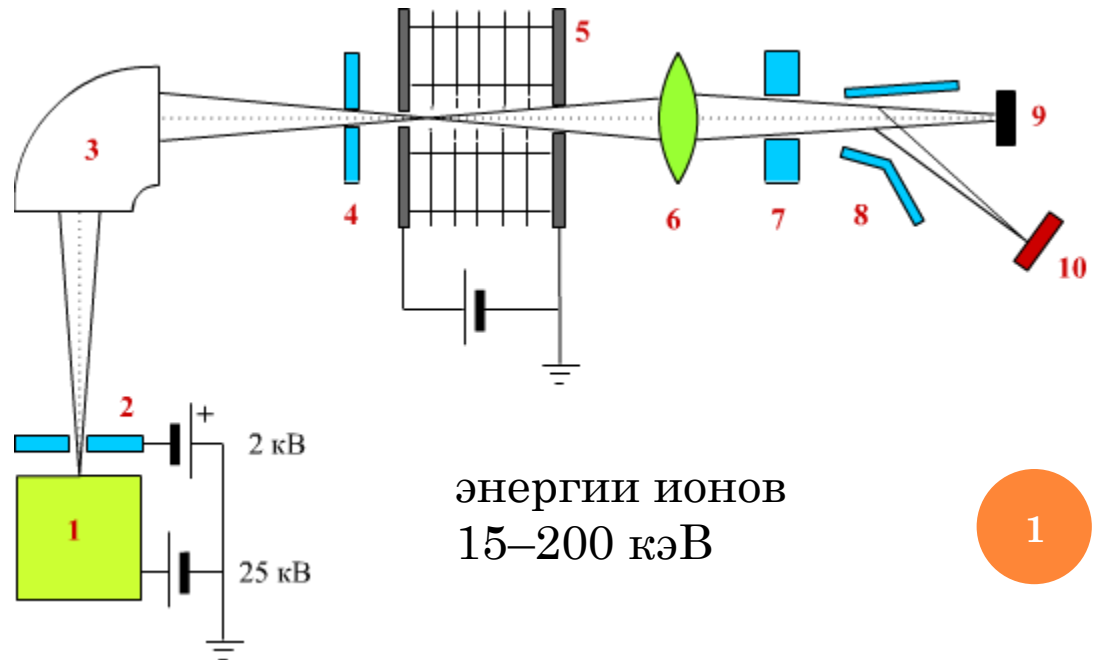


ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

- Ионная имплантация обеспечивает однородные и воспроизводимые профили концентрации, задаваемые посредством управления потоком ионов. Можно точно контролировать поверхностную концентрацию легирующей примеси и ионный состав.
- Ионная имплантация хорошо согласуется с планарной кремниевой технологией. Оксидные слои можно использовать и как маски, и как рассеиватели.
- Ионная имплантация является низкотемпературным процессом, хотя и требующим последующего отжига.

Комментарии к схеме:

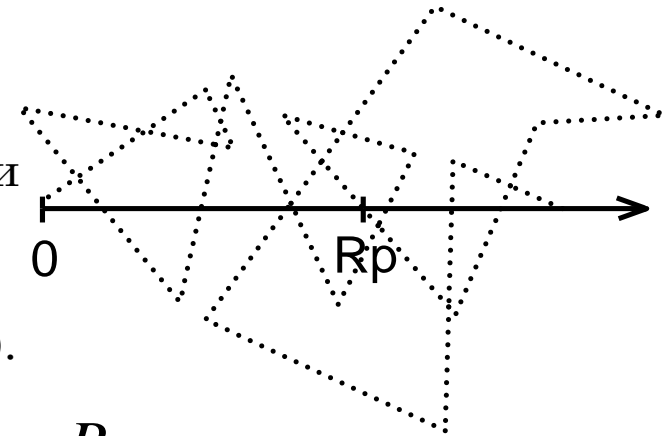
- 1 – источник ионов
- 2 – система фокусировки
- 3 – масс-спектрометр
- 4 – диафрагма
- 5 – ускоряющая трубка
- 6 – система фокусировки
- 7 – отклоняющая система
- 8 – система поворота пучка
- 9 – мишень для поглощения нейтральных частиц
- 10 – подложка + электрометр



МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

- Одномерное моделирование. Модель Lindhard-Scharff-Schiott для изотропной полубесконечной мишени.
 - торможение ионов рассчитывается как последовательность независимых упругих двухчастичных столкновений с учётом электронного торможения в приближении свободного электронного газа.

