

# Микроскопия

Привязка регистрируемого сигнала к областям, непрерывно покрывающим некоторую область проекции исследуемого образца

3D - томография

**Пространственное разрешение микроскопии:**

минимальное расстояние между двумя точками, сигналы от которых можно разделить

**Формирование изображения**

Проецирование (ОМ, ПЭМ, рентгеновская микроскопия)

сканирование по растру (РЭМ, РПЭМ, СТМ, АСМ, ...)

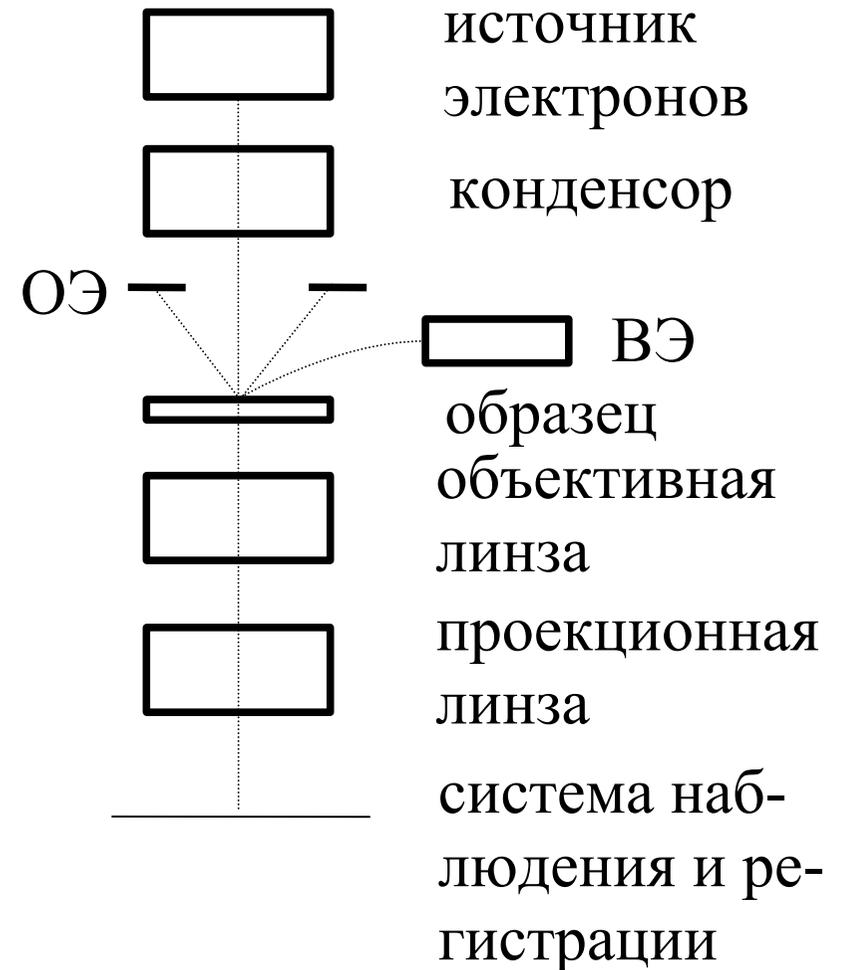
# Электронная микроскопия

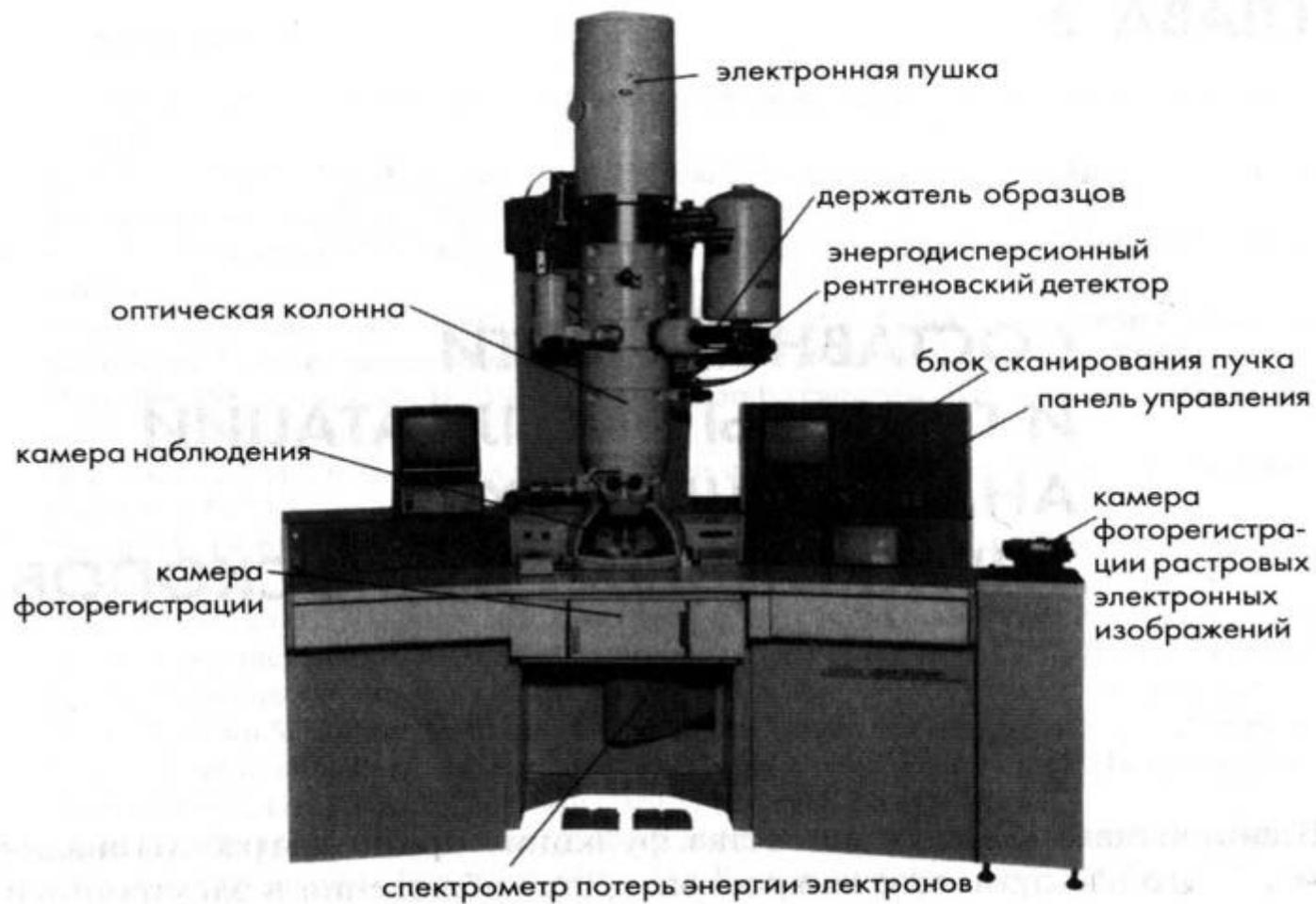
Разрешение:

оптика:	электроны:
$1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$	$\lambda = 0,123 \text{ нм}$
	100 В
	0,0025 нм
	200 кВ
	0,0016 нм
	400 кВ

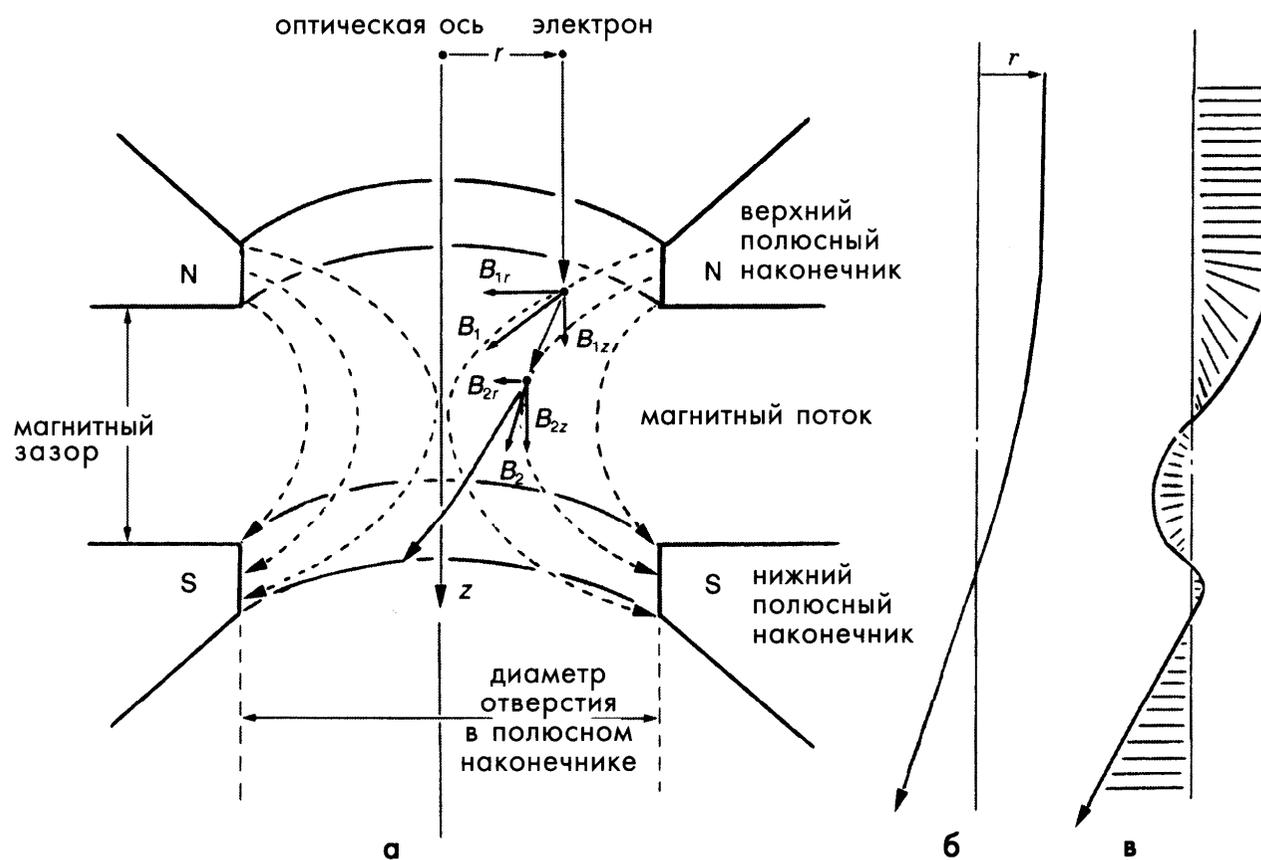
Источники электронов  
(типы катодов):

