

Экз. №

На правах рукописи

РАТНИКОВА Александра Константиновна

УДК.621.375.4.

**СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОТВОДОВ
НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА
ДЛЯ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ.**

**Специальность 05.27.01 «Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро - и
нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах»**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

г. Фрязино 2012 г.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно – производственное предприятие «Исток».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук **Пашковский А. Б.**

Официальные оппоненты:

– доктор физико-математических наук, профессор,
начальник отдела **Дюбуа Б.Ч.**

– кандидат технических наук, начальник лаборатории
Воробьевский Е.М.

Ведущая организация ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино


Защита состоится 10 апреля 2012 г. в 11 часов на заседании
диссертационного совета Д409.001.01 при ФГУП «НПП «Исток»
по адресу: 141190, Московская область, г.Фрязино, Вокзальная, д. 2а.
Большой конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП
«Исток»

Автореферат разослан 06 марта 2012 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических наук  **Погорелова Э.В.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из основных задач современной электроники является совершенствование электронной аппаратуры, в том числе уменьшение её массогабаритов при сохранении или достижении более высоких выходных параметров. Схемотехнические решения на базе дискретных корпусированных полупроводниковых элементов, в большинстве своём не изолированных электрически от корпуса, практически не позволяют снизить массогабариты приборов. Существенно уменьшить габариты может позволить использование бескорпусных кристаллов диодов и транзисторов, но при этом возникает проблема отвода тепла, выделяющегося при работе приборов. Дополнительная сложность заключается в том, что кристаллы, как правило, должны быть электрически изолированы от корпуса.

Проблема эффективного отвода тепла при этом решается путём использования в качестве теплоотводящего основания бериллиевой и алюмонитридной керамики, меди, сапфира. С учетом резкого роста мощности современных полупроводниковых приборов теплоотводы на основе меди, бериллиевой керамики, а тем более сапфира не всегда удовлетворяют потребностям отвода тепла от активной области прибора. Поэтому в последнее время все более пристальное внимание разработчиков теплоотводов обращено на поликристаллический CVD-алмаз (CVD: chemical vapor deposition – химическое осаждение из газовой фазы), выращиваемый в плазмохимическом реакторе на основе СВЧ разряда на подложке из кремния.

Интерес к этому материалу вызван его уникальными физико-химическими свойствами и возможностью получения теплоотводящих подложек большой площади. Будучи изолятором, CVD-алмаз обладает существенно более высокой теплопроводностью.

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	ТКЛР, $\times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$
CVD-алмаз	2000	1,0
ВеО-керамика	215	7,6
AlN-керамика	200	6
Медь	400	16,5
Сапфир	40	8,2

Использование алмазных подложек в качестве изолирующего теплоотвода позволит поднять мощностные характеристики приборов за счёт уменьшения теплового сопротивления и увеличения предельного тока и рассеиваемой мощности в 1,5...2 раза.

Помимо имеющихся свойств натурального алмаза (высокая теплопроводность, высокая твёрдость, износостойкость, электрическая изоляция, химическая и радиационная стойкость, наилучшие среди всех материалов параметры оптической и механической прочности), поликристаллический алмаз имеет и свои преимущества: возможность выращивания изделий заданной формы и больших размеров, высокая воспроизводимость физических параметров вследствие тщательного контроля условий роста и чистоты используемых газов.

При создании теплоотводов из алмаза необходимо решить ряд задач, связанных с изучением физических процессов, происходящих на границе металл – алмаз, позволяющих разрабатывать методы обра-

ботки алмазной поверхности, и применения алмазных теплоотводов в составе полупроводниковых приборов.

Цель работы состояла в исследовании физических процессов при формировании теплоотводов на основе поликристаллического алмаза, позволяющих существенно улучшить и стабилизировать выходные параметры полупроводниковых приборов.

