

Отзыв официального оппонента на диссертацию
Коробейникова Игоря Витальевича
«Термоэлектрические явления в твердых растворах Si-Ge и (BiSb)₂(Te,Se)₃ при
высоком давлении»,

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников»

Представляемая Игорем Витальевичем работа посвящена экспериментальному изучению влияния высокого давления (до 20 ГПа) на термоэлектрические и электронные характеристики полупроводниковых материалов: кремния и германия, их твердых растворов, а также бинарных полупроводников V-VI группы и их твердых растворов. Значительное внимание уделено образованию новых фаз и вопросам фазовых превращений, связанных с переходом полупроводник-металл. Основной упор при этом сделан на развитии методов измерения термоэлектрических характеристик образцов для выявления условий фазовых превращений и получения на базе традиционных полупроводников новых материалов, обладающих не только иной кристаллической структурой, но и проявляющих новые электронные свойства, присущие металлам и полуметаллам.

Данное направление работ, связанное с исследованиями полупроводниковых материалов под действием высокого давления и анализ их фазовых превращений, является приоритетным для данного коллектива исследователей и ведется уже достаточно длительное время. Несмотря на это исследования выполненные Коробейниковым И.В. представляют значительную ценность, так как исследования были проведены на перспективных для электроники материалах и нацелены на получении оригинальных результатов. В значительной степени это связано с удачным сочетанием используемого и активно развиваемого измерительного метода на базе самостоятельно разрабатываемого экспериментального оборудования, и параллельно развиваемых аналитических методов исследования кристаллической структуры формируемых фаз. Все это способствовало, в ходе выполнения данной работы, существенному развитию понимания кристаллической структуры материалов и особенностей их электронных характеристик в условиях влияния на кристалл значительных деформаций. Данные знания имеют фундаментальное значение и важны не только для создания на базе традиционных материалов, какими являются кремний и германий, новых материалов, обладающих уникальными свойствами, но и для лучшего понимания влияния давления на структуру дефектов в них и их электронные свойства. Это особенно актуально в связи с интересом проявляемым сегодня к гетероэпитаксиальным структурам, содержащим упруго напряженные слои с высокоподвижными носителями заряда для устройств быстродействующей транзисторной электроники. В связи со сложностью, стоящих перед исследователями задач, направленных на широкое использование в современных устройствах электроники напряженных слоев и нанокристаллов, работы по совершенствованию методов создания напряжений и методов анализа как структуры, так и разнообразных свойств рассматриваемых систем несомненно заслуживают высокой оценки и являются **актуальными** для развития физики полупроводников и физики фазовых переходов и для базирующихся на наблюдаемых эффектах практических приложениях. Актуальность выбранной автором темы исследований подтверждается многочисленными выступлениями автора диссертации на Российских и зарубежных конференциях и публикациями его трудов в ведущих специализированных Рос-

сийских и зарубежных изданиях. Полученные данные об изменениях электронных свойств материалов на базе элементов 4-ой группы и их твердых растворов под давлением не только расширяют научные знания об особенностях влияния высокого давления на термоэлектрические и электронные свойства полупроводниковых материалов, но и могут быть использованы в технологиях производства различных устройств микро и наноэлектроники.

Основные результаты работы с оценкой их новизны

Ниже перечислим основные результаты исследований, полученные автором диссертации в ходе выполнения работы. Первые две главы являются обзорными. В первой главе обсуждаются более ранние работы, выполненные авторским коллективом, где выполнялась данная диссертационная работа, по исследованию фазовых переходов в кристаллах кремния. Данный обзор предшествующих работ позволяет оценить новизну проведенных автором диссертации исследований и его вклад в разработку поставленных задач. Во второй главе представлены характеристики использованного для проведения барических и термоэлектрических экспериментов оборудование, и представлены характеристики использованных в экспериментах образцов с кратким описанием методов их получения.

Среди наиболее важных результатов, представленных в последующих главах и претендующих на оригинальность, необходимо выделить следующие.