R_p – проекция пройденного ионом пути до полной остановки на направление первичного пучка (проективный пробег). Зависит от энергии пучка, ориентации и покрова поверхности.
 ΔR_p – случайный разброс проекции пробега (стандартное отклонение проективного пробега).



$$R = \int_0^E \frac{dE}{S_n + S_e}$$

$$R = \frac{2\sqrt{E}}{K_2} - \frac{\ln(1 + 2\sqrt{E} \cdot K_1 \cdot K_2)}{K_1 \cdot K_2^2}$$

$$R_p = \frac{R}{1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{m_2}{m_1}}$$

$$\Delta R_p = \frac{2}{3} R_p \cdot \frac{\sqrt{m_1 \cdot m_2}}{m_1 + m_2}$$

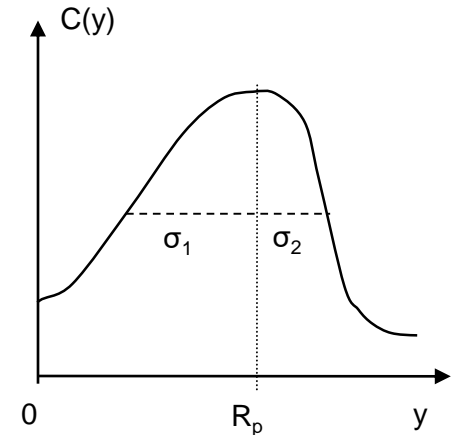
МОДЕЛЬ LINDHARD-SCHARFF-SCHIOTT

Элемент		E, кэВ									
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
B	Rp	78,4	161	243,8	323,8	397,7	468,8	537,4	603	665,4	725,3
	ΔRp	32,1	53,8	70,8	83,9	93,9	102,5	109,8	116	121,3	125,9
P	Rp	26	49	73,2	98	123,3	149,1	175,2	201,4	227,7	253,8
	ΔRp	9,4	16,4	23,1	29,5	35,4	41,1	46,6	51,8	56,6	61
As	Rp	15,9	27,1	37,7	48,1	58,4	68,6	78,9	89,1	99,5	110,1
	ΔRp	3,7	6,2	8,4	10,5	12,5	14,5	16,3	18,2	20	21,9
Sb	Rp	14	22,9	30,8	38,4	45,7	52,8	59,9	66,9	73,9	80,9
	ΔRp	2,4	3,8	5,1	6,3	7,4	8,4	9,5	10,5	11,5	12,5

Значения проективного пробега и дисперсии проективного пробега некоторых элементов в кремниевой подложке при различных энергиях имплантации

МОДЕЛЬ LINDHARD-SCHARFF-SCHIOTT

$$C(y) = C_{\max} e^{-\frac{(y-R_p)^2}{\Delta R_p^2}} \quad C_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p}$$



$$C(y) = \frac{Q \cdot f(y)}{\int_0^{\infty} f(y) dy} \quad f(y) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(y-R_p)^2}{2\sigma_1}\right), & y \leq R_p \\ \exp\left(-\frac{(y-R_p)^2}{2\sigma_2}\right), & y > R_p \end{cases}$$

- Профиль концентрации имплантированных ионов (фосфор, мышьяк, сурьма):
 - распределение Гаусса
 - сдвоенная гауссиана

МОДЕЛЬ LINDHARD-SCHARFF-SCHIOTT

- Эксперименты показывают, что профиль распределения бора существенно отличается от распределения других примесей. В качестве моделирующей функции распределения в этом случае используется Pearson IV.