Постановка задачи: для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разрабатывалась методика моделирования и расчета параметров области тепловыделения в мощных полевых транзисторах;

- исследовалась конструкция алмазного теплоотводящего основания с целью снижения внутренних механических напряжений на границе соединения материалов с разным значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР);

- разрабатывалась методика предварительного профилирования ростовой подложки для последующего разделения алмазной пластины без применения лазерной резки;

- исследовался способ термохимической обработки алмазной поверхности на металлической поверхности при высоких температурах;

- разрабатывалась методика металлизации алмазной поверхности с применением процесса ионного легирования;

- исследовалась возможность роста алмазных пленок на самоорганизованной наноразмерной поверхности;

– разрабатывалась методика измерения теплового сопротивления транзисторов на алмазном теплоотводе, теплопроводности алмазных подложек и адгезии металлических пленок к алмазу;

– с использованием разработанных моделей и методик разрабатывались алмазные теплоотводы для импульсных источников питания и предварительных усилителей мощности для АФАР.

Объектом исследования служат мощные полевые транзисторы и теплоотводы на основе поликристаллического алмаза.

Предметом исследования являются пластины поликристаллического алмаза.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Теоретически показано, что из-за интенсивных переходов электронов между слоями, размеры области максимального тепловыделения слабо зависят от параметров гетероструктуры и режима работы мощного полевого транзистора.

2. Предложен теплоотвод выпуклой формы, позволяющий уменьшить внутренние напряжения на границе соединения полупроводникового кристалла и металлизированного алмазного теплоотвода, тем самым повысить надёжность и эффективность конструкции.

3. Предложен способ профилирования ростовой кремниевой пластины путём выполнения разделительных канавок глубиной и шириной величиной, в два раза превышающей толщину готовой алмазной пластины, позволяющий исключить резку алмазной пластины.

4. Исследованы физические процессы при создании металлизации алмазной поверхности, позволяющей улучшить теплопроводящие и адгезионные характеристики.

5. Разработана методика термохимической обработки поверхности алмазных пластин, позволяющая существенно уменьшить длительность шлифовки.

В результате выполнения работы получен ряд новых результатов, на основе которых формулируются следующие

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Интенсивное рассеяние электронов в широкозонном материале приводит к тому, что размеры области тепловыделения традиционных гетероструктурных полевых транзисторов с планарным затвором имеют величину не более 0,5 мкм, слабо зависят от режима работы прибора и параметров гетероструктуры и не превосходят размеров области тепловыделения гомоструктурных полевых транзисторов, что делает гетероструктурные полевые транзисторы более чувствительными к тепловым режимам.

2. Выполнение теплоотводящего основания на основе поликристаллического алмаза выпуклой формы обеспечивает повышение надёжности системы теплоотводящее основание – полупроводниковый кристалл к воздействию смены температур и циклическому изменению мощности.

3. Выполнение канавок шириной, составляющей удвоенную толщину пленки готового изделия и глубиной, превышающей ширину, позволяет получать теплоотводы заданной геометрии без резки алмаза и уве-

личивать пробивное напряжение между мощным прибором на алмазном теплоотводе и корпусом более чем в два раза.

4. Ионное легирование плёнки кремния, нанесённой на алмаз, ионами аргона дозой в диапазоне 50 – 100 мкКл/см² с энергией 100 кэВ с последующим высокотемпературным отжигом при 850 °С позволяет исключить образование графитовой плёнки в алмазе, получить высокоадгезионную теплопроводящую металлизацию к алмазу до 60 МПа, уменьшить тепловое сопротивление системы полупроводниковый прибор – алмазный теплоотвод – корпус в 1,5 раза.

Практическая ценность работы.

Разработана модель для оценки области тепловыделения гетероструктурных транзисторов и расчет параметров области тепловыделения в мощных полевых транзисторах. Предложена конструкция теплоотводящего основания для снижения внутренних напряжений при соединении материалов с разными значениями температурного коэффициента расширения. Предложен метод предварительной резки ростовой пластины. Исследованы процессы термохимической обработки алмазных пластин. Предложен метод металлизации алмазной поверхности. Предложена методика гетероэпитаксиального роста алмазных пленок на наномодифицированных поверхностях, в частности на анодноокисленном алюминии. Предложена методика определения теплопроводности алмазных пластин.

