



LXXII International Conference
Nucleus 2022: Fundamental problems and applications
Moscow, July 11—16, 2022

Contacts for self-scanning SiC energyconverters in nano-microwatts range

V. I. Chepurnov ¹, M. V. Dolgoplov ^{2,1}, A. V. Gurskaya ²,
G. V. Puzyrnaya ¹, S. A. Radzhapov ³

¹ Samara University, Samara, Russia; ² SAMARA POLYTECH, Samara, Russia;

³ Institute of Physics and Technology, SPA "Physics-Sun", AS RUz, Tashkent,
Uzbekistan

Tue 12/07

Session

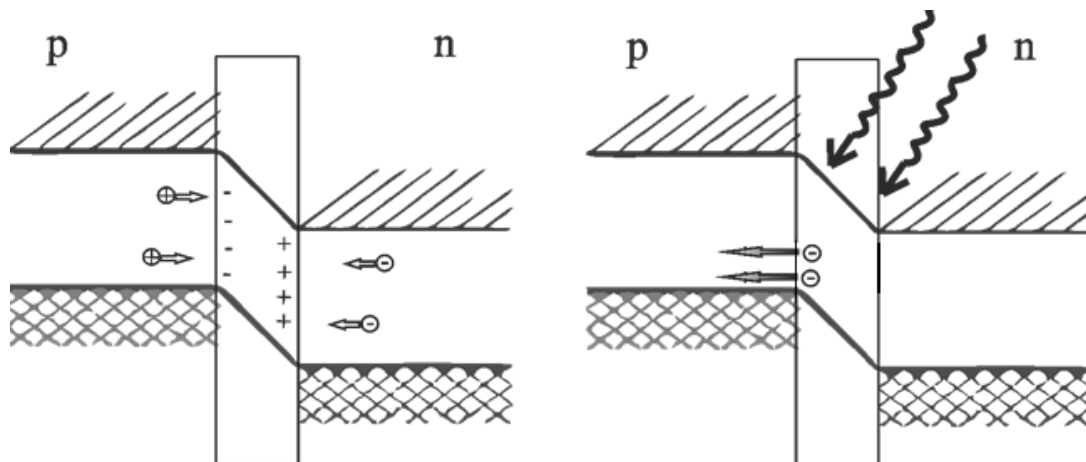
Applications of nuclear methods in
science and technology

References:

1. A. V. Gurskaya, M. V. Dolgoplov, V. I. Chepurnov, Physics of Particles and Nuclei. 48, 941 (2017).
2. A. V. Gurskaya etc. J. of Physics: Conf. Series. 1686, 012040 (2020).
3. V. I. Chepurnov Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Estestvenno-Nauchnaya Seriya. 7(118), 145 (2014)
4. V. I. Chepurnov, S. A. Radzhapov, M. V. Dolgoplov, G. V. Puzyrnaya, A. V. Gurskaya, "Efficiency determination problems for SiC*/Si microstructures and contact formation", Comp. nanotechnol., 8:3 (2021), 59–68
5. Chepurnov V., Puzyrnaya G., Gurskaya A., et al. Experimental investigation of semiconductor structures of the power source based on carbon-14 // Physics of Wave Processes and Radio Systems. - 2019. - Vol. 22. - N. 3. - P. 55-67.

RU patents 2020r.: 2 733 616, 2 714 783, 2 714 690,
2 653 398 (2018r.). 2009r. 2 370 851.

SiC в фотовольтаике и бетавольтаике



В настоящее время возрос интерес к карбиду кремния в связи с развитием бетавольтаики.

(Zhou C. et al. *Betavoltaic Cell: The Past, Present, and Future* // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 10 027005 (2021))

Материал	$E_g, \text{эВ}$	Подвижность $\mu, \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	Теплопроводность, $\text{Вт}/\text{см}\cdot\text{К}$	$T_D, \text{К}$
Si	1,12	1,1	1,5	650
GaAs	1,43	6,0	0,46	350
GaN	3,39	1,0	1,3	600
3C-SiC	2,36	750	5	1200
4H-SiC	3,26	800	4,9	1200
6H-SiC	3	370	4,9	1200
Алмаз	5,45	2200	11	1850

(Лебедев А.А. др. УФН 189 803–848 (2019))

С точки зрения радиационной стойкости важны:

- Большая ширина запрещенной зоны, это означает расширение диапазона рабочих температур
- Высокая теплопроводность (3–5 Вт/см К) обеспечивает теплоотвод
- Высокая температура Дебая определяет термическую стабильность

HT CVD – технология получения пленок SiC

<p>Метод Ачесона (Acheson E G Chem. News 68 179 (1893))</p>	<p>Поликристаллический карбид кремния (содержит множество примесей и применяется как абразив)</p>
<p>Метод Лели (Lely J A Berichte Deutschen Keramischen Gesellschaft 32 229 (1955)) и его модификации - Метод физического транспорта паров - <i>Physical Vapour Transport – PVT</i> (Tairov Yu M, Tsvetkov V F J. Cryst. Growth 43 209 (1978))</p>	<p>Объёмные кристаллы (максимально очищены от примесей, фактически монокристалл, и применяется для промышленного производства пластин)</p>
<p>Химическое осаждение из газовой фазы - Chemical Vapor Deposition – CVD (Nishino S, Powell J A, Will N A Appl. Phys. Lett. 42 460 (1983))</p>	<p>Формирование плёнки SiC на поверхности подложки химическими методами (используется для формирования структур в электронике)</p>
<p>Распыление: магнетронное, (Li Gou, Ch. Qi, J. Ran, Ch. Zheng, Thin Solid Films 345, 42 (1999)) молекулярно-лучевая эпитаксия (Кузнецов В. П., Красильник З. Ф. Физика и техника полупроводников. 2010. Т.4. № 3. С. 413–417) и др.</p>	<p>Формирование плёнки SiC на поверхности подложки физическими методами (используется для формирования структур в электронике)</p>

