

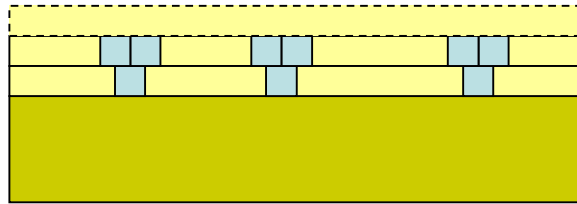
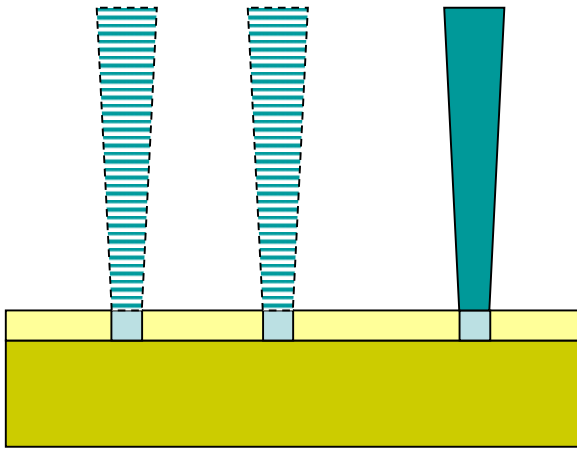
# **Ионно-лучевая литография: определение чувствительности и контраста резиста ПММА**

к.ф.-м.н. Я.Л. Шабельникова, д.ф.-м.н. С.И. Зайцев

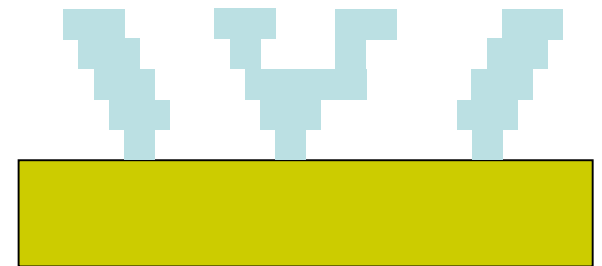
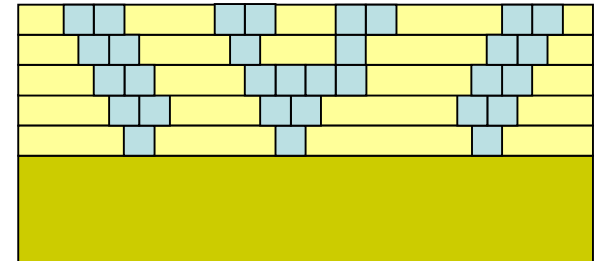
- *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*



# Ионно-лучевая литография



• • •

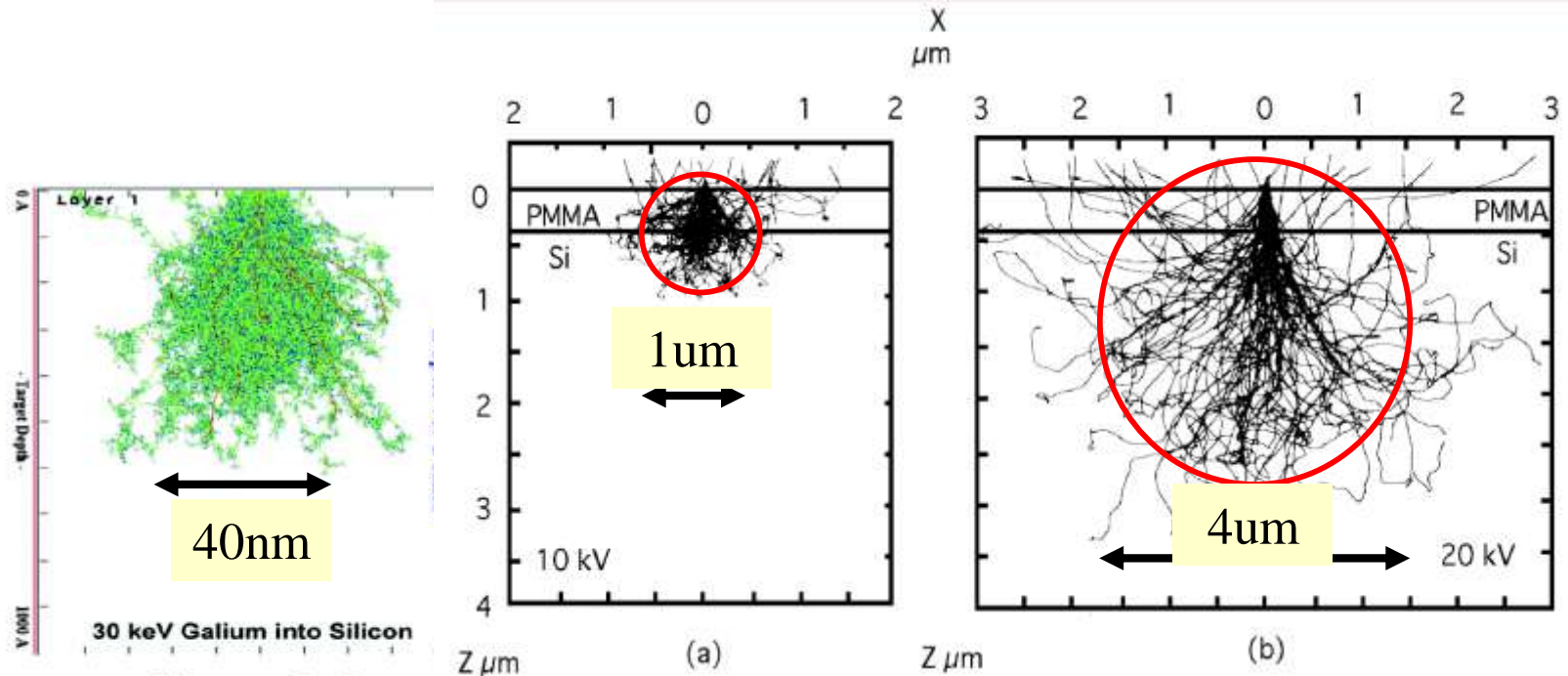


- Нанесение резиста + экспонирование
- Нанесение резиста + экспонирование
- ....
- Проявление (одновременное)

# Преимущества

По сравнению с электронной литографией

- меньше рассеяния пучка в мишени, разрешение лучше
- более компактная зона взаимодействия, выше чувствительность ( $10^3$ )
- возможна стереолитография
- нет эффекта близости
- разрешение не лимитируется пробегом вторичных электронов ( $\sim 10\text{nm}$ )



