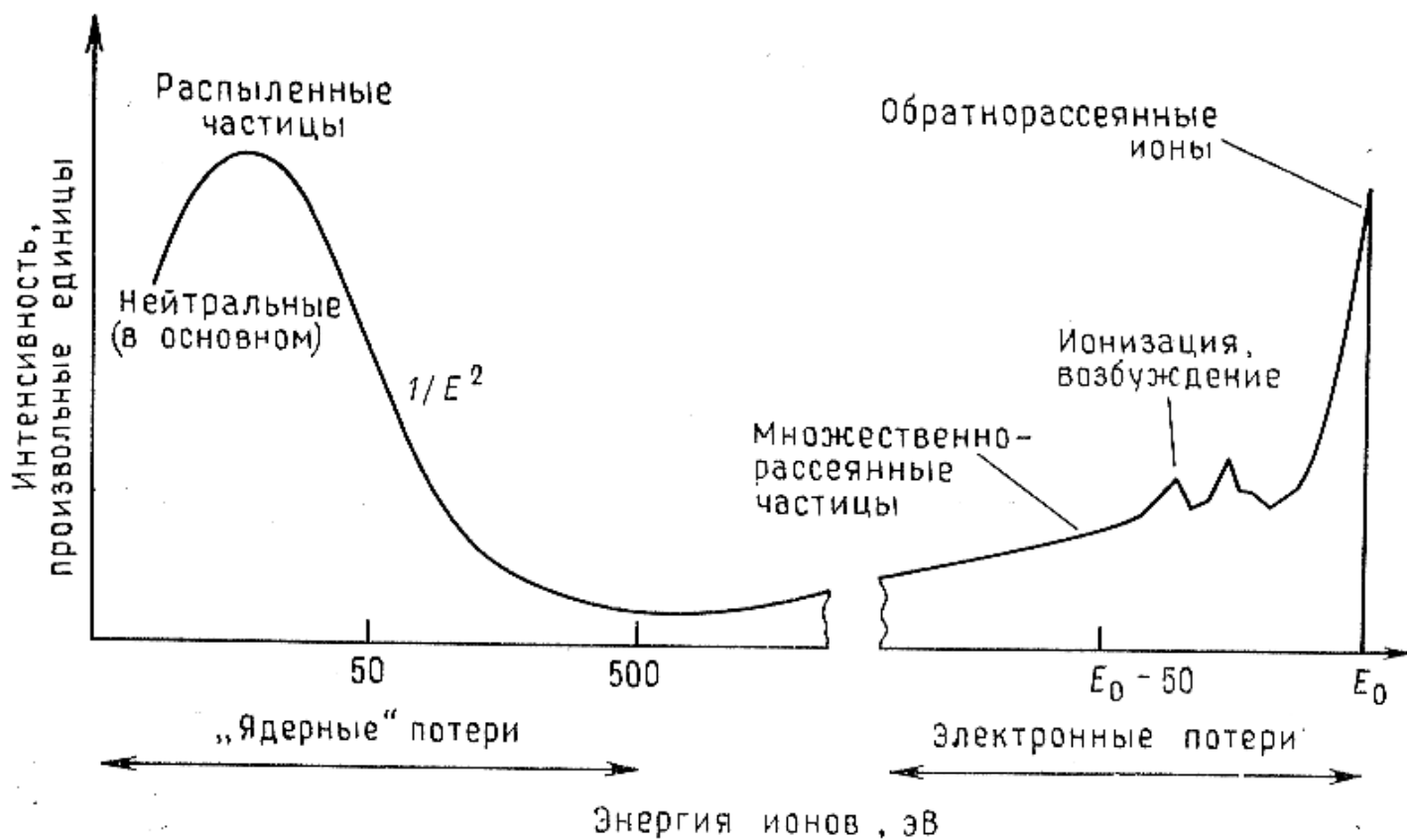


Взаимодействие ионов с поверхностью

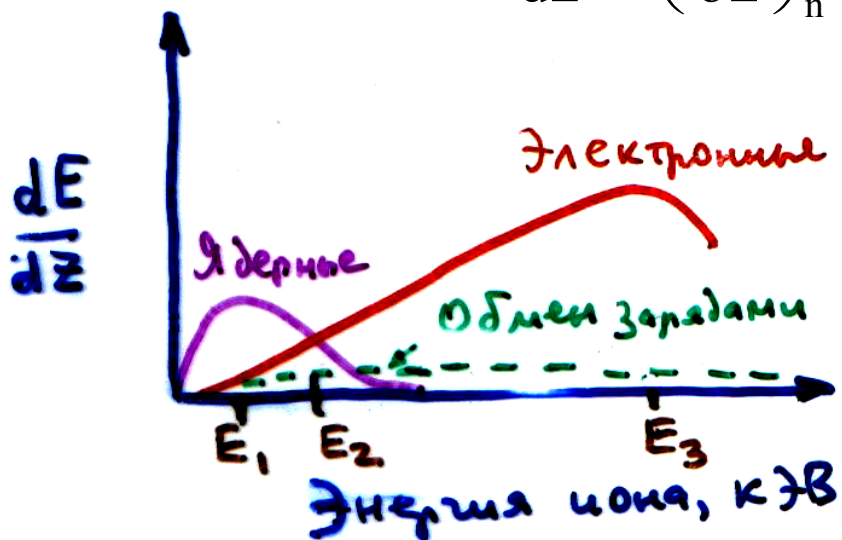
Внедрение, отражение, десорбция, распыление и ВИИЭ



Энергоспектр вторичных атомов (и ионов)

Торможение ионов в веществе

$$\frac{dE}{dz} = \left(\frac{\partial E}{\partial z} \right)_n + \left(\frac{\partial E}{\partial z} \right)_e + \left(\frac{\partial E}{\partial z} \right)_{ch}$$



	E_1	E_2	E_3
B_{11}^+	3 кэВ	17	$3 \cdot 10^3$
P_{31}^+	17	140	$3 \cdot 10^4$
A_{75}^+	73	800	$2 \cdot 10^5$ кэВ

Значения E_1, E_2, E_3
при имплантации в кремний

Ядерные потери:

