

Характеристики детекторов на основе кремния (Si) и карбида кремния (SiC) при регистрации ионов ксенона

Ю. Гуров, В. Грубчин, С. Евсеев, С. Розов, В. Сандуковский

План

- Деятельность группы полупроводниковых детекторов (ППД)
- Карбид кремния (SiC) и детекторы на его основе, преимущества перед Si-ППД
- Характеристики Si - и SiC -детекторов при регистрации ионов ксенона
- *SiC – лучший подарок девушке*

Полностью восстановлена технологическая база для изготовления ППД

Напылительные установки



Помещения для химического травления



Разработка и исследование характеристик детекторов на основе широкозонных полупроводников:

карбида кремния (SiC) (Ю. Гуров, В. Грубчин)
ОИЯИ - Электротехнический институт (Словакия)

кадмий-цинк-теллур (CdZnTe или CZT) (С. Розов)

Мотивация

ППД на основе «новых» материалов – детекторы для будущих экспериментов

(HPGe-ППД от 0.1 см³ до 200см³ , замена → Ge(Li) ППД)

Наличие современной аппаратуры и методики для измерения различных характеристик ППД, включая использование α , β , γ -источников

Карбид кремния SiC

- Искусственный карбид кремния получают восстановлением SiO_2 углеродом
 $\text{SiO}_2 + 3\text{C} = \text{SiC} + 2\text{CO}\uparrow$ (1600 - 2500°C).

- С помощью возгонки порошка SiC (технология «паровой фазы») при температуре 2500°C в атмосфере аргона выращивают кристаллы диаметром 100 мм и концентрацией $N = 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

- Детекторные ($N = 10^{14} \text{ см}^{-3}$) пленки SiC выращиваются с помощью газофазовой или жидкофазной эпитаксии.

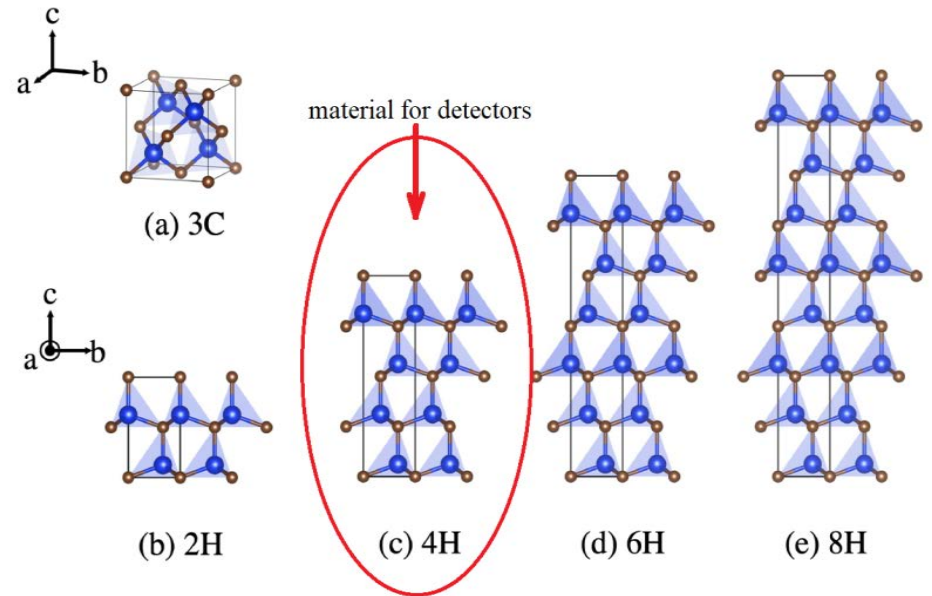


FIG. Crystal structures of the polytypes of SiC (total ~ 250) Si atoms are blue and C atoms are brown

arXiv:2008.08560v1 [hep-ph] 19 Aug 2020

Подложки из карбида кремния SiC - основа для производства различных компонентов: мощные ВЧ/СВЧ приборы; силовые приборы (MOSFET, JFET, диоды); высокотемпературные интегральные схемы; светодиоды.

