

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ЧЕРЕЗ GaN К АЛМАЗУ

Разработанные в последнее десятилетие поупроводниковые приборы нового поколения на широкозонных III-нитридах значительно превзошли по многим параметрам традиционные приборы на Si и GaAs. Поэтому усилия ученых и разработчиков направлены на исследование и развитие новых многообещающих широкозонных полупроводников (ШЗП): карбида кремния, материалов группы III-нитридов (нитрида галлия, нитрида алюминия, нитрида индия и их соединений, нитрида бора), а также алмаза. Эти материалы отличает уникальное сочетание электрофизических свойств, обещающих качественное улучшение параметров приборов на их основе. Почти по всем основным параметрам ШЗП в несколько раз превосходят традиционные материалы. Поэтому можно ожидать что по своим характеристикам приборы на их основе также будут значительно превосходить Si- и GaAs-приборы.

УРОВЕНЬ РАЗРАБОТОК GaN-ТЕХНОЛОГИИ

Ширина запрещенной зоны широкозонных полупроводниковых материалов в два-пять раз больше, чем у традиционных полупроводниковых материалов (кремния и арсенида галлия)*. Кроме того, у них выше поле пробоя (на порядок) и теплопроводность (табл.1). Дрейфовая скорость насыщения электронов ШЗП либо одинакова, либо несколько больше, чем у Si и GaAs [1,2]. К тому же, они отличаются высокой твердостью, стойкостью к воздействию агрессивных сред и радиационному излучению [3]. На сегодняшний день по достигнутым характеристикам приборов лидер среди ШЗП – нитрид галлия (GaN). Помимо благоприятного сочетания

*См. таблицу в статье: Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы. Применение в электронике. – Наст. №, с.58.

А.Васильев, д-р.ф.-м.н.,
В.Данилин, к.т.н.,
Т.Жукова

ния электрофизических свойств у GaN очень высокие коэффициенты спонтанной и пьезоэлектрической поляризации. В результате в гетероэпитаксиальных структурах (ГЭС) типа AlGaIn/GaN даже без специального легирования формируется двумерный электронный газ (2DEG) с высокими значениями концентрации электронов $n_s \cong (0,8...1,35) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и подвижности $\mu_{2DEG} \cong 1500-2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при комнатной температуре. При этом произведение $n_s \cdot \mu_e$, определяющее частотные свойства прибора, составляет $\sim (1,6...2,5) \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}\cdot\text{В}^{-1}$, что на порядок выше, чем у ГЭС на GaAs. Такое сочетание электрофизических свойств и позволяет создавать приборы на основе GaN с рекордно высокими параметрами на частотах до 100 ГГц [4, 5].

Доклады, представленные на Международной конференции по электронным приборам IEDM-2006, показали, как далеко за последние три-пять лет продвинулись ученые в разработке приборов на GaN (табл.2, 3). Определенные успехи достигнуты и в области создания приборов на карбиде кремния. Так, в исследовательском центре силовой электроники Национального института по перспективным направлениям науки и промышленных технологий Японии (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST) разработан МОП полевой транзистор на 4H-SiC с углубленным каналом [13]. Его напряжение запираения составляет 600 В, сопротивление канала в открытом состоянии $R_{on} - 1,8 \text{ мОм}\cdot\text{см}^2$, рабочий ток – 10 А при активной площади прибора $S = 0,8 \text{ мм}^2$.

Для мощного SiC-транзистора с вертикальным затвором, разработанного сотрудниками компании Northrop Grumman и Исследовательской лаборатории Армии США достигнуто напряжение запираения свыше 2000 В, что составляет ~93% от предельных возможностей карбида кремния [14].

Начат коммерческий выпуск приборов на основе GaN и SiC, что является показателем технического уровня материала и технологии приборов. Так, фирма Nitronex (США) приступила к выпуску серийных GaN HEMT на кремниевой подложке с выходной мощностью $P_{вых} = 15 \text{ Вт}$ (NPT35015) и 50 Вт (NPT35050). HEMT работают в диапазоне частот 3,3–3,8 ГГц, их рабочее напряжение $U_p - 28 \text{ В}$, КПД – 18–20%, рабочая

**Таблица 1. Тепловые и механические свойства материалов, используемых при производстве приборов на ШЗП [39]**

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	Удельное сопротивление, Ом·см	Коэффициент теплового расширения, 10^{-6}K^{-1}	Модуль Юнга, ГПа	Точка плавления, °С	Твердость по Викерсу, ГПа
Природный алмаз	>2000	–	–	1150	–	> 150
CVD-алмаз	≥ 1200	10^{16}	1	1050	–	> 60
Si	149	8 мОм·м	2,6	47	1414	12
GaAs	46	10^6	5,5	85	1530	6,9
SiC	350	10^7	5	400	2300	25
AlN	200	10^{14}	6	344	2200	12
Сапфир	40	10^{16}	8	460	2030	20
Алюминий	237	28 нОм·м	23	70	660	0,167
Медь	401	17 нОм·м	16,5	130	1084	0,369
Золото	318	22 нОм·м	14,2	78	1064	0,216
Серебро	429	16 нОм·м	18,9	83	961	0,251
Термический Si_3N_4	30	–	3	–	1900	16
Термический SiO_2	0,25–0,3	10^7	4	74	1900	13

температура $T_p = 200^\circ\text{C}$. Приборы прошли полный цикл испытаний на надежность [14, 15]. Фирма Eudyna Devices (Япония) поставляет на рынок высоковольтные GaN HEMT моделей EGN045MK и EGN21A180IV. При нелинейном искажении 3 дБ выходная мощность транзистора EGN045MK составляет 47 дБмВт, КПД – 60%, напряжение $U_{\text{си}} = 50 \text{ В}$, рабочая частота – 2,2 ГГц. Мощность транзистора EGN21A180IV, предназначенного для усилителей базовых станций мобильной связи стандарта W-CDMA, равна 180 Вт, КПД – 32%, диапазон рабочих частот – 2,11–2,17 ГГц [16].

Серийные GaN HEMT модели CGN35015 компании Cree с $P_{\text{вых}} = 15 \text{ Вт}$ в диапазоне 3,3–3,9 ГГц, $U_p = 28 \text{ В}$ и КПД 24% предназначены для систем широкополосного беспроводного доступа и WiMAX базовых станций [17].