# Измерение дозового клина

Установка: FEI DUALBEAM  
*(электронный  
и ионный пучки)*

Резист: ПММА

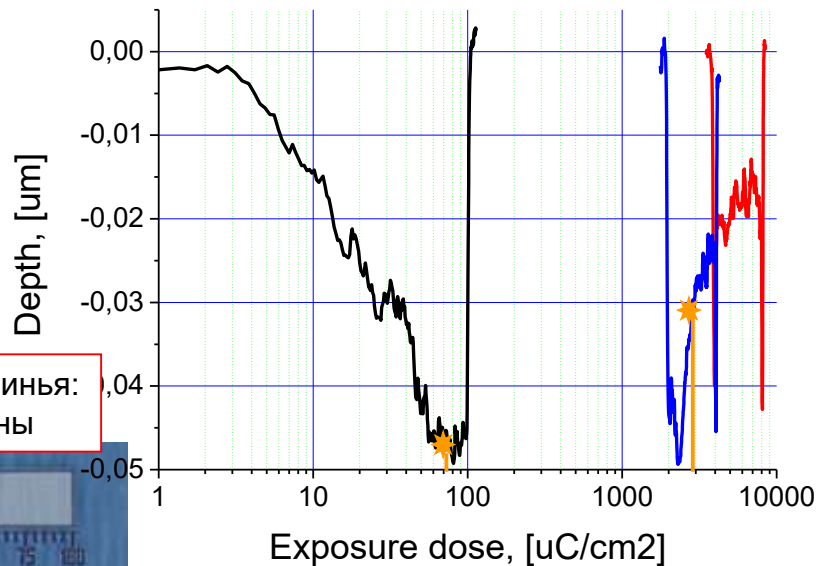
Энергия пучка: 30keV

Ионы: Ga

Профиль  
глубины  
протрава: AFM

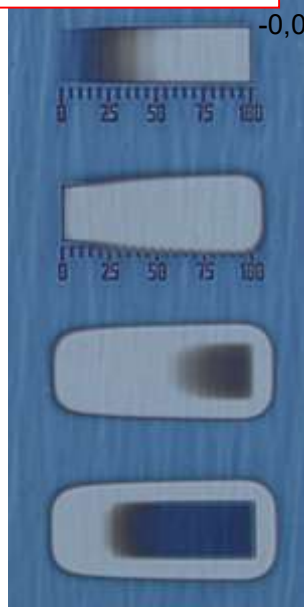


# Чувствительность: Электроны & Ионы

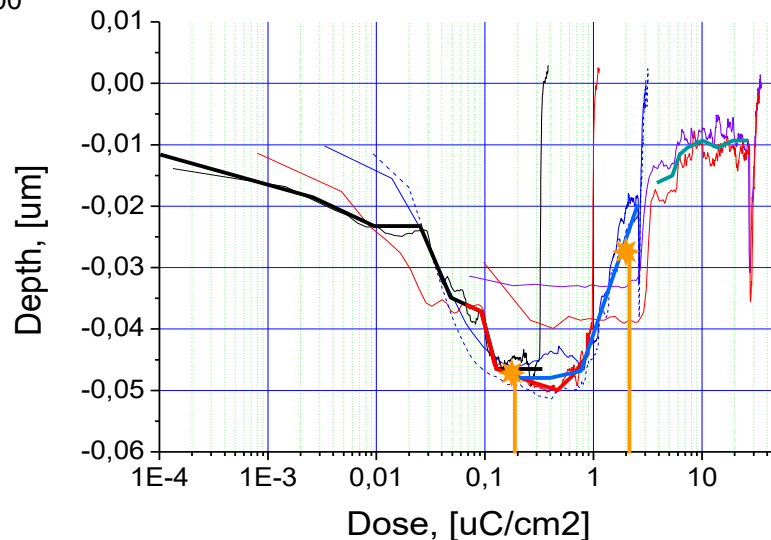


	Позитивная , [uC/cm2]	Негативная , [uC/cm2]	Ratio, Pos/Neg
Электроны (30keV)	150	~5000	33
Ионы (Ga, 30keV)	0.15	2.2	15
Отн, Ион/Электр	1000	2200	

Дозовые клинья:  
электроны



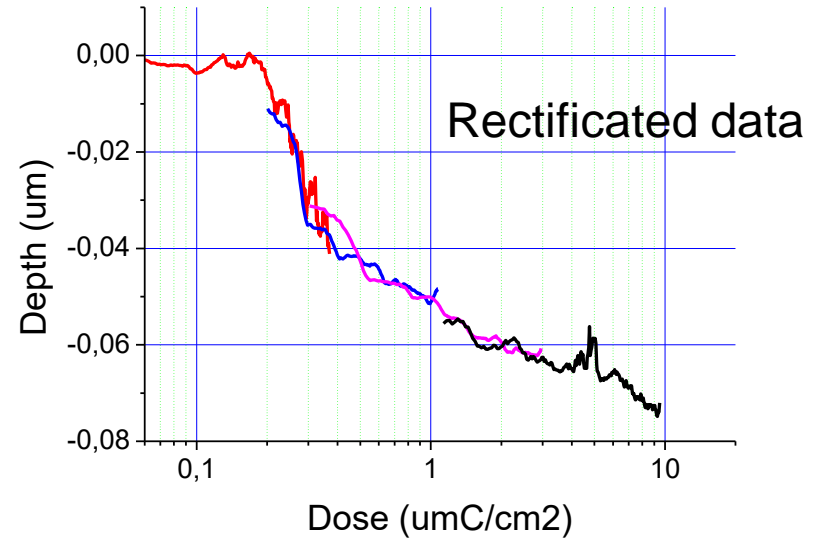
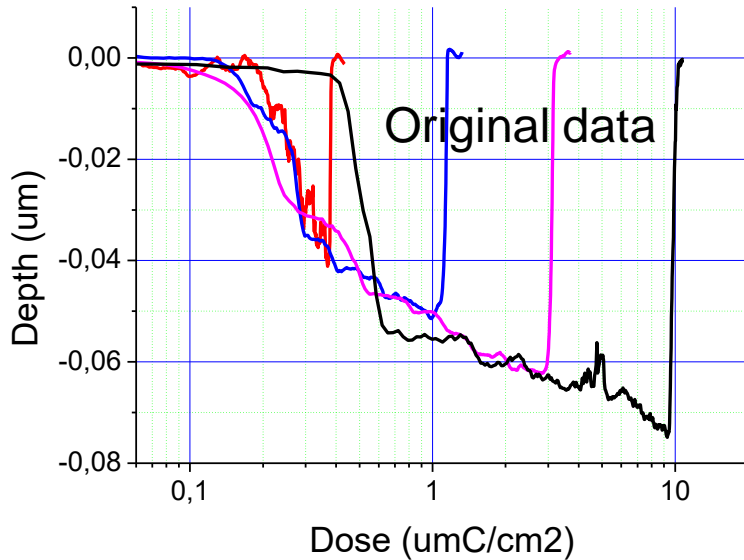
• чувствительность ПММА в  
1000раз выше к ионам (!)