Максимальное рабочее напряжение Si- транзистора **1.7 кВ**.
Рекорд для SiC транзистора **15 кВ !!!**

Преимущества SiC

№	Параметр	Si	SiC
1	Ширина запрещенной зоны, эВ	1.21	3.05
2	Критическая напряженность электрического поля В/см, 10^6	0.25	3.2
3	Теплопроводность, Вт/(см·К)	1.5	3.8
4	T плавления, °С	1420	2730
5	Пороговая энергия дефектообразования E_d , эВ	11 - 17	30 - 35

Достоинства SiC по сравнению с кремнием:

- ширина запрещенной зоны в ~ 3 раза больше, чем у Si;
- напряженность поля лавинного пробоя в ~10 раз выше, чем у Si;
- теплопроводность в ~ 2.5 раз больше, чем у Si;
- температура плавления в ~ 2 раза выше, чем у Si;
- пороговая энергия дефектообразования в ~ 2 раза больше, чем у Si



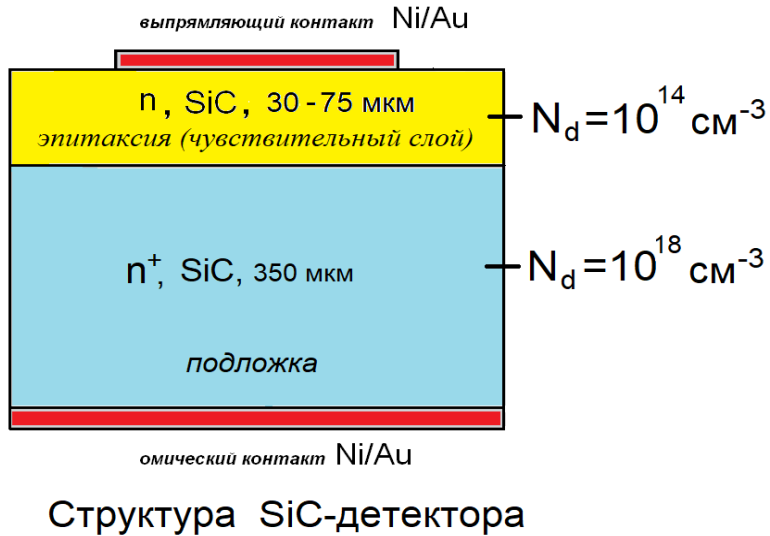
Преимущества SiC-ППД

- Обратный ток SiC - ППД $J \sim 10^{-12}$ A/cm² (Si-ППД $J \sim 10^{-9}$ A/cm²)
- Эксплуатация SiC - ППД при высоких температурах 200°C - 400°C
- Радиационной стойкость SiC - ППД значительно выше Si - ППД

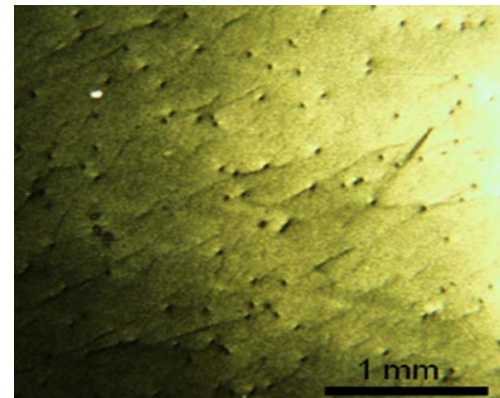
Перспективно использовать SiC - детекторы для контроля работы ядерных реакторов, ускорителей и диагностики горячей плазмы

Недостатки SiC-ППД

Размеры рабочей области: диаметр $\leq 3 \text{ мм}^2$, толщина $\leq 75 \text{ мкм}$



Высокая плотность дислокаций $D \sim 10^3 \text{ см}^2$
 $N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3} \rightarrow U_0 \sim 800 \text{ В}$ для $W = 100 \text{ мкм}$



Рентгеновская
топография
эпитаксиального
слоя SiC 50 мкм

Прогресс в производстве SiC -ППД с 2010 по 2020 г.г.

