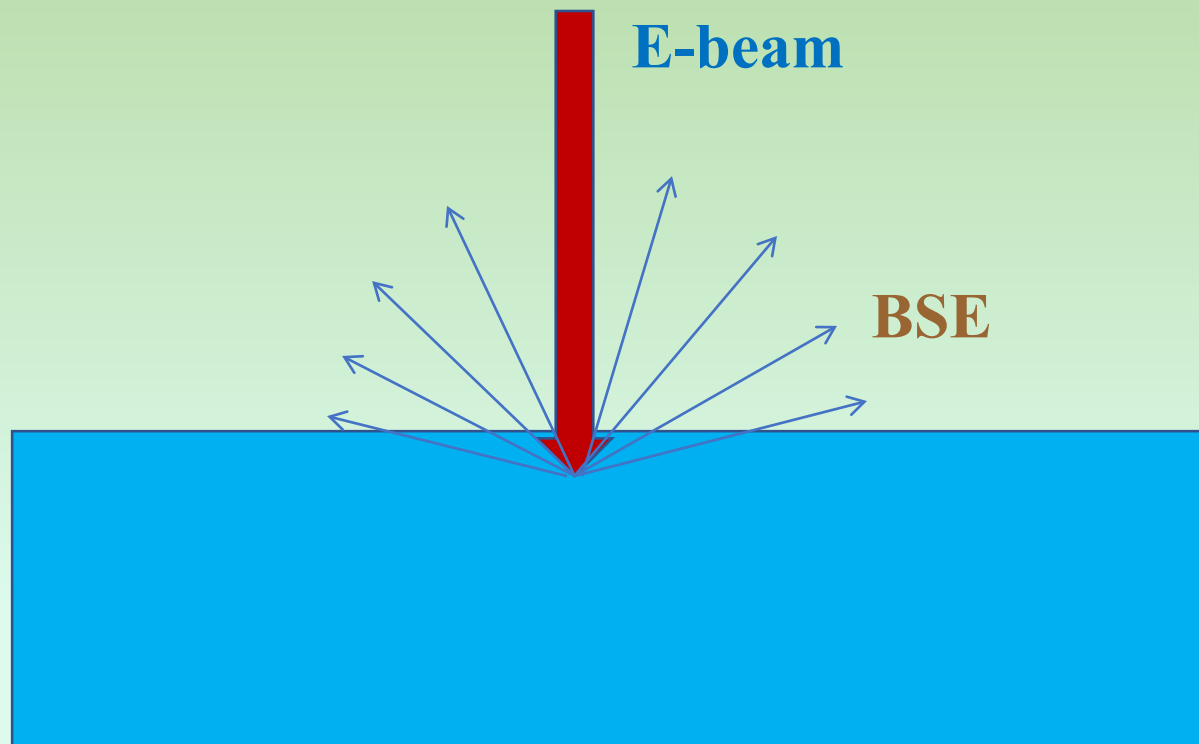
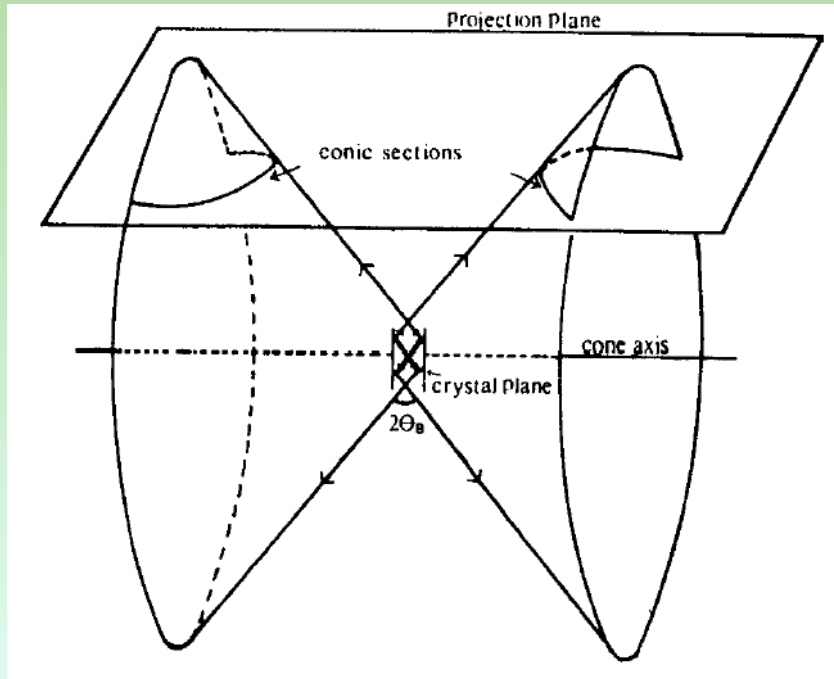


**ДИФРАКЦИЯ ОБРАТНО
ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
(EBSD)
КАНАЛИРОВАНИЕ**

Дифракция обратно рассеянных электронов



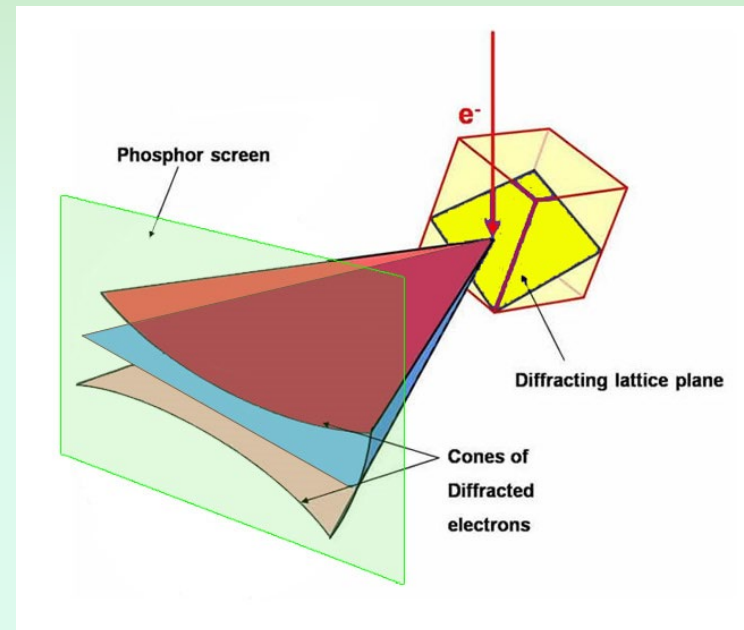
Дифракция обратно рассеянных электронов



$$2d\sin\theta_B = n\lambda$$

$$\lambda(\text{\AA}) = h/\sqrt{2mE_b} = 0.388/\sqrt{E_b(\text{keV})}$$

Для 20 кэВ $\lambda = 0.087 \text{ \AA}$



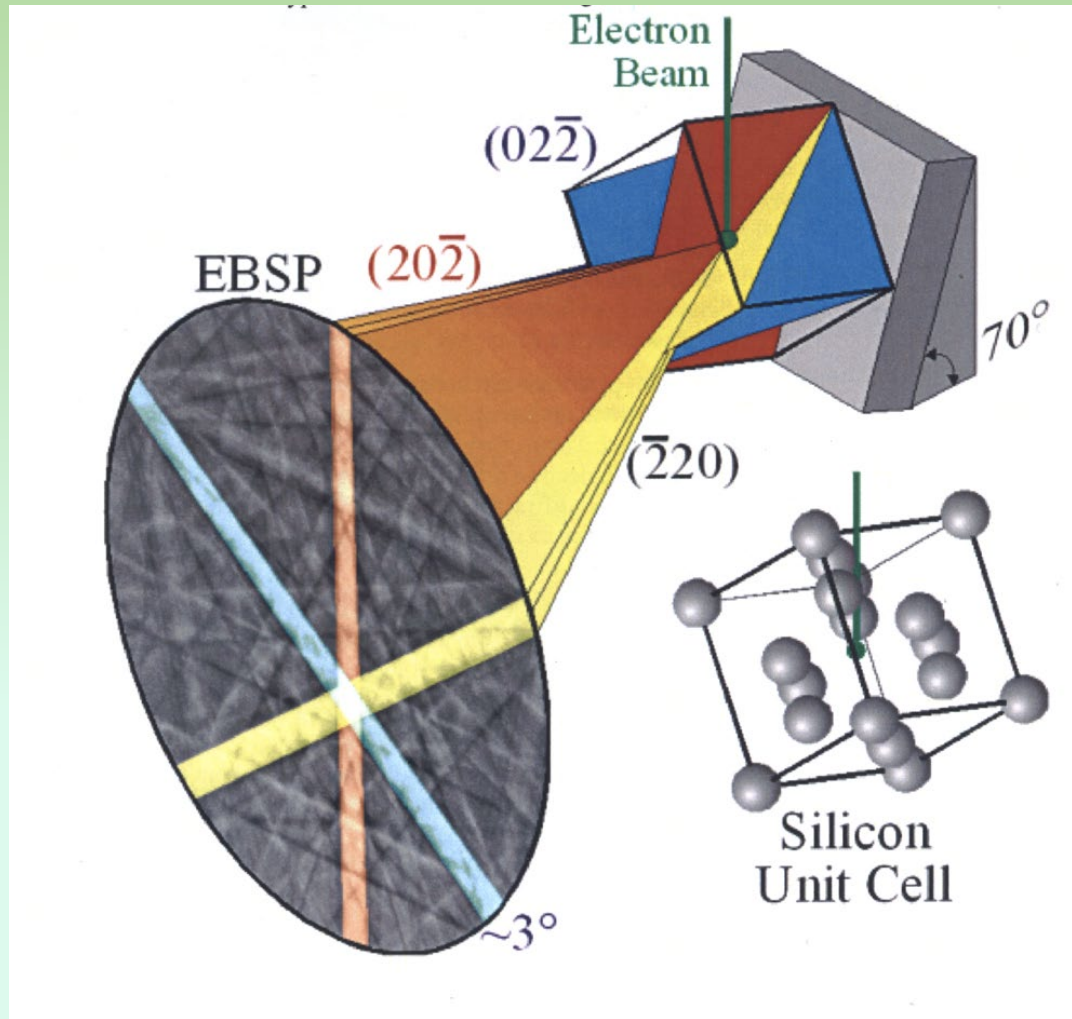
EBSD

Начали использовать в 1954

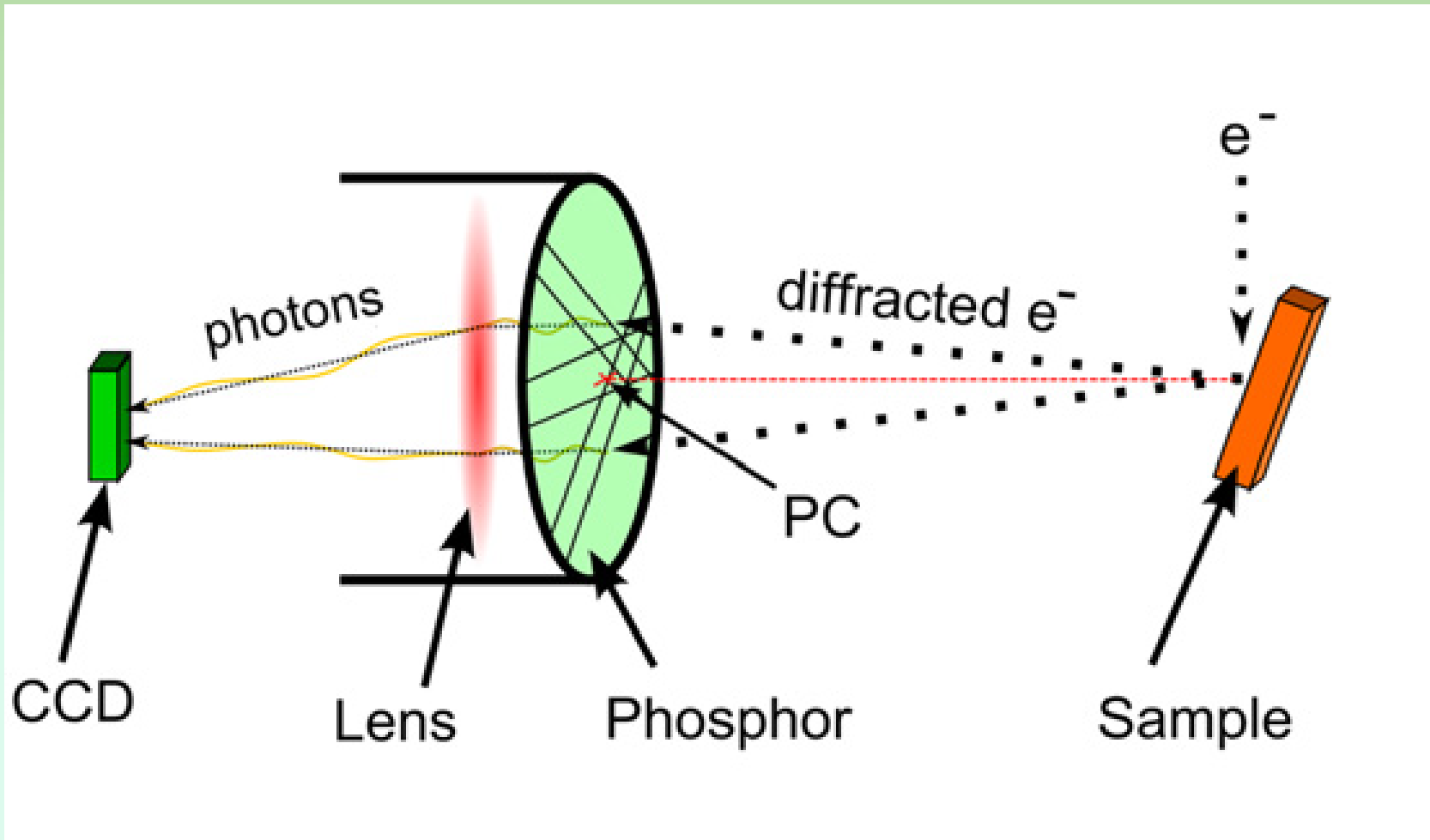
Прототип в РЭМ в 1986

**Первая коммерческая система –
начало 90-х**

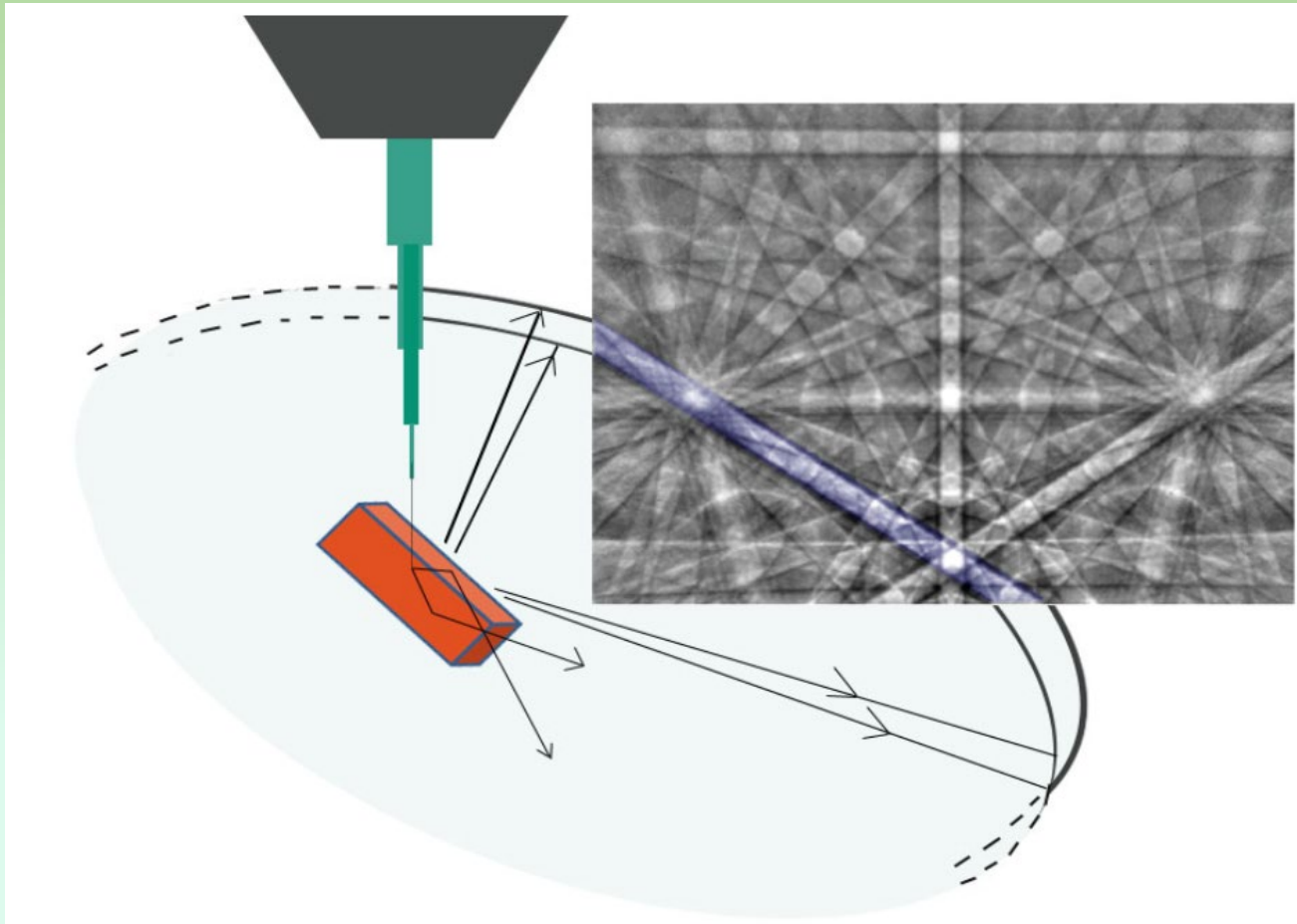
Дифракция обратно рассеянных электронов



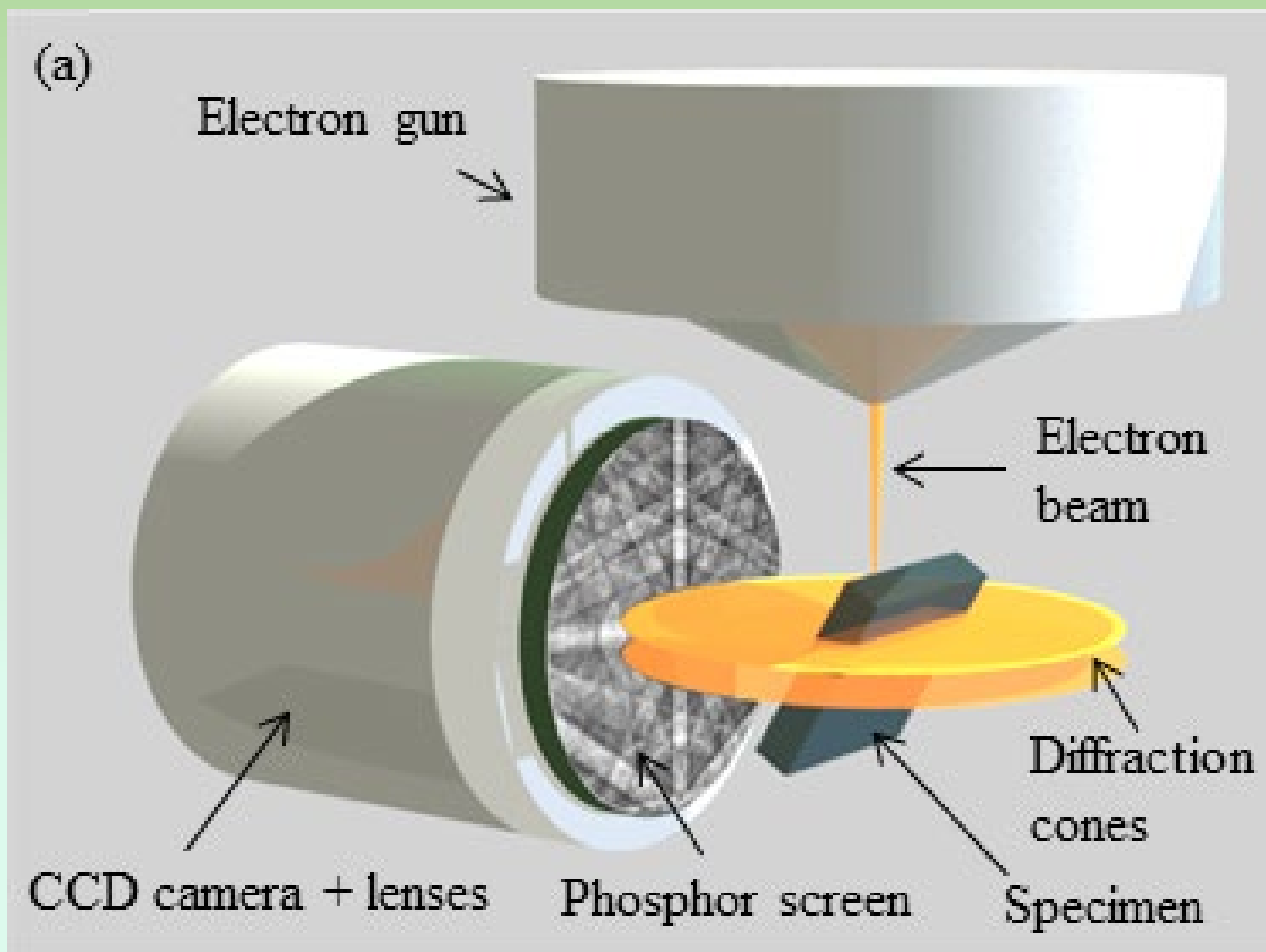
Дифракция обратно рассеянных электронов



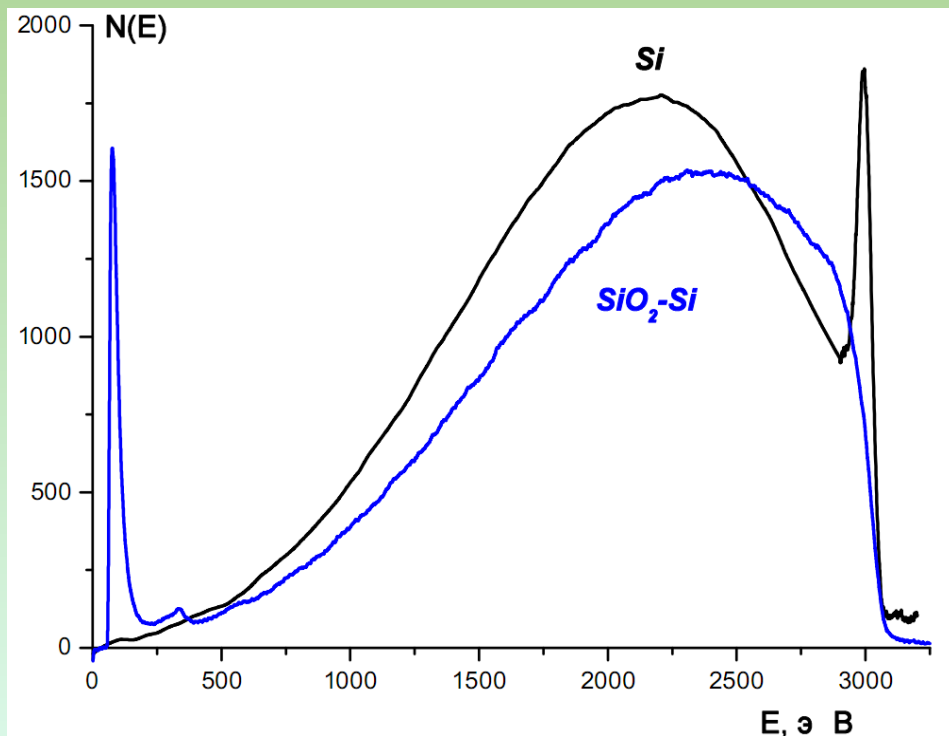
Дифракция обратно рассеянных электронов



Дифракция обратно рассеянных электронов



Измерения спектра ОРЭ



Гостев А.В., Кошев Н.А., Орликовский Н.А., Рау Э.И. «Аппаратная функция тороидального спектрометра РЭМ и ее влияние на спектры детектируемых электронов» XXIV Российская конференция по электронной микроскопии. Черноголовка. (2012) С. 177

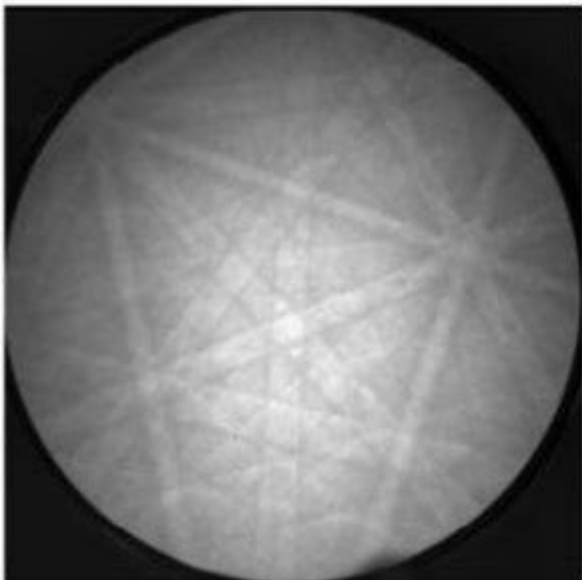
Обработка изображения



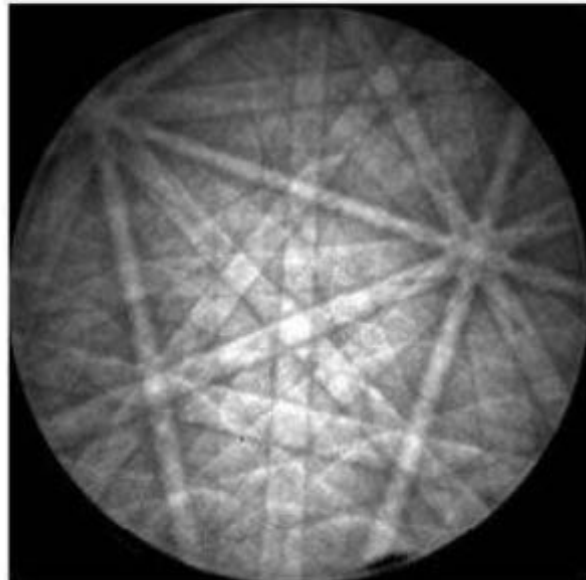
**Накопление сигнала
(длительность и
количество изображений)
Выравнивание
Процедура Биннинга**

