

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель Научного совета ОНИТ  
РАН «Фундаментальные проблемы  
элементной базы информационно-  
вычислительных и управляющих  
систем и материалов для  
ее создания»,

академик-секретарь ОНИТ РАН,  
академик РАН

Г.Я. Красников

« 14 » июля

2021 г.

### ПРОТОКОЛ

заседания Научного совета ОНИТ РАН «Фундаментальные проблемы  
элементной базы информационно-вычислительных и управляющих систем  
и материалов для ее создания» (далее — «Совет»)  
по теме «Материалы для микро- и наноэлектроники»

**МЕСТО И ДАТА ПРОВЕДЕНИЯ:** г. Москва, Ленинский пр-т, 32А, здание РАН,  
Синий зал. 22 июня 2021 г. с 10:00 до 16:22.

**ФОРМАТ ПРОВЕДЕНИЯ:** смешанный – очный и дистанционный (онлайн  
в Zoom).

### ПРЕДСЕДАТЕЛЬСТВОВАЛИ:

Председатель Совета, академик-секретарь Отделения нанотехнологий  
и информационных технологий (далее – ОНИТ) РАН, академик  
РАН Г.Я. Красников.

### УЧАСТВОВАЛИ:

#### *Члены Совета*

1. Красников Геннадий Яковлевич  
академик РАН

председатель Совета, руководитель  
приоритетного технологического  
направления по электронным  
технологиям, академик-секретарь  
ОНИТ РАН, генеральный директор  
АО «НИИМЭ» (очно)

2. Лукичев Владимир Федорович  
член-корреспондент РАН

заместитель председателя Совета,  
директор ФТИАН им. К.А. Валиева  
РАН (очно)

3. Горбацевич Александр Алексеевич  
академик РАН
4. Латышев Александр Васильевич  
академик РАН
5. Пустовойт Владислав Иванович  
академик РАН
6. Сауров Александр Николаевич  
академик РАН
7. Чаплыгин Юрий Александрович  
академик РАН
8. Бородин Владимир Алексеевич  
член-корреспондент РАН
9. Горнев Евгений Сергеевич  
член-корреспондент РАН
10. Двуреченский Анатолий  
Васильевич  
член-корреспондент РАН
11. Егоров Антон Юрьевич  
член-корреспондент РАН
12. Жуков Алексей Евгеньевич  
член-корреспондент РАН
13. Иванов Виктор Владимирович  
член-корреспондент РАН
14. Никитов Сергей Аполлонович  
член-корреспондент РАН
15. Салашенко Николай Николаевич  
член-корреспондент РАН
16. Акчурин Рауф Хамзинович  
доктор технических наук
17. Воротынцев Владимир Михайлович  
доктор химических наук
- заведующий лабораторией ФИАН,  
заведующий кафедрой квантовой  
физики и наноэлектроники НИУ  
МИЭТ, заведующий лабораторией  
АО «НИИМЭ» (онлайн)  
директор ИФП СО РАН (онлайн)
- научный руководитель НТЦ УП РАН  
(онлайн)
- директор ИНМЭ РАН (онлайн)
- президент НИУ МИЭТ (онлайн)
- заместитель генерального директора  
ФГУП ЭЗАН (онлайн)
- заместитель руководителя  
приоритетного технологического  
направления АО «НИИМЭ» (онлайн)
- заведующий лабораторией  
неравновесных полупроводниковых  
систем ИФП СО РАН, профессор  
кафедры «Физика полупроводников»  
Новосибирского государственного  
университета (онлайн)
- технический директор ООО  
«Коннектор Оптикс», профессор  
Университета ИТМО (онлайн)
- заведующий лабораторией, проректор  
по науке СПбАУ РАН им.  
Ж.И. Алферова (онлайн)
- директор Физтех-школы электроники,  
фотоники и молекулярной физики  
МФТИ (онлайн)
- директор ИРЭ им. В.А. Котельникова  
РАН (очно)
- заведующий отделом, главный  
научный сотрудник ИФМ РАН -  
филиала ИПФ РАН (онлайн)  
(онлайн)
- заведующий кафедрой ФГБОУ  
ВО «Нижегородский государственный  
технический университет им.  
Р.Е. Алексеева» (онлайн)

- |  |   |
|--|---|
| 18. Гамкрелидзе Сергей Анатольевич<br>доктор технических наук  | директор ИСВЧПЭ РАН (очно)  |
| 19. Зацаринный Александр Алексеевич<br>доктор технических наук   | заместитель директора по научной работе ФИЦ ИУ РАН (онлайн)   |
| 20. Зломанов Владимир Павлович<br>доктор химических наук   | профессор кафедры неорганической химии МГУ имени М.В. Ломоносова (очно)   |
| 21. Левченко Александр Алексеевич<br>доктор физико-математических наук   | директор ИФТТ РАН (онлайн)  |
| 22. Лучинин Виктор Викторович<br>доктор технических наук   | заведующий кафедрой микро- и наноэлектроники, директор инжинирингового центра «Микротехнологии и диагностики» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (онлайн) |
| 23. Попов Владимир Павлович<br>доктор физико-математических наук   | заведующий лабораторией физических основ материаловедения кремния ИФП СО РАН, научный консультант АО «НЗПП с ОКБ» (онлайн)            |
| 24. Рошупкин Дмитрий Валентинович<br>доктор физико-математических наук   | директор ИПТМ РАН (очно)  |
| 25. Руденко Константин Васильевич<br>доктор физико-математических наук   | заместитель директора по научной работе ФТИАН им. К.А. Валиева РАН (онлайн)   |
| 26. Соболев Николай Алексеевич<br>доктор физико-математических наук  | ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе (онлайн)   |
| 27. Кобелева Светлана Петровна<br>кандидат физико-математических наук  | доцент кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ «МИСиС» (очно)   |
| 28. Тельминов Олег Александрович<br>кандидат технических наук  | ученый секретарь Совета, начальник лаборатории АО «НИИМЭ», доцент базовой кафедры микро- и наноэлектроники МФТИ (очно)                |
| <i>От Института проблем лазерных и информационных технологий — филиала Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»</i> |   |
| 29. Новодворский Олег Алексеевич<br>доктор физико-математических наук  | заведующий лабораторией Наноструктур и тонких пленок ИПЛИТ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (онлайн)               |

*От Института физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород*

30. Гапонов Сергей Викторович  
академик РАН  
31. Фраерман Андрей Александрович  
доктор физико-математических наук
- советник РАН ИФМ РАН - филиала  
ИПФ РАН (онлайн)  
заведующий отделением ИФМ РАН -  
филиала ИПФ РАН (онлайн)

*От Федерального государственного автономного научного учреждения  
Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени  
В.Г. Мокерова Российской академии наук, г. Москва*

32. Алёшин Андрей Николаевич  
доктор физико-математических наук  
33. Редькин Сергей Викторович  
кандидат технических наук  
34. Рубан Олег Альбертович  
кандидат технических наук  
35. Хабибуллин Рустам Анварович  
кандидат физико-математических  
наук
- главный научный сотрудник  
лаборатории «Фундаментальных  
исследований низко-размерных  
электронных систем  
в наногетероструктурах соединений  
А3В5» ИСВЧПЭ РАН (онлайн)  
ведущий научный сотрудник ИСВЧПЭ  
РАН (очно)  
младший научный сотрудник ИСВЧПЭ  
РАН (онлайн)  
ведущий научный сотрудник ИСВЧПЭ  
РАН (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук»*

36. Кукушкин Владимир Алексеевич  
доктор физико-математических наук
- старший научный сотрудник ИПФ РАН  
(онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт проблем машиноведения Российской академии наук», г. Санкт-  
Петербург*

37. Кукушкин Сергей Арсеньевич  
доктор физико-математических наук
- руководитель лаборатории  
структурных и фазовых превращений  
в конденсированных средах ИПМаш  
РАН (очно)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва*

38. Алтайский Михаил Викторович ведущий научный сотрудник ИКИ РАН  
доктор физико-математических наук (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлоорганической химии им. Г.А. Разуваева Российской академии наук, г. Нижний Новгород*

39. Чесноков Сергей Артурович заведующий лабораторией ИМХ РАН  
доктор химических наук (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва*

40. Павлов Александр Александрович заместитель директора по научной  
кандидат технических наук работе ИНМЭ РАН (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук*

41. Дьячков Павел Николаевич главный научный сотрудник  
доктор химических наук лаборатории квантовой химии ИОНХ РАН (очно)

42. Кецко Валерий Александрович главный научный сотрудник ИОНХ  
доктор химических наук РАН (очно)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, г. Черноголовка Московской обл.*

43. Зайцев Сергей Иванович главный научный сотрудник ИПТМ  
доктор физико-математических наук РАН (онлайн)

44. Николайчик Владимир Иванович заместитель директора по науке ИПТМ  
доктор физико-математических наук РАН (онлайн)

45. Тулин Вячеслав Александрович главный научный сотрудник ИПТМ  
доктор физико-математических наук РАН (онлайн)

46. Егоров Владимир Константинович старший научный сотрудник ИПТМ  
кандидат физико-математических РАН (онлайн)  
наук

47. Коханчик Людмила Сергеевна ведущий научный сотрудник ИПТМ  
кандидат физико-математических РАН (онлайн)  
наук

48. Панин Геннадий Николаевич старший научный сотрудник ИПТМ  
кандидат физико-математических РАН, профессор Исследовательского  
наук  
центра квантово-функциональных  
полупроводников, Академия нано-

49. Шабельникова Яна Леонидовна кандидат физико-математических наук	информационных технологий, Университет Донгука, Сеул, Южная Корея (очно) научный сотрудник ИПТМ РАН (онлайн)
50. Шаповал Сергей Юрьевич кандидат технических наук	заведующий лабораторией эпитаксиальных микро- и наноструктур ИПТМ РАН (очно)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт  
проблем химической физики Российской академии наук, г. Черноголовка  
Московской обл.*