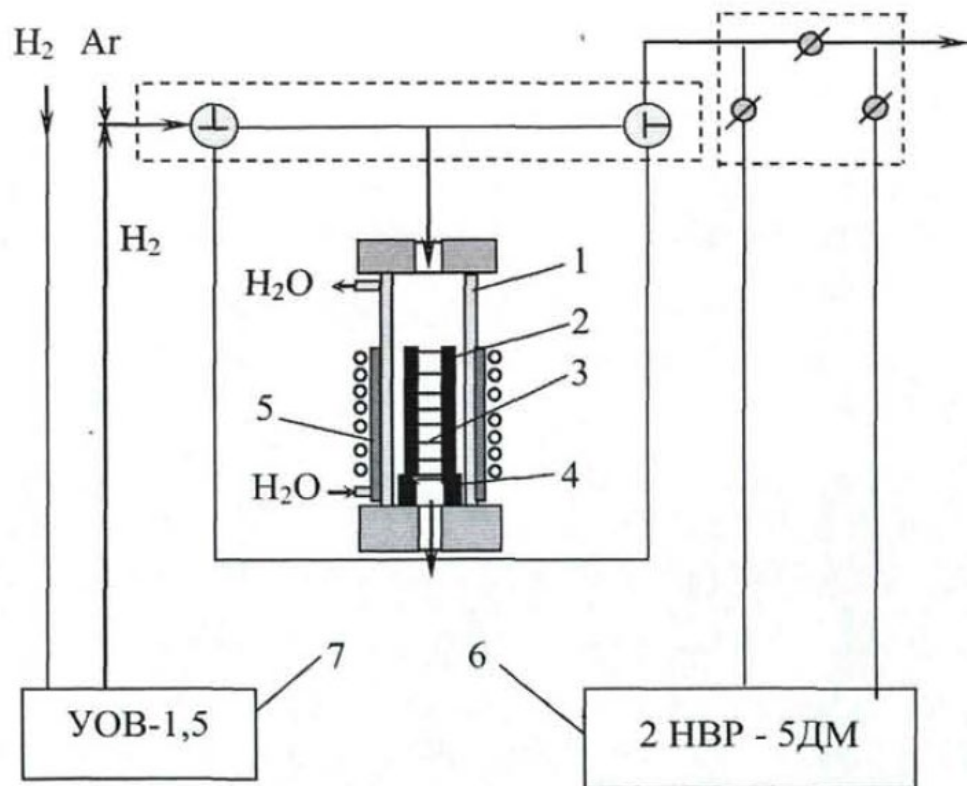


CVD – технология получения SiC

Чепурнов В.И., Гурская А.В., Долгополов М.В., Латухина Н.В., Способ получения пористого слоя гетероструктуры карбида кремния на подложке кремния. Патент № 2653398, получен 18.05.2018, приоритет 19.07.2016.



+ легирование Ga, B, P, Al

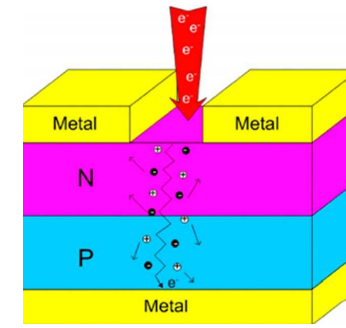


- 1 – реактор
- 2 – кассета
- 3 – температурная зона разложения гидридов кремния
- 4 – зона исходных реагентов
- 5 – генератор ВЧ-поля для нагрева кассеты
- 6 – вакуумный насос
- 7 – установка для очистки газа-носителя

[1] Ehrenberg W., Lang C.-S., West R. The Electron Voltaic Effect. Proceedings of the Physical Society A. 1951. V.64. p.424

[2] Moseley, H.G.J., Hailing, J. The attainment of high potentials by the use of radium. Proc. R. Soc. A. 1913. V.88 p.471.

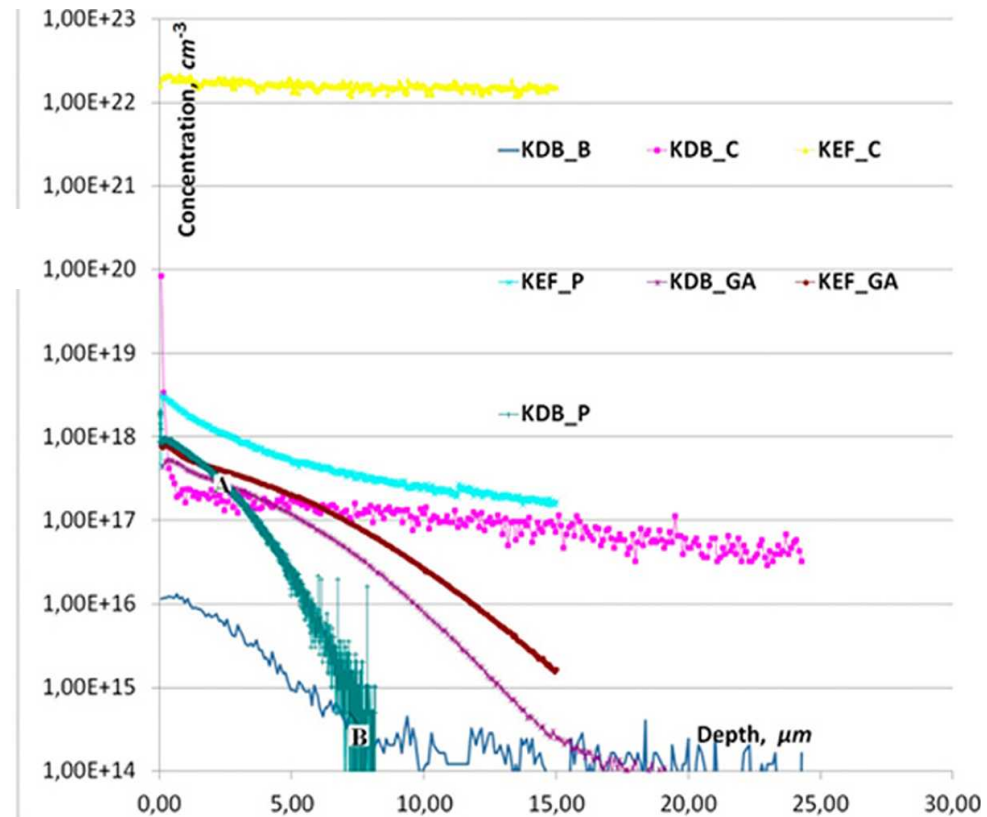
[3] Rappaport P.L, Loferski J. J., bindery E.G. A study program of possible uses new principle. Nucleonics. 1957. V.15. p.99.



Self-organizing mono 3C-SiC endotaxy technology

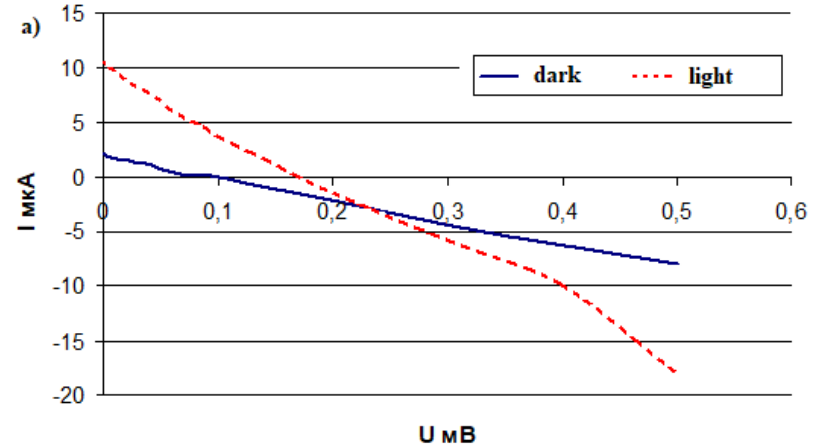
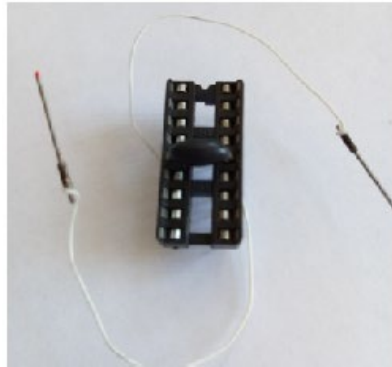
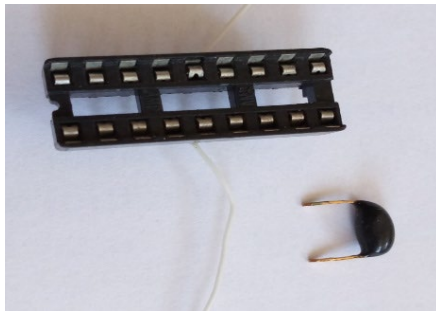
Diagram of concentrations dependencies on depth. The analyzed depth ranges from $5.3 \cdot 10^{-8}$ to $24.3 \cdot 10^{-6}$ m.