Обработка изображения

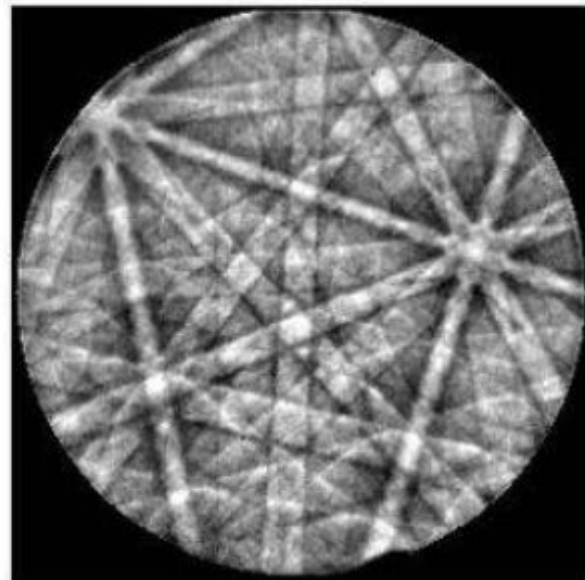
Original pattern



Background subtraction



Background division



Математическая обработка картин дифракции

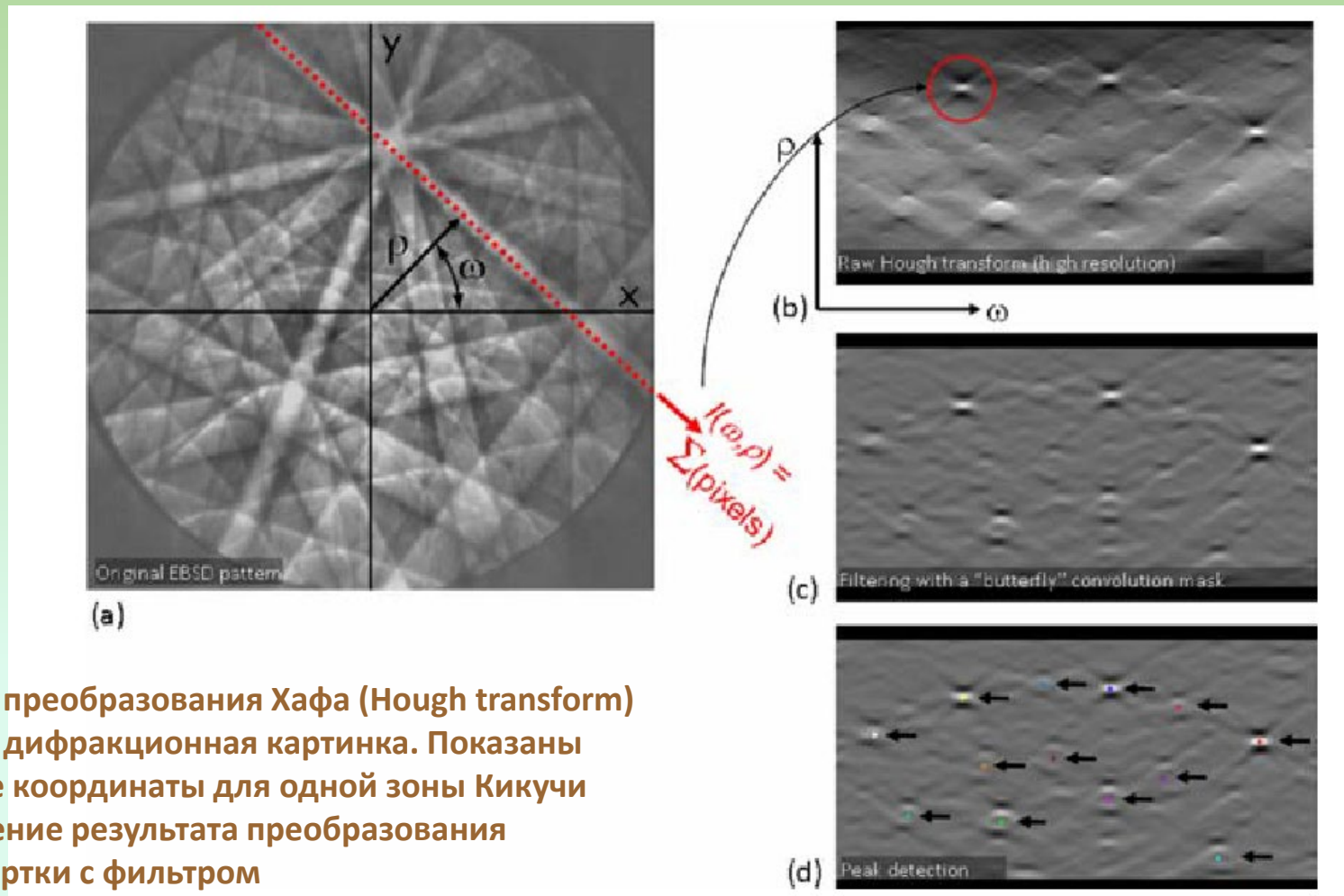
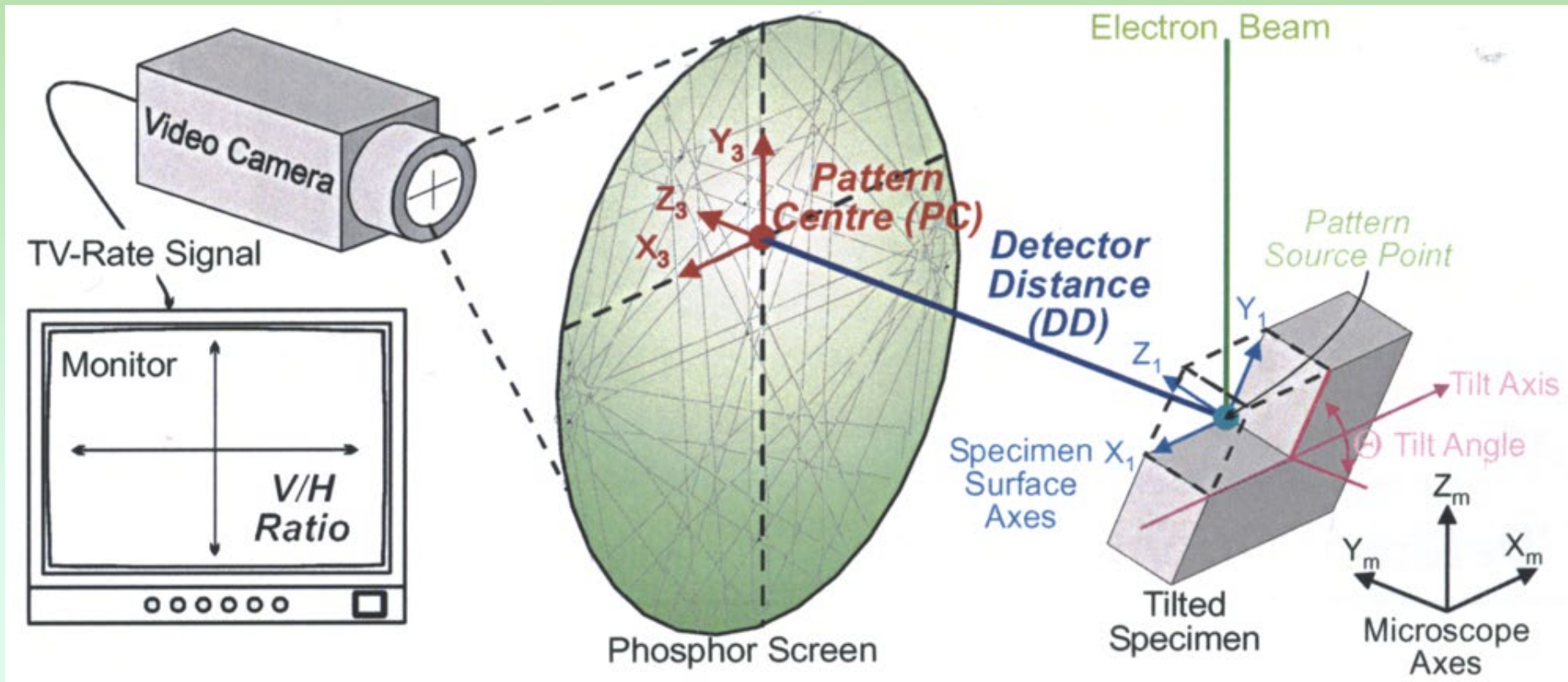


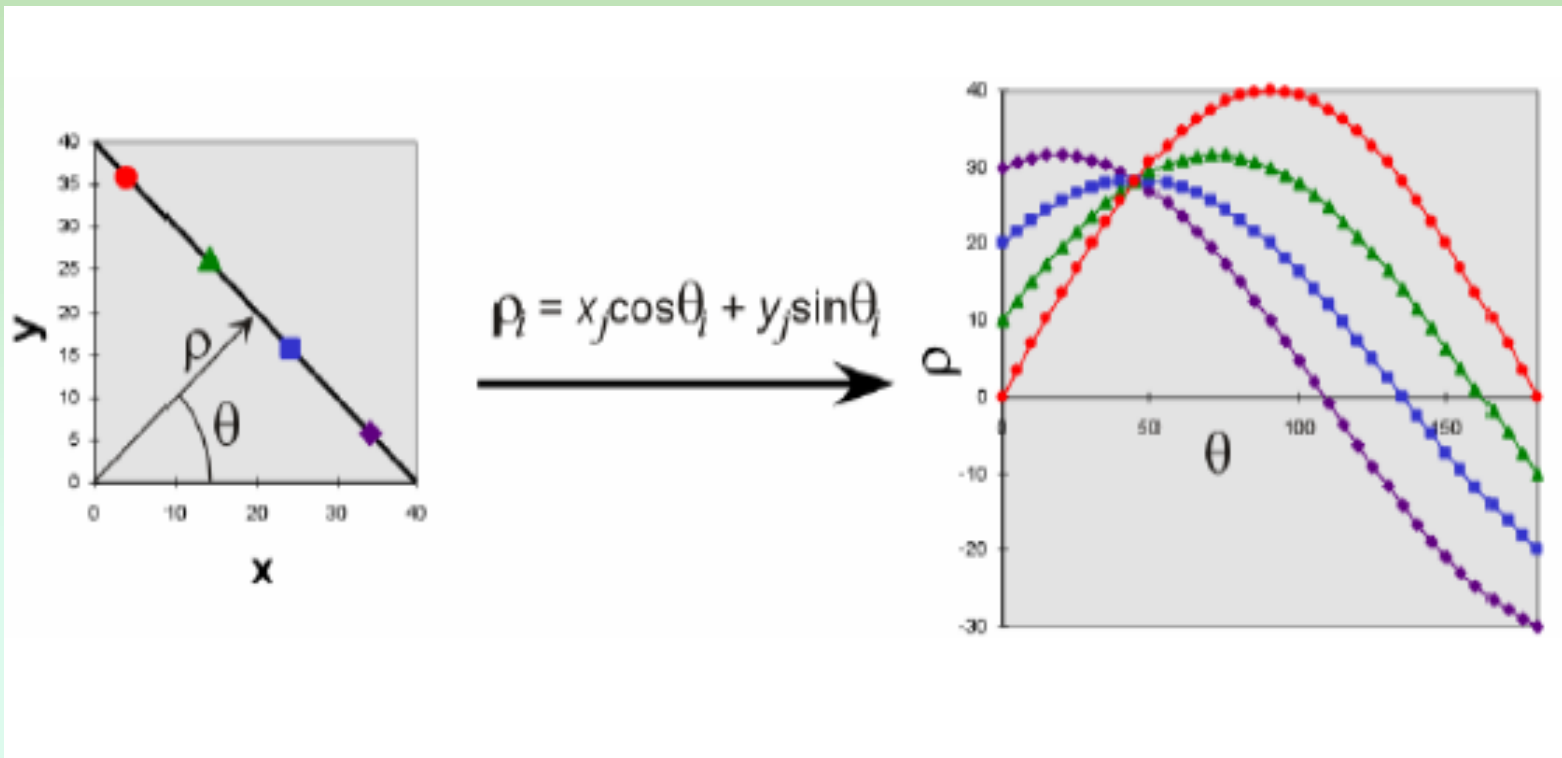
Иллюстрация преобразования Хафа (Hough transform)

- (a) Типичная дифракционная картинка. Показаны полярные координаты для одной зоны Кикучи
- (b) Изображение результата преобразования
- (c) После свертки с фильтром
- (d) Показаны максимумы

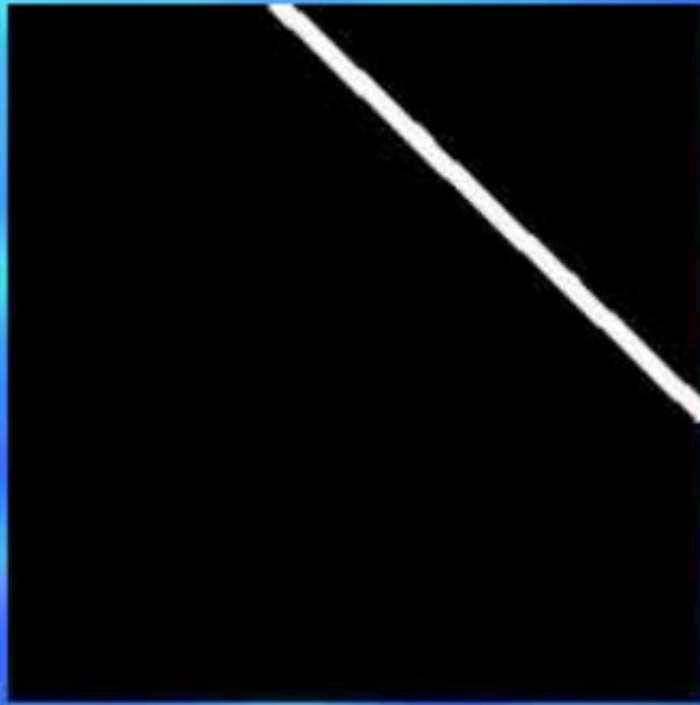
Дифракция обратно рассеянных электронов



Математическая обработка картин дифракции



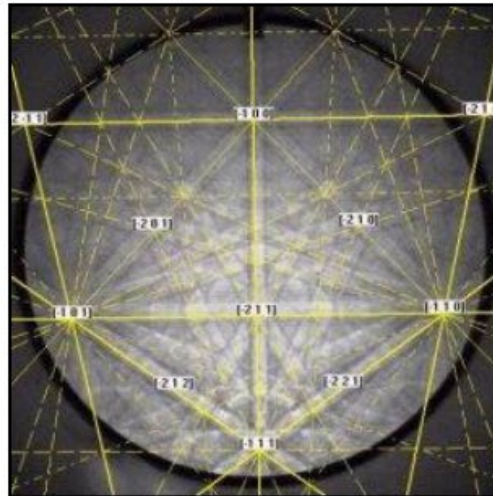
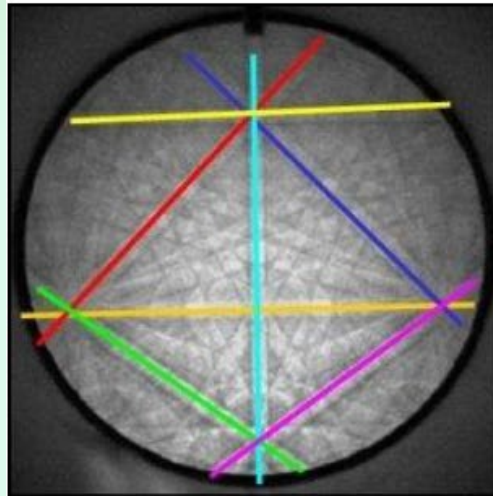
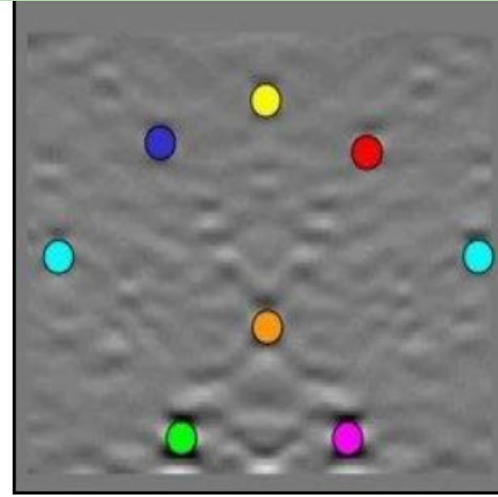
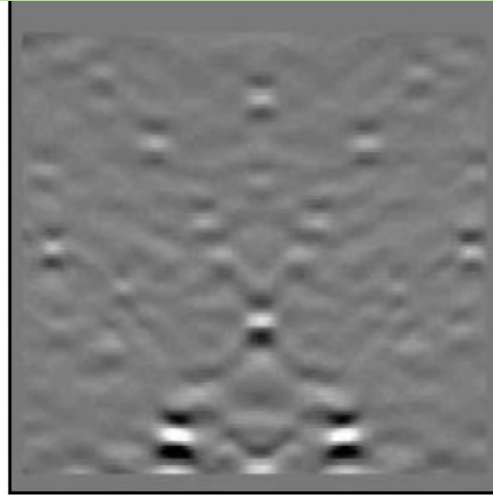
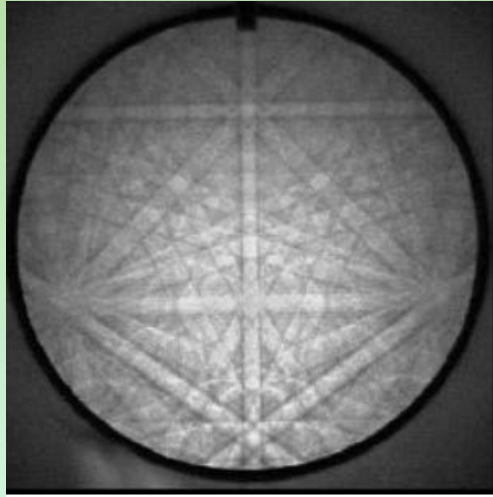
Обработка изображения



ρ

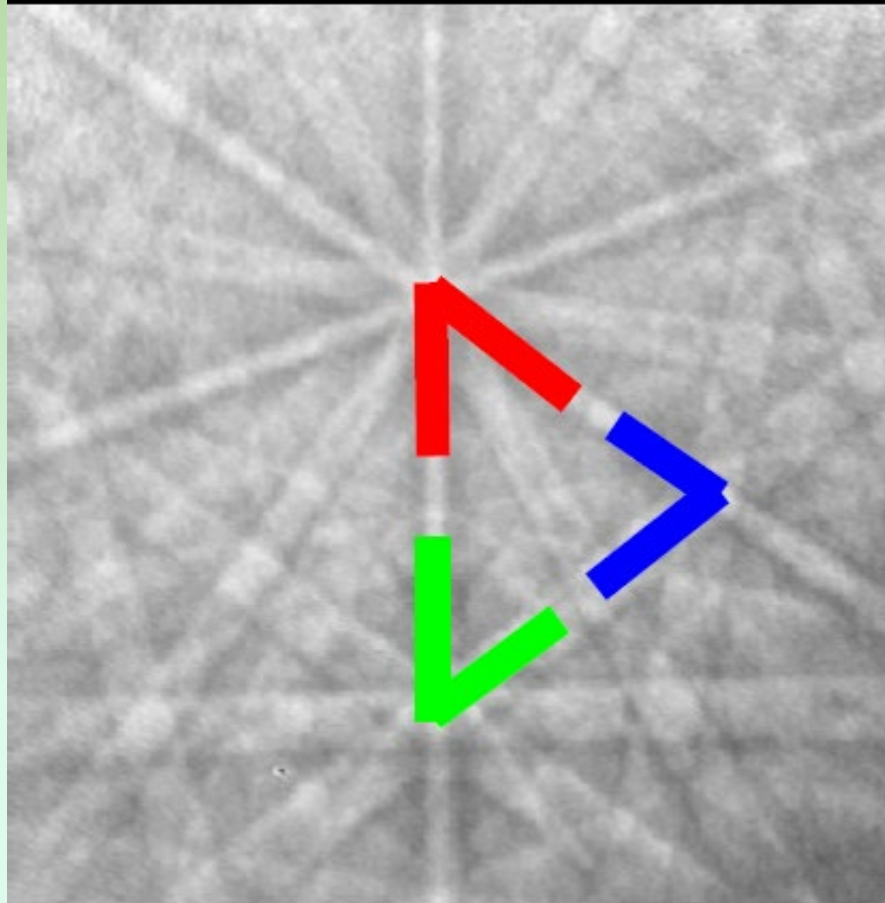
θ

Обработка изображения



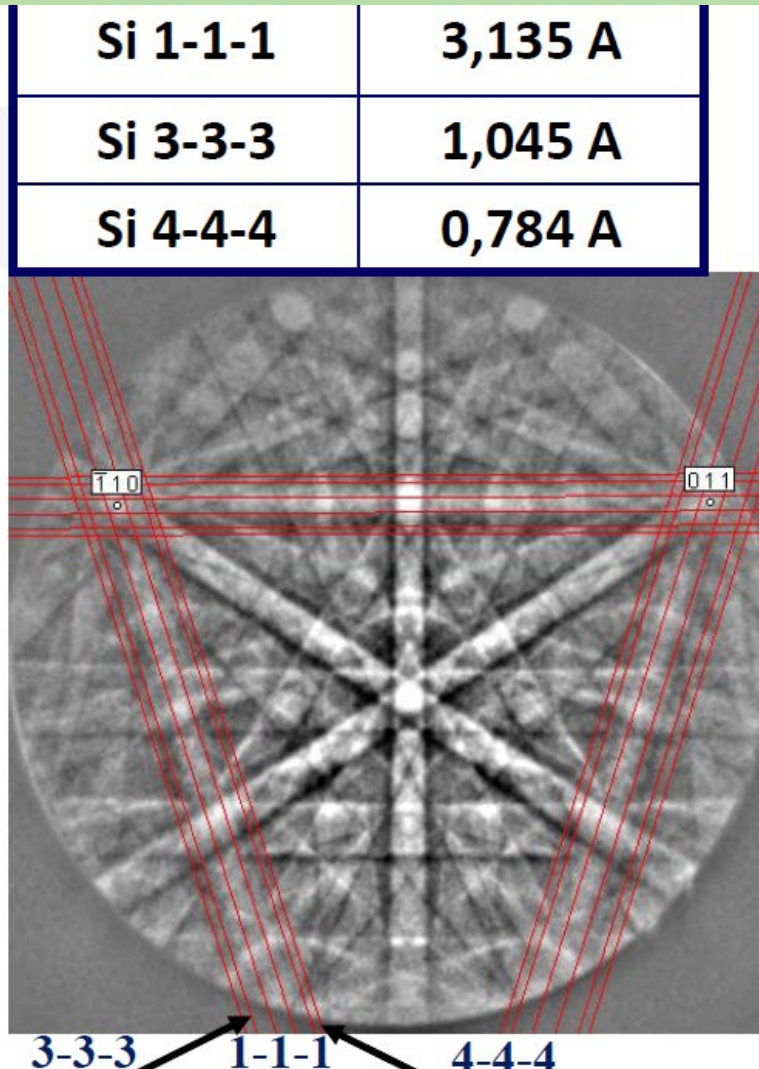
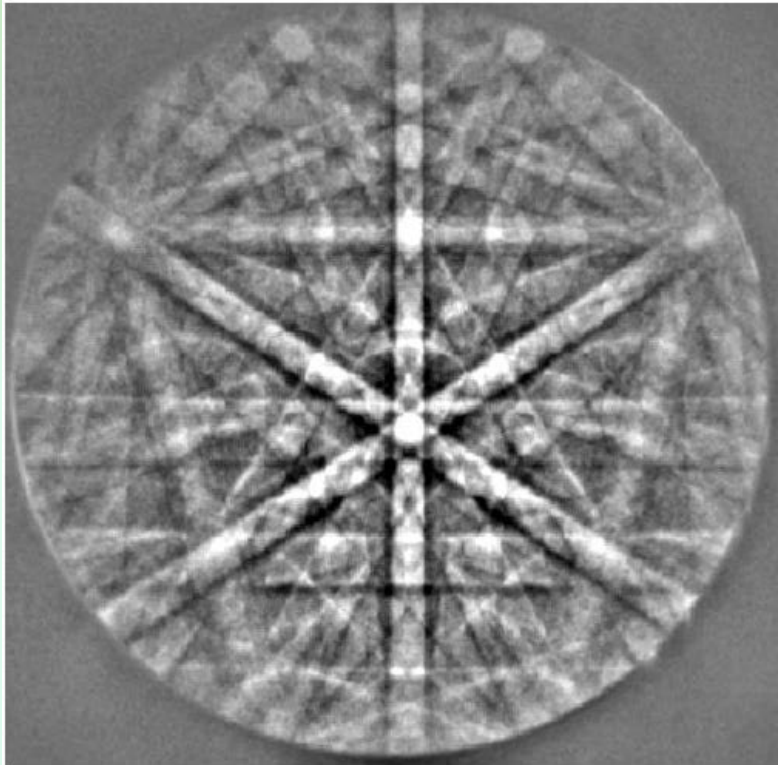
Detection
Hough transform

Обработка изображения

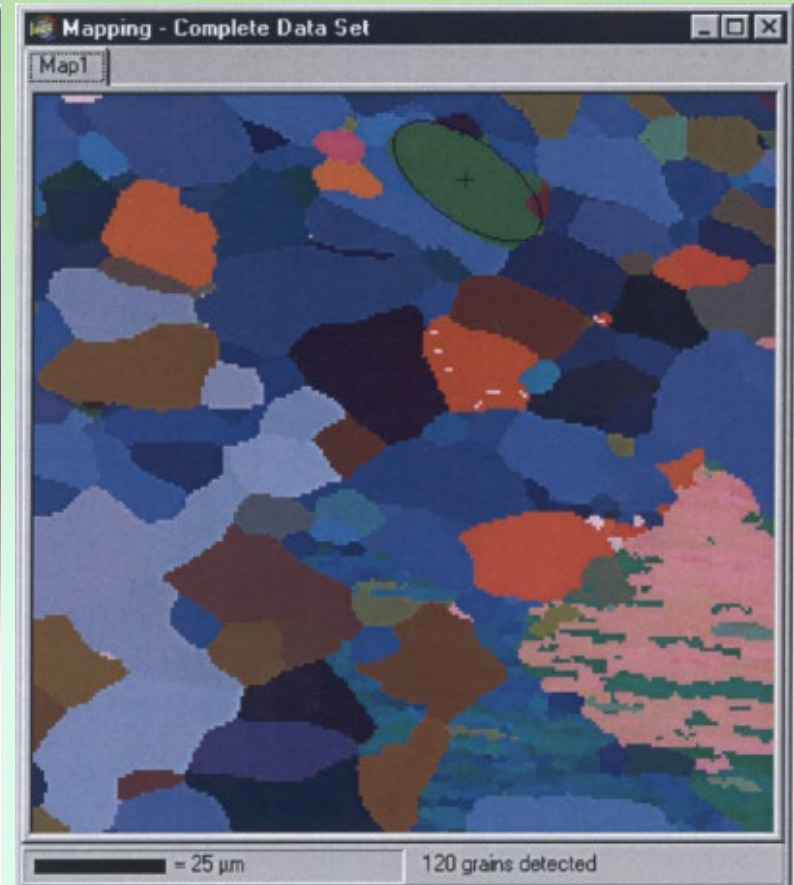
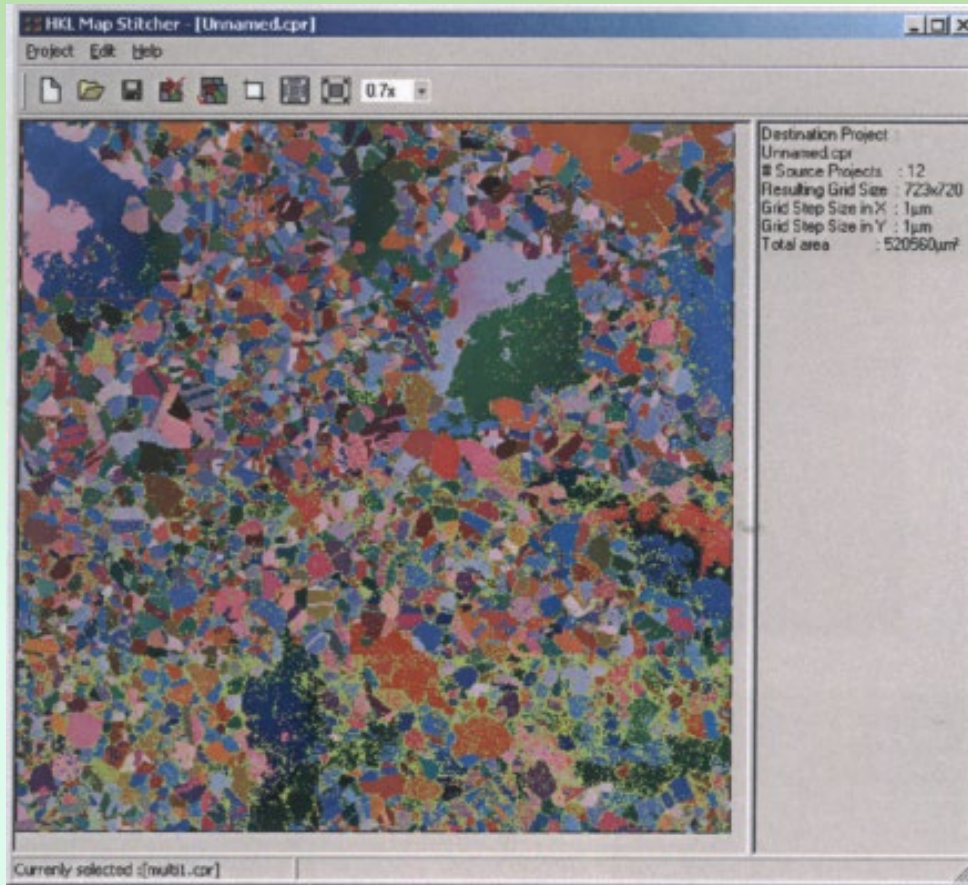