производители детекторного SiC - L.P.E. (Italy), CREE Research Inc. (USA)

- Размер SiC пластин увеличился с 35 до 100 мм (150 мм)
- Концентрация носителей уменьшилась с 5×10^{15} до $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$
- Толщина эпитаксиального слоя увеличилась с 5 до 75 мкм (120 мкм)
- Плотность дислокаций уменьшилась с 10^5 до 10^3 см^{-2} (10^2 см^{-2})
- Диаметр рабочей области увеличился с 0.2 до 3 мм

Характеристики Si - и SiC -детекторов при регистрации ионов ксенона

Использования SiC -детекторов для мониторингования пучков тяжелых ионов с энергией ~ 1 МэВ/нуклон вместо Si -ППД.

Проблемы полупроводниковой спектрометрии тяжелых заряженных частиц: «дефект амплитуды импульса» (ДАИ) и радиационная стойкость детекторов.

Первая проблема приводит к отсутствию линейной зависимости между энергией регистрируемой частицы и амплитудой сигнала с детектора (в отличие от легких заряженных частиц).

Величину амплитудного дефекта определяют как разность между амплитудами, полученными от тяжелого иона и α -частицы при равенстве их энергий на входе в детектор.

α -частица с $E = 4$ МэВ и ион ^{132}Xe с $E = 165$ МэВ имеют пробег в Si 17 мкм, при этом кол-во электрон-дырочных пар в ионном треке в 40 раз больше. Возникает «плазменное облако», которое экранирует трек от внешнего электрического поля. Это ведет к потере части образованных электрон-дырочных пар в результате их рекомбинации в плазменной колонке трека.

ДАИ зависит от характеристик измеряемой частицы (массы, энергии) и используемого ППД (свойств материала, рабочего напряжения).

Вторая проблема обусловлена тем, что ППД достаточно чувствительны к радиационным повреждениям.

При прохождении ионизирующей частицы в базовом материале детектора могут возникать нарушения кристаллической решетки: смещения и выбивания атомов из узлов решетки, изменение изотопного состава в результате ядерных реакций.

Эти процессы приводят к образованию центров захвата и рекомбинации носителей заряда, а также к изменению их исходной концентрации.

Большие дозы облучения ППД приводят к заметному ухудшению энергетического разрешения и уменьшению амплитуды сигнала, что обусловлено уменьшением времени жизни носителей и неполным сборанием заряда.

Si-детекторы – планарная технология на кремнии n-типа. Контакты – имплантация В и Р (+Al) (толщина ≈ 120 нм). Рабочая площадь 8×8 мм², толщина 200 мкм. $U = 200$ В ($E \sim 1.0$ В/ мкм).

SiC-детекторы – 50 мкм эпитаксиальный слой n-типа (10^{14} см⁻³) на n⁺-подложках ($2 \cdot 10^{18}$ см⁻³) фирмы «L.P.E.». Передний контакт $\varnothing 2$ мм – напыление Ni и Au (толщина 40 и 90 нм). Омический контакт $\varnothing 6$ мм – напыление Ni и Au. $U = 150$ В ($E \sim 3$ В/ мкм).

Энергетическое разрешение ППД ~ 25 кэВ для α -частиц с энергией $E \approx 5.5$ МэВ.

Эксперимент на циклотроне ИЦ-100 ЛЯР, ионы ^{132}Xe с $E = 165$ МэВ.

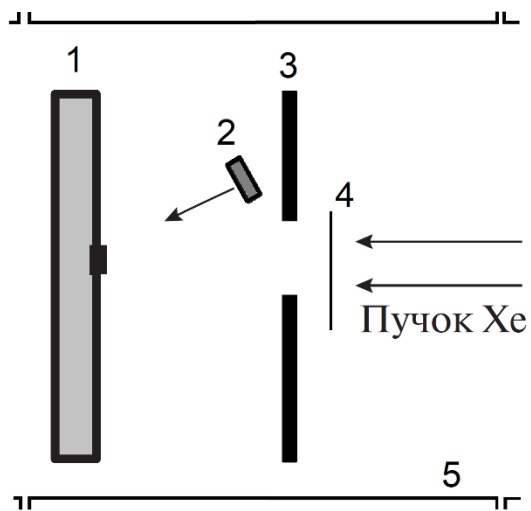


Схема измерений:

1 - детектор, 2 - α -источник ^{225}Ac , 3 - коллиматор,
4 - Al-фильтр, 5 - вакуумная камера

Использование Al-фильтров толщиной $W = 6.0, 9.5$ мкм позволило определить амплитудный дефект для трех значений энергий ионов Хе: **165, 82 и 45 МэВ**

Si - и SiC -ППД для регистрации ионов Хе
Амплитудный дефект

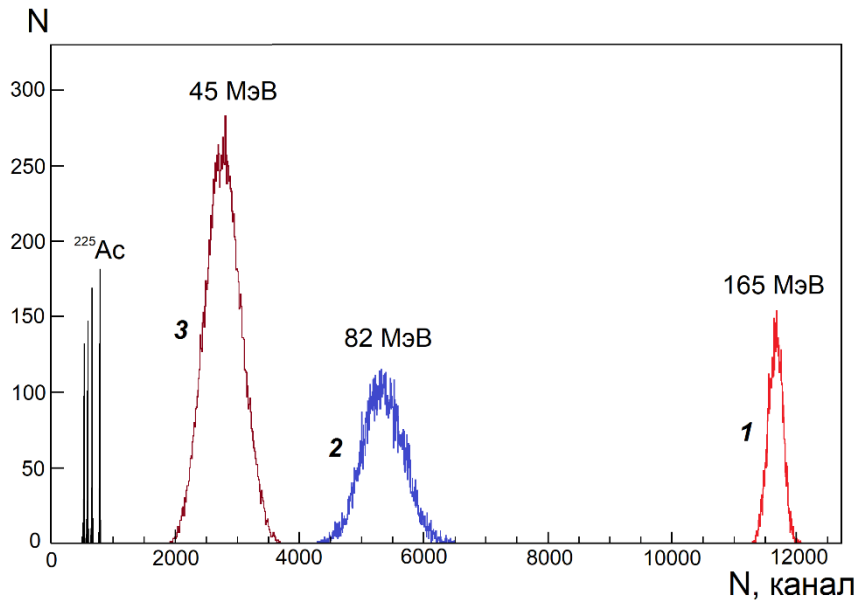


Рис. 2. Спектры ионов ^{132}Xe , измеренные Si-ППД при использовании Al-фильтров различной толщины W:

- 1 – без поглотителя;
- 2 – W = 6 мкм;
- 3 – W = 9.5 мкм

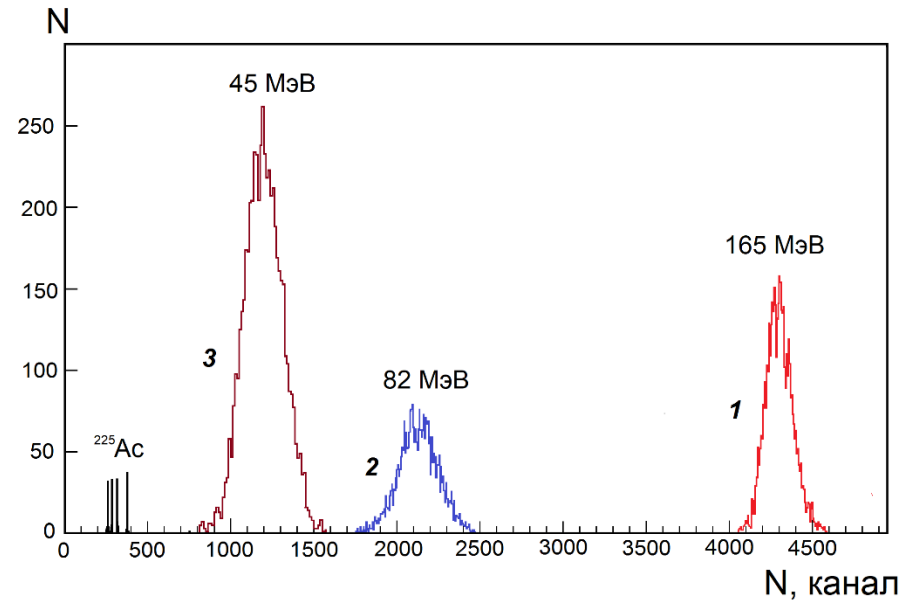


Рис. 2. Спектры ионов ^{132}Xe , измеренные SiC-ППД при использовании Al-фильтров различной толщины W:

- 1 – без поглотителя;
- 2 – W = 6 мкм;
- 3 – W = 9.5 мкм.