51. Васильев Сергей Геннадьевич кандидат физико-математических наук	старший научный сотрудник ИПХФ РАН (онлайн)
52. Зенчук Александр Иванович кандидат физико-математических наук	ведущий научный сотрудник ИПХФ РАН (онлайн)
53. Кузнецова Елена Игоревна кандидат физико-математических наук	старший научный сотрудник ИПХФ РАН (онлайн)
<i>От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва</i>	
54. Кузнецова Ирен Евгеньевна профессор РАН, доктор физико- математических наук	главный научный сотрудник, заведующий отделом аспирантуры ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (очно)
55. Волков Владимир Александрович доктор физико-математических наук	главный научный сотрудник ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (онлайн)
56. Логунов Михаил Владимирович доктор физико-математических наук	ведущий научный сотрудник ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (очно)
57. Смирнов Андрей Владимирович кандидат физико-математических наук	старший научный сотрудник ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (очно)
58. Овсянников Геннадий Александрович	заведующий лабораторией ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук*

59. Миляев Михаил Анатольевич  
кандидат физико-математических  
наук руководитель сектора нанотехнологий  
отдела наноспинtronики ИФМ УрО  
РАН (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск*

60. Ненашев Алексей Владимирович  
кандидат физико-математических  
наук старший научный сотрудник ИФП  
СО РАН (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела Российской академии наук, г. Черноголовка Московской обл.*

61. Тулина Наталья Алексеевна  
кандидат физико-математических  
наук старший научный сотрудник ИФТТ  
РАН (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, г. Санкт-Петербург*

62. Устинов Виктор Михайлович  
член-корреспондент РАН директор НТЦ микроэлектроники РАН  
(онлайн)
63. Цацульников Андрей Федорович  
доктор физико-математических наук заместитель директора по научной работе НТЦ микроэлектроники РАН  
(онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, г. Москва*

64. Булатов Марат Фатыхович  
доктор физико-математических наук директор НТЦ УП РАН (очно)
65. Пожар Витольд Эдуардович  
доктор физико-математических наук заведующий отделом НТЦ УП РАН  
(очно)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург*

66. Лебедев Александр Александрович  
доктор физико-математических наук заведующий отделением твердотельной электроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе (онлайн)
67. Николаев Владимир Иванович  
кандидат физико-математических наук заведующий лабораторией физики профилированных кристаллов ФТИ им. А.Ф. Иоффе, директор ООО «Совершенные Кристаллы» (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологический институт имени К.А. Валиева Российской академии наук, г. Москва*

68. Мяконьких Андрей Валерьевич  
кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник ФТИАН им. К.А. Валиева РАН (онлайн)
69. Рогожин Александр Евгеньевич  
кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник ФТИАН им. К.А. Валиева РАН (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва*

70. Засавицкий Иван Иванович  
доктор физико-математических наук главный научный сотрудник ФИАН (онлайн)

*От Федерального государственного унитарного предприятия  
Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным  
конструкторским бюро Российской академии наук, г. Черноголовка Московской  
обл.*

71. Веретенников Александр  
Владимирович  
кандидат физико-математических наук заместитель генерального директора по научно-технической работе и проектам ФГУП ЭЗАН (онлайн)

*От Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр  
научно-исследовательский институт системных исследований Российской  
академии наук», г. Москва*

72. Масальский Николай Валерьевич  
кандидат физико-математических наук заведующий сектором ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (очно)

*От Фрязинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Фрязино Московской обл.*

73. Чучева Галина Викторовна профессор РАН, доктор физико-математических наук заместитель директора по научной работе ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (онлайн)
74. Афанасьев Михаил Сергеевич доктор технических наук ведущий научный сотрудник ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (очно)
75. Гольдман Евгений Иосифович кандидат физико-математических наук ведущий научный сотрудник ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (онлайн)

*От Ярославского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологический институт имени К.А. Валиева Российской академии наук*

76. Трушин Олег Станиславович кандидат физико-математических наук заведующий лабораторией исследования формирования многослойных структур ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт - республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы», г. Москва*

77. Беневоленский Сергей Борисович доктор технических наук главный научный сотрудник ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ (онлайн)

*От Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва*

78. Демин Вячеслав Александрович кандидат физико-математических наук директор-координатор по направлению природоподобные технологии НИЦ «Курчатовский институт» (онлайн)

*От Государственного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Московский государственный областной университет», г. Мытищи*

79. Беляев Виктор Васильевич доктор технических наук главный научный сотрудник МГОУ, профессор Инженерной академии РУДН (очно)

*От Московского института электроники и математики национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва*

80. Самбурский Лев Михайлович кандидат технических наук доцент департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ (онлайн)

*От Научно-исследовательского института ядерной физики имени  
Д.В. Скobel'цына Московского государственного университета имени  
М.В. Ломоносова, г. Москва*

81. Рахимов Александр Турсунович  
доктор физико-математических наук заведующий кафедрой «Атомной  
физики плазмы и микроэлектроники»  
НИИЯФ МГУ, заведующий  
«Лабораторией физики плазмы  
и физических основ микротехнологии»  
НИИЯФ МГУ (онлайн)  
старший научный сотрудник НИИЯФ  
МГУ (онлайн)
82. Зырянов Сергей Михайлович  
кандидат физико-математических  
наук
83. Рябинкин Алексей Николаевич  
кандидат физико-математических  
наук старший научный сотрудник НИИЯФ  
МГУ (онлайн)

*От Научно-образовательного центра «Технологический центр» Федерального  
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва*

84. Вишневский Алексей Сергеевич  
кандидат технических наук старший научный сотрудник НОЦ  
«Технологический центр» РТУ МИРЭА  
(онлайн)

*От Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский физико-технический институт  
(государственный университет)», г. Долгопрудный Московской обл.*

85. Калябин Дмитрий Владимирович  
кандидат физико-математических  
наук старший научный сотрудник МФТИ  
(онлайн)
86. Шарапов Андрей Анатольевич  
аспирант базовой кафедры «Микро-  
и наноэлектроника» МФТИ, научный  
сотрудник АО «НИИМЭ» (онлайн)

*От Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский  
государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Н. Новгород*

87. Королев Дмитрий Сергеевич  
кандидат физико-математических  
наук научный сотрудник ННГУ им.  
Н.И. Лобачевского, научный сотрудник  
АО «НИИМЭ» (онлайн)
88. Михайлов Алексей Николаевич  
кандидат физико-математических  
наук заведующий лабораторией физики  
и технологии тонких пленок ННГУ им.  
Н.И. Лобачевского (онлайн)

89. Николичев Дмитрий Евгеньевич  
кандидат физико-математических  
наук  
доцент кафедры физики  
полупроводников, электроники  
и наноэлектроники ННГУ им.  
Н.И. Лобачевского, старший научный  
сотрудник НИФТИ ННГУ им.  
Н.И. Лобачевского (онлайн)
- От Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС», г. Москва*
90. Юшков Константин Борисович  
кандидат физико-математических  
наук  
ведущий научный сотрудник НИТУ  
«МИСиС» (онлайн)
- От Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский Томский  
государственный университет», г. Томск*
91. Алмаев Алексей Викторович  
кандидат физико-математических  
наук  
заведующий лабораторией  
металлооксидных полупроводников  
Центра исследований и разработок  
«Перспективные технологии  
в микроэлектронике» Национального  
исследовательского Томского  
государственного университета  
(онлайн)
- От Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский университет  
«Московский институт электронной техники», г. Москва, г. Зеленоград*
92. Путря Михаил Георгиевич  
доктор технических наук  
профессор НИУ МИЭТ (онлайн)
93. Иванова Галина Александровна  
кандидат технических наук  
доцент кафедры ПКИМС НИУ МИЭТ  
(онлайн)
94. Царик Константин Анатольевич  
кандидат технических наук  
научный сотрудник НОЦ «Зондовая  
микроскопия и нанотехнология» НИУ  
МИЭТ (очно)
- От Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», г. Москва*
95. Гусев Александр Сергеевич  
заместитель директора Института  
функциональной ядерной электроники  
(ИФЯЭ) НИЯУ МИФИ (онлайн)

96. Рыжук Роман Валериевич  
заведующий лабораторией дизайна  
и СВЧ измерений Института  
функциональной ядерной электроники  
НИЯУ МИФИ (онлайн)
- от Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Южный федеральный университет»*
97. Лысенко Игорь Евгеньевич  
доктор технических наук  
главный научный сотрудник Дизайн-  
центра микроэлектронной  
компонентной базы для систем  
искусственного интеллекта Южного  
федерального университета (онлайн)
- От Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Воронежский государственный технический  
университет», г. Воронеж*
98. Ситников Александр Викторович  
доктор физико-математических наук  
профессор кафедры физики твердого  
тела Воронежского государственного  
технического университета (онлайн)
- От Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Воронежский государственный университет»,  
г. Воронеж*
99. Жукалин Дмитрий Алексеевич  
кандидат физико-математических  
наук  
начальник управления науки,  
инноваций и информационной  
политики, доцент кафедры физики  
полупроводников и микроэлектроники  
ФГБОУ ВО «ВГУ» (онлайн)
- От Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»,  
г. Москва*
100. Фетисов Леонид Юрьевич  
доктор физико-математических наук  
доцент кафедры наноэлектроники РТУ  
МИРЭА (очно)
101. Фетисов Юрий Константинович  
доктор физико-математических наук  
директор НОЦ «Магнитоэлектрические  
материалы и устройства» РТУ МИРЭА  
(очно)
- От Акционерного общества «Научно-исследовательский институт  
молекуллярной электроники», г. Москва, г. Зеленоград*
102. Бокарев Валерий Павлович  
доктор технических наук  
начальник отдела службы главного  
конструктора АО «НИИМЭ», доцент  
базовой кафедры «Микро-  
и наноэлектроника» МФТИ (онлайн)