Обработка изображения

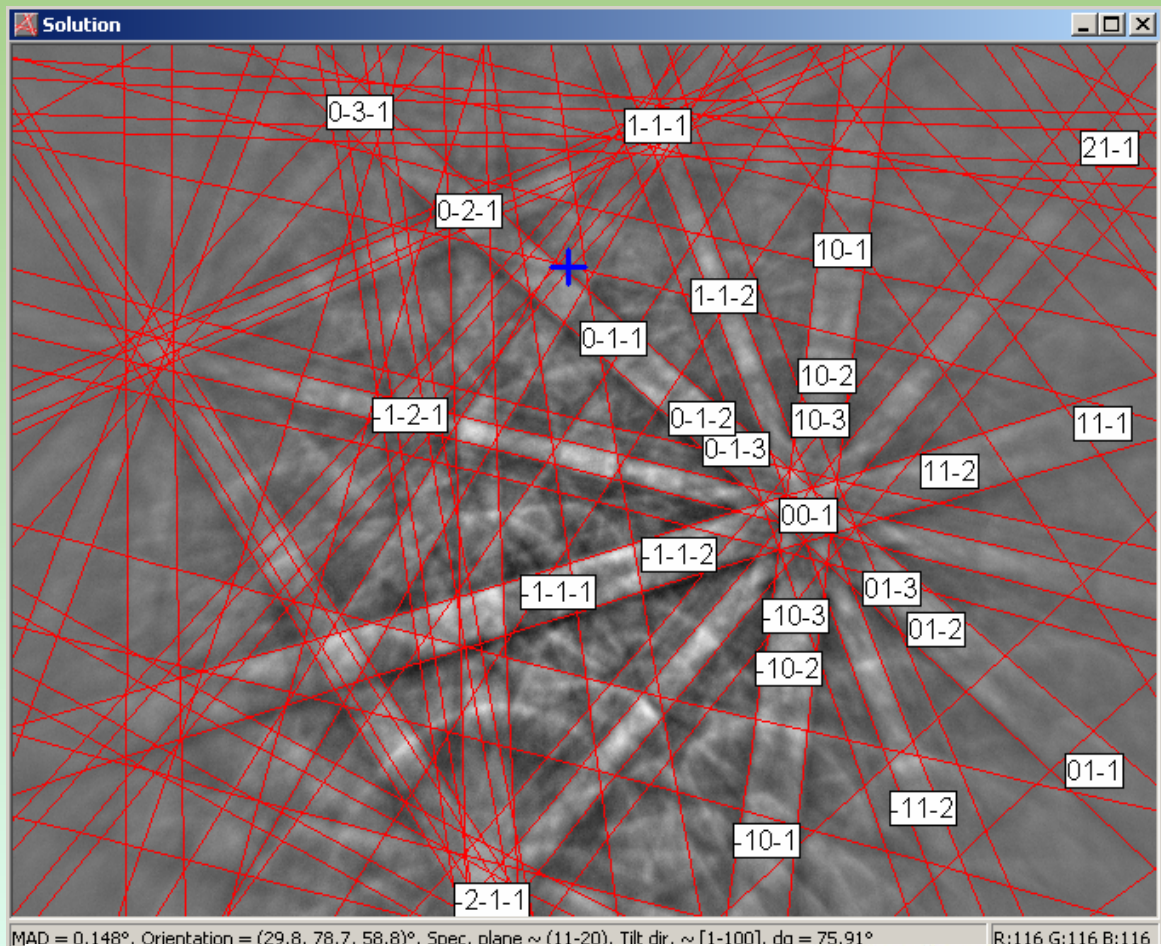
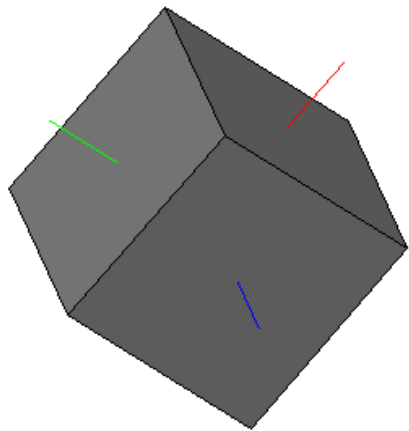
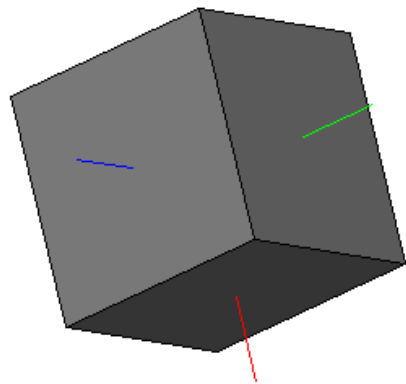
Band width is inversely proportional to d-spacing



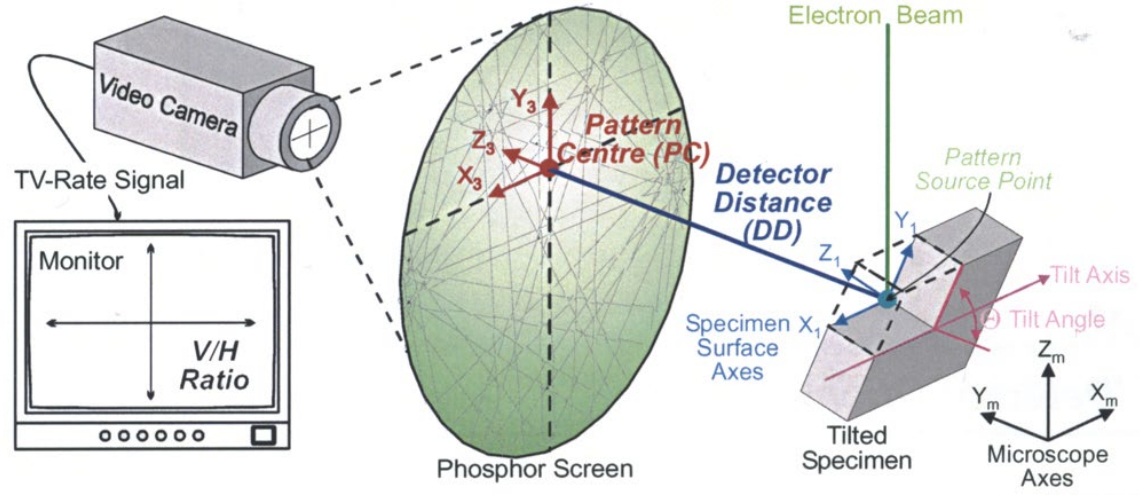
Исследование поликристаллов методом EBSD



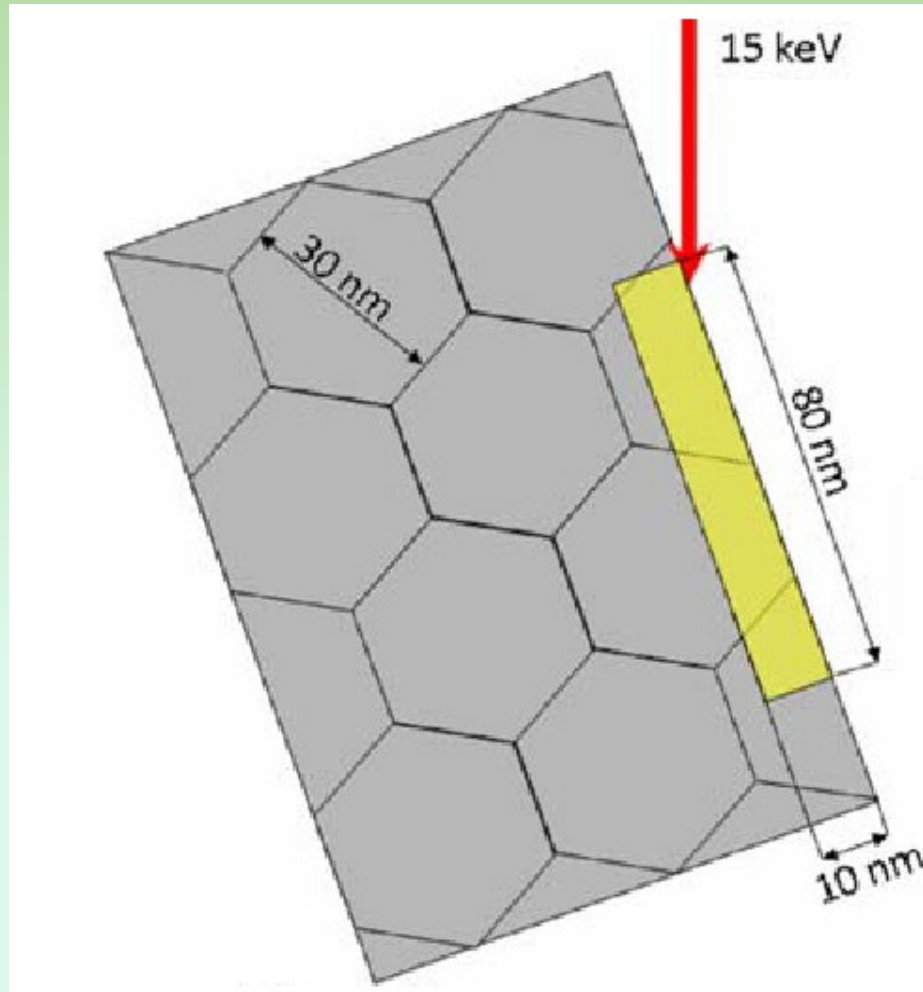
Экспертная оценка, подстройка



MAD = 0.148°. Orientation = (29.8, 78.7, 58.8)°. Spec. plane $\sim$ (11-20). Tilt dir. $\sim$ [1-100]. $d_o = 75.91^\circ$ R:116 G:116 B:116



Пространственное разрешение в методе дифракция обратно рассеянных электронов



Характеристики стандартного метода дифракции обратно рассеянных электронов

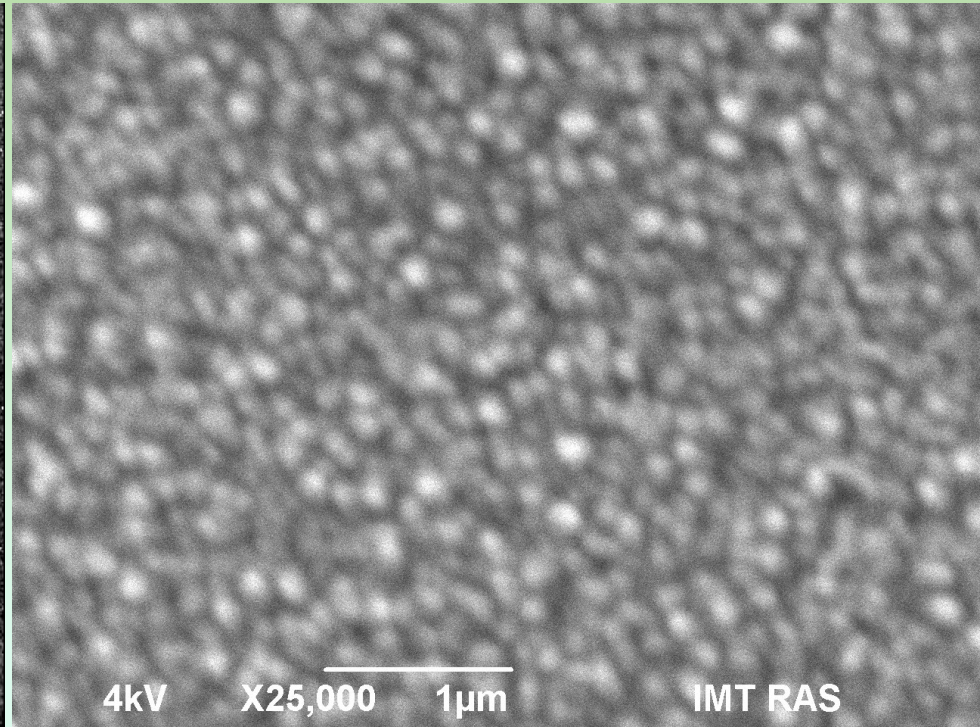
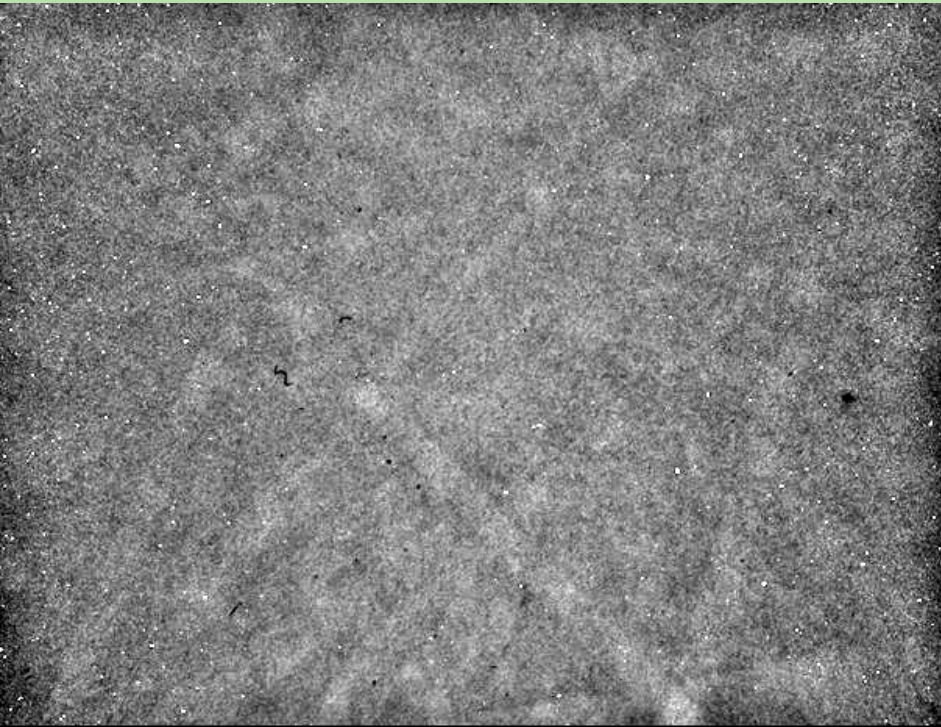
Разрешение 5-35 нм (минимальный размер зерен) – **зависит от материала и ориентации**

Параллельно пучку ~ в 3 раза хуже

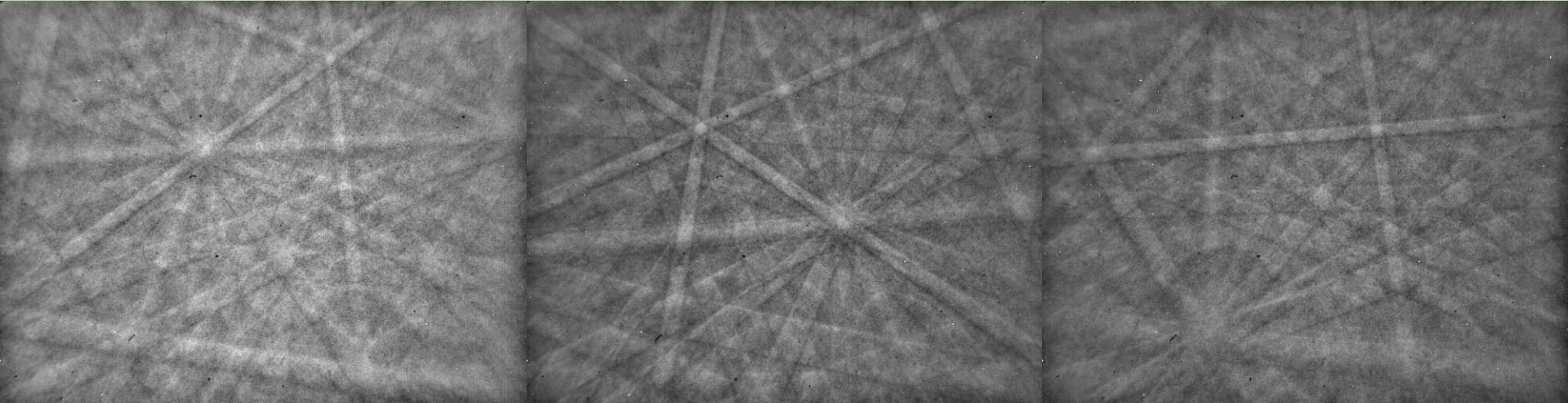
По глубине 2-10 нм

Разориентация 0.5°

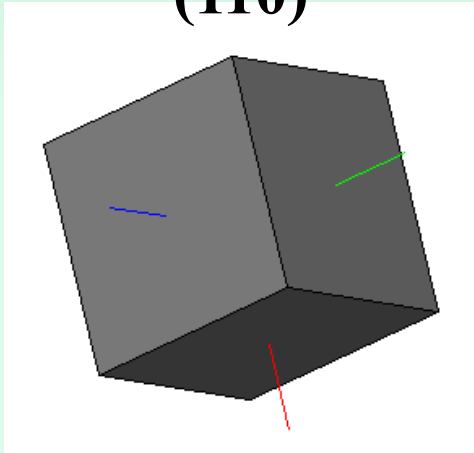
Пространственное разрешение в методе дифракция обратно рассеянных электронов



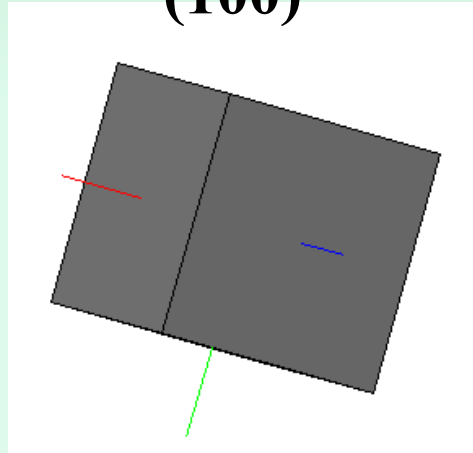
Дифракция обратно рассеянных электронов (Si)



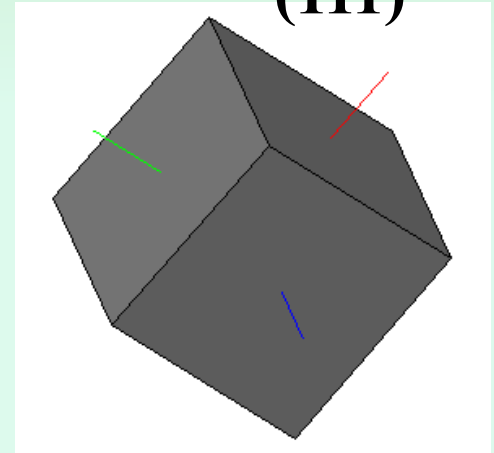
(110)



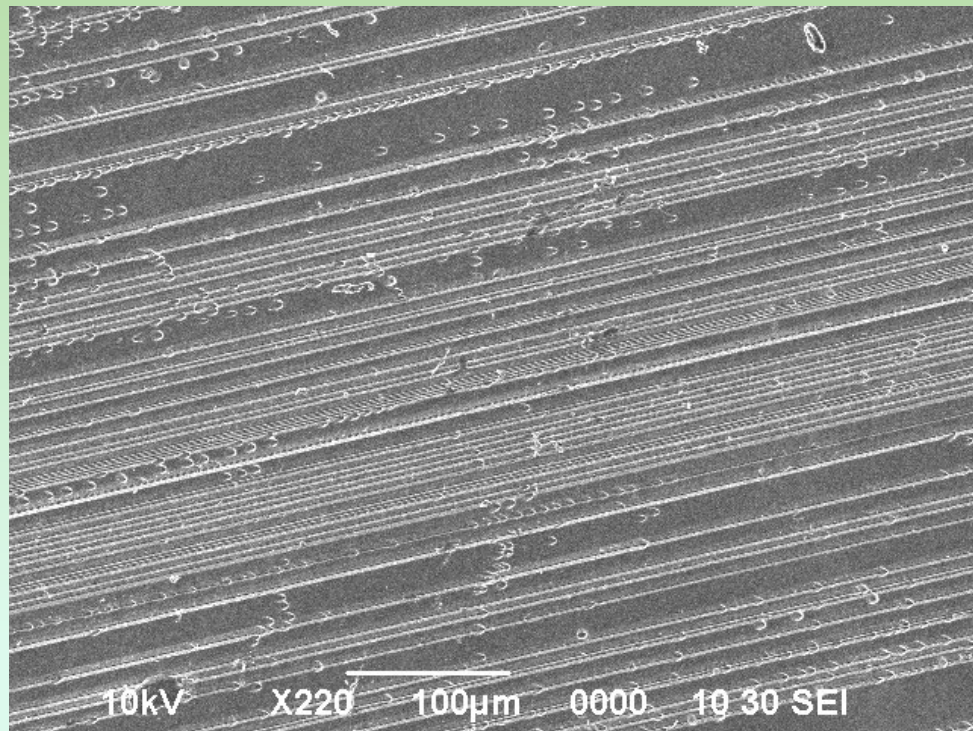
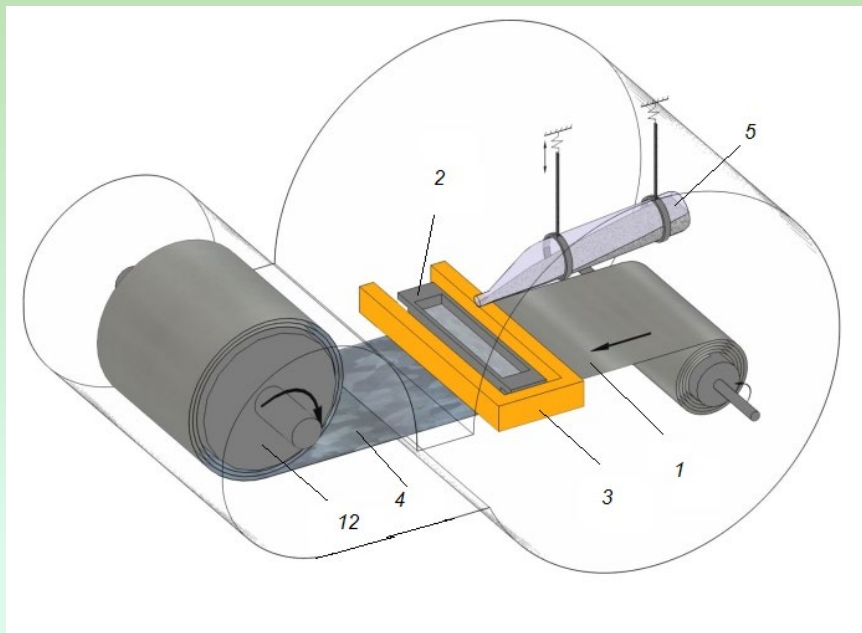
(100)



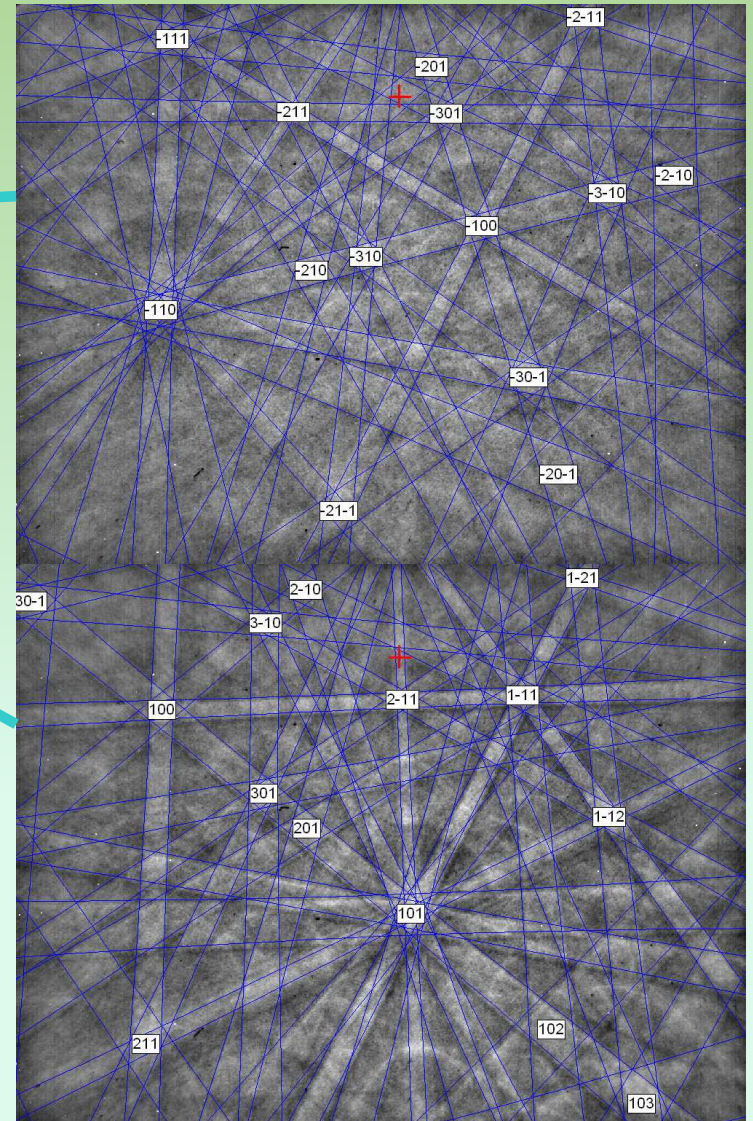
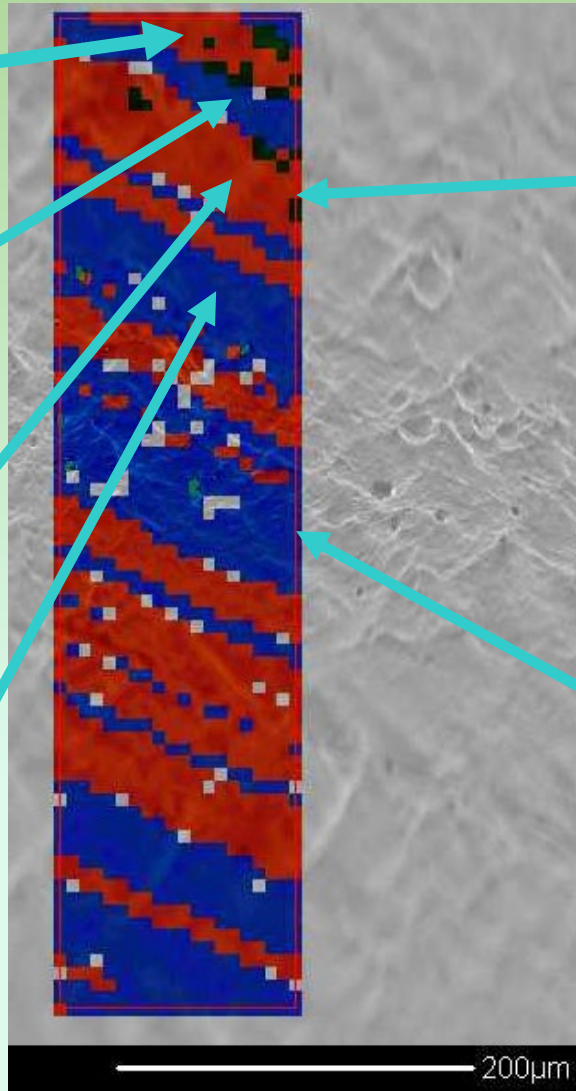
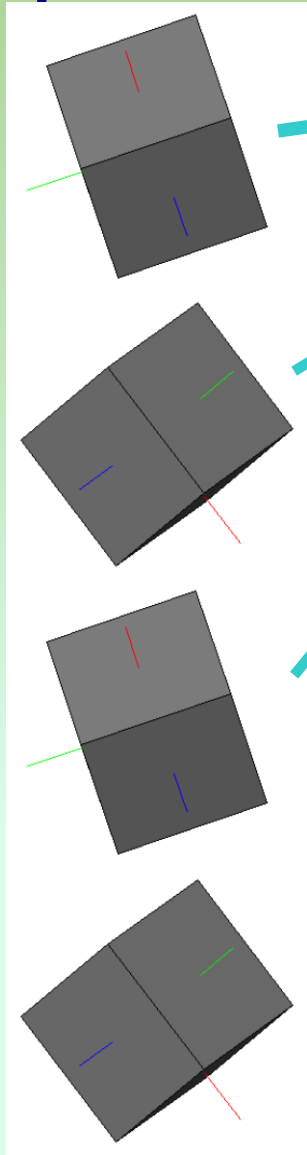
(111)



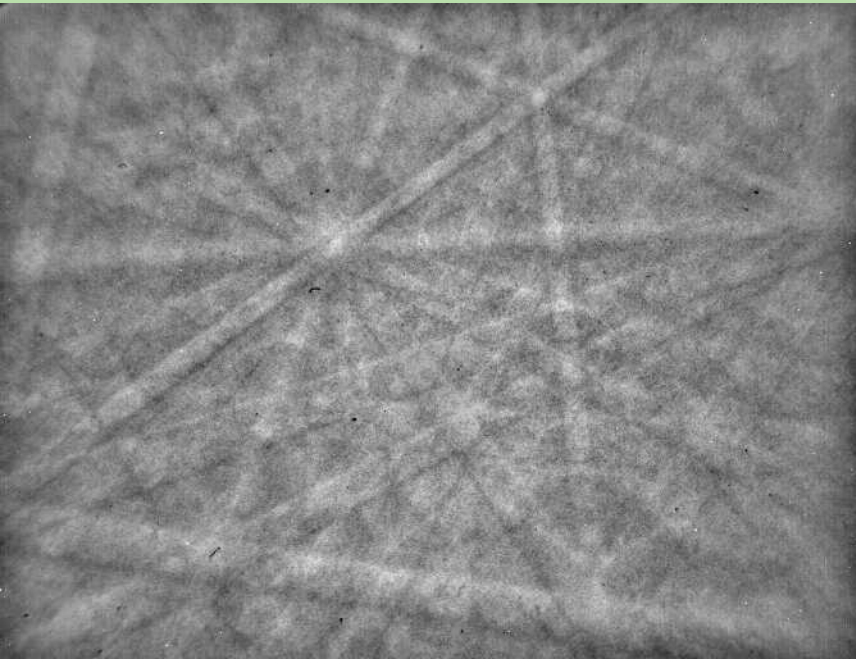
Ленты Si



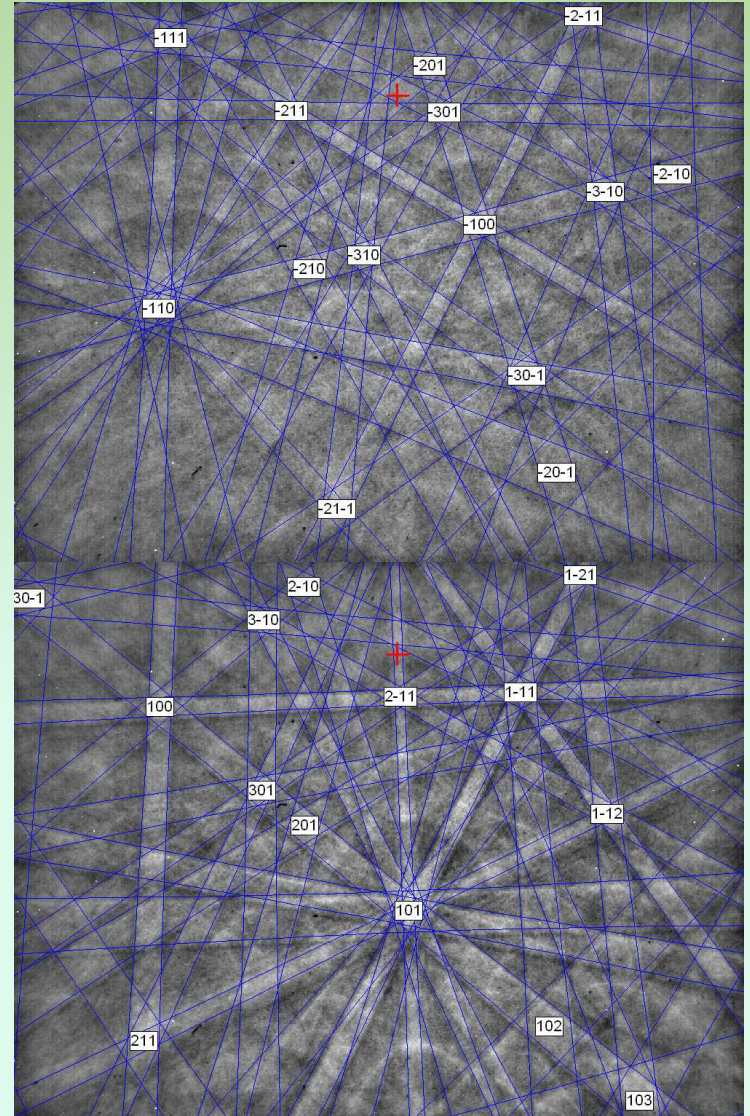
Ориентация зерен в ленте Si (EBSD)



