



**ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ
ИОНОВ ФОСФОРА НА
СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ
МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ**

Цель работы

Исследование структурных изменений в приповерхностных слоях монокристаллов Si после имплантации ионов фосфора.

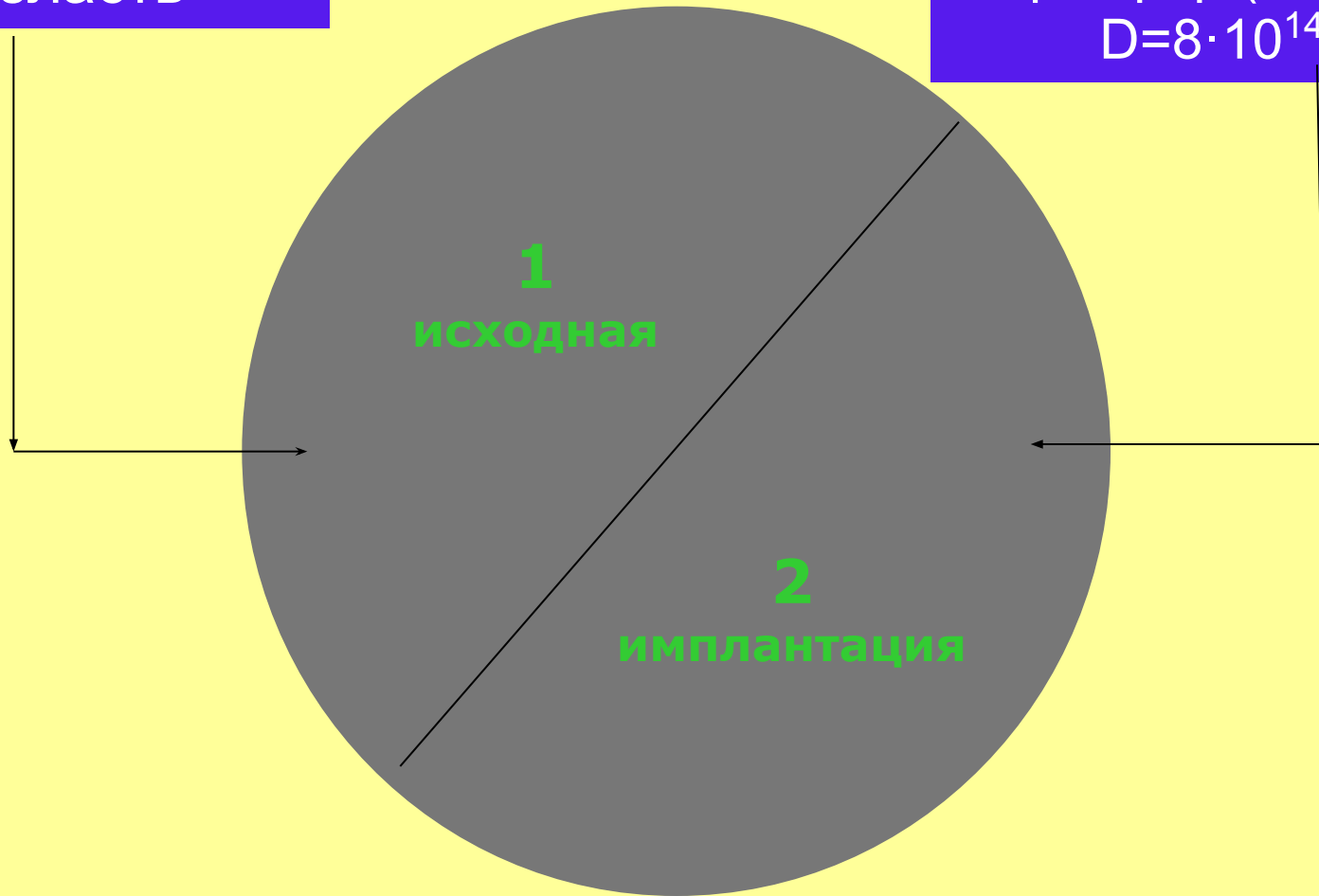
Энергия имплантированных ионов -
 $E=180$ кэВ, доза - $D=8 \cdot 10^{14}$ см⁻²