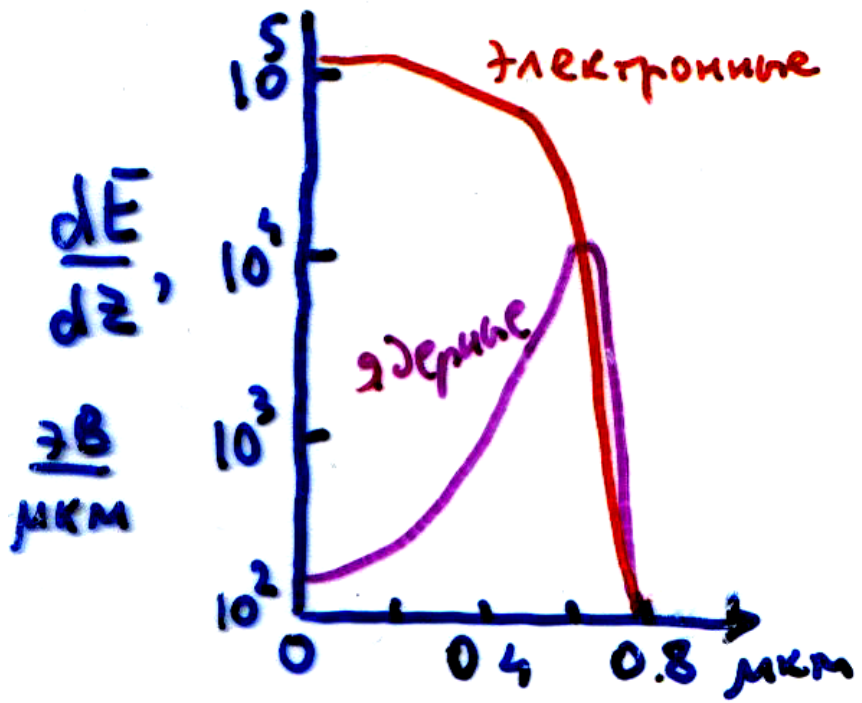
- упругие столкновения
- взаимодействие между экранированными зарядами иона и атома мишени
- выбивание атомов мишени

Электронные потери
(неупругие):

- торможение с передачей энергий электронам
- возбуждение и ионизация атомов

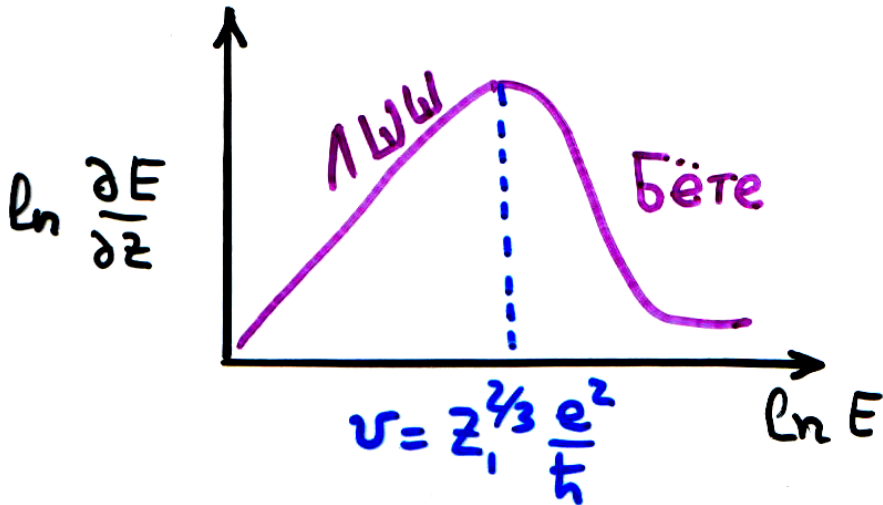
Обмен зарядами:

$$V_i \sim V_e = 2\pi z^{2/3} \cdot e^2/h \quad (<10\%)$$



Потери энергии при торможении протонов энергией 60 кэВ в резисте ПММА

Электронные потери



- Возбуждение и ионизация обоих сталкивающихся атомов
- Непрерывные потери при столкновениях с электронным газом

$$-\left(\frac{\partial E}{\partial z}\right)_e = N \cdot S_e \quad S_e = \int_0^{\infty} E_e(E, \rho) 2\pi\rho d\rho \quad [\text{эВ}\cdot\text{см}^2/\text{атом}]$$

Линдхард-Шарф-Шиотт, 1963

$$S_e = C \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot a_{\text{TF}} \cdot V$$

О.Б.Фирсов (квазимолекула, обмен электронами)

$$S_e [\text{эВ}\cdot\text{см}^2/\text{атом}] = 2.3 \cdot 10^{-23} (z_1 + z_2) \cdot V_{\text{см/с}}$$

Бёте (частицы ионизованы)

$$V > 2\pi \cdot z^{2/3} \frac{e^2}{h}$$

$$S_e = \frac{2\pi \cdot z_1^2 \cdot z_2 \cdot e^4}{E} \left(\ln \frac{4E}{I} + \dots \right)$$

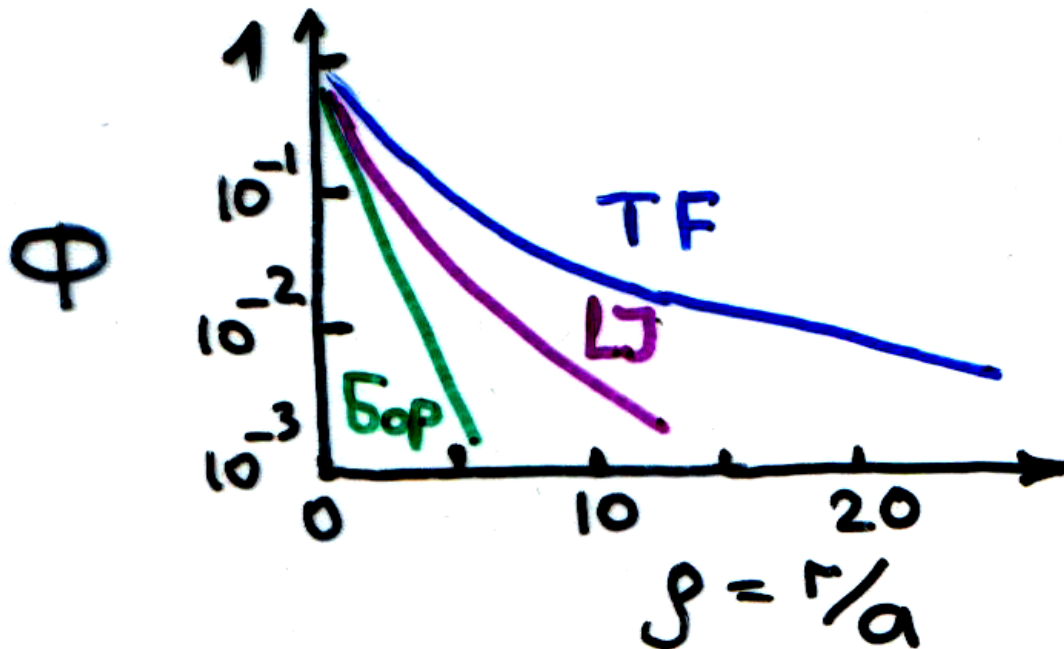
Ядерные потери

Ядерная тормозная способность $-\left(\frac{\partial E}{\partial z}\right)_n = N \cdot S_n$ $S_n = \int_0^{E_{\max}} E_n d\sigma(E_n, E) \left[\frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{\text{атом}} \right]$

