

CVD-АЛМАЗЫ

ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Алмаз не назовешь новым материалом, ведь он упоминается еще в Ветхом Завете. Необычайные твердость и химическая стойкость (adamantos по-гречески – "неодолимый"), игра света кристаллов на протяжении веков привлекали внимание к алмазу. В последние 30–40 лет ученые пришли к выводу, что благодаря уникальному сочетанию физических свойств алмаз мог бы стать привлекательным материалом для изготовления электронных устройств с экстремальными параметрами. Если бы... существовала технология получения алмаза в виде больших (диаметром несколько дюймов) пластин или пленок с низкой концентрацией примесей и дефектов. И если бы он не был запредельно дорог. Сегодня такая технология – осаждение поликристаллических пленок алмаза из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition, CVD) – быстро развивается. Поликристаллический алмаз (полиалмаз) с требуемыми свойствами уже применяют как для изготовления пассивных устройств (теплоотводов, звукопроводов в приборах на поверхностных акустических волнах), так и в качестве полупроводникового материала активных приборов (полевых транзисторов с частотой выше 100 ГГц, детекторов). Конечно, остается немало трудностей, которые необходимо преодолеть для того, чтобы подтянуть "алмазную" технологию к уровню, достигнутому хотя бы для карбида кремния. Это – и принципиальные проблемы синтеза монокристаллических пластин размером не менее одного дюйма (~25 мм), и вопросы легирования алмаза. Но, главное, психологический барьер преодолен, и мы наблюдаем превращение алмаза из экзотического для электроники материала в технический.

В.Ральченко, к.ф.-м.н.,
В.Конов, член-корр. РАН
ralchenko@nsc.gpi.ru

Одна из ярко выраженных тенденций твердотельной СВЧ-электроники – рост активности исследований и разработок приборов на основе широкозонных полупроводников. Это объясняется такими параметрами этих приборов, как большие значения пробивного и рабочего напряжения, высокая радиационная стойкость, возможность работы при повышенных температурах. Наиболее далеко продвинулись разработки приборов на пластинах и пленках нитрида галлия (GaN) [1] и карбида кремния (SiC) [2]. Однако по сочетанию важнейших параметров для электронных приборов самым перспективным можно считать алмаз (см. таблицу).

Алмаз имеет кубическую кристаллическую структуру с сильными ковалентными связями атомов углерода и с рекордно высокой атомной плотностью – $1,76 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$. Это свойство и предопределяет многие особенности алмаза. Действительно, при ширине запрещенной зоны 5,45 эВ удельное сопротивление нелегированного алмаза составляет $10^{13}–10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, подвижность электронов и дырок – 2200 и $1600 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, соответственно. Поле пробоя достигает 10^7 В/см . Алмаз чрезвычайно устойчив химически, нерастворим в плавиковой, соляной, серной и азотной кислотах. В присутствии кислорода алмаз окисляется (травится) при температурах выше 600°C . В высоком вакууме поверхностная графитизация алмаза происходит при температуре 1700°C . Правда, обратная сторона высокой инертности и твердости алмаза – серьезные проблемы, связанные с его обработкой.

У алмаза рекордная среди всех известных материалов теплопроводность – $20–24 \text{ Вт/см}\cdot\text{К}$ при комнатной температуре. Это связано с его рекордно высокой температурой Дебая $T_D=1860\text{K}$, благодаря чему комнатная температура является "низкой" в отношении динамики решетки алмаза. В результате алмаз может служить "идеальной" теплоотводящей диэлектрической подложкой. Более того, в очищенном от изотопов алмазе (природные кристаллы содержат 1,1% изотопа ^{13}C) теплопроводность может достигать $33 \text{ Вт/см}\cdot\text{К}$ [3].

Кроме того, алмаз радиационно стойкий материал. Он прозрачен в широком диапазоне спектра (от ультрафиолетового до радиоволнового), имеет высокую твердость ($81–100 \text{ ГПа}$),

рекордно высокую скорость распространения звука (18 км/с), низкую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 5,7$). Благодаря таким уникальным свойствам алмаз перспективен для применения в качестве теплоотводящих пластин в СВЧ-транзисторах, мощных мультичиповых модулях и линейках полупроводниковых лазеров. Алмаз может найти широкое применение и для изготовления окон мощных гиротронов, клистронов и CO_2 -лазеров, а также для изготовления МЭМС, акустоэлектронных устройств (фильтров на поверхностных акустических волнах гигагерцевого диапазона) и детекторов ионизирующего излучения.

Несмотря на столь очевидные достоинства, применение алмаза в электронике до последнего времени сдерживалось отсутствием надежного источника материала требуемого качества. Размеры природных кристаллов алмаза невелики (как правило, несколько миллиметров, камни размером более 10 мм редки и крайне дороги). Но главное, кристаллы алмаза содержат неконтролируемые дефекты и примеси, что приводит к огромному разбросу их параметров. Размеры синтетических кристаллов (рис.1), получаемых при высоких давлениях и температурах ($P \approx 5$ ГПа, $T \approx 1600\text{K}$) в присутствии катализаторов (процесс, открытый еще в 50-е годы 20 века), также малы. В них велика неконтролируемая концентрация примеси азота – $10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, в таких алмазах присутствуют и примеси катализаторов. Широкий круг проблем алмазной электроники представлен в [4].

Новые перспективы применения алмаза появились в результате разработки технологии его синтеза при низких давлениях [5].

ВЫРАЩИВАНИЕ АЛМАЗА ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Метод газозафазного синтеза алмаза не так уж и нов. Пионерские исследования этого метода проводились в Институте физической химии и электрохимии им. А.М.Фрумкина АН СССР еще в середине 50-х годов 20 века (в отделе Б.В.Дерягина) [6]. Примерно тогда же были успешно решены проблемы синтеза при высоких давлениях. Однако долгое время как в работах этой группы, так и у зарубежных исследователей скорости осаждения алмаза не превышали 0,1 мкм/ч и были далеки от значений, представляющих практический интерес. Кроме того, из-за загрязнения поверхности графитоподобным осадком длительно поддерживать процесс роста не

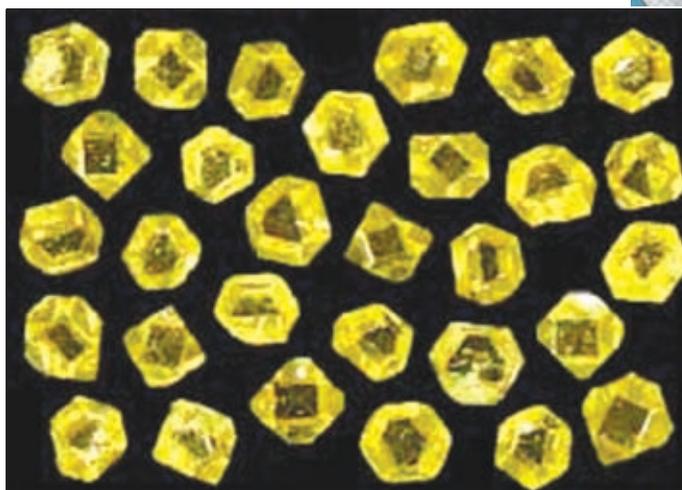


Рис.1. Синтетические монокристаллы алмаза, полученные при высоких давлениях

удавалось. Лишь к началу 80-х годов удалось достичь скорости роста более 10 мкм/ч. В настоящее время CVD-метод позволяет получать достаточно чистые поликристаллические алмазные пленки и пластины диаметром более 100 мм и толщиной от единиц микрометров до 1–3 мм (рис.2). Таким образом, алмазные пластины приобрели форму, привычную для принятых в электронике технологий.

