологии образца, полученное с помощью полевого сканирующего электронного микроскопа (a), средняя часть пленки ниобия (b), наноперфорированная пленка ниобия при большом увеличении (c)

С этой целью были разработаны экспериментальные методы формирования гетероструктур высокого качества на основе сверхпроводников и изучено влияние технологических методов формирования тонких пленок и гетероструктур на прозрачность интерфейса [16-27]. В процессе выполнения этих исследований была установлена необходимость развития теоретических методов оценки параметров интерфейса, поскольку существующие на тот момент теории не позволяли надежно установить микроскопические параметры гетероструктур, адекватно описывающие их экспериментальные характеристики. Подобные работы были начаты в БГУИР практически одновременно с экспериментальными исследованиями. Основные результаты этих исследований отражены в работах [28–53]. Основные научные результаты связаны с установлением характера влияния неоднородностей тонких пленок ферромагнетика и вариаций обменной энергии в них на сверхпроводящие параметры гетероструктур типа сверхпроводник – ферромагнетик, разработки физических моделей, адекватно описывающих фазовый переход в сверхпроводящее состояние таких гетероструктур в области толщин ферромагнетика, соответствующих кроссоверу между 0 и π -связью между соседними сверхпроводящими слоями, разработки концепции многомодового фазового перехода в многослойных гетероструктурах на основе сверхпроводника и ферромагнетика.

NEW ELEMENTS OF SUPERCONDUCTING ELECTRONICS AND SPINTRONICS

S.L. PRISCHEPA

Abstract

The basic results of development and research of new elements of superconducting electronics on the base of porous templates and superconductor – ferromagnet heterostructures are presented shortly. The fundamental aspects of original achievements in the region of the superconducting nanoelectronics, quantum physics interpretation processes in nanoscale self-assembled superconducting nanowires, the coexistence of superconductivity and magnetism are reviewed.