Приведенные параметры приборов как на GaN, так и на SiC, хотя и значительны, но не предельны. Это обусловлено как недостатками подложечных материалов, так и несовершенством выращиваемых на них эпитаксиальных структур (ЭС). Подложки для GaN ЭС должны иметь минимальное

расхождение с нитридом галлия по параметрам решетки и КТР, хорошую теплопроводность для снятия тепловых ограничений и хорошие изолирующие свойства, обеспечивающие малые потери на СВЧ. Они должны быть доступны и технологичны в обработке. Диаметр подложек должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить экономически эффективное массовое производство. И, наконец, они должны быть достаточно дешевыми. Сегодня наиболее полно этим требованиям отвечают подложки из Al_2O_3 , SiC и $\text{Si}_{(111)}$. Однако рассогласование по постоянной решетки Al_2O_3 -подложки и GaN велико (~14%). К тому же, теплопроводность Al_2O_3 -подложек очень низкая (0,33 Вт/см·К) [18]. Поэтому они в основном применяются при изготовлении маломощных приборов.

Подложки из монокристаллического SiC отвечают большинству перечисленных требований. Однако пока они еще дороги (1000–2000 долл./дюйм²) и трудны в обработке. Приборы на их основе по стоимости еще не могут конкурировать на рынке с GaAs- и Si-подложками, что сдерживает их коммерциализацию. Подложки из $\text{Si}_{(111)}$ очень перспективны

Таблица 2. Характеристики GaN-транзисторов микроволнового и миллиметрового диапазонов, представленных на IEDM 2006

Компания	Тип транзистора	Общая ширина затвора, мм	Рабочая частота, ГГц	Выходная мощность, Вт	Усиление Кр, дБ	КПД, %	Примечание
Cree	Трехкаскадная СВЧ МИС на GaN ГПТШ*	0,15	80,5	0,316, или 2,1 Вт/мм	–	–	Мощность в непрерывном режиме выходного каскада трехкаскадной МИС [5]
Cree, Технологический центр в Санта-Барбаре	Внутрисогласованный усилитель на двух GaN HEMT	28,8 x 2	3,5	550	12,5	66	При напряжении 55 В прибор работал в полосе частот 3,3–3,6 ГГц. Все согласующие компоненты размещены в корпусе усилителя [6]
HRL Laboratories	GaN HEMT	1,0	10	20	20	43	Транзисторы с углубленным субмикронным затвором длиной $L_g = 0,15 \text{ мкм}$ и малой емкостью. Характеристики получены для МИС двухкаскадного усилителя класса АВ [7]
Eudyna Devices	GaN HEMT на четырех кристаллах	36	2,9–3,3	800 (в импульсном режиме)	–	> 59	Выполнен на четырех кристаллах [8]
Отделение твердотельной микроволновой техники компании Toshiba	AlGaIn/GaN HEMT	11,52	9,5	81,3	–	34 (при $V_{DS} = 30 \text{ В}$)	Выполнен на двух кристаллах. Нелинейные искажения 3дБ [9]
Cree	AlGaIn/GaN HEMT с полевым электродом	1,05 1,5	30 30	5,4 5,2 8	–	36 31 31	[10]

*Гетеропереходный полевой транзистор с затвором Шоттки.

Таблица 3. Характеристики мощных GaN-транзисторов, представленных на IEDM 2006

Компания	Тип транзистора	Пробивное напряжение $U_{пр.зс}$, В	Сопротивление в открытом состоянии, $R_{он}$, МОм·см ²	Ток стока, I_d , мА/мм	Пороговое напряжение, $U_{пор}$, В	Примечание
Исследовательский центр полупроводниковых приборов компании Matsushita Electric	AlGaIn/GaN-транзистор на Si-подложке	640	2,6	200	1,0	Характеристики получены для транзистора в нормально закрытом состоянии. В транзисторе, получившем название транзистора с инжекционным затвором, используется инжекция дырок из слоя p-AlGaIn в гетеропереход AlGaIn/GaN. Это позволяет существенно увеличить плотность электронов в обедненном канале и тем самым увеличить ток стока [10]
Отделение электротехники и компьютерной техники Калифорнийского университета в Санта-Барбаре	AlGaIn/GaN HEMT с полевой пластиной	1400	3	–	–	Характеристики получены для транзистора, работающего в обогащенном режиме. Высокое пробивное напряжение и малое сопротивление в открытом состоянии получены благодаря применению самосовмещенной наклонной полевой пластины и обработке в плазме CF4 [11]
Toshiba	GaN полевой МДП-транзистор	380	2	–	–	[12]

с точки зрения экономичности производства. Они технологичны. Освоено массовое производство пластин диаметром до 300 мм. Но на Si₍₁₁₁₎-подложках достаточно сложно выращивать эпитаксиальные слои GaN, AlN и их соединения. Тем не менее, некоторые фирмы, например Nitronex и Oki Electronics, Soitec Group и ее отделение Picogiga International (Франция) разработали методы выращивания на подложках Si₍₁₁₁₎ пленок GaN, пригодных для изготовления HEMT. Лидер в этом направлении – компания Nitronex. С помощью ее технологии на GaN-на-Si₍₁₁₁₎-подложках диаметром 100 мм выращены ЭС AlGaIn/GaN, прошедшие полный цикл испытаний. На базе этих ЭС начат серийный выпуск мощных СВЧ-транзисторов (NPTB00025, NPTB00050, NPT35050 и др.) по доступной цене (950 долл. за два транзистора – NPT35015 и NPT35050). Тем самым компания доказала состоятельность своей технологии [14, 19]. Основной недостаток Si₍₁₁₁₎-подложек – низкая теплопроводность (табл.4).

Для устранения основных недостатков SiC- и Si₍₁₁₁₎-подложек специалистами Soitec Group и Picogiga разработаны следующие четыре вида композитного подложечного материала, пригодного для выращивания слоев GaN с низкой плотностью дефектов: GaN на Si; SiC на изоляторе (SiCOI); GaN на изоляторе (GaNOI); Si на полиSiC (SopSiC) [20, 21].

Подложки типа GaN на Si получают путем непосредственного выращивания слоев GaN на широкодоступных высокоомных подложках кремния (HRSi₍₁₁₁₎) диаметром до 6" (150 мм) [16] предложенным разработчиками Soitec методом молекулярно-лучевой эпитаксии (MBE). Плотность мощности GaN HEMT, изготовленных на таких структурах, в X-диапазоне

составила 9,33 Вт/мм, крутизна $g_m = 120$ мСим/мм и $U_p = 28$ В [20]. Три других типа подложек получены путем комбинирования MBE и технологии "быстрого переноса" слоя (Smart Cut) (рис.1) [21]. Достоинство метода в том, что передняя ростовая сторона композитной подложки, например SopSiC, может служить затравочным материалом для дальнейшего выращивания ЭС GaN, а с другой стороны подложки независимо от передней ростовой поверхности может быть использован материал-носитель (в данном случае полиSiC) с оптимизированными параметрами.