Для реализации цели:

- Использовано методы рентгеновской топографии и двухкристального спектрометра;
- Использовано численные методы решения системы дифференциальных уравнений, описывающие процессы рассеяния рентгеновских лучей в искаженных кристаллах

Исходная
область

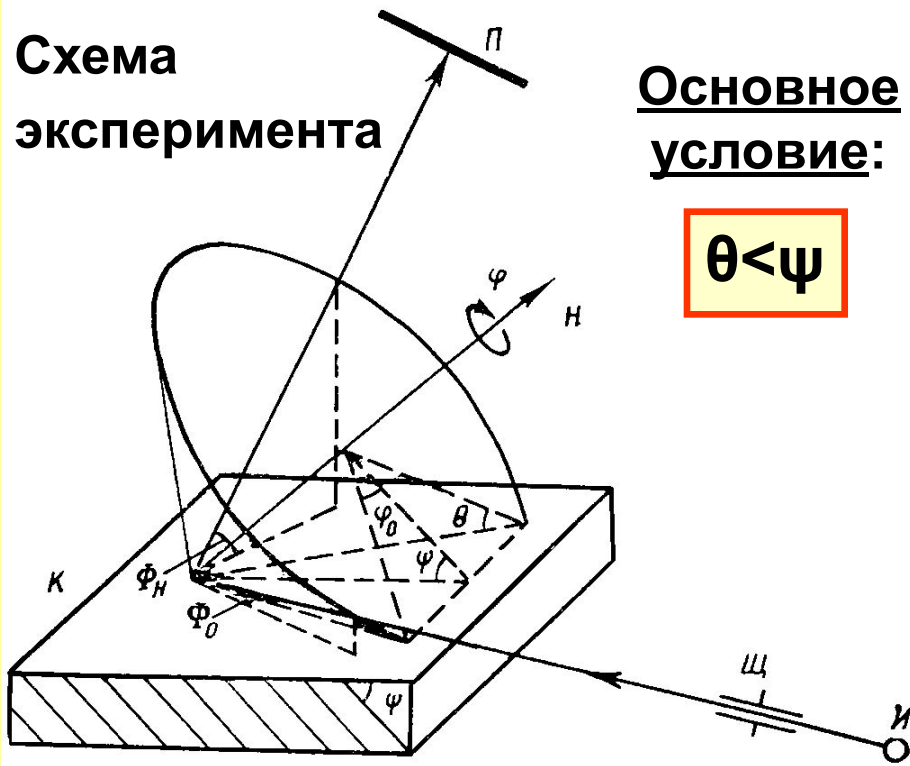
Ионная имплантация:
фосфор ($E=180\text{keV}$,
 $D=8 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-2}$)



Образец кремния схематично

КОСОНЕСИММЕТРИЧНАЯ ДИФРАКЦИИ В ГЕОМЕТРИИ НА ОТРАЖЕНИЕ

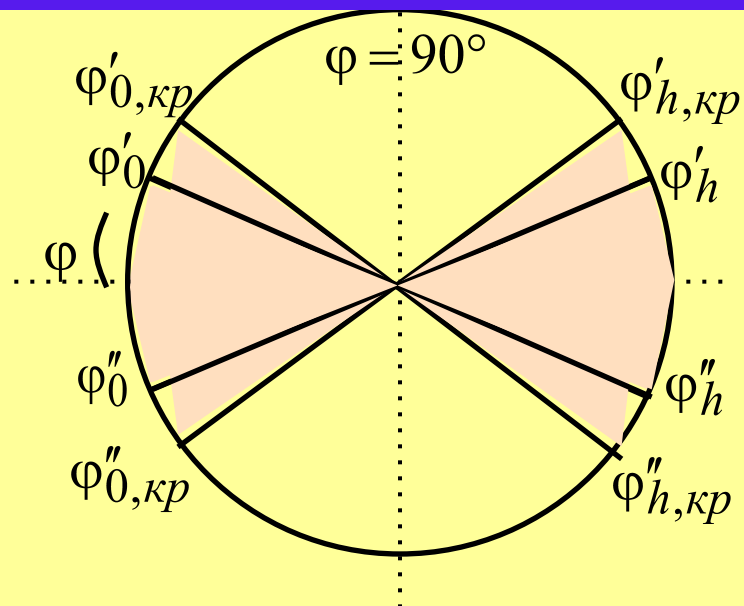
Схема
эксперимента



Основное
условие:

$$\theta < \psi$$

Схематическое представление
особенный значений азимутального
угла поворота ϕ
при повороте кристалла вокруг
вектора дифракции



И – источник рентг. излучения
Щ – щель
П – пленка
К – кристалл

$$\gamma_0 = \sin \Phi_0 = -\cos \theta \cos \varphi \sin \psi + \sin \theta \cos \psi$$

$$\gamma_h = \sin \Phi_h = -\cos \theta \cos \varphi \sin \psi - \sin \theta \cos \psi$$

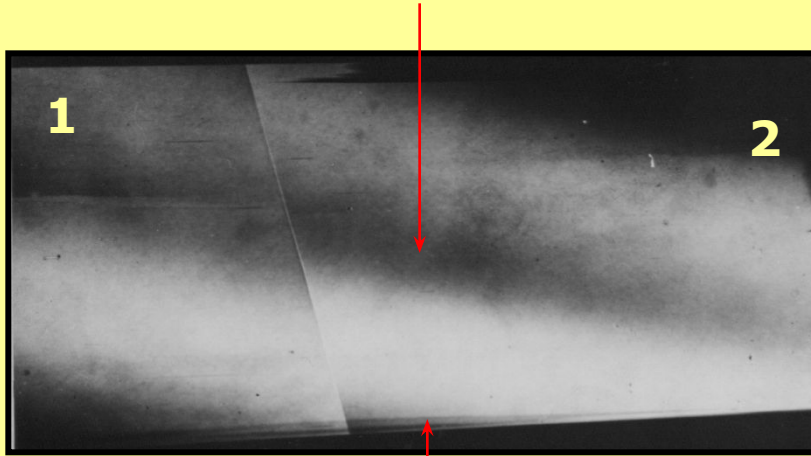
$\gamma_0 < 0 \rightarrow \cos \varphi \geq \text{tg} \theta_B \text{ctg} \psi$ дифракция Лауэ,
 $\gamma_0 \geq 0 \rightarrow \cos \varphi < \text{tg} \theta_B \text{ctg} \psi$ дифракция
Брэгга;

$0 \geq \gamma_0 \rightarrow 0 \rightarrow \cos \varphi_{0,h} < \pm \text{tg} \theta_B \text{ctg} \psi$ эффект ПВО

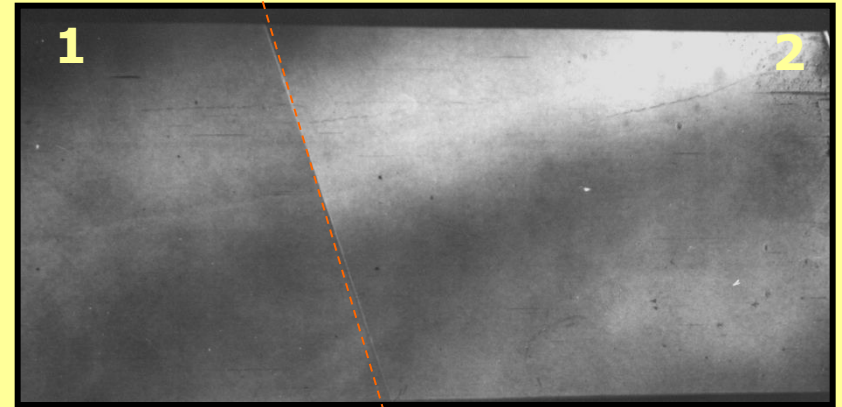
$0 \leq \gamma_0 \leq \gamma_{кр}$ дифракция Брэгга
и эффект ПВО