В третьей главе представлены полученные автором новые данные по зависимостям измеряемой термоэдс от давления, полученные для разных фаз кремния и германия при комнатной температуре. Что касается термоэдс монокристаллов кремния, обсуждаемой в разделе 3.1, автором для объяснения наблюдаемого положительного знака термоэдс металлических фаз высокого давления была использована модель d-зоны, предложенная ранее для описания термоэдс металлов. Проведенные автором оценки не только объяснили знак наблюдаемой термоэдс, но и позволили понять причину повышенных, по сравнению с другими металлическими фазами, значений термоэдс полуметаллической фазы Si-III.

Остальные параграфы данной главы посвящены исследованию поведения термоэдс германия под высоким давлением. Нужно отметить, весьма заметное отличие в поведении под давлением (причем для всего диапазона прикладываемых давлений) различных фаз германия. В работе основное внимание уделено поведению с давлением исходной кубической фазы Ge-I, фазовому переходу в металлическую фазу Ge-II и метастабильной тетрагональной фазе Ge-III. Показано, что поведение фаз Ge-III и Si-III существенно различается, в отличие от поведения металлических фаз Ge-II и Si-II. Диссертантом на серии слабо легированных образцов германия с проводимостью, обусловленной фоновой примесью, было установлено, что прикладываемое давление, независимо от исходной проводимости образцов Ge-I, сдвигает проводимость к *p*-типу при этом *p*-тип проводимости сохранялся при переходе в металлическую фазу β -Sn (Ge—II). Наблюдаемая инверсия типа проводимости автором при этом связывается исключительно с присутствием в прессе негидростатических деформаций, приводящей к расщеплению дырочных подзон, и доминирующим вкладом в проводимость заряда «легких» дырок с более высокой подвижностью. *(Вообще-то, дырки становятся легкими, только для определенных кристаллографических направлений и зависят от вида деформации)*. Инверсия знака *n*–*p* обратима, если приложенное давление не

превышает 2 ГПа, и становится необратимой, если приложенное давление больше, чем 2 ГПа.

Полиморфная модификация германия Ge-III, возникающая после снятия давления, как продемонстрировано автором диссертации характеризуется полупроводниковыми свойствами электронного типа проводимости с шириной запрещенной зоны около 0.7 эВ в отличие от фазы Si-III, являющейся полуметаллом с перекрытием зон на уровне 0.3эВ. Автором представлены данные, хотя и не очень подробные, по исследованию этой фазы несколькими методами.

В главе 4 автором диссертации впервые изучены характеристики доступных (правда, в очень узком диапазоне составов) монокристаллов твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, подвергнутых гидростатическому сжатию. Твердые растворы SiGe, в том числе подвергнутые деформациям, за последние десятилетия получили широкое признание и сегодня, наряду с Si и Ge являются важнейшими материалами микроэлектроники. Проводится сопоставление характеристик сплавов с характеристиками соответствующих элементарных полупроводников Si и Ge.

Показано, что твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0.87 \leq x \leq 0.98$) с преобладанием германия при приложении давления без изменения исходной кристаллической структуры Ge-I и последующей декомпрессии характеризуются изменением дефектной структуры кристалла, с образованием стабильной системы дополнительных акцепторных центров. Нужно отметить, что появление дополнительных примесных центров *p*-типа проводимости, характерно и для гетероэпитаксиальных SiGe слоев, выращиваемых на кремнии и подверженных двусосному сжатию. В диссертации показано также, что твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с преобладанием германия при декомпрессии после приложения высоких давлений выше 13 ГПа переходят в полупроводниковую фазу со структурой типа Ge-III. Величина термоЭДС в этой фазе зависит от содержания кремния в сплаве и меняется в пределах от -300 мкВ/К (при $x = 0.98$) до +170 мкВ/К ($x = 0.87$), то есть характеризуется появлением примесных центров обоих типов (донорных и акцепторных).