Перспективный тип композитных подложек – SopSiC. Подложка этого типа состоит из слоя HRSi₍₁₁₁₎, выращенного методом зонной плавки, и высокоомного (>10⁵ Ом·см) поликристаллического кубического SiC. Перенесенный на подложку SopSiC слой HRSi₍₁₁₁₎ по кристаллическому совершенству сопоставим с объемным кремнием. Поверхностная шероховатость слоя – ангстремного уровня, что создает идеальные условия для эпитаксиального роста GaN. По тепловым и механическим характеристикам поликристаллический SiC сравним с монокристаллическим материалом. Из сравнения характеристик HEMT-структур на различных типах подложек видно, что структуры на SopSiC незначительно уступают остальным (табл.5). А расчетные зависимости температуры перехода прибора от рассеиваемой мощности для различных типов подложек говорят о том, что SopSiC-подложки, незначительно отличаясь от полиSiC-подложек, существенно превосходят подложки Si₍₁₁₁₎. Вместе с тем, они несколько уступают монокристаллическим SiC-подложкам (рис.2) [21]. Из расчетных зависимостей температуры пере-

Таблица 4. Сравнение свойств различных подложечных материалов, предназначенных для изготовления GaN HEMT [21]

Материал подложки	Диаметр подложки, мм	Теплопроводность, Вт/К·см	Удельное сопротивление, Ом·см	Эксплуатационная готовность	Цена/площадь, отн. ед.
HRSi ₍₁₁₁₎	100	1,5	10 ⁻³ –10 ⁴	Отличная	1
SiC	50	3–4	10 ⁴ –10 ⁸	Плохая	200
Сапфир	100	0,5	>10 ⁸	Хорошая	4
GaN/AlN	50/–	2,1/3	–/>>10 ⁸	Очень плохая/–	–
ПолиSiC	300	3	10 ⁻² –10 ⁹	Отличная	2–3

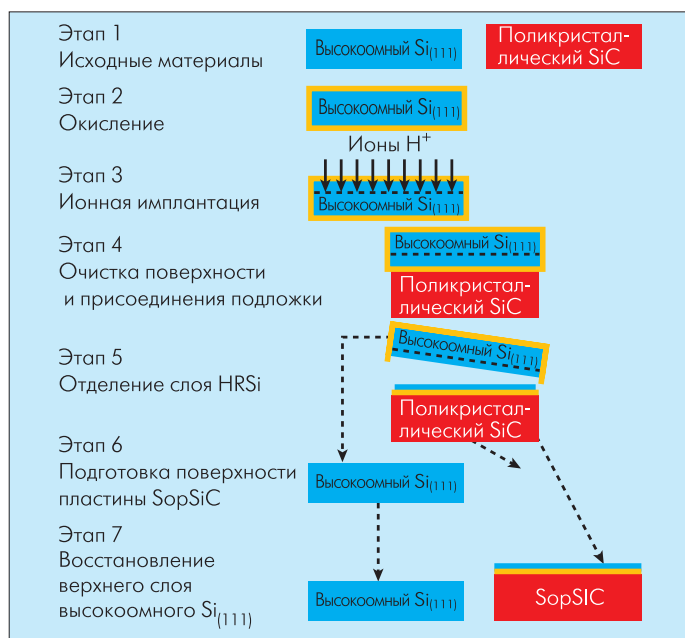


Рис. 1. Smart Cut технология переноса слоя GaN [21]

хода для различных GaN-структур и уровней их мощности видно, что подложки SopSiC мало отличаются от подложек на моно- и полиSiC, но значительно лучше Si-подложек (рис.3) [20, 21]. Следует отметить, что плотность дислокаций GaN-эпитаксиальных структур, выращенных как на простых, так и композитных чужеродных подложках, высока ($D \geq 10^7 \text{ см}^{-2}$), что ухудшает параметры и надежность приборов. Поэтому, несмотря на достигнутые успехи в области разработки GaN-приборов, по-прежнему остаются нерешенными проблемы получения достаточно дешевого подложечного материала из слиточного GaN и отвода генерируемого тепла. Последняя проблема особенно актуальна для мощных приборов. Отсутствие приемлемого теплоотвода не позволяет полностью реализовать расчетные мощности GaN-приборов и приводит к ухудшению их надежности. Все это мешает дальнейшей коммерциализации нитридных приборов и побуждает разработчиков обратиться к алмазу – ШЗП-материалу, по всем основным параметрам превосходящему прочие полупроводниковые материалы.

МИКРО- И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ АЛМАЗНЫЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Искусственный синтез монокристаллов алмаза в мире изучается давно. Десятки предприятий и научных центров в США, Японии, Франции, Великобритании, Германии и других странах мира занимаются прикладными исследованиями и

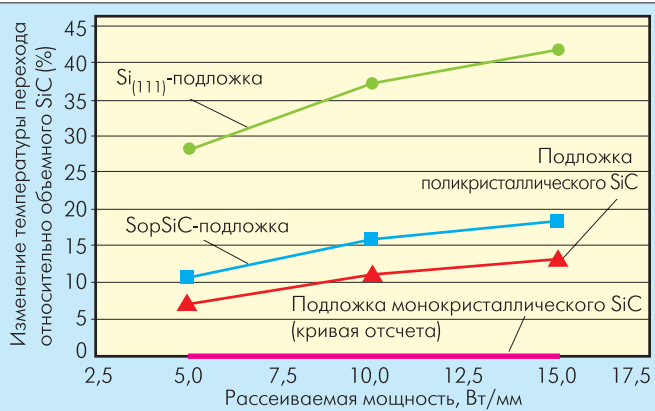


Рис.2. Расчетная зависимость изменения температуры перехода относительно объемного SiC от рассеиваемой мощности [21]

промышленным выпуском изделий на основе синтетических алмазов. Большой вклад внесли Исследовательская лаборатория ВМС США (Air Force Research Lab., AFRL), компании Apollo Diamond, General Electric, Group4 Labs. LLC, Sp3 Diamond Technologies (США), Sumitomo Hamamatsu (Япония), LETY, BOLD (Франция) и др. В России систематические исследования синтеза монокристаллов алмазов и выращивание моно- и поликристаллических алмазных пленок начались в 90-х годах прошлого столетия. Сегодня они продолжают в Центре естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН (Москва), ТРИНИТИ (Троицк), ООО "УралАлмазИнвест" (Москва), Институте физической химии РАН (Москва), Институте минералогии и петрографии СО РАН (Новосибирск) и других.

