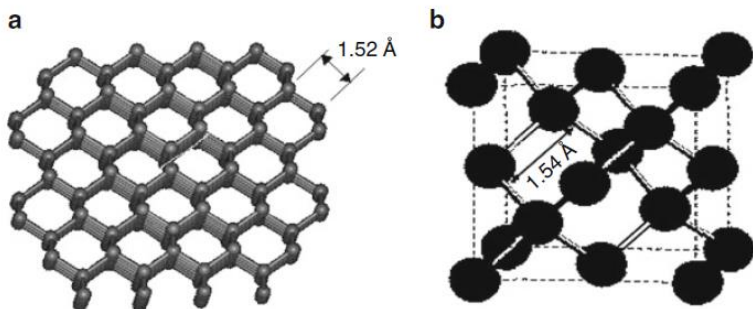


Современное состояние и перспективы развития твердотельной электроники на основе алмаза и алмазоподобных материалов

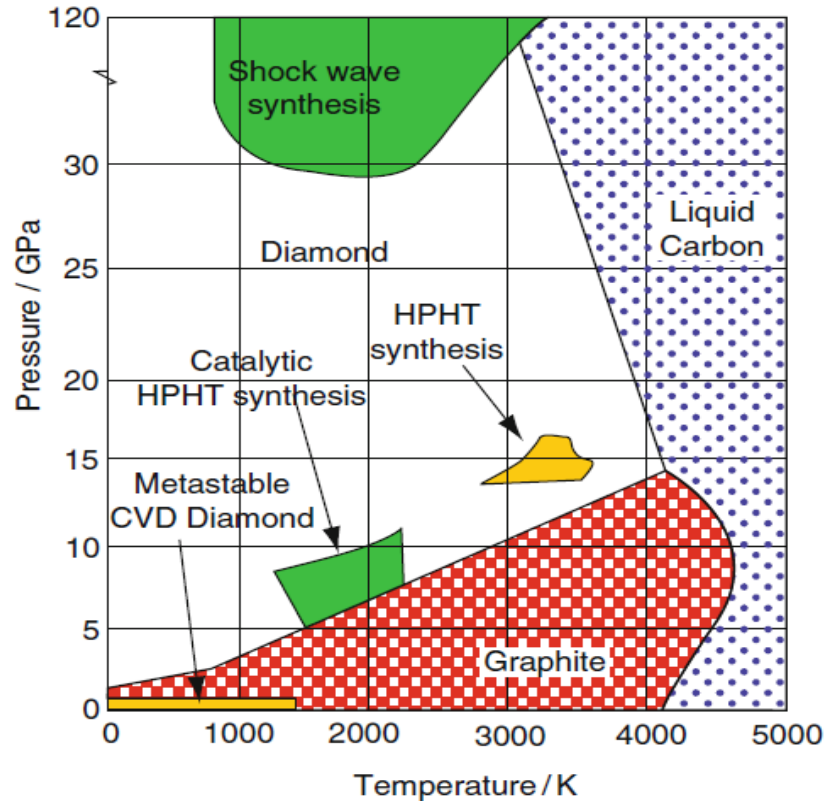
*Сергей Ковешников
Институт Проблем Технологии
Микроэлектроники РАН*



Содержание

- 1. Получение, свойства и области применения алмазов и алмазных пленок*
- 2. Прогресс в развитии алмазной технологии для микроэлектроники*
- 3. Разработка полевых (нормально открытых) транзисторов*
- 4. Заключение*

Методы роста алмаза и алмазных пленок



1. *Высокотемпературный метод при высоком давлении (HPHT) имитирует условия формирования природного алмаза: алмаз устойчив при высоких температурах ($> 1,300^{\circ}\text{C}$) и высоких давлениях (> 40 кбар).*
2. *Метод (CVD) представляет собой метод синтеза алмаза при низком давлении и низких температурах за счет химического осаждения из газовой фазы (Генерация атомарного водорода вблизи поверхности является важным фактором роста пленки).*