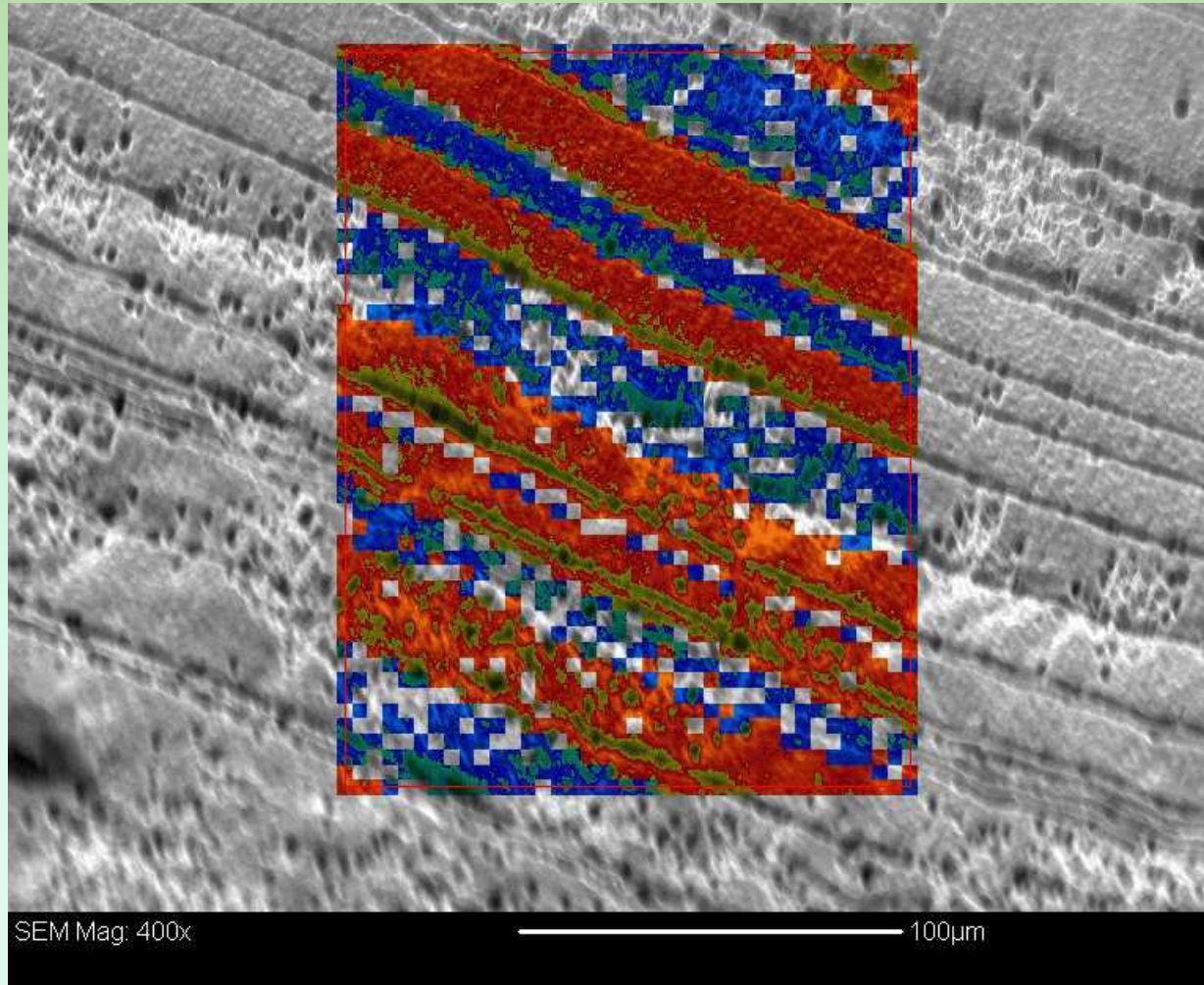
Ориентация зерен в ленте Si



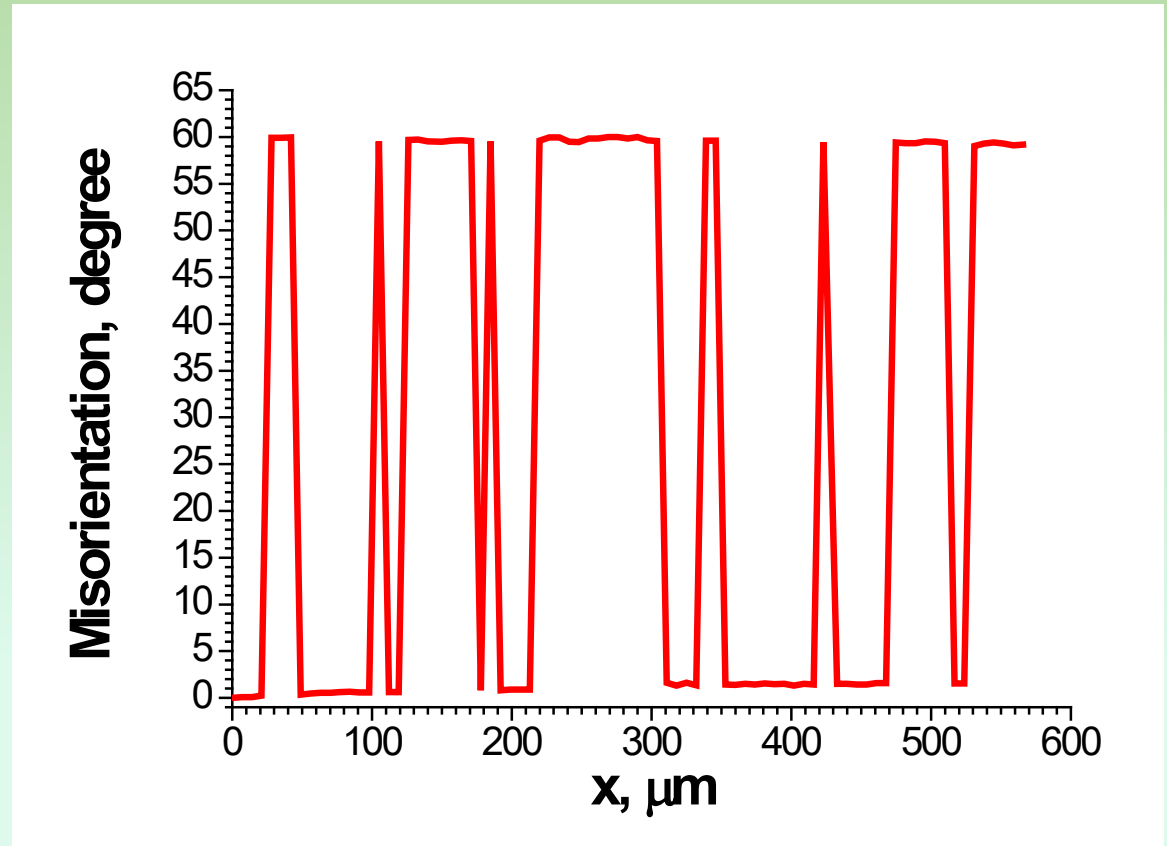
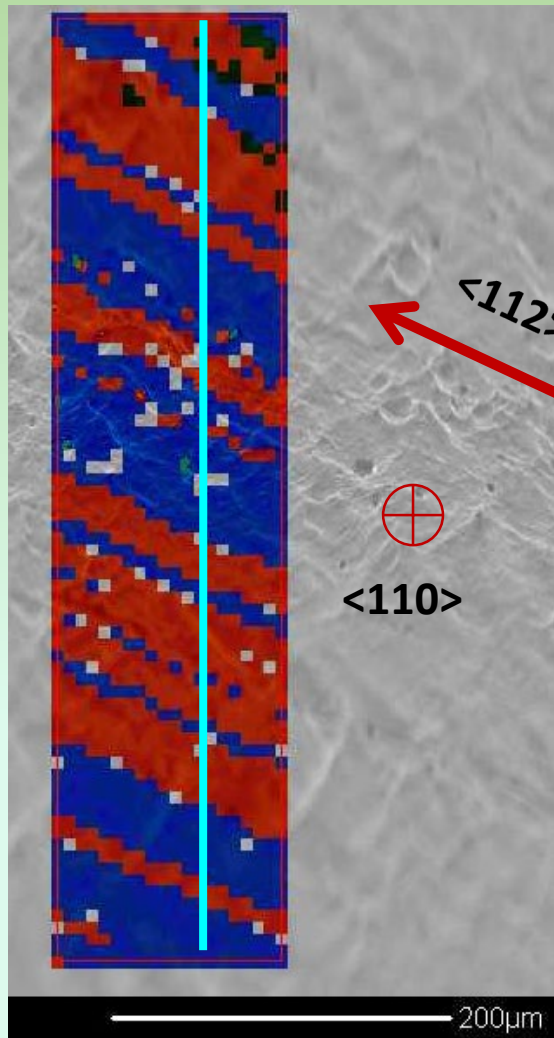
(110)



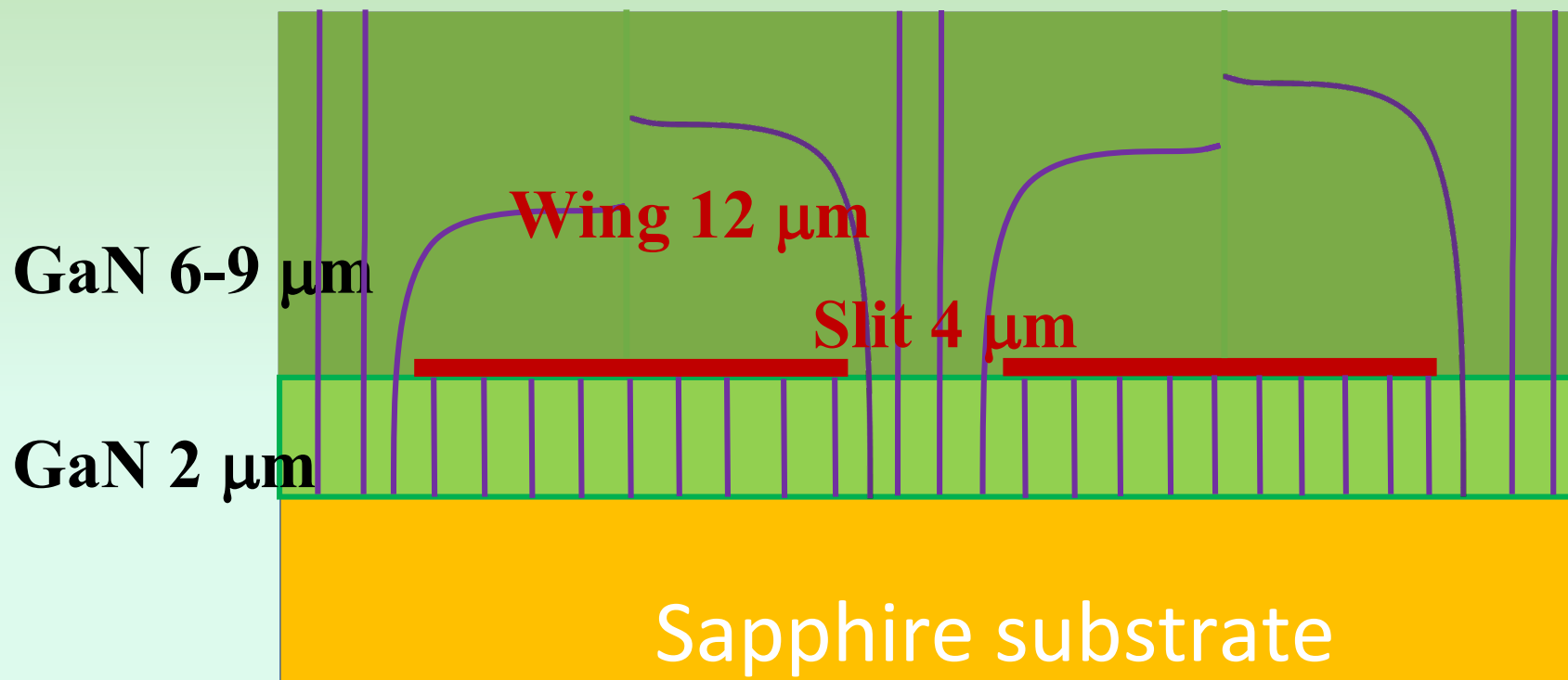
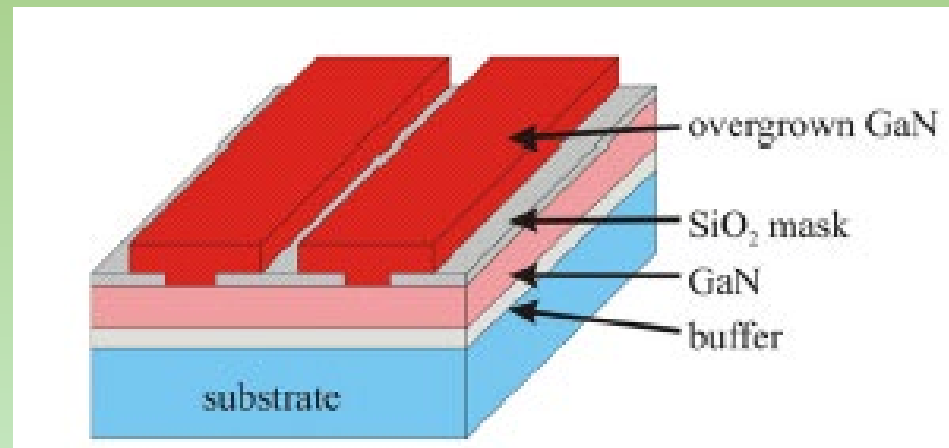
Ориентация зерен в ленте Si



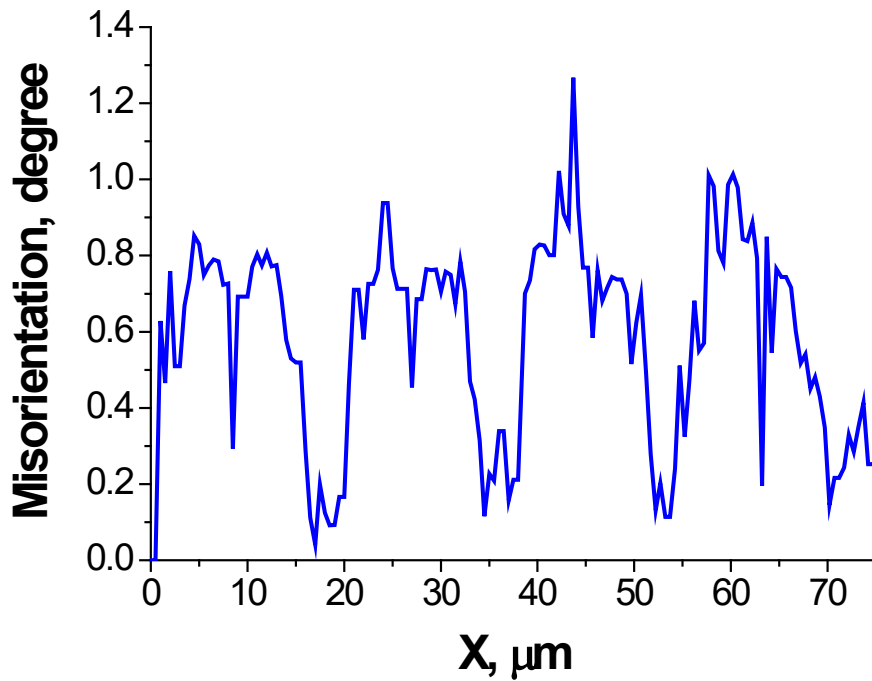
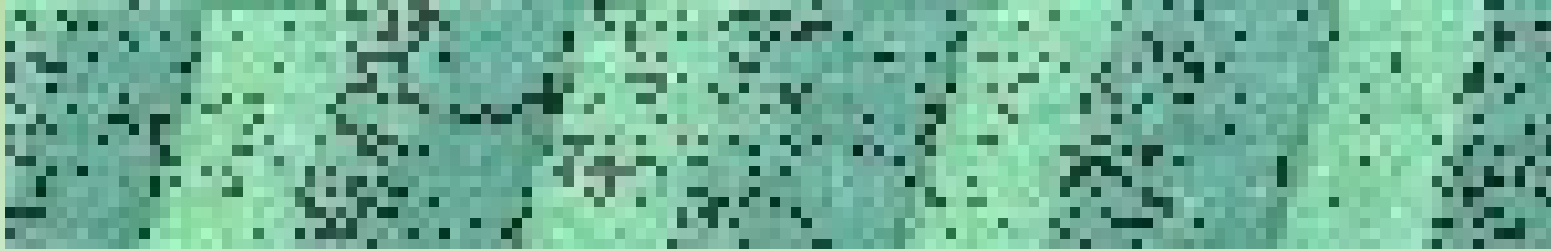
Разориентация зерен



ELOG GaN

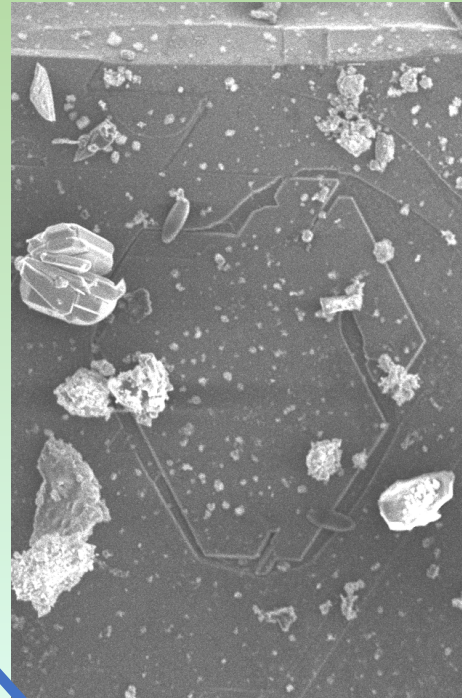
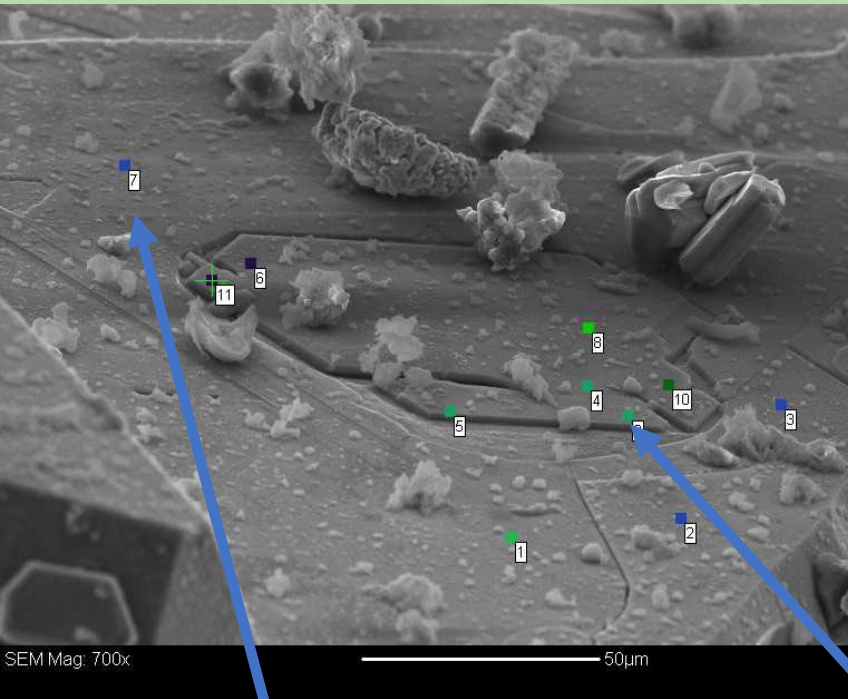


ELOG GaN

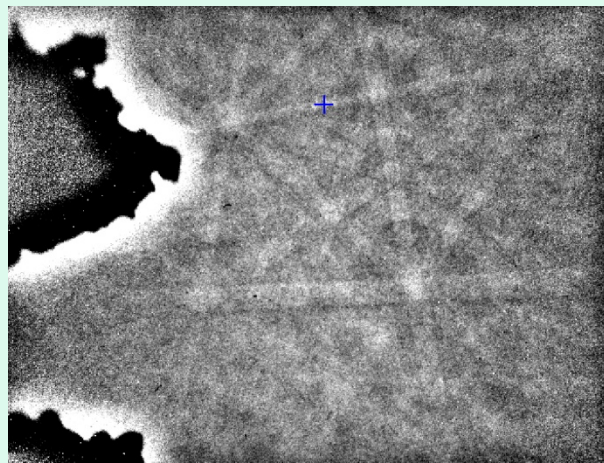


**Electron backscatter
diffraction map and the
corresponding misorientation
profile**

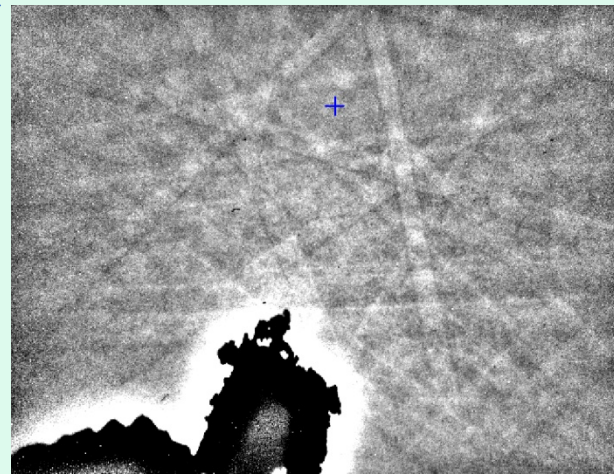
Дифракция обратно рассеянных электронов



CL

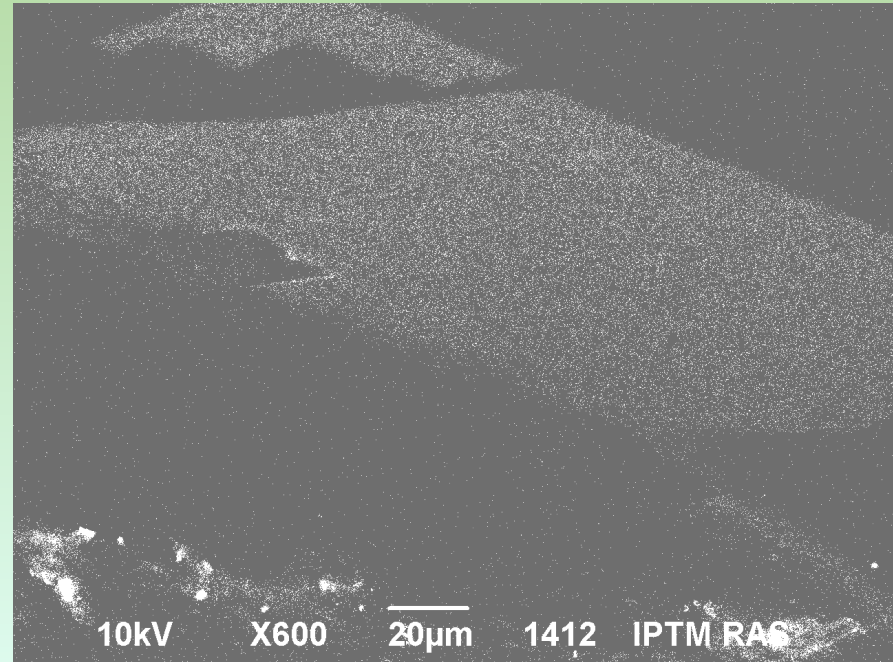


3C-SiC



6H-SiC

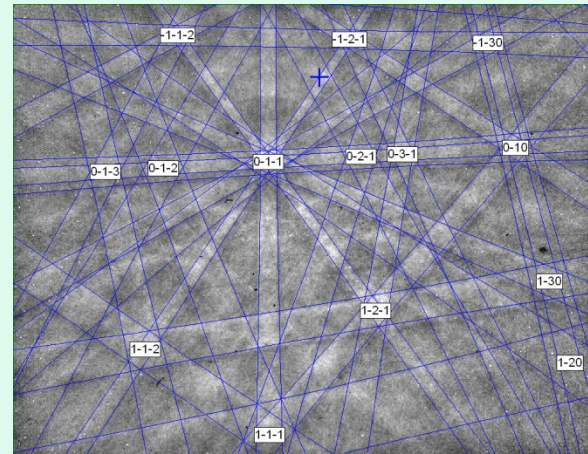
Дифракция обратно рассеянных электронов



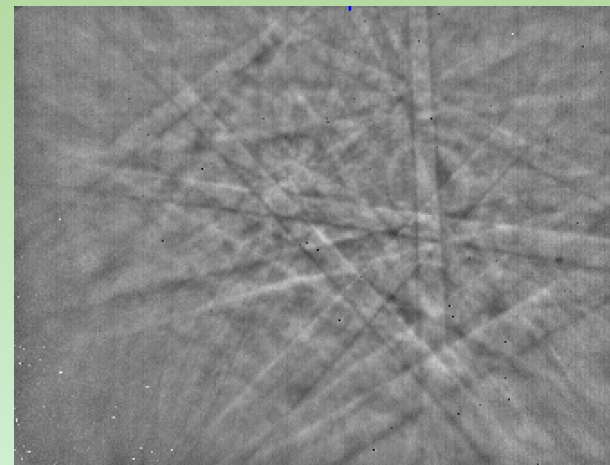
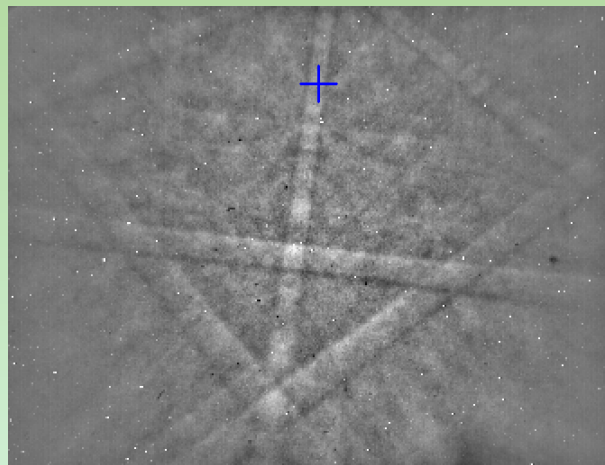
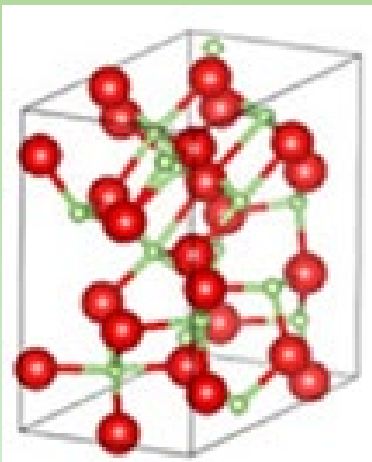
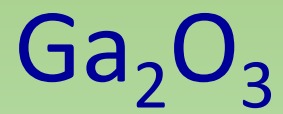
CL