Из всех ШЗП у алмаза наилучшее для твердотельных приборов сочетание основных электрофизических параметров. В этой группе алмаз выделяется самой высокой теплопроводностью, низкой диэлектрической проницаемостью, способствующей снижению диэлектрических потерь в СВЧ-приборах, и высокой радиационной стойкостью ($>10^{15}$ нейтрон/см²), а также высокой дрейфовой скоростью насыщения как электронов, так и дырок (недавно получены пленки алмаза с $\mu_e = 4500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ и $\mu_p = 3800 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [22]) и высокой напряженностью поля электрического пробоя. Это делает его перспективным материалом для изделий, работающих в экстремальных условиях. Приборы на материале с такими свойствами по своим параметрам могут в десятки раз превосходить традиционные приборы, работать при температурах до 600°C и при рабочем напряжении до 2,5 В и более. Таким образом, на алмазе можно проектировать мощные высокотемпературные приборы, в том числе и СВЧ,

Таблица 5. Характеристики GaN HEMT-структур, сформированных на различных подложках [21]

Тип подложки	Поверхностное сопротивление, Ом/кв.	Подвижность носителей, см ² /В·с	Поверхностная плотность носителей N _s , см ⁻²	Дифракция рентгеновских лучей (002)*	Плотность дефектов, см ⁻²
Si**	250–320	1800–2100	~1·10 ¹³	700	3·10 ⁹
SopSiC**	250–320	1800–2100	~1·10 ¹³	700	3·10 ⁹
SiCOI**	250–320	1800–2100	~1·10 ¹³	300	1·10 ⁹
SiC***	280–320	1500–2300	~1·10 ¹³	150/250	1·10 ⁹

* Полная ширина на уровне максимального значения; **Подложки компании Picogiga International; ***Подложки других поставщиков

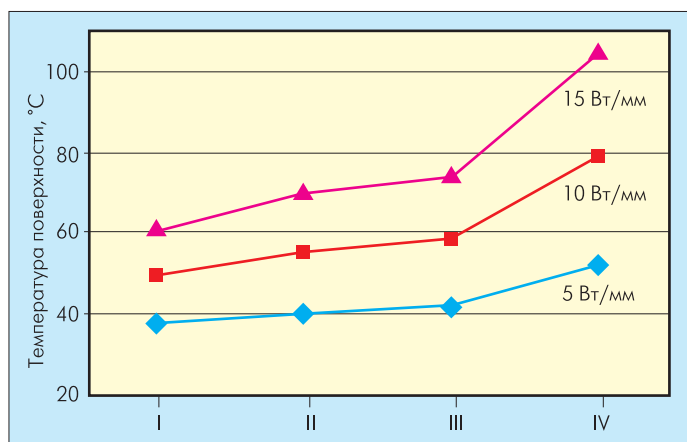


Рис. 3. Зависимость поверхностной температуры прибора от типа подложки (позиция I — для монокристаллической SiC-подложки; позиция II — для полиSiC-подложки; III — для SopSiC-подложки; IV — для Si-подложки) при различной рассеиваемой мощности [20]

способные заменить вакуумные лампы [3, 23]. Высокие же значения подвижности и дрейфовой скорости носителей позволяют создавать быстродействующие цифровые схемы, которые заменят кремниевые микросхемы, выполняемые на основе транзисторов с длиной затвора 0,1–0,05 мкм, при которой пробивные напряжения транзисторов становятся крайне низкими.

Но применению алмаза в электронике препятствуют следующие его недостатки:

- отсутствие доступных по цене пластин монокристаллического алмаза диаметром, пригодном для серийного производства приборов (≥ 100 мм);
- графитизация при температуре выше 600°C в присутствии кислорода и превращение в графит при 900°C;
- трудности механической обработки (шлифовки, полировки) и проведения традиционных технологических операций (формирования областей p- и n-типа, диффузии, ионного легирования, "сухого" и "мокрого" травления), поскольку алмаз самый твердый и химически стойкий материал. Сейчас эти процессы только исследуются;
- сложность контролируемого направленного легирования примесями p- и n-типа, которые уже при комнатной температуре полностью активизированы. Большинство исследованных примесей алмаза имеют очень глубокие примесные энергетические уровни, не позволяющие создавать приборы, стабильно работающие при обычных температурах (например, для бора $E_a = 0,37$ эВ, а для фосфора $E_a = 0,6$ эВ [24, 25]);
- отсутствие промышленной алмазной технологии.

Согласно общепринятой физической классификации по уровню содержания основной примеси — азота, алмаз в зависимости от особенностей спектра ИК-поглощения в однофоновой области делят на типы I и II и подтипы Ia, Ib, IIa и IIb. Большинство природных алмазов относятся к подтипу Ia, 2% природных алмазов — к подтипу IIa. Природные полупроводниковые алмазы подтипа IIb исключительно редки [23, 26].

Размеры добываемых природных кристаллов алмаза, пригодных для промышленного использования, в массе своей малы. Такие алмазы используются в основном для создания режущих инструментов. Более крупных алмазных кристаллов значительно меньше, они дороги и используются в основном в ювелирной промышленности [23]. Вследствие высокой стоимости, невозможности электрофизических свойств, непригодности к промышленному производству из-за малых размеров и ограниченных природных ресурсов о природном алмазе для нужд полупроводниковой электроники речь пока идти не может.

Чистые синтетические монокристаллические структурно-совершенные алмазы выращивать очень трудно и дорого. Но именно на алмазах этого типа исследуется возможность изготовления полупроводниковых приборов. Самый большой синтетический монокристалл алмаза недавно был получен в институте Карнеги в Вашингтоне методом CVD-осаждения в СВЧ-плазме при скорости роста >100 мкм/ч. Высота кристалла составляла 12,7 мм, масса — 10 карат (1 карат = 0,2 г), что соответствует площади сечения ~ 45 мм² [27].

Разработки приборов на синтетическом монокристаллическом алмазе ведутся на протяжении многих лет. Однако до их массового производства предстоит пройти еще длинный путь и решить целый комплекс научных и технологических проблем. Вместе с тем, на природных и синтетических монокристаллах алмаза уже удалось создать СВЧ-транзисторы, диоды Шоттки, "слепые" к солнечному свету фотоприемники, датчики рентгеновского излучения и т.п. Эти приборы, как правило, получены на синтетических гомоэпитаксиальных пленках алмаза, выращенных на монокристаллах синтетического алмаза, полученного методом CVD в СВЧ-плазме, или на природных кристаллах алмаза.

Большинство публикаций, касающихся СВЧ-транзисторов на монокристаллическом алмазе, ограничиваются описанием статических характеристик прибора. Это связано с технологическими трудностями их изготовления и низким качеством используемого алмаза.