$$\frac{df(y)}{dy} = \frac{(y-a)f(y)}{b_0 + b_1y + b_2y^2}$$

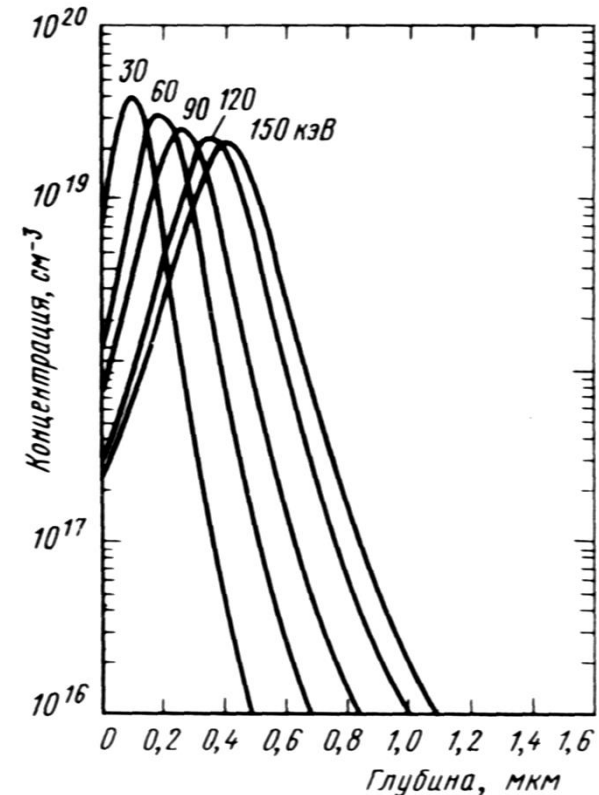
$$\int_{-\infty}^{\infty} f(y)dy = 1$$

$$\mu_1 = \int_{-\infty}^{\infty} y \cdot f(y)dy = R_p$$

$$\mu_i = \int_{-\infty}^{\infty} (y - R_p)^i \cdot f(y)dy \quad \text{где } i = 2, 3, 4; \quad \sqrt{\mu_2} = \Delta R_p$$

$$\gamma = \frac{\mu_3}{\Delta R_p^3} \quad \beta = \frac{\mu_4}{\Delta R_p^4}$$

$$b_0 + b_1x + b_2x^2 = 0$$



Результаты аппроксимации экспериментальных данных по ионной имплантации бора (доза $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) в кремний ориентации (111)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ PEARSON IV

$$a = -\frac{\Delta R_p \cdot \gamma(\beta + 3)}{A}$$

$$b_0 = -\frac{\Delta R_p (4\beta - 3\gamma^2)}{A}$$

$$A = 10\beta - 12\gamma^2 - 18$$

$$b_1 = -\frac{\Delta R_p \cdot \gamma(\beta + 3)}{A}$$

$$b_2 = -\frac{2\beta - 12\gamma^2 - \Delta R_p}{A}$$

$$C(y) = k \cdot \left(b_2 (y - R_p)^2 + b_1 (y - R_p) + b_0 \right)^{\frac{1}{2b_2}} \times \exp \left(-\frac{\frac{b_1}{b_2} + 2b_1}{\sqrt{4b_2b_0 - b_1^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{2b_2(y - R_p) + b_1}{\sqrt{4b_2b_0 - b_1^2}} \right)$$