CVD рост алмазных пленок

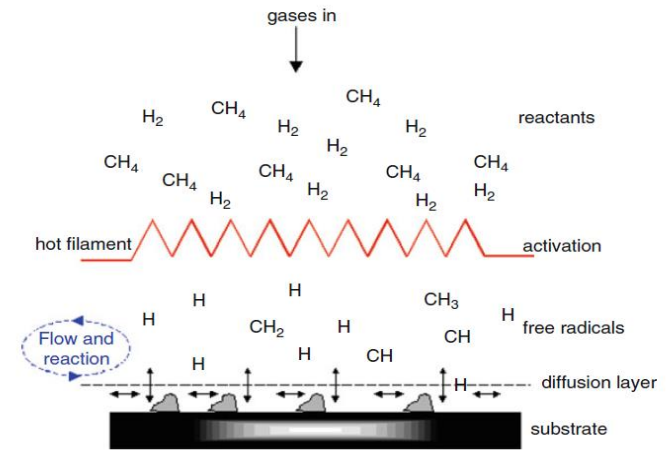
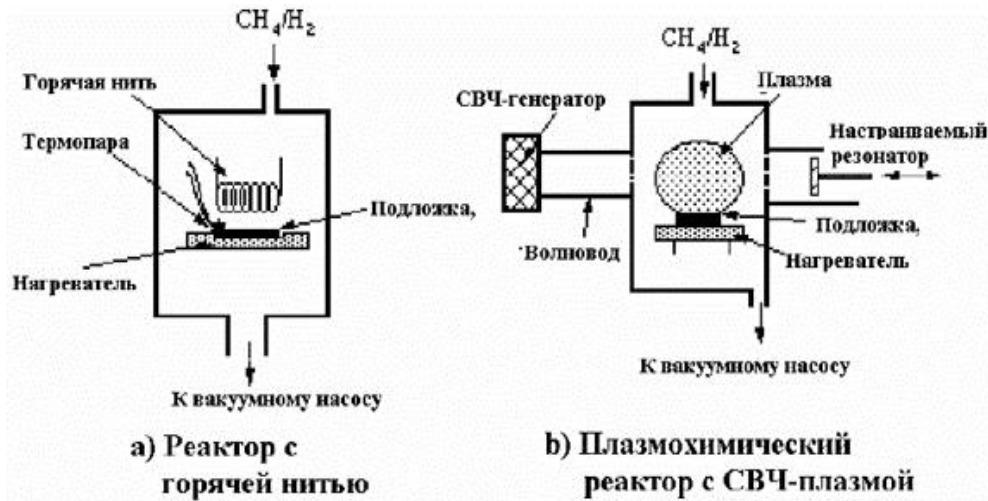
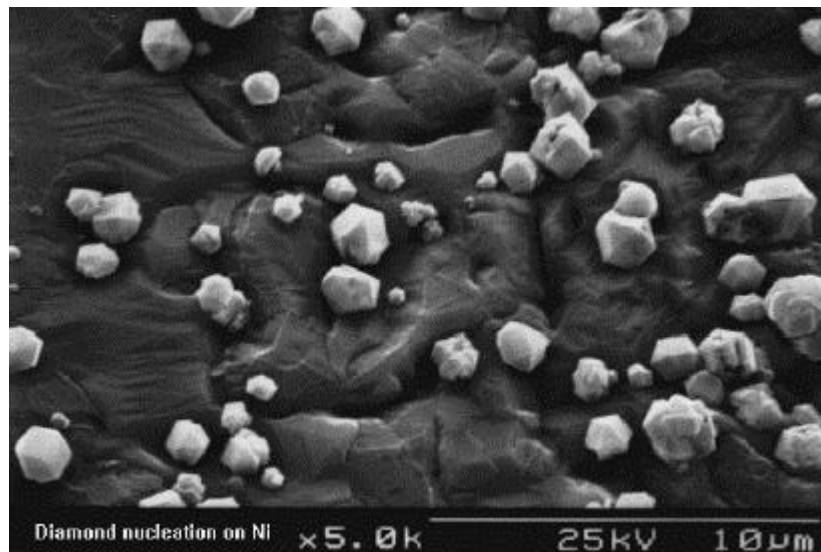
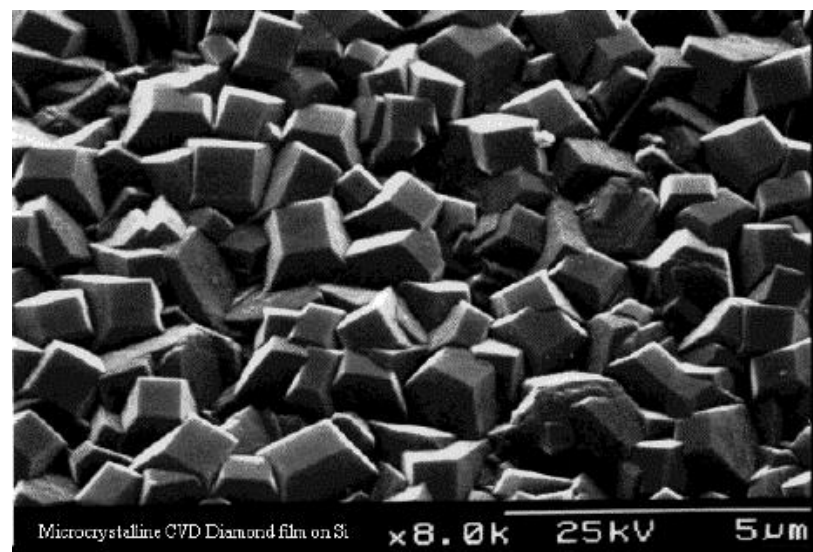


Fig. 3 Chemistry of hydrocarbon radicals and hydrogen atoms in a hot filament chemical vapor deposition method

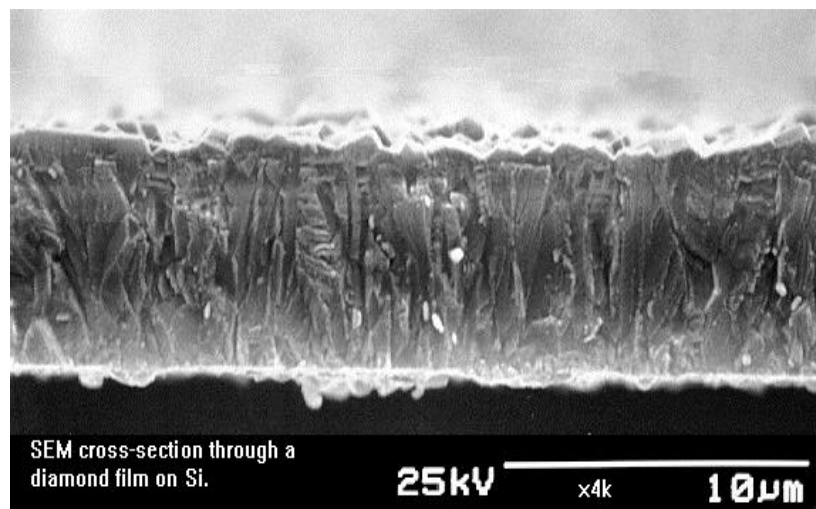
- Газовую смесь, например CH_4 в H_2 , вводят в камеру реактора через горячую нить, расположенную над подложкой.
- При температуре филамента 2000°C , CH_4 и H_2 разлагаются на его поверхности с образованием радикалов углеводородов и атомов H
- Образованные радикалы химически реагируют либо в газовой фазе, либо на подложке
- Самой эффективной подложкой является сам алмаз. Кремний - следующий наиболее эффективный и наиболее изученный материал для роста алмазных пленок
 - Разупорядоченность решетки между кремнием и алмазом составляет около 52% (постоянная решетки кремния составляет $5,4301\text{ \AA}$, а для алмаза - $3,5667\text{ \AA}$)
 - Несмотря на большую разницу в коэффициенте теплового расширения между кремнием и алмазом, адгезия пленки хорошая, благодаря слою карбида кремния, образованную до формирования зародышей алмаза



Алмазные микрокристаллы кристаллы на поверхности Ni.