Экранированный потенциал

$$U = \frac{z_1 z_2 e^2}{r} \Phi\left(\frac{r}{a}\right)$$

экранировка



$$U_{\text{Бор}} = \frac{z_1 z_2 e^2}{r} \exp\left(-\frac{r}{a_B}\right)$$

$$U_{\text{TF}} = \frac{z_1 z_2 e^2}{r} \Phi\left(\frac{r}{a_{\text{TF}}}\right)$$

Потенциал Томаса-Ферми

Уравнение Пуассона решается с помощью статистической модели Томаса-Ферми

$$\Delta U = 4\pi n = \frac{8\sqrt{2}}{3\pi} U^{3/2}$$

$$U = \frac{z_1 z_2 e^2}{r} \Phi\left(\frac{r}{a}\right),$$

где $a \propto \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{3\pi}{4}\right)^{2/3}}{Z^{1/3}} a_0 = \frac{0,885}{Z^{1/3}} a_0$

Φ определяется методом численного интегрирования

r/a	1	10
Φ	0.424	0.024

Для «экранированного» иона с зарядом Z_1 параметр экранирования

ЛШШ

$$a_{TF} = \frac{0.885 \cdot a_0}{(z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{1/2}}$$

Фирсов:

$$a_F = \frac{0.885 \cdot a_0}{(z_1^{1/2} + z_2^{1/2})^{2/3}}$$

$$s_n(\varepsilon) = -\frac{d\varepsilon}{d\lambda} = \frac{d\left(\frac{E_1}{E_{TF}}\right)}{d\left(\frac{z}{L}\right)}$$

- универсальная функция ядерных потерь

$$\varepsilon = \frac{E_{rel}}{z_1 z_2 e^2 / a_{TF}} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \cdot \frac{E_1}{z_1 z_2 e^2 / a_{TF}} = \frac{E_1}{E_{TF}}$$

- приведенная энергия

Энергия

Томаса-Ферми

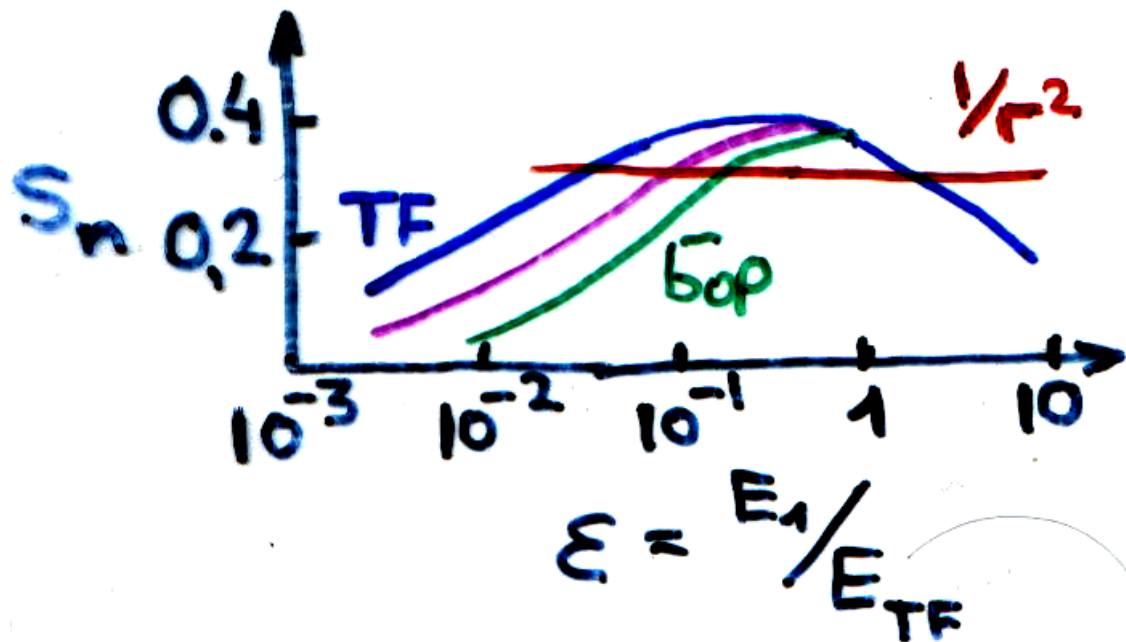
$$E_{TF} = z_1 z_2 e^2 / a_{TF} \left(1 + \frac{M_1}{M_2} \right) =$$

	C	Cu	Mo	W
H	0.4	3	5	10 кэВ
He	1.1	6	10	20 кэВ

$$\lambda = \frac{z}{L} \text{ -- безразмерный пробег иона, где } L = \frac{1}{N \pi a_{TF}^2 \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2}}$$

Вид универсальной функции для различных потенциалов

$$S_n(\varepsilon) = -\frac{d\varepsilon}{d\lambda}$$



Для потенциала $U \sim 1/r^2$ --

$$S_n = 0.327$$

Приближенно (В.В.Юдин)

$$S_n = \frac{0.45\sqrt{\varepsilon}}{0.3 + \varepsilon}$$

Пробег иона

Средний полный
пробег иона

$$R = \int_0^R dz = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{\left(\frac{dE}{dz}\right)_я + \left(\frac{dE}{dz}\right)_э}$$

Проекционный пробег

(на направление движения первичного иона)

$$R_p \pm \Delta R_p$$

ΔR_p – разброс пробегов (straggling)