103. Орлов Олег Михайлович  
кандидат технических наук  
начальник лаборатории отдела  
функциональной электроники  
АО «НИИМЭ» (онлайн)
104. Мошкова Лилия Айратовна  
младший научный сотрудник  
АО «НИИМЭ» (онлайн)
105. Нефедьев Сергей Васильевич  
главный специалист АО «НИИМЭ»  
(онлайн)
106. Полушкин Евгений Анатольевич  
ведущий инженер АО «НИИМЭ»,  
младший научный сотрудник ИПТМ  
РАН (онлайн)
107. Сергеев Виталий Сергеевич  
советник генерального директора  
АО «НИИМЭ» (очно)
108. Степаненко Наталья  
Владимировна  
руководитель Учебного центра  
АО «НИИМЭ» (онлайн)

*От Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Пульсар»,  
г. Москва*

109. Енишерлова-Вельяшева Кира  
Львовна  
доктор технических наук  
начальник лаборатории АО «НПП  
«Пульсар» (очно)

*От Акционерного общества «Центральное конструкторское бюро «ДЕЙТОН»,  
г. Москва, г. Зеленоград*

110. Рубцов Юрий Васильевич  
генеральный директор АО «ЦКБ  
«Дейтон» (онлайн)
111. Юдахин Юрий Анатольевич  
доктор исторических наук  
директор по научно-техническому  
развитию АО «ЦКБ «Дейтон» (онлайн)

*От Некоммерческой организации Фонд развития центра разработки  
и коммерциализации новых технологий, г. Москва*

112. Суэтин Николай Владиславович  
доктор физико-математических наук  
вице-президент по науке  
и образованию Фонда «Сколково»,  
ведущий научный сотрудник НИИЯФ  
МГУ (онлайн)

*От Открытого акционерного общества «Санкт-Петербургская  
судостроительная компания», г. Санкт-Петербург*

113. Мельников Сергей Юрьевич  
доктор технических наук  
генеральный директор ОАО «СПСК»  
(очно)

*От Общества с ограниченной ответственностью «Мега Эпитех», г. Москва,  
г. Зеленоград:*

114. Крюков Виталий Львович  
кандидат технических наук  
директор ООО «Мега Эпитех»  
(онлайн)

## ПОВЕСТКА ДНЯ:

академик РАН Красников Геннадий Яковлевич (АО «НИИМЭ»). Открытие заседания.

(1) д.т.н. Гамкрелидзе Сергей Анатольевич (ИСВЧПЭ РАН). Плазмохимические методы формирования и фрагментирования материалов электронной техники на примере кубического карбида кремния на кремнии, алмаза и сапфира.

(2) член-корр. РАН Гудилин Евгений Алексеевич, д.х.н. Зломанов Владимир Павлович (МГУ имени М.В. Ломоносова). Принципы управления свойствами материалов для микро- и наноэлектроники.

(3) д.ф.-м.н. Кукушкин Сергей Арсеньевич, д.ф.-м.н. Осипов Андрей Викторович (ИПМаш РАН). Наномасштабный карбид кремния на кремнии и его особые свойства. От теории до производства.

(4) **онлайн** д.т.н. Лучинин Виктор Викторович (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»). Отечественный карбидокремниевый материаловедческий базис для экстремальной электроники. Рост, эпитаксия, имплантация.

(5) **онлайн** д.ф.-м.н. Лебедев Александр Александрович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе). Графен на SiC: получение, исследования и практические применения.

(6) д.ф.-м.н. Рошупкин Дмитрий Валентинович (ИПТМ РАН). Перспективные пьезо- и сегнетоэлектрические материалы.

(7) к.т.н. Шаповал Сергей Юрьевич, Ковальчук Анатолий Викторович (ИПТМ РАН), Полушкин Евгений Анатольевич (АО «НИИМЭ», ИПТМ РАН). Материалы радиационно стойкой электроники. Некоторые способы модификации структур с целью повышения радиационной стойкости.

(8) д.х.н. Кецко Валерий Александрович (ИОНХ РАН). Проблемы создания материалов и пленочных структур на основе ферритов на подложках полупроводников для устройств магнитоэлектроники.

(9) д.ф.-м.н. Логунов Михаил Владимирович, член-корр. РАН Никитов Сергей Аполлонович (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН). Магнитооптические материалы для микро- и наноэлектроники.

(10) **онлайн** член-корр. РАН Двуреченский Анатолий Васильевич, Кацюба Алексей Владимирович, к.ф.-м.н. Камаев Геннадий Николаевич, д.ф.-м.н. Володин Владимир Алексеевич (ИФП СО РАН). Радиационные явления в пленках CaF<sub>2</sub>.

(11) д.х.н. Дьячков Павел Николаевич (ИОНХ РАН). Нанотрубки – актуальные материалы наноэлектроники и их электронное строение.

(12) **онлайн** д.х.н. Чесноков Сергей Артурович (ИМХ РАН). Новые фоторезисты для однофотонной и двухфотонной фотополимеризации.

(13) к.ф.-м.н. Кобелева Светлана Петровна (НИТУ «МИСиС»). Особенности получения соединений A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> из паровой фазы.

(14) онлайн к.ф.-м.н. Алмаев Алексей Викторович (Национальный исследовательский Томский государственный университет). Элементы силовой и сенсорной электроники на основе оксида галлия.

Общая дискуссия. Подведение итогов заседания Научного совета.

(академик РАН Г.Я. Красников, академик РАН А.В. Латышев,  
академик РАН В.И. Пустовойт, академик РАН Ю.А. Чаплыгин,  
член-корр. РАН Е.С. Горнев, член-корр. РАН А.В. Двуреченский,  
член-корр. РАН В.Ф. Лукичев, д.т.н. Р.Х. Акчурин, д.т.н. В.В. Беляев,  
д.ф.-м.н. М.Ф. Булатов, д.х.н. В.М. Воротынцев, д.т.н. С.А. Гамкрелидзе,  
д.х.н. П.Н. Дьячков, д.т.н. К.Л. Енишерлова-Вельяшева, д.ф.-м.н. С.И. Зайцев,  
д.х.н. В.П. Зломанов, д.х.н. В.А. Кецко, д.ф.-м.н. С.А. Кукушкин,  
д.ф.-м.н. А.А. Лебедев, д.ф.-м.н. М.В. Логунов, д.т.н. В.В. Лучинин,  
д.ф.-м.н. Д.В. Рошупкин, д.ф.-м.н. К.В. Руденко, д.ф.-м.н. А.А. Фраерман,  
д.х.н. С.А. Чесноков, к.ф.-м.н. А.В. Алмаев, к.ф.-м.н. В.К. Егоров,  
к.ф.-м.н. С.П. Кобелева, к.ф.-м.н. Н.В. Масальский, к.ф.-м.н. Г.Н. Панин,  
к.т.н. К.А. Царик, к.т.н. С.Ю. Шаповал)

1. В заседании приняло участие 28 из 47 членов Совета. 59 организаций представлены 114 учеными и специалистами, из которых 32 приняло участие в обсуждении.
2. Во вступительном слове при открытии заседания Председатель Совета, академик РАН Г.Я. Красников в связи с Днем памяти и скорби 22 июня почтил минутой молчания погибших в дни Великой отечественной войны 1941-1945 гг. Отметил существенную роль материаловедения в интересах развития современной электронной компонентной базы, пояснил существующие механизмы бюджетного финансирования работ в указанной области.
3. Д.т.н. Гамкрелидзе Сергей Анатольевич сообщил, что в ИСВЧПЭ РАН ведутся работы по формированию структур карбида кремния на кремнии кубического политипа 3C-SiC. В исследованиях использовались плазмы трех типов разрядов: ВЧ диодного, ВЧ индукционного и СВЧ с магнитным полем. Применяются газовые смеси  $\text{SiH}_4 + \text{CF}_4 + \text{Ar}$  и  $\text{SiH}_4 + \text{CH}_4 + \text{Ar}$ . Технологический процесс проходит в четыре этапа: промывка технологической смесью, очистка и травление поверхности, имплантация-карбонизация, формирование пленки SiC. Эпитаксиальный рост 3C-SiC выполняется при температурах не превышающих 800°C. Толщины получаемых слоёв от нескольких нанометров, десятков микрон и полная модификация пластин Si на всю толщину (в зависимости от необходимости). При этом, всегда наблюдается утонение пластин. В основе физической модели технологического процесса лежит образование дефектов (вакансий) на поверхности Si пластины при обработке в плазме и их диффузия в глубь кристалла, что эквивалентно выходу атомов Si на поверхность, где они “связываются” химически и переходят в летучие состояния и удаляются с помощью вакуумной системы. Таким образом,

устраняется напряженное состояние между решётками Si и SiC ввиду отличия их параметров. Сформированные таким образом слои 3C-SiC на Si можно использовать для создания силовых приборов, датчиков и в качестве подслоев для нитридных приборов, заменив при этом дорогие SiC подложки фирмы CREE (США). При лазерном плазмохимическом фрагментировании пластин (лазер на парах меди с длинами волн 578,2 нм и 510,6 нм и ультрафиолетовый лазер с длиной волны 355 нм) используется такое физическое явление как оптический пробой в специально подобранных газовых средах с образованием химически активной плазмы, компоненты которой взаимодействуют с материалом пластины или слоя (процесс плазмохимического травления) и переводят его в газовую фазу, которая удаляется с помощью вакуумной системы. Разработанная технология обладает следующими преимуществами: отсутствует грат, линия реза может иметь произвольную форму и не зависит от кристаллографии пластины, отсутствует модификация материала пластины, профиль травления приближается к прямоугольному (аспектное отношение – 4). Получены патенты на способы лазерного плазмохимического фрагментирования пластин алмаза и сапфира, а также на способ формирования 3C- SiC на Si.