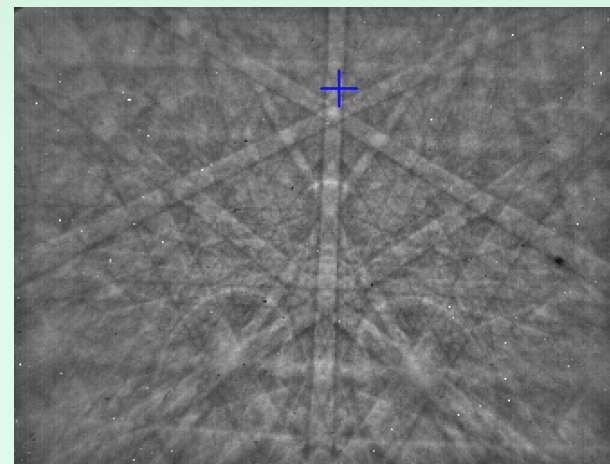
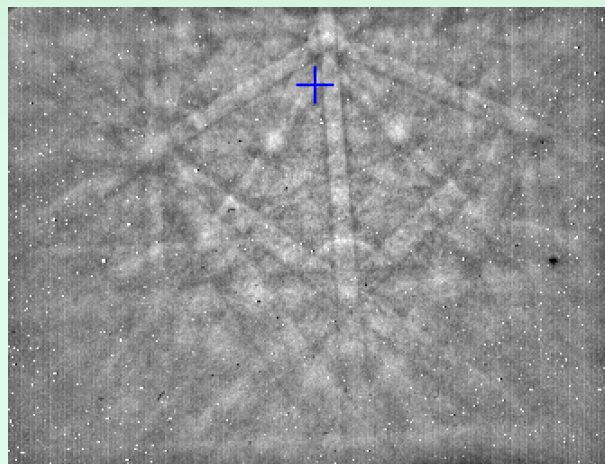
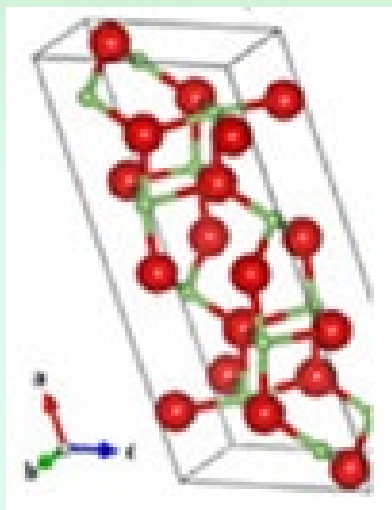
3C-SiC



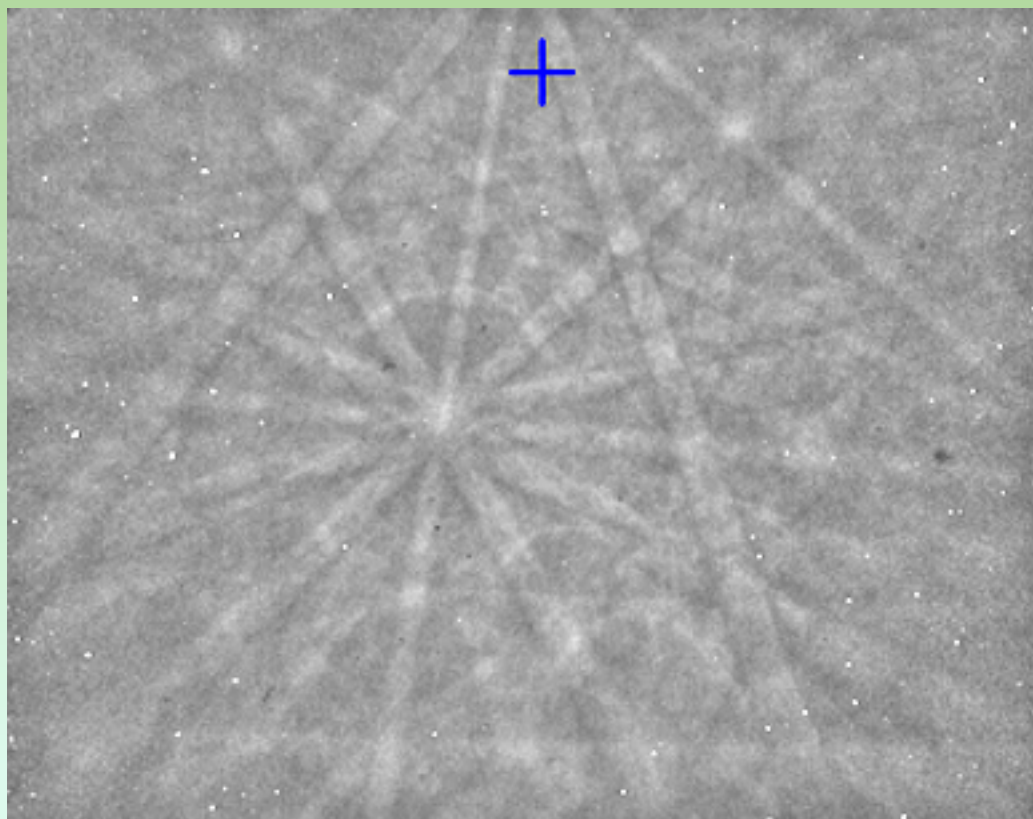
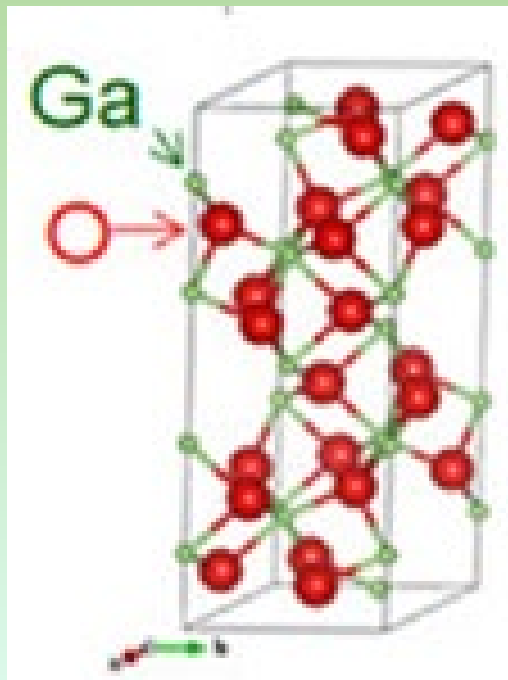
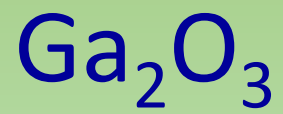
4H-SiC



α-Ga₂O₃, орторомбический

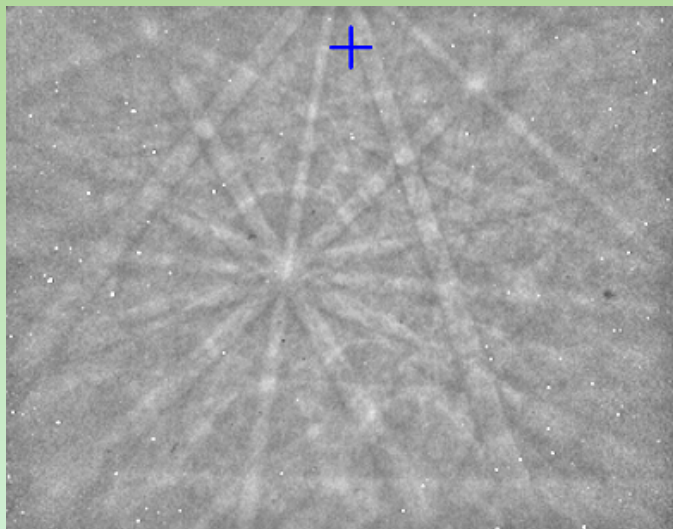


β-Ga₂O₃, моноклинный

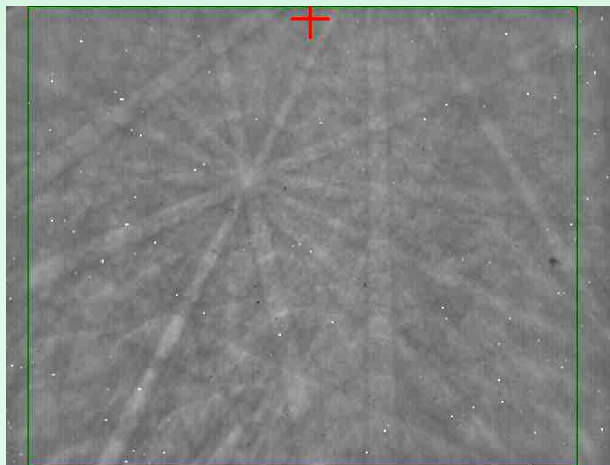
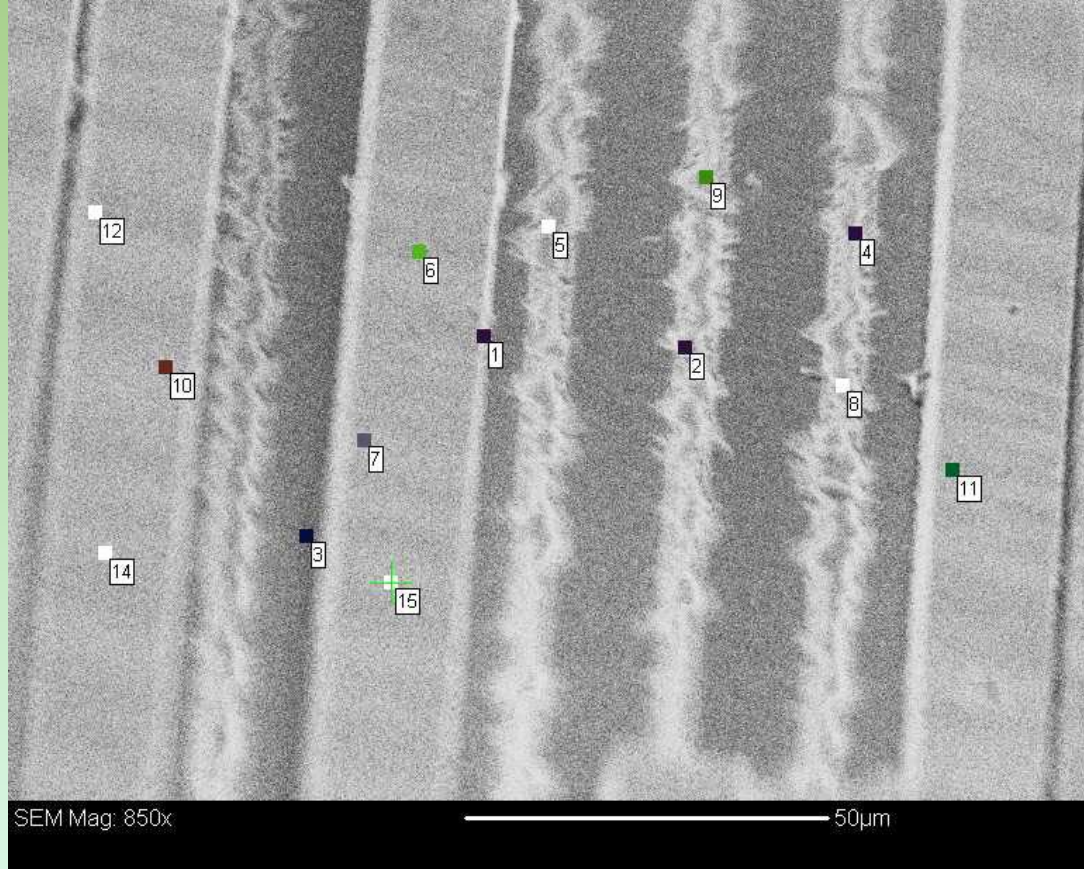


α - Ga_2O_3 , ромбоэдрический

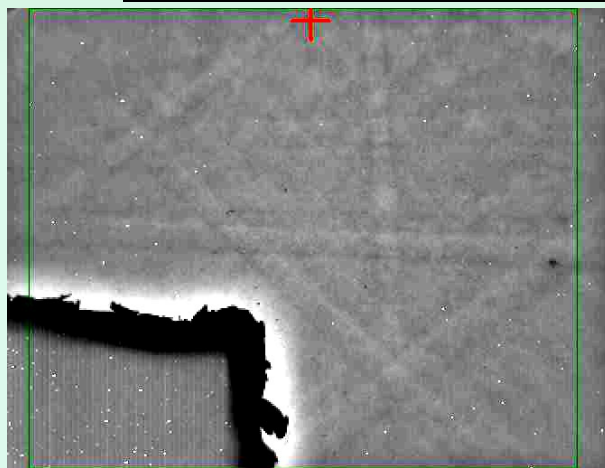
ELOG Ga_2O_3



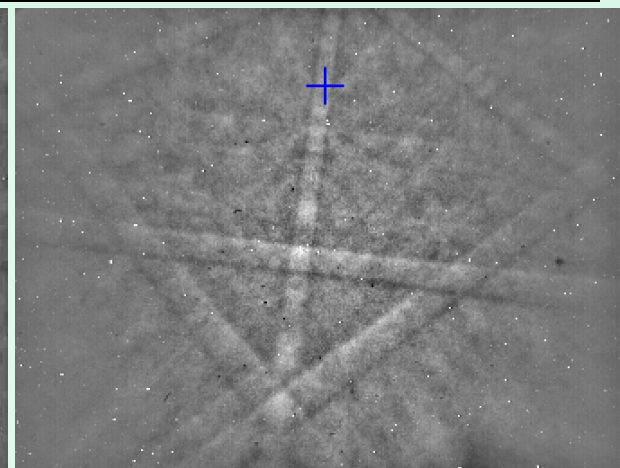
$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$
ромбоэдрический



6,9

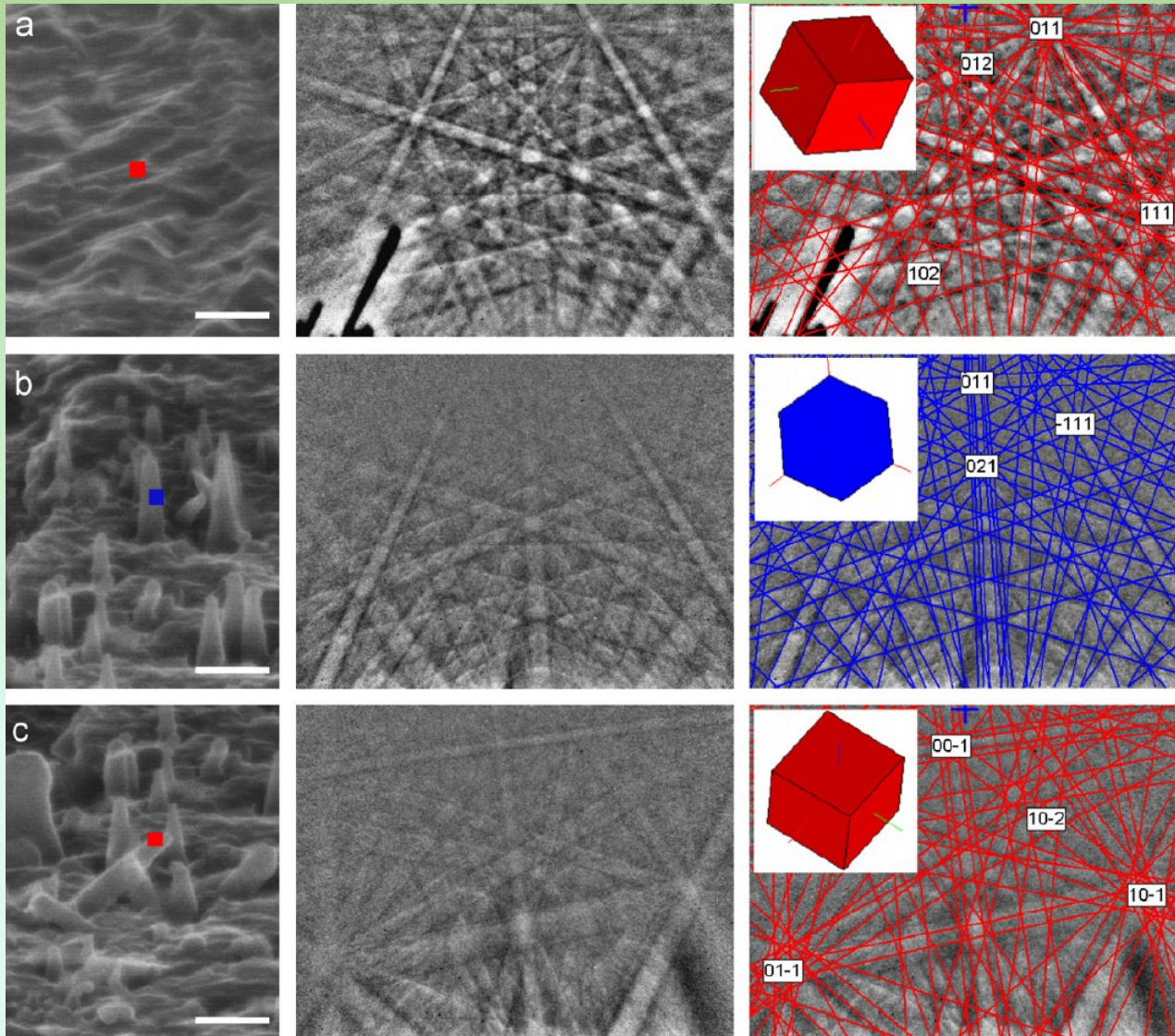


7,12



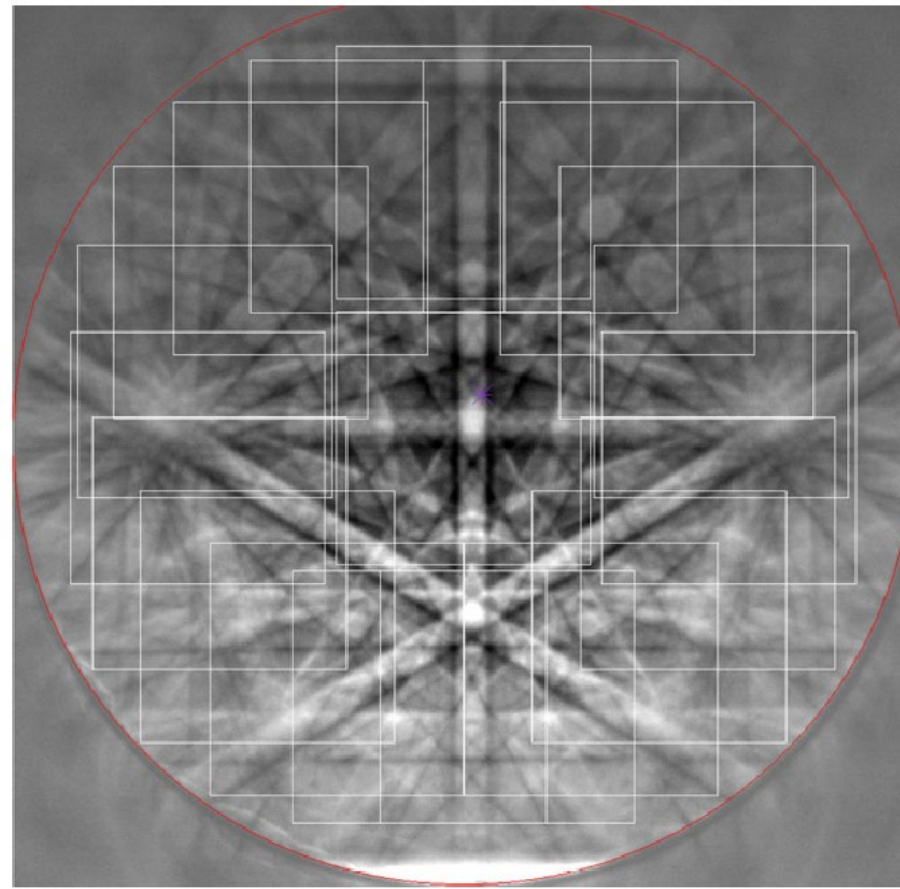
$\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Наностолбики GaAs



S.V. Prikhodko
et al,
Ultramicroscopy.
109, 133, 2008

Высокочувствительные измерения деформаций и вращений решетки

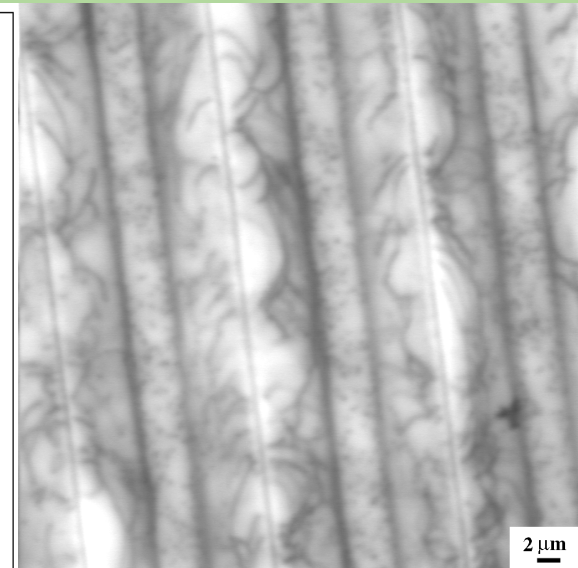
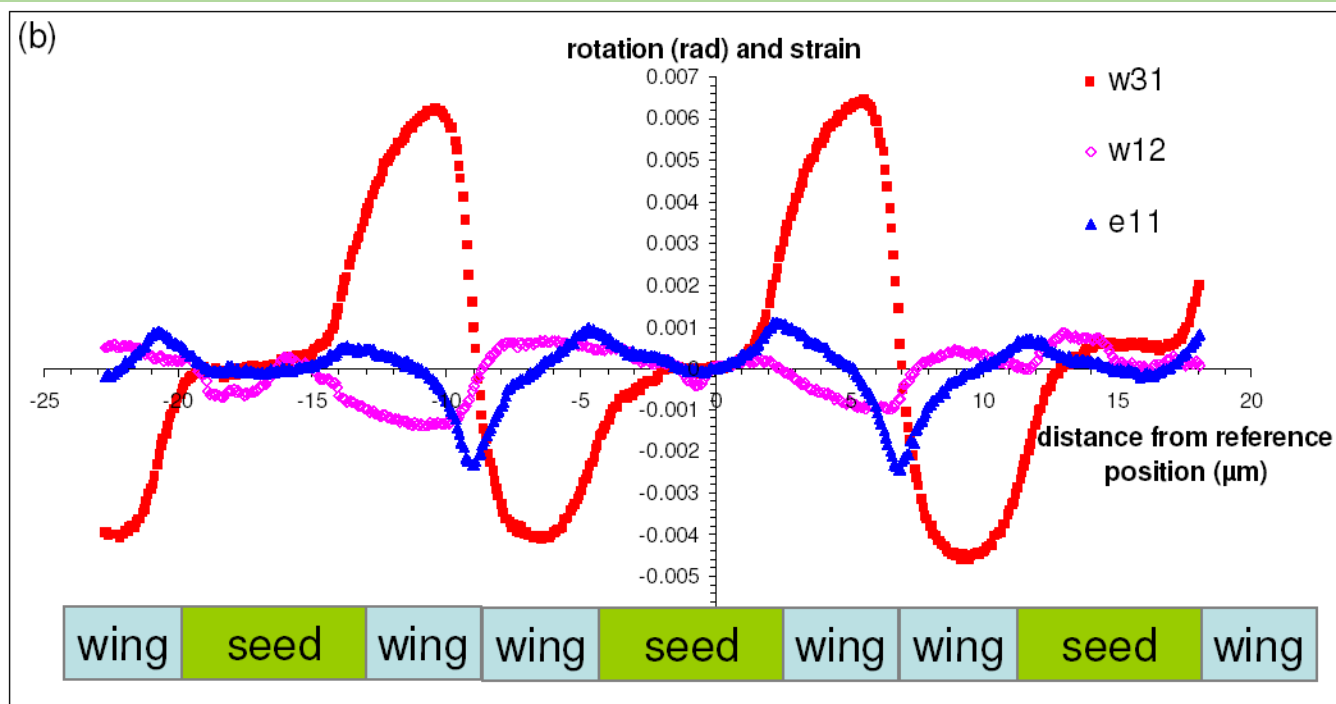


Деформации до
 10^{-4}

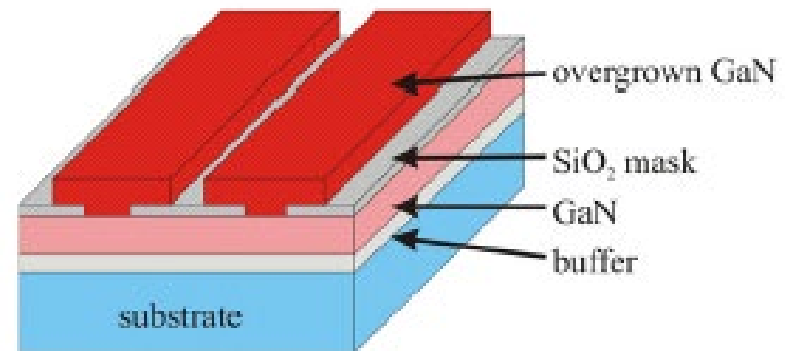
Вращение до
 0.006°

Сравнение 20-50 фрагментов дифракционных картин с реперной картиной методами кросс-корреляции

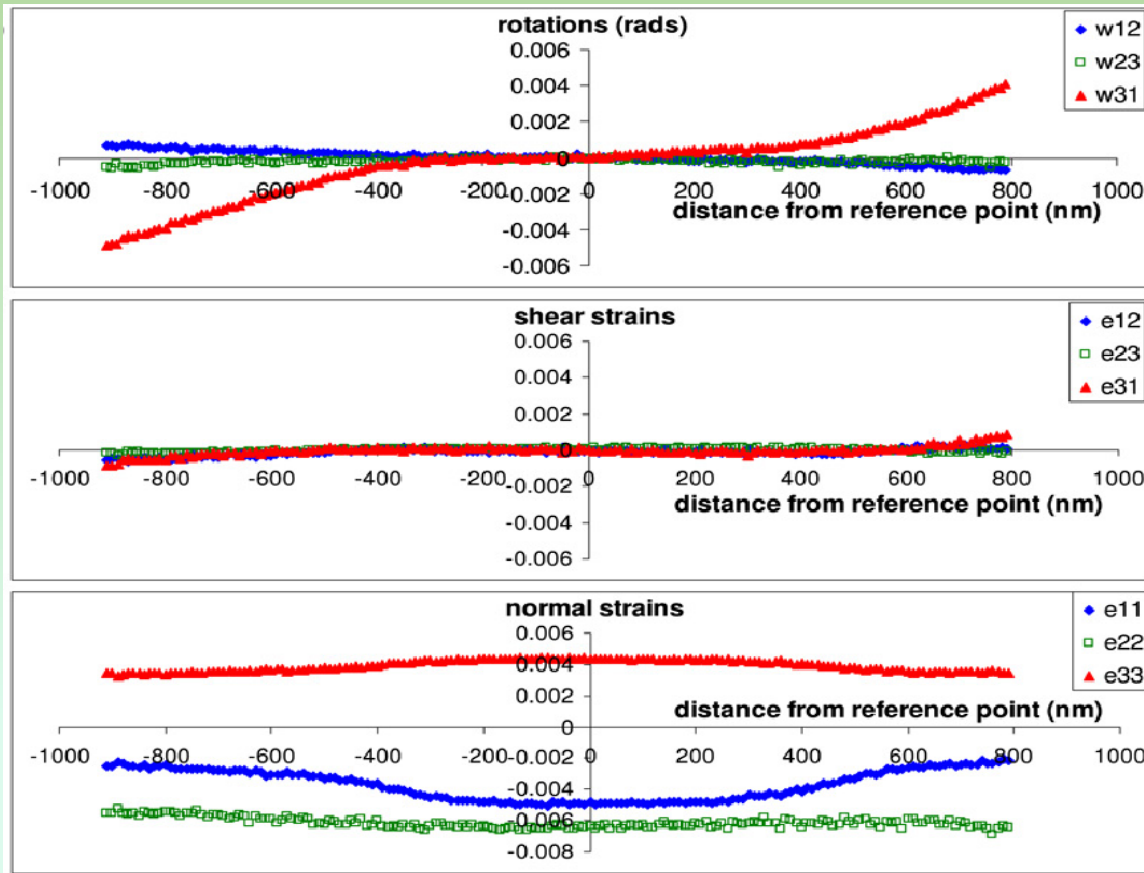
ELOG GaN



Angus J. Wilkinson, J. Physics:
Conference Series 326 (2011) 012004



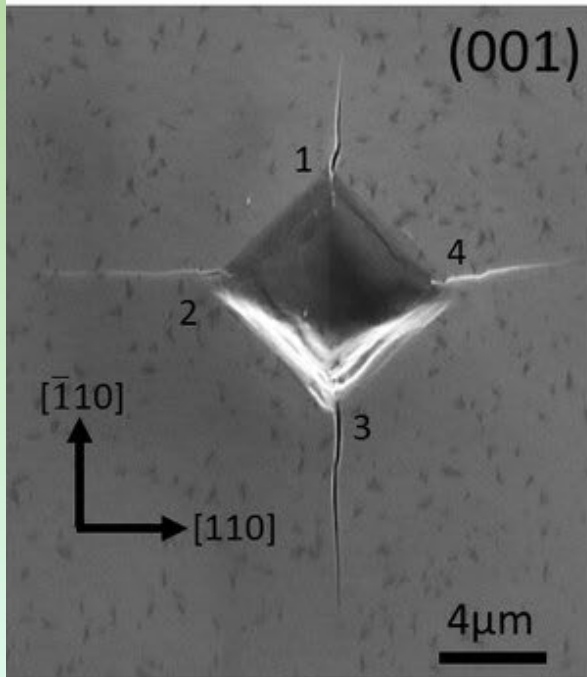
200 нм $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}/\text{Si}$