The concentration of C 12 atoms (KDB C curve), depending on the analyzed depth, ranges from $8.4 \cdot 10^{19}$ to $3.2 \cdot 10^{16}$ particles/cm³.

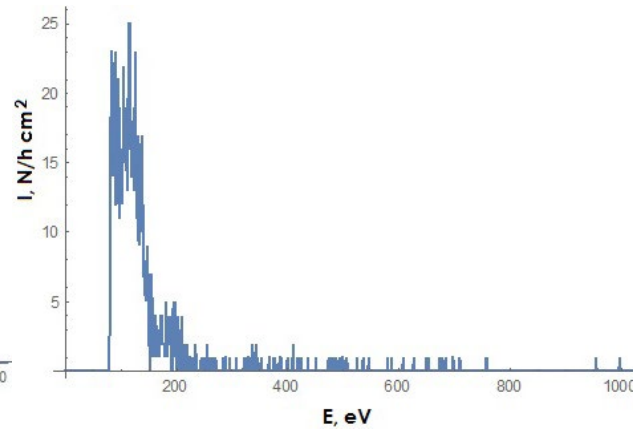
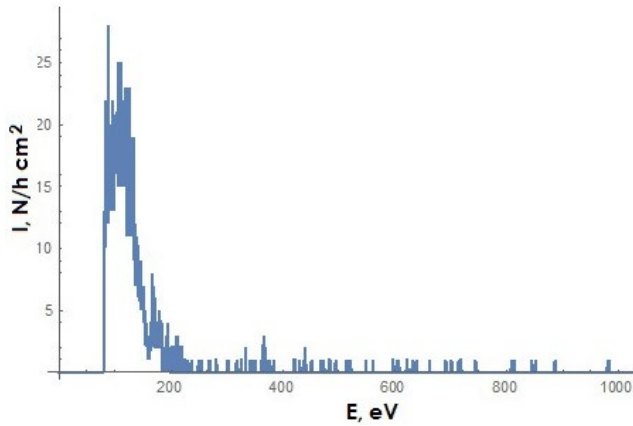


Бета-преобразователь на углероде-14 в структуре SiC*/Si

(Чепурнов В.И. и др. Физика волновых процессов и радиотехнические системы 22(3) 55-67 (2019))



Темновая и световая вольтамперные характеристики, измеренные на структуре n-SiC/p-SiC/p-Si



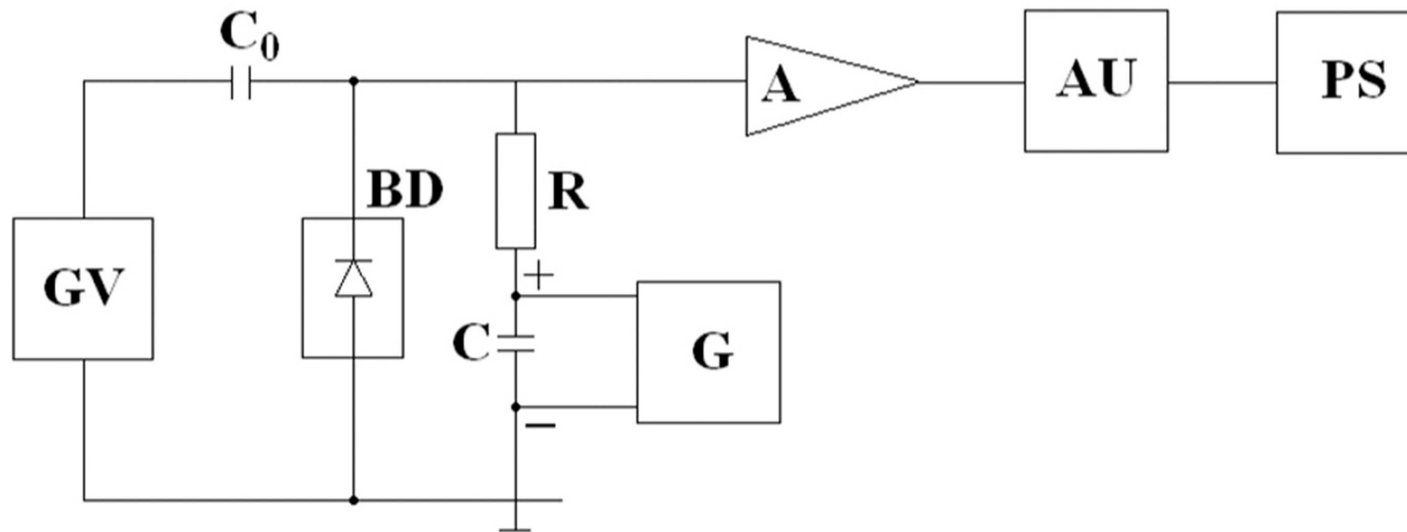
the development of a programmable beta scanner:



Betasensor (detector) for betameter (left, diameter 11 mm) and beta gamma radiometer (right, length 20 cm)