4. Д.х.н. Зломанов Владимир Павлович сообщил, что на кафедре неорганической химии МГУ им. М.В. Ломоносова систематизированы принципы управления свойствами материалов для микро- и наноэлектроники. Они основаны на четырех признаках вещества: состава, энергии взаимодействия частиц (энталпийная и энтропийная), структуры и размера частиц. Показаны способы последовательного получения монокристалла кремния, карбida кремния и алмаза из диоксида кремния.
5. д.ф.-м.н. Кукушкин Сергей Арсеньевич сообщил, что в ИПМаш РАН совместно с Обществом с ограниченной ответственностью Научно-технический центр «Новые технологии» (ООО НТЦ «Новые технологии») предложена, обоснована и подготовлена к реализации в промышленном масштабе идея замены подложки сапфира на подложку с пленкой nano-SiC на Si. Приборы на SiC долговечны и технологичны в изготовлении. Широкозонные полупроводники GaN и AlN, хотя и превосходят по ряду параметров SiC, но не имеют собственных подложек – рост происходит на подложках SiC или сапфира, что увеличивает скорость деградации таких приборов. Существующие способы получения пленок SiC на Si приводят к образованию трещин и дислокаций, а также к искривлению подложки ввиду высоких механических напряжений. В предлагаемом методе происходит замещение в решётке кремния атомов Si на атомы C путем образования объектов, в которых атомы C в междоузельной позиции взаимодействуют с вакансиями Si посредством упругой энергии. В итоге получен многоэтапный процесс, в результате которого образуются поры между подложкой Si и пленкой SiC. Анализ спектров пропускания и отражения слоев SiC подтверждают упругое взаимодействие атомов C в межузельной позиции и вакансии Si. Разработанная 3D модель углеродно-вакансационной структуры

в SiC, выращенном методом согласованного замещения атомов, позволяет найти наиболее вероятный путь системы от реагентов к продуктам. Продемонстрированы и теоретически обоснованы результаты ряда экспериментов, подтверждающих состоятельность предложенной идеи. Экспериментально обнаружено и подтверждено квантово-химическим моделированием, что на границе раздела SiC /Si(111) и SiC /Si(110), вследствие химической реакции замещения, так и вследствие усадки кристаллической ячейки Si при ее превращении в кристаллическую ячейку SiC происходит образование в нем целого ряда новых уникальных свойств. А именно: на межфазной границе раздела SiC-Si образуется тонкий промежуточный слой с диэлектрической проницаемостью, соответствующей полуметаллу; в слабых магнитных полях при комнатной температуре возникают два квантовых эффекта. Во-первых, эксперимент фиксирует образование гистерезиса статической магнитной восприимчивости, что связывается с эффектом Мейснера–Оксенфельда, а во-вторых, экспериментально обнаружено возникновение осцилляций Ааронова–Бома в полевых зависимостях статической магнитной восприимчивости. За возникновение последнего эффекта ответственны нанотрубки SiC и микропоры, формирующиеся на межфазной границе, раздела SiC-Si в процессе синтеза SiC. Полученные пленки нано-SiC на Si могут применяться (1) в качестве буферного слоя дальнейшего роста на его поверхности толстых пленок и гетероструктур AlN, GaN, ZnO, SiC и полупроводников других соединений; (2) для синтеза объемных слоев AlN (толщиной 100 мкм) и GaN (толщиной 350 мкм и более), полученных ИПМаш РАН совместно с ООО НТЦ «Новые технологии» и ООО «НКТ», с последующим их отделением от кремниевой подложки; (3) в качестве самостоятельной структуры для создания дополнительных структур для микро- и оптоэлектроники на основе нано-SiC/Si; (4) для выращивания нитевидных нанокристаллов, нитевидных кристаллов, нанопроволок NWs, структур InAs, AlGaAs, GaN и др. Такие буферные слои нано-SiC / Si и гетероструктур на основе соединений AlN, GaN, ZnO, SiC на соединениях Si с буферным слоем SiC могут применяться при производстве следующих изделий ЭКБ: (1) светодиодов и мощных светодиодов, синих лазеров; (2) приборов для СВЧ, НЕРТ-транзисторов; (3) различных видов акустических мембран; (4) приборов ночного видения; (5) датчиков теплового излучения на пироэффекте; (6) датчиков ультрафиолетового излучения; (7) различных видов диодов, в том числе диодов Шоттки; (8) мощных выпрямителей и тиристоров; (9) микропроцессоров и элементов памяти, стабильно работающих при повышенных температурах и обладающих повышенной стойкостью. Продемонстрированы светодиоды, полученные на пленках нано-SiC на Si совместно с НТЦ микроэлектроники РАН, ООО НТЦ «Новые технологии» и ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

6. Д.т.н. Лучинин Виктор Викторович сообщил, что в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» развиваются ряд доминирующих направлений электронной промышленности:

(1) технологии синтеза полупроводниковых материалов и эпитаксиальных структур: карбид кремния, монокристаллический алмаз; (2) постростовые технологии производства силовой высоковольтной (до 6 500 В, более 200 А) высокотемпературной ( $450^{\circ}\text{C}$ ) и радиационно-стойкой электроники на основе карбида кремния и алмаза; (3) технологии производства изделий СВЧ электроники (героструктуры GaN на SiC), субнаносекундной импульсной электроники (SiC дрейфовые диоды с резким восстановлением); (4) технологии производства микро- и микрооптоэлектромеханических систем. В ЛЭТИ отложен технологический маршрут разработки и производства SiC: рост кристаллов, эпитаксия, постростовые процессы, изготовление функциональных модулей. ЛЭТИ разработал и реализует процессы: роста, эпитаксии и ионной имплантации. Совместно с ООО «Сектор» ЛЭТИ разработал и создал отечественную установку для выращивания объемных монокристаллов карбида кремния диаметром 4"-6", на которой реализует процесс получения монокристаллических слитков карбида кремния диаметром 4". Предложены и реализованы процессы проведения резки, шлифовки и полировки карбида кремния и определения шероховатости поверхности, плотности структурных дефектов дислокаций и пор с классификацией их по фигурам травления. Эпитаксия осуществляется на подготовленных поверхностях подложки SiC «EPI-READY», применяется «слоистый» рост без образования зародышей на отклоненных поверхностях SiC. Проводится комплекс исследований материала после эпитаксии оптическими методами с использованием комбинированных методов, основанных на люминесценции, поляризационной микроскопии, микроскопии светлого и тёмного поля. Для промышленного применения разработаны методы, связанные с определением толщины, концентрации и подвижности носителей заряда в SiC на основе Фурье-анализа спектров отражения. Используются программы собственной разработки для расчета значений толщин и концентраций доноров в эпилоях для приборов различного назначения. В обеспечение процесса легирования проведены расчетные и экспериментальные работы для формирования ионной имплантацией MOSFET структур SiC; Исследованы процессы ионной имплантации акцепторов бора и алюминия в эпилой n-SiC, а также фосфора для формирования материала n-типа. С 2006 г. ведутся работы по созданию и использованию гетероэпитаксиальных композиций, в том числе по газофазной эпитаксии SiC на Si и ионно-плазменного осаждения слоёв карбида кремния и нитрида алюминия на сапфире. Обнаружены эффекты, связанные с получением редких политипов AlN в системе AlN – SiC и политипа 2H SiC. Созданы МЭМС-датчики давления и ускорения, сенсоры температуры и УФ излучения для которых исследованы экстремальные характеристики. Совместно с ИПФ РАН разработаны автоэмиссионные структуры карбид кремния – нанокристаллический алмаз, показавшие высокую стабильность. Определены следующие тенденции в технологии SiC: (1) эпитаксиальные слои:

(1.1) толстые ( $> 100$  мкм), для силовой электроники; (1.2) высокочистые для силовой электроники и фотоники; (1.3) слои политипа 3С для СВЧ электроники и фотоники; (2) гетероструктуры: (2.1) SiC/Si для микросистемной техники, (2.2) SiC/Me3N для СВЧ электроники и оптоэлектроники, (2.3) графен на поверхности SiC; (3) подложки SiC: (3.1) получение из жидкой фазы, (3.2) получение монокристаллов 3С-SiC  $\mu > 1\,000$  см<sup>2</sup>/Вс для СВЧ-электроники, (3.3) получение высокоомных нелегированных подложек  $r > 108$  Ом×см для СВЧ электроники, (3.4) упорядоченные массивы 3D микро- и наноразмерных монокристаллов для автоэмиссионной электроники и фотоники, (3.5) 3D микроструктуры – SiC – алмаз для автоэмиссионной электроники.