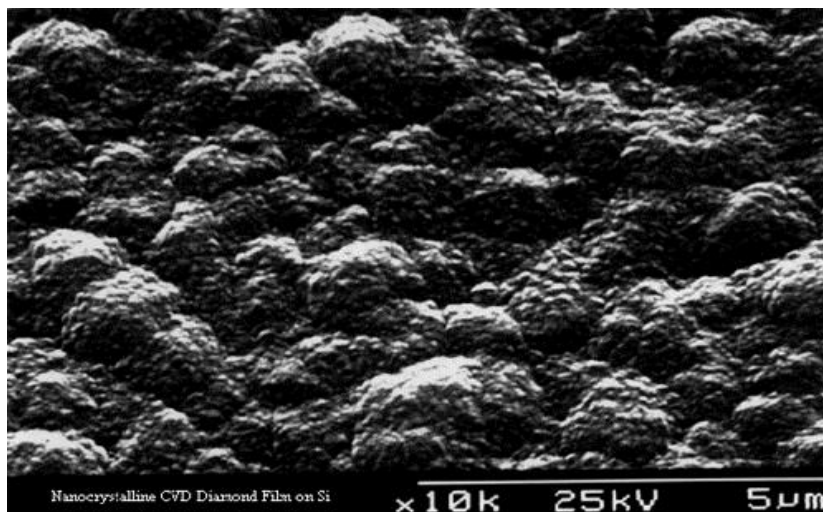


Микрокристаллическая CVD-алмазная пленка на кремнии.



Поперечный срез алмазной пленки толщиной 6,7 мкм на кремниевой подложке

11/30/2018



Нанокристаллическая пленка, типичная для выращенной при высоких (>2 %) концентрациях метана.

Некоторые из известных свойств алмазов:

- Предельная механическая твердость (~ 90 ГПа).
- Прочность – высокий объемный модуль $1,2 \times 10^{12}$ Н/м², низкий коэффициент сжатия $8,3 \times 10^{-13}$ м²/Н.
- Наивысшее значение теплопроводности при комнатной температуре 2×10^3 Вт/м/К.
- Коэффициент теплового расширения (КТР) при комнатной температуре $0,8 \times 10^{-6}$ К.
- Высокая теплопроводность (в четыре раза больше, чем у меди).
- Широкая полоса пропускания оптического излучения от глубокого УФ до далекого ИК.
- Удельное сопротивление $\sim 10^{16}$ Ом·см при комнатной температуре.
 - При легировании удельное сопротивление от 10 до 10^6 Ом·см,
 - что превращает его в широкозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны $5,4$ эВ.
- Высокие химические антикоррозионные свойства.
- Биологически совместимый материал.
- Высокая радиационная стойкость (прозрачен в широком диапазоне от УФ до радиоволнового

Параметры некоторых полупроводников при $T=300$ К

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

(В.Ральченко, В.Конов, ЭЛЕКТРОНИКА: 2007)

Применения алмазных пленок

Материалы для теплоотводов.

Теплоотводы лазерных диодов и небольших СВЧ интегральных схем.

Режущие инструменты, износостойкие покрытия, композиционные материалы.

Абразив или покрытие на вставках режущего инструмента (напр., буровые головки).

Способность предохранять механические части, например, в коробке передач, трансмиссии...

Осаждение алмазных пленок на поверхности металлических проводов или неметаллических волокон

Оптика.

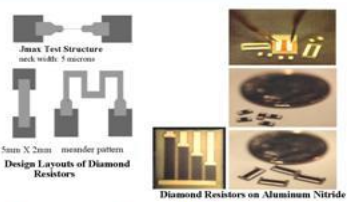
Защитное покрытие для инфракрасной оптики (для покрытия материалов типа ZnS, ZnSe, и Ge).

Электронные устройства (силовая, СВЧ электроника, работающая в экстремальных условиях).

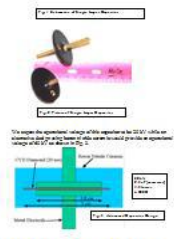
Возможность легирования алмаза, изменяя его электрические свойства

APPLYING DIAMOND - passives

DIAMOND POWER RESISTORS

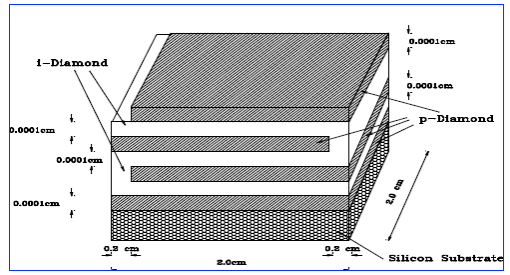
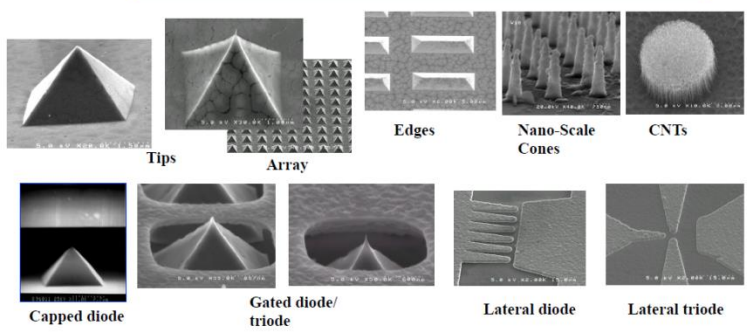