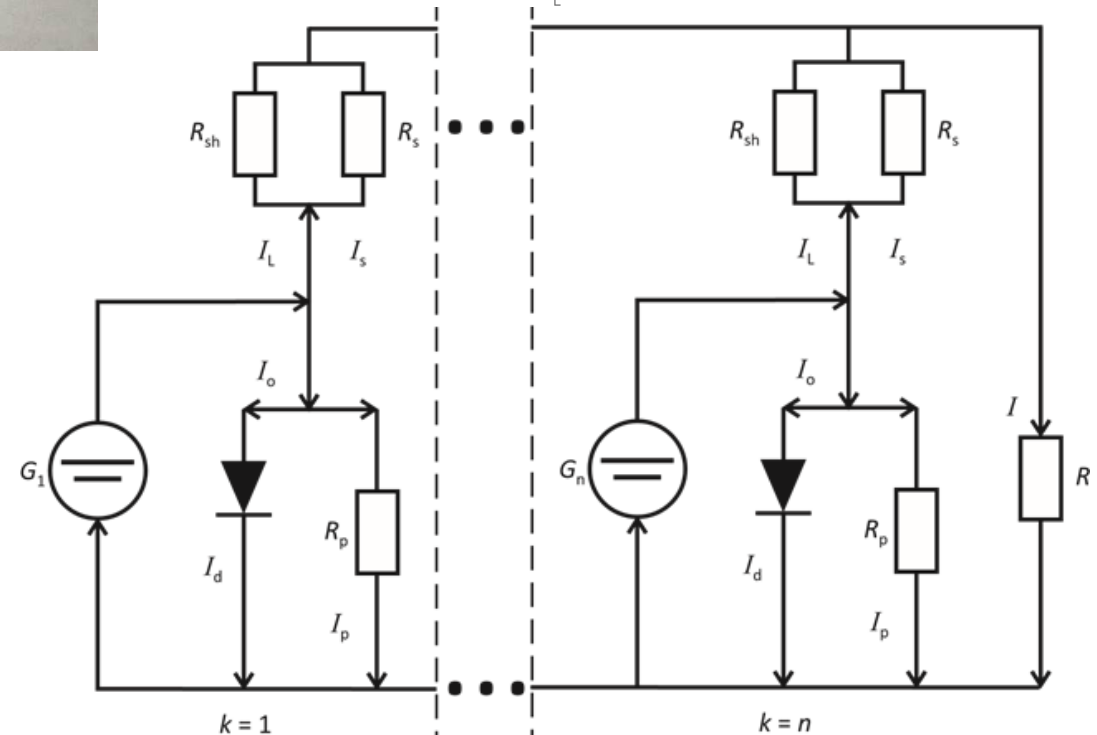
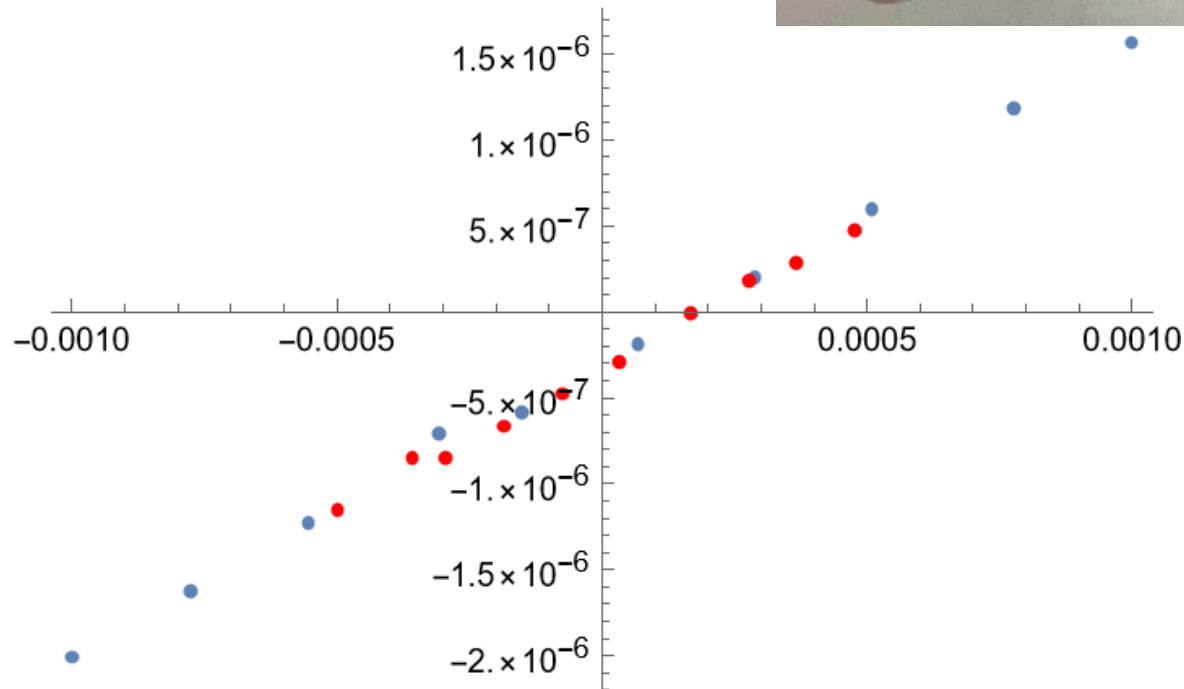
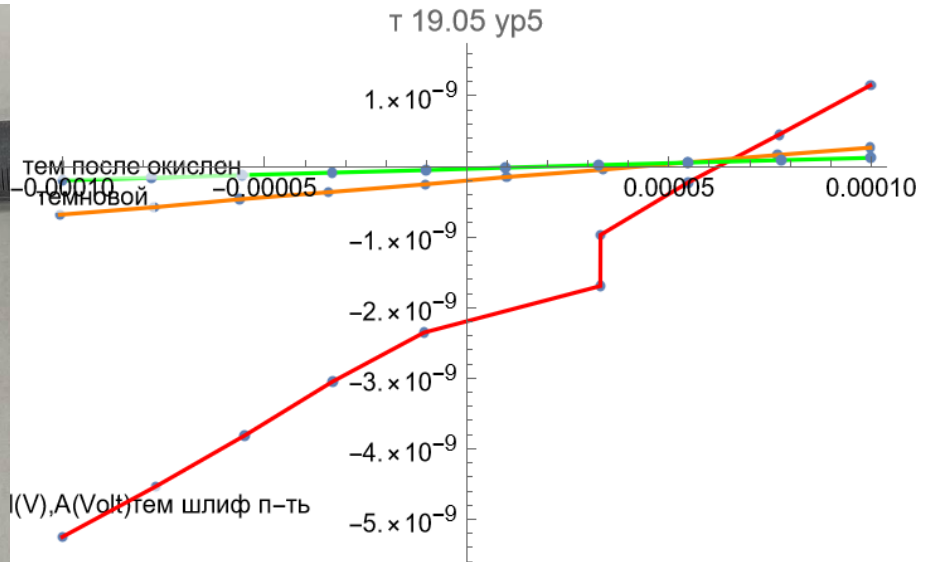
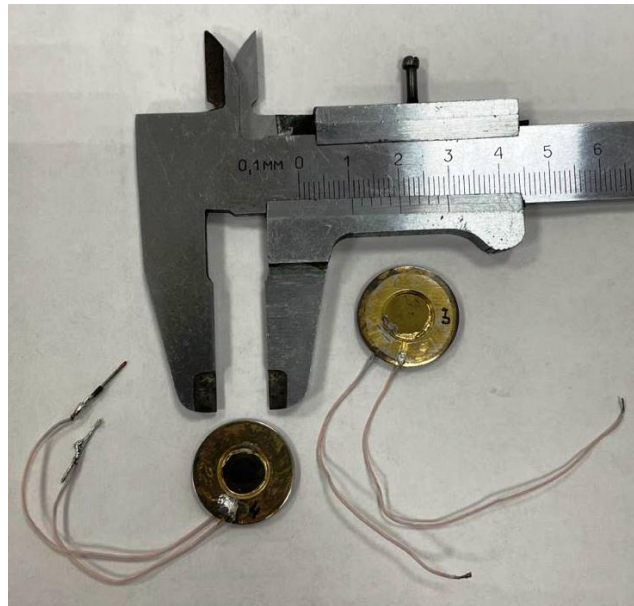
Спектр C-14 из программы эксперимента: $3600t = \text{с}$, ус.256, $U=90 \text{ В}$.

Electrical diagram of the measuring device



BD — detector, AU is the scale Converter, A — charge sensitive amplifier, PS — amplitude analyzer, G — source bias voltage, R - resistor leakage, C is a blocking condenser, GV — generator of voltage pulses, CO — metering capacitor.