7. Д.ф.-м.н. Лебедев Александр Александрович сообщил, что В ФТИ им. А.Ф. Иоффе решаются вопросы исследования и получения пленок графена, ведется разработка прототипов газовых и биосенсоров. В работах лауреатов Нобелевской премии А.К. Гейма и К.С. Новоселова описана методика отшелушивания двумерного кристалла графена, не имеющая перспектив в промышленном применении. Поэтому было необходимо разработать технологию, пригодную для промышленного производства графена. Ставилась задача подбора технологических параметров для управляемого формирования на подложке SiC пленки графита толщиной в один моносвой при нагреве в вакууме или в атмосфере инертного газа. Такой метод термического разложения размер позволяет получать пленку графена размером с подложку (6-8 дюймов), при этом формируется второй слой атомов углерода на площади порядка 20 % подложки. Исследована дифракция медленных электронов, проведена рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, выполнены электрофизические измерения параметров пленок графена. Сформированы омические контакты, получен образец для проведения измерений эффекта Холла. Показана линейность вольтамперных характеристик, обнаруженные осцилляции Шубникова – де Гааза подтверждают двумерный характер проводимости выращенной пленки. Лучшее значение подвижности носителей составило 6 000 см<sup>2</sup>/В·с, что превышает достигнутые значения других исследователей и практически совпадает с теоретическим пределом. Полученные пленки графена могут применяться в СВЧ транзисторах, оптике, газовых и биосенсорах, микромеханике, спинtronике, приемниках ТГц диапазона. Транзисторы на графене имеют малую разницу между включенным и выключенным состояниями, что снижает перспективу их использования. Графен может быть использован в качестве буферного слоя для роста различных нитридов на поверхности SiC. Благодаря свойству графена – высокой подвижности носителей заряда в сочетании с их малой концентрацией, возможно изготовление сенсоров, детектирующих присоединение даже одной молекулы к поверхности графена. На чипе размером 1x2 мм показано детектирование NO<sub>2</sub> при концентрации 1 ppb. Однако газовый сенсор на основе графена обладает низкой селективностью. Для устранения недостатка был разработан биосенсор, принцип

работы которого основан на изменении сопротивления графенового канала при химической реакции соединения антигена с комплементарным ему антителом. В заключении можно сделать следующие выводы. (1) Разработана технология формирования пленок графена методом термодеструкции поверхности SiC. (2) проведенные исследования методами рамановской спектроскопии, атомно-силового микроскопии, дифракции медленных электронов, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением подтвердили высокое структурное совершенство выращенных пленок. (3)-На основе выращенных пленок были изготовлены прототипы газовых и био- сенсоров. (4) Открываются широкие перспективы использования аналогичных приборов в биологии и медицине.

8.

9. Д.Ф.-м.н. Рошупкин Дмитрий Валентинович сообщил, что в ИПТМ РАН ведутся работы в области синтеза и исследования (1) сегнетоэлектрических кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ; (2) смешанных сегнетоэлектрических кристаллов  $\text{Li}(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3$ ; (3) пьезоэлектрических кристаллов семейства лантангаллиевого силиката  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ; (4) 1D кристаллов (nanoстержни  $\text{ZnO}$ ,  $\text{AlN}$ ); (5) 2D кристаллов (графен, оксид графена). По синтезу сегнетоэлектрических кристаллов для акусто- и оптоэлектроники сегодня мировым лидером является Китай. В России постепенно началось восстановление данного направления. ФГУП ЭЗАН выпускает установки «NiKa-3М» для синтеза высокотемпературных оксидных кристаллов методом Чохральского. В ИПТМ РАН проводятся исследования по выращиванию конгруэнтных и стехиометрических кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$ ;  $\text{Li}(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3$ . Сегодня удается выращивать кристаллы ниобат лития диаметром до 120 мм из платинового тигля, в то время как кристаллы tantalата лития имеет более высокую температуру плавления, для обеспечения которой требуется использование дорогих иридиевых или платино-родиевых тиглей (стоимость иридия сегодня – 28 тыс. долл. за унцию). Современное применение кристаллов ниобата и tantalата лития – это акустоэлектроника, акустооптика, оптоэлектроника и фотоника. Буквально в последние 10 лет появилось направление – создание гибридных структур из оксидного диэлектрика с полупроводниковым кристаллом. Изначально кристаллы имеют одинаковую толщину 250 мкм, затем в процессе бондинга кристаллы срашивают с последующим утонением сегнетоэлектрического кристалла до толщины 4÷5 мкм и активно используется в оптоэлектронике и акустоэлектронике. Совместно с Mapper Lithography (г. Москва) сформирована структура – 112° срез кристалла tantalата лития на кремний. В ИПТМ РАН исследован процесс возбуждения поверхностных и псевдоверхностных акустических волн в таких слоистых структурах, продемонстрировано, что скорости акустических волн в таких слоистых структурах существенно превышают скорости для объемных кристаллических материалов. В части оптоэлектроники продемонстрирована возможность формирования сегнетоэлектрических доменных структур

с размером доменов в несколько нанометров методом прямой электронно-лучевой преполяризации. В ИПТМ РАН решена задача выращивания кристаллов сложных растворов  $\text{Li}(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3$ , которые сочетают лучшие свойства кристаллов ниобата лития (высокие значения пьезоэлектрических модулей) и танталата лития (низкие значения температурного коэффициента частоты). В ИПТМ РАН решена задача выращивания кристаллов сложных растворов  $\text{Li}(\text{Nb},\text{Ta})\text{O}_3$  за счет длительного предварительного перемешивания расплава, скорости вращения кристаллов  $\sim 100$  об./мин. и скорости вытягивания кристаллов из расплава  $\sim 0.4$  мм/час. В ходе проведения всего спектра исследований обнаружено, что температура Кюри имеет линейную зависимость от ниобата до танталата лития. Оказалось, что в гибридных кристаллах состав смещается в сторону стехиометрического состава с разницей в 0,5 %. Обеспечено измерение всех параметров кристаллической решетки. Исследования акустических свойств показало, что происходит изменение скорости акустических волн. В результате моделирования состава кристалла предсказываются акустические свойства материала. Такие кристаллы могут быть использованы в качестве подложек для изготовления сенсоров и актиоаторов. В ИПТМ РАН ряд групп на протяжении многих лет занимается синтезом 1D и 2D кристаллов. Одним из изучаемых свойств графена является изменение протекающего тока при облучении УФ-излучением в связи с генерацией носителей заряда. Рассмотрены вопросы акустостимулированного транспорта носителей заряда в графене, когда распространения поверхностных акустических волн приводит к изменению тока в пленке графена. Работы выполняются в том числе по крупному научному проекту Минобрнауки России № 075-15-2020-791 с соисполнителями – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и АО «НИИМЭ».

10. К.т.н. Шаповал Сергей Юрьевич сообщил, что в ИПТМ РАН и АО «НИИМЭ» ведутся работы по разработке способов модификации структур для повышения стойкости изделий микроэлектроники. Структуры и материалы для оптических процессоров описываются формой, периодом и диэлектрической проницаемостью и остаются работоспособными до доз, вызывающих изменение указанных параметров. Рассматриваются баллистические структуры в условиях квантования проводимости: структуры теряют стойкость только при дозах, приводящих к разрушению материала. В завершившейся программе ЕО «Quantum Switch» достигли квантования при 70 К, что не является достаточно успешным результатом. В акустоэлектрических преобразователях, элементах логики подтверждена высокая радиационная стойкость. Широкозонные полупроводники обеспечивают работу геостационарных спутников: в 1970-е гг. – алмазные диоды с эпитаксией или насыщением водородом в СССР, в конце 1980-х гг. – транзисторы с рабочей температурой 550° С в США, в 2000-е гг. – AlGaN/SiC, сапфир, кремний. В кремниевых приборах и СБИС используются Si на диэлектрике – кремний на шпинели, флюорите, сапфире, КНИ. В качестве способов повышения радиационной

стойкости кремниевых структур применяют щелевую изоляцию, повышение рабочей температуры, насыщение водородом, подзатворную щелевую изоляцию, геттерирование. Существенно снизить концентрацию радиационных дефектов возможно внедрением в транзисторную структуру Ван-дер-Ваальсово связанного водорода. Также используют отжиг в водороде при температуре  $\geq 900^\circ\text{C}$ , пирогенное окисление, гидрогенизованный псевдоаморфный кремний, нитрид кремния с водородными связями, обработка в водородной плазме, пары воды и HCl при эпитаксии. Проведено сравнительное исследование МДП структур с оксидом и нитридом кремния, получены следующие выводы. (1) В исходных структурах с оксидом кремния параметры диэлектрика (заряд в диэлектрике и качество интерфейса диэлектрик-полупроводник) лучше, чем в структурах с нитридом. (2) Обработка в водородной плазме со смещением приводит к сдвигу UFB в область положительных напряжений на  $\sim 1,5$  В (отрицательный заряд  $\sim 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ). (3) Воздействие водородной плазмы со смещением уменьшает встроенный заряд в нитриде кремния и, соответственно, улучшает параметры структуры. На сегодняшний день не решена задача нейтрализации воздействия электронного облучения, которое сильно портит кремний. К особенностям воздействия нейтронного облучения на полупроводники относятся: высокая проникающая способность, зависимость сечения захвата от энергии, образование большого количества вакансий вплоть до увеличения объёма, ядерные реакции, наличие материалов с большим сечением захвата. Предложены некоторые способы повышения стойкости к нейтронному облучению: гетероэммитер, заглубление пассивной базы, повышение удельного сопротивления подложки, диэлектрическая изоляция, формирование стоков вакансий, насыщение водородом для пассивации электрически активных центров, организация условий для конформной модификации вакансационных кластеров, экраны из нитрида бора, отрицательный заряд вакансий. Гетероэммитер обладает следующей совокупностью факторов: барьер для тока дырок, увеличение коэффициента инжекции, сильнолегированная база меньшей толщины, малый размер пассивной базы.