V-образный вольфрамовый  
 $\text{LaB}_6$   
катоды с полевой эмиссией





# Фокусировка электронного пучка, магнитная линза

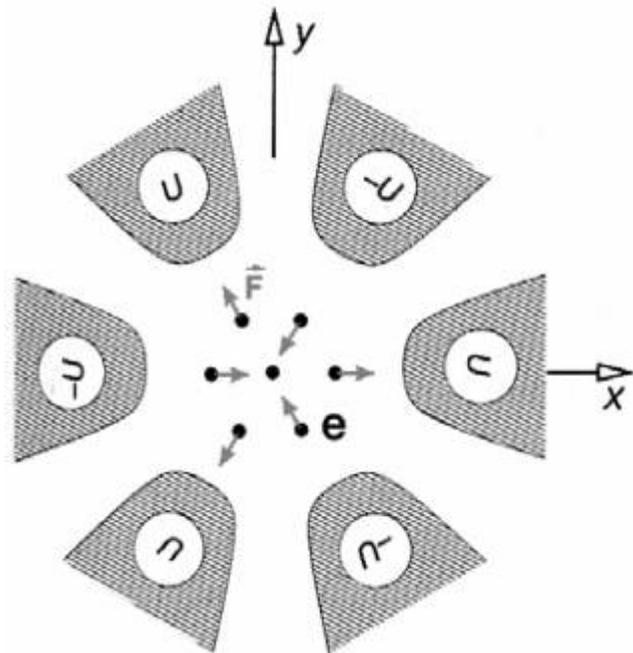


# Ограничения разрешения электронномикроскопического изображения

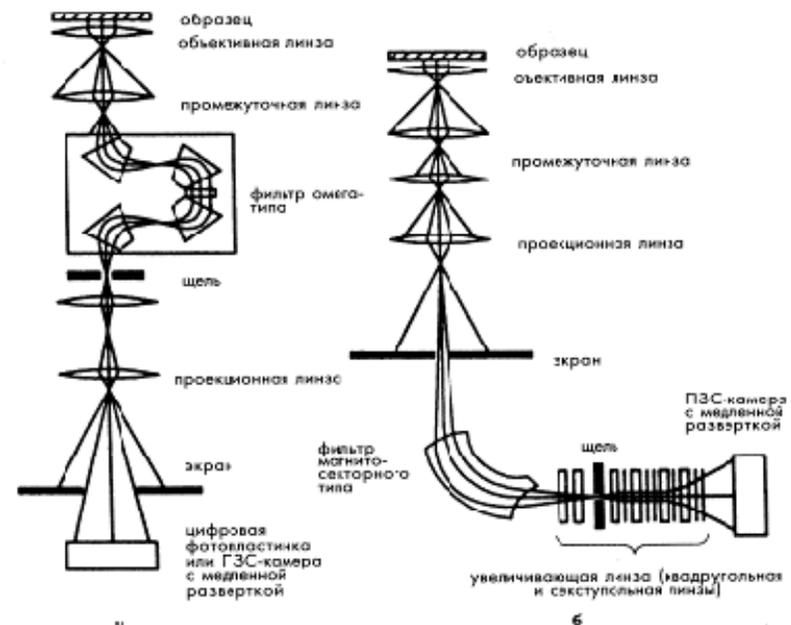
сферическая aberrация  
хроматическая aberrация

## Корректоры aberrаций

сферической



хроматической



## Типы контраста в ПЭМ:

- поглощение пучка образцом

- рассеяние

ПЭМВР      амплитудный контраст

- интерференция лучей

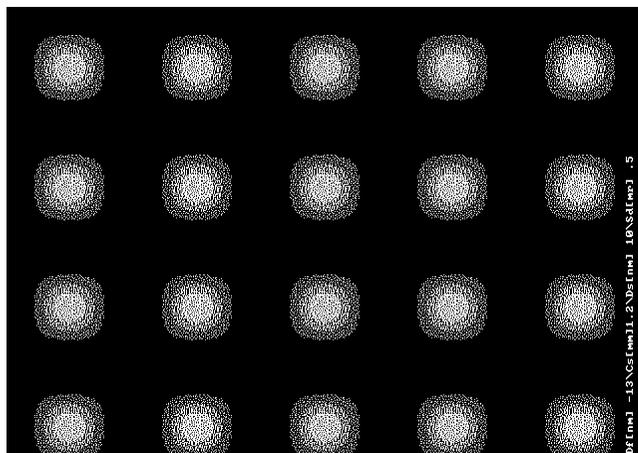
полосы Френеля

полосы равной толщины

муар

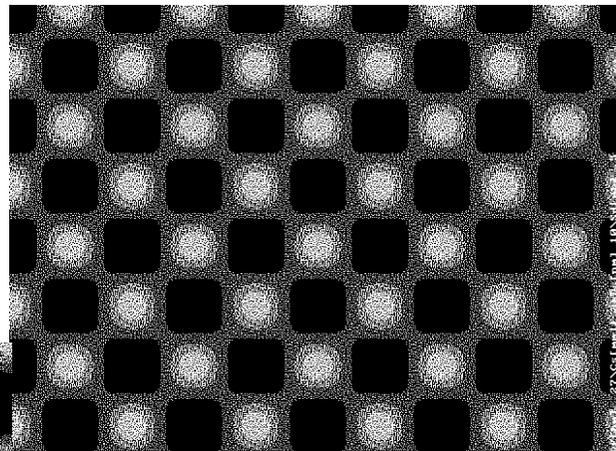
# Положение фокуса и изображение высокого разрешения

$\text{BaZrO}_3$ , (100), объективная диафрагма  $10 \text{ nm}^{-1}$  (19 отражений)