Разработанные процессы разделения, шлифовки и металлизации позволили создать надежные алмазные теплоотводящие подложки.

Применение этих методов позволило на отечественной элементной базе разработать, изготовить и провести поставки:

- первых отечественных транзисторов на алмазном теплоотводе для импульсных источников электропитания;
- алмазных теплоотводов для предварительных усилителей мощности для АФАР X – диапазона частот;
- алмазных теплоотводов для кремниевых СВЧ транзисторов L-диапазона;
- алмазных теплоотводов для карбидокремниевых диодов Шоттки.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы опубликованы в материалах международных и российских конференций: IX международного форума «Высокие технологии XXI века-2008» Москва, 22-25 апреля 2008 г.; Международных конференций «Нанотехнологии – производству», г. Фрязино, 25-27 ноября 2008 г., 1-3 декабря 2009 г., 1-3 декабря 2010 г.; VI международного семинара ISSCRM-2009 «Карбид кремния и родственные материалы», Великий Новгород, 27-29 мая 2009 г.; Международного научно-технического семинара «Электровacuумная техника и технология», Москва, 19-21 марта 2008 г.; 47-ого международного симпозиума «Электроника и электрооборудование транспорта. Проблемы и пути развития», Суздаль, 27-30 октября 2008 г.; 18-ого международного симпозиума «Nanostructures: Physics and Technology», Санкт-Петербург, 21-26 июня 2010 г.; 7-ой Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы», Москва, 1-3 февраля 2010 г.

Публикации. По материалам диссертации автором опубликовано 22 печатные работы, из них 7 работ в журналах по перечню ВАК для защиты кандидатских диссертаций и 5 патентов РФ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа выполнена на 126 страницах текста, содержит 57 рисунков, 14 таблиц и список литературы из 113 наименований.

Содержание и результаты работы.

Во введении дано обоснование актуальности работы, определены цели и задачи исследований, перечислены основные результаты, выводы и рекомендации, научные положения, выносимые на защиту. Обоснована практическая значимость работы.

В первой главе приведено моделирование тепловых процессов в ряде полупроводниковых приборов.

В разделе 1.1 приведен расчет области тепловыделения в мощных полевых транзисторах в зависимости от параметров транзисторной структуры и топологии транзистора. Показано, что границы области наиболее интенсивного тепловыделения не совпадают точно ни с границами статического домена, ни с границами области, в которых энергия электронов максимальна.

На основе расчетов показано, что учет реальных размеров области тепловыделения повышает расчетные значения температуры в канале транзистора на 10 – 30 °С, что соответствует уменьшению максимально допустимого напряжения на стоке в стандартных режимах примерно на 1 – 1,5 В. Очевидно, что из-за уменьшения области теп-

ловыделения для полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием эта проблема встает ещё более остро.

В разделе 1.2 приведены результаты тепловых расчетов приборов, состоящих из кристалла (кремния, нитрида галлия, арсенида галлия, карбида кремния и алмаза), алмазного теплоотвода и медного фланца корпуса. Проведен анализ эффективности использования теплоотводов из алмаза. Показано, что такой теплоотвод особенно эффективен для тонких приборов с высоким уровнем мощности и достаточно высокой теплопроводностью собственно кристалла транзистора или диода.

Во второй главе приведен обзор методов получения изделий из пластины поликристаллического алмаза и предложена конструкция алмазного теплоотвода.

В разделе 2.1. предложена конструкция поверхности металлизированного теплоотводящего основания, выполненного выпуклой формы (патент РФ № 2407106, приоритет 03.08.2009 г.).

Проведены испытания воздействием циклического изменения мощности полевых транзисторов на алмазном теплоотводе (количество циклов – 10000, изменение температуры при испытаниях составляет $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) с целью оценки их качества и надежности. Для контроля деградации транзисторов во время циклирования мощностью измерялось их тепловое сопротивление. Экспериментально определено, что транзисторы, смонтированные на теплоотводах выпуклой формы, выдержали 10000 циклов, приборы с плоским теплоотводом – от 1000 до 7000 циклов, после чего произошла деградация характеристик приборов.

