

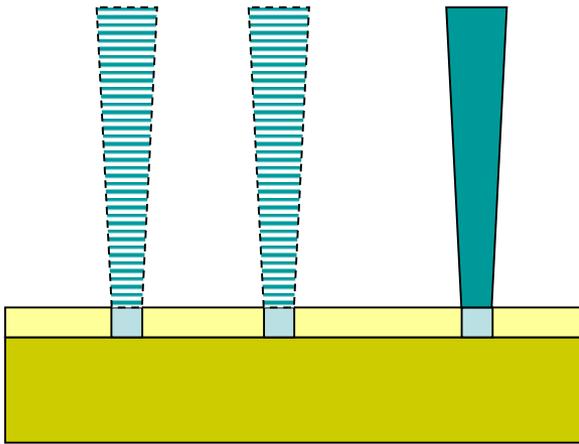
Ионно-лучевая литография: моделирование взаимодействия ионов с органическими резистами

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

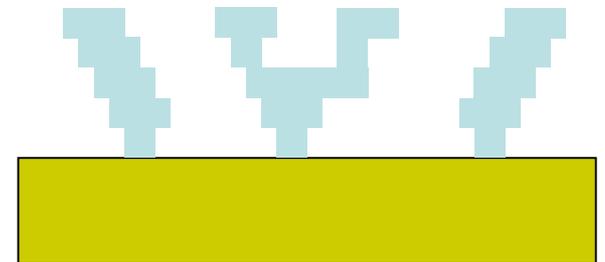
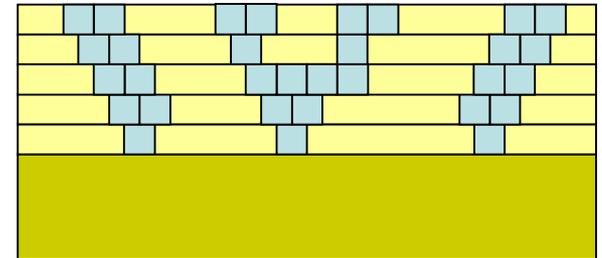
- *Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН*



Ионно-лучевая литография



• • •

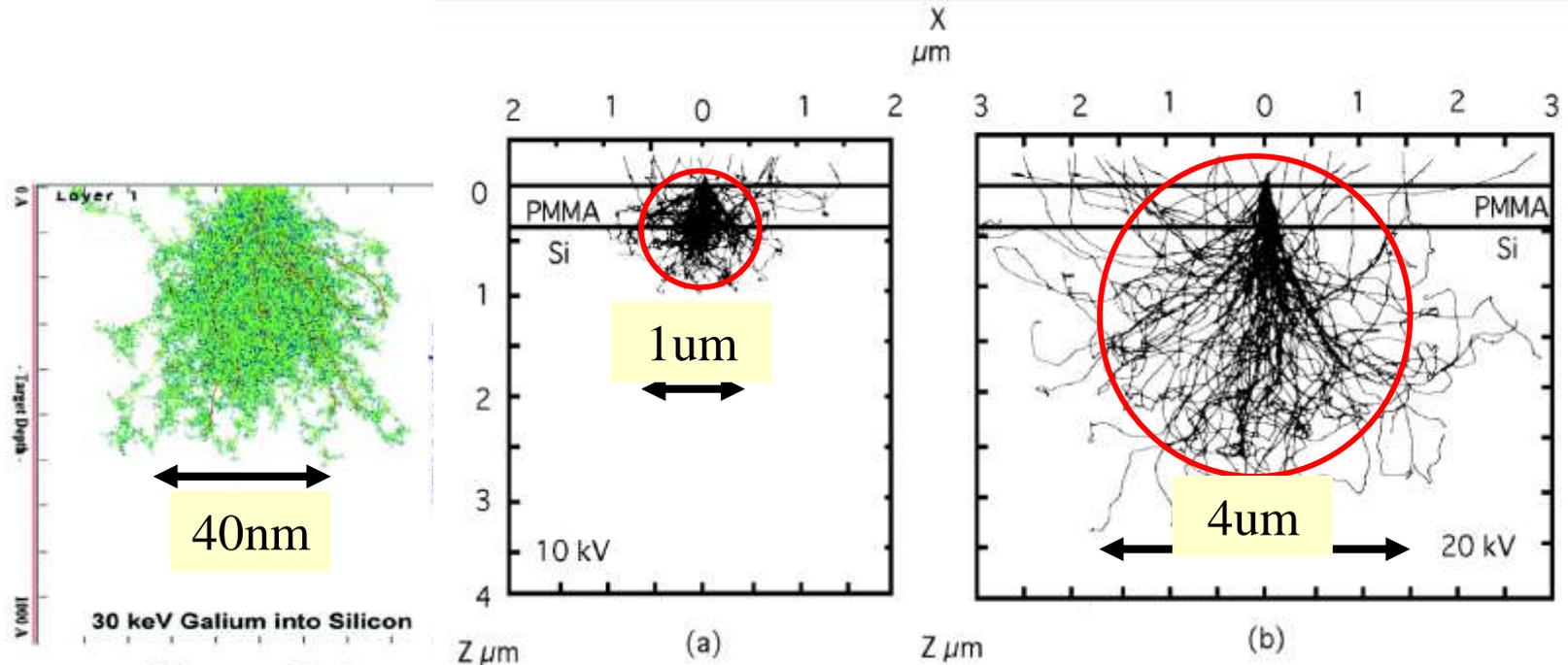


- Нанесение резиста + экспонирование
- Нанесение резиста + экспонирование
-
- Проявление (одновременное)

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 ($\sim 10\text{nm}$)