Топография монокристалов Si

17



а) $L_{\text{ext}} = 2,1 \text{ мкм}$

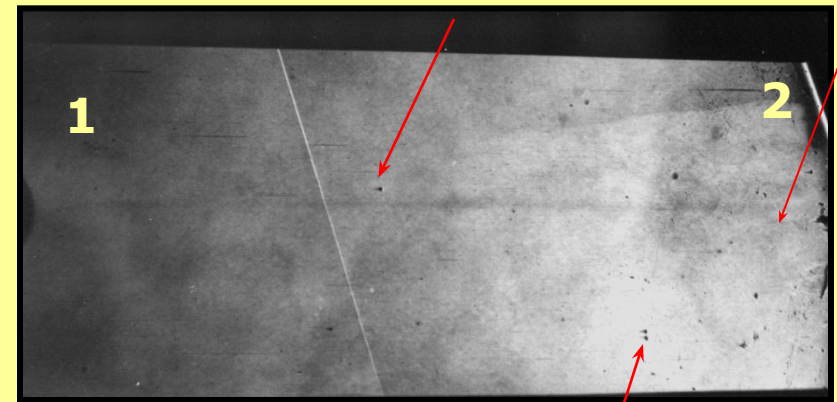


б) $L_{\text{ext}} = 1,05 \text{ мкм}$

Х-лучевые топограммы монокристалла Si:

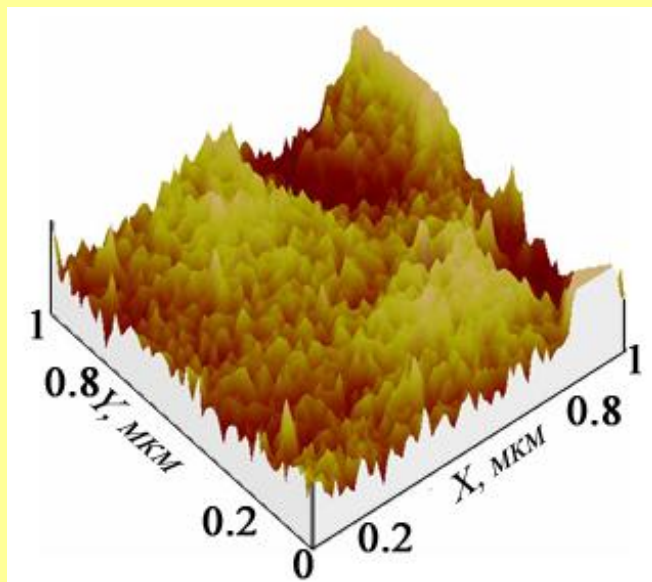
СиK α -излучение,
входящая плоскость
(111)

1-исходная область;
2-имплантированная

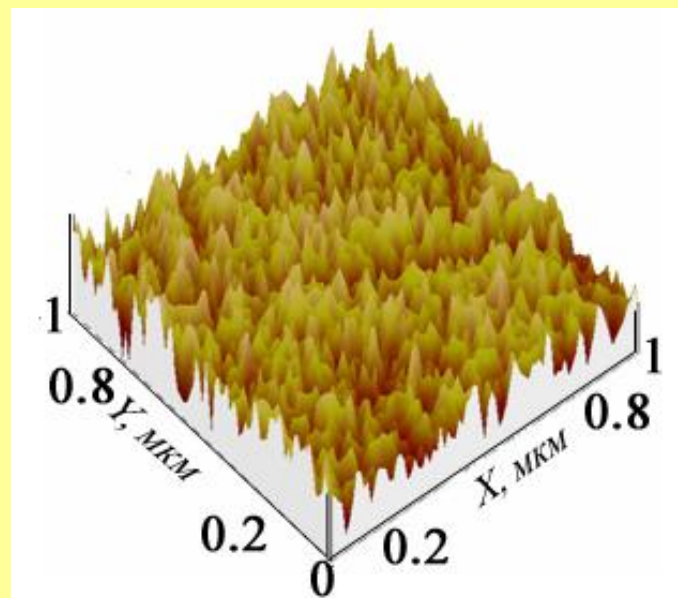


в) $L_{\text{ext}} = 0,75 \text{ мкм}$

Атомно-силовая микроскопия образца Si



а)