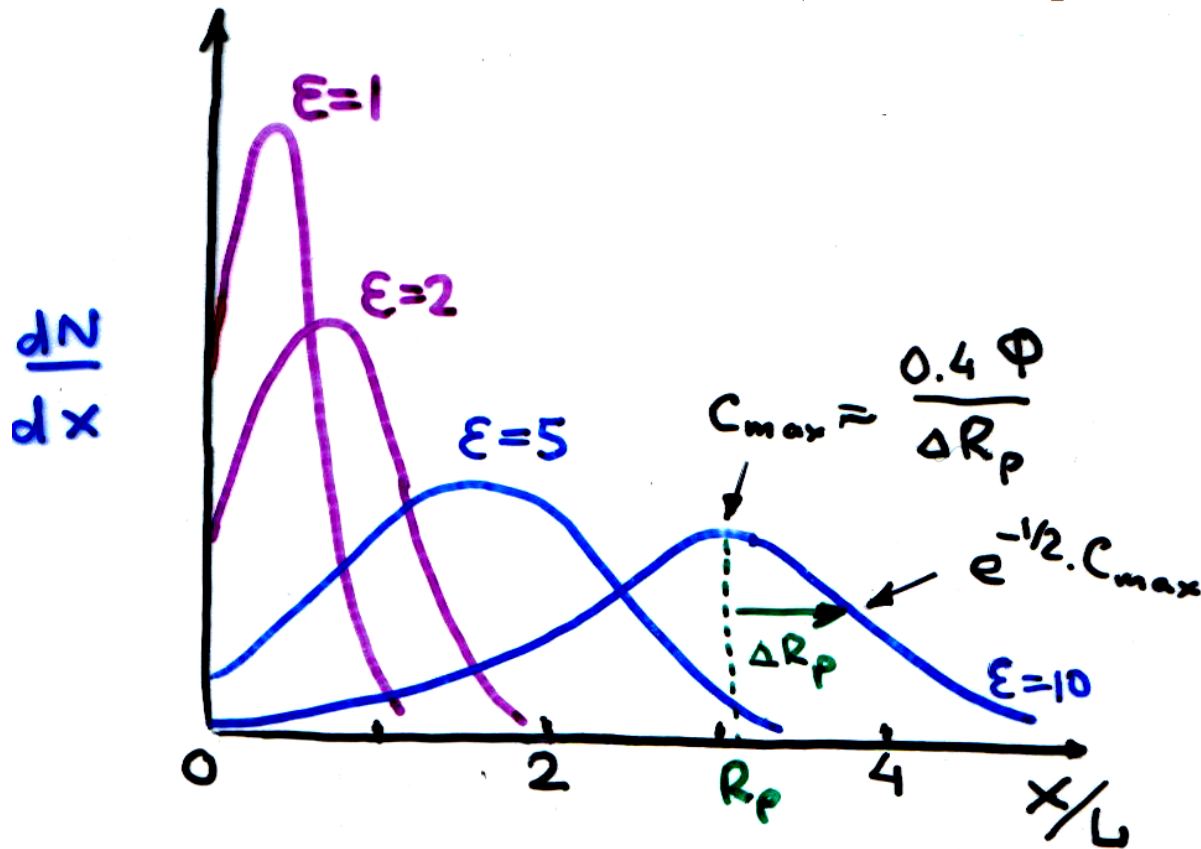
Распределение внедренных частиц (при отсутствии каналирования) описывается распределением Гаусса

$$\frac{dN}{dx} = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p} \cdot e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}}$$

(Φ - доза облучения на см^2 поверхности,

ΔR_p – стандартное отклонение)

Гауссово распределение внедренных частиц (нет каналирования)



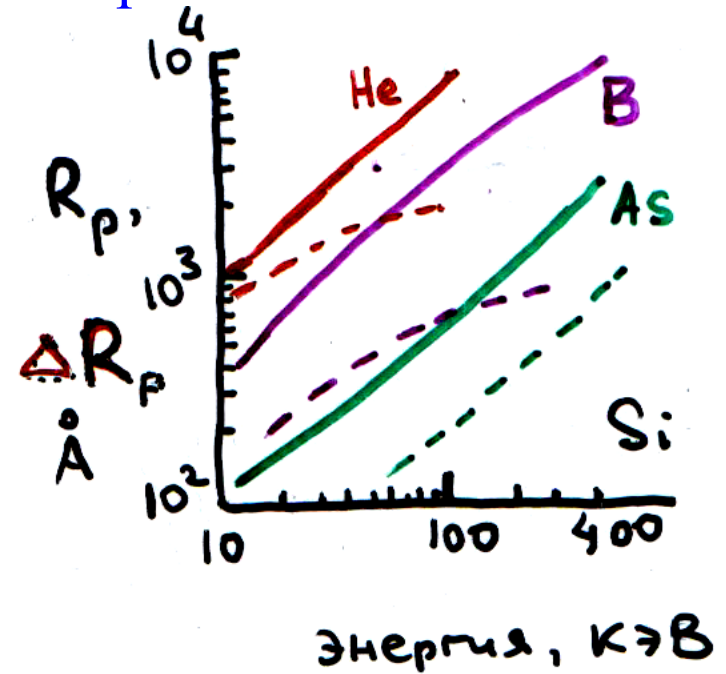
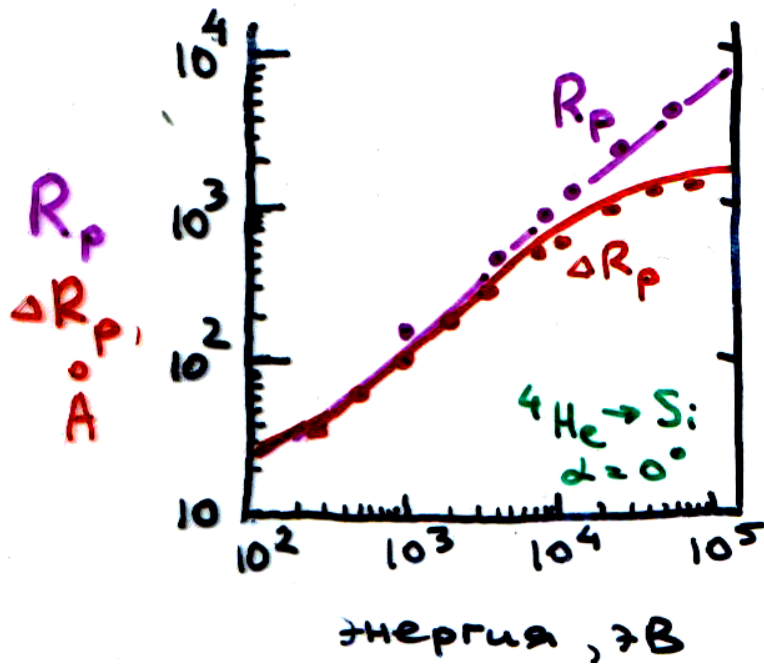
$$L = \frac{1}{N \cdot \pi a_{TF}^2 \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2}}$$