CVD-процесс основан на разложении, тем или иным способом, углеводородов (как правило – метана) в смеси с водородом и последующем осаждении алмаза на нагретую подложку. Рабочая смесь диссоциирует в вакуумной камере под действием электрического разряда, СВЧ-плазмы или лазерного излучения. Возможна также диссоциация на горячей нити или в пламени газовой горелки (в этом случае используют смесь ацетилен-кислород). Продукты разложения (углеводородные радикалы и атомарный водород) диффундируют к подложке, нагретой до температуры 700–1000°C, на которую и осаждается алмаз (рис.3). Рост алмаза не является эпитаксиальным, зарождение кристаллов происходит на заранее привнесенных на подложку центрах нуклеации, обычно (нано)частицах алмаза. Типичное значение давления газа в камере составляет 30–100 Торр, а скорости осаждения – 1–20 мкм/ч. В качестве подложек чаще всего используют кремний или молибден, но осаждают алмазные пленки можно и на другие материалы, стойкие к нагреву до 1000°C в присутствии атомарного водорода. Полученные пленки могут быть химически отделены от подложки и использованы далее

Параметры некоторых полупроводников при T=300K

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ	Напряжение пробоя, МВ/см	Подвижность, см ² /В·с		Теплопроводность, Вт/м·К
			электронов	дырок	
Ge	0,66	0,2	3900	1900	28
Si	1,12	0,4	1500	540	150
GaAs	1,42	0,4	8500	400	46
GaN	3,0	3	1250	850	130
4H-SiC	3,26	3	800	70	490
Алмаз	5,45	10	2200	1600	2000

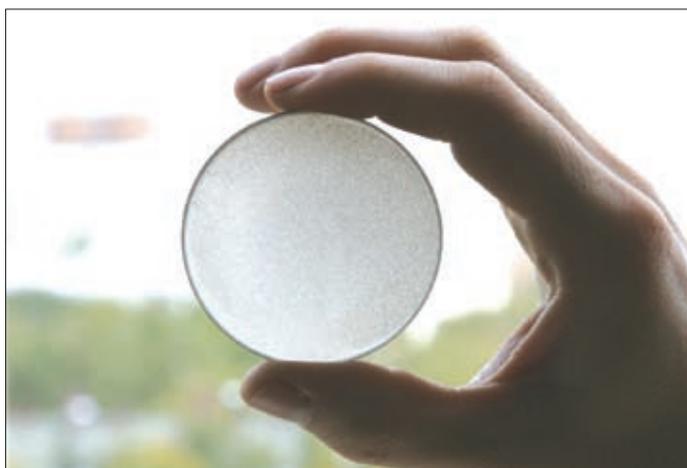


Рис.2. Пластина поликристаллического алмаза (диаметр 57 мм, толщина 0,5 мм)

в виде пластин. В то время как площадь поликристаллического CVD-алмаза может составлять десятки и сотни квадратных сантиметров, площадь монокристаллических пленок обычно не превышает 1 см^2 , поскольку она ограничена размерами алмазной подложки.

Важнейшие достоинства газофазного полиалмаза:

- большие размеры пластин;
- высокая воспроизводимость физических параметров благодаря тщательному контролю условий роста и чистоты используемых газов;
- возможность выращивания пленок (изделий) заданной формы на профилированных подложках (метод реплики);
- возможность нанесения алмазных слоев на поверхности различных материалов.

В отличие от алмазной керамики, получаемой путем спекания алмазного порошка, синтезированный из газовой фазы полиалмаз не содержит ни пор, ни связующего материала. По своим характеристикам он скорее сопоставим с монокристаллами алмаза. При достаточно высокой чистоте реакционных газов содержание азота (основная примесь в природных и синтетических кристаллах) в алмазе легко может быть доведено до 1 ppm (одной миллионной

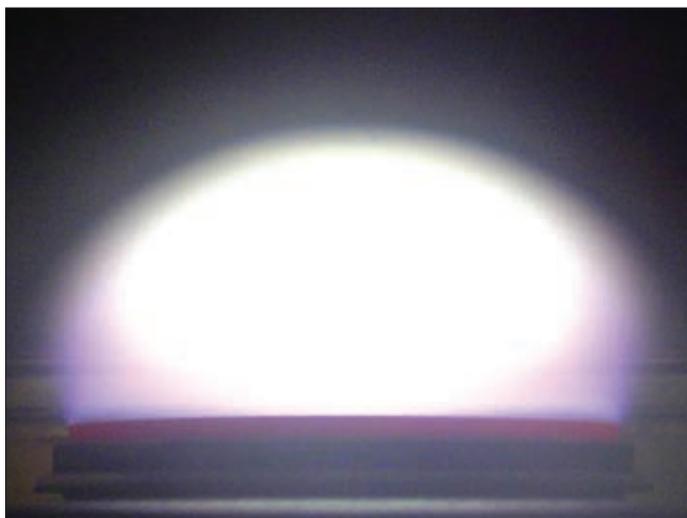


Рис.3. Осаждение алмаза на кремниевую подложку из СВЧ-плазмы

доли, или $1,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и ниже. Природные алмазы со столь малой концентрацией азота крайне редки. Наиболее чистый материал получают при осаждении в СВЧ-плазме (частота – 2,45 ГГц или 910 МГц), поскольку в этом случае отсутствуют распыляемые электроды, привносящие примеси в разряд. Концентрация примесей азота и бора в монокристалле CVD-алмаза, выращенном фирмой Element Six (E6, бывшее технологическое подразделение компании De Beers) в СВЧ-плазме, не превышала 10^{15} см^{-3} [7], значения подвижности электронов и дырок составили 4500 и $3800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, соответственно, т.е. были вдвое выше, чем у наиболее совершенных "безазотных" природных кристаллов типа IIa. В поликристаллических пленках в заметных количествах (порядка 10–1000 ppm) присутствует примесный водород, который локализуется преимущественно на границах зерен. Отметим, что поликристаллический алмаз принципиально отличается от так называемых "алмазоподобных" пленок, и по большинству параметров значительно превосходит их [8]. Алмазоподобные пленки – аморфный углеродный материал толщиной не более единиц микрометра, обладающий высокой твердостью, но очень низкими теплопроводностью и подвижностью носителей заряда.

В Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН разработан лабораторный автоматизированный реактор для выращивания алмаза из СВЧ-плазмы (2,45 ГГц, 5 кВт) (рис.4), на котором на подложках диаметром до 75 мм были получены пластины полиалмаза высокого качества.

ТЕПЛОТВОДЯЩИЕ ПОДЛОЖКИ

Благодаря уникально высокой теплопроводности (в пять раз выше, чем у меди) миниатюрные теплоотводящие подложки из природных и технических монокристаллов алмаза (диаметром <2,5 мм) еще в 60-х годах прошлого столетия нашли применение в лавинно-пролетных диодах (ЛПД) и лазерных диодах [9], позволяя повысить их мощность и надежность. На полиалмазе можно реализовывать конструкции теплоотводов в виде пленок и пластин практически любого масштаба. Еще в 1992 году был рассмотрен вариант трехмерного монолитного мультичипового модуля размером $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ с многоуровневым расположением пластин из CVD-алмаза размером $10 \times 10 \text{ см}$ [10]. Такое расположение алмазных пластин позволяет существенно увеличить частоту интегральных схем за счет укорочения длины межсоединений. Благодаря сверхвысокой теплопроводности подложки отводить тепло можно через торцы модуля. Согласно оценкам, при полной выделяемой мощности модуля 20 кВт такой "куб" нагревается всего лишь на 31°C , в то время как в случае применения нитрида алюминия нагрев составил бы 367°C . Модули с таким плотным монтажом перспективны для создания сверхкомпактных суперкомпьютеров [10].

Альтернативой дорогостоящим толстым пластинам полиалмаза в ряде случаев могут стать более тонкие (десятки



Рис.4. Установка синтеза алмазных пленок в СВЧ-плазме УПСА-100

микрометров) алмазные слои, нанесенные на стандартные диэлектрические подложки, например на AlN-керамику [11]. Это приводит к значительному, в три–пять раз, увеличению теплопроводности наиболее ответственного наружного слоя теплоотвода.

Теплопроводность полиалмаза имеет свои особенности, обусловленные микроструктурой кристаллитов (рис.5). Во-первых, кристаллиты растут в виде колонн, ориентированных перпендикулярно поверхности, причем с увеличением толщины пленки "диаметр" колонн увеличивается. При прохождении вдоль пленки фононы в основном рассеиваются на границах зерен (а также на примесях и дефектах, концентрирующихся преимущественно вблизи границ зерен), а не вдоль колонн. Поэтому, как правило, нормальная к плоскости пленки теплопроводность (k_{\perp}) больше тангенциальной k_{\parallel} (параллельной пленке) [12]. Анизотропия теплопроводности может достигать 50%. Во-вторых, следует учитывать неоднородность поликристаллического CVD-алмаза в тепловом отношении по толщине. Это связано с тем, что по мере наращивания слоя размеры кристаллитов постепенно увеличиваются от ~ 1 мкм в сильно дефектном слое вблизи подложки до десятков и даже сотен микрометров на противоположной, более совершенной ростовой стороне. Значение k_{\parallel} для одной и той же пластины может составлять 20 Вт/см·К на ростовой стороне и 7–8 Вт/см·К в мелкозернистом слое на подложечной стороне [13]. Путем сошлифовки дефектного слоя пленки толщиной 20–30 мкм можно примерно в два раза увеличить теплопроводность подложечной стороны.

Основная примесь CVD-алмаза – водород, имеющий тенденцию к декорированию разнообразных структурных дефектов. Поэтому концентрация примесного (связанного)

водорода может служить хорошим индикатором дефектности материала. Это и определяет обратную корреляцию теплопроводности и числа C-H связей (рис.6). По мере увеличения концентрации водорода с 70 до 1000 ppm теплопроводность k_{\perp} уменьшается с 21 до 9 Вт/см·К. При этом значения k_{\perp} регулярно превосходят значения k_{\parallel} на 10–15% [14]. Максимальные значения теплопроводности CVD-полиалмаза близки к известным значениям этого параметра лучших природных монокристаллов.

При температурах выше комнатной теплопроводность алмаза уменьшается в силу возрастающей роли фонно-фононного рассеяния. В диапазоне температур 300–500К, важном для практических применений, теплопроводность может быть аппроксимирована степенной зависимостью $k \sim T^{-n}$, где показатель n зависит от степени дефектности алмаза, т.е. от значения k при комнатной температуре (рис.7). Для качественных пластин ($k = 18\text{--}20$ Вт/см·К) показатель $n \approx 1$ [14]. Это означает, что при нагреве до $T=200^{\circ}\text{C}$ теплопроводность уменьшается примерно в 1,6 раза.

ОБРАБОТКА АЛМАЗНЫХ ПЛАСТИН

Обработка алмазной пластины-заготовки, предназначенной для изготовления алмазных элементов, включает резку, шлифовку и/или полировку, отжиг, металлизацию. Поскольку алмаз самый твердый из всех известных веществ, любая его механическая обработка крайне затруднительна. Наиболее эффективный способ раскроя поликристаллического алмаза – лазерная резка [15]. Эта операция заключается в нагреве

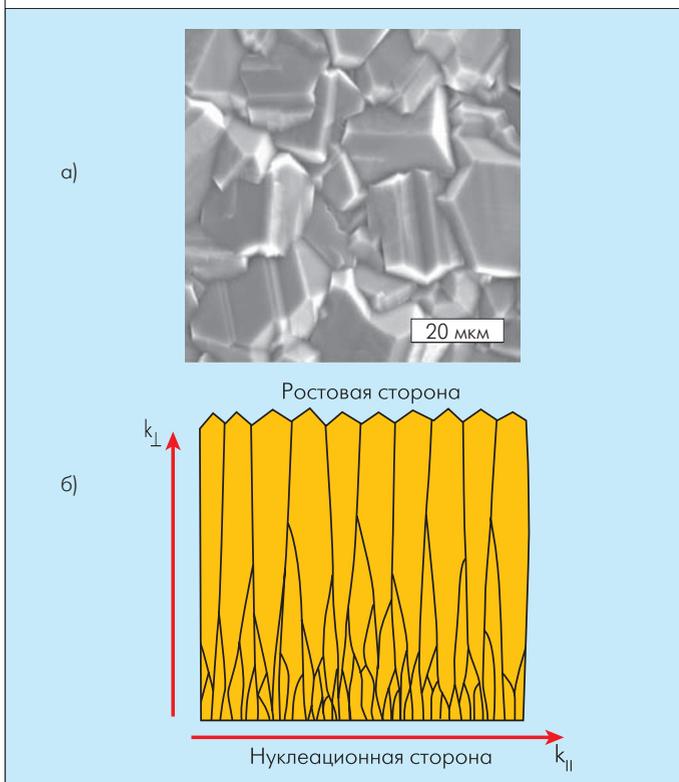


Рис.5. Топография ростового строения поверхности полиалмаза (а) и схема поперечного сечения (б)