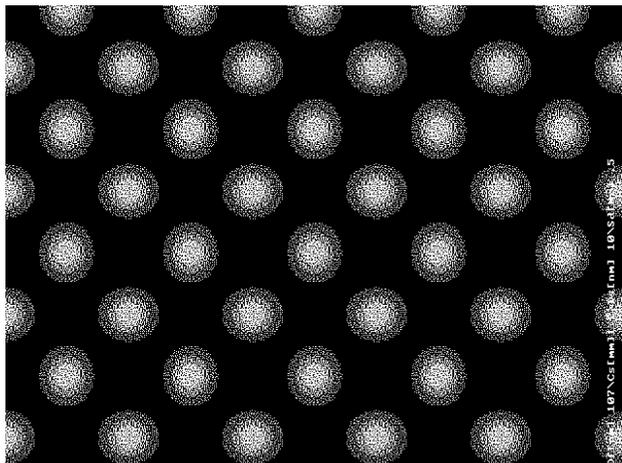
-40 нм

40 нм  
дефокусировка  
по Шерцеру

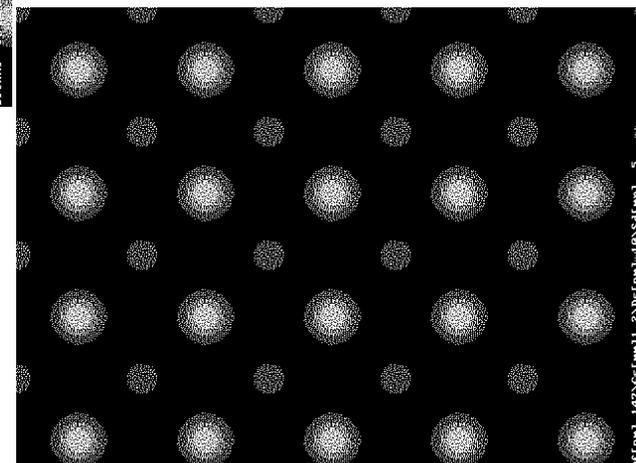


0 нм (точный фокус)