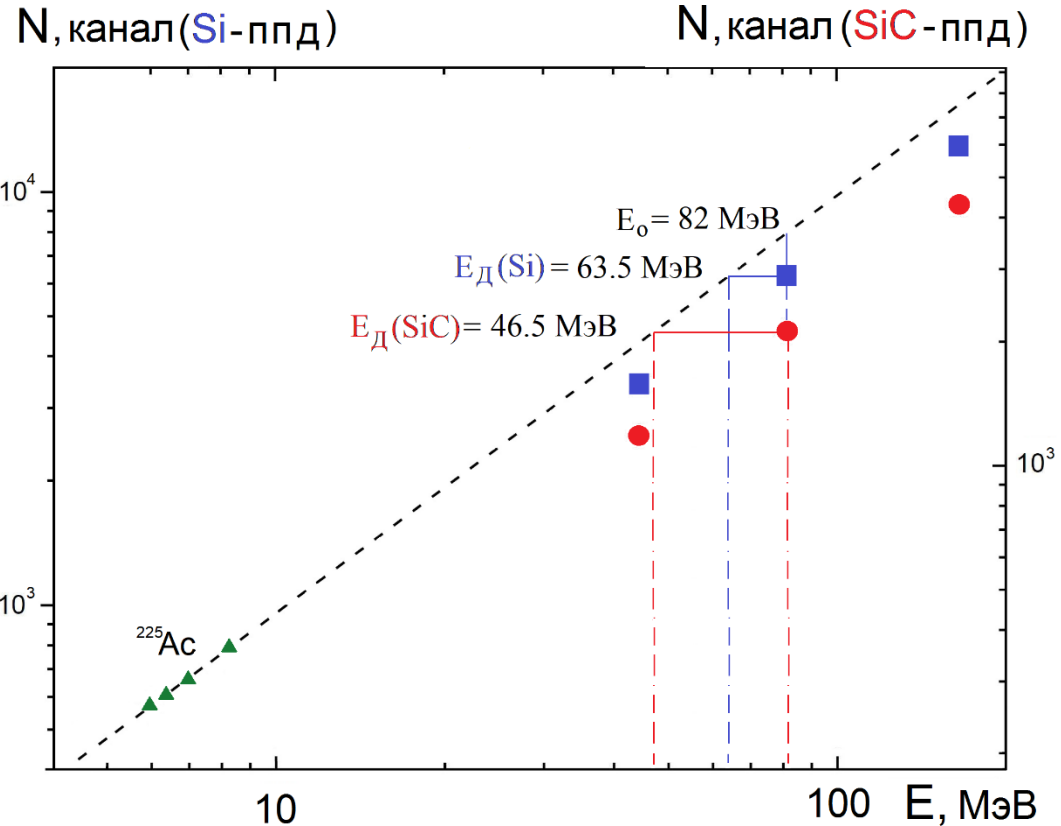
α -линии ^{225}Ac : 5980, 6341, 7067, 8375 кэВ

E_d – энергия зарегистрированная ППД
 E_{Xe} – «истинная» энергия ионов Хе

$$dE \text{ (ДАИ)} = E_{Xe} - E_d$$

E_{Xe} , МэВ	165	82	45
E_d (Si), МэВ	133.5	63.5	35
dE , МэВ	31.5	18.5	10
dE/ E_{Xe} , %	19	23	22
E_d (SiC), МэВ	96.5	46.5	25.5
dE , МэВ	68.5	35.5	19.5
dE/ E_{Xe} , %	42	43	43

погрешность dE ≤ 3.5%



Сравнение амплитуд сигналов от α -частиц ^{225}Ac и ионов Хе:

- ▲ - α -частицы ^{225}Ac , измеренные Si - и SiC - ППД;
- - ионы, измеренные Si - ППД;
- - ионы, измеренные SiC - ППД

Пунктир – калибровка по α -пикам.