11. Д.х.н. Кецко Валерий Александрович сообщил, что в ИОНХ РАН ведутся работы по созданию материалов и пленочных структур на основе ферритов на подложках полупроводников для устройств магнитоэлектроники. С участием автора доклада д.х.н. В.А. Кецко разработан (синтезирован) магнитный полупроводниковый материал на основе феррита магния путем частичного замещения в его кристаллической решетке ионов железа на ионы галлия. Температура Кюри полученного магнитного полупроводникового материала (оптимального) состава  $\text{Mg}(\text{Fe}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_2\text{O}_4$  около 440 К, ширина запрещённой зоны – 1,9 эВ, а значение намагниченности насыщения оказалась на 20% больше, чем у  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ . Получение комнатнотемпературных магнитных полупроводниковых материалов в плёночном виде на подложках коммерческих

полупроводников относится к фундаментальным задачам спинtronики. В данном случае их решению препятствуют две основные проблемы: высокая температура кристаллизации ферритов и рассогласование их кристаллографических параметров с материалами коммерческих подложек микроэлектроник. К исключениям можно отнести монокристаллические пленки на основе  $Y_3Fe_5O_{12}$ , эпитаксиально соглассованные с подложками типа  $Gd_3Ga_5O_{12}$ . Нами было показано, что простым методом ионно-лучевого распыления удается сформировать поликристаллические пленки состава  $Mg(Fe_{0.8}Ga_{0.2})_2O_4$  на подложках кремния, однако магнитные характеристики образцов не превышали 20% по сравнению с объемными аналогами при сохранении высокой температуры Кюри. Далее был разработан способ получения пленочных структур на основе ферритов, независимый от степени рассогласования параметров пленки и подложки и со свойствами пленок, сопоставимыми с объемными аналогами. Способ получения состоял из нескольких этапов. Первоначально на полупроводниковую подложку методом ионного распыления наносился слой феррита толщиной до 20 нм. При этом на межфазной границе были минимизированы процессы диффузии. Кристаллизация полученной структуры протекала в квазимпульсном режиме (нагрев 600<sup>0</sup>С, кристаллизация 2-3 мин и быстрое охлаждение) без разогрева подложки. Затем ионным распылением пленка феррита утонялась до толщины слоя феррита около 2 нм. После этого проводили повторное нанесение пленки феррита на зародышевый закристаллизованный слой этого же материала. Процесс кристаллизации в повторном случае протекал в квазиэпитаксиальном режиме (т.к. кристаллизация шла от зародышевого сплошного поликристаллического слоя наноразмерной толщины стехиометрического состава). При этом оказалось, что магнитные свойства полученных структур увеличились до 80 % от объемных аналогов. Получены однородные по толщине (до 1 мкм) и площади (порядка 100 кв. см) пленки ферритов на подложках полупроводников, в которых снижение уровня интерфейсных и объемных дефектов достигнуто за счет оптимизации процессов формирования, что позволило приблизиться к свойствам объемных аналогов. Для дальнейшего развития предложенного подхода и улучшения характеристик пленочных структур важную роль играет стабильность состава и морфология материала мишени в процессе длительного ионного распыления. Нами был разработан способ синтеза порошкообразного материала и изготовления из него мишней стандартным компактированием под давлением с требуемыми свойствами. Порошкообразные материалы были получены методом сжигания геля. Отличительная особенность здесь заключалась в длительности процесса синтеза, которая не превышала двух минут. Впервые описаны и установлены значения истинной температуры горения гелей. В результате получены наноразмерные (около 50 нм) порошки ферритов с унимодальным распределением частиц по размерам.

Предложенным методом получены пленки  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  и  $\text{Mg}(\text{Fe}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_2\text{O}_4$  на подложках Si, GaN и GaAs. Образцы на подложках GaN и GaAs были получены с дополнительным барьерным слоем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Одновременно слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  был использован для сглаживания рельефа поверхности методом ионно-лучевого распыления-осаждения исходно дефектной поверхности GaN. Коллективом в настоящее время продолжаются работы по созданию материалов и пленочных структур для магнито- и оптоэлектроники, разработке макетов дискретных устройств (например, магнитоплазмонный кристалл, спин-волновой фильтр и фазовращатель). В частности, исследуется возможность получения структур на основе феррогранатов висмута и церия, а также возможность формирования на их основе магнитооптических носителей информации вплоть с субмикронными планарными размерами пикселей. Проводятся мероприятия по расширению применения предложенного метода синтеза пленок ферритов и полученных пленочных структур. В ИОНХ РАН готовы к конструктивному взаимодействию по созданию элементов электронных устройств на основе пленок ферритов на подложках расширенного типоряда свойств.

12. Д.Ф.-М.Н. Логунов Михаил Владимирович сообщил, что в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН ведутся работы в области магнитооптических материалов для микро- и наноэлектроники. Выделено два основных направления приложений магнитооптических материалов: оптика-на-кристалле и сверхбыстрая электроника. Поиск решений проблемы межсоединений в ультрабольших интегральных схемах (УБИС) является одной из актуальнейших задач микроэлектроники. Традиционные решения основаны на многоуровневой разводке соединений. В УБИС сетка соединений становится чрезвычайно сложной: число уровней разводки соединений приближается к 100, а общая длина соединительных проводников системы металлизации одной микросхемы – к 100 км. Это ограничивает рост производительности, снижает надежность и повышает стоимость интегральных схем. В качестве перспективного способа решения проблемы активно исследуется возможность перехода от металлических к оптическим межсоединениям верхнего уровня УБИС, что позволит исключить перекрестные помехи, многократно повысить скорость передачи данных. Стремление реализовать все элементы оптики-на-кристалле на базе кремниевой фотоники, монолитно интегрированной с УБИС, сталкивается с проблемой создания эффективных оптических изоляторов, выполняющих функции диодов в оптических схемах. Высокие параметры оптической изоляции достигаются в невзаимных устройствах – магнитооптических изоляторах. От первых попыток реализации миниатюрных оптических изоляторов для оптики-на-кристалле с помощью бондирования магнитооптических пленок в настоящее время, благодаря технологическим успехам в синтезе гетероструктур с различными кристаллографическими параметрами слоев, перешли к разработке изоляторов на базе монолитно

интегрированных магнитооптических материалов – ферритов со структурой граната. Такие материалы в виде тонких пленок и в составе гетероструктур рассматриваются как наиболее перспективные магнитооптические материалы для невзаимных устройств оптики-на-кристалле. Это обусловлено рекордными величинами вращения плоскости поляризации света (эффекта Фарадея) в ферритах-гранатах, легированных висмутом или церием. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН совместно с коллегами из Минска найдены условия прецизионного послойного травления магнитооптических пленок методом ионно-лучевого распыления пучком ионов кислорода. Показано, что коэрцитивная сила пленок в области магнитных полей, соответствующих движению доменных границ, в результате послойного травления до 90 % толщины пленок не превышает 0,6 Э, что важно при использовании пленок в устройствах на базе доменных границ и других наноразмерных спиновых структур. Возможности использования магнитооптических материалов в реальных УБИС, нагревающихся в рабочем режиме до 100 °C и более, определяются термостабильностью эффекта Фарадея и магнитных параметров пленок. Показано, что в поликристаллических пленках ферритов-гранатов манометровых толщин, перспективных для использования в оптике-на-кристалле, эффект Фарадея может изменяться менее чем на 10% при изменении температуры на 160 °C, а наиболее высокую термостабильность коэрцитивной силы имеют пленки с температурой компенсации магнитного момента, приближающейся к температуре Нееля. Для формирования невзаимных элементов пленки структурировали, изменяя толщину по площади пленки. Ряд полученных в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН результатов относится к вопросам управления невзаимными устройствами и поиску оптимального диапазона длин волн для функционирования устройств оптики-на-кристалле. Перспективным диапазоном для оптики-на-кристалле может выступать терагерцевый диапазон, так как в масштабах микросхемы распространение терагерцевых сигналов вполне возможно. Управляемая генерация терагерцевых колебаний в магнитныхnanoструктурах открывает перспективы повышения быстродействия логических и запоминающих устройств на несколько порядков, вплоть до рабочих частот в десятки терагерц. Прорабатываются различные варианты развития устройств сверхбыстрой электроники. В качестве перспективных рассматриваются устройства спинtronики, работающие в основном с использованием спина электрона и соответствующих квазичастиц – магнонов. Отсутствие необходимости физического перемещения электронов в устройствах спинtronики позволяет на несколько порядков повысить как быстродействие, так и энергоэффективность устройств, и перейти к активному использованию диэлектрических материалов, таких как ферриты-гранаты. В настоящее время в ИРЭ им. В.А. Котельникова выполняется грант Правительства РФ для государственной поддержки исследований под руководством ведущих учёных, приглашенный профессор – А.И. Кирилюк

(Нидерланды). В рамках выполнения проекта создана лаборатория спин-фотоники и установка для исследования сверхбыстрых процессов с максимальной разрешающей способностью 20 фс. До недавнего времени в этой области большинство работ было связано с исследованием металлических плёнок в связи с доступностью их синтеза, в настоящее время интерес смешается на изучение магнитных диэлектриков. Поскольку практически единственным способом возбуждения сверхбыстрой динамики является воздействие фемтосекундными лазерными импульсами с линейной или циркулярной поляризацией, ключевыми параметрами материалов становятся их магнитооптические свойства – эффекты Фарадея, Керра, Коттона-Мутона (Фохта), магнитный дихроизм – линейный и циркулярный. В ферритах наряду с ферромагнитной (гигагерцевой) модой возможно возбуждение сверхбыстрых терагерцевых колебаний намагниченности, характерных для антиферромагнитно связанных спинов. Другой особенностью ферритов как многорешеточных магнетиков является возможность как компенсации намагниченности подрешеток, так и компенсации спинового углового момента. В последнем случае скорость доменных границ может превышать 2 км/с, граница за 1 пс смешается на несколько нм и появляется перспектива разработки сверхбыстрых устройств для нейроморфных компьютеров на базе доменных границ. Ведутся работы по поиску других магнитооптических материалов, среди которых выделим нанокомпозитные пленки как материалы с искусственно формируемыми мультиферроидными свойствами.