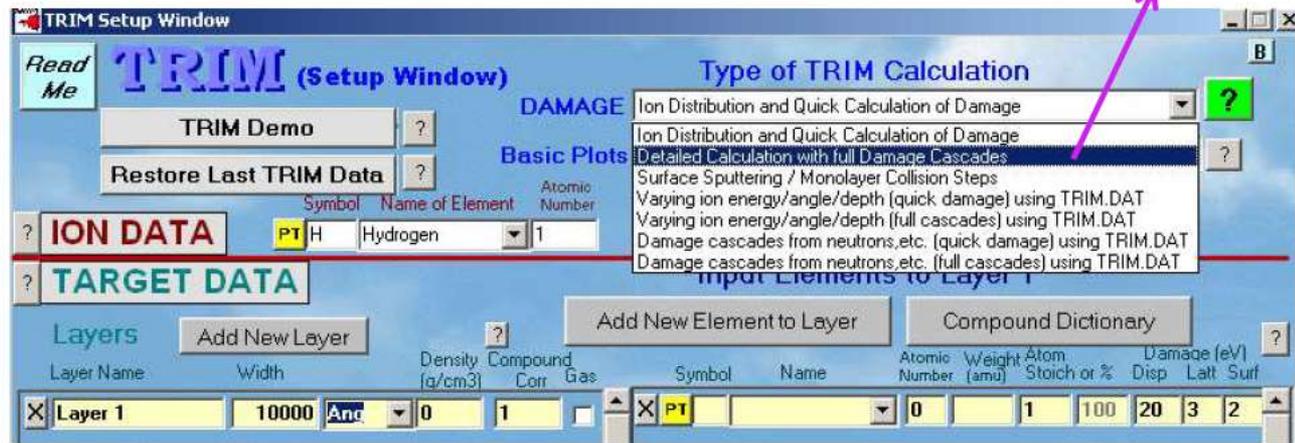


План

- ❖ Моделирование зоны поглощенной энергии для широкого диапазона масс ионов
- ❖ Аналитическое описание распределения поглощенной энергии
- ❖ Сравнение чувствительности резиста ПММА к ионам и электронам
- ❖ Новый подход к определению контраста резиста
- ❖ Характерные значения скорости травления и плотности поглощенной энергии
- ❖ Дефектообразование в подложке

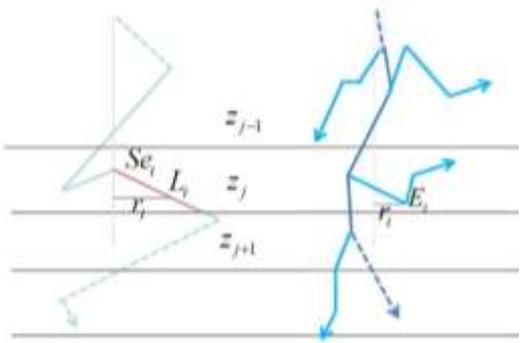
Моделирование траекторий с помощью программного пакета TRIM

расчет с учетом каскадов выбиваемых атомов



10000 ионов
30кэВ

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



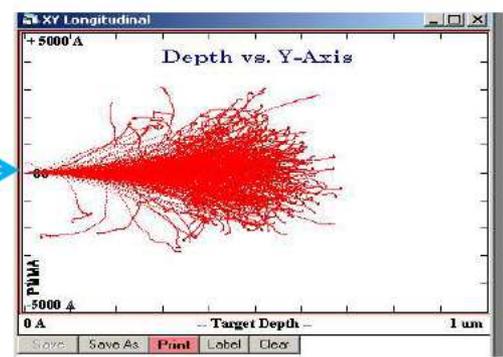
Поглощенная в слое энергия

Поглощенная в слое энергия

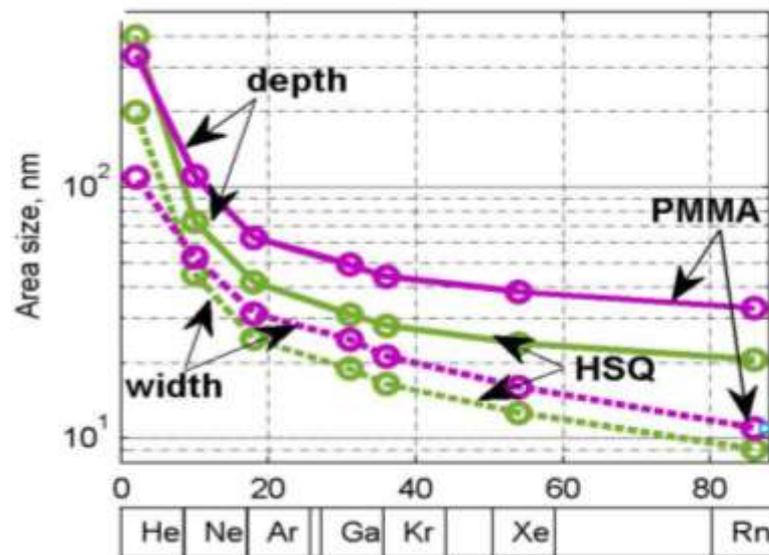
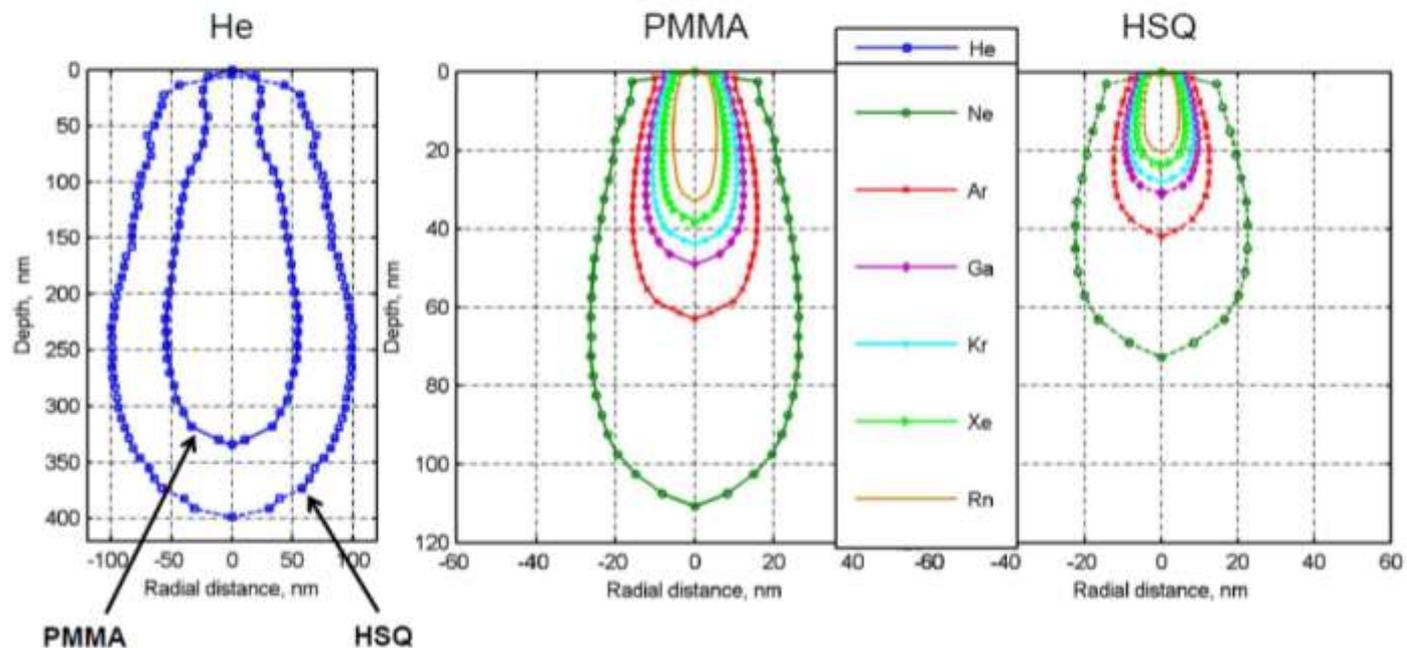
$$E_e(z_j) = \sum_i L_i Se_i + \sum_i E_i$$