Si - и SiC -ППД для регистрации ионов Хе
Радиационная стойкость

Si - ППД облучались ионами Хе дозами 1.2×10^6 , 3.5×10^6 , 2.6×10^7 см⁻².
SiC - ППД облучались ионами Хе дозами 1.9×10^7 , 3.1×10^8 , 2.3×10^9 см⁻²

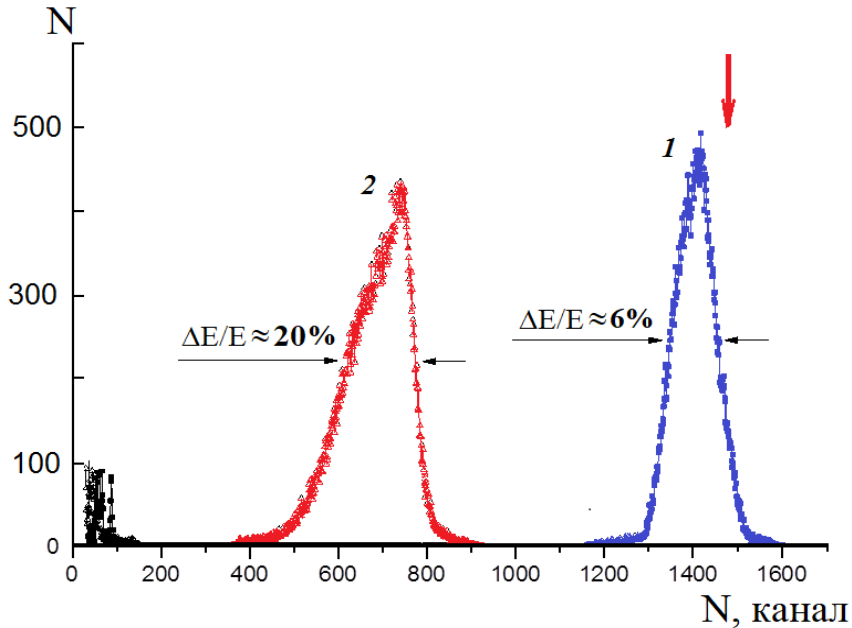


Рис. 1. Спектры ионов Хе, измеренные **Si**-ППД при дозах 3.5×10^6 (1) и 2.6×10^7 см⁻² (2).

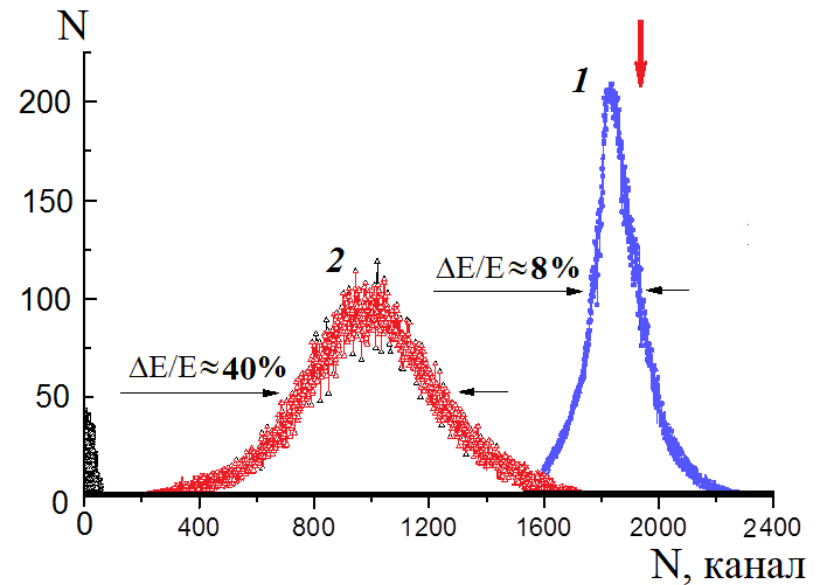


Рис. 2. Спектры ионов Хе, измеренные **SiC**-ППД при дозах 1.9×10^7 см⁻² (1) и 2.3×10^9 см⁻² (2).