Результат металлизации,
возможности
комбинирования



Что влияет на эффективность бета-преобразования?

- *положение p-n-перехода (глубина его залегания)*
- *способ внедрения радиоизотопа в материал полупроводника*
- *самопоглощение радиоизотопа и его активность, а также период полураспада*
- *процессы дефектообразования в структуре*
- *темпы генерации электрон-дырочных пар*

Что влияет на эффективность бета-преобразования?

- положение гетероперехода или p-n-перехода (глубина его залегания)

- способ внедрения радиоизотопа в материал полупроводника

- самопоглощение радиоизотопа и его активность, а также период полураспада

- процессы дефектообразования в структуре

- темп генерации электрон-дырочных пар

Задача диффузионного легирования

1 этап.

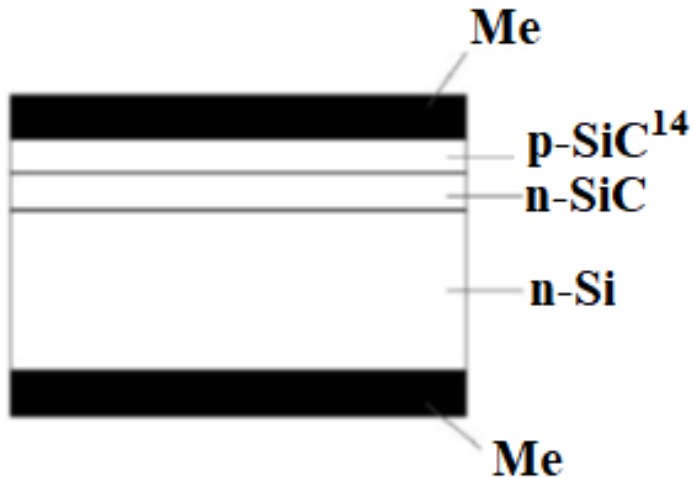
Легирование Si
фосфором (P).



3 этап.

Легирование SiC
бором (B).
Создание p-n-перехода.

2 этап. Карбидизация + легирование фосфором (P).



Song CW et al. Computer Simulation of Temperature Parameter for Diamond Formation by Using Hot-Filament Chemical Vapor Deposition. Coatings. 2018; 8(1):15.

Geiser J. Multiscale Modeling of Chemical Vapor Deposition (CVD) Apparatus: Simulations and Approximations. Polymers. 2013; 5(1):142-160.

Korean J. Chem. Eng., Mathematical Modeling for Chemical Vapor Deposition in a Single-Wafer Reactor. 19(3), 391-399 (2002)

Покоева В.А., Сивакова К.П. // Физика волновых процессов и радиотехнических систем. 2007. Т. 10. № 2. С. 110-114.

Задача диффузионного легирования

n-Si(P) / n-SiC(P)

$$\frac{\partial G_1}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 G_1}{\partial x^2} + \mu_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(G_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

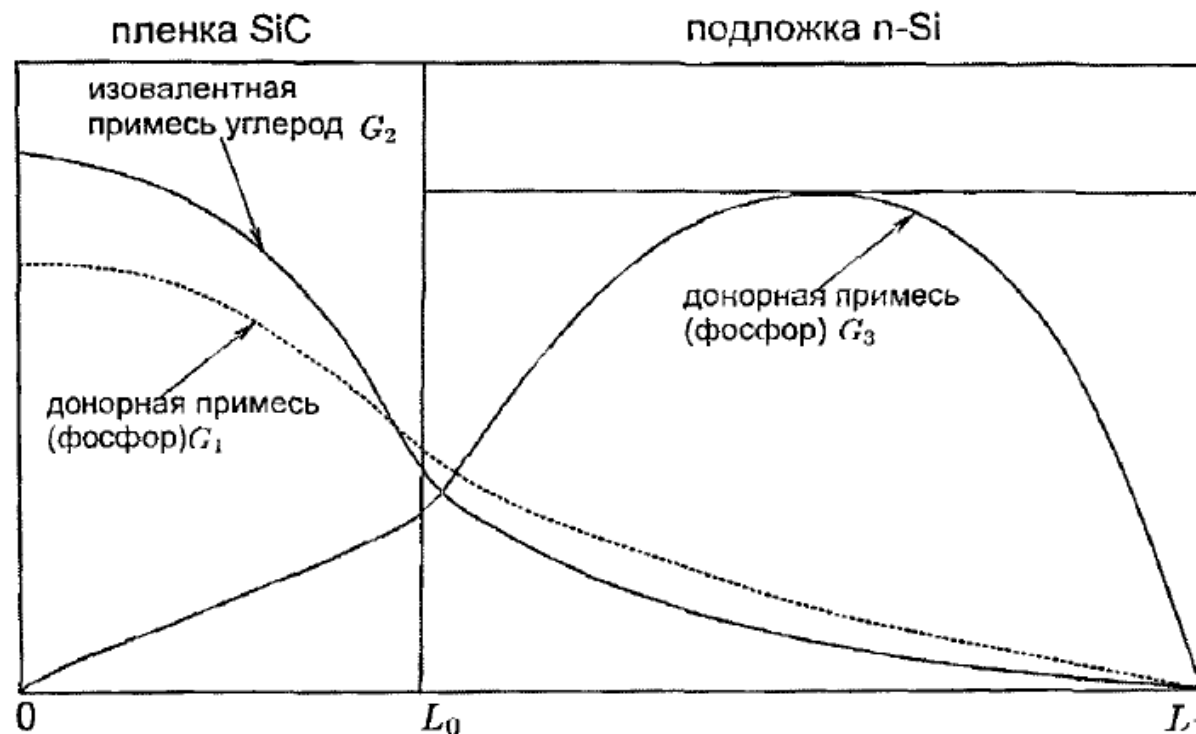
$$\frac{\partial G_2}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 G_2}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial G_3}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 G_3}{\partial x^2} + \mu_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(G_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - \mu_n \frac{\partial}{\partial x} \left(N \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \mu_p \frac{\partial}{\partial x} \left(P \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{4\pi}{\epsilon} e(N - G_1 - G_3 - P)$$