Впервые сведения о малосигнальных высокочастотных полевых транзисторах с затвором Шоттки (ПТШ) на алмазе были опубликованы учеными Университета Васеда (Япония) [28]. Приборы были изготовлены на нелегированных гомоэпитаксиальных алмазных пленках, осажденных методом CVD в СВЧ-плазме на подложки алмаза, синтезированные при высоких значениях давления и температуры (High Pressure High Temperature, HPHT-алмаз). Максимальная плотность тока $I_{си}$ транзисторов с затвором длиной $L_3 = 2$ мкм и шириной $W_3 = 50$ мкм была равна 95 мА/мм при $U_{си} = -5$ В и $U_{зи} = -1,5$ В, напряжение отсечки $U_{отс} = 0,5$ В. Крутизна прибора $g_m = 89$ мСм/мм. Частота отсечки прибора f_T при измерениях на малом сигнале была равна 2,2 ГГц, максимальная частота



генерации $f_{\max} - 7$ ГГц. Эта же группа исследователей сообщила об изготовлении на таком же материале МДП-транзистора. В качестве изолятора затвора использовался фторид кальция (CaF_2). Благодаря более низкой затворной емкости СВЧ-параметры транзистора на малом сигнале удалось улучшить в два раза по сравнению с первыми образцами транзистора. Крутизна прибора с $L_3 = 0,7$ мкм на частоте 2 ГГц составляла 40 мСм/мм в широкой области раскачки по $U_{зи}$ (от 0,8 до 1,2 В), что обеспечило высокую линейность сигнала на выходе. Усиление транзистора на частоте 2 ГГц превышало 15 дБ, а f_T и f_{\max} составили 11 и 18 ГГц, соответственно [29].

Японские специалисты электротехнической лаборатории в Тсукуба изучали процесс выращивания тонких монокристаллических нелегированных пленок алмаза на подложках из монокристаллического алмаза (001) методом CVD в СВЧ-плазме в присутствии водорода. Было показано, что на поверхности такой пленки формируется 2DHG-подобный канал (подобный слою двумерного дырочного газа), наведенный водородом, адсорбированным на поверхности и создающим тонкий поверхностный слой p-типа с концентрацией дырок $10^{13}-10^{14}$ см⁻² при комнатной температуре [30]. Механизм этого явления пока полностью не изучен.

Ученые отделения электронных приборов и схем Университета г. Ульм (Германия) [31] создали поверхностно-канальный ПТШ с каналом p-типа, наведенным адсорбированными на поверхности атомами водорода. Транзистор изготовлен на монокристалле синтетического легированного азотом алмаза типа Ib с изолирующими свойствами при комнатной температуре. Гомоэпитаксиальный слой выращивали методом CVD в СВЧ-плазме с последующей обработкой поверхности в плазме водорода для получения поверхностного тонкого слоя, подобного слою 2DHG. Для изоляции приборов на кристалле поверхность пластины селективно обрабатывалась в кислороде. В качестве материала омического контакта использовали Au, затворного барьера Шоттки – Al, который обеспечивает высоту барьера на алмазе 0,8–0,9 эВ. Этот встроенный барьер Шоттки оказался достаточным для обеднения канала без подачи внешнего смещения. В итоге прибор работал в режиме обогащения. В результате ток I_c прибора с $L_3 = 0,2$ мкм был равен -370 мА/мм при $U_k = 10$ В, $U_3 = -3$ В, $U_{отс} = -0,1$ В. Пробивное напряжение по стоку $U_{пр.с} = -68$ В. При работе в усилителе класса А с оптимальной нагрузкой экстраполированный максимум плотности выходной мощности составил 3 Вт/мм. Частота отсечки транзистора $f_T = 11,5$ ГГц, $f_{\max} = 33,3$ ГГц. Согласно оценкам, при уменьшении длины затвора до 0,1 мкм максимальная частота генерации может быть повышена до 50 ГГц.

Совместными усилиями специалистов компании Nippon Telegraph and Telephone (NTT) и Университета г. Ульм (Германия) создан ПТШ на алмазе, работающий на частоте 81 ГГц

[32]. Разработчики отмечают, что главная проблема для изготовления на алмазе приборов с приемлемыми характеристиками – несовершенство материала (высокая плотность дефектов и присутствие неконтролируемых примесей). Теоретический анализ, проведенный компанией NTT, показал, что благодаря высоким значениям теплопроводности, пробивного напряжения и дрейфовой скорости носителей алмазные приборы, в сравнении с кремниевыми, могут работать при в пять раз большей температуре, в 30 раз больших значениях напряжения и на в три раза более высоких частотах [32]. Эти результаты показывают, что алмазные ПТШ способны стать альтернативой для ВЧ- и СВЧ-мощных приборов на основе традиционных материалов. Однако измерения, выполненные учеными Университета г. Ульм на частоте 4 ГГц, выявили нестабильность и деградацию алмазных транзисторов при высоких уровнях мощности. Решение этой проблемы они видят в замене поверхностного канала, наведенного водородом, углубленным импульсно легированным бором слоем. По расчетным данным компании NTT и Университета г. Ульм, плотность выходной мощности в этом случае составит ~30 Вт/мм, а максимальная частота – 200 ГГц.

Справедливость такого прогноза подтверждают результаты, полученные разработчиками лаборатории фундаментальных исследований компании NTT. На гомоэпитаксиальной пленке алмаза, выращенной CVD-методом на монокристаллической синтетической HPHT-алмазной подложке, ими были изготовлены ПТШ с частотой отсечки f_c на малом сигнале, равной 45 ГГц, и $f_{\max} - 120$ ГГц. Мощность транзисторов на большом сигнале составила 2,1 Вт/мм на частоте 1 ГГц [33].

Полученные результаты свидетельствуют о положительной тенденции развития технологии приборов на синтетическом монокристаллическом алмазе. Однако эти приборы пока еще не могут работать на большом сигнале в силу все тех же ранее упомянутых проблем: отсутствия отработанной приборной технологии и качественного материала достаточно большого диаметра.