Si - и SiC -ППД для регистрации ионов Хе
Радиационная стойкость

Таблица 1. Характеристики **Si** - ППД, полученные при облучении ионами Хе с различными интегральными потоками

Доза, см ⁻²	Энергетическое разрешение ($\Delta E/E$), %		Уменьшение амплитуды сигнала, %	
	ионы Хе	α -частицы	ионы Хе	α -частицы
0	3.5	0.5	-	-
1.2×10 ⁶	6	0.9	5	2
3.5×10 ⁶	8	1.1	18	8
2.6×10 ⁷	20	1.4	50	30

Таблица 2. Характеристики **SiC** - ППД, полученные при облучении ионами Хе с различными интегральными потоками

Доза, см ⁻²	Энергетическое разрешение ($\Delta E/E$), %		Уменьшение амплитуды сигнала, %	
	ионы Хе	α -частицы	ионы Хе	α -частицы
0	4.5	0.5	-	-
1.9×10 ⁷	8	1.1	6	3
3.1×10 ⁸	20	1.8	18	12
2.3×10 ⁹	40	2.9	48	32

Выводы

- Показано, что дефект амплитуды импульса при регистрации ионов Хе с энергиями 165, 82 и 45 МэВ в 2 раза больше для SiC - ППД по сравнению с Si -детекторами.
- Установлено, что ухудшение работоспособности SiC - ППД наступает при дозовых нагрузках от облучения ионами Хе на порядок больше, чем при использовании Si - детекторов.

Планы

- ◆ Исследование характеристик SiC - ППД после облучения нейтронами.
- ◆ Изготовление методом ионной имплантации SiC - ППД с диаметром рабочей области 10 мм.

SiC - лучший подарок девушке

В конце 20 века на рынке драгоценных камней и ювелирных изделий появился новый камень, а точнее **синтетический кристалл карбида кремния**. В природе такой минерал встречается в крайне незначительных количествах и называется **муассанит** (moissanite).



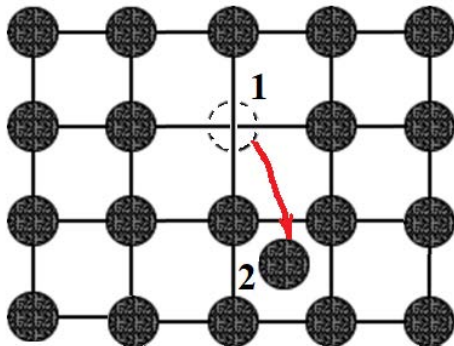
SiC - лучший подарок девушке

- **Муассанит похож на алмаз:**
твёрд (9.5 по шкале Мооса, по сравнению с 10 для алмаза),
прозрачен с показателем преломления 2.65 - 2.69 (для алмаза 2.42),
следовательно данный минерал **сверкает сильнее, чем алмаз.**
- **Камень можно отличить от алмаза** с помощью его **двулучепреломления** и
очень небольшой **зелёной или жёлтой флуоресценции** в ультрафиолетовом
свете.
- Муассанит остаётся неповреждённым до 1800 °С, в отличие от **алмаза**,
который **горит при температуре 800 °С.**
- Особенность бриллиантов - теряют свой блеск при контакте с руками из-за
загрязнения жиром. Одного прикосновения к поверхности алмаза достаточно,
чтобы он стал значительно тусклее, после чего его необходимо протирать
спиртом.
Муассанит благодаря своей особой структуре **отталкивает жир**, поэтому
остаётся чистым и сверкающим намного дольше.

Стоимость муассанита более чем в 20 раз меньше стоимости алмаза.

Спасибо за внимание!

	Si	SiC
μ_n , $\text{cm}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	1500	900
μ_p , $\text{cm}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	480	200



E_d - энергия, которую должна передать частица полупроводниковой матрице для образования в ней пары Френкеля, т. е. вакансии (**1**) и межузельного атома (**2**).

энергии необходимая для удаления атома из решетки кристалла, а затем для его перемещения в междоузлие решетки.

	Si	SiC	Алмаз
Постоянная решетки	5.42	3.08	3.57
Расчет E_d , эВ	12.8	37	80
Эксперимент E_d , эВ	13-17	30-35	60-80