D_i - коэффициенты диффузии

μ_i - подвижности зарядов

Задача диффузионного легирования

n-Si(P) / n-SiC(P)

$$G_1(0, t) = G_{01} = \text{const}$$

$$G_2(0, t) = G_{02} = \text{const}$$

$$G_3(0, t) = 0$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(0, t) = \text{const}$$

$$G_3(x, t) = 0, 0 \leq x \leq L_0$$

$$L_0 = 0,2 \text{ мкм}$$

$$G_1(L_1, t) = 0, t > 0$$

$$G_2(L_1, t) = 0, t > 0$$

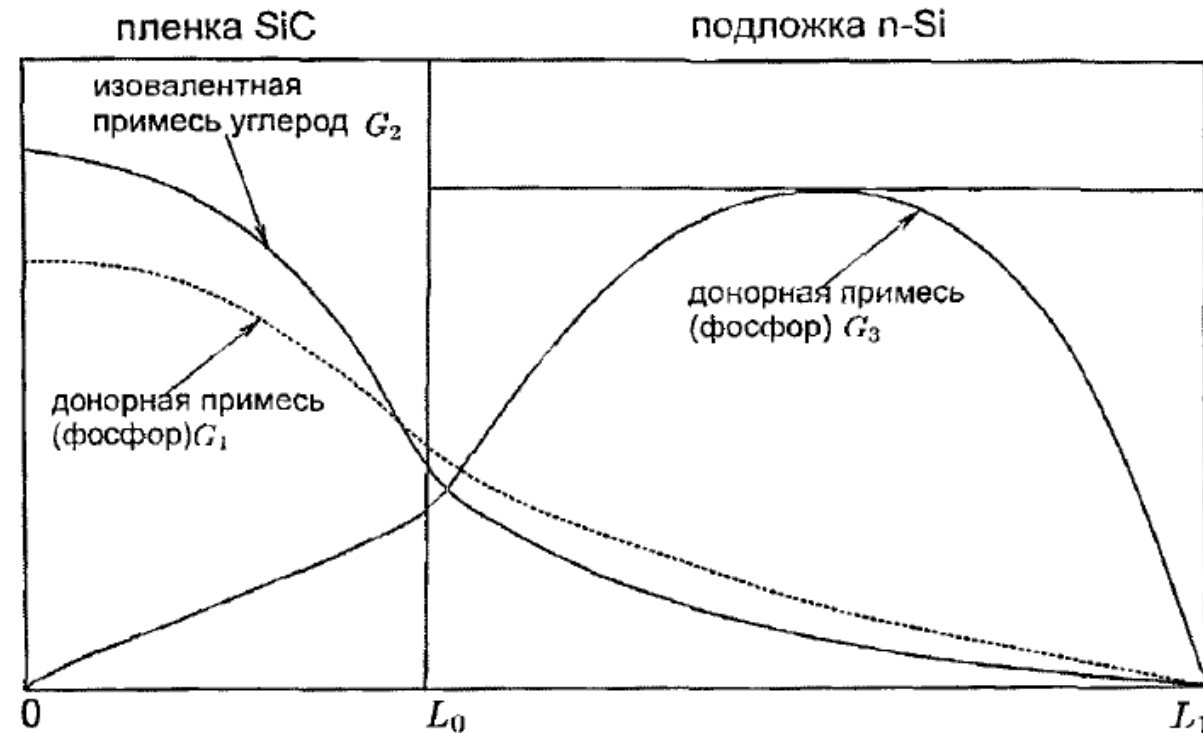
$$G_3(L_1, t) = 0, t > 0$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(L_1, 0) = \text{const}$$

$$G_3(x, 0) = G_{03}, L_0 \leq x \leq L_1$$

$$L_1 = 523 \text{ мкм}$$

7/12/2022



D_i - коэффициенты диффузии

μ_i - подвижности зарядов

Задача диффузионного легирования

n-Si(P) / n-SiC(P) / p-SiC(B)

$$\frac{\partial G_1}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 G_1}{\partial x^2} - \mu_2 \frac{\partial}{\partial x} \left(G_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial G_2}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 G_2}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial G_3}{\partial t} = D_d \frac{\partial^2 G_3}{\partial x^2} + \mu_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(G_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - \mu_n \frac{\partial}{\partial x} \left(N \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \mu_p \frac{\partial}{\partial x} \left(P \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{4\pi}{\varepsilon} e(N + G_1 - G_3 - P)$$

$$G_1(0, t) = G_{01} = const$$

$$G_2(0, t) = G_{02} = const$$

$$G_3(0, t) = 0$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(0, t) = const$$

$$G_3(x, t) = 0, 0 \leq x \leq L_0$$

$$L_0 = 0,2 \text{ мкм}$$

$$G_1(L_1, t) = 0, t > 0$$

$$G_2(L_1, t) = 0, t > 0$$

$$G_3(L_1, t) = 0, t > 0$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(L_1, 0) = const$$

$$G_3(x, 0) = G_{03}, L_0 \leq x \leq L_1$$

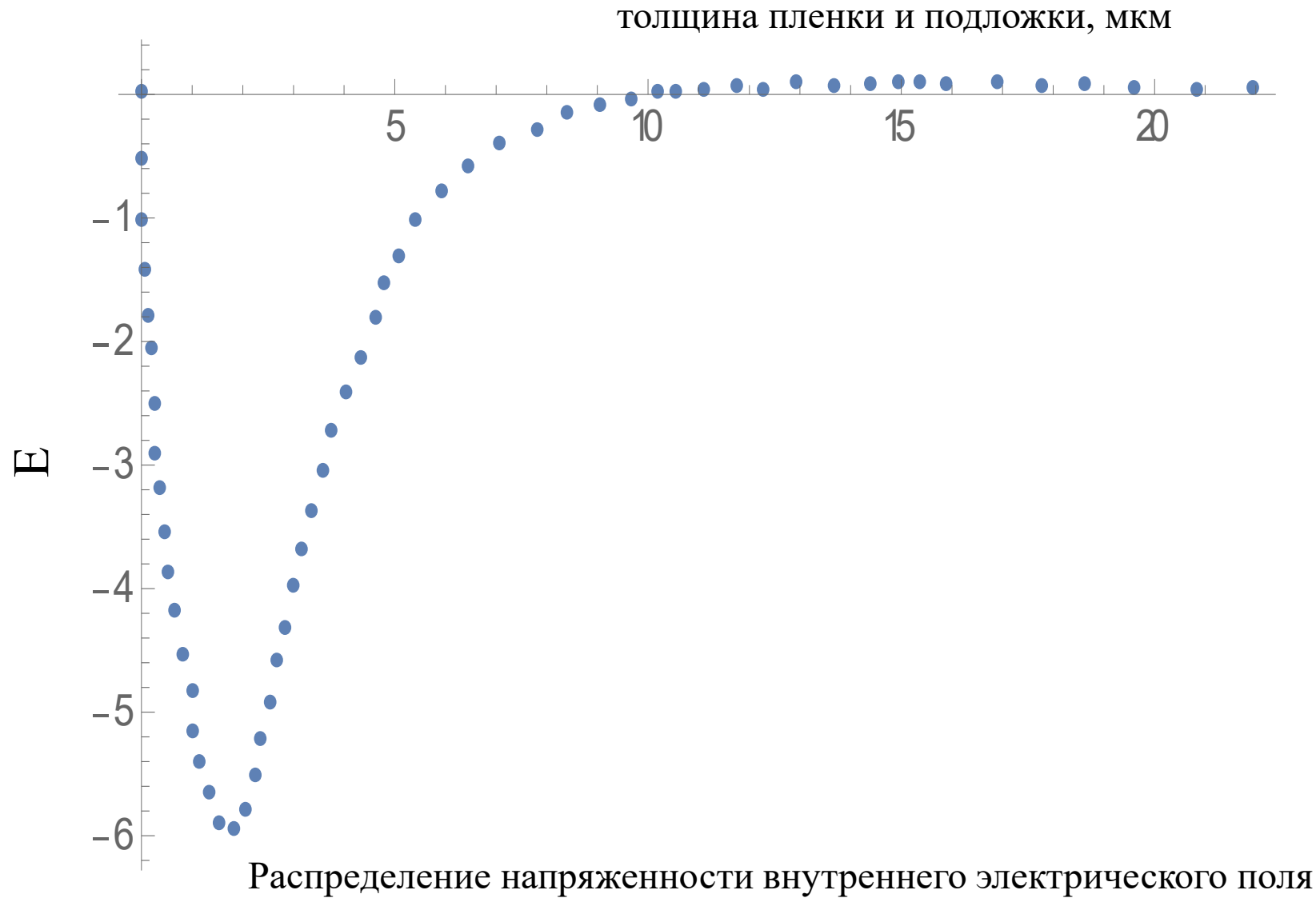
$$L_1 = 523 \text{ мкм}$$

D_i - коэффициенты диффузии

μ_i - подвижности зарядов

Напряженность:

$T = 1380 \text{ }^\circ\text{C}$



$t = 80 \text{ мин (1 процесс)}$
 $G01=10, G02=100, G03=110$
 $d=2 \text{ мкм}$

$t = 60 \text{ мин (2 процесс)}$
 $G01=200, G02=100, G03=110$
 $d=2 \text{ мкм}$

Что влияет на эффективность бета-преобразования?

- положение p-n-перехода (глубина его залегания)

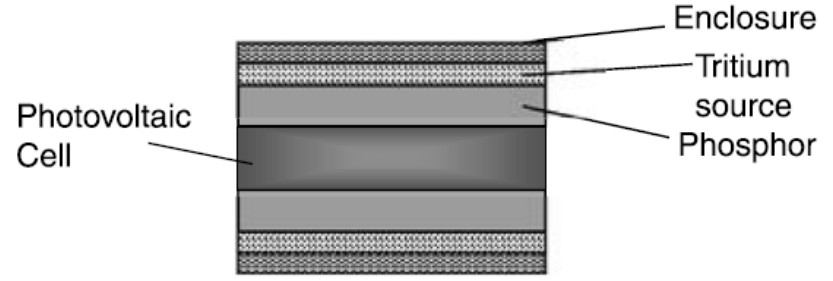
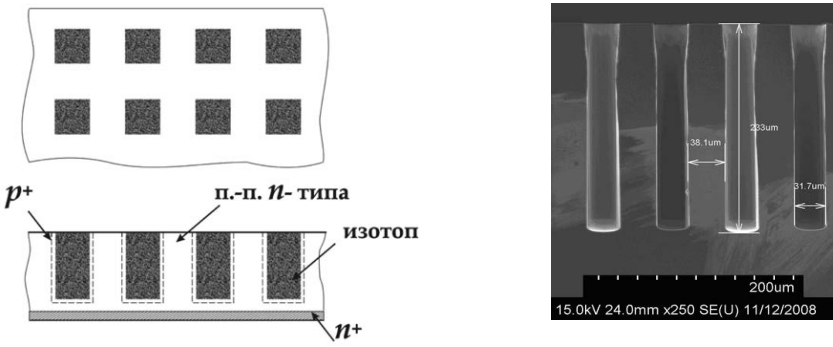
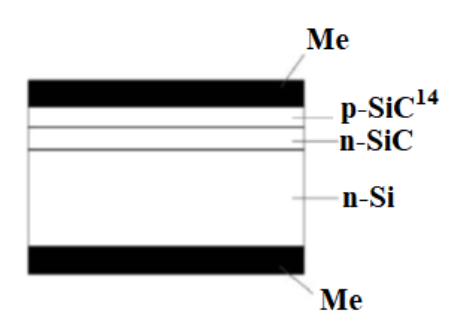
- способ внедрения радиоизотопа в материал полупроводника

- самопоглощение радиоизотопа и его активность, а также период полураспада

- процессы дефектообразования в структуре

- темп генерации электрон-дырочных пар

Способ внедрения радиоизотопа в материал полупроводника

<p>Тонкая плёнка/Пластинка</p>	
<p>Внедрение в поры/ямки/канавки/микроканалы/колодцы/пирамидки в структуре полупроводника</p>	
<p>Имплантация радиоизотопа внутрь структуры полупроводника</p>	

Что влияет на эффективность бета-преобразования?

- *положение p-n-перехода (глубина его залегания)*
- *способ внедрения радиоизотопа в материал полупроводника*
- *самопоглощение радиоизотопа и его активность, а также период полураспада*
- *процессы дефектообразования в структуре*
- *температура генерации электрон-дырочных пар*

Самопоглощение радиоизотопа и его активность, а также период полураспада

Слой половинного ослабления:

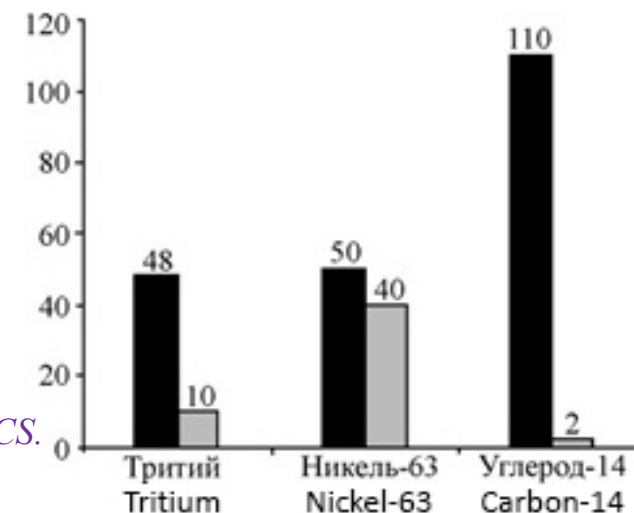
$$d \approx \frac{0,095ZE_{max}^{3/2}}{A}$$

Активность:

$$A_u = 4,17 \times 10^{23} \frac{m_u}{A \times T_{1/2}}$$

Кикоин, И. К. Таблицы физических величин. Справочник / И. К. Кикоин. - М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

*Saurov A.N., Bulyarskiy S.V., Risovaniy V.D., ...
PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS.
Vol. 20. №5, 2015. Pp. 474-480.*



Comparison of isotopes by energy reserve (highlighted in black) and cost in 2015:

■ – energy reserve, kW x h/kg; ■ – cost per 1 Ki of activity, thousand dollars.

Изотоп	Поглотитель изотопа	Период полураспада, лет	d, мг/см ²	E _{max} , МэВ	Активность (1г чистого изотопа), Ки
Ni-63	Si	100,1	0,82	0,067	56,67
	Ni-63		0,73		
C-14	Si	5730	2,93	0,156	4,45
	C-14		2,51		
H-3	Si	12,3	0,12	0,019	9700
	H-3		0,08		

Согласно работе:

Нагорнов Ю.С. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2013. №3(27). С.136-145.

выход бета-частиц никеля будет происходить с глубины не более 3,8 мкм от поверхности

Что влияет на эффективность бета-преобразования?