В разделе 2.2. разработан метод получения готовых изделий из пластин алмаза необходимой геометрии (патент РФ №2357001, приоритет 25.08.2007 г.). Способ заключается в том, что на ростовой кремниевой пластине алмазным диском прорезают канавки с образованием площадок шириной, составляющей удвоенную толщину пленки готового изделия и глубиной, превышающей ширину. Затем выращивают поликристаллическую алмазную пленку на поверхности подложки (рис.1).

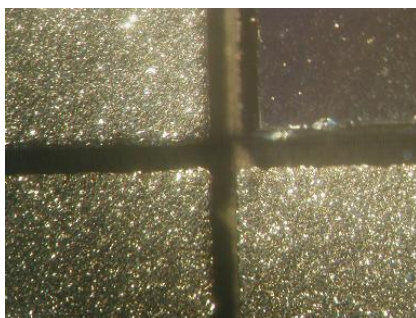


Рис.1. Фото алмазной пластины, выросшей на профилированной ростовой подложке.

Преимущества предварительной резки ростовой пластины заключаются в следующем:

- в результате стравливания кремниевой подложки после роста пленки поликристаллического алмаза получают изделия заданного типа-размера без использования режущих инструментов;

- теплоотводы, полученные данным способом, имеют бортики по периметру, которые увеличивают пробивное напряжение между мощным прибором, смонтированным на алмазный теплоотвод, и корпусом до 3 – 4 кВ.

В **третьей главе** приведены результаты исследований физических процессов на границе раздела металл – алмаз, происходящих при шлифовке и металлизации алмазной поверхности.

В **разделе 3.1.** предложен способ термохимической обработки алмаза на железной поверхности при высоких температурах для уменьшения шероховатости и выравнивания поверхности.

Проведенные исследования показали, что для целей шлифовки алмазной поверхности необходимо проводить процесс в диапазоне температур 1150 – 1200 °С (рис.2).

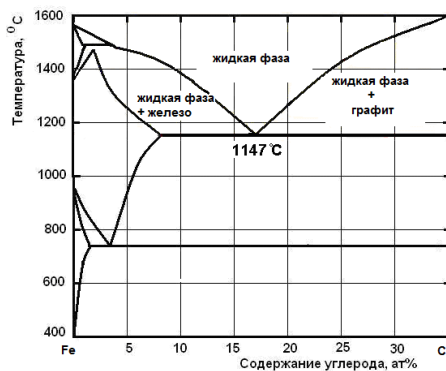


Рис. 2. Диаграмма состояния железо – углерод

Процесс растворения алмазной и железной поверхностей при высоких температурах заключается в образовании жидкой фазы карбида железа и растворения выступающих алмазных участков и формирования плоской поверхности. В результате поверхность становится сглаженной без острых вершин и впадин. Экспериментально показано, что обработка данным способом позволяет достигнуть величины шероховатости алмазной поверхности менее 300 нм.

В **разделе 3.2.** предложен способ металлизации алмазной по-

верхности с использованием процесса ионной имплантации. С целью создания высокоадгезионного слоя в алмазе проводится имплантация ионами аргона пленки кремния толщиной 0,07 мкм, нанесённой на алмаз, дозой 250 мкКл/см² и энергией 100 кэВ (патент РФ № 2285977, приоритет 21.03.2005 г.). Ионная имплантация обеспечивает образование прочных химических соединений (карбиды, силициды), необходимых для соединения с хорошей степенью адгезии. Приведены результаты расчёта концентрации введенной примеси, построены профили внедрения ионов аргона в кремний и атомов отдачи кремния в алмазе, определена величина адгезии металлизационного покрытия Ti-Mo-Ni к пластинам алмаза с помощью клеевого метода с использованием клея МСП.

Экспериментально установлено, что имплантация аргоном дозой 250 мкКл/см² увеличивает силу адгезии, достигающую максимума в диапазоне 80 – 83 МПа, отрыв при этом происходит либо по клею, либо клея от металлов.