В твердых растворах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0.014 \leq x \leq 0.026$) с преобладанием кремния тип электрической проводимости может изменяться с *p*- на *n*-тип под действием относительно невысоких давлений (в интервале 0.3-1.5 ГПа). Нижняя граница этого диапазона соответствует давлениям, наблюдаемым в гетероэпитаксиальных слоях. Данное изменение может быть, как обратимым, так и необратимым, в зависимости от величины приложенного давления, что естественно связать с образованием в структуре при сжатии дефектов решетки

В твердых растворах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ дырочного типа проводимости с доминированием кремниевой компоненты тип электрической проводимости также менялся с *p*- на *n*-тип под действием относительно невысоких нагрузок (до 1 ГПа) и эффект был обратим. Это может быть связано либо с изменением под давлением (негидростатическим) зонной структуры, либо с движением уровней примеси относительно уровня Ферми). Нужно отметить, что факт возрастания электронной подвижности с приложением одноосной нагрузки в напряженных слоях Si, сегодня достаточно хорошо изучен и активно применяется при изготовлении Si псевдоморфных транзисторов. В гетероэпитаксиальных слоях это увеличение обычно составляет несколько десятков процентов. Автор продемонстрировал, что приложение более высоких нагрузок, по сравнению с теми, что реализуются в гетероструктурах, позволяет уве-

личить проводимость образцов в несколько раз (возможно, в том числе и за счет разной зависимости энергий активации примесных центров р- и n-типа от величины нагрузки), что представляет значительный интерес для практики. *Нужно отметить, однако, что в эксперименте были использованы компенсированные, а не предельно «чистые» образцы. На это указывает и тот факт, что в образцах насыщенных водородом (с.84), в которых имеет место пассивация оборванных связей) сменена типа проводимости не наблюдалась.*

Необратимость наблюдаемых эффектов при приложении более высоких нагрузок очевидно связана с появлением дополнительных дефектов, что отмечается автором. Можно предположить, что неоднородность сжатия приводит к сдвиговым деформациям и появлению протяженных дефектов (дислокаций), которые в кремнии и в сплавах со стороны кремния легко выявляются, например методом дислокационной люминесценции. Однако автор данную методику для исследования образцов не применял, возможно из-за низкого качества последних. Соответственно представленная интерпретация наблюдаемых эффектов вызывает вопросы, основные из которых отмечены в разделе «замечания».

Значительное внимание в работе уделено измерениям спектров комбинационного рассеяния света. Нужно отметить, что данная методика применительно к сплавам SiGe является одним из основных методов, наряду с рентгеновской дифракцией, оценки состава и величины деформации в исследуемом материале. Коробейниковым И.В. представлен довольно обширный экспериментальный материал по спектрам КРС нескольких структур и их зависимостей от давления. Результаты измерений довольно хорошо согласуются с данными других измерений, хотя и есть ряд особенностей. Особенно интересным является поведение фононных линий под действием сильных нагрузок. Механизмы проявления последних в работе, однако, никак не обсуждаются и не комментируются.

В 5-ой главе представлено большое количество измерений, выполненных на поликристаллических соединениях A_2B_6 разнообразного состава. Показано, что кристалл $(Bi_{0.25}, Sb_{0.75})_2Te_3$ имеет ромбоэдрическую структуру типа Bi_2Te_3 , обладает достаточно хорошими термоэлектрическими характеристиками и остается стабильным вплоть до давлений 9.5 ГПа. При более высоких давлениях наблюдаются два фазовых перехода: сначала в моноклинную структуру с симметрией $C2/m$, а затем, выше 18 ГПа, в моноклинную фазу с симметрией $C2/c$. Однако большая часть результатов данной главы носит зоологический характер без детального анализа и обсуждения многочисленных наблюдаемых нюансов.

Для всех глав диссертации, вместо простейших качественных рассуждений, хотелось бы все-таки видеть какие-либо закономерности, либо даже количественные характеристики, которые могли бы пригодиться при идентификации возможных при деформациях нарушений кристаллической структуры образцов.

В целом все же можно констатировать, что полученные автором диссертации результаты являются новыми научными знаниями как в области физики сильно напряженных полупроводниковых материалов, так и в области физики фазовых переходов.

Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Можно констатировать, что полученные автором диссертации новые результаты, а также сформулированные на их основе положения и выводы обладают высокой степенью

достоверности и обоснованности. Достоверность сделанных выводов подтверждается авторитетом автора диссертации и научных групп, где выполнялась работа, а также высоким уровнем используемой для проведения экспериментов аппаратуры. Полученные автором диссертации экспериментальные зависимости сопоставляются с результатами численного анализа и нашли подтверждение в работах, выполненных в других исследовательских коллективах. В диссертации представлен достаточно полный обзор работ по использованию давления для модификации свойств кристаллов кремния. Результаты измерений, выполненных методом термоэдс, сопоставляются с данными дифракционного анализа и комбинационного рассеяния света, полученными с использованием самого современного оборудования.