Power density of 12.4 MW/cm²
Operation at > 600 °C
Extreme operation thermistor



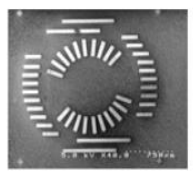
DIAMOND POWER CAPACITORS

Carbon/diamond electron emission device forms

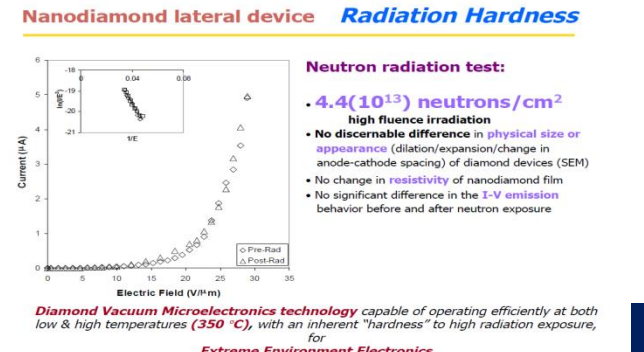
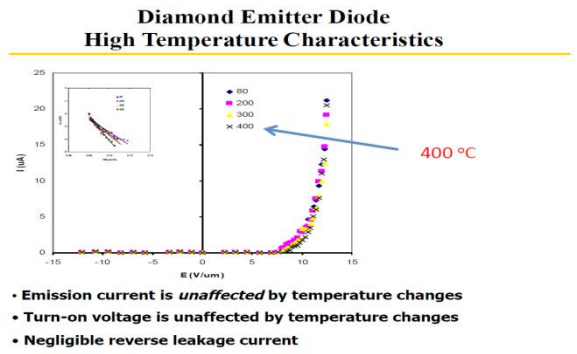


Comb Structured Capacitor

- 30 square resistor configuration for high temperature environment

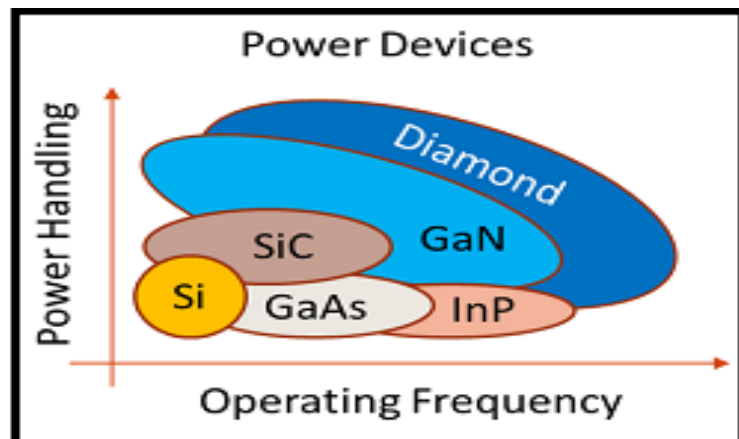


- Metal etch mask
- O₂ RIE of diamond film
- Layer uniformity



Силовая электроника на основе алмаза

Высокие значения напряжения пробоя, высокая подвижность носителей заряда и высокая теплопроводность используются в мощной высокочастотной электронике.



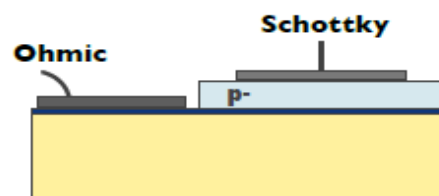
Property	Symbol [unit]	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond
Bandgap	E_G [eV]	1.1	1.43	3.23	3.45	5.45
Saturated drift velocity	v_S [10^7 cm/s]	1.0	1.0	2.0	2.2	1.1
Electron mobility	μ_n [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]	1500	8500	1000	1250	1000
Hole mobility	μ_p [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]	480	400	100	200	2000
Breakdown field	E_B [MV/cm]	0.3	0.4	3	2	10
Relative dielectric constant	ϵ_r	11.8	12.5	9.8	9	5.5
Thermal conductivity	λ [W/cm.K]	1.5	0.5	5	1.5	22
Johnson's figure of merit	JFM [10^{23} $\Omega\cdot\text{W}/\text{s}^2$]	2.3	4	900	490	2530
Keyes figure of merit	KFM [10^7 W/Ks]	10	3.3	53	17	218
Baliga's figure of merit	BFM [Si=1]	1	14	554	188	23068

TABLE I. Basic physical properties of wide band gap semiconductors and related figures of merit¹ (Johnson, Keyes and Baliga) (see footnote for definitions).

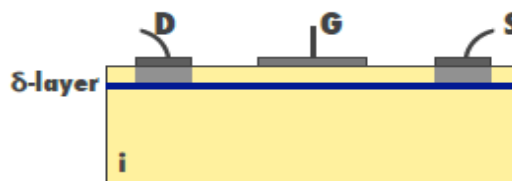
¹ Johnson's figure of merit: $JFM = (\frac{E_G v_S}{2\pi})^2$ - Frequency and power products of transistor.
 Keyes' figure of merit: $KFM = \lambda (\frac{v_S}{2\pi E_B})^{\frac{1}{2}}$ - Thermal limitation on high-frequency performance.
 Baliga's figure of merit $BFM = \epsilon_r \mu E_B^3$ - Loss in high power and high-frequency operation.

В настоящее время активно исследуются структуры на основе двумерного дырочного газа, включая:

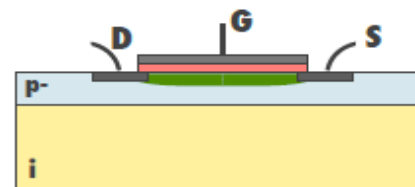
- структуры с обработанной в водороде поверхностью
- транзисторы на основе AlN/алмаз гетероструктур,
- Транзисторы на основе концепции δ -легирования бором (δ -FET).