Дозовые клинья: ионы



# Определение Контраста



## Угол наклона $h[\log(D)]$

$$h = h_0 \left( \frac{D}{D^*} \right)^\gamma$$

$$V \sim M^\gamma$$

$$M \sim 1/D$$

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{D}{D_0} \right)^\gamma$$

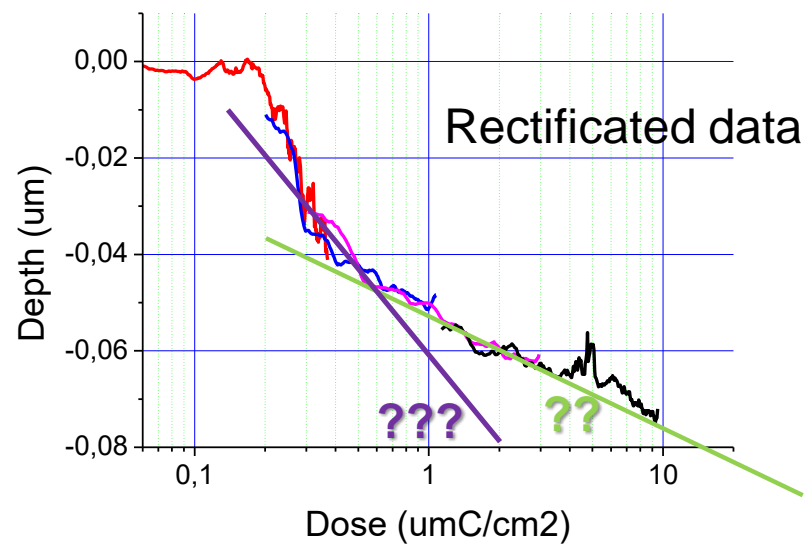
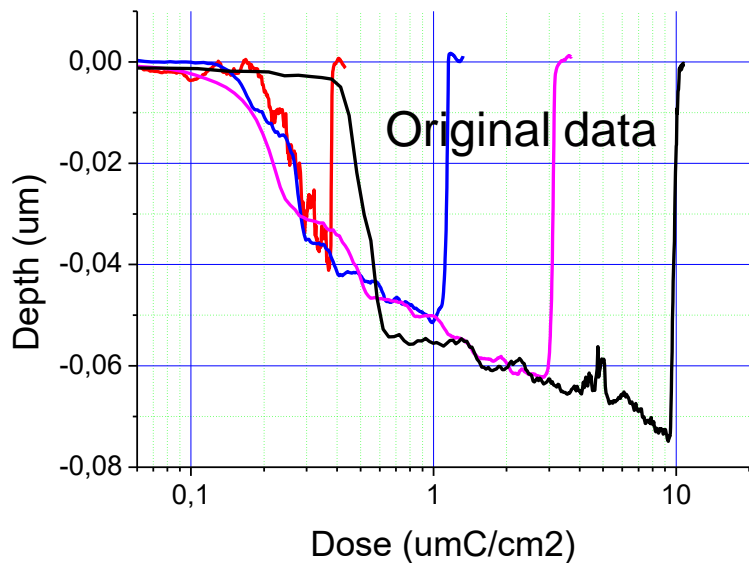
$\gamma$

- Контраст

$h_0$  - толщина резиста

$D^*$  - чувствительность

# Определение Контраста



Скорость растворения зависит от глубины (!)

$\gamma$  - контраст

$$B \approx 0.47 * L\_energy$$

$$C \approx 0.38 * L\_energy$$

$$\varepsilon_{zp}(z) = A \exp\left(-\frac{(z - B)^2}{2C^2}\right)$$

$$V \sim M^\gamma$$

$$M \sim 1/\varepsilon$$

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^\gamma$$

$$\int_0^T dt = \int_0^h \frac{dz}{V} = \frac{1}{V_0} \int_0^h \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^\gamma dz$$

граничное условие

$$h(D = D^*) = h_0$$

$$h = F^{-1} \left[ \left(\frac{D}{D^*}\right)^\gamma F(h_0) \right]$$

$$F(h) = \int_0^h \frac{dz}{\varepsilon_{zp}^\gamma(z)}$$

$D$  – полная поглощенная доза при данной позиции пучка,  
 $D^*$  - чувствительность,  $\varepsilon_{zp}$  - доля энергии, поглощенной на  
глубине  $z$ .