На теплоотводах с данной металлизацией были смонтированы кристаллы транзисторов для дальнейшего изучения тепловых характеристик данных приборов (рис.3).

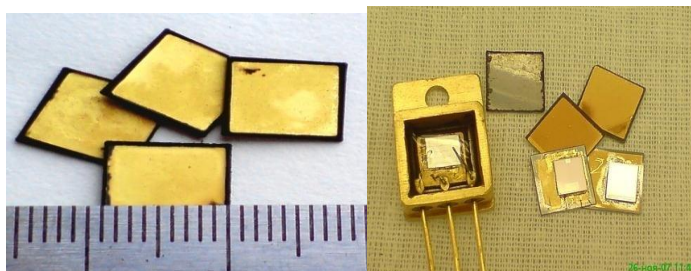


Рис.3. Алмазные теплоотводящие подложки и транзистор на алмазном теплоотводе.

Результаты измерений теплового сопротивления приборов представлены на рис.4.

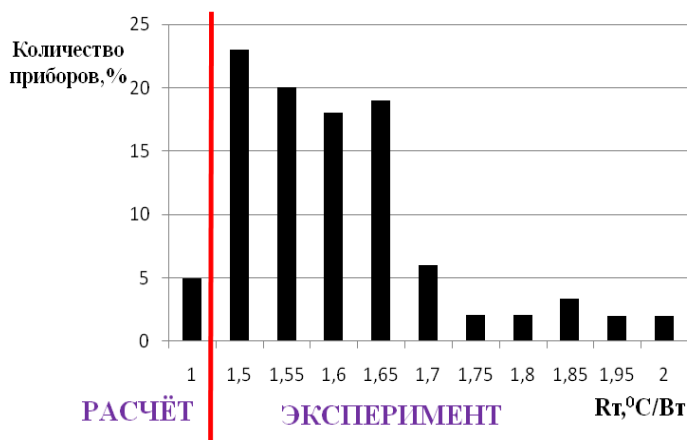


Рис. 4. Гистограмма распределения величины теплового сопротивления мощных полевых транзисторов.

Обнаружено, что тепловое сопротивление увеличено по сравнению с расчётными данными. Было высказано предположение, что возникает графитовая прослойка в алмазе после ионного легирования, ухудшающая тепловые характеристики алмазных теплоотводящих

подложек. Для решения данной проблемы проведены эксперименты по имплантации алмаза ионами аргона дозами $50 - 400 \text{ мкКл/см}^2$ с энергией 100 кэВ и последующим отжигом в диапазоне температур $200 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$. После каждой ступени отжига на алмазных пластинах проводились измерения электрического сопротивления между зондами. Показано, что при дозе легирования меньше 100 мкКл/см^2 имплантированный слой восстанавливается в решетку алмаза, а свыше 100 мкКл/см^2 имплантированный слой при термическом отжиге не восстанавливает своих изолирующих свойств, переходит в графит, что было подтверждено исследованиями методом прямого наблюдения графита по Рамановским спектрам, изучением распределения тепловых полей и измерением теплового сопротивления приборов.

Экспериментально обнаружено, что тепловое сопротивление приборов на алмазных теплоотводах, легированных меньшей дозой, имеет значение $2,16 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, образцы, легированные дозой более 100 мкКл/см^2 , имеют тепловое сопротивление приборов $3,85 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, что говорит о наличии слоя графита внутри алмазного теплоотвода и неравномерном распределении тепла.

В разделе 3.3. представлен способ обработки поверхности композиционного материала алмаз – карбид кремния – кремний, основанный на термодиффузионном растворении в металле (стали) кремния и углерода, для уменьшения размеров композита (высоты пластины) и шероховатости (патент РФ №2402509 приоритет 26.05.2009). Проведенные исследования показали, что обработка такой поверхности должна проводиться в двух температурных диапазонах:

1. $1210 - 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ с целью травления карбидокремниевой матрицы;

2. 1150 – 1190 °С для активного растворения алмазных зерен в железе, позволяющего удалить выступы на поверхности композита.