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



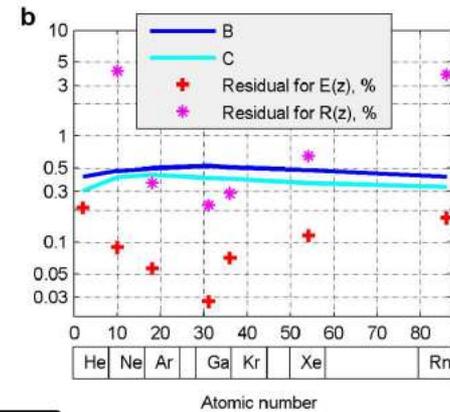
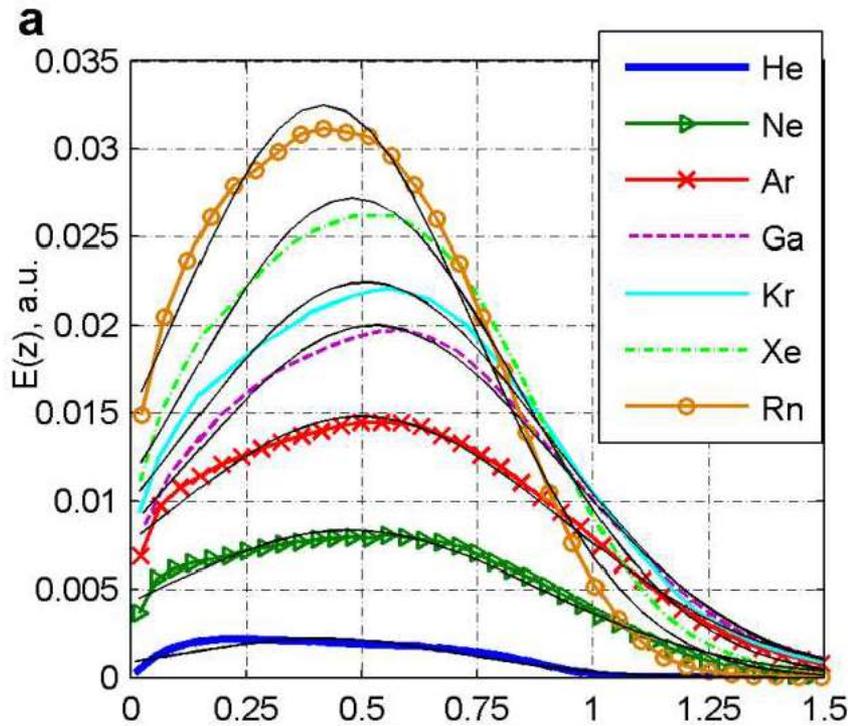
11nm for PMMA
9nm for HSQ