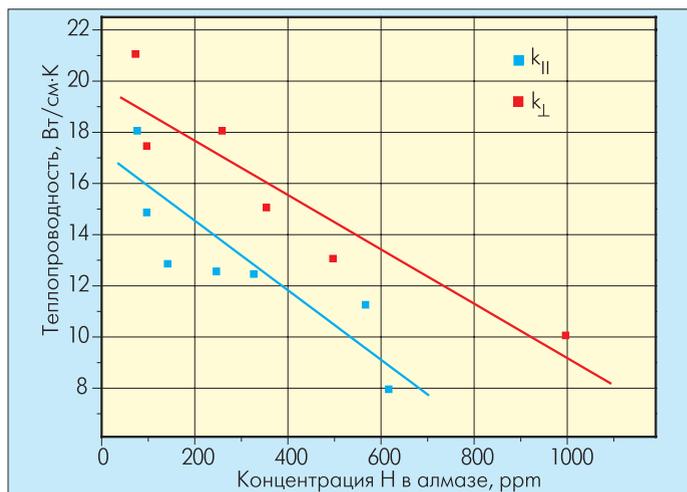


Рис.6. Зависимость теплопроводности алмаза $k_{||}$ и k_{\perp} от концентрации примесного водорода в образце [14]

поверхности и испарении (абляции) материала при воздействии на него коротким импульсом лазерного излучения. Таким образом, твердость не играет существенную роль. Для резки применяют импульсно-периодические твердотельные Nd:YAG-лазеры и лазеры на парах меди с частотой повторения импульсов порядка 10 кГц и средней мощностью 15–30 Вт. При ширине реза ~100 мкм и менее (рис.8в) возможен прецизионный раскрой пластины на элементы заданной формы. Лазерная абляция сопровождается графитизацией тонкого (~0,1 мкм) поверхностного слоя, который может быть удален окислением на воздухе или жидким окислителем. Сверление алмазных пластин, например для создания коммутаций (рис.8б), проводится аналогично лазерной резке. Отверстие диаметром 200 мкм в пластине толщиной 0,5 мм за 3–4 с пробивается лучом Nd:YAG-лазера мощностью 14 Вт [15].

Шероховатость ростовой стороны пластины CVD-алмаза толщиной 0,3–1,0 мм может составлять единицы и десятки микрометров. Поэтому, как правило, пластину необходимо шлифовать или полировать. Пластины небольшого размера (~1 см) можно полировать по классической технологии, применяемой для огранки бриллиантов (на шаржированном алмазным порошком чугуном круге). Полировка полиалмаза – процесс медленный, при этом можно добиться шероховатости $R_a < 10$ нм (до 0,2 нм в пределах одного зерна) [16].

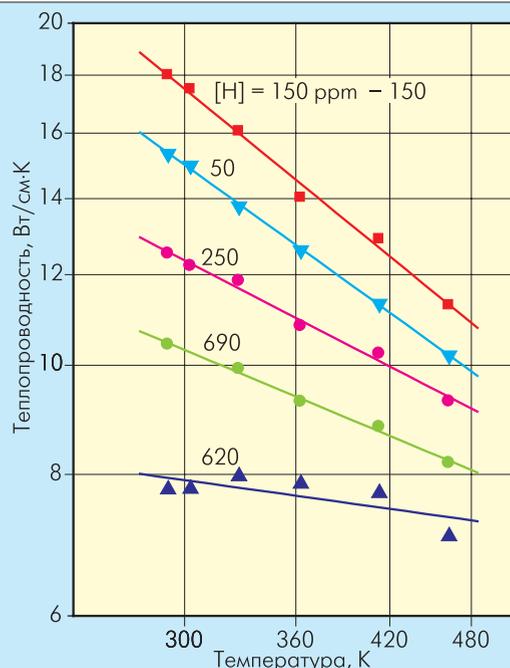


Рис.7. Температурные зависимости теплопроводности $k_{||}$ в логарифмических координатах для алмазных пластин различного качества. Для каждого образца указана концентрация примесного водорода (ppm) [14]

Более быстрая операция – шлифовка на свободном абразиве. Она позволяет за разумное время уменьшить шероховатость до ~100 нм [11]. Разрабатываются методы термохимической полировки, а также методы сглаживания алмазных пленок с помощью лазерной абляции сканирующим (наклонным) пучком [17, 18] (рис.8а). В ряде случаев трудностей с полировкой можно избежать, располагая приборы на подложечной стороне, шероховатость которой без обработки составляет 10–20 нм.

Послеростовую обработку можно минимизировать, выращивая алмазные элементы заданной формы методом реплики [19]. При этом осаждение ведется на подложку (обычно кремниевую) с созданным на ней рельефом, точный алмазный отпечаток которого получают после удаления подложки (рис.9). Таким способом, в частности, были изготовлены острия для полевых эмиттеров [20] и сквозные микроканалы в алмазных подложках с аспектным отношением, равным 50 [21].

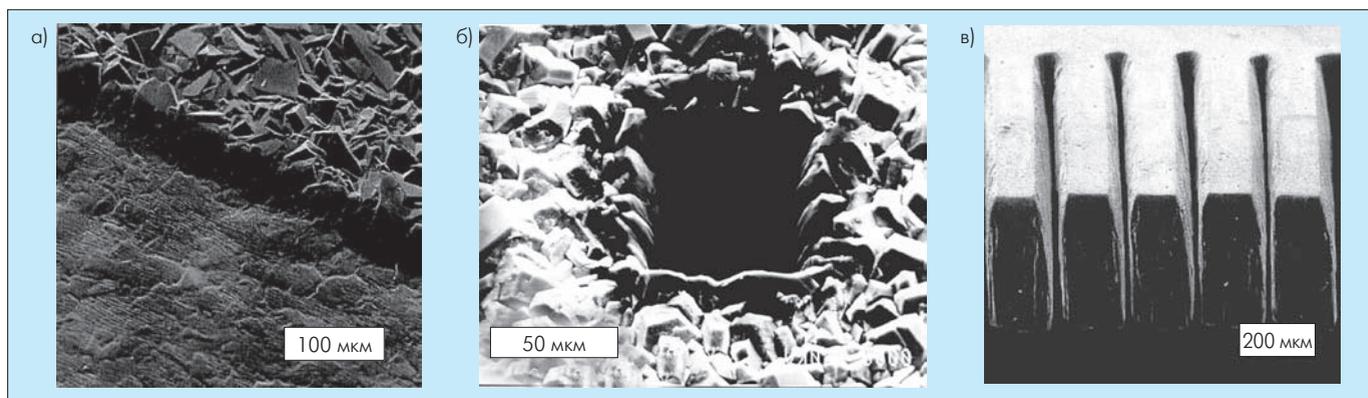


Рис.8. Лазерная обработка подложек полиалмаза: а) сглаживание поверхности; б) сверление; в) резка