13. Член-корр. РАН Двуреченский Анатолий Васильевич сообщил, что в ИФП СО РАН ведутся работы по изучению радиационных явлений в пленках  $\text{CaF}_2$ . Цель – установление структуры и химического состава плёнок  $\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$ , выращиваемых при облучении быстрыми электронами как в процессе роста, так и после формирования плёнок  $\text{CaF}_2$ . Рост плёнок осуществлялся методом молекулярно-лучевой эпитаксии при температуре подложки в интервале 300–550° С. Энергия быстрых электронов составляла 20 кЭВ, плотность тока 50 мкА/см<sup>2</sup>, скорость роста 0,3 А/с. С целью подтверждения применимости структуры  $\text{CaF}_2$  в электронике продемонстрирован результат использования плёнок  $\text{CaF}_2$  для создания структур резонансно-туннельных диодов. Показано, что при росте эпитаксии  $\text{CaF}_2$  на подложке Si (111) с помощью облучения электронами наблюдается соответствие пиков в спектре комбинационного рассеяния следа пучка условиям формирования силицида  $\text{CaSi}_2$ . Таким образом, при облучении происходит изменение структуры и состава облучаемой области с образованием силицида, обладающего высокой металлической проводимостью. Также была исследована зависимость фазовых превращений от толщины эпитаксиальной пленки  $\text{CaF}_2$ . Рост плёнок с разной толщиной происходил в результате облучения. Анализ плёнок разной толщины показал, что плёнки  $\text{CaF}_2$  характеризуются тригональной ромбоэдрической модификацией TR3 TR6: либо 3, либо 6 слоёв цепочек кремния. Получен вывод: для тонких

плёнок (толщиной < 20 нм) характерен 3-х слойный трансляционный период, для более толстых – 6-ти слойный. Была исследована зависимость фазовых превращений от температуры эпитаксиальной пленки  $\text{CaF}_2$ , с толщинами 10 и 40 нм. Было показано, что характерные пики, соответствующие образованию силицидов, появляются только при температуре от 300 °C. В ходе изучения возможного механизма формирования пленки  $\text{CaSi}_2$  проведено облучение электронным пучком в процессе эпитаксиального роста  $\text{CaF}_2$  на Si. Обнаружено, что такое облучение приводит к явлению радиолиза – диссоциации молекулы  $\text{CaF}_2$  на фтор и кальций. Фтор может образовывать летучие соединения и десорбироваться с поверхности растущей пленки, а оставшийся Ca вступает в химическую связь с Si. Для подтверждения предположения сделан лазерный отжиг пленок  $\text{CaF}_2$  на Si (111). В результате были обнаружены наноструктуры округлой формы, усеченные наносферы – полости, которые заполнены молекулами газа  $\text{Si}_2\text{F}_6$ .

14. Д.х.н. Дьячков Павел Николаевич сообщил, что в ИОНХ РАН ведутся исследования электронного строения и применения нанотрубок в качестве материалов наноэлектроники. Нанотрубки обнаружены в 1991 г., в 1997 г. обнаружили их дифференциацию на полупроводниковые и металлические. Разные нанотрубки обладают различными электрическими свойствами, в частности нанотрубка может обладать гетеропереходом металл-полупроводник. В 2013 г. опубликована работа о создании компьютера, все транзисторы которого основаны на углеродных нанотрубках. В ИОНХ РАН поставлена задача разработать более точный современный неэмпирический метод расчёта электронных свойств нанотрубок. В качестве исходного выбран метод присоединённых плоских волн: в области атомов потенциал совпадает с атомами, между атомами потенциал постоянный, движение ограничено двумя непроницаемыми цилиндрическими барьерами. Электронная структура нанотрубок определяется свободным движением электронов в цилиндрическом пространстве с рассеянием на атомах и с отражениями от цилиндрических стенок. Необходимо решить уравнение Шредингера внутри атомных сфер и совместить решения на границах сфер. Вычислить интервал перекрывания и гамильтониан, разработать компьютерную программу. Первый расчёт выполнен в ИОНХ РАН в 2002 г., результат использовали для описания некоторых особенностей оптического спектра как металлических, так и для полупроводниковых трубок. Выполнено расширение решения для одностенных нанотрубок на двустенные с помощью учета туннелирования между внутренним и внешним слоем. В ходе измерений электрических свойств комбинации нанотрубки и кристаллической матрицы оказалось, что во всех случаях наблюдалась только металлические свойства. Для объяснения создана модель с непроницаемым барьером внутри трубы и конечным барьером в матрице, получили что в результате возмущения зонной структуры щель схлопывается. В хиральных нанотрубках трансляционные ячейки могут быть бесконечными.

В ИОНХ РАН впервые выполнены неэмпирические расчёты таких трубок с учетом не только трансляционной, но и винтовой симметрии – выведена формула цилиндрической волны. Рассчитаны трубы (11,3) с 652 атомами с помощью всего 180 базисных функций и погрешностью 0,01 эВ, а также трубка (100,99) с 118 804 атомами. При наличии дефектов в нанотрубках отсутствует симметрия. В ИОНХ РАН известная функция Грина сопряжена с новым методом цилиндрических волн, благодаря чему возможен расчет структуры любой трубы: с дефектом и без. Выполнен расчет зонной структуры при скручивании и растяжении нанотрубки, также получены результаты замещения углерода: в случае азота ширина запрещённой зоны становится уже, в случае бора запрещённая зона исчезает. Для анализа спин-орбитального взаимодействия зонная структура рассчитана путем учета релятивистских эффектов и увеличением базиса вдвое. Полученный метод пригоден не только к углеродным системам, но и к кремниевым, бор-азотным и другим. Расчеты показали, что все золотые нанотрубки должны быть металлическими независимо от их геометрии. Также рассчитали, что при пропускании переменного тока нанотрубки будут излучать в рентгеновской области. Возможно решение и обратной задачи: помещение золотого соленоида в магнитное поле вызывает в нем токи.

15. Д.х.н. Чесноков Сергей Артурович сделал сообщение о существующих и инновационных фотолитографических процессах. Фотолитография предназначена для создания с помощью излучения на поверхности подложки рельефа заданной геометрии и толщины, основное применение – микроэлектроника. В проекционной фотолитографии критический размер образующегося на поверхности подложки элемента пропорционален длине волны. Так, для получения структур размером  $\sim 10$  нм используется экстремальный ультрафиолет с длиной волны 13.5 нм. В то же время есть подходы к созданию технологий получения на подложке субмикронных структур с использованием наоборот длинноволнового излучения. Первый. Двухволновая фотополимеризация. В состав фоторезиста входит фотоинициатор чувствительный в видимом диапазоне и фотоингибитор чувствительный к ближнему УФ. Это позволяет сузить область фотополимеризации резиста и сформировать структуры размером до 64 нм. Второй. Двухфотонная фотополимеризация. Особенностью двухфотонной фотополимеризации является зависимость скорости реакции от интенсивности излучения в квадрате в отличие от зависимости в степени 0.5 – 1.0 для однофотонной фотополимеризации. Процесс происходит только в узкой зоне инициирующего луча, где интенсивности излучения достаточно для поглощения молекулой фотоинициатора сразу двух квантов света. В результате при использовании излучения титан-сапфирового лазера  $\lambda \sim 800$  нм на промышленно выпускаемых нанолитографах получают структуры размером  $\sim 100$  нм. Третий. Комбинация процессов двухфотонной и двухволновой фотополимеризации. Она приводит

к увеличению разрешающей способности фоторезиста еще на порядок. Экспериментально получены элементы структур толщиной 9 нм. Группа учёных из ИМХ РАН, ФИАН и МФТИ занимается исследованиями в области двухфотонной фотополимеризации. Ведётся разработка новых фотоинициаторов для фоторезистов и исследование их свойств на промышленных нанолитографах и нанолитографах собственной разработки ФИАН и МФТИ. На основе имидазолсодержащих фотоинициаторов создан фоторезист способный к фотополимеризации в одно- и двухфотонном режиме. Оптимизация состава фотоинициирующей системы проведена на основе обнаруженной взаимосвязи между энергетическим порогом двухфотонной фотополимеризации и скоростью однофотонных процессов. Фоторезист отличается высокой стабильностью и позволяет записыватьnanoструктуры с размером единичного элемента 100 нм. Полученные результаты опубликованы в журнале с кварталем Q1 с вынесением основной информации на обложку. На текущем этапе исследований проведена модификация фотоинициатора с целью снижения вероятности диффузии первичного инициирующего радикала из зоны засветки, что привело к существенному увеличению разрешающей способности фоторезиста. Экспериментально получены полимерные структуры с минимальным размером элемента 65 нм. В дальнейшем для увеличения разрешающей способности фоторезистов планируется создание материалов, работающих в двухфотонном и фвухлучевом режимах записи на оригинальных фотоинициирующих и фотоингибирующих системах.