Но одно из главных достоинств алмаза – уникальная теплопроводность – может быть эффективно использовано уже в ближайшее время. Речь идет о применении алмаза в качестве теплопроводящей поликристаллической подложки мощных полупроводниковых приборов. Полупроводниковые приборы и электронные системы, особенно мощные, генерируют тепловые потоки, которые необходимо быстро отводить для предотвращения их перегрева, приводящего к ухудшению параметров приборов и устройств на их основе. Несмотря на то, что абсолютные уровни мощности в полупроводниковых приборах умеренные – от нескольких десятков до нескольких сотен ватт, – плотности тепловых потоков могут быть значительными (~50 Вт/см²), а в ряде приборов, например в твердотельных лазерах, достигать 2000 Вт/см² [34]. Проблему отвода такого большого количества тепла

можно эффективно решить за счет синтеза CVD-методом поликристаллических алмазных пленок и пластин (толщиной от нескольких нанометров до нескольких миллиметров) на подложках Si, SiC, AlN диаметром 100 мм и более.* При выращивании CVD-методом алмазных поликристаллических пленок на подложках кремния, т.е. структуры "алмаз на кремнии" (Diamond on Silicon, DOS), используются достаточно дешевые исходные реагенты (метан и водород). Поэтому стоимость таких подложек невелика и может оказаться меньше стоимости SiC-подложек. По многим физическим параметрам CVD поликристаллический алмаз приближается к лучшим природным монокристаллам алмаза. Таким образом, DOS-подложка может служить альтернативой подложкам типа SOI, SiCOI, SopSiC и другим.

Теплопроводность поликристаллических пленок алмаза зависит от их толщины и размера зерен. Так, теплопроводность пленки толщиной в несколько сот микрометров при комнатной температуре составляет 16–18 Вт/см·К, а при толщине <10 мкм – уже менее 10 Вт/см·К [35]. Значения теплопроводности в зависимости от толщины пленки могут отличаться в три раза. Полученную DOS-структуру нельзя использовать непосредственно в качестве подложки для нанесения GaN ЭС, так как ее поверхность со стороны полиалмаза не подходит для эпитаксиального выращивания на ней пленок GaN из-за полного рассогласования их кристаллических решеток и КТП. При выращивании пленки GaN на кремниевой стороне DOS-подложки толстый (>500 мкм) слой кремния необходимо утоньшать до менее 20 мкм, чтобы вклад кремния в общую теплопроводность структуры был минимальным. Кроме того, при создании DOS-структуры с целью ее удешевления используют подложку кремния низкого качества, непригодную для выращивания на ней приборных GaN-слоев.

Поэтому возникла необходимость создания композитной подложки на основе CVD-полиалмаза с тонким (<20 мкм) слоем кремния приборного качества, т.е. подложки типа "кремний на полиалмазе" (Silicon-on-Diamond, SOD). Существуют различные способы формирования структур SOD: технология присоединения слоя кремния приборного качества к полиалмазу DOS-структуры (как в SOI); прямое осаждение алмазных пленок на кремний приборного качества DOS-подложки (или другую подходящую подложку) или комбинация этих двух способов**. [36].

В рамках программы США WBGSTI*** группе ведущих компаний США – Sp3 Diamond Technology, Nitronex, TriQuint, Emscore, Group4 Labs, а также Исследовательской лаборатории ВМС США – было поручено разработать промышлен-

ную технологию получения подложек типа SOD диаметром ≥ 100 мм с нанесенным слоем GaN. Этот слой должен быть пригодным для выращивания GaN ЭС, на которых можно формировать активные приборы и СВЧ МИС.

Компания Sp3 Diamond Technology разработала композитную SOD-подложку с верхним тонким слоем кремния приборного качества. Первоначально специалистами компании Sp3 были изготовлены DOS-подложки большого диаметра. Алмазные пленки осаждались на дешевые подложки монокристаллического кремния методом CVD в СВЧ-плазме с горячей нитью. Это позволило получить поликристаллические алмазные пленки толщиной от нескольких субмикрон до 50 мкм со сверхгладкой поверхностью. Благодаря хорошему состоянию полученной ростовой поверхности кристалла на нее методом присоединения переносился тонкий (1–20 мкм) слой монокристаллического высокоомного кремния приборного качества. На этот слой уже можно осаждать GaN-пленки. Исходная (жертвенная) подложка кремния удалялась путем шлифовки-полировки и химического травления. Таким образом была получена SOD-подложка. На второй фазе программы WBGSTI фирма Sp3 разработала технологию получения GaN-пленок на SOD, пригодных для изготовления приборных структур.

Моделирование приборов на теплопроводящем слое поликристаллического алмаза показало, что по сравнению с приборами на традиционных подложках температура перехода HEMT снижена на 80К, а выходная мощность увеличена с 6 до 15 Вт/мм. Это позволяет утверждать, что срок службы приборов на подложках GaN на SOD в 16–1700 раз больше, чем у GaN HEMT на SiC- и Al₂O₃-подложках [37, 38]. Появление SOD-подложек – большой успех в продвижении GaN HEMT на рынок. Компания Sp3 Diamond Technology готова поставлять структуры на SOD-подложках диаметром 50–300 мм для проведения исследований в области СВЧ-транзисторов, лазерных диодов, светодиодов и других приборов. Sp3 работает в тесном контакте с фирмой Nitronex, которая с помощью отработанных методов выращивания GaN ЭС создает на ее подложках мощные GaN HEMT (рис.4) [37].

SOD-подложки – хорошие теплораспределители. Разработчики компании TriQuint Semiconductor рассчитали снижение температуры прибора мощного СВЧ-транзистора при замене Si-подложки толщиной 150 мкм на SOD-подложку с алмазным слоем толщиной 20 мкм (рис.5), а также зависимости температуры прибора от рассеиваемой мощности для подложек из Si, SiC и алмаза толщиной 100 мкм (рис.6) [37]. Теплопроводность алмаза была принята равной 6 Вт/см·К. В результате достоинства алмаза были недооценены. Тем не менее, при использовании SOD-подложек резкое уменьшение нагрева прибора очевидно.

Больших успехов в разработке промышленной технологии получения подложек из поликристаллического алмаза

*См.: Сидоров В. Полиалмаз и алюминитридная керамика. Перспективные теплоотводы корпусов СВЧ-транзисторов. – Наст. №, с.77.