Основные результаты диссертации опубликованы в многочисленных статьях, как в англоязычных журналах, так и в Российских изданиях, включенных в перечень ВАК. Они также обсуждались на многочисленных Российских и Международных конференциях и симпозиумах и хорошо известны научной общественности.

Практическая значимость

Полученные результаты проведенных автором диссертации исследований имеют, наряду с фундаментальным, прикладной характер. Они в значительной степени расширяют наши знания о поведении кристаллов кремния, германия и их сплавов в условиях воздействия на них высоких давлений, способствуют развитию методов гетероэпитаксии на кремнии слоев германия и твердых растворов SiGe, широко применяемых в последние годы в быстро переключающих устройствах микроэлектроники. *В гетероэпитаксиальных напряженных слоях псевдоморфной системы Si-Ge нагрузки достигают обычно величины порядка нескольких десятых долей Гпа, а не 20 Гпа, как указано автором на стр.101.* Несмотря на то, что твердые растворы SiGe, наряду с соединениями на основе материалов A₂B₆, уже давно используются в качестве тензодатчиков, поиск новых стабильных структурных фаз, обладающих повышенной тензочувствительностью, представляет значительный интерес для практики.

Результаты диссертации могут быть использованы в организациях, занимающихся проблемами напряженных Si-Ge гетероэпитаксиальных структур и фазовых переходов: ИФП СО РАН (г.Новосибирск), ИПФ РАН (г. Нижний Новгород), ИФТТ РАН, ИОФ РАН и др. (Москва и Моск. обл), ИФП РАН им. Иоффе (Санкт Петербург), ЮФУ (Ростов-на-Дону) и т. д.

Замечания по диссертационной работе

Замечания к главе 3.

Переходы от одного типа проводимости к другому автор связывает с недостатками используемого экспериментального оборудования и возможному появлению в образцах одноосных деформаций, снимающих вырождение подзон в критических точках зоны Бриллюэна (главным образом в валентной зоне). При этом не обсуждается возможность расщепления электронных долин и влияние на знак термоэдс электронов в разных долинах и связанное с этим эффектом изменение междолинного рассеяния. Важным является и то, под каким углом к главным осям кристалла направлены возникающие одноосные (а возможно и сдви-

говые) деформации, так как массы электронов (тяжелая или легкая сильно зависят не только от величины деформации, но и от направления протекания тока).

Необратимость наблюдаемых кривых указывает на то, что при нагрузках в кристаллах германия возникает проскальзывание атомных плоскостей приводящих к появлению дислокаций. Последние, как известно, образуют проводящие каналы р-типа проводимости. Поэтому высказанные предположения относительно механизмов реально наблюдаемых особенностей можно считать лишь попытками их объяснения на качественном уровне.

Очевидно, что для того, чтобы ответить на все возникающие вопросы требуется знание характеристик исходных материалов, уровень фоновой примеси в них, степень компенсации. Из эксперимента видно, что разные образцы обладают отличными характеристиками, трудно контролируемые в технологическом процессе. Это приводит к заметному разбросу измеряемых величин. Кроме указанной причины, объясняющей наблюдаемый переход с ростом давления к р-типу проводимости фаз Ge-I и Ge-II, можно указать и изменение с ростом давления энергий активации уровней неконтролируемой примеси (в том числе и уровней глубоких центров, связанных с различными вакансионными комплексами). Возможно, даже одни только гидростатические нагрузки (то есть без привлечения для объяснения наблюдаемого эффекта не гидростатических нагрузок) могут привести к смещению положения уровня Ферми в ту или иную сторону и соответственно к изменению типа проводимости. При приложении сильных нагрузок и возможного появления, как признается сам автор, пусть и незначительной неоднородной деформации, не исключена и вероятность образования в Ge дислокаций, обусловленных смещением межкуристаллических плоскостей, и которые, как известно, могут приводить к образованию каналов дырочного типа проводимости. Влияние на характеристики Ge после снятия нагрузок генерируемых дефектов решетки (дислокаций, комплексов «междуузельный атом – вакансия» и др.) указывает, в частности, появление в структуре необратимых эффектов, таких как смена типа проводимости с n на p в Ge-I и наоборот с p на n в Ge-III. Все это указывает на необходимость более тщательного изучения не только кристаллической структуры решетки, но и природы образующихся при деформации дефектов.