Распределение внедренных частиц

$\epsilon = E_1/E_{TF}$ - приведенная энергия

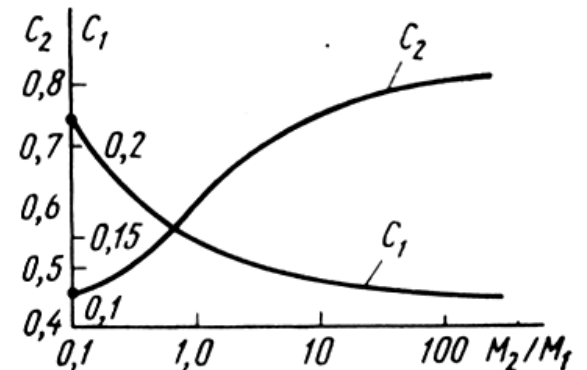
x/L - безразмерный пробег

Проекция пробега и стандартное отклонение
при имплантации в кремнии

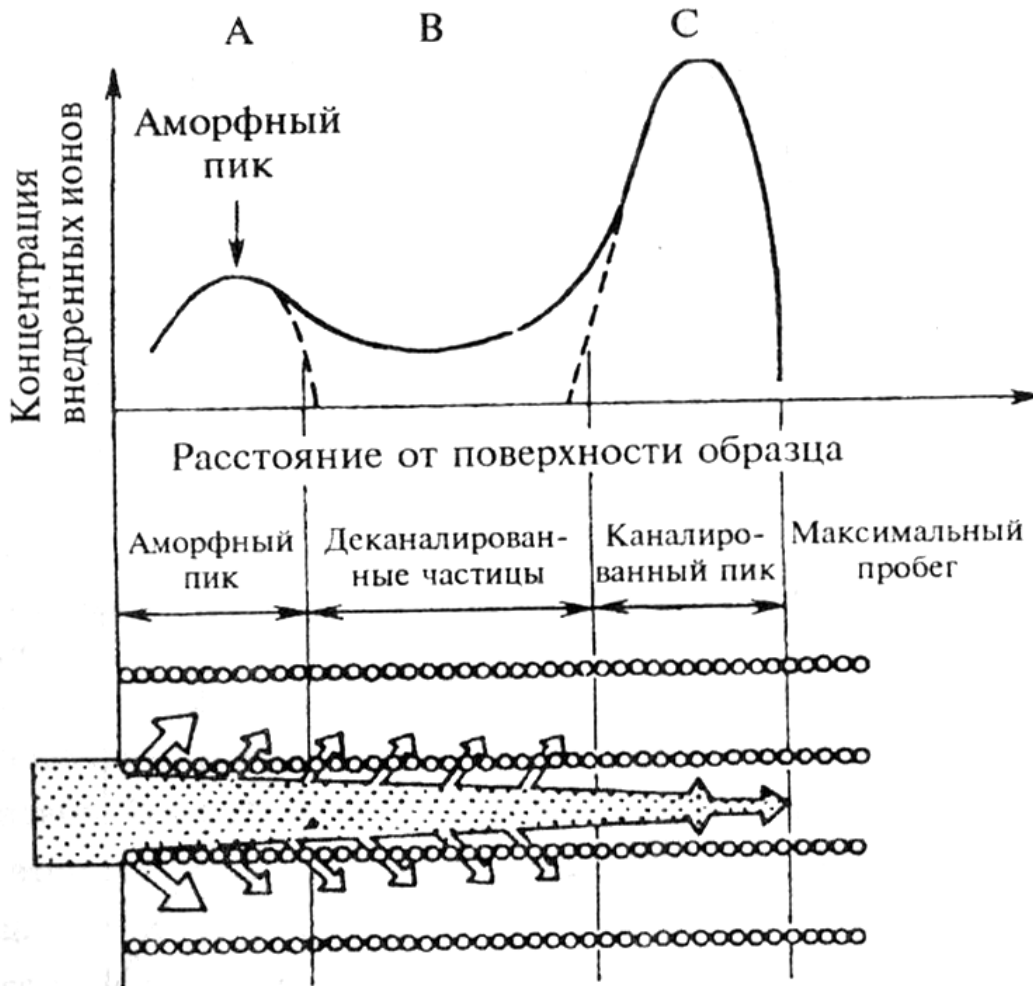


$$0,002 < \epsilon < 0,1 \quad \bar{R}_p = c_1 M_1 \left[\frac{z_1^{2/3} + z_2^{2/3}}{z_1 z_2} E \right]$$

$$0,5 < \epsilon < 10 \quad \bar{R}_p = c_2 M_2 \left[\frac{z_1^{1/3} + z_2^{1/3}}{z_1 z_2} E \right]$$



Критические углы каналирования ионов в Si



Ион	E, кэВ	Угол, град.		
		Направление канала		
		<110>	<111>	<100>
B	30	4.2	3.5	3.3
	50	3.7	3.2	2.9
P	30	5.2	4.3	4.0
	50	4.5	3.8	3.5
As	30	5.9	5.0	3.5
	50	5.2	4.4	4.0

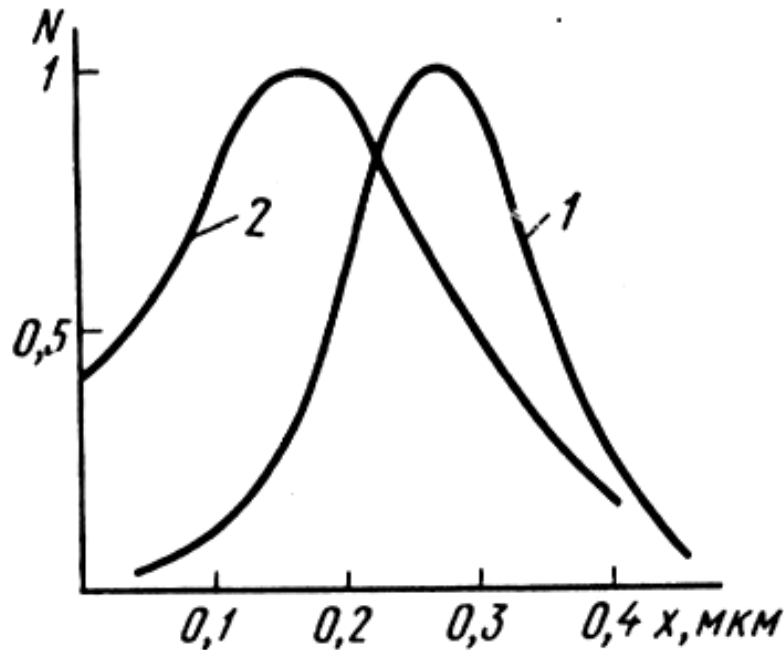
Схема распределения остановившихся ионов по глубине монокристалла

Радиационные дефекты

При торможении первичный ион выбивает со своих мест атомы решетки

Образование вакансий, межузельных атомов и объемных дефектов

Дефектов намного больше, чем имплантируемых частиц !