~~$$M \sim 1/D$$~~

$$\varepsilon(z) = \frac{D}{Z} E_b \varepsilon_{zp}(z)$$

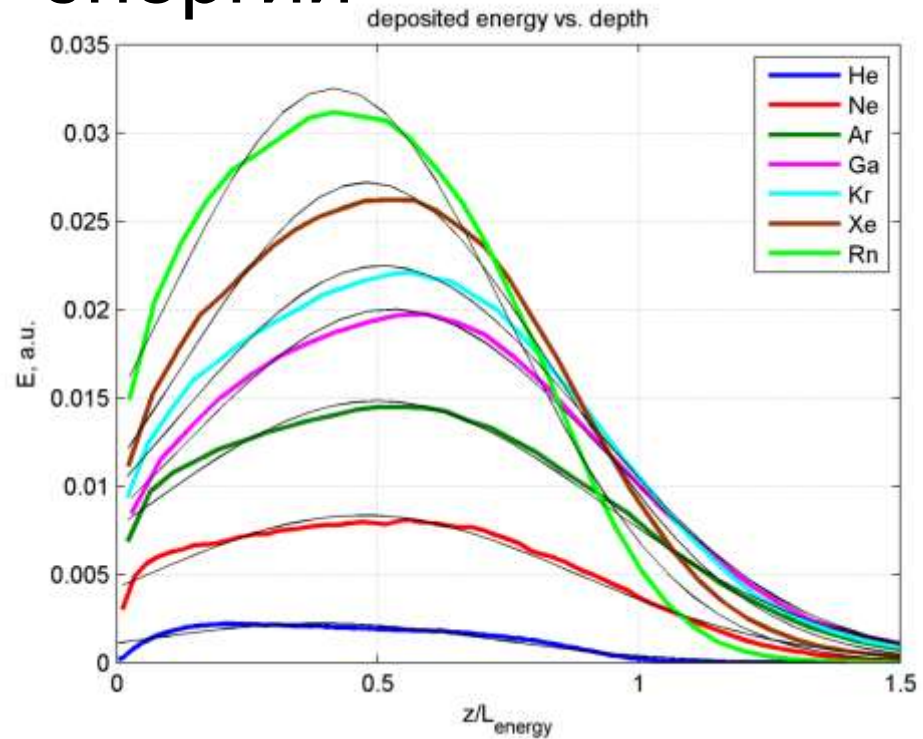


# Распределение по глубине поглощенной энергии

$$\varepsilon_{zp}(z) = A \exp\left(-\frac{(z-B)^2}{2C^2}\right)$$

$$B \approx 0.47 * L\_energy$$

$$C \approx 0.38 * L\_energy$$

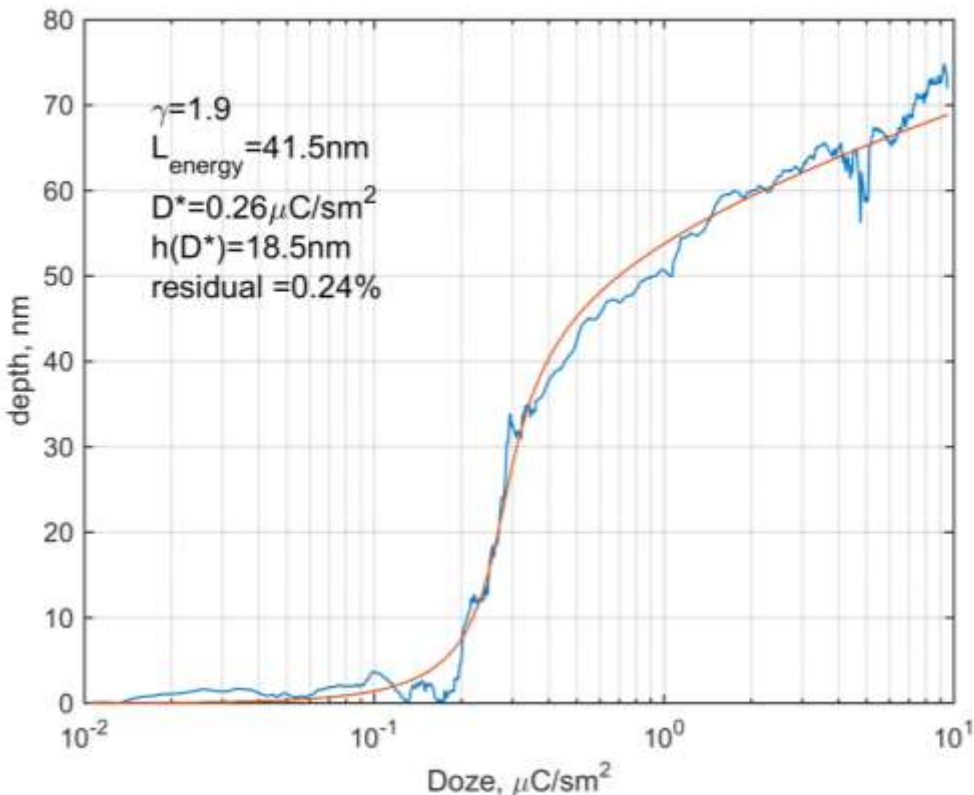
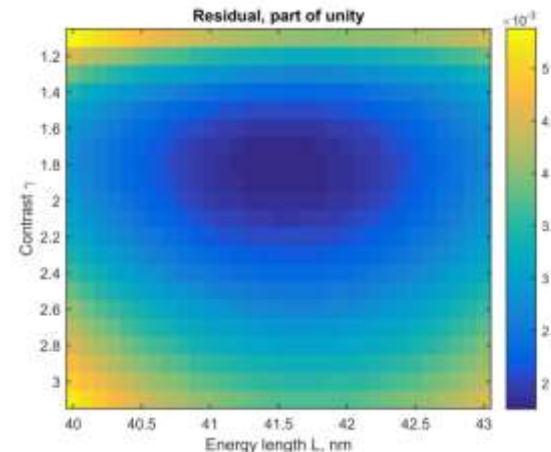


$$F(h) = \frac{\sqrt{2}C}{\sqrt{\gamma}} \left( \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi C \Phi_c(-B/(\sqrt{2}C))}} \right)^\gamma \left[ \Phi_k \left( \frac{\sqrt{\gamma}B}{(\sqrt{2}C)} \right) + \text{sign}(h-B) \Phi_k \left( \frac{\sqrt{\gamma}|h-B|}{(\sqrt{2}C)} \right) \right]$$

$$h = F^{-1} \left[ \left( \frac{D}{D^*} \right)^\gamma F(h_0) \right]$$

# Зависимость глубины протравы от дозы

- Модельная зависимость сравнивалась с измеренной
- Были определены значения контраста и Энергетической длины



	Теория	Эксперимент
Контраст, $\gamma$	NA	1.9
$L_{\text{energy}}$	54nm	42nm

- Предложенная процедура открывает путь (косвенно, через значения энергетической длины и/или через верификацию различных моделей зависимости поглощенной энергии от глубины) к исследованию взаимодействия ионов с атомами резистов

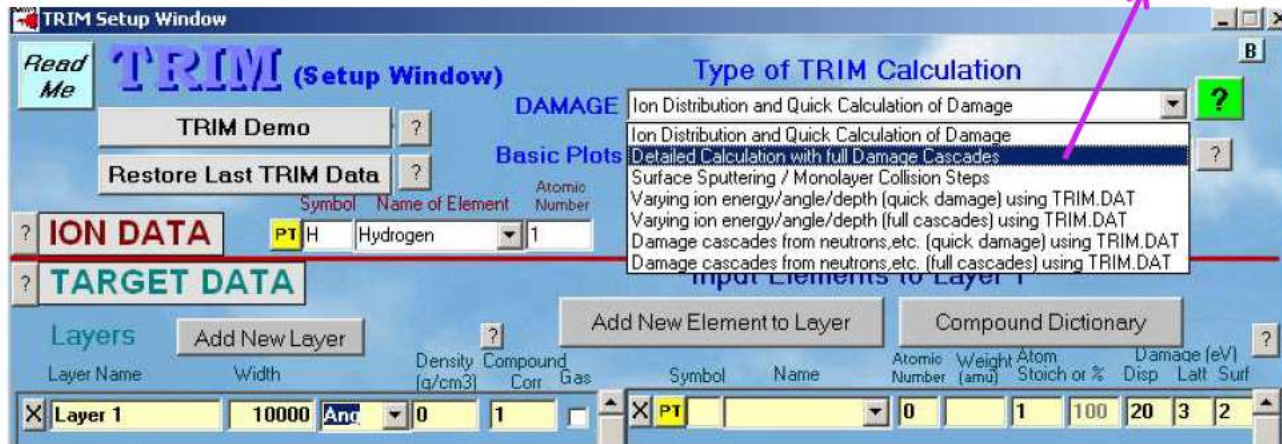
# Выводы:

- Показано, что полностью аналогичных условиях облучения чувствительность резиста примерно на три порядка больше к ионам, чем к электронам.
- Наблюдалось негативное поведение ПММА при облучении его ионами, что означает возможность его использования для трехмерных структур (стереолитографии)
- Предложен подход к определению контраста резистов при экспонировании их ионами, когда поглощенная доза сильно зависит от глубины
- Возможность определять энергетическую длину позволит получать информацию о сечении рассеяния в зависимости от энергии иона  $E$ , его массы  $M$ , массы атомов мишени  $m$ .