16. К.ф.-м.н. Кобелева Светлана Петровна сообщила, что на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ «МИСиС» ведутся работы в области изучения свойств соединений  $A_2B_6$  и возможности получения их из паровой фазы. Материалы CdO, ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe, как и в 1950 – 1960 гг., востребованы, но, в связи с их сложностью недостаточно интересуют промышленность. Предельные концентрации на этих материалах достигнуты за счет использования легирующих примесей. Самые широкозонные из них – ZnO, ZnS, – получаются р-типа, что связано с особенностями жизни точечных дефектов. Для материалов с шириной запрещенной зоны более 2,5 эВ энергия образования донорного эффекта меньше – порядка 2 эВ. Решетке оказывается выгоднее создать донорный дефект, в результате создание р-типа невозможно, в то время как для светоизлучающих структур необходимы р-п переходы. Другая проблема – фотоприемные устройства, где нужны высокие сопротивления. При наличии сопоставимой области гомогенности материалов, точечные дефекты формируют отклонение. При получении материала высокотемпературными расплавными методами на границах получается материал с максимальной концентрацией свободного носителя заряда только за счет собственных дефектов, при этом их концентрация весьма высока. Получение качественных приборов с использованием жидкофазных методов выращивания или их вариаций в таких материалах затруднено. Применяются

парофазные методы выращивания, при этом испарения в паровой фазе полностью разлагаются на металл и двухатомные молекулы. Испарения в небольшом объеме на границе области гомогенности состоят практически из одного основного компонента. Учитывая, что при испарении с избытком теллура испаряется в основном теллур, при испарении с избытком кадмия – в основном кадмий, то существует состав с конгруэнтным испарением и отношением для парциального давления кадмия и теллура равным 2, так называемый состав  $P_{\min}$ . Оказалось, что такой состав имеет минимальную гибсоновскую энергию и соответствует минимальному общему давлению, которое возможно в системе этого равновесия твердое тело – пар. Линию р-минимума легко посчитать по константе испарения экспериментально, она может лежать внутри или вне области гомогенности. При обсуждении стехиометрии в реальных кристаллах важно указывать точность, при этом такой состав не обязательно должен обладать минимальным количеством дефектов. На указанной кафедре была поставлена большая работа, которая должна была начинаться синтезом соединения  $A_2B_6$  и заканчиваться выращиванием монокристалла. Но она закончилась выращиванием фоточувствительных и люминисцентных пленок. В 1970-е гг. была поставлена технология – метод многократной возгонки-сублимации, позволяющий в одном реакторе из трубы длиной 3 м синтезировать и очищать приведенный к составу  $P_{\min}$  материал. На примере CdTe было абсолютно доказано, что материал, который закладывается соответствует  $P_{\min}$  при температуре, где они были собраны в ампуле. При использовании метода многократной пресублимации получают максимально на данное время очищенные от остаточных примесей широкозонные соединения  $A_2B_6$ , одновременно состав по основным компонентам приводится к конгруэнтно сублимирующему при 600-650 °С. Это позволяет использовать такие материалы для выращивания пленок с высокой фоточувствительностью и экситонными спектрами фотолюминисценции. Предполагается возможность выращивания монокристаллов таких соединений из паровой фазы методами термического испарения. Все проведенные исследования по технологии многократной пресублимации носят исследовательский характер, при этом авторы считают полезным внедрение описанного метода в промышленное производство.

17. К.Ф.-м.н. Алмаев Алексей Викторович сообщил, что в НИТГУ совместно с ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ННГУ им. Н.И. Лобачевского, объединенных в консорциум, ведутся исследования элементов силовой и сенсорной электроники на основе оксида галлия. В текущем году опубликован обзор по ионной имплантации  $\beta$ - $Ga_2O_3$ . Основные направления работ по  $\beta$ - $Ga_2O_3$  – разработка полевых транзисторов и диодов с барьером Шоттки для силовой электроники, солнечно-слепые детекторы УФ-излучения и газовые сенсоры. Основное преимущество  $\beta$ - $Ga_2O_3$ , кроме стабильности, – большая ширина запрещённой зоны, позволяющая достичь теоретическую критическую напряжённость электрического поля около

8 МВ/см, что превышает аналогичный параметр для Si, GaAs, SiC, GaN. В ряде работ предлагается разрабатывать приборы для транспорта, альтернативной энергетики и специального применения. По ряду параметров  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> превышает другие материалы, однако обладает низкой теплопроводностью и высокой стоимостью подложки. Заделом указанного консорциума являются (1) синтез и исследование  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (2) отработка режимов и исследование ионной имплантации, в том числе с целью создания функциональных областей в силовых MOSFET и SBD на основе  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Зарубежными учеными было показано, что ионная имплантация гораздо выгоднее для создания функциональных областей в оксиде галлия по сравнению с другими методами. Для создания низкоомных областей используют ионы кремния, азота и магния для высокоомных областей, имеются работы с использованием аргона. В данный момент наблюдается соревнование между некоторыми коллективами, в очередных публикациях появляются новые характеристики приборов. Полевые транзисторы демонстрировали отсутствие дрейфа характеристик при нагреве до 300 °С. Компания Perfect Crystal совместно с ФТИ им. А.Ф. Иоффе научились первыми в мире выращивать метастабильные фазы на подложках с профилированной поверхностью, имеют большой задел к синтезу на GaN. Недостатками  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> являются низкая теплопроводность и моноклинная кристаллическая решетка. Для их компенсации используют метастабильные фазы, например,  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ширина запрещенной зоны  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5,3 эВ позволяет увеличить напряженность электрического поля до 10 МВ/см. Представляет интерес исследование твердых растворов и создание  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Ir<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Однако в НИТГУ считают более перспективной гетероструктуру  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Gr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обладающим низким несоответствием кристаллических решеток (0,4 %): совместно с ФТИ им. А.Ф. Иоффе созданы омические контакты и проведены предварительные исследования  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ $\alpha$ -Gr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В ННГУ им. Н.И. Лобачевского изучают влияние ионной имплантации на пленку  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с включениями  $\kappa(\epsilon)$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: показано, что воздействие ионной имплантации позволяет получить гетероструктуры и привести к деформациям самого кристалла. Для псевдогексагональной орторомбической структуры  $\kappa(\epsilon)$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показана возможность создания функциональных областей силовых приборов при помощи диффузии атомов примесей. В этом направлении работает Университет Пармы (Италия), в ФТИ им. Иоффе разработана технология синтеза такой структуры. В ННГУ им. Н.И. Лобачевского разработан метод синтезаnanoструктур  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> путем имплантации галлия в матрицу Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, с целью применения в УФ солнечно-слепых детекторах. В НИТГУ для этих целей создавались структуры на основе тонких пленок  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нанесенных ВЧ магнетронным распылением с последующим высокотемпературным отжигом. Разработано несколько конструкций приборов: детекторы второго (в НИТГУ) и третьего (в ФТИ им. Иоффе) типов обладают высокими фотоэлектрическими характеристиками. Также созданы газовые сенсоры

на основе  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Разработан детектор кислорода окружающей среды с высоким динамическим диапазоном и временем отклика менее 20 с. С помощью модифицированной оксидом хрома пленки имеется возможность управлять чувствительностью и снизить рабочие температуры до 300-500 °С. Методом HVPE на сапфире получены сенсоры газов на основе монофазных полиморфных пленок оксида галлия. Обнаружена сильная зависимость газочувствительных свойств от концентрации донорной примеси Sn, в результате значительно снижены рабочие температуры. В НИТГУ недавно было показано, что для гетерофазных полиморфных структур оксида галлия имеется чувствительность к газам в области низких температур, начиная с комнатных, благодаря наличию гетероперехода на границе полиморфов  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ . В итоге  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  признан оптимальным для силовой электроники материалом, имеющим уникальные преимущества перед другими перспективными широкозонными полупроводниковыми материалами – GaN и SiC. В России фронт работ в области исследования и применения  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  недостаточен и представлен пока лишь единичными коллективами. Участникам указанного консорциума представляется возможным реализовать программу по созданию прототипов силовых полевых транзисторов и диодов на основе  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  на имеющейся научно-исследовательской базе. С учетом недостатков стабильной фазы  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  целесообразным является развитие работ по синтезу и исследованию метастабильных фаз  $\alpha$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  и  $\kappa(\epsilon)$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  для создания приборов силовой электроники. Созданы прототипы газовых сенсоров и солнечно-слепых УФ детекторов на основе полиморфных структур оксида галлия. Необходимы дальнейшие исследования, направленные на улучшение качества материала, конструктивный дизайн, установление ключевых закономерностей для разработки конкурентоспособных приборов, в том числе с применением ключевой для современной микроэлектроники технологии – ионной имплантации.

18. В заключительном слове председатель Совета, академик РАН Г.Я. Красников поблагодарил авторов за высокий научный уровень докладов и выразил уверенность в интеграции усилий в части развития материалов для микро- и наноэлектроники между организациями, представленными членами Совета, приглашенными учеными и специалистами.

**РЕШИЛИ:**

1. Принять к сведению полученную в ходе заседания информацию.
2. Рекомендовать отечественным организациям, заинтересованным в участии в НИОКР по материалам для микро- и наноэлектроники:
  - использовать механизм субсидий Минпромторга России на обеспечение части затрат, реализующимся путем рассылки проекта постановления Правительства Российской Федерации об утверждении «Правил предоставления из федерального бюджета субсидий российским организациям...» с просьбой

предоставить информацию по установленной форме о планируемой НИОКР и последующим проведением конкурсного отбора (например, в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 декабря 2020 г. № 2136 выпущен приказ Минпромторга России от 18 мая 2021 г. № 1817 о проведении с 18 мая 2021 г. по 30 июня 2021 г. конкурсного отбора в том числе по направлению «специальные материалы»: высокочистые химические вещества и реагенты, специальные газы и смеси газов, металлоорганические соединения; комплекс материалов для литографии; полупроводниковые материалы; эпитаксиальные структуры кремния; высокочистые металлы и сплавы, мишени, композиционные металлические материалы; технологические материалы; композиционные материалы, керамические материалы, диэлектрики и другие);  
– участвовать в импортозамещении материалов для микро- и наноэлектроники (комплекс материалов для литографии; высокочистые химические вещества; эпитаксиальные структуры кремния; прочее) путем направления предложений по выполнению НИОКР в адрес начальника отдела специальных материалов АО «НИИМЭ» Варламова Дениса Александровича dvarlamov@niime.ru.

3. Членам Совета направить в адрес ученого секретаря Совета предложения по докладам на будущие заседания Совета по темам: «Состояние и перспективы развития электронного машиностроения» (09.02.2021 г.), «Развитие методов диагностики материалов и элементной базы» (11.2021 г.), «Нейроморфные системы и энергонезависимая память» (02.2022 г.).
4. Авторам докладов рекомендовать предоставить ученому секретарю Совета тезисы доклада для публикации в сборнике трудов Совета, презентации к докладам, освобожденные от конфиденциальной информации – для публикации на сайте Совета.

Ученый секретарь Совета,  
к.т.н.

Тельминов О.А.