**См.рис. 10 в статье: Ральченко В., Конов В. CVD-алмаз для электроники. – Наст. №, с.58.

***См.: Викулов И., Кичаева Н. GaN – технология. Новый этап развития СВЧ-микросхем. –Наст. №, с.80.

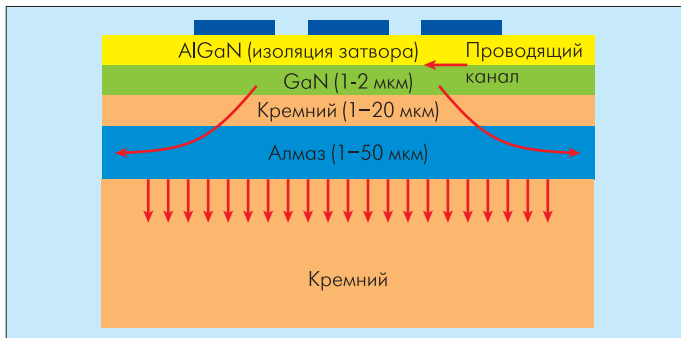


Рис.4. Структура композитной SOD-подложки [37]

достигла компания Group4 Labs, специалистами которой разработаны и запатентованы две ключевые технологии:

- физико-химический метод обработки поверхности, позволяющий превращать грубую ростовую поверхность поликристаллического алмаза, выращенного методом CVD в СВЧ-плазме с горячей нитью, в поверхность, пригодную для присоединения к ней монокристаллической эпитаксиальной полупроводниковой пленки;
- метод надежного атомарного присоединения монокристаллических полупроводниковых соединений к специально обработанной поверхности поликристаллической CVD алмазной подложки, обычно несовместимой со сложными полупроводниковыми соединениями.

Полученные с помощью этих методов композитные пластины GaN на CVD-алмазе (GaNOD) компания Group4 Labs потавляет на рынок как в виде самостоятельных алмазных поликристаллических подложек толщиной от 25 мкм до толщины, определяемой заказчиком, так и в виде подложек GaNOD диаметром 50 мм с поверхностью, готовой под эпитаксию нитрида галлия с верхним слоем Ga- или N-полярности. Семейство таких пластин названо Xero Wafer. Пластины Xero Wafer состоят из слоя GaN (Ga- или N-полярности) толщиной 500 нм, присоединенного через промежуточный слой (не металлической и не органической природы) толщиной 0,5 мкм

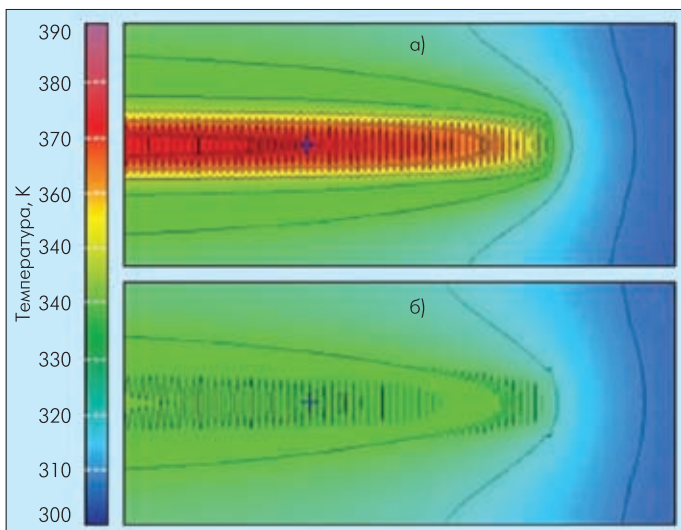


Рис.5. Понижение рабочей температуры мощного многозатворного СВЧ-транзистора: а) на Si-подложке толщиной 150 мкм; б) на SOD-подложке с 20-мкм слоем алмаза [37]

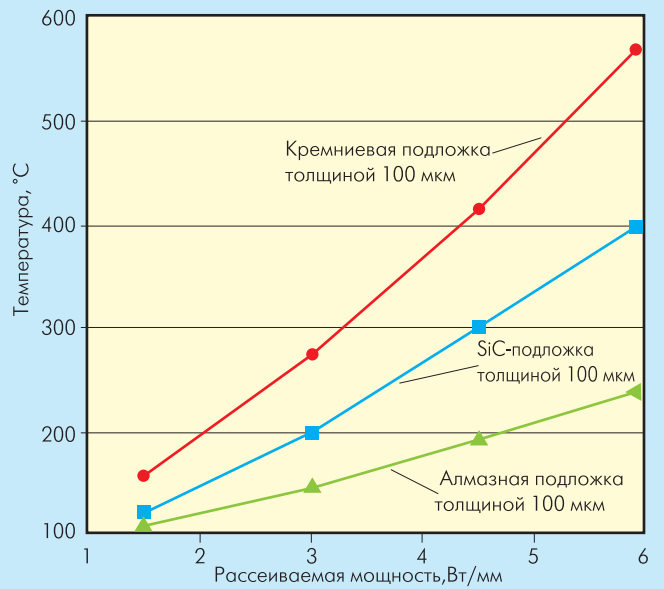


Рис.6. Зависимости температуры GaN HEMT, выполненных на различных подложках, от рассеиваемой мощности [37]

к подложке полиалмаза по технологии компании Group4. Поставляемые пластины пригодны для непосредственного эпитаксиального выращивания III-нитридных слоев (AlN, InN, GaN) и их соединений, предназначенных для изготовления полупроводниковых приборов. Пластины Xero Wafer диаметром 50 мм поставляются по цене от 5 тыс.–7 тыс. долл. за штуку. Цена пластин размером 10×10 мм с поверхностью Ga-полярности – 550–600 долл., N-полярности – 450–500 долл. [39]. Эти пластины могут успешно конкурировать с GaN, SiC, Si и Al₂O₃ подложками. Пока рекордные значения мощности и частоты транзисторов были получены на подложках GaN на SiC. Тепловой расчет модели HEMT, проведенный компанией Group4, показал, что GaNOD пластины Xero Wafer позволяют существенно снизить температуру прибора и повысить плотность рассеиваемой мощности (рис. 7).

Сотрудники Group4 Labs утверждают, что применение подложки GaN на алмазе позволит улучшить плотность мощности транзисторов, используемых в усилителях антенных решеток в зависимости от условий и режимов работы в 5–100 раз по сравнению с GaN-транзисторами на SiC-подложках.

Подложки типа SOD, GaN-на-SOD и GaNOD найдут широкое применение в качестве теплораспределителей и теплоотводов в конструкциях полупроводниковых приборов и МИС.