Список литературы

1. Дедю В.И., Лыков А.Н., Лыньков Л.М., Прищепя С.Л., Семеняков Л.В., Самохвал В.А., Костюченко С.А. // Препринт ФИАН СССР. 1988. № 27.
2. Лыньков Л.М., Прищепя С.Л., Семеняков Л.В. // Докл. АН БССР. 1990. Т. 34. № 3. С. 238–242.
3. Лынькоў Л.М., Прышчэпа С.Л., Семенякоў Л.В. // Весці АН БССР. Сер. Фіз.-мат. навук 1992. № 1. С. 87–91.
4. Лыньков Л.М., Прищепя С.Л., Самохвал В.А. // Журнал технической физики. 1992. Т. 62, № 4. С. 156–161.
5. Дедю В.И., Лыков А.Н., Прищепя С.Л. // Препринт ФИАН СССР. 1989. № 73.
6. Дедю В.И., Лыков А.Н., Прищепя С.Л. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1990. Т. 97, № 3. С. 872–879.
7. Голямина Е.М., Дедю В.И., Лыков А.Н., Прищепя С.Л., Трояновский А.М. //Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1991. Т. 4. № 7. С. 1430–1434.
8. Golyamina E.M., Dedyu V.I., Lykov A.N., Prischepa S.L., Troyanovskij A.M. // Physica C. 1991. Vol. 185–189. Part III. P. 2031-2032.
9. Prischepa S.L., Lynkov L.M., Lykov A.N., Dedyu V.I. // Cryogenics. 1994. Vol. 34. ICEC Supplement. P. 851–853.
10. Trezza M., Prischepa S.L., Cirillo C., Fittipaldi R. // J. of Applied Physics. 2008. Vol. 104. № 8. P. 083917(1-7).
11. Trezza M., Cirillo C., Prischepa S.L., Attanasio C. // European Physical Letters. 2009. Vol. 88. № 5. P. 57006(1-6).
12. Воробьева А.И., Прищепя С.Л., Уткина Е.А., Комар О.М. // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 2.
13. Trezza M., Cirillo C., Vorobjeva A.I., Outkina E.A., Prischepa S.L., Attanasio C. // Superconductor Science and Technology. 2013. Vol. 26. № 3. P. 035001(1-5).
14. Cirillo C., Trezza M., Chiarella F., Vecchione A., Bondarenko V.P., Prischepa S.L., Attanasio C. // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 101. № 17. P. 172601(1-5).
15. Trezza M., Cirillo C., Sabatino P., Carapella G., Prischepa S.L., Attanasio C. // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 103. № 25. P. 252601(1-4).
16. Attanasio C., Maritato L., Prischepa S.L., Salvato M., Engel B.N., Falco C.M. // J. of Applied Physics. 1995. Vol. 77. № 5. P. 2081–2086.
17. Attanasio C., Coccoresse C., Maritato L., Prischepa S.L., Salvato M., Engel B.N., Falco C.M. // Physical Review B. 1996. Vol. 53. № 3. P. 1087–1090.
18. Mercaldo L.V., Attanasio C., Coccoresse C., Maritato L., Prischepa S.L., Salvato M. // Physical Review B. 1996. Vol. 53. № 21 P. 14040–14042.
19. Attanasio C., Coccoresse C., Mercaldo L.V., Salvato M., Maritato L., Lykov A.N., Prischepa S.L., Falco C.M. // Physical Review B. 1998. Vol. 53. № 10. P. 6056–6060.
20. Coccoresse C., Attanasio C., Mercaldo L.V., Salvato M., Maritato L., Slaughter J.M., Falco C.M., Prischepa S.L., Ivlev B.I. // Physical Review B. 1998. Vol. 57. № 13. P. 7922–7929.
21. Attanasio C., Coccoresse C., Mercaldo L.V., Prischepa S.L., Salvato M., Maritato L. // Physical Review B. 1998. Vol. 57. № 22. P. 14411–14415.
22. Attanasio C., Coccoresse C., Mercaldo L.V., Salvato M., Maritato L., Prischepa S.L., Giannini C., Tapfer L. // Physica C. 1999. Vol. 312. № 1–2. P. 112–120.
23. Attanasio C., Di Luccio T., Mercaldo L.V., Prischepa S.L., Russo R., Salvato M., Maritato L. // Philosophical Magazine B. 2000. Vol. 80. № 5. P. 875–882.
24. Cirillo C., Attanasio C., Maritato L., Mercaldo L.V., Prischepa S.L., Salvato M. // J. of Low Temperature Physics. 2003. Vol. 130. № 5/6. P. 509–527.
25. Cirillo C., Prischepa S.L., Romano A., Salvato M., Attanasio C. // Physica C. 2004. Vol. 404. P. 95–98.
26. Cirillo C., Prischepa S.L., Salvato M., Attanasio C. // The European Physical Journal B. 2004. Vol. 38. P. 59–64.
27. Tesauro A., Aurigemma A., Cirillo C., Prischepa S.L., Salvato M., Attanasio C. // Superconductor Science and Technology. 2005. Vol. 18. № 1. P. 1–8.
28. Кушнир В.Н., Петров А.Ю., Прищепя С.Л. // Материалы, технологии, инструменты. 1998. Т. 3. № 2. С. 125.
29. Кушнир В.Н., Петров А.Ю., Прищепя С.Л. // Физика низких температур. 1999. Т. 25. № 12. С. 1265–1270.
30. Kushnir V.N., Prischepa S.L., Della Rocca M.L., Salvato M., Attanasio C. // Physical Review B. 2003. Vol. 68. № 25. P. 212505(1-5).
31. Prischepa S.L., Kushnir V.N., Attanasio C. // Microelectronic Engineering. 2003. Vol. 69. P. 346–349.
32. Kushnir V.N., Prischepa S.L., Cirillo C., Della Rocca M.L., Angrisani Armenio A., Maritato L., Salvato M., Attanasio C. // The European Physical Journal B. Vol. 41. P. 439–444.
33. Prischepa S.L., Cirillo C., Kushnir V.N., Ilyina E.A., Salvato M., Attanasio C. // Physical Review B. 2005. Vol. 72. № 2. P. 024535(1-6).
34. Cirillo C., Prischepa S.L., Salvato M., Attanasio C., Hesselberth M., Aarts J., 72, 144511, 2005// Physical Review B. 2005. Vol. 72. № 14. P. 144511(1-5).
35. Прищепя С.Л., Кушнир В.Н., Ильина Е.А. // Весці АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. 2006. № 1. С. 86–92.