Schottky



δ -FET



MOSFET

Псевдо-вертикальная структура диода Шотки, транзистор с δ -легированием бором ($5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) и МОП транзистор с Al-Al₂O₃-р-тип алмаз структурой

Развитие микроэлектроники на основе алмаза

- Кремний, начиная с 1960-х, все еще является самым популярным материалом микроэлектроники (рыночная доля составляет 95%).
- Затраты на производственные мощности, используемые для создания микросхем, растут быстрее, чем спрос на них.
- Главная проблема продолжающегося увеличения плотности транзисторов на чипе – нагрев и огромные энерго-затраты (например, на охлаждение компьютерных серверов).
- Необходима альтернатива кремнию, которая позволит производить более энергетически эффективные приборы
- Алмаз является такой альтернативой, причем как в качестве подложки для кремниевых структур, так и в качестве самостоятельной платформы полупроводниковых материалов.
- На протяжении нескольких десятков лет этот материал и способы его искусственного изготовления интенсивно исследуются. Основными проблемами традиционно считались:
 - 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
 - сложность контролируемого направленного легирования примесями p- и n-типа.
- **Работы компании AKHAN Technologies совместно с U.S. Energy Department's Argonne National Laboratory открывают новые возможности для развития микроэлектроники**

Рывок в развитии алмазной технологии для микроэлектроники

Akhan Semiconductor deploys 200mm process in new diamond-based chip facility

February 24, 2018

Source: ASM International

Akhan Semiconductor, разработчик технологии алмазных полупроводников, объявляет о развертывании 200 мм производственного оборудования и процессов на своем новом производственном объекте в Гурни, штат Иллинойс. Коммерческие поставки на рынок полупроводниковых изделий на основе алмаза будут уже в 2018 г.

Прорывная технология компании Akhan основана на росте нанокристаллической алмазной пленки (NCD) и новом процессе легирования

- В 2016 Akhan Semiconductor разработал PIN диоды на основе p- и n- типа алмазных пленок толщиной 500 нм и, таким образом, продемонстрировал создание алмазных полупроводников, пригодных для КМОП технологии.*
- Технологический секрет компании заключается в имплантации фосфора в алмаз p-типа и бора и лития в алмаз n-типа*
- Разработанный процесс получения тонких легированных пленок алмаза на 200 мм пластинах будет применяться для создания широкого класса приборов: сенсоров, аналоговых схем, MEMS, и др. и использоваться в смартфонах, ноутбуках, автомобилях, бытовой электронной технике и т.д.*
- Согласно анализу, проведенному компанией Gartner Inc., количество устройств, связанных с интернетом (Internet of Things), вырастет с 6.3 миллиардов в 2016 до 20 миллиардов в 2020. Это потребует развития новых приборов на новых материалах, включая алмаз.*
- Технология, разработанная компанией Akhan Semiconductor, дает решения для создания приборов, необходимых для развития Интернета вещей***

Еще одно свидетельство развития алмазной технологии компанией AKHAN

AKHAN Semiconductor Selected for US Army's xTechSearch Pitch Competition

Photonics.com

[Sep 2018](#) AKHAN Semiconductor Inc., a technology company specializing in the fabrication and application of lab-grown, electronics-grade diamonds, has announced that its **Miraj Diamond technology** has been selected by the U.S. Army to be part of the inaugural Army Expeditionary Technology Search (xTechSearch).

Разработанная алмазная технология будет использоваться для улучшения механических и оптических свойств приборов, применяемых в системах воздушной и противоракетной обороны (оптические окна, зеркала и линзы), в лазерных системах с высокой энергией, для повышения работоспособности и надежности систем в экстремальных условиях

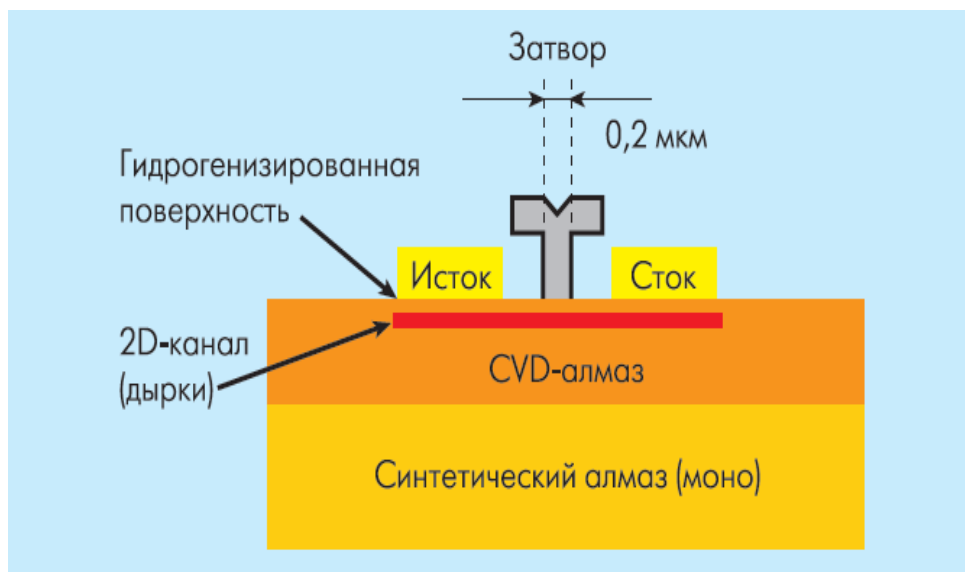
Разработка полевых (нормально открытых) транзисторов

Легирование алмаза:

- Акцептор - Бор – образует глубокий уровень с энергией активации $E_a = 0,37$ эВ.
- Донор – азот образует глубокий уровень с энергией активации $E_a = 1,7$ эВ
- Легирование донорной примесью (фосфором) с энергией активации $E_a = 0,45$ эВ в начале 2000 находился на уровне экспериментальных исследований

Первые полевые транзисторы на монокристаллическом алмазе:

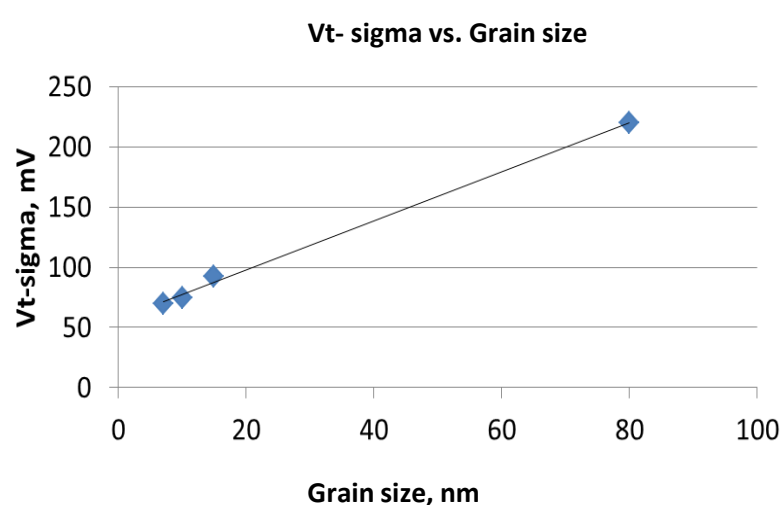
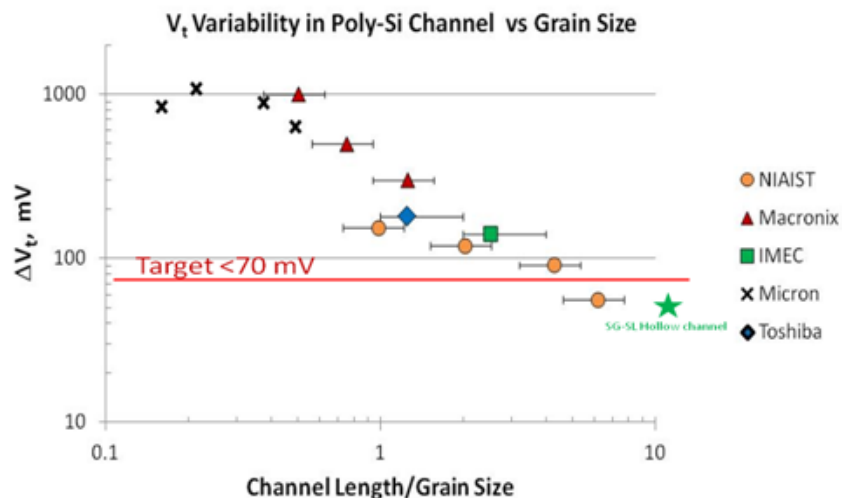
- Прогресс в создании полевых транзисторов связан с открытием возможности получения в алмазе проводимости p-типа путем гидрогенизации (легирования водородом) поверхности.
- В Университете Васеда (Япония) в 2001 году были изготовлены транзисторы с длиной затвора 2 мкм, показавшие значения частоты отсечки f_T и максимальной частоты генерации f_{max} транзистора 2,2 и 7 ГГц соответственно.
- Позднее сообщалось о получении на алмазном полевом транзисторе с гидрогенизированной поверхностью значений $f_T = 25$ ГГц и $f_{max} = 80$ ГГц при длине затвора 0,22 мкм.



Разработка полевых (нормально открытых) транзисторов

Полевые транзисторы на поли и нанокристаллических алмазных пленках:

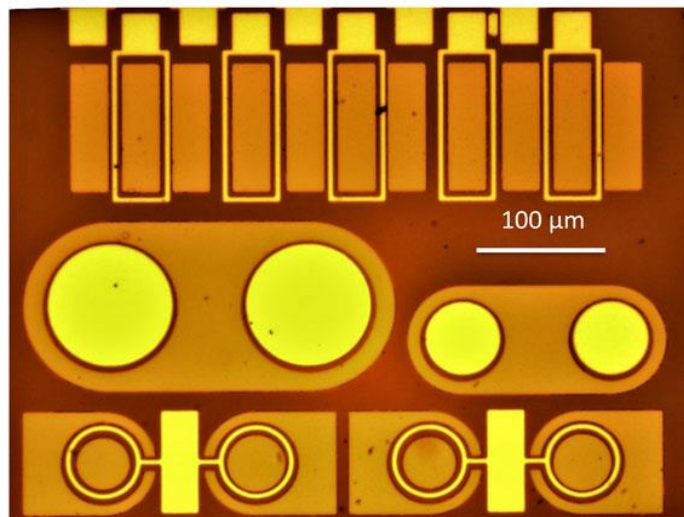
- Для MESFET, изготовленных на поликристаллическом алмазе с размером зерна около 100 мкм удалось получить высокие значения частот $f_T = 45$ ГГц и $f_{\max} = 120$ ГГц.
- Высокие параметры прибора (даже выше, чем у транзистора на монокристаллическом алмазе) удалось реализовать благодаря тому, что затвор полевого транзистора по своим размерам сопоставим с зерном кристалла!!!! Это привело к существенному ослаблению влияния межкристаллитных границ.
 - 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.
- Однако, для получения стабильных значений порогового напряжения транзистора размер зерна должен быть много меньше длины канала:



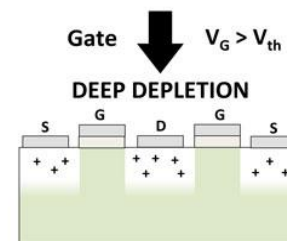
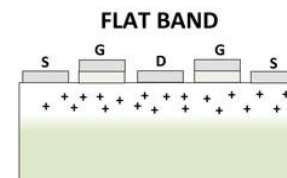
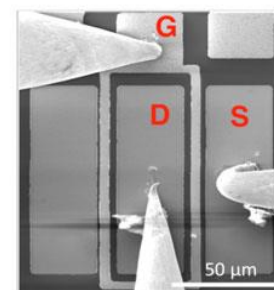
Разработка полевых (нормально открытых) транзисторов

Полевые транзисторы на объемно легированном алмазе:

- Один из подходов увеличения подвижности дырок в канале МОП транзисторов заключается в использовании объемно легированного алмаза, а не эпитаксиального слоя, для создания нормально открытых МОП транзисторов.
 - Такой подход, разработанный учеными во Франции, Великобритании и Японии, позволил увеличить подвижность дырок на порядок в МОП транзисторе с оксидом алюминия в качестве подзатворного диэлектрика.