Аппроксимация плотности поглощенной энергии

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

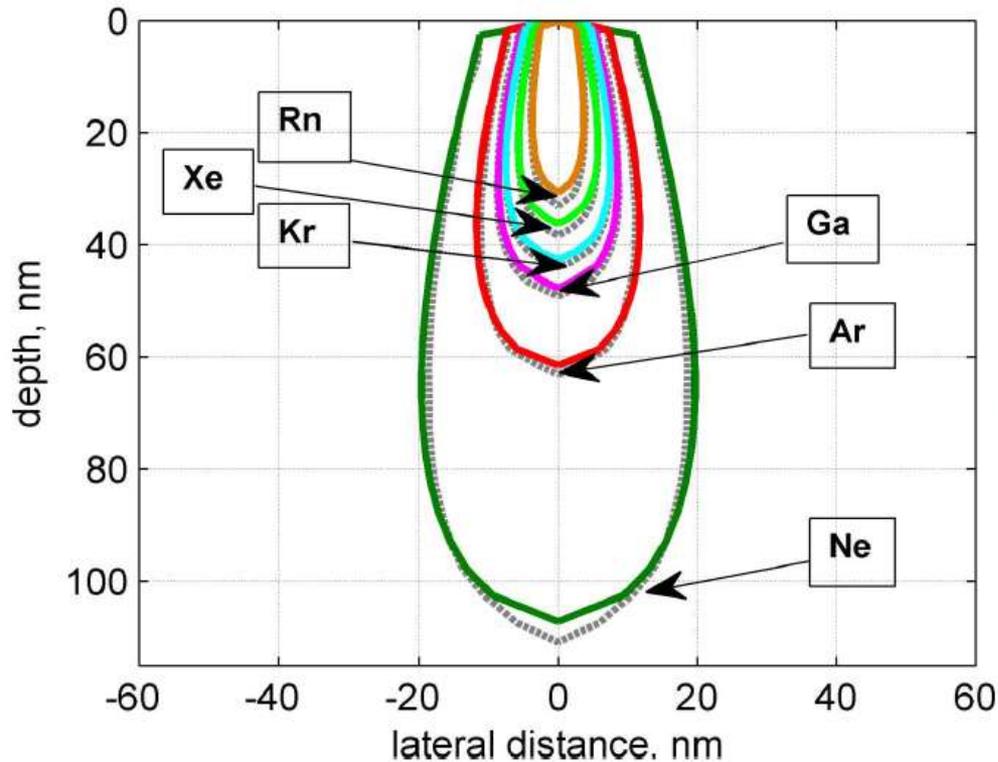
$$B \approx 0.47$$

$$C \approx 0.38$$



Аппроксимация плотности поглощенной энергии

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



$$B \approx 0.47$$

$$C \approx 0.38$$

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

Измерение дозового клина

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

Резист: ПММА

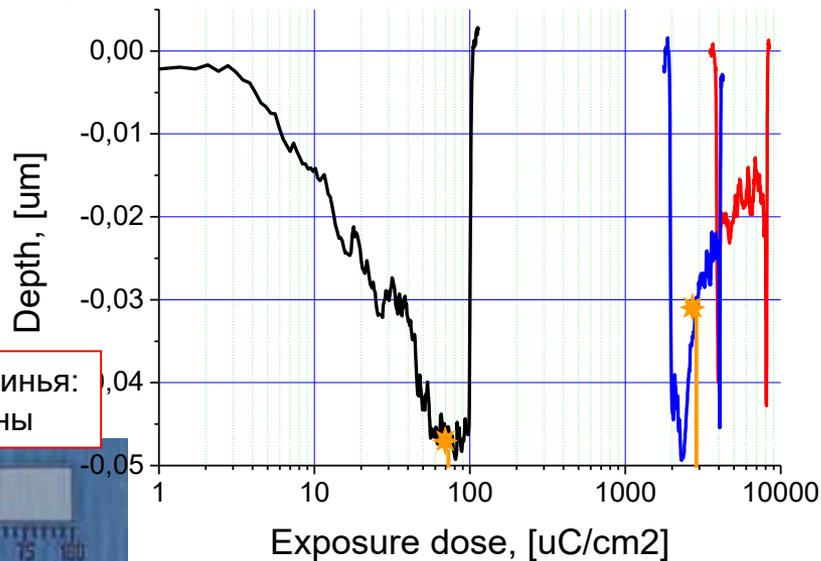
Энергия пучка: 30keV

Ионы: Ga

Профиль
глубины
протрава: AFM

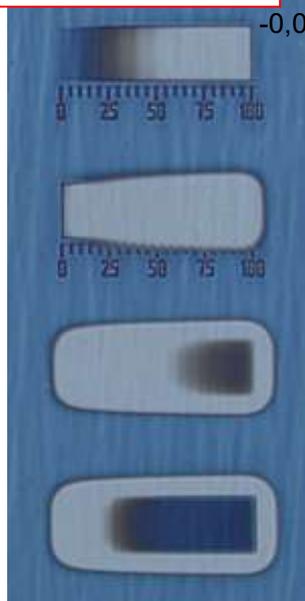


Чувствительность: Электроны & Ионы

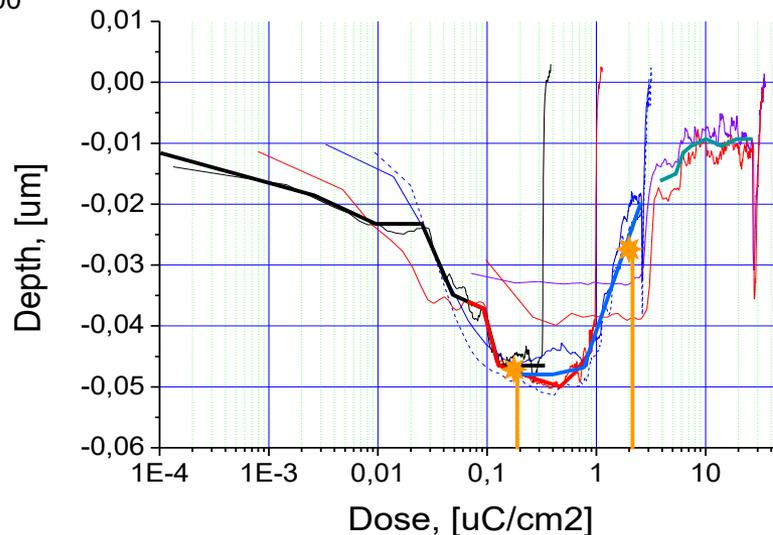


	Позитивная , [uC/cm2]	Негативная , [uC/cm2]	Ratio, Pos/Neg
Электроны (30keV)	150	~5000	33
Ионы (Ga, 30keV)	0.15	2.2	15
Отн, Ион/Электр	1000	2200	

Дозовые клинья:
электроны



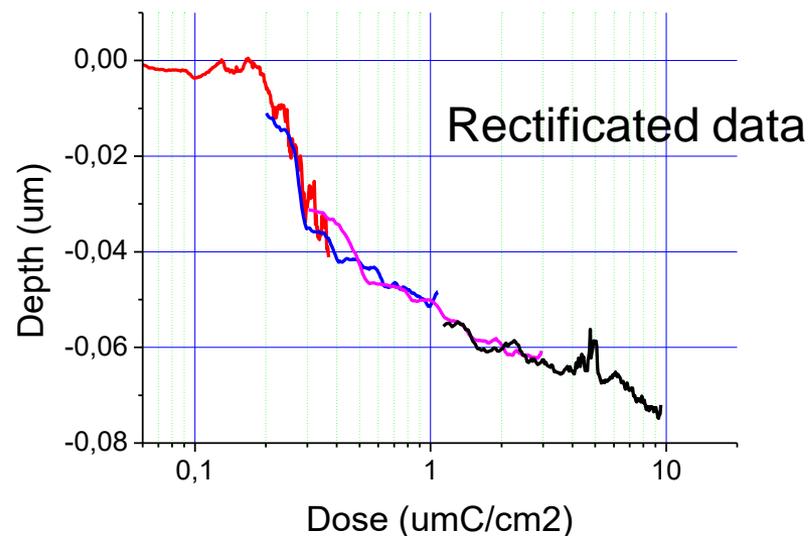
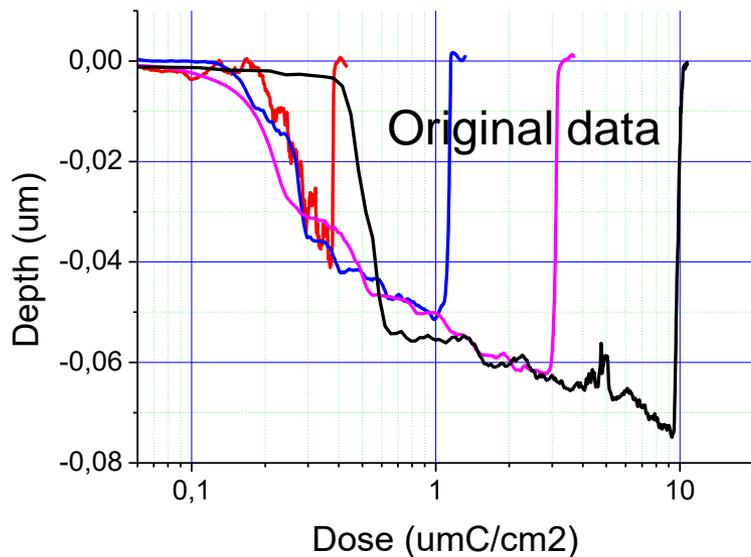
• чувствительность ПММА в
1000раз выше к ионам (!)