Число смещенных атомов решетки

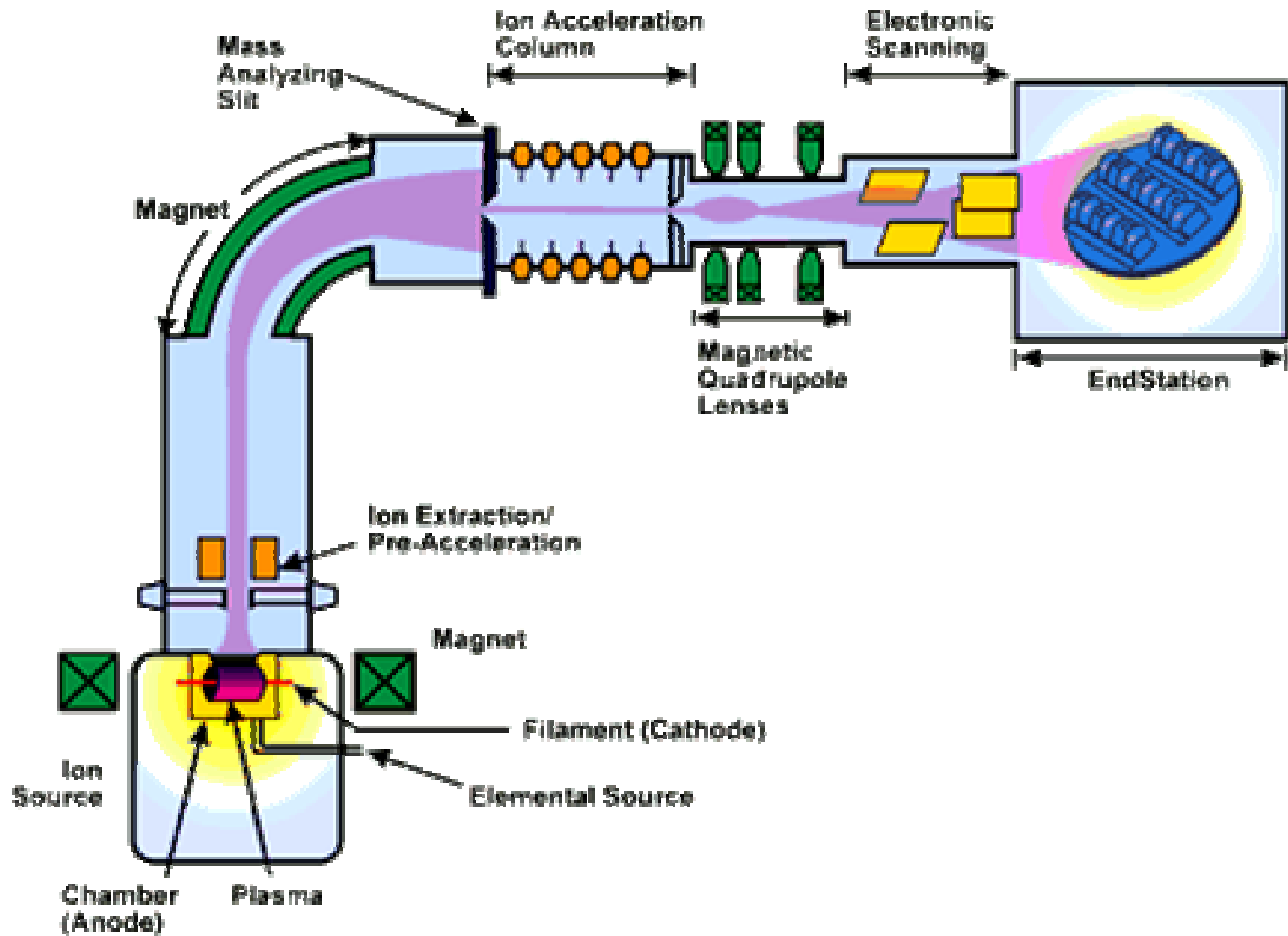
$$N_d \approx \frac{E}{2E_d}$$

$$E_d \sim 5 \div 80 \text{ эВ}$$

$$E_d = 22 \text{ эВ для Si}$$

Относительное распределение имплантированных ионов бора (1) и радиационных дефектов (2)

Типичный высоковольтный имплантер



Высоковольтная имплантация

- Имплантация в полупроводники
 - Глубокозалегающие изолирующие области (SiO_2 для КНИ- структур)
- Имплантация в диэлектрики
- Имплантация в металлы (дозы: 10^{16} - 10^{18} см⁻²)

Требования

- угол наклона на пластине $< 1.0^\circ$
- энергетический разброс $< 3.0 \%$
- однородность дозы $< 1.5 \%$
(для 300 мм пластин)

Преимущества:

- Низкотемпературный процесс
- Контроль дозы и профиля
- Финишный процесс

Фокусированные ионные пучки

Легирование субмикронных размеров без применения литографии

Недостатки:

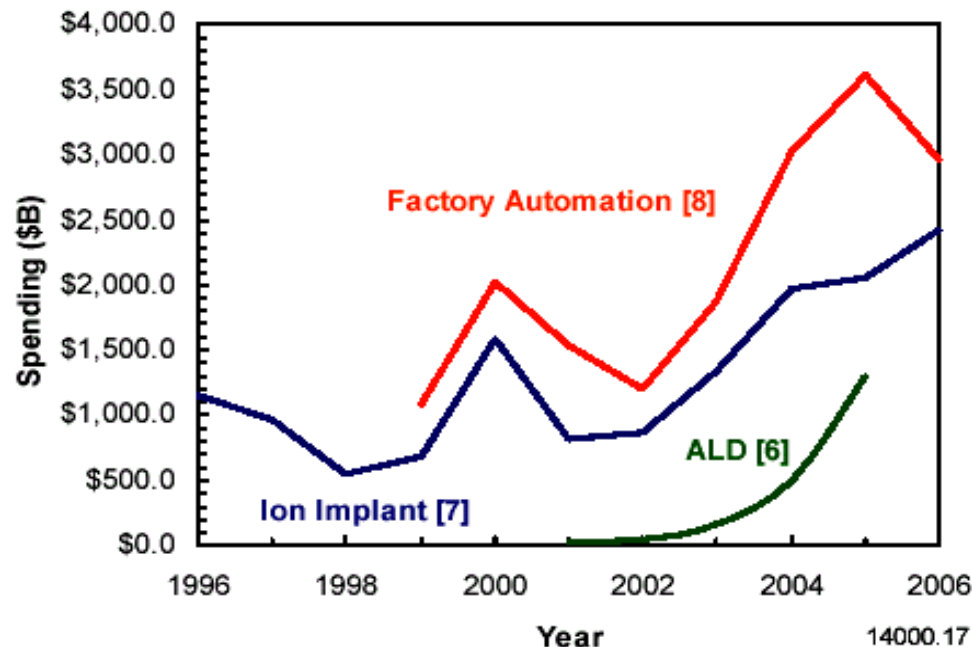
- Наличие дефектов в материале
- Сложность процесса
- Дороговизна

Производство имплантеров

3 типа имплантеров:

- сильноточные
- среднего тока
- высокой энергии (МэВ)