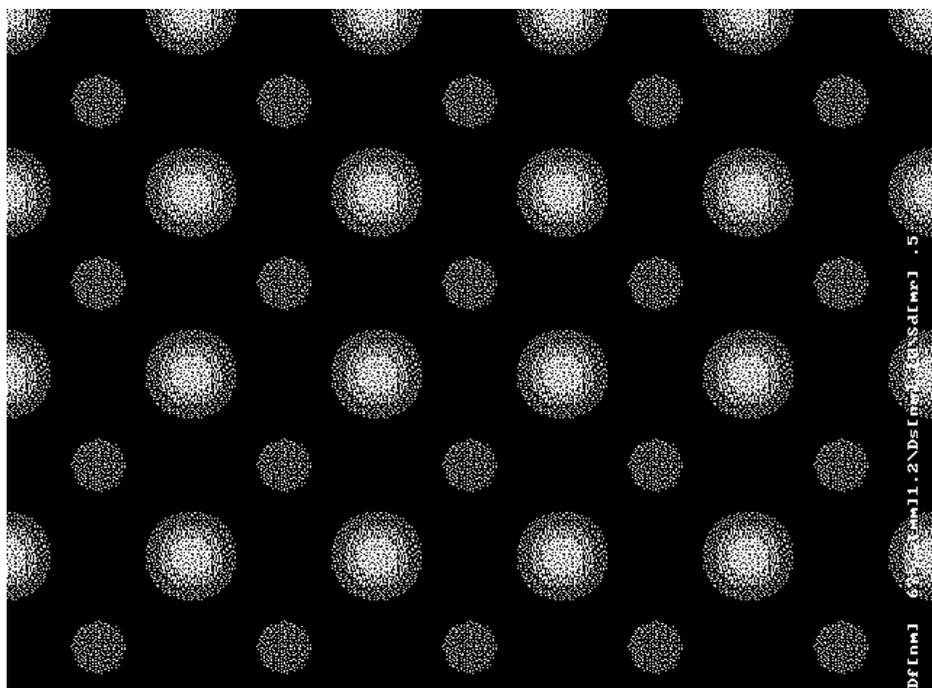
80 нм



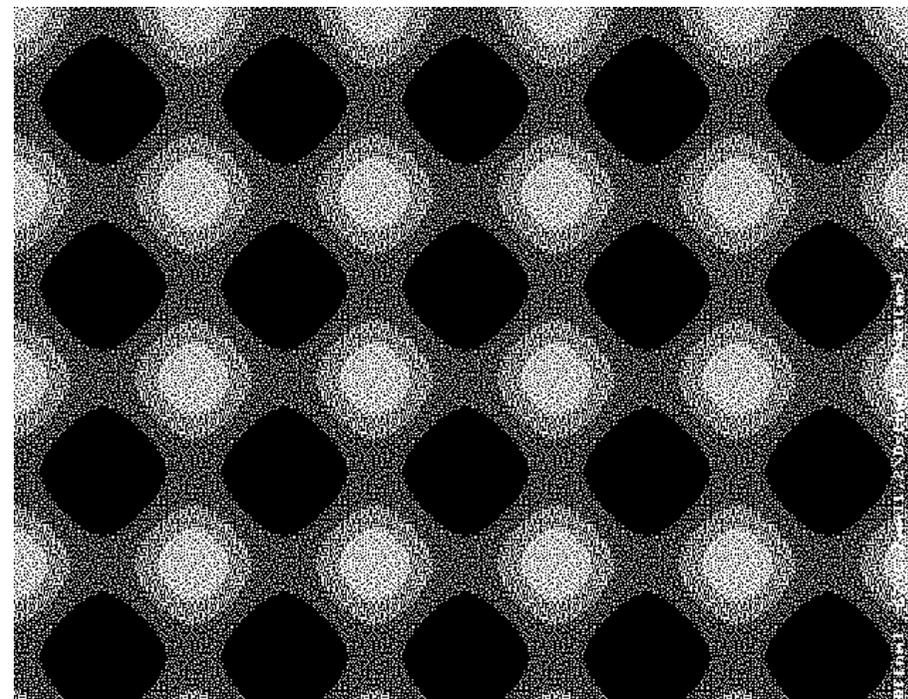
120 нм



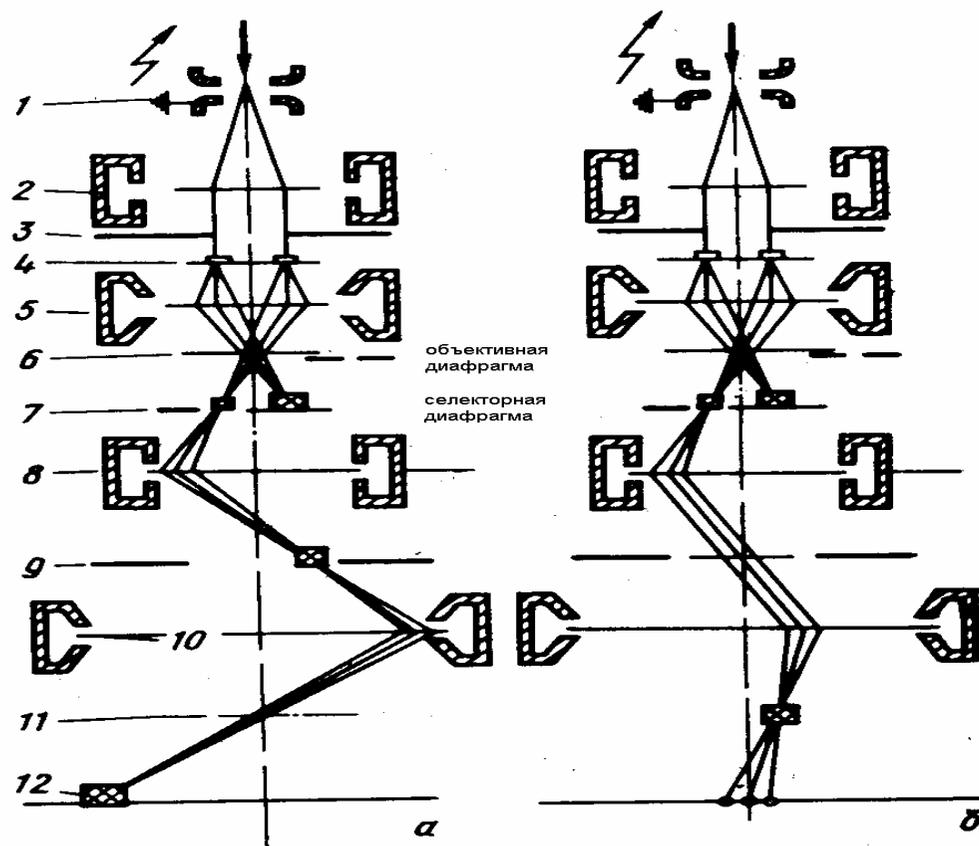
объективная диафрагма  
 $10 \text{ нм}^{-1}$  (19 отражений)  
дефокус по Шерцеру



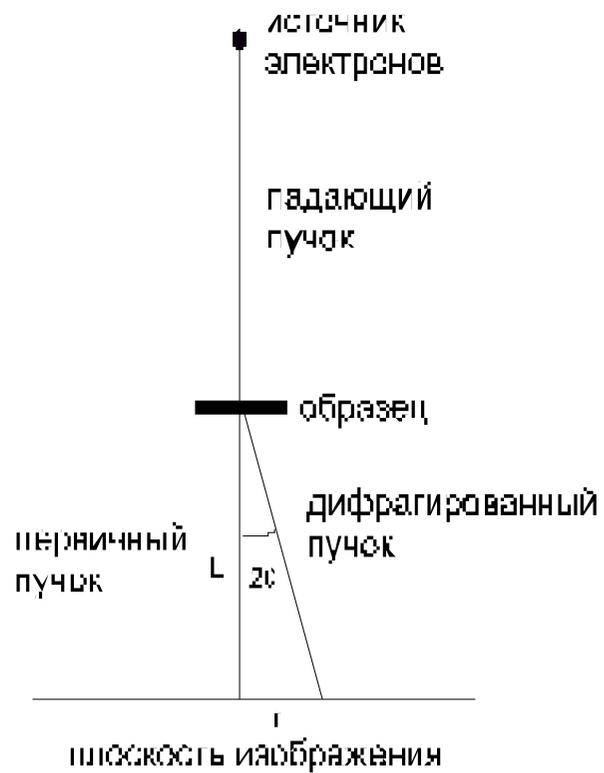
объективная диафрагма  
 $5 \text{ нм}^{-1}$  (7 отражений)  
дефокус по Шерцеру



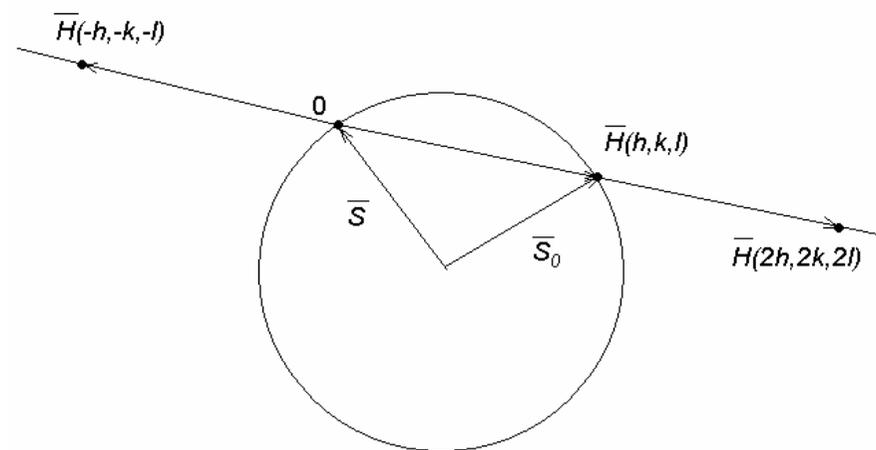
# Дифракция электронов



1 — электронная пушка, 2 — конденсорная линза, 3 — конденсорная диафрагма, 4 — образец, 5 — объективная линза, 6 — задний фокус объективной линзы, 7 — селекторная диафрагма, 8 — промежуточная линза, 9 — полевая диафрагма, 10 — проекционная линза, 11 — задний фокус проекционной линзы, 12 — регистрируемое изображение