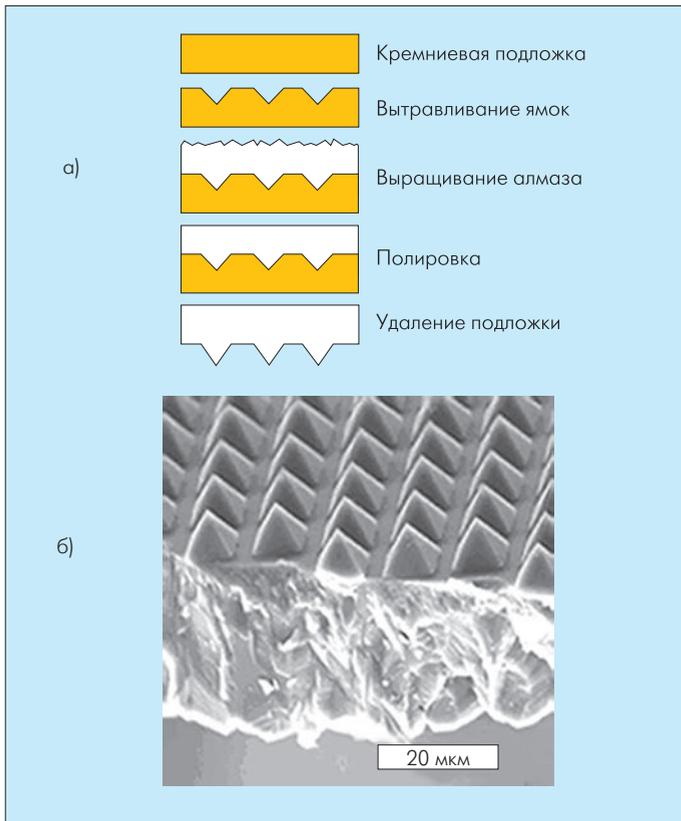


Рис.9. Принцип метода реплики (а) и массив алмазных пирамид (период 12 мкм), выращенных на анизотропно травленной кремниевой подложке (б)

СТРУКТУРЫ "ПОЛУПРОВОДНИК НА АЛМАЗЕ"

Проблема монтажа полупроводникового кристалла на алмазном теплоотводе непростая в силу очень низкого коэффициента теплового расширения алмаза ($1,05 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при 20°C). Это приводит к возникновению опасных механических напряжений в кристалле. При слишком толстом промежуточном слое между алмазом и кристаллом тепловое сопротивление структуры может оказаться неприемлемо большим, нивелируя достоинства алмазного тепловода. Приборный слой должен лежать как можно ближе к границе раздела кристалл-алмаз. Попытки получить составную пластину вида кремний на алмазе (КНА, или SOD – Silicon-On-Diamond) путем присоединения под давлением отполированной алмазной пленки к кремниевой пластине [22] по аналогии с системой кремний на изоляторе (КНИ) оказались неудачными. Не удалось избежать образования трещин и локальных потерь контакта, по-видимому, вследствие недостаточной степени полировки и жесткости алмаза.

Другой подход предусматривает выращивание алмазного тепловода на пластине кремния, утонение пластины до десятков или единиц микрон и изготовление прибора в тонком слое Si. Рабочий слой в этом случае близок к границе раздела с алмазом, причем адгезию алмаза к кремнию обеспечивает тонкий слой SiC, который "автоматически" формируется в процессе наращивания пленки алмаза. Условия синтеза алмаза (при 800°C в атмосфере углеводорода)

не приводят к заметной генерации дефектов в кремнии [23]. Однако однородный слой кремния толщиной всего в несколько микрон получить механическим шлифованием подложки проблематично вследствие изначально имеющегося изгиба сэндвича кремний-алмаз. Интересное решение этой проблемы было предложено группой ученых Университета Северной Каролины (США) [24]. Алмазная пленка выращивалась на КНИ-подложке толщиной 0,5 мм с рабочим слоем кремния толщиной 1,5 мкм и подслоем SiO_2 толщиной 3,0 мкм. Далее химически удалялись сначала основная (нижняя) часть кремниевой подложки, а затем SiO_2 . В результате получали пластину SOD (рис.10). Сравнение скорости диссипации тепла от тестовых платиновых микронагревателей (размером $3 \times 30 \text{ мкм}$) на поверхности SOD и стандартной КНИ-пластины показало, что для SOD нагрев до 37°C достигался при удельной мощности источника 560 кВт/см^2 , а для КНИ – при на порядок меньшей мощности.

Компания Group 4 Labs LLC, США, объявила о разработке технологии изготовления двухслойной пластины GaN-алмаз, в которой путем физико-химической обработки поликристаллической алмазной подложки достигается ее "атомное" соединение с монокристаллическим слоем GaN* [25]. Недавно на алмазной подложке, поставляемой фирмой Group4 Labs, совместными усилиями компании Emscore и Исследовательской лаборатории ВМС США впервые в мире изготовлен AlGaIn/GaN HEMT [25, 26].

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Основываясь на теоретической модели, ученые из Университета штата Северная Каролина [27] оценили параметры полевых транзисторов с затвором Шоттки (MESFET), изготовленных на SiC, GaAs и алмазе. Расчеты показали, что мощность MESFET на алмазе в диапазоне частот 5–100 ГГц должна быть в 30 раз выше, чем у транзистора на GaAs, и примерно в четыре раза выше, чем у транзистора на карбиде кремния. Однако, несмотря на многолетние усилия реализовать электронные приборы на алмазе, его потенциал как материала для

*Васильев А., Данилин В., Жукова Т. Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу. – Наст.№, с.68.

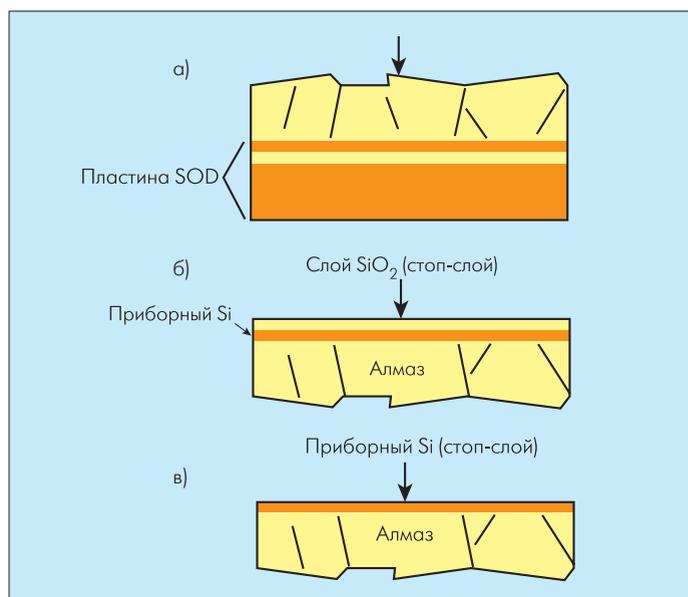


Рис. 10. Процесс изготовления SOD-пластины: а) осаждение пленки алмаза; б) травление Si в KOH; в) травление SiO₂ в HF [24]

формирования активных электронных приборов до сих пор использован недостаточно. Это обусловлено в первую очередь сложностью его легирования, в особенности примесями n-типа. Единственная надежная легирующая примесь – бор – образует глубокий акцепторный уровень с энергией активации $E_a = 0,37$ эВ. Донорный уровень азота – 1,7 эВ – еще более глубокий и не может быть активирован при комнатной температуре. Легирование донорной примесью (фосфором) с энергией активации $E_a = 0,45$ эВ все еще находится на уровне экспериментальных исследований и не используется при создании реальных приборов.