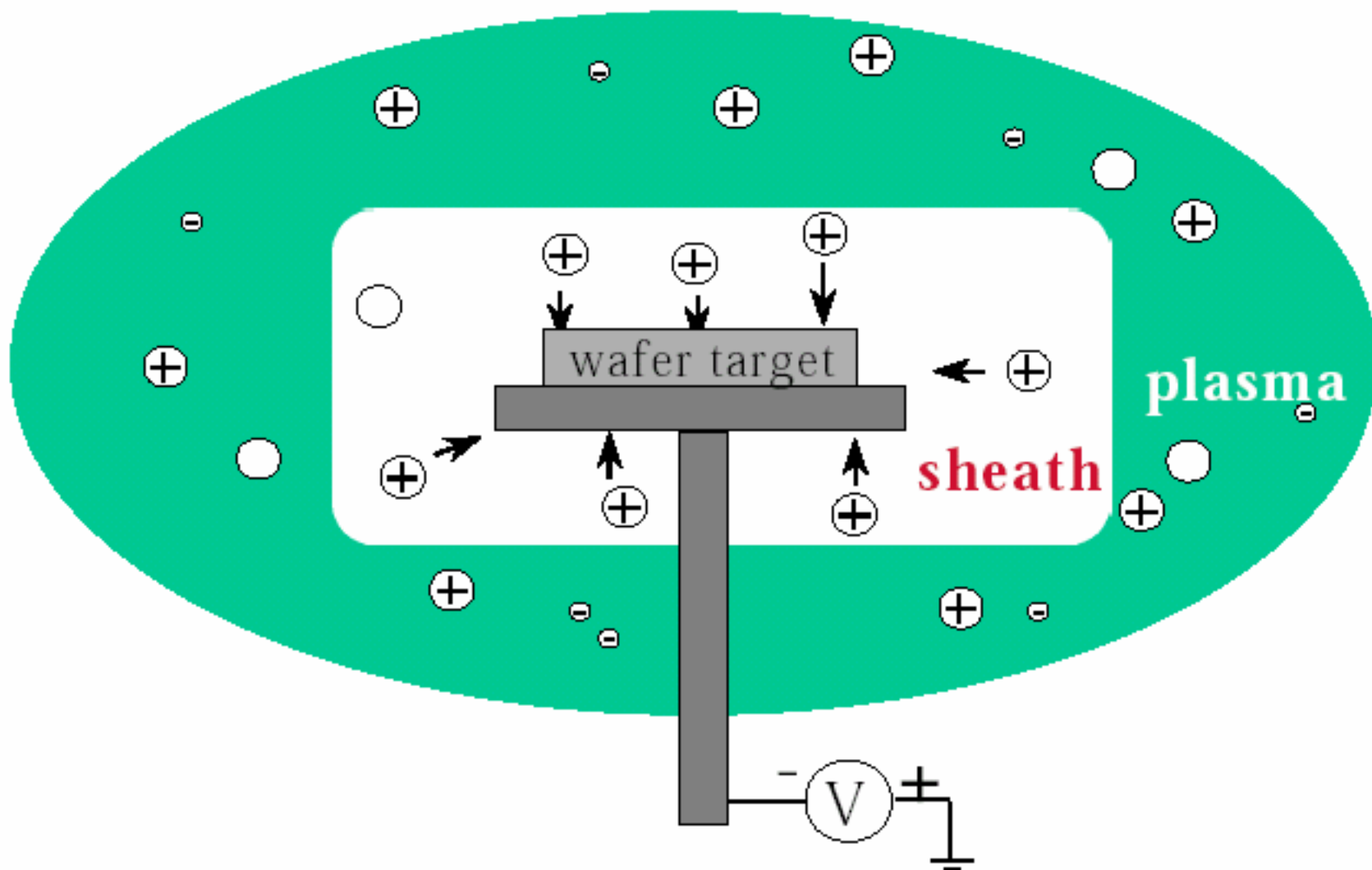
Инвестиции в производство



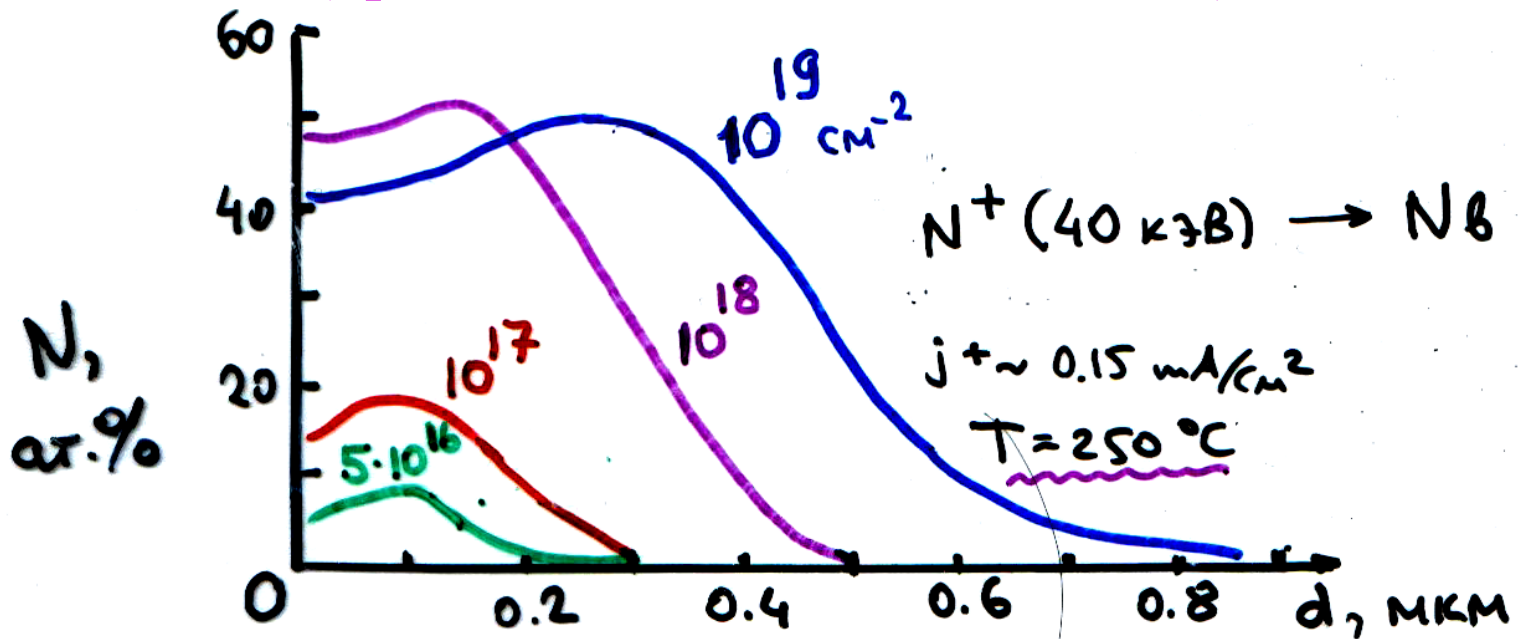
Основные производители

Company	Location
Axcelis Technologies	Beverly, MA
Varian Semiconductor Equipment Associates	Gloucester, MA
Applied Materials Implant Division	Horsham, U.K.
Sumitomo Easton Nova (joint venture with Axcelis)	Tokyo, Japan
Nissin Electric	Kyoto, Japan
Ibis Technology	Danvers, MA

Высокодозная имплантация в плазме (РШ)



Радиационно-стимулированная диффузия (при высокодозной имплантации)

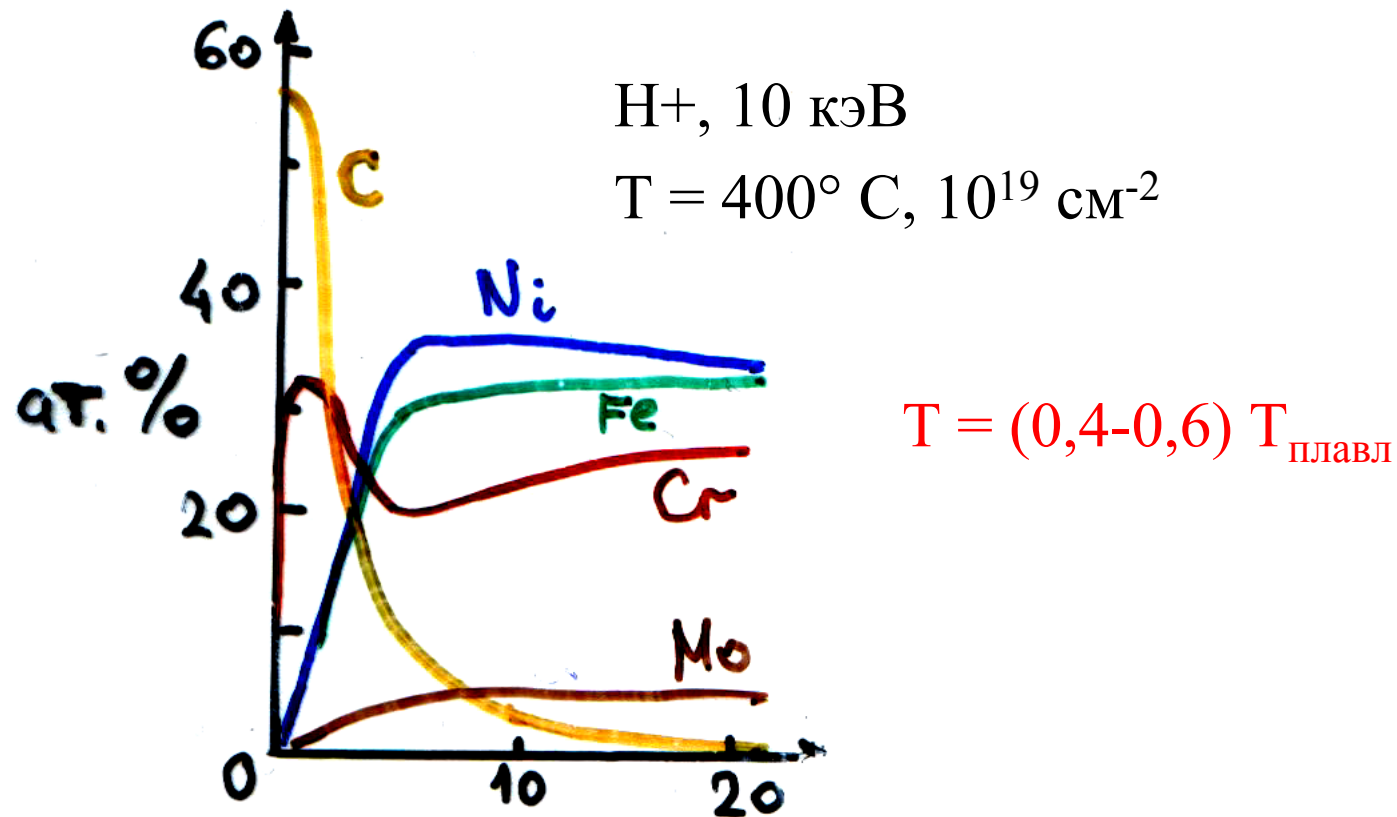


Распределение имплантированных в Nb атомов азота

“Дальнодействие”:

при дозе 10^{19} cm^{-2} и $T \sim 250^\circ\text{C}$ толщина слоя ($>40\%$)
в 3 раза больше проецированного пробега

Радиационно-индуцированная сегрегация (при высокодозной имплантации)



Распределение компонентов
высоконикелевой стали по глубине

Модификация химического состава поверхностного слоя