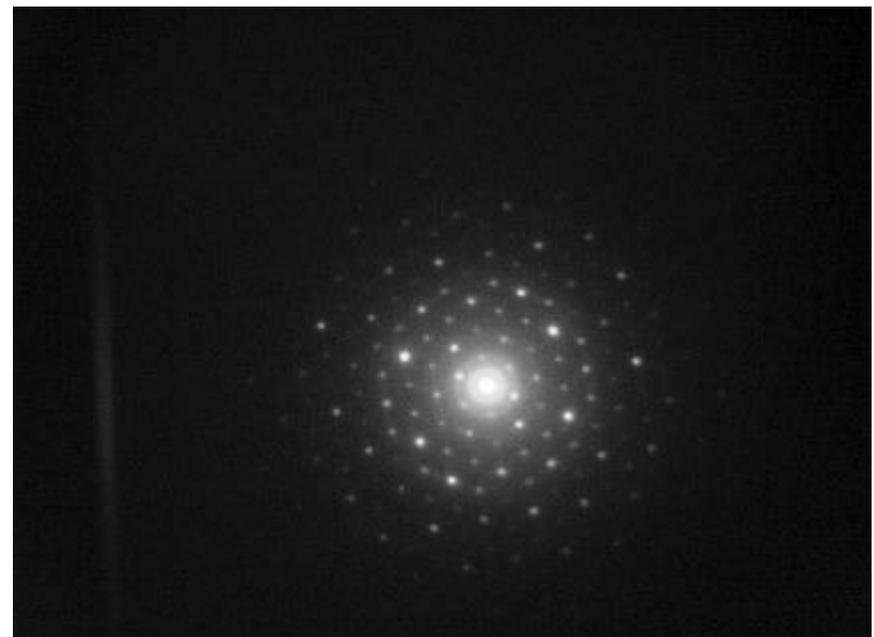
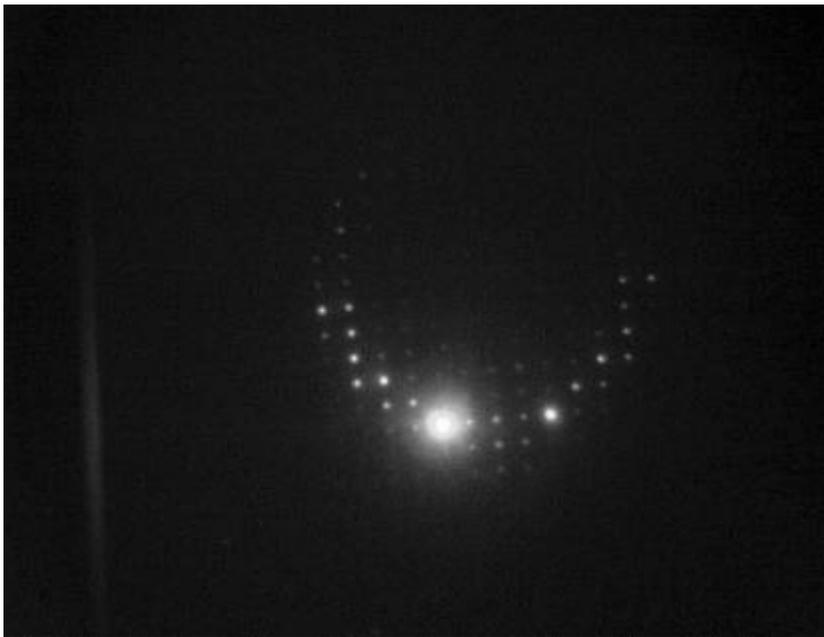