В разделе 3.4. исследована возможность гетероэпитаксиального роста пленок CVD-алмаза на поверхности, содержащей анодно-окисленный алюминий (АОА) с целью изучения закономерности роста алмазной пленки на поверхностях большого диаметра и получения улучшенной адгезии алмаза к ростовой подложке во время роста.

Исследована возможность выращивания эпитаксиальных слоев нитрида галлия на алмазе методом хлорид-гидридной эпитаксии через маску из пористого АОА и плёнки титана. Полученные результаты позволят продолжить исследования по выращиванию слоев нитрида галлия на алмазе с «электронным» качеством слоя, пригодным для реализации приборных структур.

В четвертой главе исследованы методы контроля теплопроводности алмазных пластин и теплового сопротивления мощных полевых транзисторов с алмазными теплоотводами и адгезии металлических пленок к алмазной поверхности.

В разделе 4.1. приведен обзор методов измерения теплопроводности алмазных пластин. Изложены трудности, возникающие при измерении теплопроводности, связанные с низкой точностью результатов. Для решения данной проблемы предложен метод контроля, основанный на измерении разницы температур при прохождении стационарного теплового потока вдоль композиционного образца на основе исследуемого и эталонного образцов (патент РФ №2319950, приоритет 25.09.2006).

На рис. 5 представлен общий вид устройства для определения теплофизических характеристик материала.

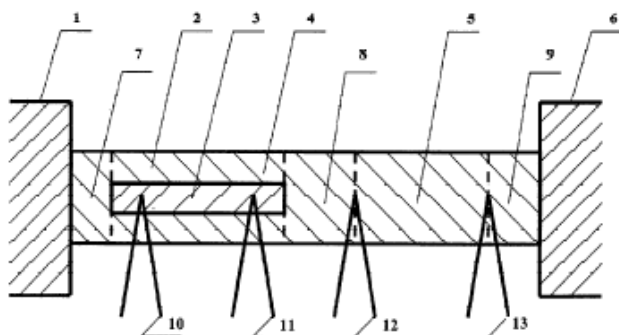


Рис. 5. Общий вид устройства для определения теплофизических характеристик материала в разрезе: 1– нагреватель; 2 – однонаправленный композиционный образец на основе исследуемого образца – 3 и твердого материала матрицы – 4; 5 – эталонный образец; 6 – радиатор; 7, 8, 9 –соединения между элементами устройства; 10,11,12,13 – термопары.

Данный способ позволяет повысить точность определения теплопроводности образцов за счет обеспечения надежного совмещения исследуемого образца с эталонным и исключения влияния контакта соединяемых поверхностей. Экспериментально определен коэффициент теплопроводности алмазных пластин, находящийся в диапазоне 600 – 1000 Вт/м·К.

В разделе 4.2. представлены результаты измерения величины теплового сопротивления мощных полевых транзисторов с теплоотводом из поликристаллического алмаза. Способ основан на измерении величины прямого падения напряжения на р-п переходе полупроводникового прибора. Экспериментально установлено, что

значения теплового сопротивления приборов находятся в диапазоне 0,8 – 1,5 °C/Вт.

В разделе 4.3. представлены результаты измерения адгезии металлизации к алмазной поверхности клеевым методом. В основу определения величины адгезии положен принцип измерения усилия отрыва грибка, приклеиваемого к контролируемому покрытию. Измеренные величины адгезии металлизации к алмазной поверхности находятся в диапазоне 60 – 80 МПа.

В заключении сформулированы основные полученные результаты:

1. Определены форма и размер области тепловыделения в мощных гетероструктурных полевых транзисторах в зависимости от параметров и топологии транзисторной структуры. Проведен тепловой расчёт приборов с алмазным теплоотводом и эффективности использования алмазного теплоотвода для приборов с высоким уровнем мощности и высокой теплопроводностью кристалла прибора.
2. Предложена конструкция теплоотводящего основания из поликристаллического алмаза, позволяющая значительно снизить внутренние напряжения на границе соприкосновения кристалла прибора и теплоотвода, повысить механическую прочность и надежность, оптимизировать условия теплопередачи, максимально повысить эффективность отвода тепла.
3. Предложен метод получения образцов из пластин поликристаллического алмаза необходимой геометрии. Готовые теплоотводы, входящие в состав прибора, полученные данным ме-

тодом позволяют увеличить пробивное напряжение между фланцем и любым из выводов корпуса прибора.