Что же касается метастабильной полученной после декомпрессии фазы Ge-III, и изучаемой автором диссертации с использованием ряда методов видно, что полученный новый материал по структуре и характеристикам весьма далек от своего предшественника (Ge-I). В частности, из приведенных электронограмм видно, что полученный материал является далеко не текстурированным поликристаллом. Из представленных электронограмм видно, что автор имел дело с поликристаллами, обладающими достаточно сильной разориентацией зерен. На это указывает и появление высокой плотности состояний в запрещенной зоне, возможно связанных с границами зерен, приводящей к высокой концентрации электронов, соответственно повышенной проводимости и размытию краев зон (проводимости и валентной). Этим же можно объяснить и наблюдаемый вид оптических спектров поглощения, а возможно и спектров комбинационного рассеяния света, приведенных на рис. 3.12в,д. Так спектры КРС характеризуются весьма большим числом фоновых линий и их интерпретация требует проведения специальных расчетов. Частоты оптических фононов в общем случае характеризуются длинами связей и могут зависеть не только от ориентации кристалла при измерении, но и с неоднородными деформациями в кристалле. Соответственно и прямозонность

изучаемой фазы Ge-III, основанная только на проводимых расчетах, также пока остается под вопросом. Возможно, ответить на этот вопрос можно было бы, используя более надежные, например, модуляционные методики, позволяющие более четко разделять прямые и непрямые переходы.

Замечания к главе 4.

Изменение проводимости кристаллов твердого раствора с p - на n -тип под действием относительно невысоких давлений около 0.3-1.5 ГПа может быть, как обратимым, так и необратимым, в зависимости от величины приложенного давления. Это указывает на важную роль примесной атмосферы в кристаллах. В кристаллах со стороны кремния, выращенных методом Чохральского, важную роль могут играть комплексы кислорода и углерода.

В то же время в образцах, полученных со стороны германия, последние не играют заметной роли, в том числе из-за их низкой растворимости в матрице германия. Но возможно более важную роль могут играть дислокации (энергия образования их в германии ниже, чем в кремнии) и границы зерен, так как использованные образцы являлись поликристаллами. К сожалению детальная информация о характеристиках исходных образцов в диссертации отсутствует и многие выводы основана только на измерениях термоэдс. В тоже время автор говорит о собственной проводимости исходных образцов (см. стр 74). Вообще то странно говорить о собственных характеристиках материалов, имея дело с примесными компенсированными материалами, в которых под действием деформации возникают еще и дополнительные дефекты p -типа. Скорее эти полупроводники надо рассматривать не как собственные полупроводники, а как системы с большим количеством акцепторных центров.

В образцах твердых растворов со стороны кремния тип проводимости с приложением относительно невысоких нагрузок (до 1 ГПа) менялся с p - на n -тип и эффект был обратим. Автор диссертации вскользь связывает наблюдаемый эффект с изменением под давлением (негидростатическим) зонной структуры материала аналогично предыдущему случаю, с расщеплением дырочных подзон. Однако не указано ни направление одноосной деформации ни ориентация вырезанных образцов. Последние, как показано на рис.4.7 имеют весьма произвольную форму. Не указаны и расположения осей образцов в прессе относительно наковальни. При одноосном сжатии (если оно возникает) дырочные подзоны кремния обычно смещаются в сторону увеличения концентрации тяжелых, а не легких дырок, которых и без того очень мало (4%). Поэтому естественно наблюдаемый эффект связать с расщеплением электронных долин и возрастанием проводимости электронного типа за счет увеличения вклада электронов с легкой электронной массой. Именно этот эффект применяется в транзисторной электронике (в полевых Si гетеротранзисторах с напряженным Si каналом) для увеличения электронной подвижности. Поэтому, на мой взгляд, заявлять в выводах диссертации об обнаружении нового эффекта в результате воздействия на кристалл небольших нагрузок слишком слишком претензиозно.