## Сфера Эвальда



$$r = L \left( \lambda / d \right)$$

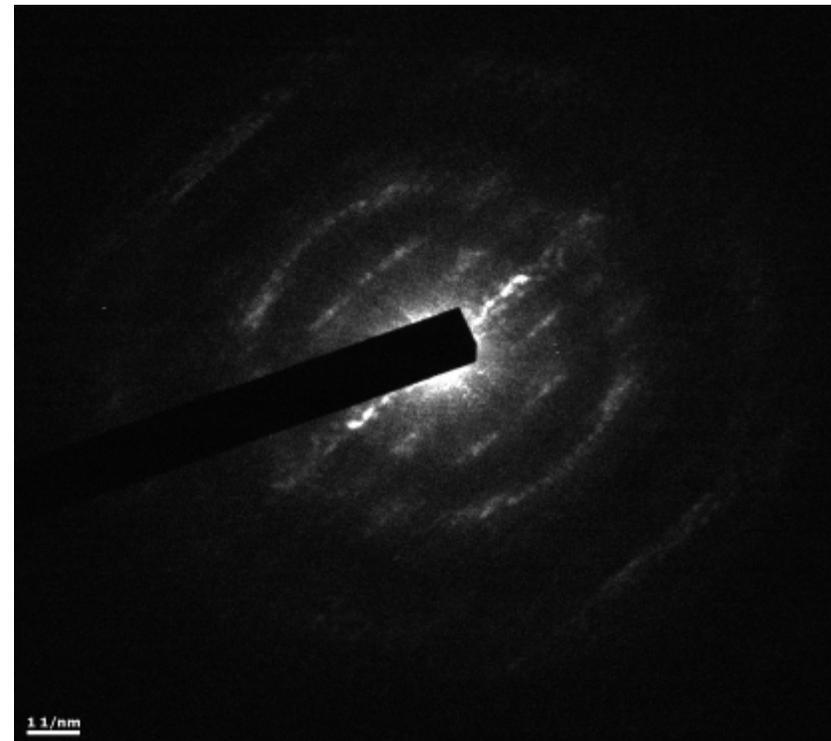
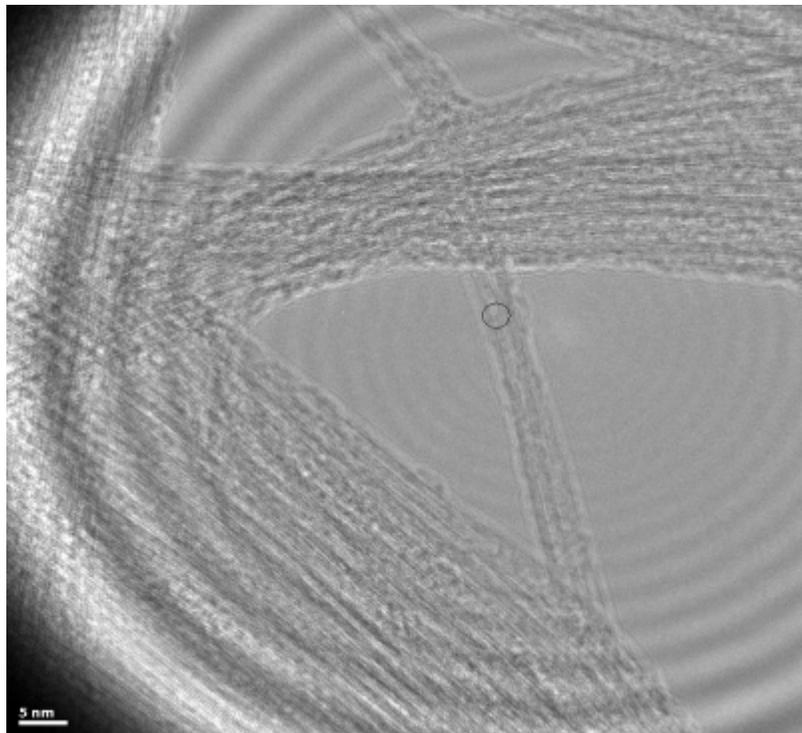
# Ориентация образца относительно падающего пучка



локальность — доли мкм (селекторная диафрагма)