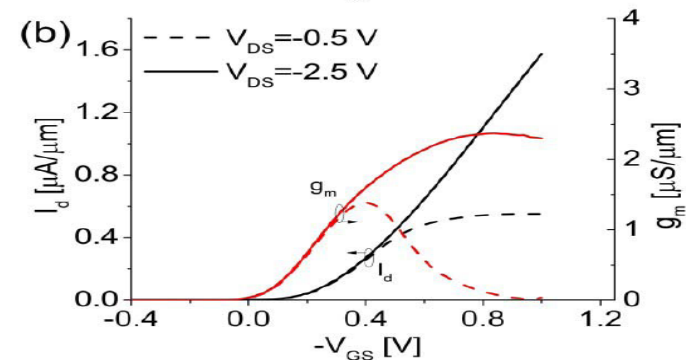
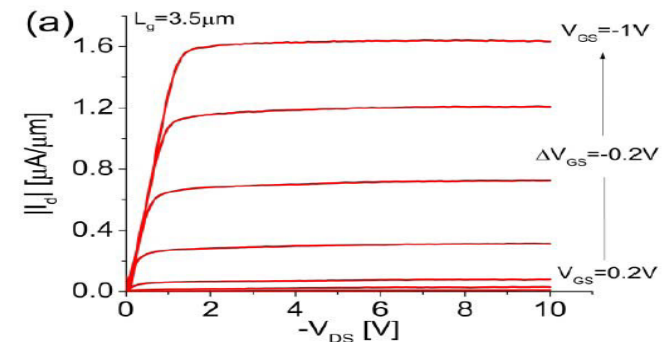
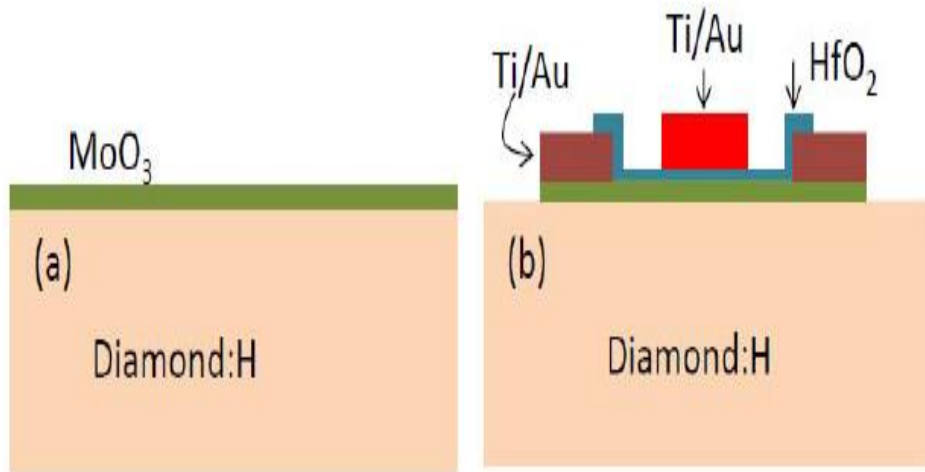
**Deep Depletion
MOSFET**



Разработка полевых (нормально открытых) транзисторов

Diamond:H/MoO₃ 2D MOSFET

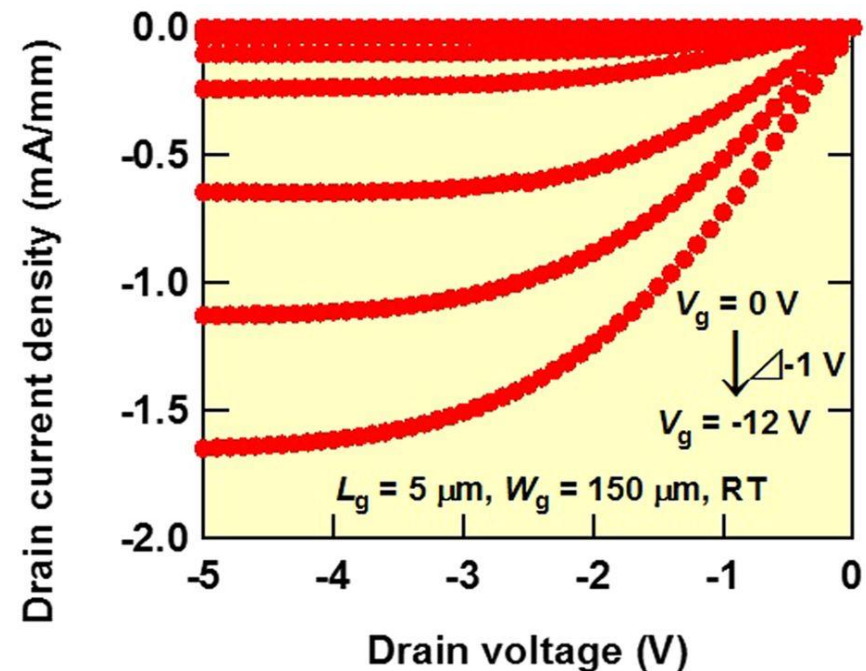
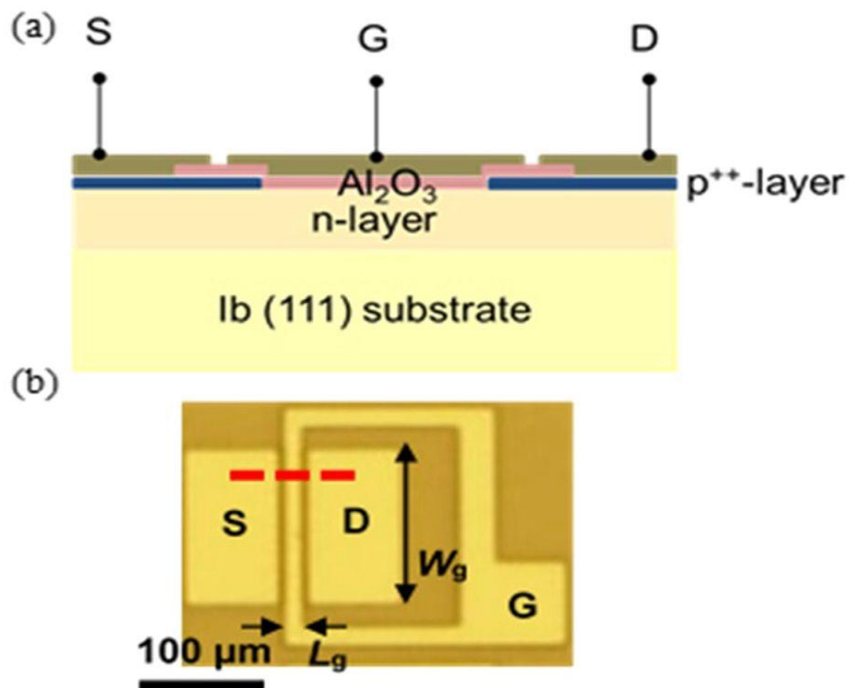
- Эффективный подход поверхностного легирования алмаза путем обработки в водородной плазме (алмаз: H), нашел дальнейшее развитие в Массачусетском Институте Технологии (MIT).
 - Используя оксид молибдена для создания квантовой ямы была достигнута рекордная плотность дырок (от 7×10^{13} до $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$).
 - Транзисторы продемонстрировали высокую стабильность до температуры 350°C.
 - При этом подвижность дырок в канале очень низкая ($30 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$). Механизмы рассеяния не изучены.