При высоких нагрузках и последующей декомпрессии образцов возникают фазы аналогичные фазам Ge-III (Si-III), что подтверждено методами рентгенографии (полученные снимки говорят о поликристаллической структуре полученных образцов) и комбинационного рассеяния света. Последние спектры (точнее зависимость положения линий в них от состава сплава), однако, в диссертации констатируются без детального обсуждения. В поведе-

нии отдельных линий спектра, в частности, имеются и некоторые интересные особенности. Так непонятен наблюдаемый сдвиг линии Ge-Ge в сплавах $Ge_{1-x}Si_x$ подвергнутых циклическим деформациям в сторону больших частот оптического фонона (рис.4.5), в отличие от поведения фононов Ge-Ge с ростом содержания Si в гетероэпитаксиальных пленках сплава и в монокристаллических образцах, полученных в других группах, а также с результатами самого автора, полученными на образцах сплава с высоким содержанием Si (рис.4.13).

Что же касается линий Si-Ge в исходных (не подвергнутых деформациям) образцах сплава $Si_{1-x}Ge_x$, то можно предположить, что их отсутствие связано с низким качеством выращенных образцов (атомы германия распределены по кристаллу не однородным образом, а исключительно в виде кластеров Ge). На это, в частности, указывают и относительно высокие интенсивности Ge-Ge пиков, наблюдаемых в кристаллах SiGe с низким содержанием германия, и появление этих (Si-Ge) фононных линий под действием сильных нагрузок (4.14). Механизмы проявления последних в работе, однако, никак не обсуждаются и не комментируются.

Что же касается соединений A2B6 разного состава, то остается непонятным, чем эти материалы лучше для практики более простых и распространенных образцов Si, Ge и их сплавов. Как видно из кривых, представленных в диссертации, термоэдс последних в несколько раз выше. Кроме того, хорошо известно применение нитевидных кристаллов SiGe в качестве различных датчиков, в том числе и прикладываемых нагрузок.

Заметим также, что вместо простейших качественных рассуждений по поводу возможных механизмов той или иной обсуждаемой особенности, в работе хотелось бы видеть какие-либо дополнительные закономерности (например, температурные), либо даже количественные характеристики, которые могли бы пригодиться при оценке энергий активации и идентификации возможных при деформациях нарушений кристаллической структуры образцов.

Высказанные замечания, однако, в целом не снижают ценности проделанной Коробейниковым И.В. работы и научной значимости полученных им результатов. Они также не ставят под сомнение достоверность и новизну сформулированных в диссертации основных выводов, а скорее носят рекомендательный характер, отражающий отдельные недоработки автора, и одновременно, показывают многочисленные трудности, возникающие в ходе проводимых исследований. Полученные результаты в общем соответствуют поставленной цели и выбранным задачам исследования, содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации. Содержание диссертации согласуется с содержанием опубликованных работ, а тема диссертационной работы соответствует выбранной специальности.

Заключение

Представленная И.В. Коробейниковым диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение ряда принципиальных задач физики полупроводников и фазовых переходов. Полученные результаты имеют важное прикладное значение и способствуют развитию физики ряда основных полупроводниковых материалов, находящихся под воздействием высокого гидростатического давления. Основное внимание уделено измерению характеристик твердых растворов на основе кремния и герма-

ния, широко применяемых в электронике. Диссертация содержит обширный экспериментальный материал и написана доходчивым и понятным языком.

По актуальности темы, по обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов представленная работа отвечает требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в УРФУ», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Коробейников Игорь Витальевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Я, Орлов Лев Константинович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент -

ведущий научный сотрудник Института
физики микроструктур – филиала Федерального
исследовательского центра Институт
прикладной физики Российской
академии наук
доктор физико-математических наук
Орлов Лев Константинович

Орлов Л.К.

Подпись Орлова Л.К. заверяю
Начальник ОК ИФМ РАН



Осипенко М.Л.

« 18 » ноября 2021 г.

Контактная информация: Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», 603087, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д.7, тел. 8 (831) 4601931, E-mail: orlov@ipm.sci-nnov.ru