Дозовые клинья: ионы



Определение Контраста



Угол наклона $h[\log(D)]$

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

$$V \sim M^\gamma$$

$$M \sim 1/D$$

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

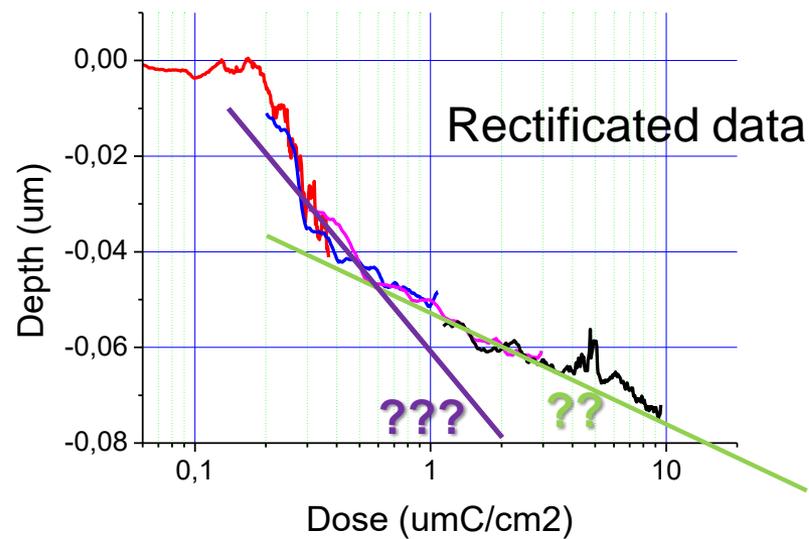
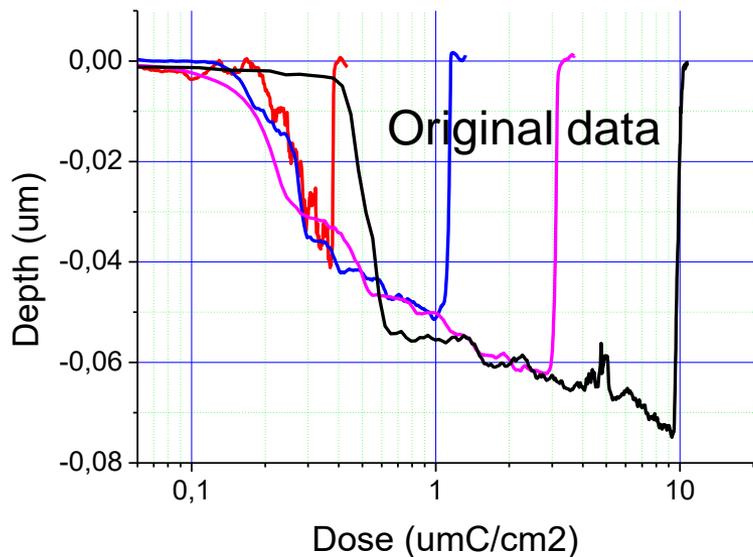
γ

- Контраст

h_0 - толщина резиста

D^* - чувствительность

Определение Контраста



Скорость растворения зависит от глубины (!)

γ - 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, ε_{zp} - доля энергии, поглощенной на
глубине z .

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

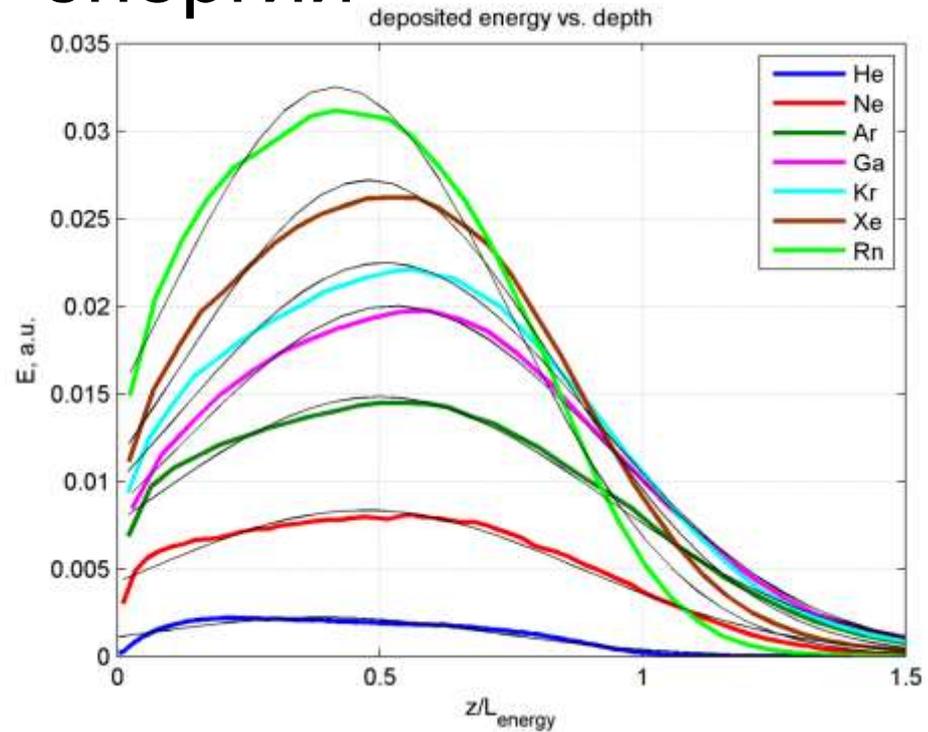
$$\varepsilon(z) = \frac{D}{Z} E_b \varepsilon_{zp}(z)$$