б)

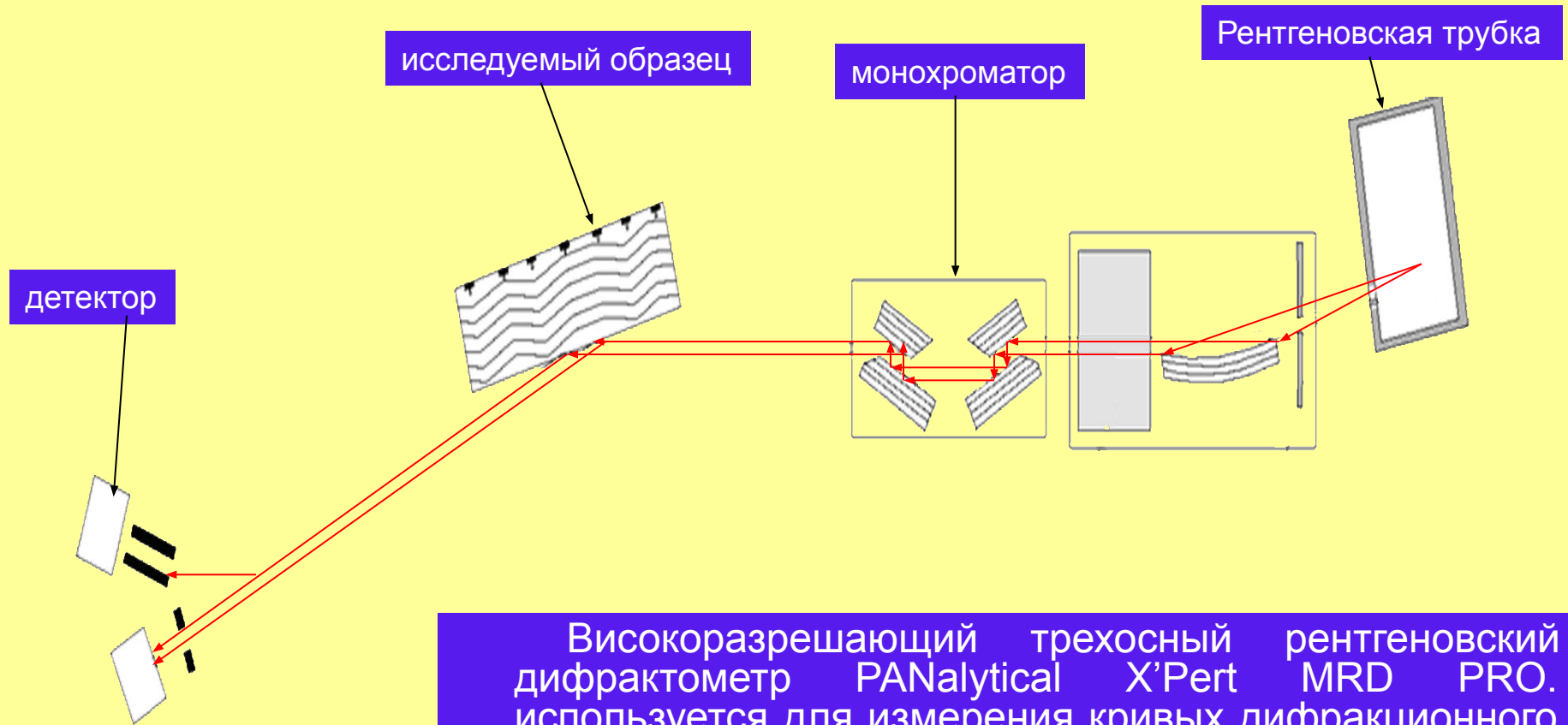
Объёмное изображение микрорельефа поверхности образца Si