В августе 2006 года компании Group4 Labs и Emcore совместно с Исследовательской лабораторией ВМС США объявили о создании первого в мире работающего AlGaIn/GaN HEMT на подложке GaNOD [38]. ЭС HEMT была выращена компанией Emcore методом химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (MOCVD) на подложке GaNOD, поставляемой компанией Group4 Labs. HEMT были изготовлены в Исследовательской лаборатории ВМС. Характеристики приборов не приводятся, сообщается лишь, что HEMT успешно функционировали. Но тот факт, что получены

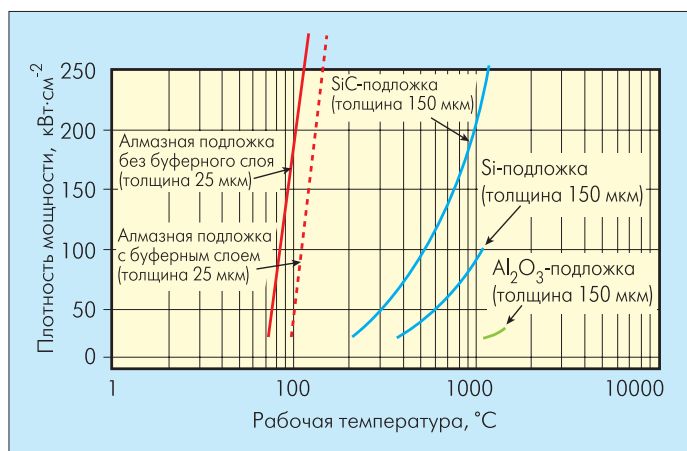


Рис.7. Зависимость рабочей температуры НЕМТ, выполненных на различных подложках, от рассеиваемой мощности кристалла

работающие НЕМТ X-диапазона на GaNOD, позволяет надеяться, что в ближайшем будущем произойдет очередной скачок параметров приборов на основе ШЗП.

На основании проведенного анализа можно констатировать, что ШЗП имеют существенные преимущества перед традиционными полупроводниками, что подтверждается рекордными параметрами приборов на основе GaN и SiC. Начало коммерческого выпуска приборов на этих материалах показывает, что главные технологические проблемы приборов на этих материалах уже решены. Но возможности приборов на гетероструктурах AlGaN/GaN в полной мере еще не реализованы из-за отсутствия качественного подложечного материала с высокой теплопроводностью. Существенным вкладом в решение этой проблемы может стать создание теплопроводящих подложек на основе полиалмаза.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hudgins J. L.**— Journal of Electronic Materials, 2003, v.32, No.6, p.471–477.
2. **Itoh Y., Honjo K.**— IEIC Trans. Electron, Feb. 2003, v.E86-C, No.2, p. 108–119.
3. **Данилин В.Н., Жукова Т.А., Кузнецов Ю.А.** и др. Обзор по электронной технике. Сер.1, СВЧ Техника, 2001 вып.1, .
4. **Данилин В.Н., Жукова Т.А.** и др. ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, № 4, с. 20–29.
5. **Micovic M., Kurdoghlian** et al.— IEEE IEDM, 15.6, 2006.
6. **Wu Y.-F., Wood S.M.** et al. — IEEE IEDM 2006, 15.4.
7. **Moon. J.-S., Wonget D.** et al.— IEEE IEDM 2006, 15.5.
8. **Mitani E., Aojima M.** et al. —Int. Conf. on CS MANTECH 2007, May 14–17, Ses.11, GaN & SiC Power Devices (не опубли.)
9. **Takagi K., Vasuda R.** et al.— 28-th IEEE CSIC Sympoium, Nov.13–14, 2006, Abst. N.5.
10. **Wu Y.-F., Moore M.** et al. —IEEE IEDM, 2005, 23.5.
11. **Mitani E., Aojima M.** et al.— Int. Conf. on CS MANTECH, 2007, May 14–17, Ses.11, GaN & SiC Power Devices (не опубли.)
12. **Saito W., Omura I., Tsuda K.** — Int. Conf. on CS

- MANTECH 2007, May 14–17, Ses.11, GaN & SiC Power Devices (не опубли.)
13. **Harada S., Kato M.** et al.— IEEE IEDM, 2006, 35,1.
14. **Veliadis V., MeganMcCoy** et al.— Int. Conf. on CS MANTECH 2007, May 14–17, Ses. 11, GaN & SiC Power Devices, не опубли.
15. Compound Semiconductor 2006, v.12, No.7, p.11.
16. Каталог фирмы Eudyna Device www.eudyna.com/e/products_e/newproducts_e/gan_hemt_era.html
17. Каталог фирмы Cree
18. **Dadgar A., Strittmater A.** et al.— Physic Status Solidy (c) 0, No.6, 2003, p.1583–1606.
19. **Piner Ed.** —Compound Semiconductor, 2004, July, vol.10, No.6, p. 27–31.
20. **Bove P., Lahreche H.** et al. —Solid State Technology, Jan. 2006, p. 43-46.
21. **Ledys J.-L., Letertre F.** —Compound Semiconductor, 2005, v.11, No.10, p.24.
22. **Isberg J., Hammersberg J.** et al.— Science, 297 (2002), 1670.
23. Природные алмазы России. Под ред. В.Б. Кваскова.—М.: Полярон, 1997.
24. **Balmer S., Friel I.** et al. — MRS Fall meeting, Symposium J: Diamond electronics – Fundamentals to applications, Nov.27–Dec.1, 2006, Abst.J1.2.
25. **Kohn E., Aleksov A.** et al.— CS MANTECH 2004, Abst.2.5.
26. **Катруша А.Н., Новиков Н.В.** и др. ISSN 0203 – 3119. Сверхтвердые материалы, 2004, № 2, с.41–46.
27. **Krasnicki S., Yan C.-S.** et al. —MRS Fall meeting, Symposium J: Diamond electronics – Fundamentals to applications, Nov.27 – Dec.1, 2006, Abst.J9.28.
28. **Taniuchi H., Umezawa H.** et al.— IEEE Electron Device Letters, Aug. 2001, v.22, No8, pp. 390–392.
29. **Umezawa H., Hirotsuda** et al.— IEEE Electron Device Letters, March, 2002, v.23, No3, p. 121–123.
30. **Hayashi K., Yamanaka S.** et al. — Appl. Phys. Letters, 1996, v.68, p. 376–378.
31. **A. Aleksov, Denisenko A.** et al.— IEEE Electron Device Letters, Aug. 2002, v.23, No.8.
32. Compound Semiconductor, Oct. 2003, p. 13.
33. **Tallaire A., Kasu M.** et al.— MRS Fall meeting, Symposium J: Diamond electronics – Fundamentals to applications, Nov.27–Dec.1, 2006, Abst.J9.7.
34. **Tampa G.S., Voronov O.A., Veress A.A.**— MRS Fall meeting, Symposium J: Diamond electronics – Fundamentals to applications, Nov.27–Dec.1, 2006, Abst.J8.4.
35. **Ralchenko V., Galkina T.** et al.— Science and technology of semiconductor-on-insulator structures and devices operating in harsh environment, 2005, 77–84. Kluver academic publishers.
36. **Alexov A., Li X.** et al.— Diamond & Related Materials 14 (2005) 308–313.
37. **Zimmer J., Chandler G., Aidala D.** Compound Semiconductor, Jan/Feb 2007, p.29–31.
38. www.compoundsemiconductor.net/articles/news/10/8/4/1.
39. www.group4labs.com