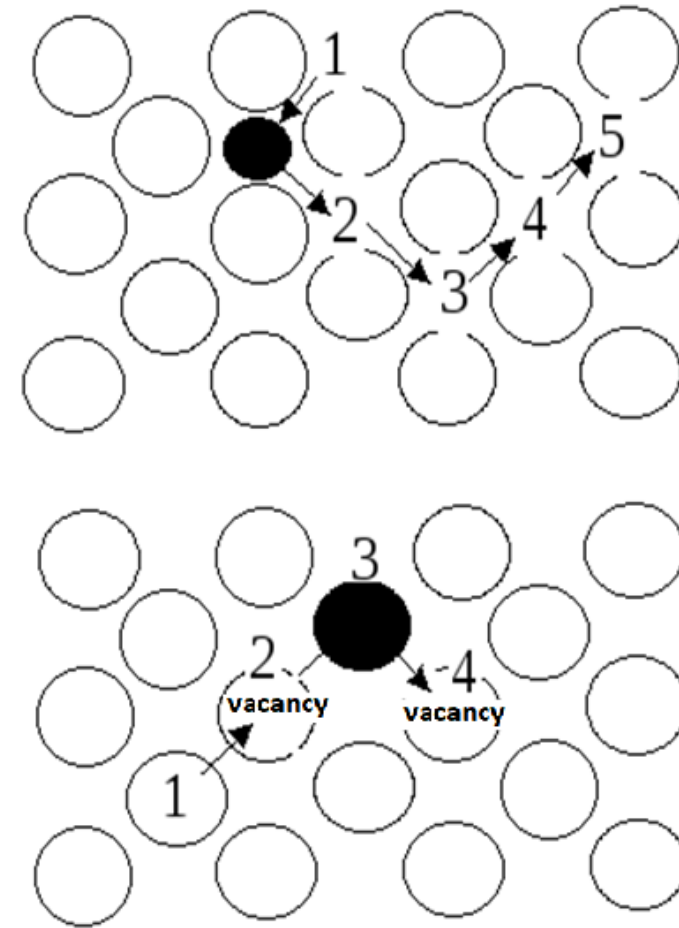
- *положение p-n-перехода (глубина его залегания)*
- *способ внедрения радиоизотопа в материал полупроводника*
- *самопоглощение радиоизотопа и его активность, а также период полураспада*
- *процессы дефектообразования в структуре*
- *температура генерации электрон-дырочных пар*

Процессы дефектообразования в структуре

Вопрос рассматривается на структурном уровне:

- 1) В процессе выращивания SiC на подложке Si (эндотаксия)*
- 2) В процессе распада радиоизотопов*
- 3) В процессе внешних воздействий, в том числе механического*

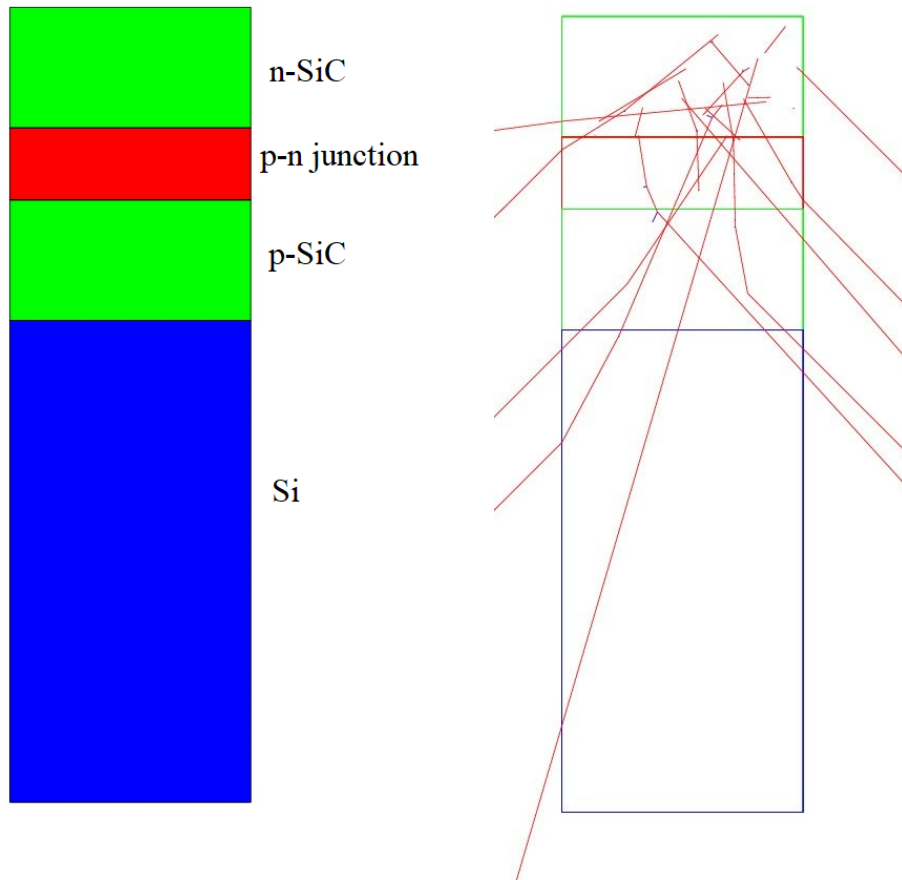
Alimov L.E., Anufriev A.V., Gurskaya A.V. etc. Silicon Carbide 3C-SiC phase band structures calculation in DFT // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1686. Issue 1.



Что влияет на эффективность бета-преобразования?

- *положение p-n-перехода (глубина его залегания)*
- *способ внедрения радиоизотопа в материал полупроводника*
- *самопоглощение радиоизотопа и его активность, а также период полураспада*
- *процессы дефектообразования в структуре*
- *температура генерации электрон-дырочных пар*

Темп генерации электрон-дырочных пар



Моделирование методом Монте-Карло в **GEANT4** проводилось **10000000** раз. Из 10000000 первичных электронов **6 039 018** электронно-дырочных пар были разделены p-n-переходом. Поскольку скорость генерации приходится на единицу времени, это значение линейно масштабируется с радиоизотопной активностью. $A_{C-14} = 5.203 \cdot 10^{18}$ Бк.

Заключение

- *положение p-n-перехода (гетероперехода) согласно математической модели эндотаксии SiC/Si находится на глубине менее 2мкм, а электрическое поле распределено в толщине чуть более 5 мкм в области p-n-перехода*
- *существует три подхода к внедрению радиоизотопов в структуру: в виде планарного слоя, в заготовленные поры/ямки/канавки/микрочаналы/колодцы/пирамидки и в виде встроенных атомов в химическую структуру полупроводника*
- *самопоглощение радиоизотопа имеет смысл рассматривать, когда изотопы нанесены в виде слоя; активность радиоизотопа зависит от способа получения радиоизотопа (удельная активность)*
- *образование дефектов в структуре энергетически выгодно по вакансионному механизму; дислокации образуются в процессе роста SiC/Si, но геттерируются, и структура очищается от дефектов*
- *модель порождения электрон-дырочных пар с AC-14 = $5.203 \cdot 10^{18}$ Бк даёт примерную оценку числа вторичных электронов (из 10 000 000 первичных электронов 6 039 018 электронно-дырочных пар)*