4. Исследованы физические процессы, происходящие при термохимической обработке алмазной поверхности, определён температурный диапазон травления алмазной поверхности. Показано, что обработка данным методом позволит получить шероховатость величиной менее 300 нм.
5. Предложен способ металлизации алмазной поверхности, позволяющий избежать графитизации алмаза, основным процессом которого является ионное облучение пленки кремния, нанесённой на алмаз. Экспериментально определена величина адгезии металлизационного покрытия к алмазной поверхности и тепловое сопротивление приборов на алмазном теплоотводе.
6. Проведено исследование возможности гетероэпитаксиального роста алмазной пленки и получения поликристаллических слоев алмаза.
7. Предложен способ определения коэффициента теплопроводности алмазных образцов, позволяющий повысить точность измерений.

Публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК.

1. Бережнова П.В., Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Ратникова А.К. Оценка области нелокального тепловыделения в мощных

- гетероструктурных полевых транзисторах. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2007. Вып.4 (492). С.21 - 24.
2. Духновский М.П., Крысов Г.А., Ратникова А.К. Металлизация пластин из искусственного CVD-алмаза. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2008. Вып. 1(494). С. 3-7.
 3. Духновский М.П., Кудряшов О.Ю., Леонтьев И.А., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. Термическая обработка поликристаллического CVD-алмаза с целью формирования гладкой поверхности. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2008. Вып. 2 (495). С. 41-46.
 4. Вяхирев В.Б., Духновский М.П., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. Изолирующие теплоотводы на основе CVD-алмаза для силовой электроники. Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2009. Вып. 3 (502). С. 36-40.
 5. Воробьев А.А., Воробьева Е.В., Галдецкий А.В., Духновский М.П., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. Моделирование теплового режима полупроводниковых приборов с различными типами теплоотводов. Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника, 2010. Вып. 2 (505). С.12-20.
 6. Ратникова А.К. Теплоотводящие подложки на основе поликристаллического CVD-алмаза. Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника, 2011. Вып. 3 (510). С. 76-86.
 7. Бугаев А.С., Веденеев А.С., Гудков В.А., Духновский М.П., Ратникова А.К., Рыльков В.В., Федоров Ю.Ю. Наноструктурированные слои анодного оксида алюминия на изолирующих подложках. Радиотехника и электроника. 2011. Том 56. №12. С.1-5.

Патенты и свидетельства.

1. Патент № 2285977 РФ. Металлизированная пластина алмаза и способ её изготовления. Духновский М.П., Крысов Г.А., Ратникова А.К.; приоритет от 21.03.2005.
2. Патент 2319950 РФ. Способ определения теплофизических характеристик материала и устройство для его осуществления. М.П. Духновский, А.К. Ратникова; приоритет 25.09.2006.
3. Патент №2357001 РФ. Способ получения изделий из поликристаллического пластин алмаза. М.П. Духновский, О.Ю. Кудряшов, И.А. Леонтьев, А.К. Ратникова, Ю.Ю. Федоров. 25.08.2007.

4. Патент № 2407106 РФ. Мощный полупроводниковый прибор. М.П. Духновский, А.К. Ратникова, Ю.Ю. Федоров; приоритет от 03.08.2009 г.
5. Патент 2402509 РФ. Способ обработки поверхности детали из композиционного материала алмаз-карбид кремния – кремний. Духновский М.П., Федоров Ю.Ю., Ратникова А.К., Гордеев С.К., Корчагина С.Б.; приоритет 26.05.2009.

Другие публикации по теме диссертации.