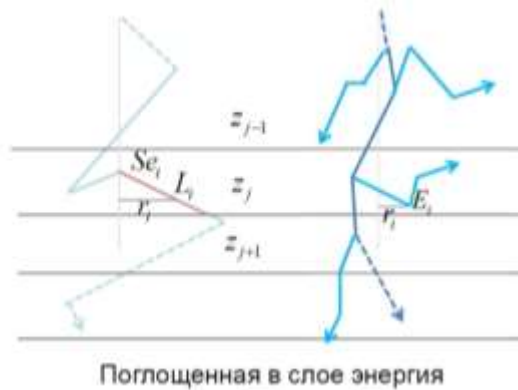
**Спасибо за внимание !**

# Моделирование траекторий с помощью программного пакета TRIM

расчет с учетом каскадов выбиваемых атомов



10000 ионов  
30кэВ



$L_i$  - длина лежащей в слое части пробега

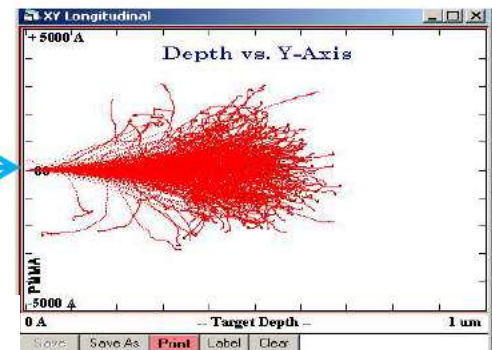
$r_i$  - расстояние от середины лежащей в слое части пробега до оси пучка

Поглощенная в слое энергия

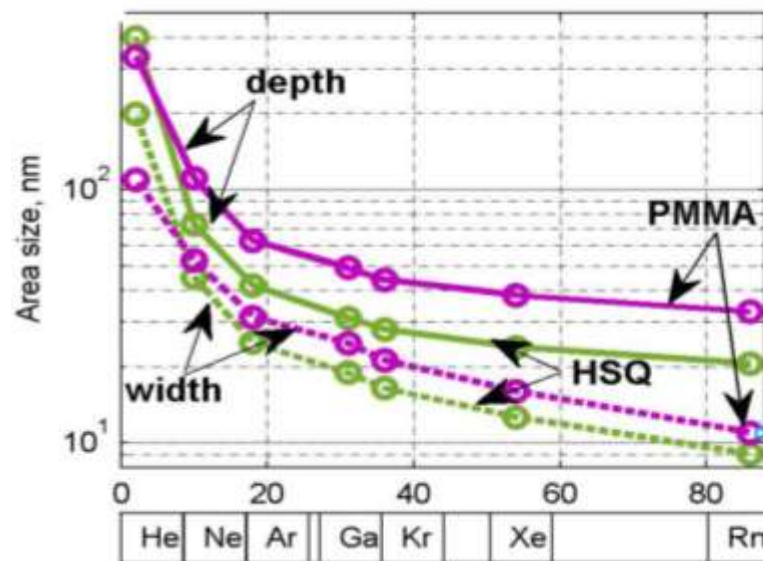
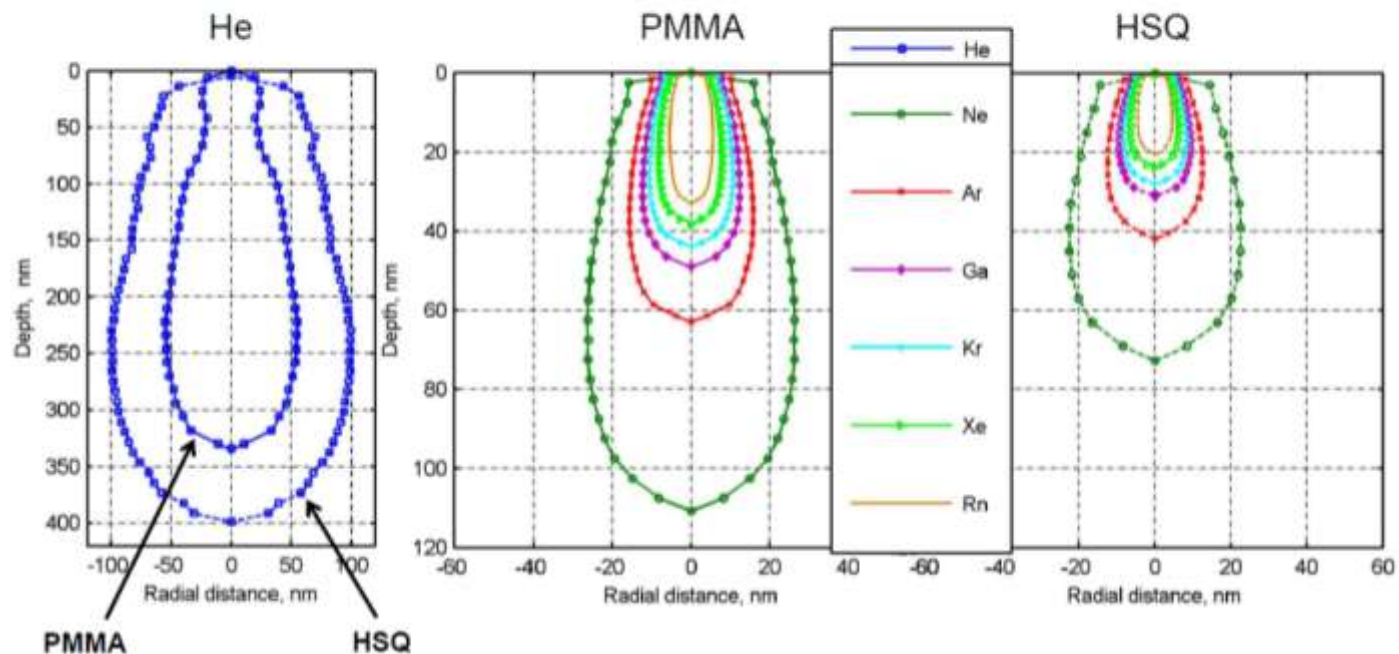
$$E_e(z_j) = \sum_i L_i Se_i + \sum_i E_i$$