а) исходная область

б) имплантированная область

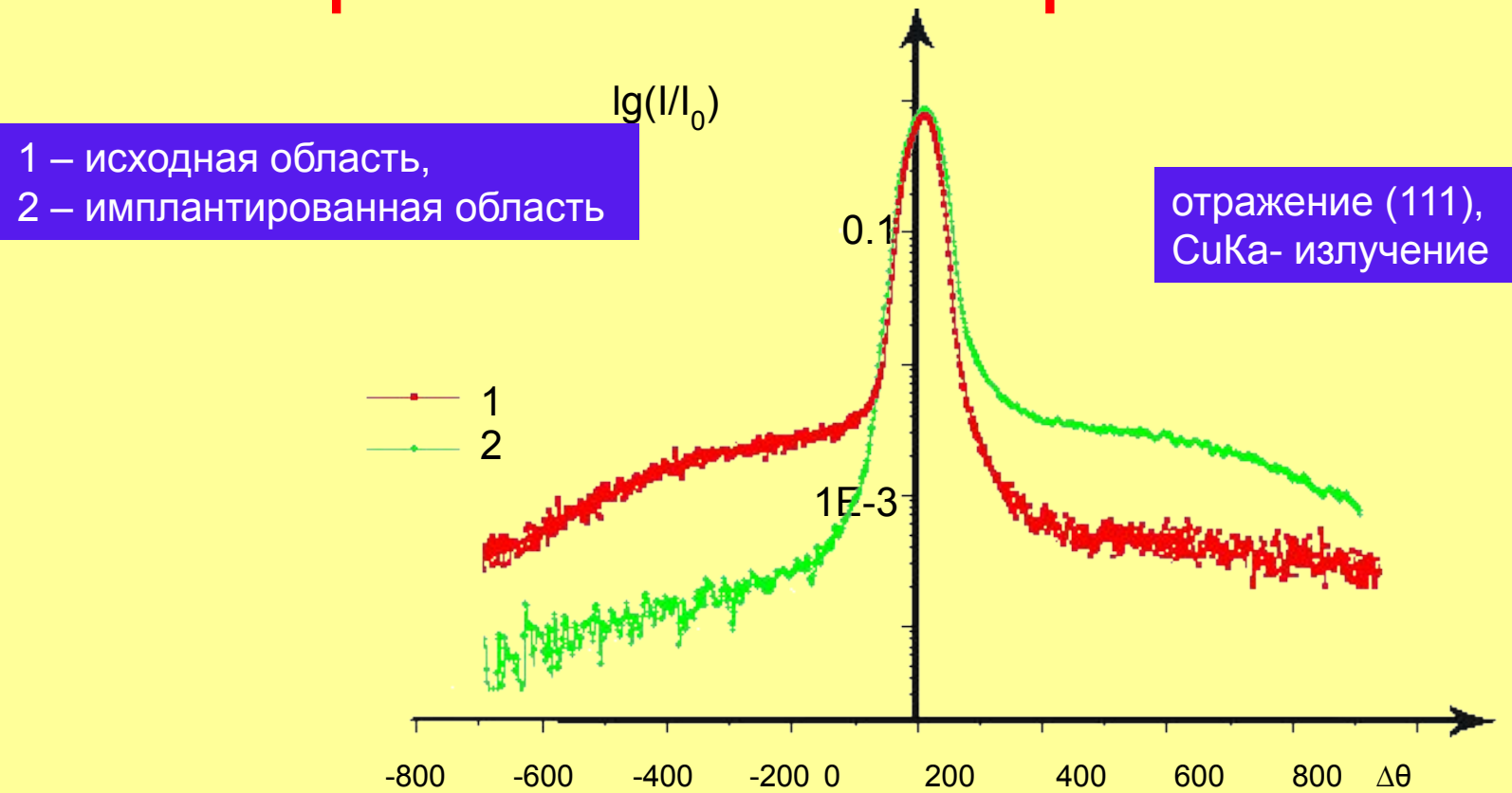
| № | Z, мкм | R _a , мкм | R _q , мкм |
|----------------------|--------|----------------------|----------------------|
| 1 (исходная) | 1,725 | 0,150 | 0,201 |
| 2 (имплантированная) | 4,756 | 0,273 | 0,373 |

Схема трехосного рентгеновского дифрактометра



Високоразрешающий трехосный рентгеновский дифрактометр PANalytical X'Pert MRD PRO. используется для измерения кривых дифракционного отражения (КДО). На трехосном дифрактометре фирмы "Philips" находится: на первой оси - германиевый монохроматор из четырехкратным отражением, на второй - исследуемый образец, на третьей кристалл - анализатор .