1. Духновский М.П., Кудряшов О.Ю., Леонтьев И.А., Михальченков А.Г., Ратникова А.К., Темиряева М.П., Федоров Ю.Ю. Рост CVD-алмаза на модифицированной поверхности с наноразмерными топологическими элементами. Материалы конференции IX Международного форума «Высокие технологии XXI века-2008». 22-25 апреля 2008 г. Россия, Москва. С. 40-41.
2. Духновский М.П., Королев А.Н., Ратникова А.К., Рожков С.Е., Федоров Ю.Ю. Термическая шлифовка пластин CVD-алмаза для теплоотводов мощных полупроводниковых приборов. Материалы 47-го международного симпозиума «Электроника и электрооборудование транспорта. Проблемы и пути развития», Суздаль, 27-30 октября 2008.С.23-24.
3. Духновский М.П., Королев А.Н., Ратникова А.К., Рожков С.Е., Федоров Ю.Ю. Термическая шлифовка пластин CVD-алмаза для теплоотводов мощных полупроводниковых приборов. Электроника и электрооборудование транспорта. №6. 2008. С.25-28.
4. Духновский М.П., Кудряшов О.Ю., Леонтьев И.А., Михальченков А.Г., Петров К.П., Ратникова А.К., Темиряева М.П., Федоров Ю.Ю. Особенности роста пленок CVD-алмаза на поверхности с наноразмерными топологическими элементами. Материалы 30-го заседания Международного постоянного действующего научно-технического семинара «Электровacuумная техника и технология». Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. С. 54-56.
5. Духновский М.П., Печий Ю.М., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. Исследование влияния свойств теплоотводов на характеристики карбид кремниевых диодов Шоттки. Тезисы докладов VI международного семинара ISSCRM-2009 «Карбид кремния и родственные материалы». Великий Новгород, 2009. С. 197-198.

6. Духновский М.П., Ратникова А.К., Федоров Ю.Ю. Исследование влияния свойств теплоотводов на тепловое сопротивление карбидокремниевых диодов Шоттки. Электроника и электрооборудование транспорта. №.5-6. 2009. С.43-45.
7. Духновский М.П., Михальченков А.Г., Ратникова А.К., Темирязева М.П., Фёдоров Ю.Ю. Линейное анодное окисление тонких пленок алюминия на электроизолирующих подложках. Тезисы конференции «Нанотехнологии производству 2009». г. Фрязино, 1-3 декабря 2009 г. С. 169-170.
8. Говорков А.В., Донсков А.А., Духновский М.П., Дьяконов Л.И., Козлова Ю.П., Кудряшов О.Ю., Леонтьев И.А., Малахов С.С., Марков А.В., Меженный М.В., Павлов В.Ф., Поляков А.Я., Ратникова А.К., Ратушный В.И., Смирнов Н.Б., Фёдоров Ю.Ю., Югова Т.Г. Плёнки нитрида галлия, выращенные методом хлорид-гидридной эпитаксии на поликристаллическом алмазе, с использованием наноструктурированных слоев TiN и анодного окисла алюминия. Тезисы 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». Москва, МГУ, 1-3 февраля 2010 г. С. 147-148.
9. Bugaev A.S., Dukhnovskyi M.P., Fedorov Yu.Yu., Kudryashov O.Yu., Leontiev I.A., Mityagin A.Yu., Ratnikova A.K., Vedeneev A.S. CVD-diamond grown on porous alumina template. 18th Int.Symp. «Nanostructures: Physics and Technology». St.Petersburg, Russia, 2010. С. 228.
10. Духновский М.П., Комков С.В., Ратникова А.К., Темирязева М.П., Федоров Ю.Ю. Высокоскоростная термошлифовка и нанополировка поверхности CVD-алмаза как альтернатива его механической обработки. Тезисы докладов VII Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству – 2010». г. Фрязино, 1-3 декабря 2010 г. С.48.

Подписано в печать 29.02.2012 года

Формат 60x80/16. Объём 1 усл.- печ. листов.

Тираж 50 экз. ризограф ОАО «Исток Аудио Интернэшнл»