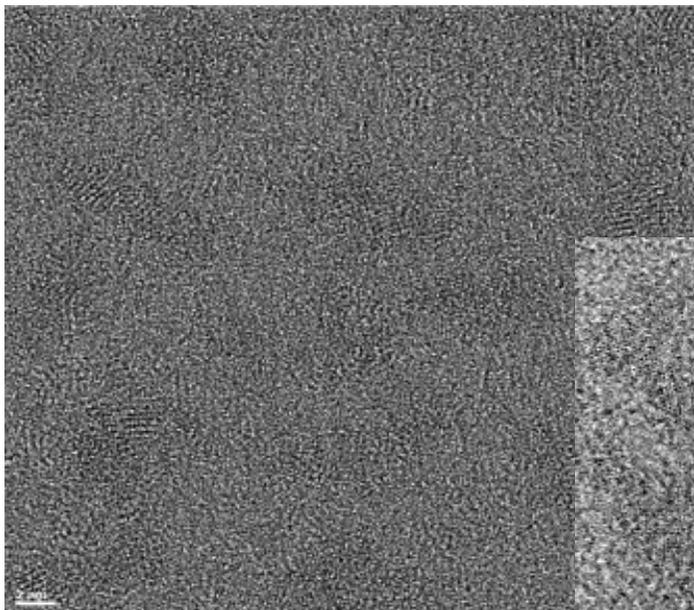
Дифракция в сходящемся пучке

Дифракция в нанопучке

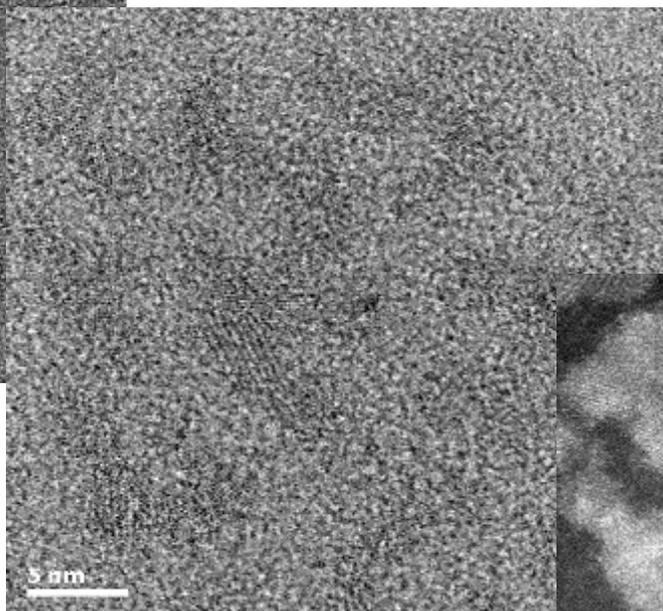


# Светлопольные и темнопольные изображения

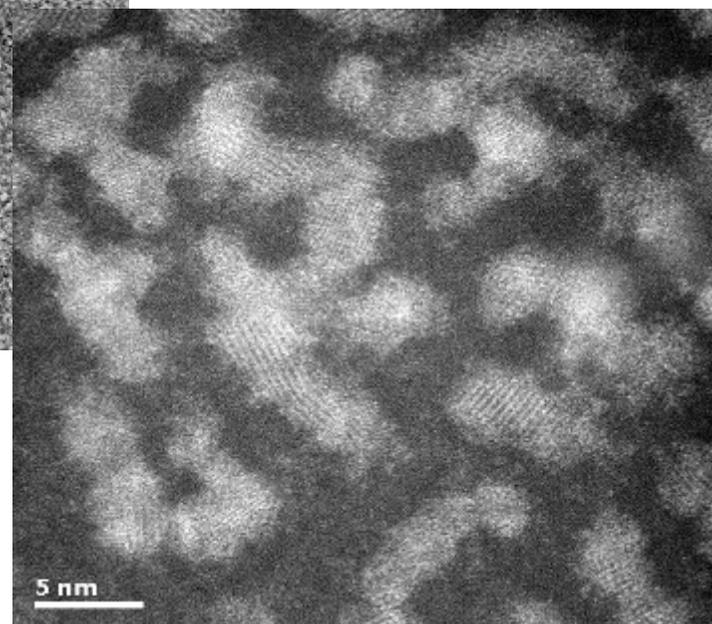
светлопольная ПЭМ



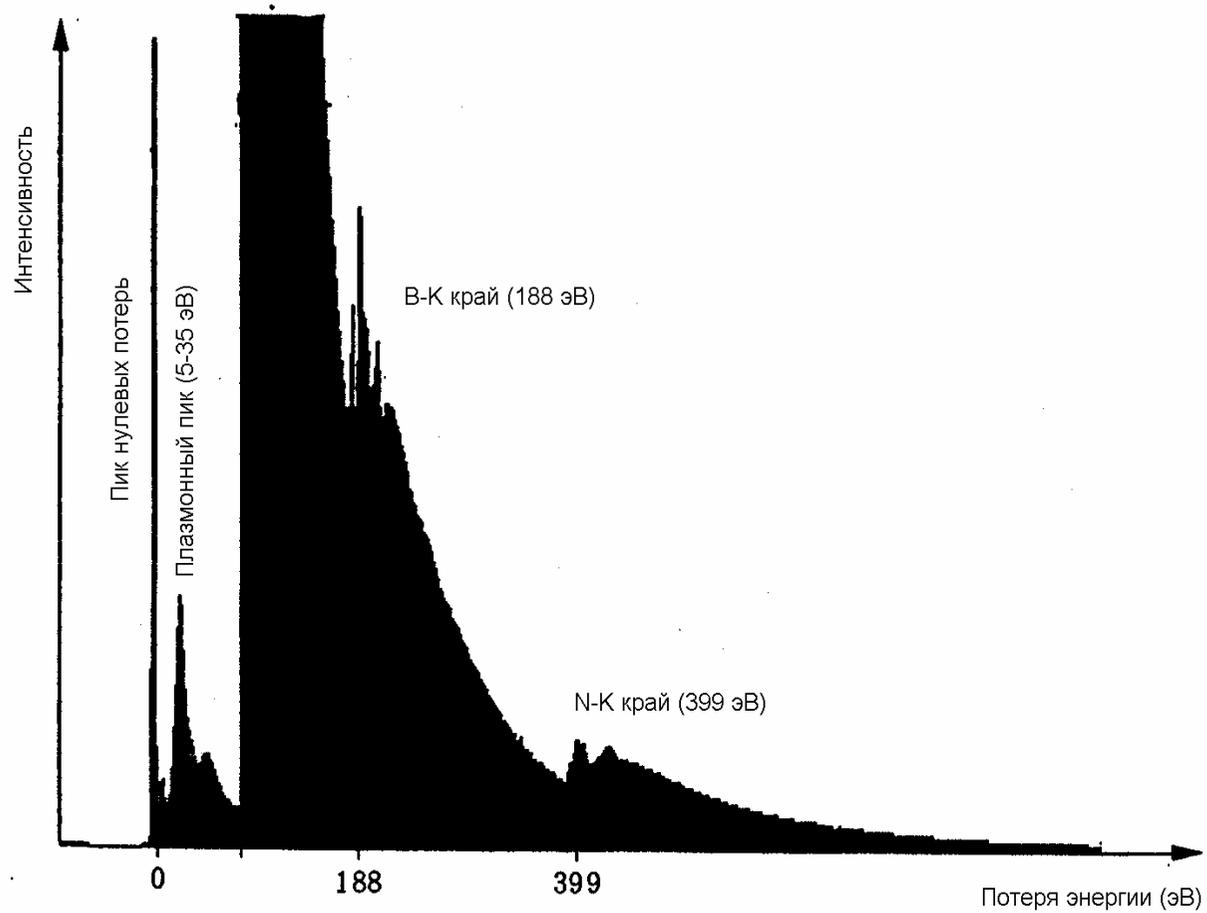
светлопольная РПЭМ



HAADF



# Неупругое рассеяние электронов (EELS)



# Основные методы подготовки образцов

- порошок на металлической сетке / углерод-полимерной пленке
- механическое утонение / травление
- ФИП
- реплики

## Литература:

### ПЭМ:

1. П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон, Д. Пэшли, М. Уэлан. Электронная микроскопия тонких кристаллов., М., Мир, 1968.
2. Г. Томас, М.Д. Гориндж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов., М., Наука, 1983
3. Дж. Спенс. Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения, М., Наука, 1986
4. Д. Синто, Т. Оикава. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия., М., Техносфера, 2006
5. D.V. Williams, C.V. Carter. Transmission Electron Microscopy. V. I – IV. NY and London, Plenum Press, 1996

### РЭМ:

1. Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. М., Мир, 1984
2. под ред. Ф. Моррис, Тискье. Микроанализ и растровая электронная микроскопия. М., Metallurgia, 1985
3. под ред. Дж.Дж. Грена, Дж.И. Гольдштейна, Д.К. Джоя, А.Д. Ромига. Основы аналитической электронной микроскопии. М., Metallurgia, 1990