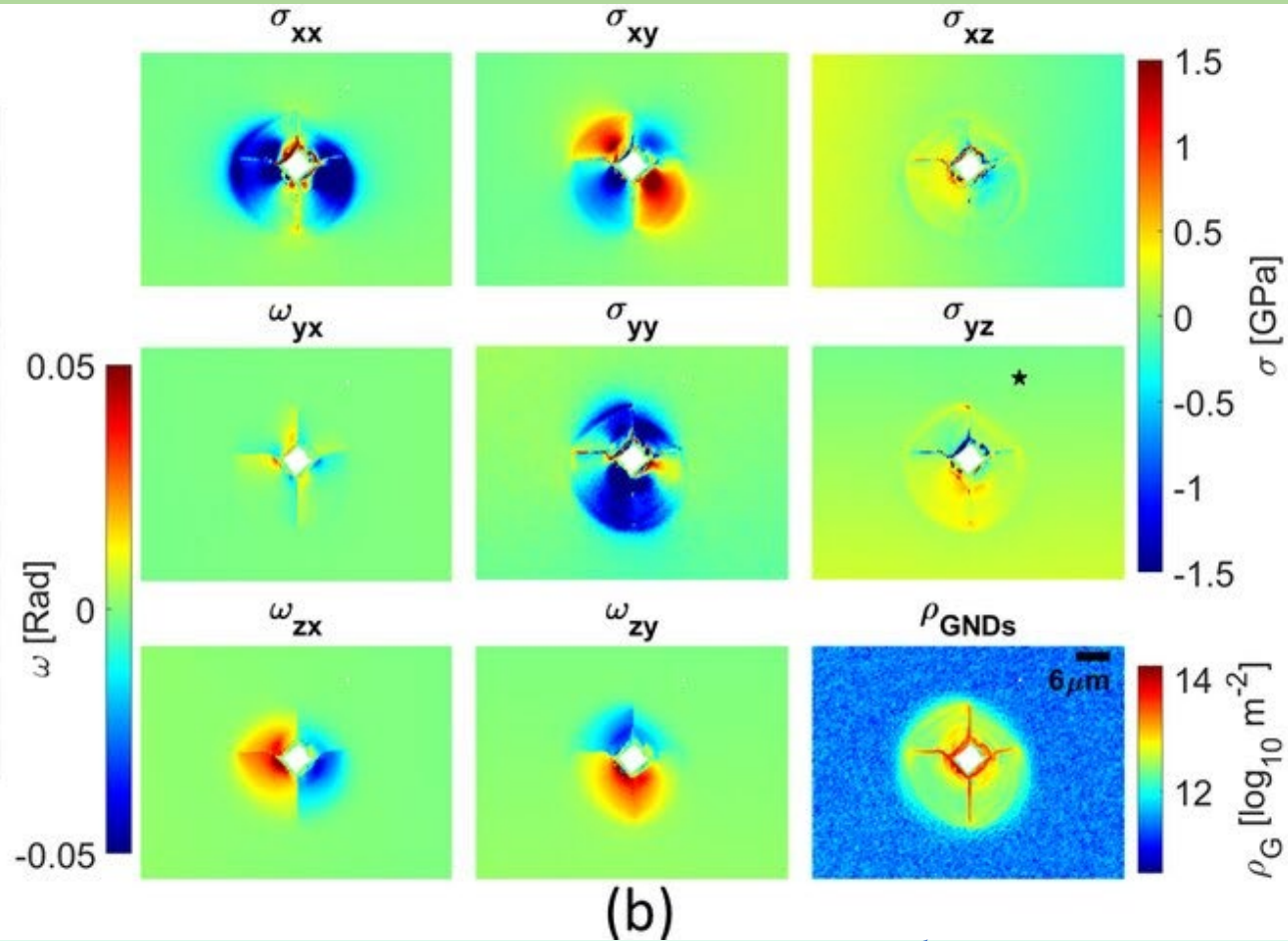
распределение поворотов и деформаций решетки в прямоугольной мезоструктуре шириной 2 мкм

Angus J. Wilkinson, Graham Meaden, David J. Dingley,
Superlattices and Microstructures 45 (2009) 285294

Определение компонент напряжений



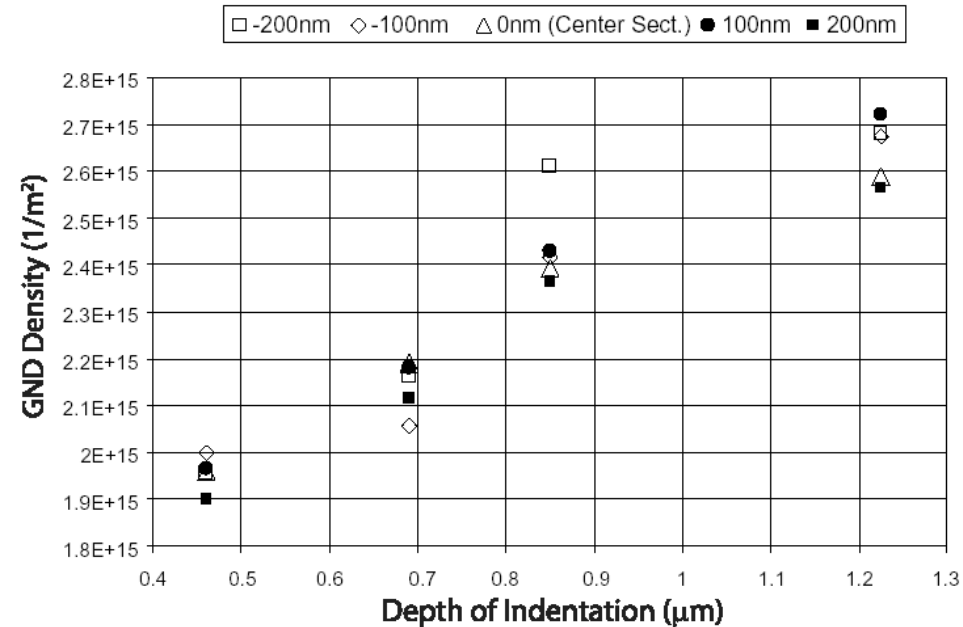
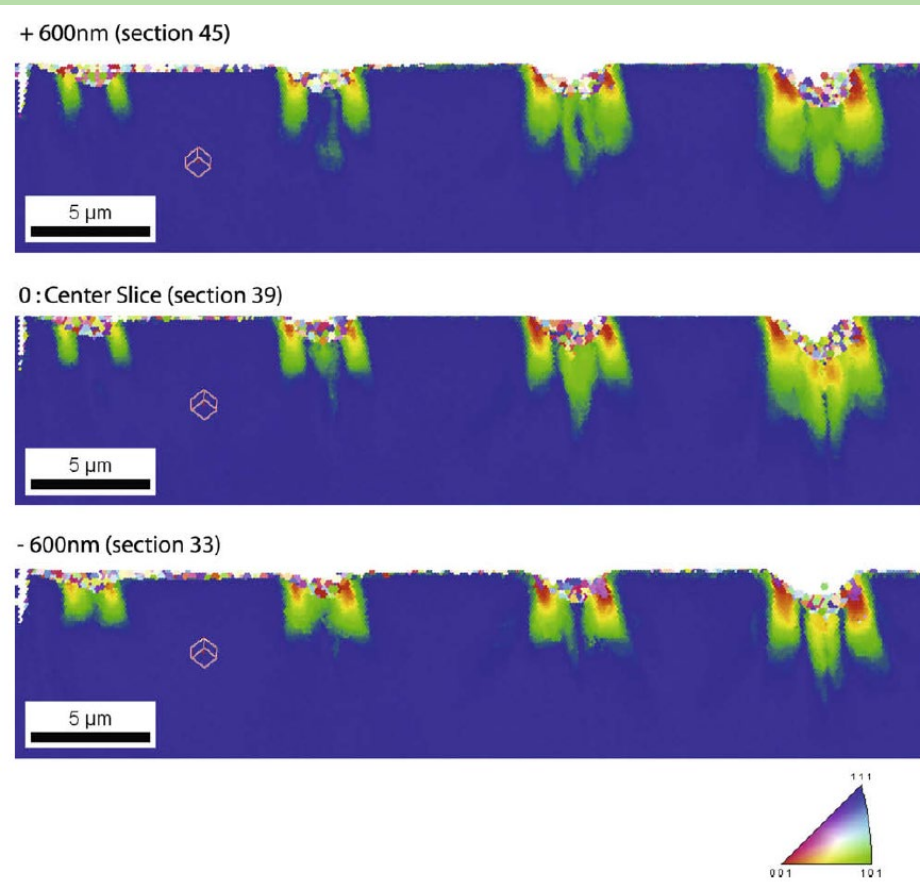
(a)



(b)

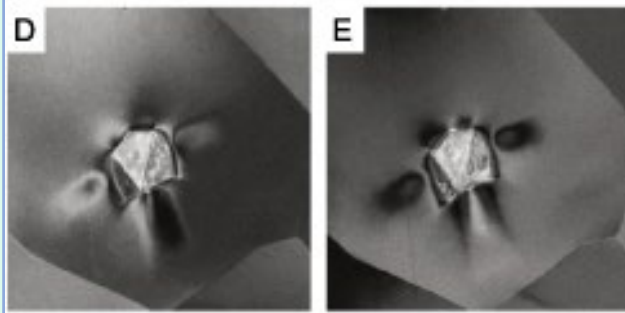
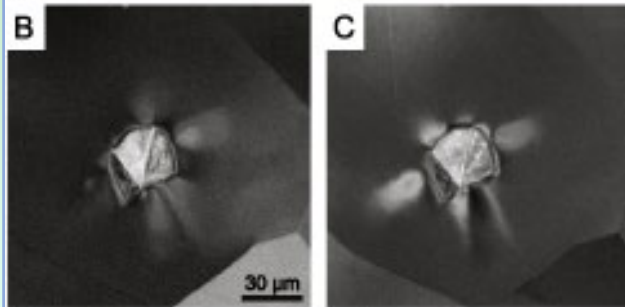
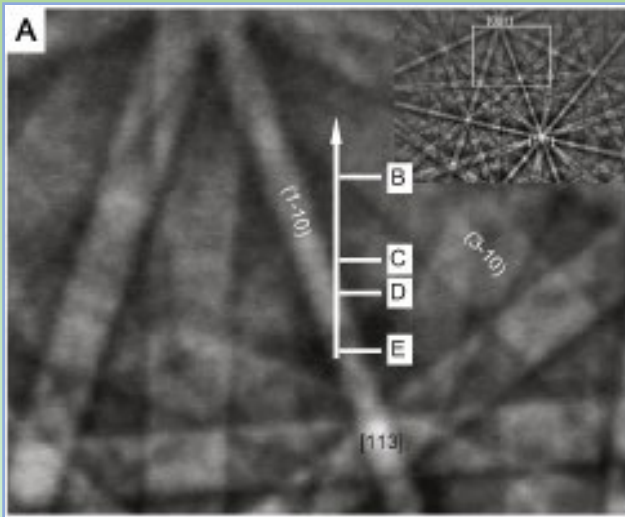
Геометрически необходимые дислокации

Индентирование Си (геометрически необходимые дислокации)



Eralp Demir, Dierk Raabe, Nader Zaafarani, Stefan Zaefferer, Acta Materialia 57 (2009) 559–569

Новый метод - темнопольный EBSD



**Отпечаток
индентора на
железе**

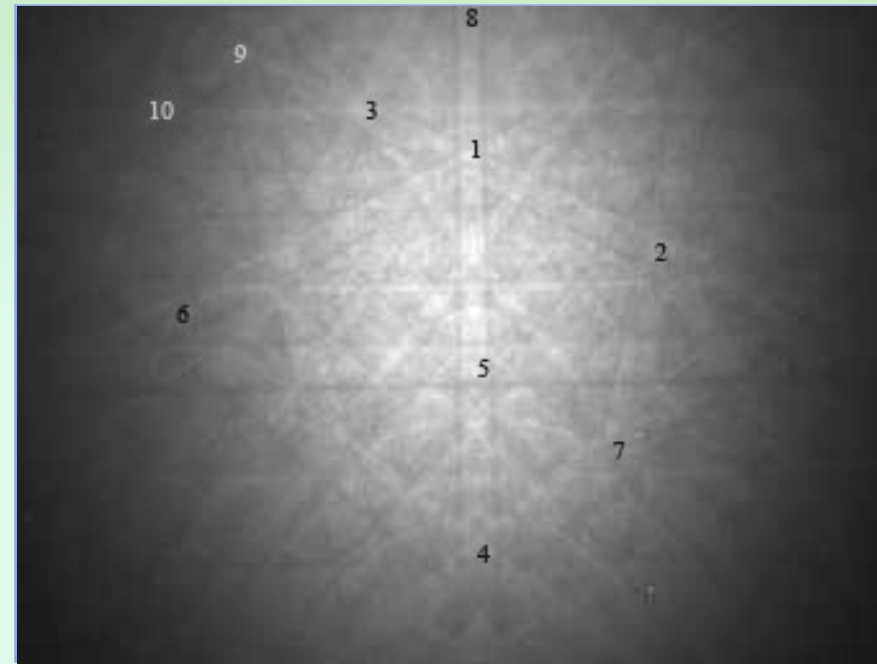
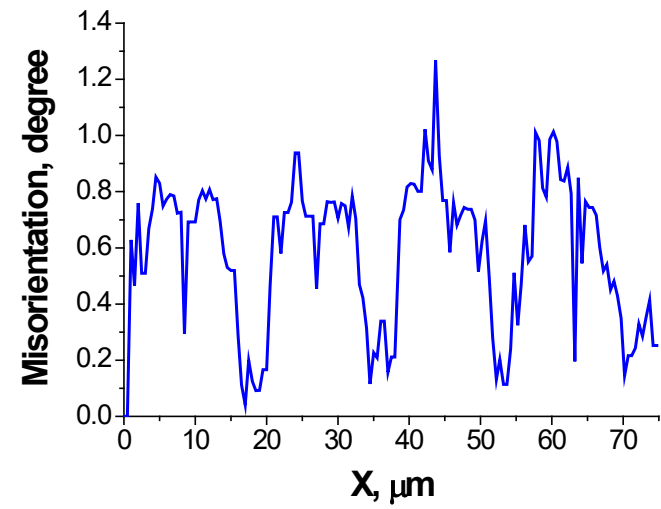
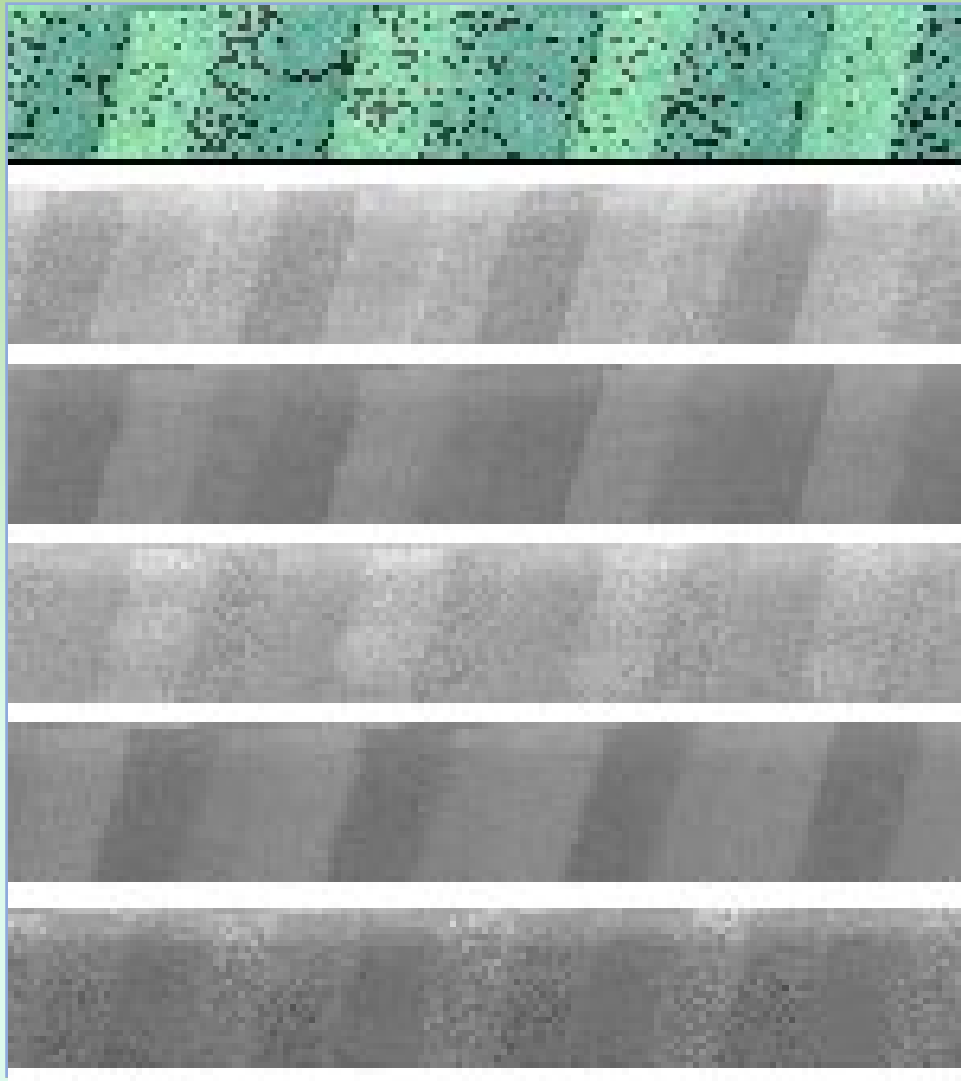
**N. Brodusch, H. Demers,
R. Gauvin.**

**Ultramicroscopy, 148,
123–131, 2015**

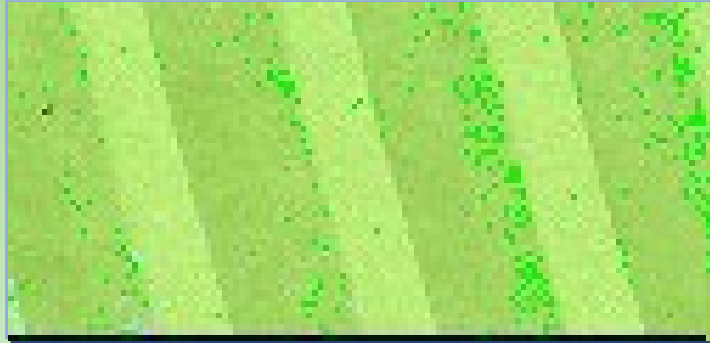
**Возможность
использования большого
количества отражений.**

**Позволяет лучше
выявлять мелкие зерна**

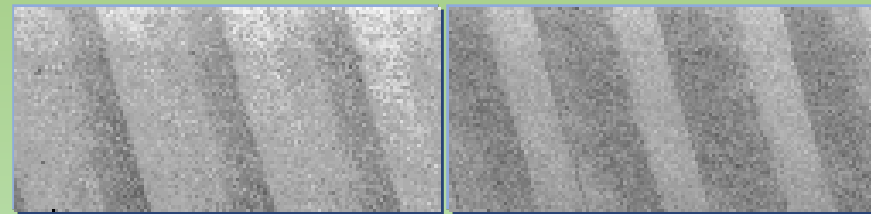
EBSD DF



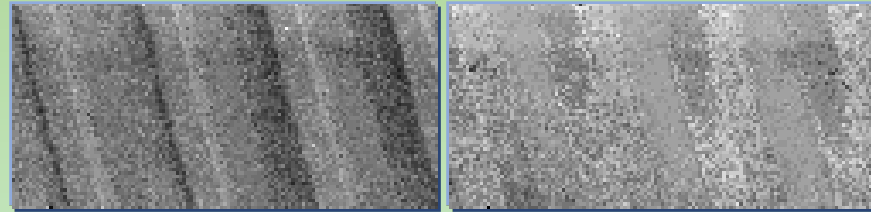
EBSD DF



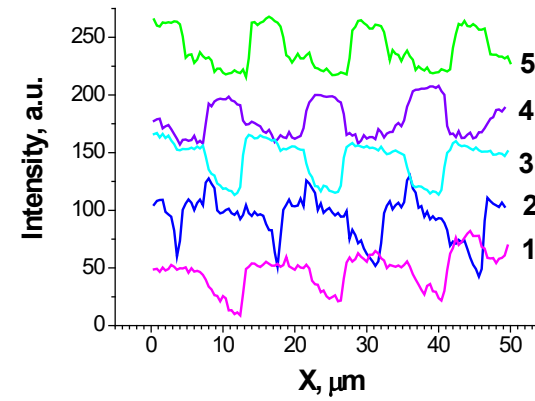
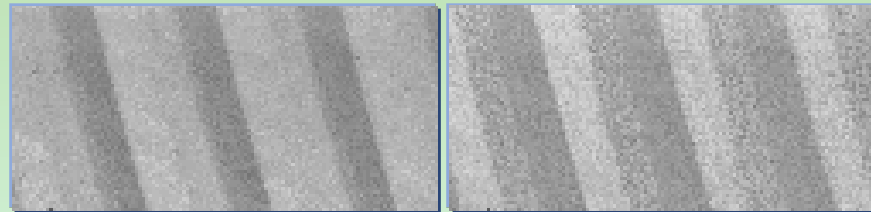
1



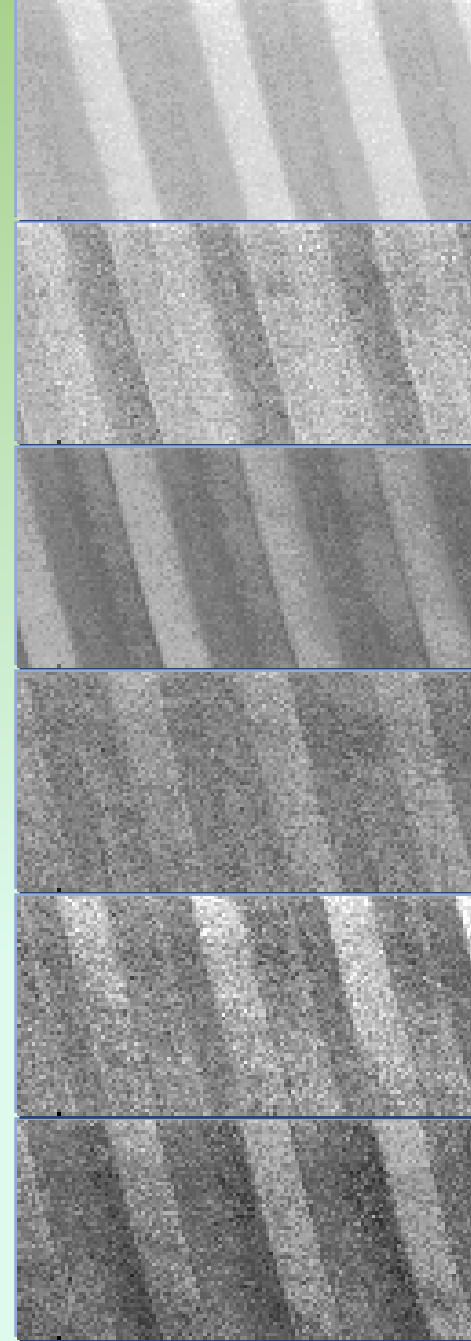
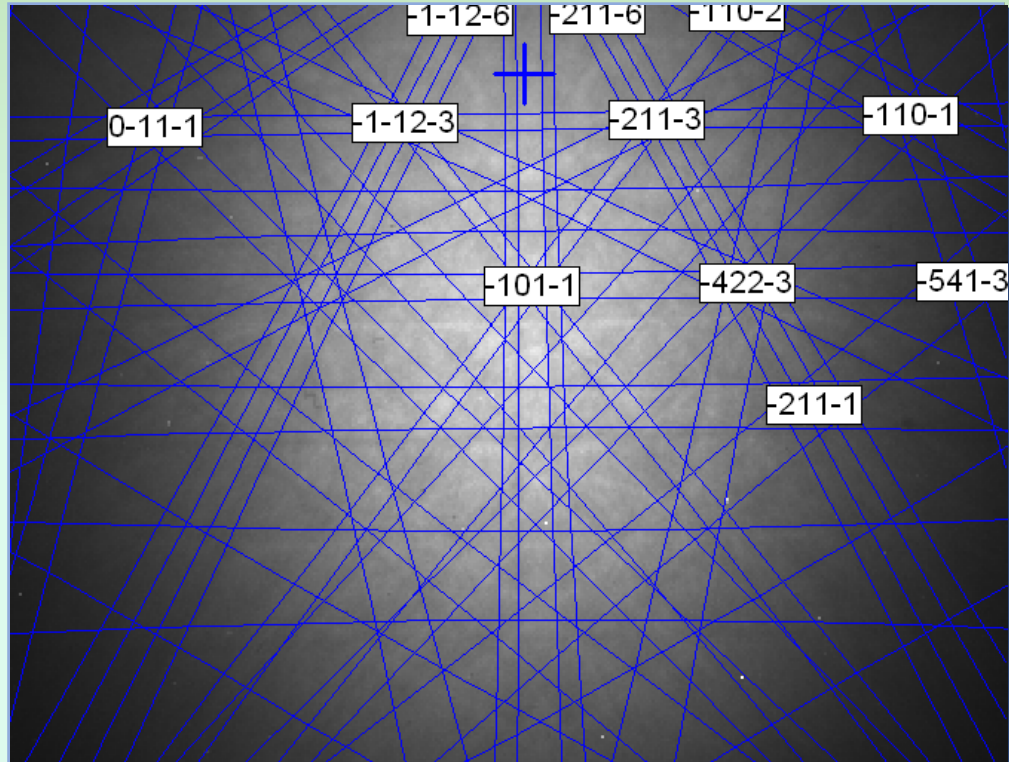
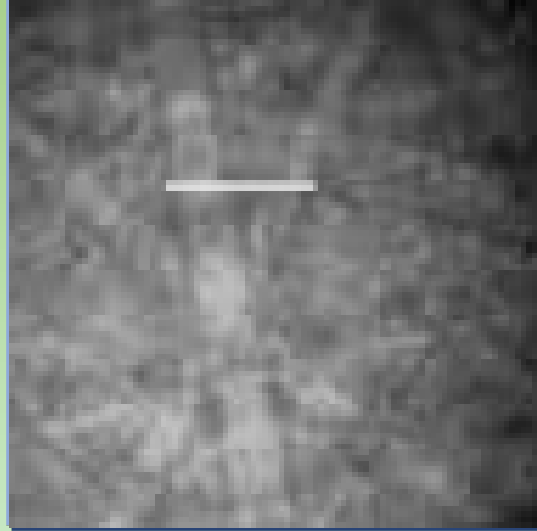
2