36. *Cirillo C., Prischepa S.L., Salvato M., Attanasio C.* // J. of Physics and Chemistry of Solids. 2006. Vol. 67. P. 412–415.
37. *Kushnir V.N., Prischepa S.L., Cirillo C., Attanasio C.* // The European Physical Journal B. 2006. Vol. 52 P. 9–14.
38. *Angrisan Armenio A., Iannone G., Cirillo C., Prischepa S.L., Attanasio C.* // Physical Review B. 2007. Vol. 76. № 2. P. 024515(1-6).
39. *Kushnir V.N., Ilyina E.A., Prischepa S.L., Cirillo C., Attanasio C.* // Superlattices and Microstructures. 2008. Vol. 43. № 2. P. 86–92.
40. *Prischepa S.L., Cirillo C., Bell C., Kushnir V.N., Aarts J., Attanasio C., Kupriyanov M.Yu.* // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. № 6. С. 431–435.
41. *Cirillo C., Bell C., Iannone G., Prischepa S.L., Aarts J., Attanasio C.* // Physical Review B. 2009. Vol. 80. № 9. P. 094510(1-5).
42. *Prischepa S.L., Kushnir V.N., Cirillo C., Attanasio C., Vecchione A., Bell C., Aarts J., Kupriyanov M.Yu.* // Solid State Phenomena. 2009. Vol. 152–153. P. 478–481.
43. *Cirillo C., Prischepa S.L., Attanasio C.* // J. of Physics: Condensed Matter. 2009. Vol. 21. № 25. P. 254201(1-3).
44. *Кушнир В.Н., Прищепина С.Л.* // Вест. Фонда фундамент. исслед. 2009. № 4. С. 99–109.
45. *Kushnir V.N., Prischepa S.L., Cirillo C., Attanasio C.* // J. of Applied Physics. 2009. Vol. 106. № 11. P. 113917(1-3).
46. *Ilyina E.A., Cirillo C., Prischepa S.L., Attanasio C.* // J. of Superconductivity and Novel Magnetism. 2010. Vol. 23. № 3. P. 329–332.
47. *Кушнир В.Н., Прищепина С.Л.* // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2010. № 4. С. 108–111.
48. *Kushnir V.N., Prischepa S.L., Aarts J., Bell C., Cirillo C., Attanasio C.* // The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems. 2011. Vol. 80. № 4. P. 445–449.
49. *Mancusi D., Ilyina E. A., Kushnir V. N., Prischepa S. L., Cirillo C., Attanasio C.* // J. of Applied Physics. 2011. Vol. 110. № 11. P. 113904(1-4).
50. *Kushnir V. N., Prischepa S. L., Cirillo C., Vecchione A., Attanasio C., Kupriyanov M. Yu., Aarts J.* // Physical Review B. 2011. Vol. 84. № 21. P. 214512(1-10).
51. *Кушнир В.Н., Прищепина С.Л.* // Докл. НАН Беларусі. 2012. Т. 56. № 1. С. 60–64.
52. *Prischepa S.L., Kushnir V.N., Cirillo C., Attanasio C., Kupriyanov M.Yu.* // Solid State Phenomena. 2012. Vol. 190. P. 409–412.
53. *Kushnir V.N., Prischepa S.L., Mancusi D., Ilyina E.A., Cirillo C., Attanasio C.* // J. of Superconductivity and Novel Magnetism. 2013. Vol. 26. № 9. P. 2861–2862.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Прищепин Сергей Леонидович (1956 г.р.), д.ф.-м.н., профессор. В 1979 г. окончил МИФИ. В 1985 г. защитил кандидатскую, в 1996 г. – докторскую диссертацию. Профессор кафедры защиты информации. Ведет научные исследования в области сверхпроводимости, наноматематики и наноэлектроники. Является научным руководителем заданий, выполняемых в рамках Фонда фундаментальных исследований, NATO, INTAS, 7-ой Рамочной программы Европейской комиссии. Автор 8 книг и глав в книгах, 139 статей, 22 патентов на изобретение. Под его руководством защищены 3 кандидатские диссертации, одна из которых – в Италии.