В одной из ранних работ учеными Университета штата Пенсильвания на алмазе был создан полевой транзистор с изолированным затвором (MISFET) со структурой Al-i-p⁺-Ti [28]. На грани (100) природного алмаза типа Ia (т.е. с концентрацией азота более 10^{18} см⁻³) выращивался слой легированного бором алмаза толщиной 100 нм. Концентрация дырок в слое составила $6,9 \cdot 10^{14}$ см⁻³, подвижность – 290 см²/В·с. Затворным диэлектриком служил слой SiO₂ толщиной 100 нм. Токи утечки затвора не превышали 10 пА при температуре 300°С. Параметры экспериментальных образцов транзисторов оказались гораздо хуже ожидаемых, в основном в силу дефектности алмазных слоев.

Новые подходы к созданию полевых транзисторов связаны с открытием возможности получения в алмазе проводимости p-типа путем гидрогенизации (легирования водородом) его поверхности [29]. Приповерхностный проводящий слой толщиной порядка 10 нм создается в результате обработки пластины в водородной микроволновой плазме. Концентрация дырок в таком слое составляет $(0,5-1) \cdot 10^{13}$ см⁻². Она остается постоянной в диапазоне температур -120...120°С. Подвижность носителей лежит в диапазоне 50–150 см²/В·с [30], и, что благоприятно, энергия активации носителей

низкая, всего 23 мэВ [31]. На основе этого эффекта на монокристаллических пленках алмаза были созданы экспериментальные образцы MESFET (рис. 11).

В Университете Васеда (Япония) в 2001 году были изготовлены образцы транзистора с длиной затвора 2 мкм. Значения частоты отсечки f_T и максимальной частоты генерации f_{max} транзистора были равны 2,2 и 7 ГГц соответственно [32]. Позднее сообщалось о получении на алмажном полевом транзисторе с гидрогенизированной поверхностью значений $f_T = 25$ ГГц и $f_{max} = 80$ ГГц при длине затвора 0,22 мкм [33]. Хотя достигнутые удельные мощности составляют пока чуть более 2 Вт/мм [34], рассматривается возможность увеличения этого уровня до 30 Вт/мм при ширине затвора 0,1 мкм [35].

Интересно, что не так давно для MESFET, изготовленных на поликристаллическом алмазе с размером зерна около 100 мкм (рис. 12), удалось получить высокие значения частот $f_T = 45$ ГГц и $f_{max} = 120$ ГГц [36]. Алмазная пластина с содержанием примеси бора и азота на уровне не выше 11 ppb (ppb – одна миллиардная доля) была выращена компанией Е6, а транзистор изготовлен специалистами компании NTT (Япония). Высокие параметры прибора (даже выше, чем у транзистора на монокристаллическом материале) удалось реализовать благодаря тому, что полевой транзистор по своим размерам сопоставим с зерном кристалла. Это привело к существенному ослаблению вредного влияния межкристаллитных границ. А по качеству материал в объеме отдельного зерна сравним с эпитаксиальными монокристаллическими пленками. В результате появилась возможность изготовления активных электронных компонентов на пластинах полиалмаза диаметром 100 мм. Исходя из перспектив создания нового класса алмазных приборов, обещающих революционизировать мощную СВЧ-электронику, в компании Е6 создано подразделение "Алмазные СВЧ-приборы".

ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Прохождение ионизирующего излучения через алмаз приводит к генерации свободных носителей заряда, которые могут быть собраны на электродах, расположенных на поверхности. В этом случае алмаз выполняет функцию

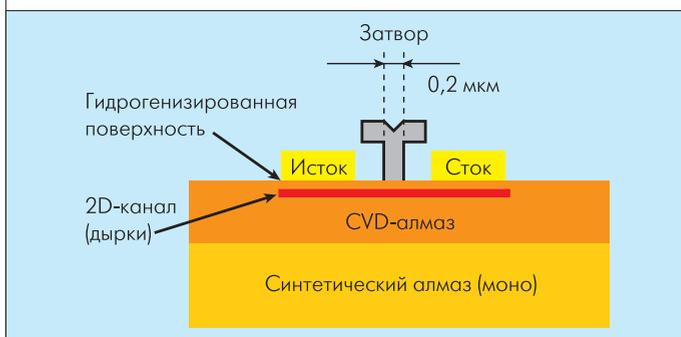


Рис. 11. Структура MESFET, выполненного на гидрогенизированной поверхности эпитаксиальной алмазной пленки



твердотельной ионизационной камеры. Край собственного поглощения алмаза лежит в УФ-области спектра (225 нм), поэтому детекторы на основе алмаза значительно более чувствительны к УФ-излучению, чем к свету видимого спектра. Это позволяет создавать "солнечно-слепые детекторы" без каких-либо дополнительных оптических фильтров. Соотношение фотоотклика детектора на основе CVD-алмаза со встречно-штыревыми электродами в УФ- и видимой областях спектра (коэффициент спектральной дискриминации) может составлять $\sim 10^5$, fotocувствительность — ~ 1 А/Вт и быстродействие — порядка 1 нс [37]. Высокая чувствительность и спектральная селективность таких фотодетекторов сохраняются при нагреве до 300°C [38].

Благодаря большим размерам алмазные пленки перспективны для создания позиционно-чувствительных и микрополосковых детекторов излучения УФ- и рентгеновского диапазонов. Высокая радиационная стойкость алмаза позволяет рассматривать его как перспективный материал для бортовых УФ-детекторов, предназначенных для космических исследований [39]. CVD-алмаз может служить и материалом детекторов частиц высоких энергий (альфа-частиц, гамма-квантов и нейтронов) [40, 41].

"Длина собирания заряда" — ключевой параметр детекторов — в поли- и монокристаллическом CVD-алмазе достигает 275 и 420 мкм, соответственно, а производство подвижности на время жизни носителей заряда $\mu\tau$ — 10^{-6} см²/В (сравнимо с GaAs) и 10^{-4} см²/В (на уровне SiC), соответственно [41]. Дальнейшее улучшение качества детекторов, по-видимому, зависит от развития метода получения монокристаллических алмазных пленок.

АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

Устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в пьезоэлектрических материалах, такие как линии задержки,

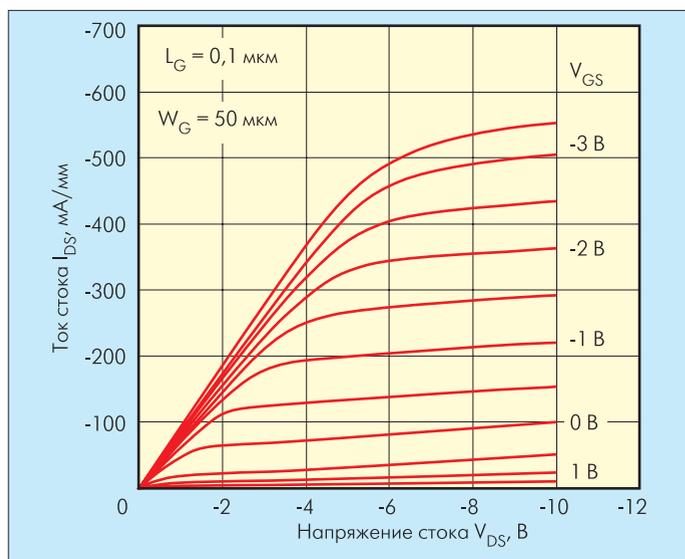


Рис. 12. Вольт-амперные характеристики MESFET на поликристаллическом алмазе с каналом длиной $L_G = 0,1$ мкм и шириной $W_G = 50$ мкм [36]

генераторы, фильтры ВЧ-диапазона, основаны на преобразовании ВЧ-сигнала в акустическую волну на встречно-штыревых металлических электродах и затем на обратном преобразовании ее в электромагнитную волну. Центральная частота фильтра $F = V/\lambda$, где V и λ — соответственно скорость распространения звука и длина волны ПАВ, задаваемая периодом электродов Λ . Устройства, способные работать в гигагерцевом диапазоне частот (0,6–10 ГГц), необходимо выполнять на материале с максимально высокой скоростью V . При этом период электродов Λ должен быть минимальным. Для создания фильтра с частотой $F = 2$ ГГц при $\Lambda = 2$ мкм скорость V должна составлять 4000 м/с. Значение V пьезоэлектриков, традиционно используемых для создания ПАВ-устройств, таких как кварц, LiNbO_3 , LiTaO_3 , составляет всего лишь 2500–4500 м/с. Хотя современная литография и позволяет формировать структуры с периодом $\Lambda < 0,5$ мкм, для продвижения в область более высоких частот предпочтительно увеличивать скорость распространения звука в ПАВ. Вот почему перспективны слоистые структуры, в которых тонкий слой пьезоэлектрика нанесен на материал—звукопровод с высоким значением V . И здесь алмаз, скорость поверхностной акустической волны в котором $V \approx 10$ км/с, теоретически вне конкуренции. Проблемы и состояние разработок устройств на ПАВ на основе структур типа ZnO/алмаз или AlN/алмаз рассматривались в обзорах [42, 43]. Компанией Sumitomo (Япония) продемонстрирован фильтр на структуре ZnO/алмаз на частоту 3,5 ГГц [44].

Для того чтобы избежать акустических потерь на шероховатостях поверхности, подложку необходимо тщательно полировать. Правда, СВЧ-фильтры на основе ПАВ могут быть созданы и на мелкозернистых (возможно, нанокристаллических) алмазных пленках с низкой исходной шероховатостью [45]. Это позволило бы упростить технологический процесс изготовления слоистых структур, избежав затратной процедуры полировки пленок.

За последние 10–15 лет усилиями исследователей и технологов, в первую очередь Японии, США, Германии и Великобритании, CVD-алмаз превратился в инженерный материал с прогнозируемыми характеристиками и привычными для электроники размерами (50–150 мм). По своим свойствам он приближается и даже превосходит наиболее чистые природные монокристаллы. В России благодаря пионерским работам в ИФХ РАН были заложены основы метода синтеза алмаза при низких давлениях (правда, на подложках небольших размеров). Разработанный в ИОФ РАН метод выращивания алмаза в СВЧ-плазме позволил получать пластины диаметром до 50–75 мм, резко повысить чистоту и совершенство материала и создать (совместно с ЦФП РАН) образцы ростового оборудования мирового уровня. В последние годы еще один центр синтеза крупногабаритных