3



EBSD DF

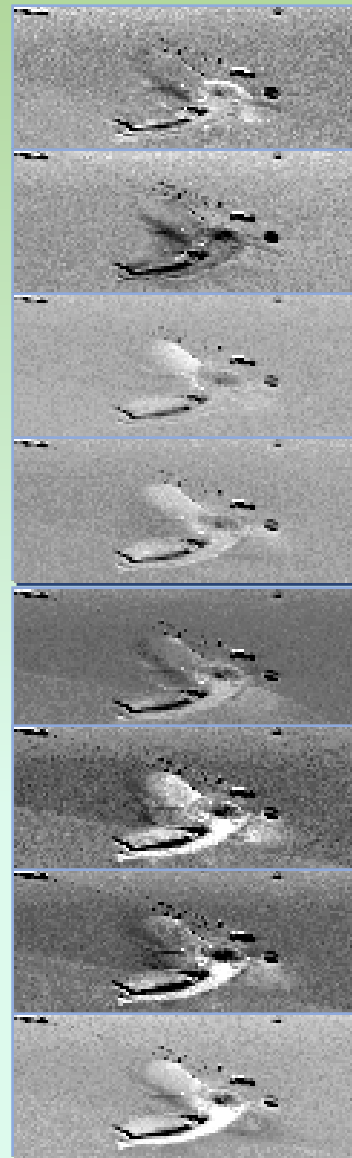


EBSD DF



Отпечаток
индентора на SiC

Ширина
изображения 80 мкм



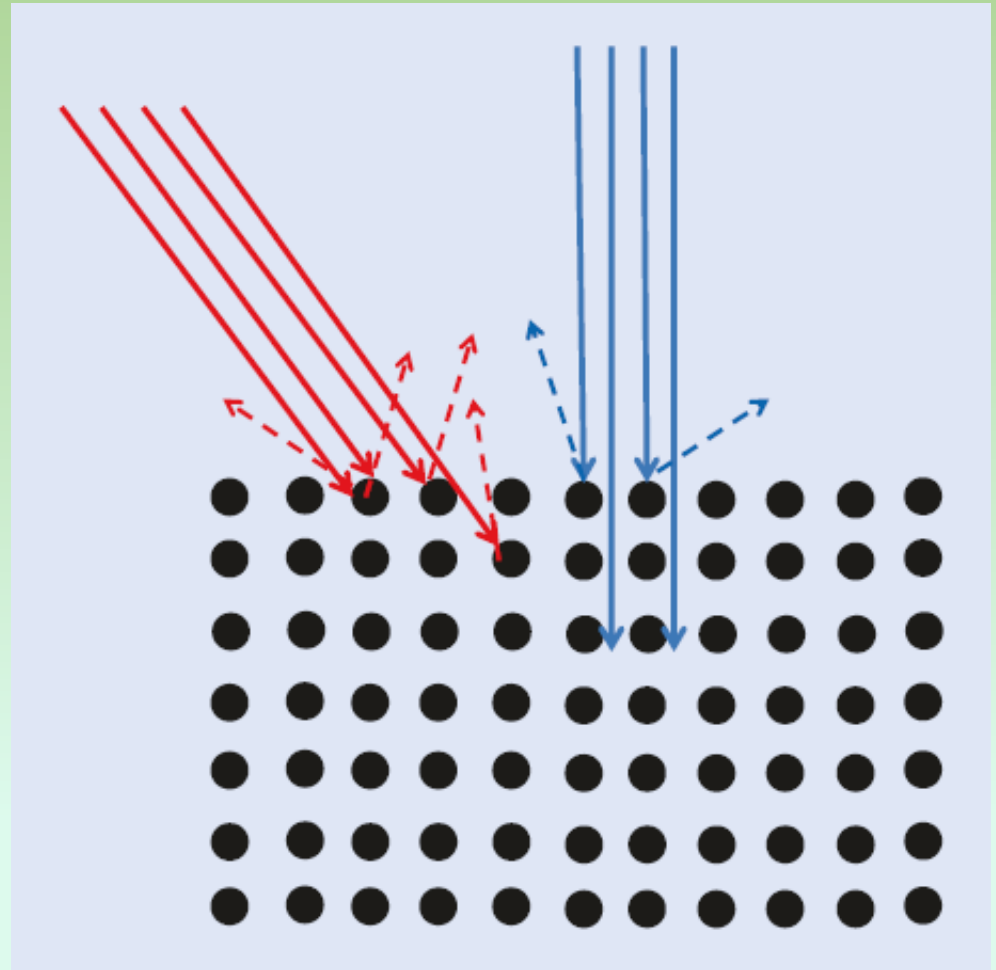
Режим каналирования

Контраст изменяется при
угле Брэгга

$$n\lambda = 2d \sin \theta_B$$

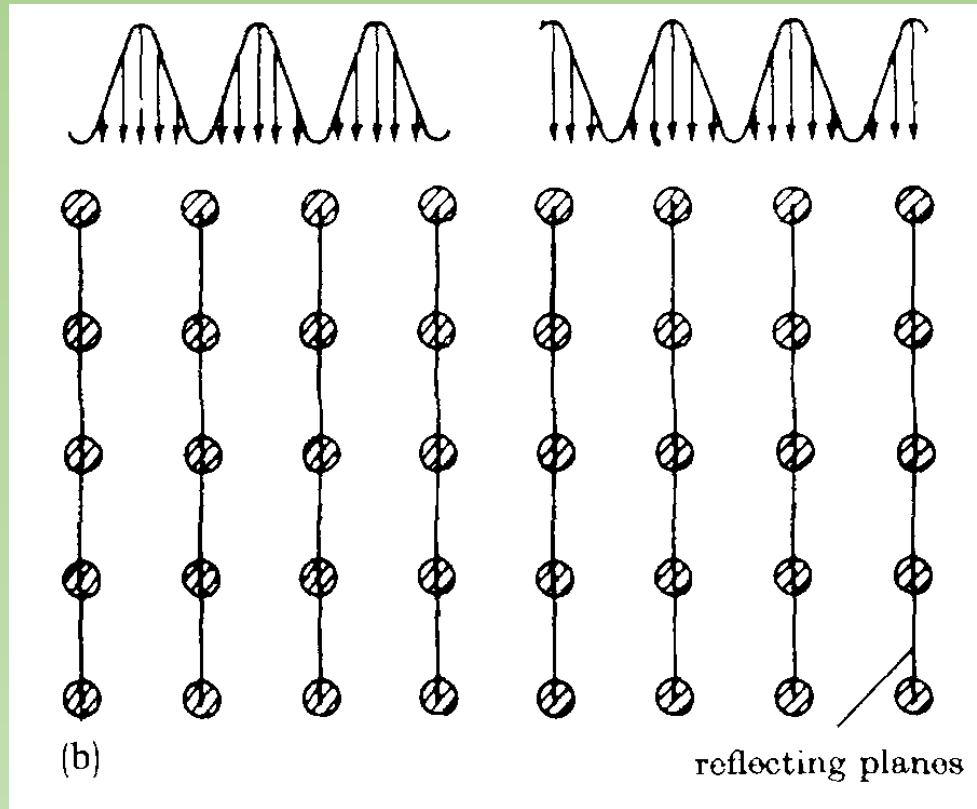
$$\lambda_e = h/p$$

При 15 кэВ $\lambda_e = 0.00994$ нм



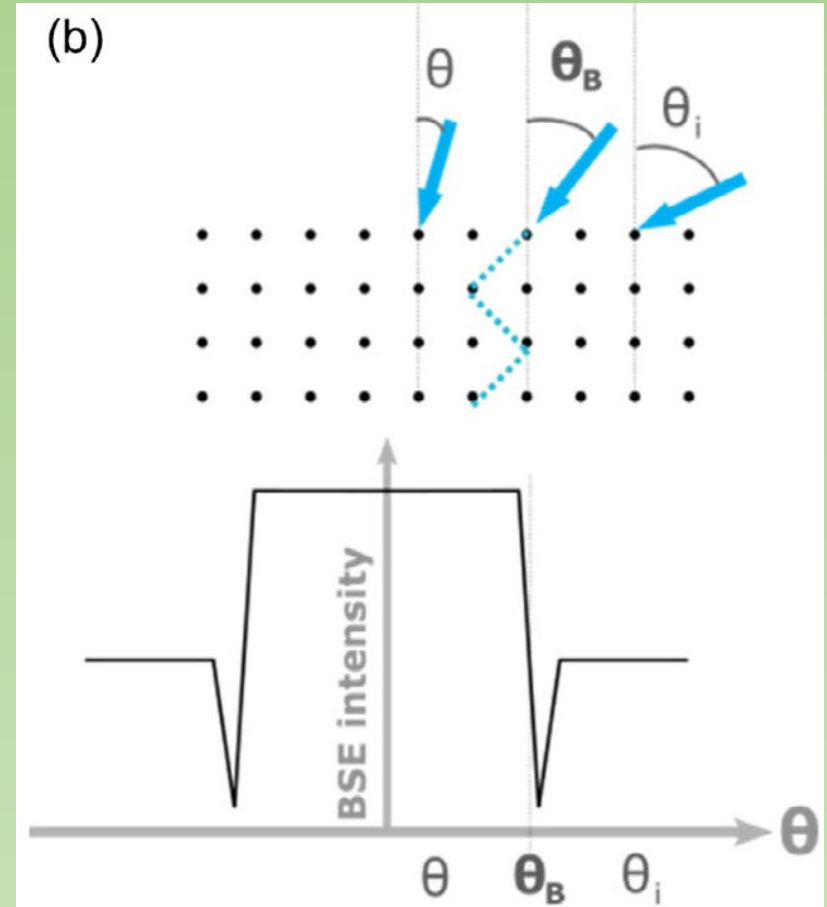
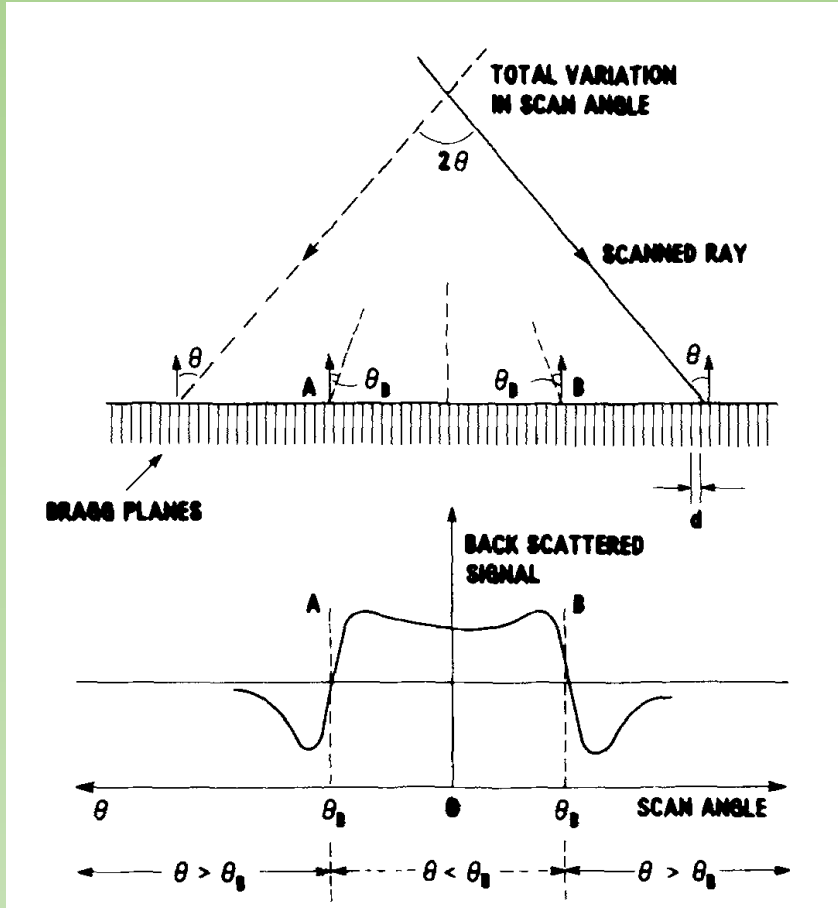
Контраст не превышает 2-5 %, т.к. электроны
быстро «забывают» свою траекторию

Режим каналирования



Поток электронов в кристалле можно описать блоховскими волновыми функциями. В простейшем случае его можно описать 2 волновыми функциями с максимумом интенсивности между плоскостями и максимумом на линии атомов.

Режим каналирования



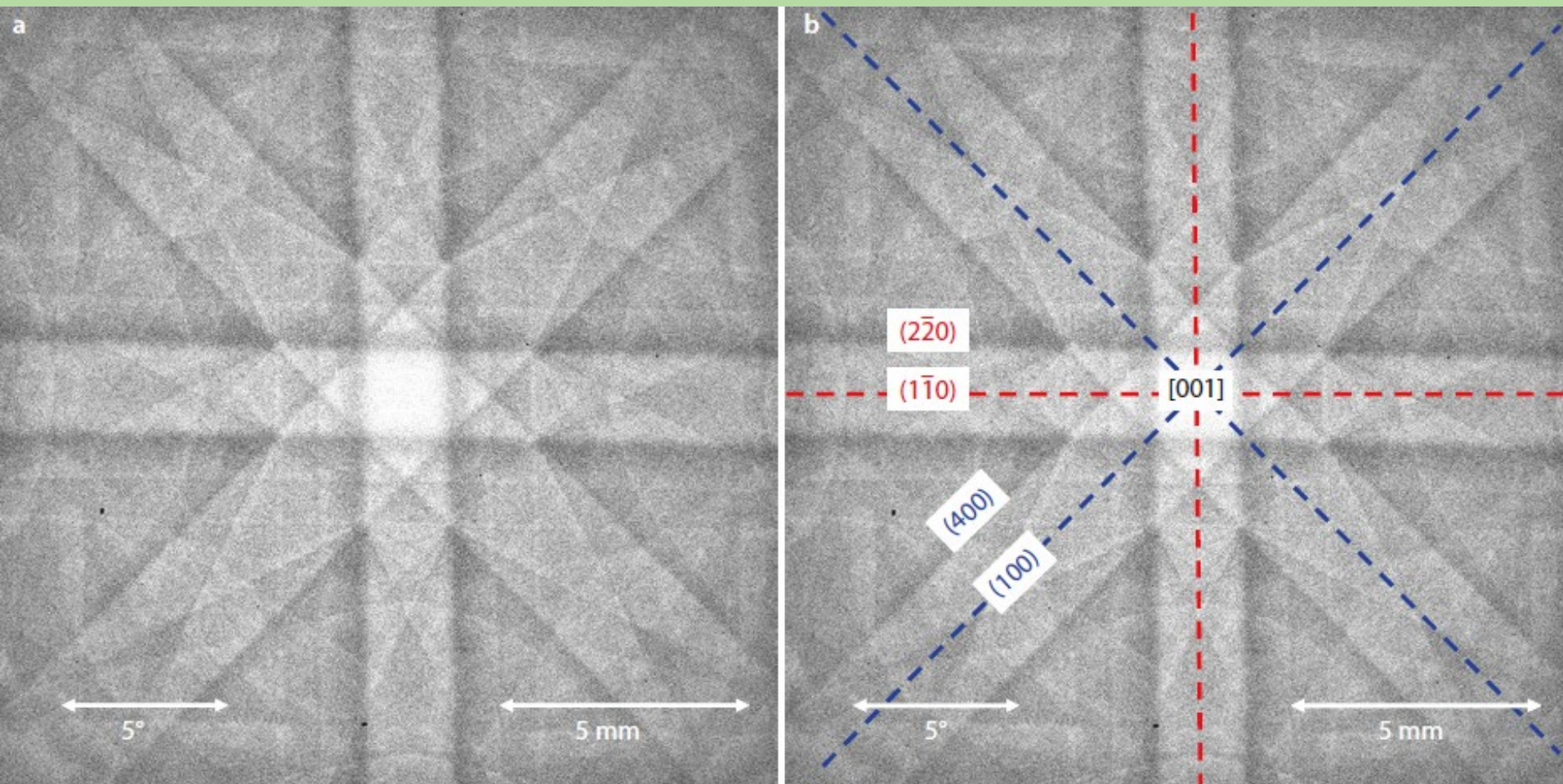
Когда угол падения равен углу Брегга, интенсивности двух волн равны. При $\theta > \theta_B$ интенсивность II волны меньше интенсивности I и отражается меньше электронов. При $\theta < \theta_B$ все наоборот.

Углы Брэгга для Si при 15 кэВ

Planes (hkl)	Spacing (nm)	θ_B (degrees)
111	0.314	0.908
220	0.192	1.48
311	0.164	1.74
400	0.136	2.10
422	0.111	2.57
511	0.105	2.72

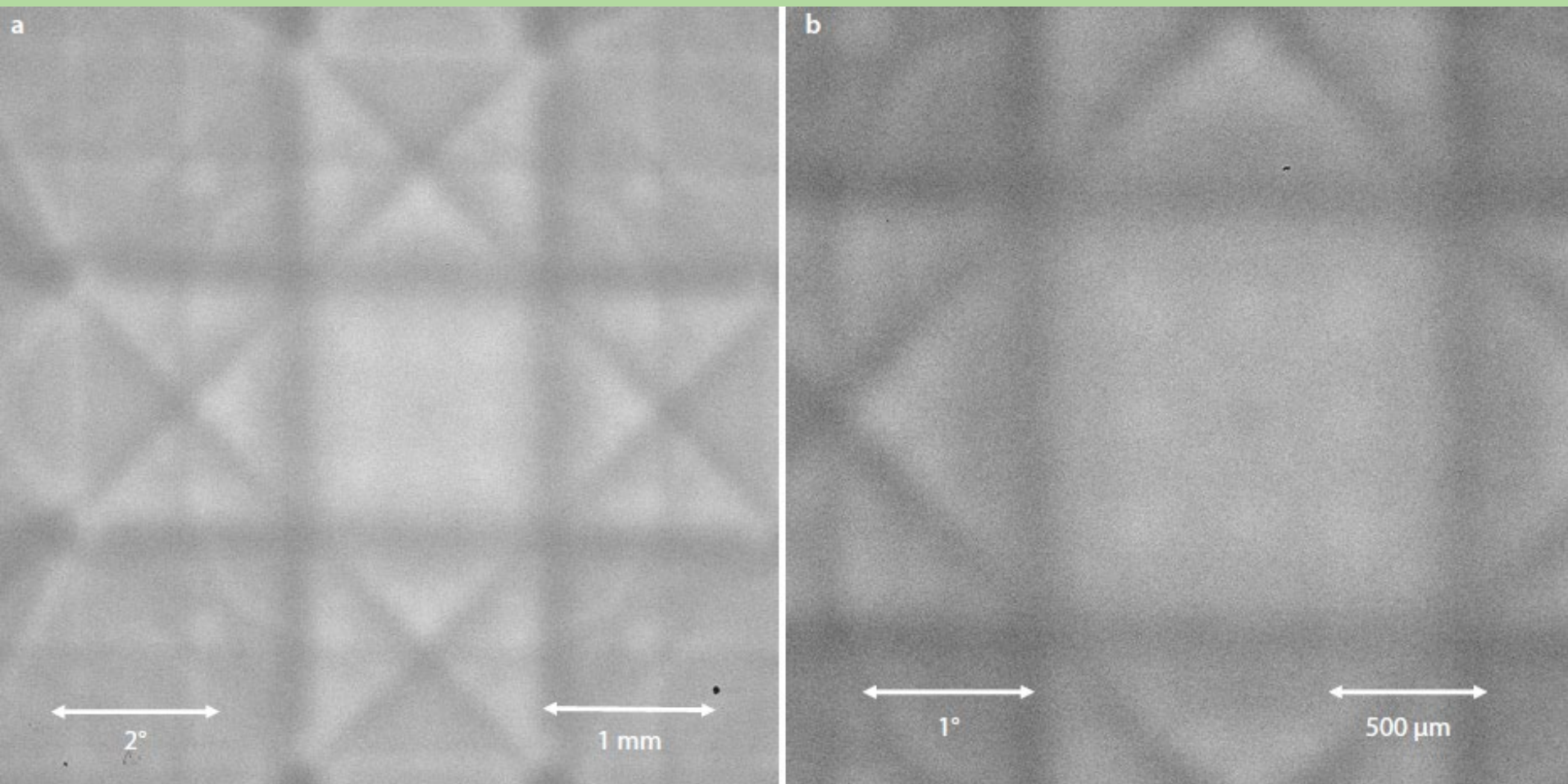
При рабочем расстоянии 10 мм и ширине области сканирования 2 мм угол падения изменяется в диапазоне $\pm 12^\circ$

Режим канализирования



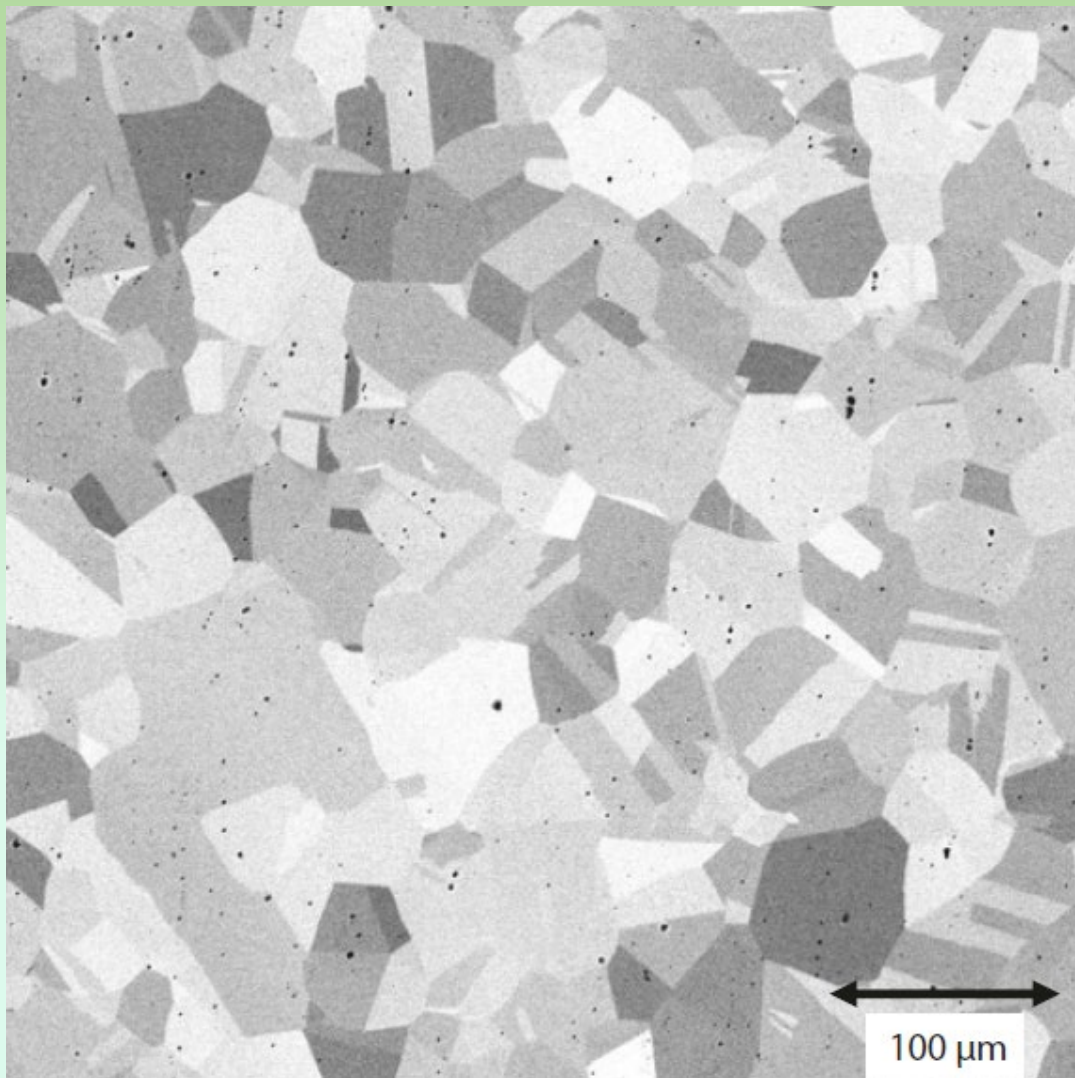
Si (001) при 15 кэВ

Режим каналирования



Повышение увеличения ограничивает диапазон углов

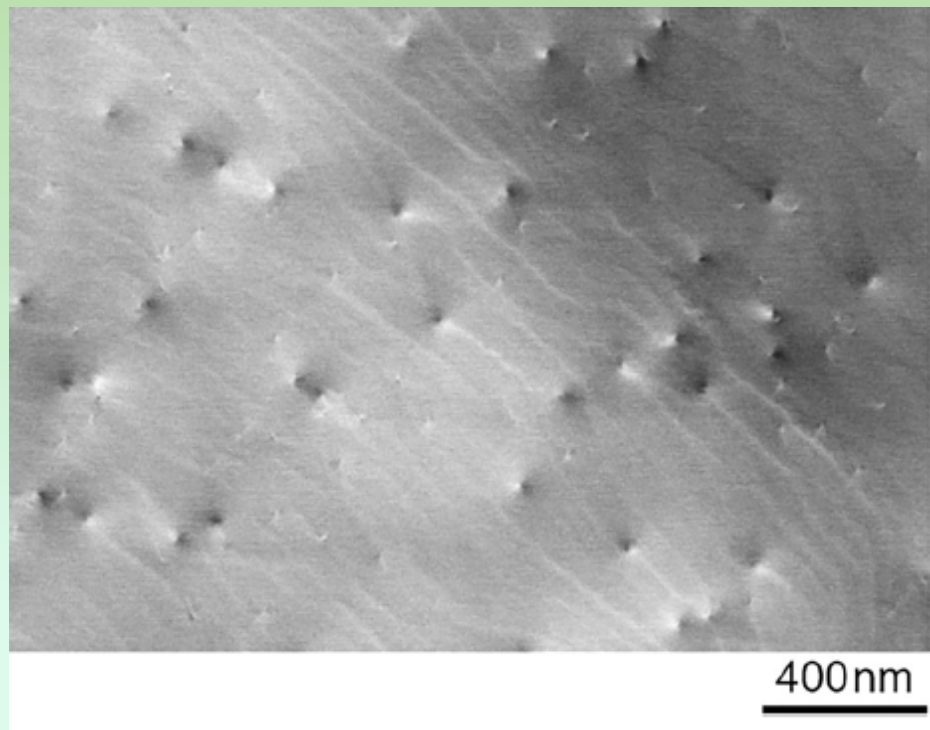
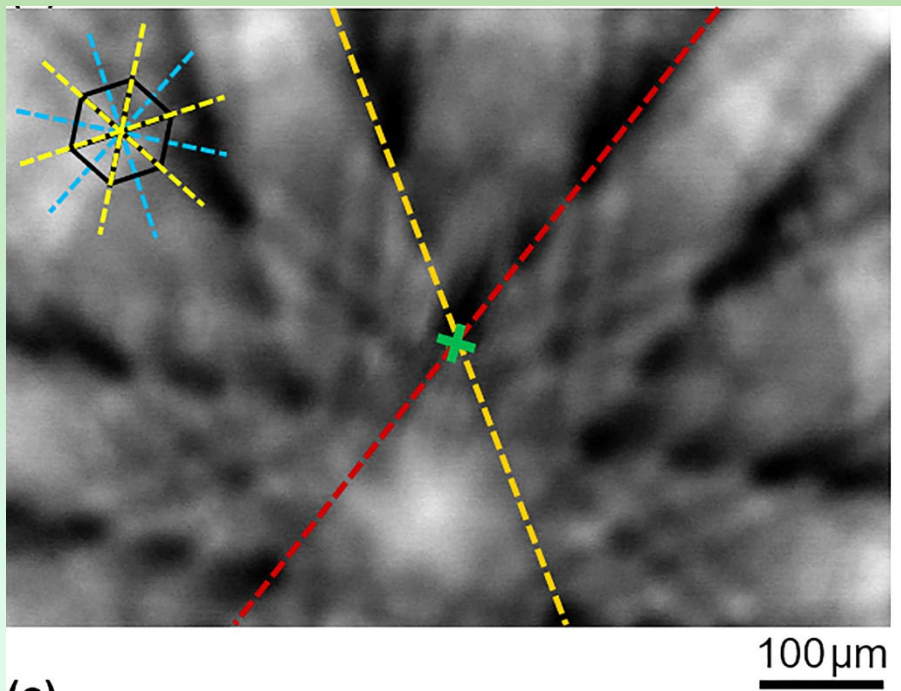
Режим канализирования



Зерна в поликристаллическом FeNi, $E_b = 15$ кэВ

Режим канализирования.

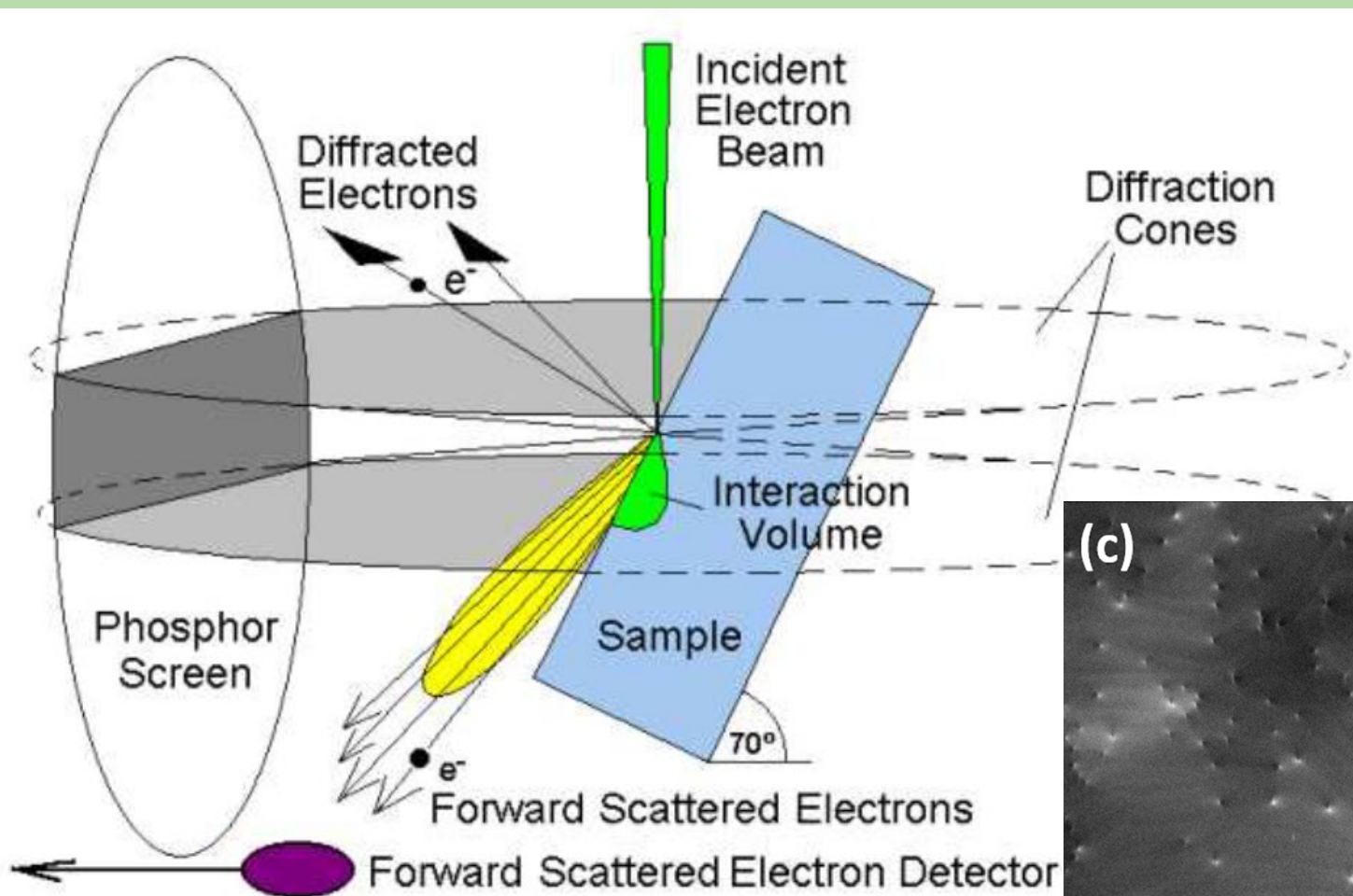
Выявление дислокаций



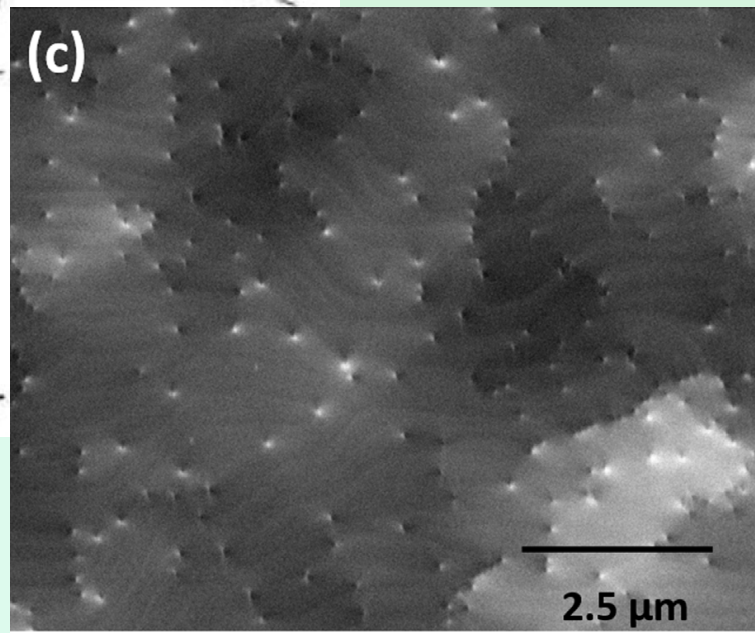
GaN on Si

Режим каналирования.