- Длина канала составляла 3,5 – 11 мкм.
- Слой оксида гафния толщиной 10 нм в качестве подзатворного диэлектрика нанесен методом ALD при 200°C.
- Омические титан-золото (20-200 нм) контакты изготовлены по лифт-офф технологии

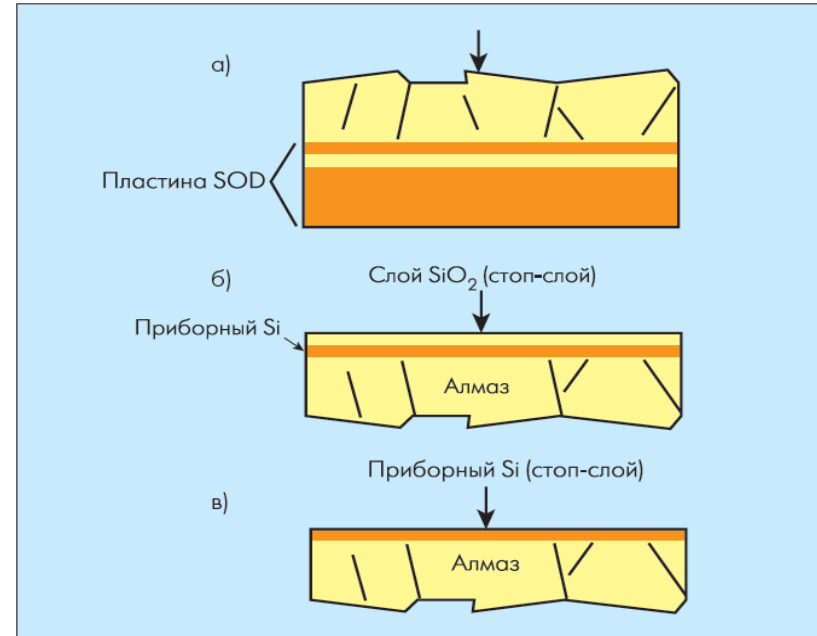
Разработка полевых (*нормально закрытых*) транзисторов

- Группа исследователей из японских университетов в 2016 году впервые продемонстрировала нормально закрытый транзистор с p-каналом на (111) алмазе, легированном фосфором.
- Оксид алюминия использовался в качестве подзатворного диэлектрика



Структуры "полупроводник на алмазе"

- Попытки получить пластину вида кремний на алмазе (КНА, или SOD – Silicon-On-Diamond) путем присоединения под давлением отполированной алмазной пленки к кремниевой пластине по аналогии с системой кремний на изоляторе (КНИ) оказались пока неудачными.
- Интересное решение было предложено в 2005 г. группой из Университета Северной Каролины в США:
 - Алмазная пленка выращивалась на КНИ-подложке толщиной 0,5 мм с рабочим слоем кремния толщиной 1,5 мкм и подслоем SiO₂ толщиной 3,0 мкм.
 - Далее химически удалялись сначала основная (нижняя) часть кремниевой подложки, а затем SiO₂. В результате получали КНА



- 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 нитрида галлия (www.group4labs.com).
- В 2007 г. совместными усилиями компании Emscore и Исследовательской лаборатории ВМС США
- впервые в мире изготовлен AlGaIn/GaN HEMT на алмазной подложке, поставляемой фирмой
- Group4 Labs

Заключение

- 1. Технологии, направленные на получение алмазных пленок на пластинах большого размера, их контролируемое легирование и изготовление приборов микроэлектроники развиваются быстрыми темпами*
- 2. Технология, разработанная компанией Akhan Semiconductor, дает решения для создания приборов, необходимых для развития Интернета вещей, а это вызовет (или уже вызвало) интерес крупных компаний*
- 3. Вместе с тем, остается еще большое поле для проведения фундаментальных исследований и инженерных разработок для создания реальной КМОП технологии (например, создание нормально закрытых МОП транзисторов с каналами n и p- типа, с высокой подвижностью носителей и с качественной границей раздела с диэлектриком*