поликристаллических пластин успешно развивается в ИПФ РАН (Нижний Новгород). Отечественные производители электронных приборов уже осознали реальность существования нового материала, а некоторые успели "пощупать" его, поставив соответствующие НИР (в основном пока лишь по разработке пассивных компонентов – теплоотводящих подложек). И теперь наступает время создания отечественного промышленного оборудования и технологии получения поликристаллических алмазных пластин, тем более для этого уже имеется значительный научный задел. Как анализ литературы, так и собственный экспериментальный опыт показывает, что базовые установки для роста полиалмаза могут быть адаптированы для синтеза монокристаллического алмаза без кардинального изменения их конструкции. Это позволит решать и задачи создания активных электронных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин В., Жукова Т. и др. Транзистор на GaN пока самый "крепкий орешек". – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №4, с.20.
2. Лебедев А., Сбруев С. SiC-электроника: прошлое, настоящее, будущее. – ЭЛЕКТРОНИКА:НТБ, 2006, №5, с.28.
3. Olson J.R., Pohl R.O. et al. Thermal conductivity of diamond between 170 and 1200K and the isotope effect. – Phys. Rev. B, 1993, v. 47, No. 22, p.14850.
4. Алмаз в электронной технике. Сб. статей под ред. В.Б. Кваскова, М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Dischler B., Wild C. (Eds). Low-Pressure Synthetic Diamond: Manufacturing and Applications. – Springer, Berlin, 1998.
6. А.с. 339134 СССР. Способ наращивания граней алмаза, Спицын Б.В., Дерягин Б.В. Приоритет от 10.07.1956. Оpubл. Бюл. №17, 1980, с. 233.
7. Isberg J. et al. High carrier mobility in single-crystal plasma-deposited diamond. – Science, 2002, v.297, p.1670.
8. Miln W.I. Electronic devices from diamond-like carbon. – Semicond. Sci. Technol., 2003, v.18, p.S81–S85.
9. Моряков О.С. Алмазные теплоотводы в конструкции полупроводниковых приборов. Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы – М., 1982, вып.1 (857).
10. Eden R.C. Applications of diamond substrates for advanced high density packaging. – Diamond Relat. Mater. 1993, v.2, p.1051.
11. Ральченко В.Г., Савельев А.В. и др. Двухслойные теплоотводящие диэлектрические подложки алмаз-нитрид алюминия. – Микроэлектроника, 2006, т.35, №4, с.243.
12. Ивакин Е.В. и др. Измерение теплопроводности поликристаллического CVD алмаза методом импульсных динамических решеток – Квантовая электроника, 2002, т.32, с. 367.
13. Ivakin E.V., Ralchenko V.G. et al. Laser-induced dynamic transient application for thermal conductivity measurements of CVD diamond. – Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies. Proceedings of SPIE, 2003, v.5121, p.253.
14. Sukhadolau A.V., Ivakin E.V. et al. Thermal conductivity of CVD diamond at elevated temperatures. – Diamond and Related Materials, 2005, v.14, p.589.
15. Migulin V.V. et al. Oxygen-assisted laser cutting and drilling of CVD diamond plates. – Lasers in Synthesis, Characterization and Processing of Diamond, Proceedings of SPIE, 1998, v.3484, p.175.
16. Podesta A. et al. An atomic force microscopy study of the effects of surface treatments of diamond films produced by chemical vapor deposition.– Diamond and Related Materials, 2006, v.15, p.1292.
17. Ralchenko V.G., Pimenov S.M. Processing of diamond. – Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films. In: Ed. by M. Prelas et al.: Marcel Dekker, New York, 1997, p. 983.
18. Pimenov S.M. et al. Laser polishing of diamond plates. – Appl. Phys. A, 1999, v.69, p.81.
19. Ralchenko V. et al. Nano- and microcrystalline CVD diamond films on surfaces with intricate shape. – A.A. Voevodin et al. (eds), Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings, 2004, p.209/ Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
20. Karabutov A.V. et al. Surface engineering of diamond tips for improved field electron emission. – Diamond and Related Materials, 2001, v.10, p.2178.
21. Ralchenko V.G., Givargizov E.I. Fabrication of very-high-aspect-ratio microchannels in CVD diamond by a molding technique. – Proc. of the 7th Applied Diamond Conference/ 3rd Frontier Carbon Technologies Joint Conference (ADC/ FCT 2003)/ Ed. by M. Murakawa et al., NASA/CP-2003-212319 (2003), p.540–543.
22. Youshin G.N. et al. Study of fusion bonding of diamond to silicon for silicon-on-diamond technology. – Appl. Phys. Lett. 2002, v.81, p.3275.
23. Ralchenko V., Galkina T. et al. CVD diamond films for SOI technologies. – D. Flandre et al. (eds). Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structure and Devices Operating in a Harsh Environment, Kluwer, 2005, p.77.
24. Aleksov A. et al. Silicon-on-diamond: An advanced silicon-on-insulator technology. – Diamond and Related Materials, 2005, v.14, p.308.
25. www.group4labs.com.
26. Dumka D.C., Saunier P. AlGaIn/GaN HEMTs on diamond substrate.– Proc. Devices Research Conference, University of Notre Dame, South Bend, Indiana, USA, June 18–20, 2007.
27. Trew R.J. et al. The potential of diamond and silicon carbide electronic devices for microwave and millimeter-wave applications.– Proc. of the IEEE, 1991, v.79, N.5, p.598.
28. Gildenblatt G.Sh. et al. High temperature thin film diamond field-effect fabricated using a selective growth method.– IEEE Electron Device Letters, 1991, v.12, N2, p.37.
29. Hayashi K. et al. Study of the effect of hydrogen on transport properties in chemical vapor deposited diamond films by Hall measurements.– Appl. Phys. Lett. ,1996, v.68, p.376.
30. Kasu M., Ueda K. et al. Diamond-based RF power transistors: Fundamentals and applications.– Diamond and Related Materials, 2007, v.16, p.1010.
31. Nebel C.E., Ertl F. et al. Low temperature properties of the p-type surface conductivity of diamond – Diamond and Related Materials, 2002, v.11, p. 351.



32. **Umezawa H.** et al. Potential applications of surface channel diamond field-effect transistors. – *Diamond and Related Materials*, 2001, v.10, p.1743.
33. **Kubovich M., Kasu M.** et al. Microwave performance evaluation of diamond surface channel FETs. – *Diamond and Related Materials*, 2004, v.13, p.802.
34. **Kasu M., Ueda K.** et al. 2 W/mm output power density at 1 GHz for diamond FETs. — *IEE Electron Lett.* 2005, v.41, p.1249.
35. **Kohn E., Ebert W.** Electronic devices on CVD diamond. – *Low-Pressure Synthetic Diamond: manufacturing and Applications*. Ed. by B. Dischler, C. Wild, Springer — Berlin, 1998, p.331.
36. **Ueda K., Kasu M.** et al. Diamond FET using high-quality polycrystalline diamond with f_T of 45 GHz and f_{max} of 120 GHz. – *IEEE Electron Device Letters*, 2006, v. 27, N7, p.570.
37. **Ральченко В.Г.** и др. УФ-детекторы на основе поликристаллических алмазных пленок для эксимерных лазеров. – *Квантовая электроника*, 2006, т.36, №6, с.487.
38. **Salvatori S.** et al. High-temperature performances of diamond based UV-photodetectors. – *Diamond and Related Materials*, 2000, v.9, p.982.
39. **Hochedez J-F.** et al. Diamond UV detectors for future solar physics missions. – *Diamond and Related Materials*, 2001, v.10, p.673.
40. **Schmidt G.J.** et al. A neutron sensor based on single crystal CVD diamond. — *Nucl. Instrum. And Methods A*, 2004, v.527, p.554.
41. **Manfredotti C.** CVD diamond detectors for nuclear and dosimetric applications. – *Diamond and Related Materials*, 2005, v.14, p.531.
42. **Белянин А.Ф., Самойлович М.И.** Пленки алмаза и алмазоподобных материалов: формирование, строение и применение в электронике. — *Высокие технологии в промышленности России.* – М.: ЦНИТИ "Техномаш", 2003, с.19.
43. **Shikata S.** CVD diamond for surface acoustic wave filters. – *Low-Pressure Synthetic Diamond: Manufacturing and Applications*. Ed. by B. Dischler and C. Wild, Springer. — Berlin, 1998, p.262.
44. **Shikata S.** et al. SAW filters based on diamond. – *Applications of Diamond Films and Related Materials: 3rd Int. Conf.* Ed. by A. Feldman et al. — NIST Spec. Publ. 885, 1995, p.29.
45. **Mortet V.** et al. Structural characterization of AlN/diamond structures used for surface acoustic wave devices applications. – *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2003, v.199, p.145.
46. **Krauss A.R.** et al. Ultrananocrystalline diamond thin films for MEMS and moving mechanical assembly devices. – *Diamond and Related Materials*, 2001, v.10, p.1952.
47. **Baldwin J.W.** et al. Nanocrystalline diamond resonator array for RF signal processing. – *Diamond and Related Materials*, 2006, v.15, p.2061.
48. **Гарин Б.М.** и др. О потерях в алмазе в миллиметровом диапазоне. – *Письма в ЖТФ*, 1999, т.25, N.7-8; с.85.
49. **Денисов Г.Г.** и др./Известия ВУЗов, серия "Радиофизика", 2003, т.XLVI, N10, с.845.
50. **Thumm M.** *Plasma Phys. and Controlled Fusion*, 2003, v.45, p.A143.