Выявление дислокаций

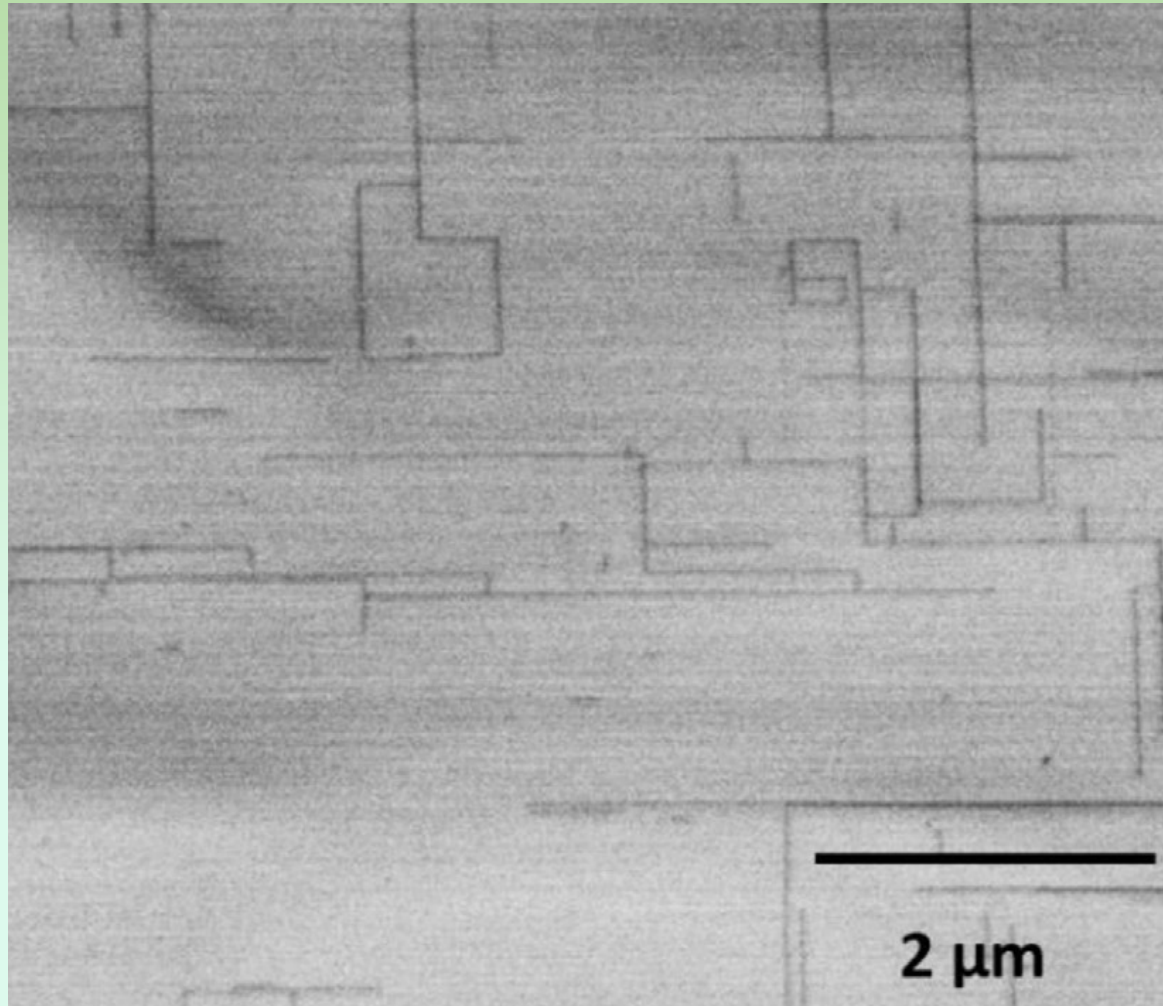


GaN



Режим канализирования.

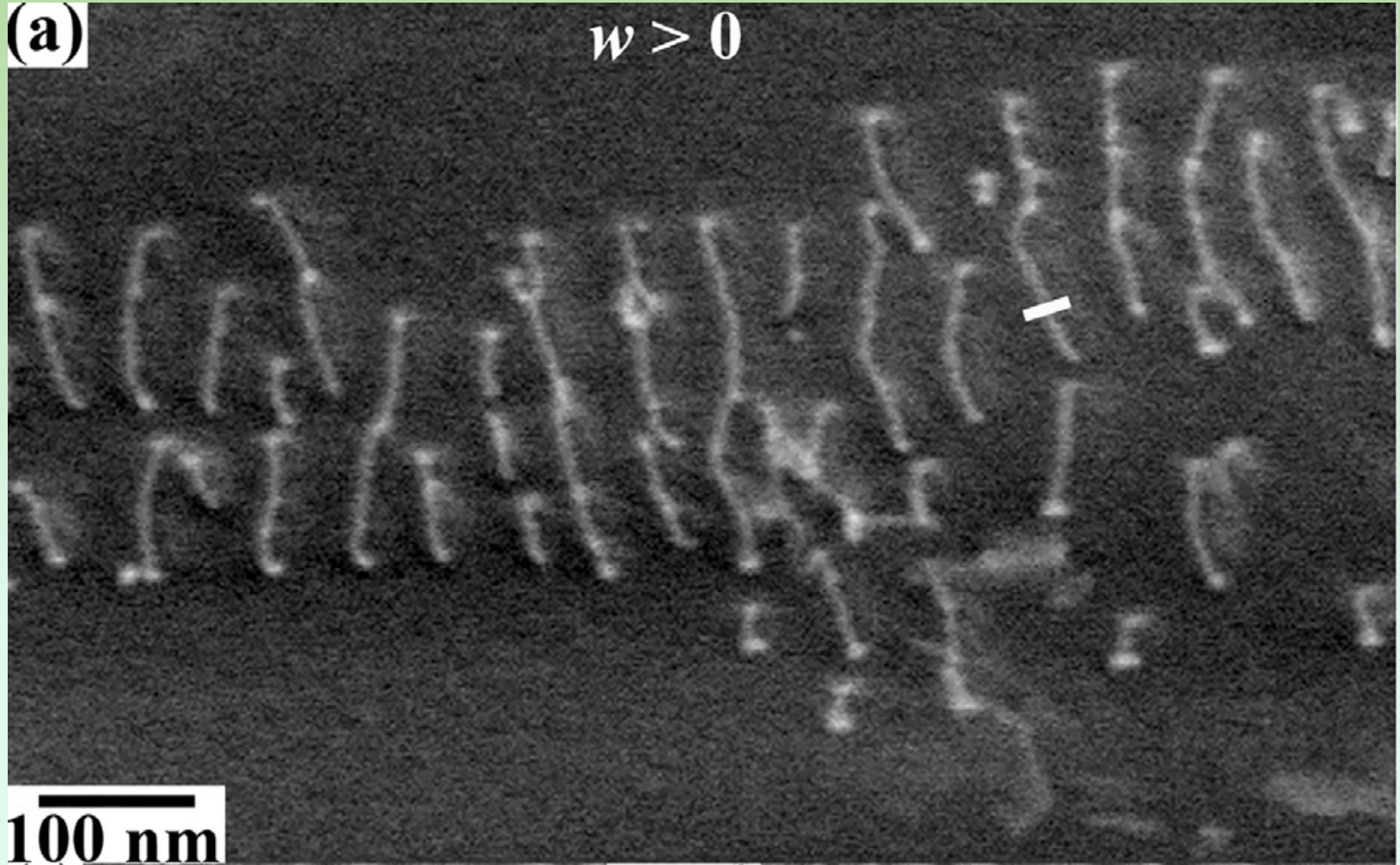
Выявление дислокаций



SiC SSF

Режим канализирования.

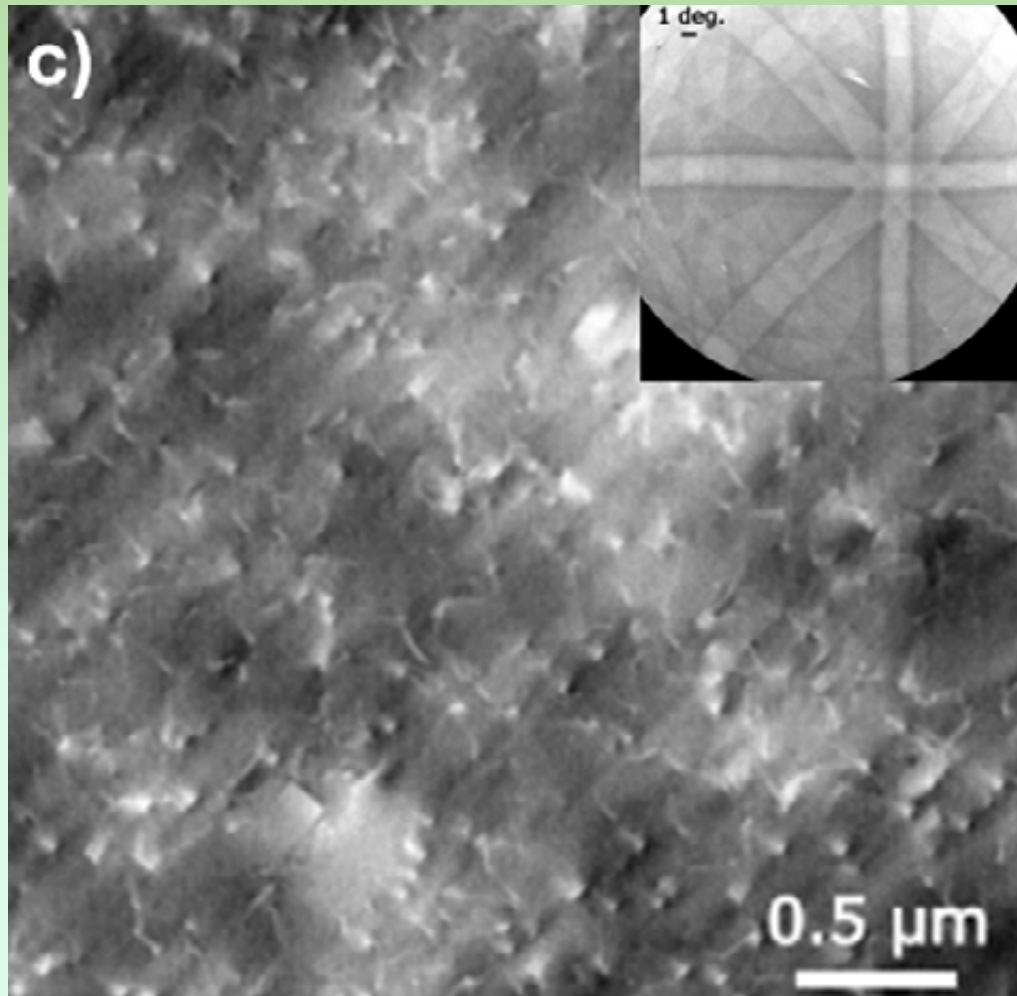
Выявление дислокаций



нержавейка

Режим каналирования.

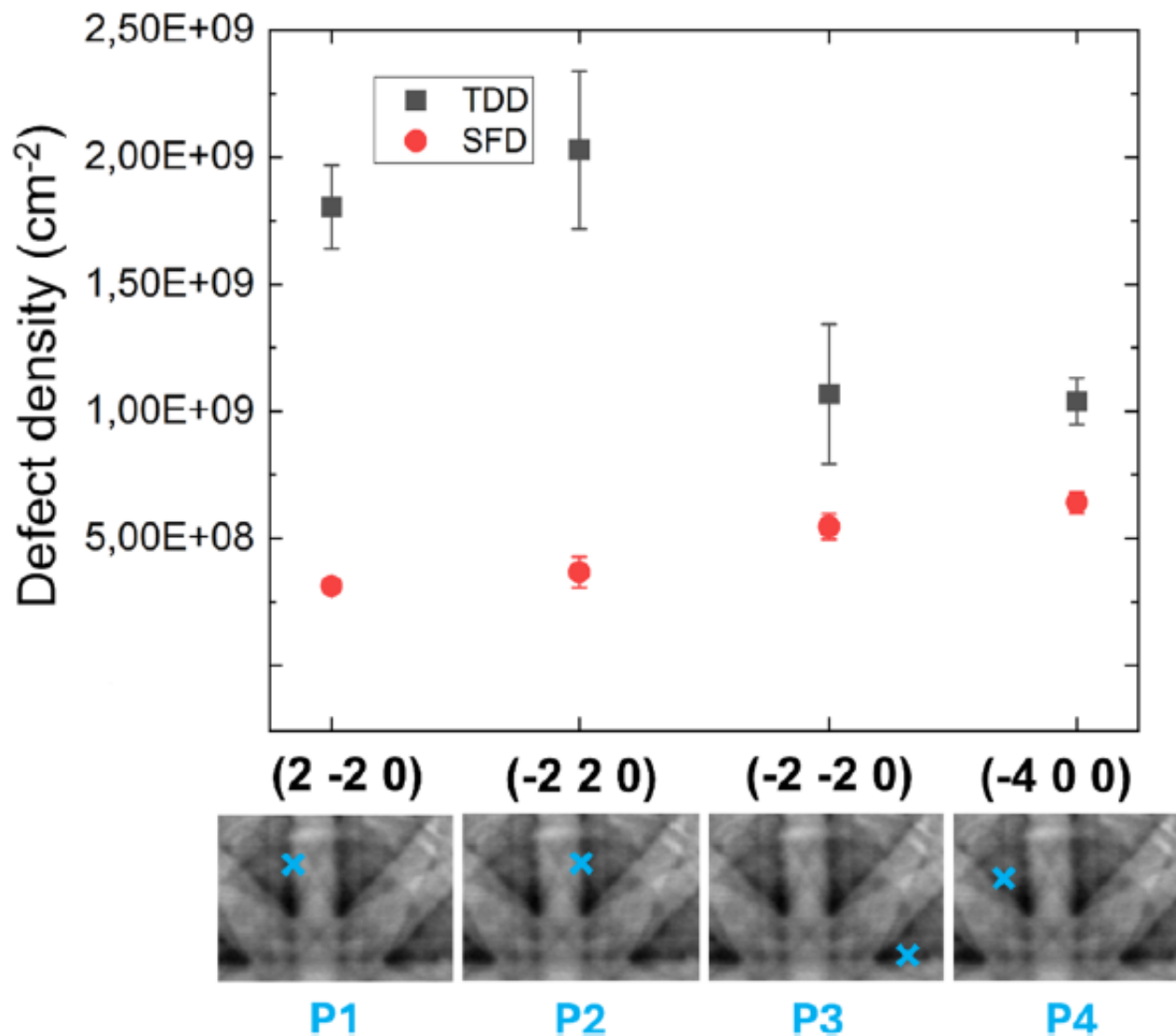
Выявление дислокаций



GaInAs

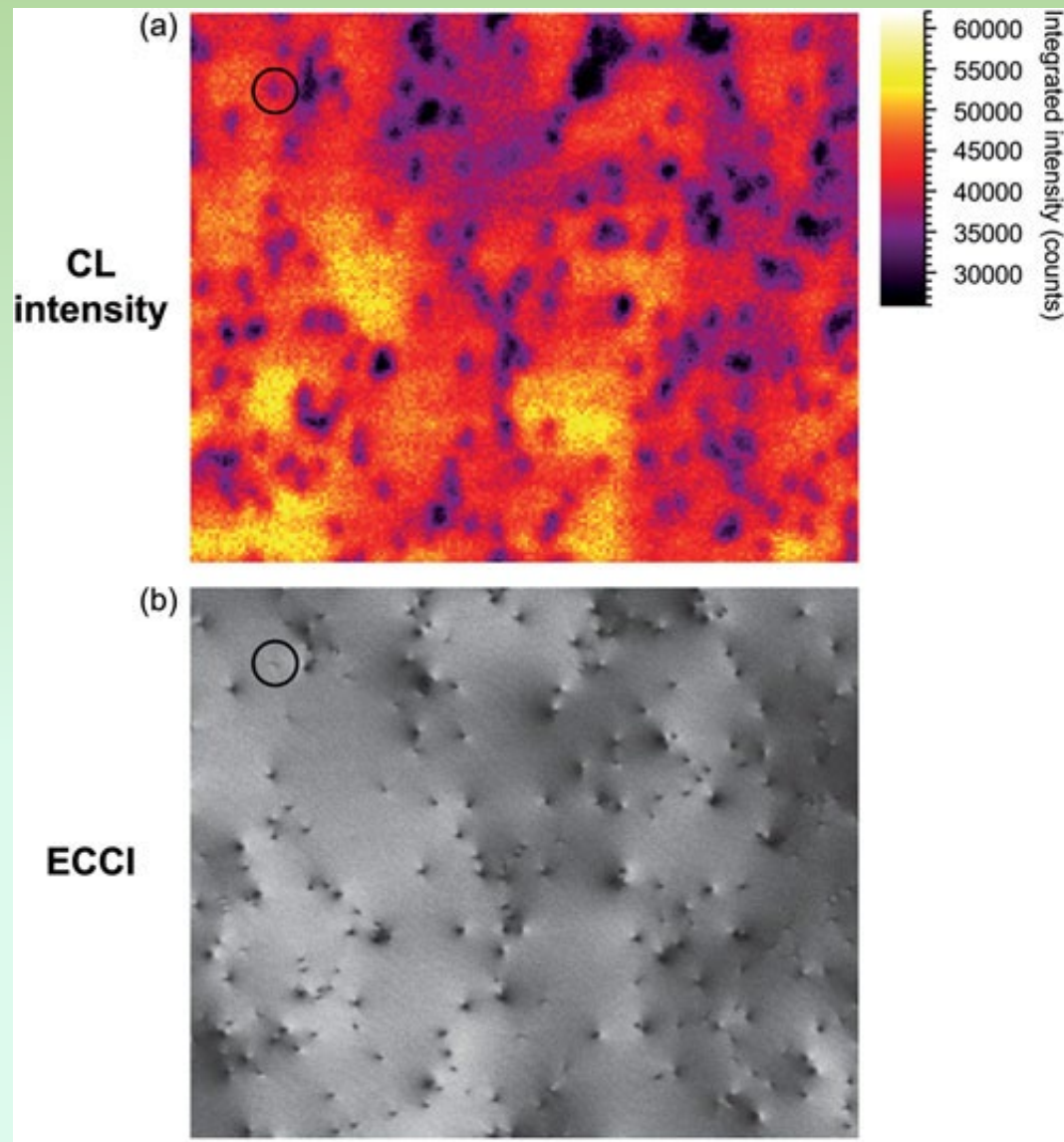
Режим канализирования.

Выявление дислокаций

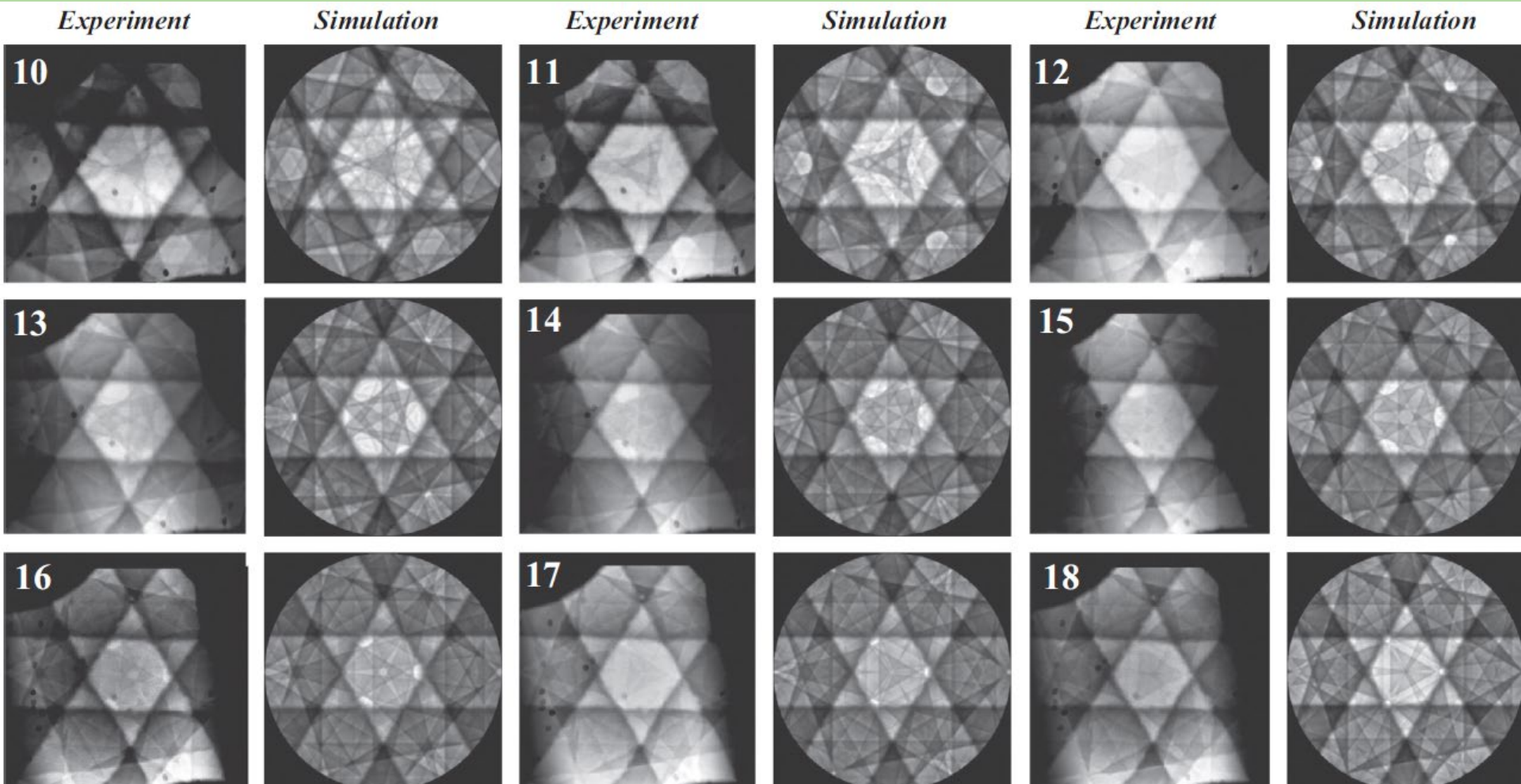


Режим канализирования + CL

GaN

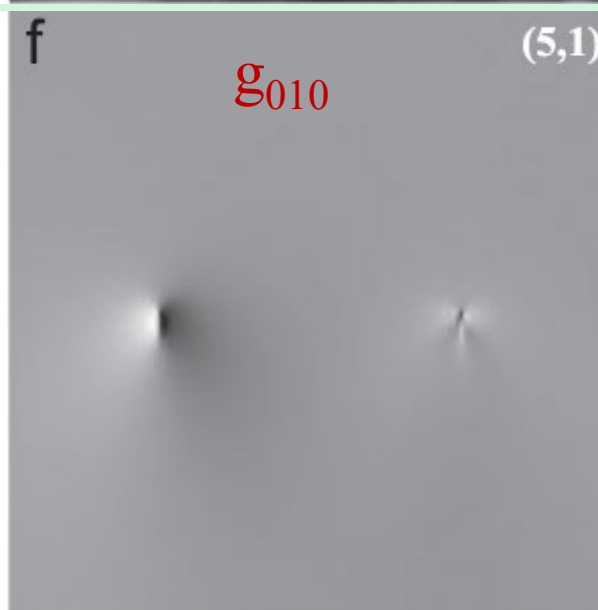
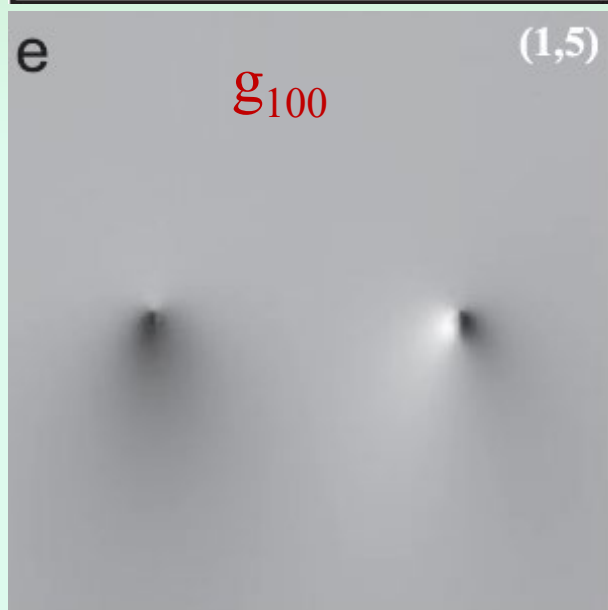
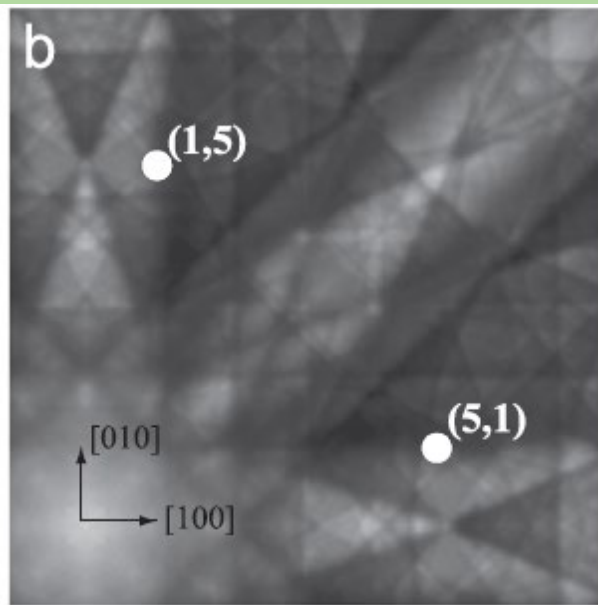
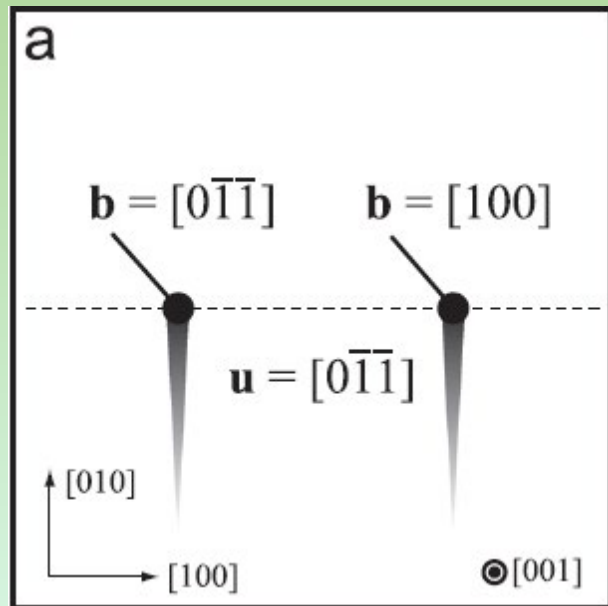


Режим каналирования. Моделирование



AI

Режим канализирования. Моделирование



Теория

**Спасибо за
внимание**