Среднее радиальное отклонение

$$\sigma(z_j) = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\sum_i L_i Se_i r_i^2 + \sum_i E_i r_i^2}{\sum_i L_i Se_i + \sum_i E_i}}$$



# Зона модификации в зависимости от атомного номера



11nm for PMMA  
9nm for HSQ

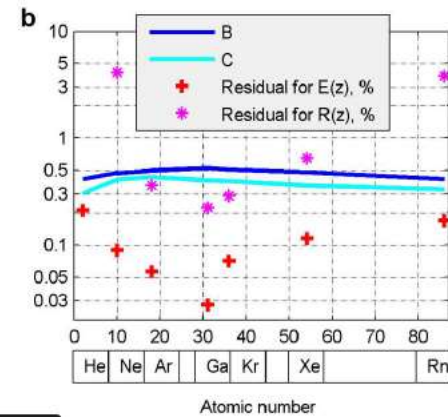
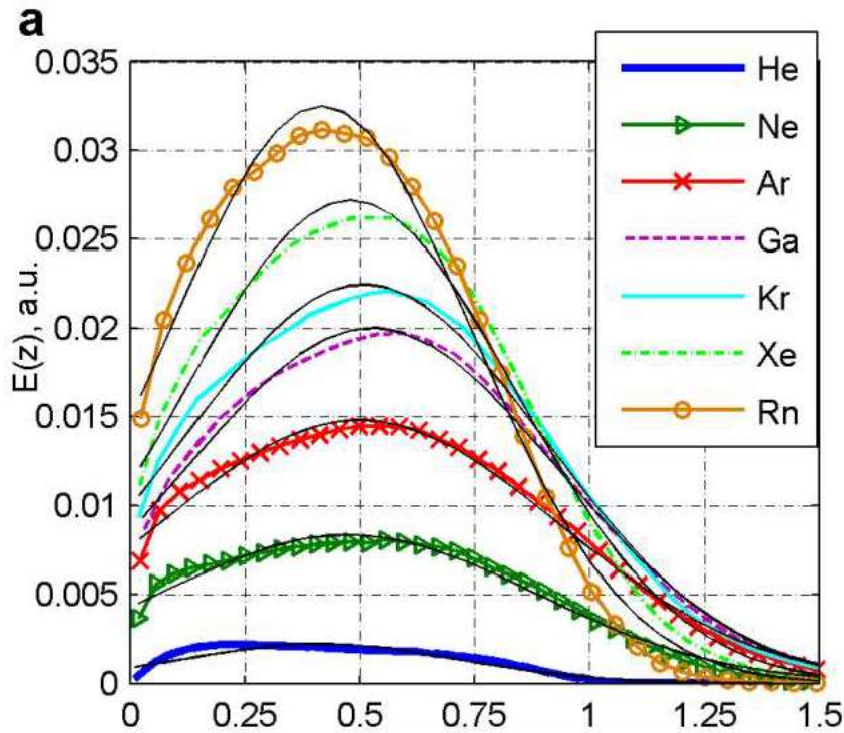


# Аппроксимация плотности поглощенной энергии

$$E_z(z/L_{energy}) = A \exp\left(-\frac{(z/L_{energy} - B)^2}{2C^2}\right)$$

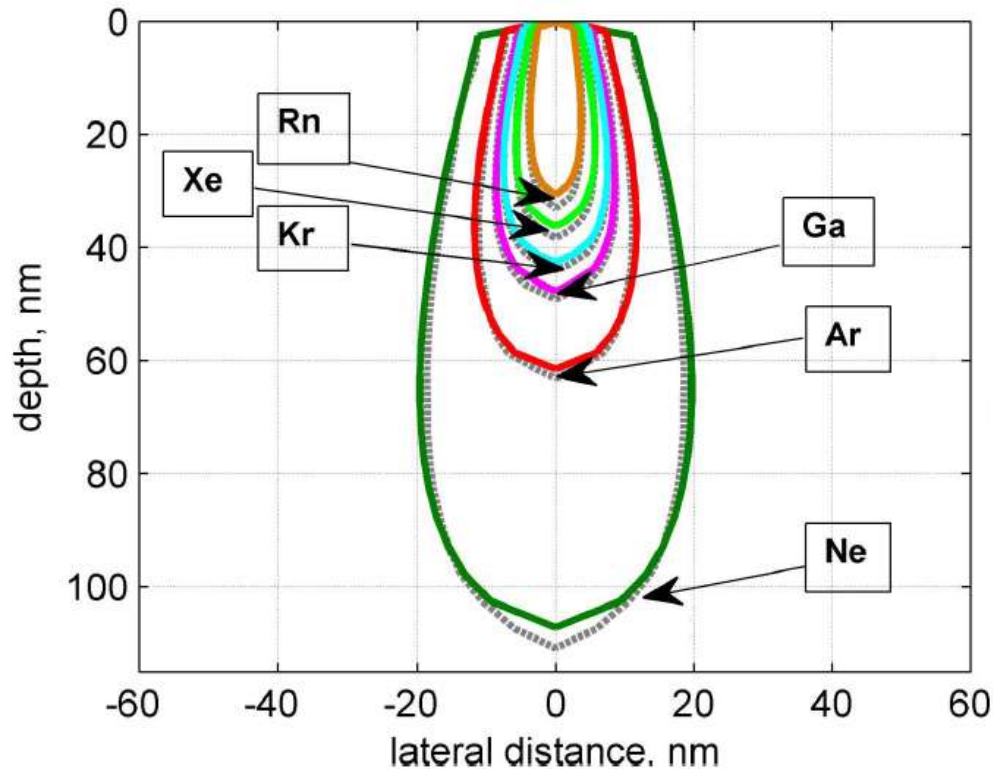
$$B \approx 0.47$$

$$C \approx 0.38$$



# Аппроксимация плотности поглощенной энергии

$$E(r, z) = E_z(z)E_R(r, z) = \frac{A}{2\pi\sigma(z)^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma(z)^2}\right) \exp\left(-\frac{(z/L_{energy} - B)^2}{2C^2}\right)$$



$$B \approx 0.47$$

$$C \approx 0.38$$

$$\sigma(z) \approx 11.6 \sqrt{\frac{M}{M_T}} + z \left( 0.2 - \frac{M}{300M_T} \right)$$