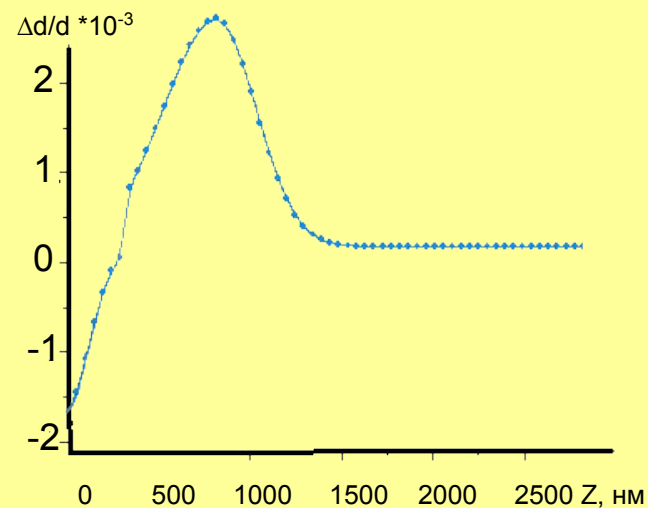
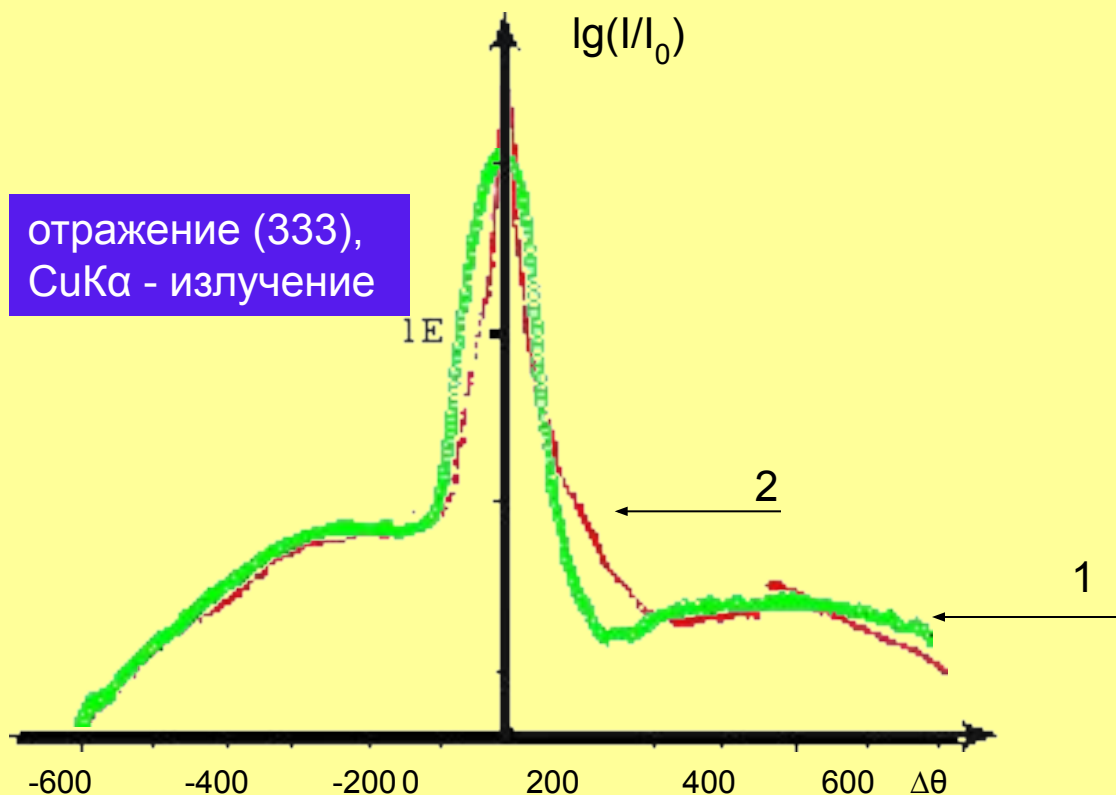
Кривые дифракционного отражения монокристалла Si