Распределение по глубине поглощенной энергии

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

$$B \approx 0.47 * L_energy$$

$$C \approx 0.38 * L_energy$$

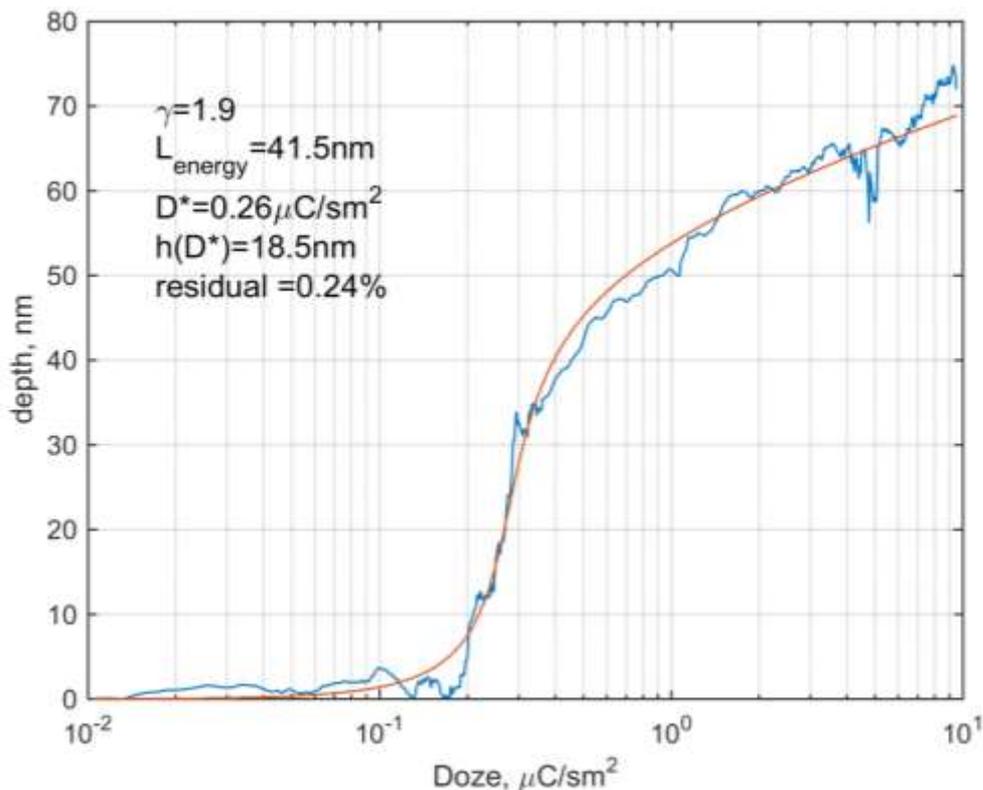
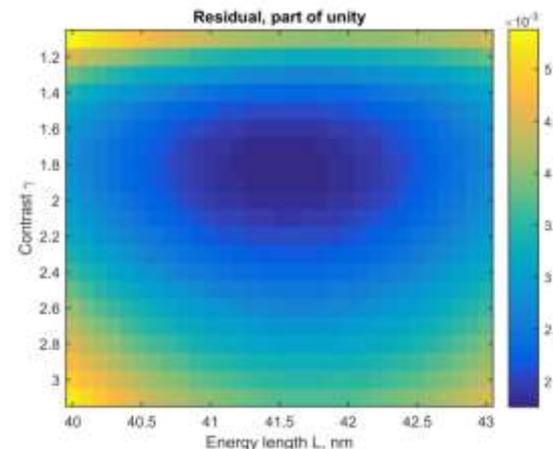


$$F(h) = \frac{\sqrt{2}C}{\sqrt{\gamma}} \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi C \Phi_c(-B/(\sqrt{2}C))}} \right)^\gamma \left[\Phi_k \left(\frac{\sqrt{\gamma}B}{(\sqrt{2}C)} \right) + \text{sign}(h-B) \Phi_k \left(\frac{\sqrt{\gamma}|h-B|}{(\sqrt{2}C)} \right) \right]$$

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

Зависимость глубины протравы от дозы

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



	Теория	Эксперимент
Контраст, γ	NA	1.9
L_{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

Характерные значения плотности поглотенной энергии и скорости растворения резиста