# Характерные значения плотности поглотенной энергии и скорости растворения резиста

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^\gamma \quad \gamma - \text{контраст}$$

$$\varepsilon(z) = A \exp\left(-\frac{(z-B)^2}{2C^2}\right) \quad \int_0^T dt = \int_0^h \frac{dz}{V} = \frac{1}{V_0} \int_0^h \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}\right)^\gamma dz$$

$$B \approx 0.47 * L\_energy$$

$$C \approx 0.38 * L\_energy$$

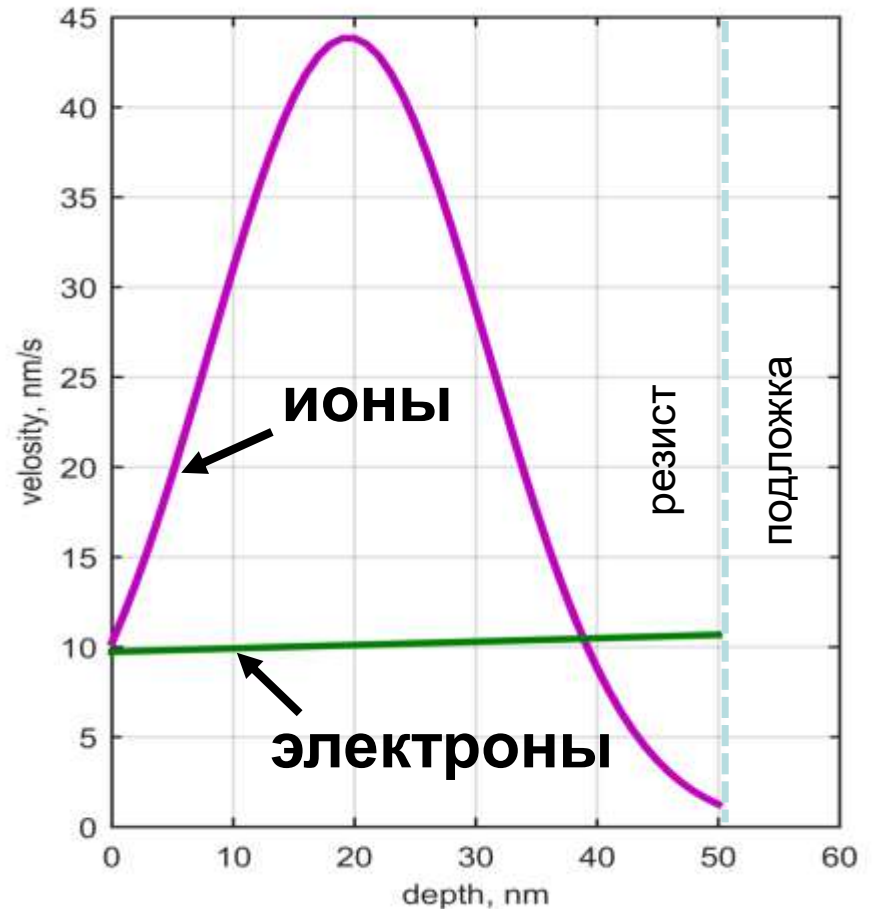
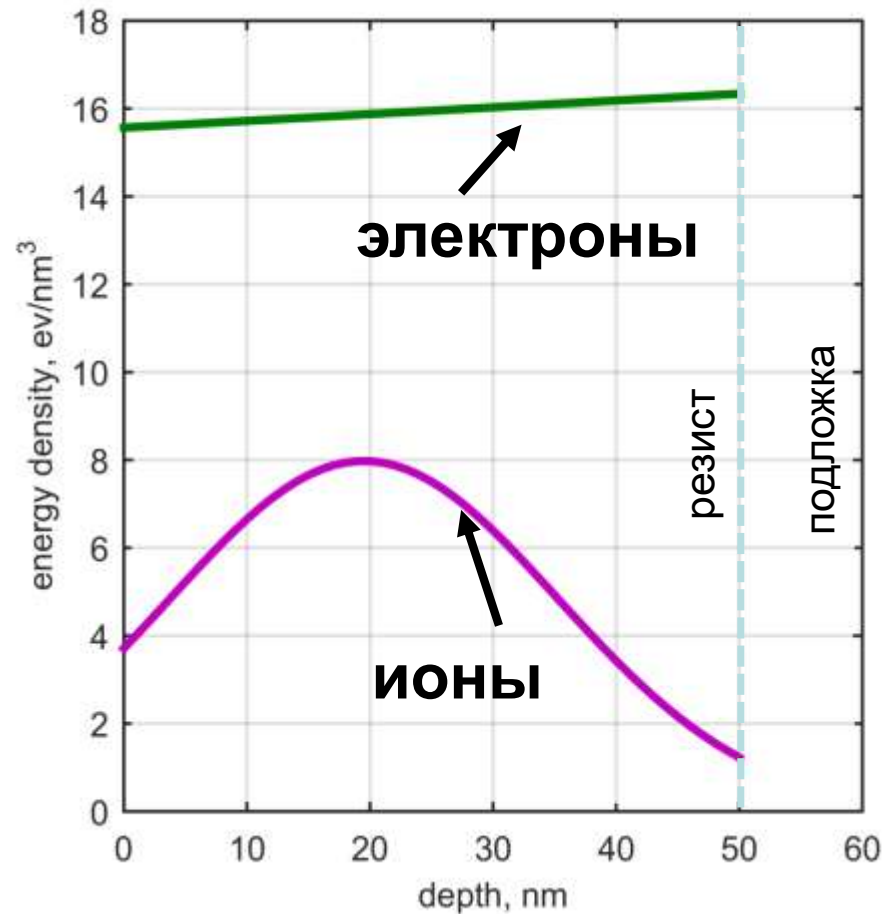
$$\varepsilon(z) = \frac{D}{Z} E_b \varepsilon_{zp}(z) \quad h(D = D^*) = h_0$$

$$V(z) = \frac{F(h_0)}{T} \left( \frac{Z}{D^* E_b} \right)^\gamma \varepsilon^\gamma(z) \quad F(h) = \int_0^h \frac{dz}{\varepsilon_{zp}^\gamma(z)}$$

$D$  – полная поглотенная доза при данной позиции пучка,  
 $D^*$  - чувствительность,  $\varepsilon_{zp}$  - доля энергии, поглотенной на  
 глубине  $z$ .