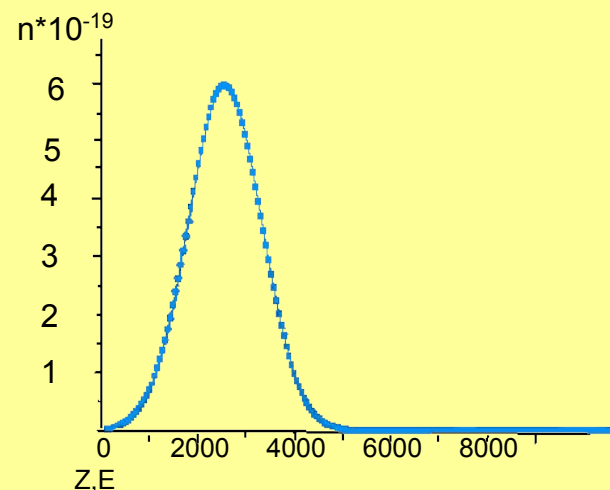
| № обл. | $\mu_d, \text{см}^{-1}$ | $L \cdot 10^2$ | $R_{d.k.}, \text{мкм}$ | $n_{d.k.}, \text{см}^{-3}$ | $R_{c.k.}, \text{мкм}$ | $n_{c.k.}, \text{см}^{-3}$ | $R_{п.}, \text{мкм}$ | $n_{п.}, \text{см}^{-3}$ |
|--------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|
| 1 | 1,05 | 0,6 | 0,45 | $7 \cdot 10^6$ | 0,009 | $7 \cdot 10^{11}$ | 0,5 | $8 \cdot 10^7$ |
| 2 | 0,21 | 0,18 | 0,4 | $2 \cdot 10^8$ | 0,009 | $8 \cdot 10^{12}$ | 0,9 | $2 \cdot 10^9$ |

Кривые дифракционного отражения монокристалла Si: сопоставление теоретической и экспериментальных кривых

1 – экспериментальная кривая,
2 – теоретически рассчитанная кривая.



Профиль деформации в приповерхностных слоях кристалла, имплантированного ионами фосфора



Распределение имплантированных ионов фосфора в кристалле кремния, полученное с помощью программного пакета SRIM-2003

Выводы:

- Воздействие ионной имплантации на поверхность образца приводят к изменению характеристик и формы кривых качания, особенно их “хвостов”, относительно исходной части образца. Наблюдается также незначительное увеличение полуширины кривых качания и отношения интегральной интенсивности к высоте максимума кривой.
- Из полученного распределения имплантированных ионов следует, что максимальное значение концентрации имплантата $n=5.75 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ наблюдается на глубине порядка $\sim 2500 \text{ \AA}$.
- Исходя из численных решений уравнений Такаги – Топена, а также из расчетов на основании обобщенной динамической теории дифракции рентгеновских лучей построен профили деформации в поверхностных слоях кремния
- Оценены средний радиус и концентрация микродефектов: дискообразные кластеры – размер $\sim 0,5 \text{ мкм}$, концентрация $\sim 10^7 \div 10^8 \text{ см}^{-3}$; сферические кластеры – размер $\sim 0,011 \text{ мкм}$, концентрация $\sim 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$.
дислокационные петли – размер $\sim 0,7 \text{ мкм}$, концентрация $\sim 10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-3}$
- Определенная с помощью атомно-силовой микроскопии высота Ra характерного рельефа неровностей на имплантированной ионами поверхности, равна $\sim 0,273 \text{ нм}$