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

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

$$B \approx 0.47 * L_energy$$

$$C \approx 0.38 * L_energy$$

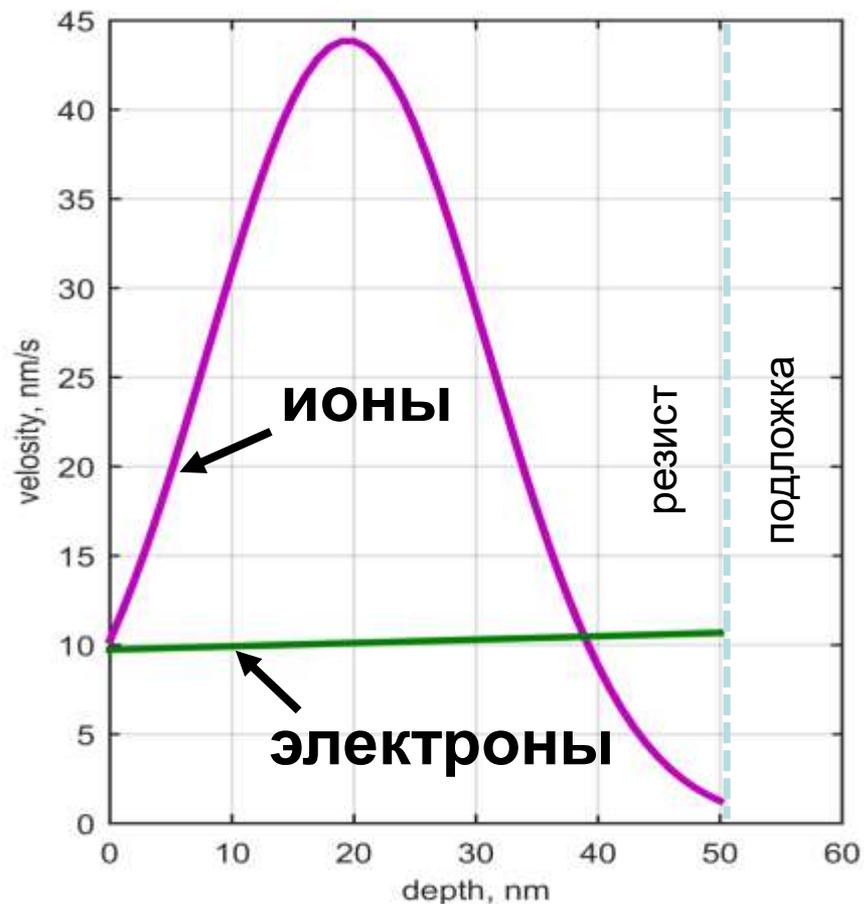
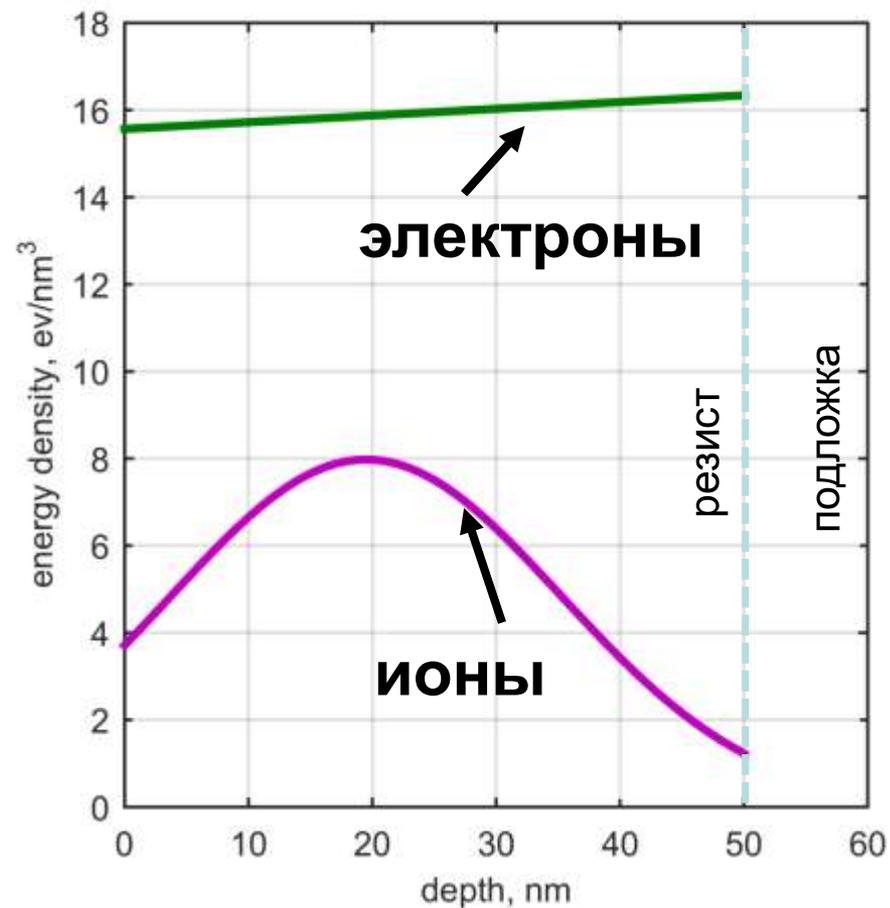
$$\varepsilon(z) = \frac{D}{Z} E_b \varepsilon_{zp}(z) \quad h(D = D^*) = h_0$$