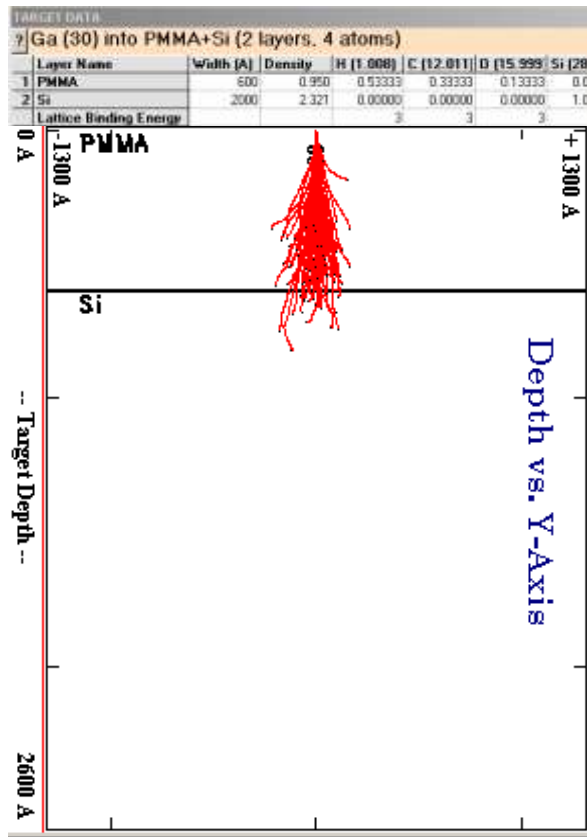
# Распределение по глубине

поглощенной энергии и скорости травления



# Дефектообразование в подложке

Ионы Ga



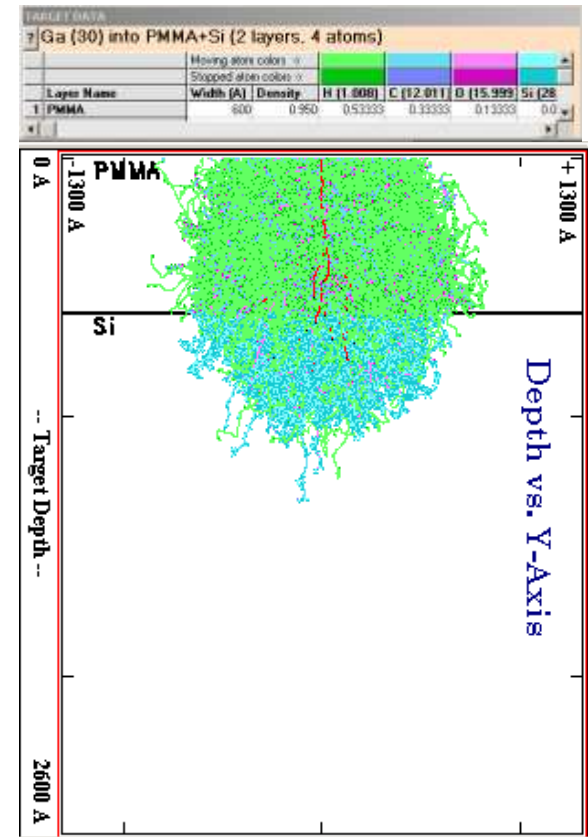
$$n_{Ga} = \frac{Dn_z}{e}$$

$$\varepsilon = \frac{DE_b \varepsilon_z}{eh}$$

$$n_{fr} = \frac{\varepsilon}{E_d}$$

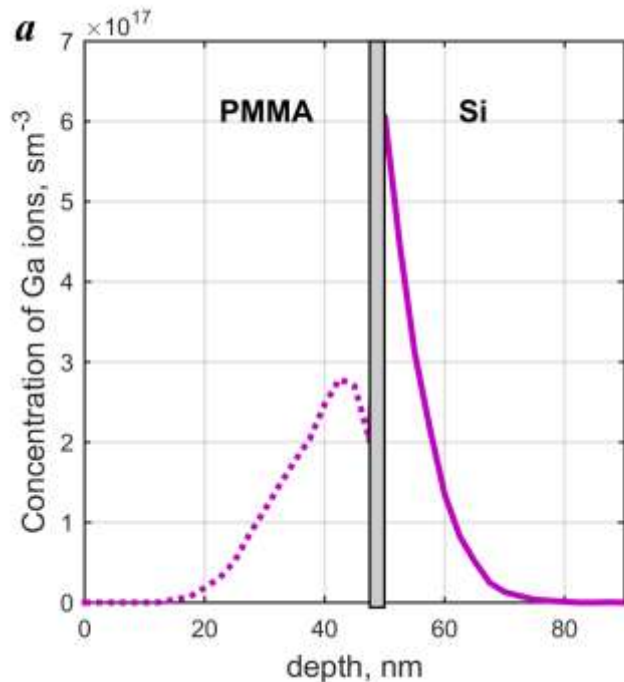
Френкелевские пары

(вакансия-смещенный атом)



# Дефектообразование в подложке

Ионы Ga



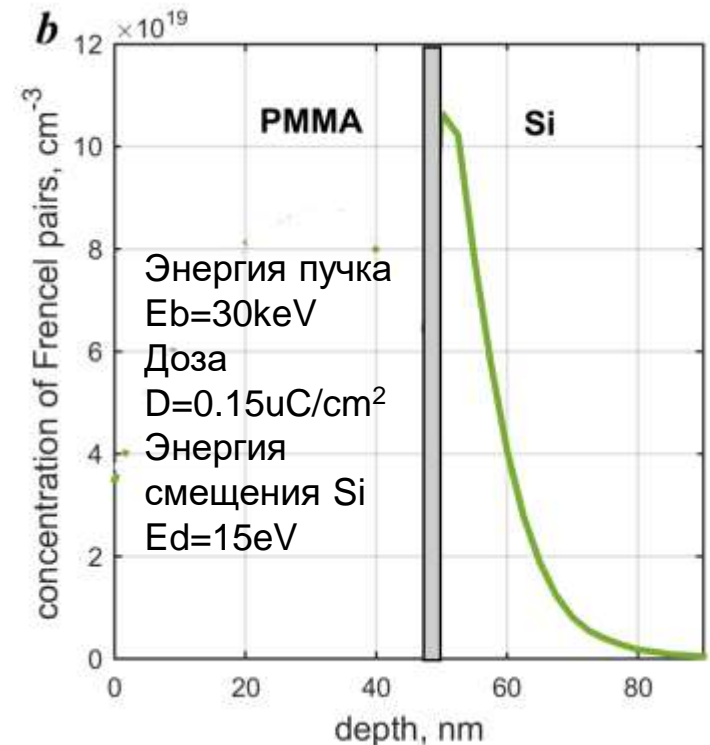
$$n_{Ga} = \frac{Dn_z}{e}$$

$$\varepsilon = \frac{DE_b \varepsilon_z}{eh}$$

$$n_{fr} = \frac{\varepsilon}{E_d}$$

Френкелевские пары

(вакансия-смещенный атом)



концентрация Ga имеет порядок  $10^{17}$ , а френкелевских пар примерно  $10^{20}$ . Обе эти величины на несколько порядков меньше концентрации атомов матрицы (кремния)