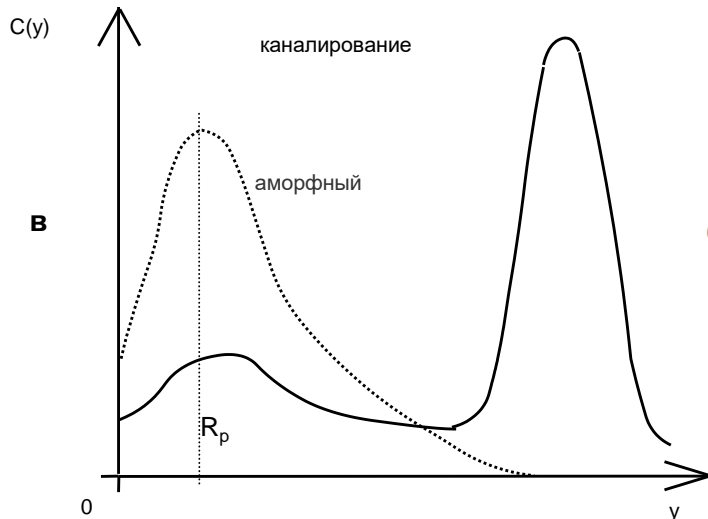
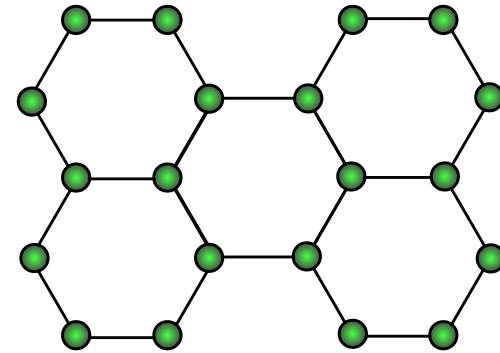
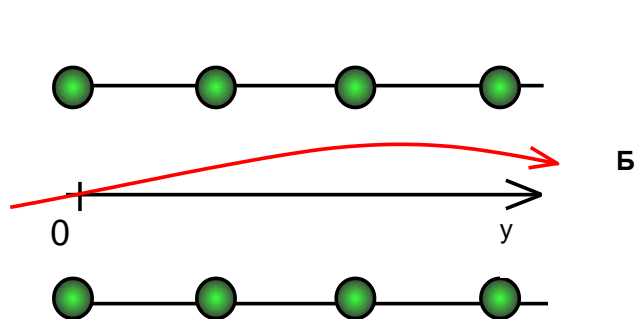
В предельном случае $\beta = 3, \gamma = 0$
коэффициенты $b_1 = b_2 = 0$, и
решением уравнения
будет распределение
Гаусса.

параметр k определяется из условия нормировки

$$\beta \geq 2.8 + 2.4\gamma^2$$

ПРОСТОЙ УЧЁТ ЭФФЕКТОВ КАНАЛИРОВАНИЯ

- Ионы примеси могут проникнуть в кристалл значительно глубже, чем в аморфный материал, если имплантация производится вдоль главной кристаллической оси или плоскости. При этом вместо комбинации ядерного и электронного торможений имеет место только электронное.



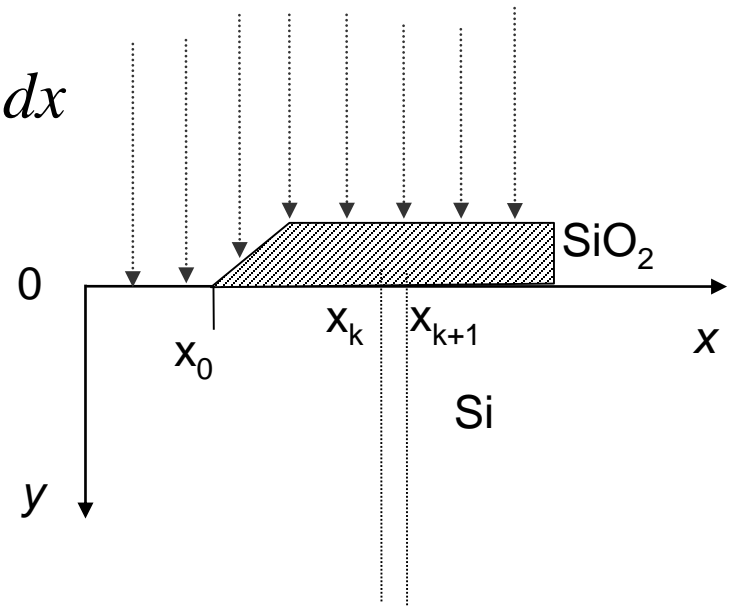
$$C(y) = C(y) + Ae^{-\lambda(y-y_0)}$$

- Способы устранения эффекта:
 - изменение угла падения ионов
 - аморфизация приповерхностного слоя (имплантация через окисел)

2D МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

$$C(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_x} \int_{-\infty}^{\infty} C(y, d(x)) \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}} dx$$

$$C(y, d) = \begin{cases} C_{SiO_2}(y), & y \leq d \\ C_{Si}(y-d), & y > d \end{cases}$$



$$C(x, y) = \frac{C(y)}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{x - x_r}{\sqrt{2}\sigma_x} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x - x_l}{\sqrt{2}\sigma_x} \right) \right) \quad \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^z e^{-v^2} dv$$

- Основное назначение таких моделей – описание эффекта имплантации за край маски