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

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

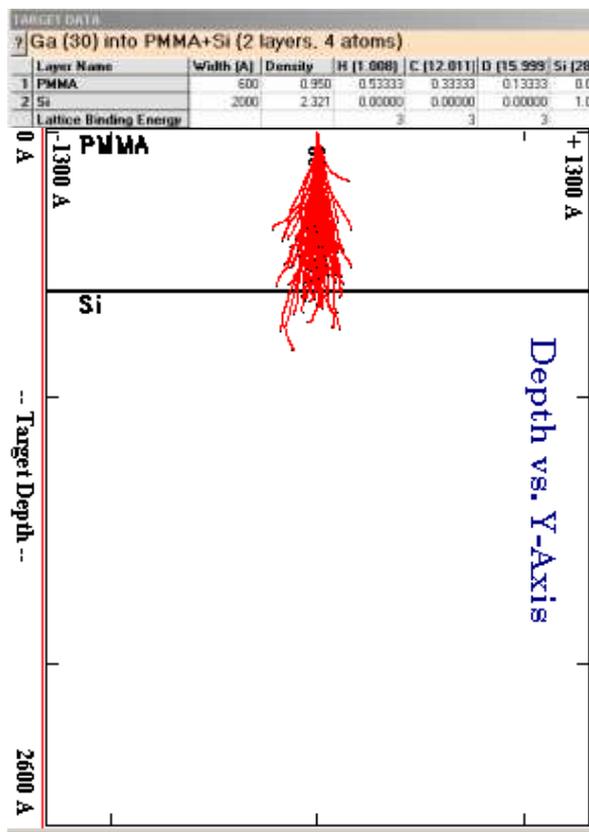
Распределение по глубине

поглощенной энергии и скорости травления



Дефектообразование в подложке

Ионы Ga



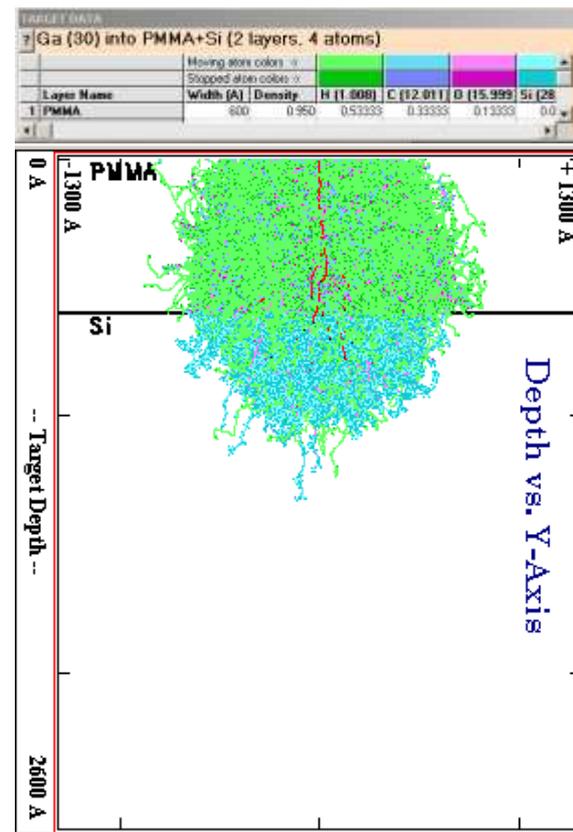
$$n_{Ga} = \frac{Dn_z}{e}$$

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

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

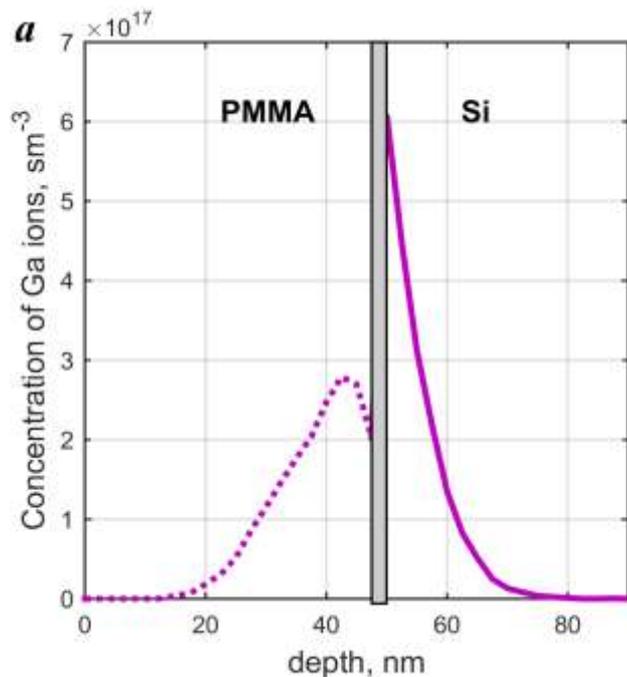
Френкелевские пары

(вакансия-смещенный атом)



Дефектообразование в подложке

Ионы Ga



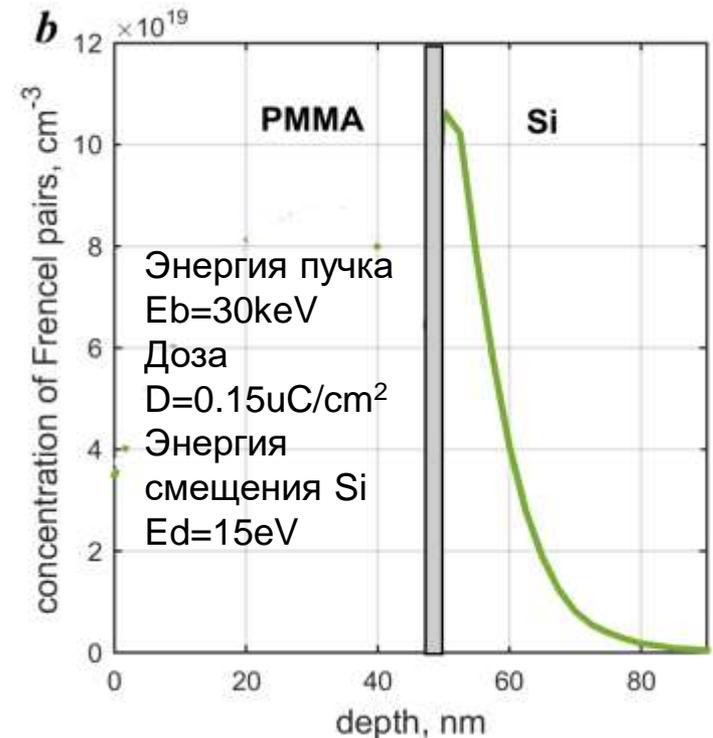
$$n_{Ga} = \frac{Dn_z}{e}$$

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

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

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)

Выводы:

- Проведено моделирование области поглощенной энергии для ряда ионов (He, Ne, Ar, Ga, Kr, Xe и Rn) и двух типов резистов (PMMA и HSQ). Исследованы размеры области модификации свойств резистов от энергии и массы ионов.
- Показано, что в случае использования тяжелых ионов поперечный размер области может составлять менее десяти нанометров.
- Для распределения поглощенной энергии в резисте предложено аналитическое описание в виде произведения двух гауссовых функций. Ширины и центры этих гауссовых функций определяются энергетической длиной и отношением массы иона к (средней) массе атомов резиста.
- Полученное описание распределения поглощенной энергии позволит делать оценки размеров области модификации для любых типов ионов с энергией десятки кэВ и легких резистов, а значит, может использоваться для априорных оценок разрешения и производительности, а также выбора пар ион-резист и энергий ионного пучка.

Выводы:

- 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 .
- Показано, что при дозе облучения равной чувствительности резиста в ионной и электронной литографии значения объемной плотности поглощенной энергии имеют один порядок величины. Однако им соответствует примерно в три раза большая скорость растворения резиста при экспонировании ионами, чем электронами. Это может означать большую эффективность механизма взаимодействия ионов с резистом с точки зрения числа разрываемых связей в полимерных цепях, чем электронов.
- При экспонировании ПММА ионами Ga с энергией 30кэВ и дозой 0.15uC/cm^2 , достаточной для растворения слоя 50нм, концентрация Ga в подложке имеет порядок 10^{17} , а френкелевских пар примерно 10^{20} . Обе эти величины на несколько порядков меньше концентрации атомов матрицы (кремния).

Спасибо за внимание !