

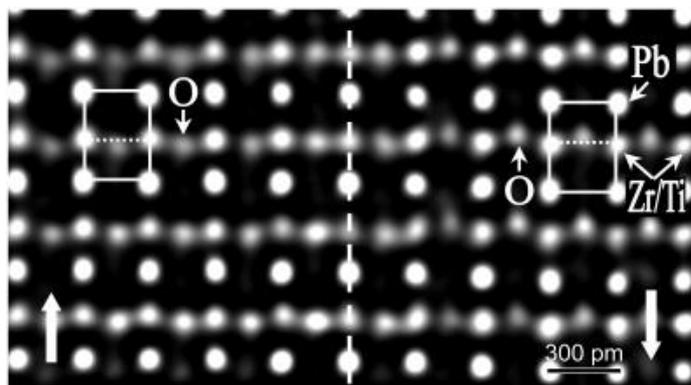
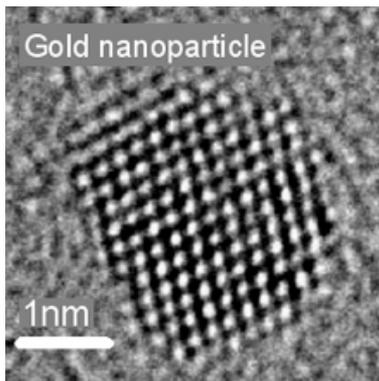
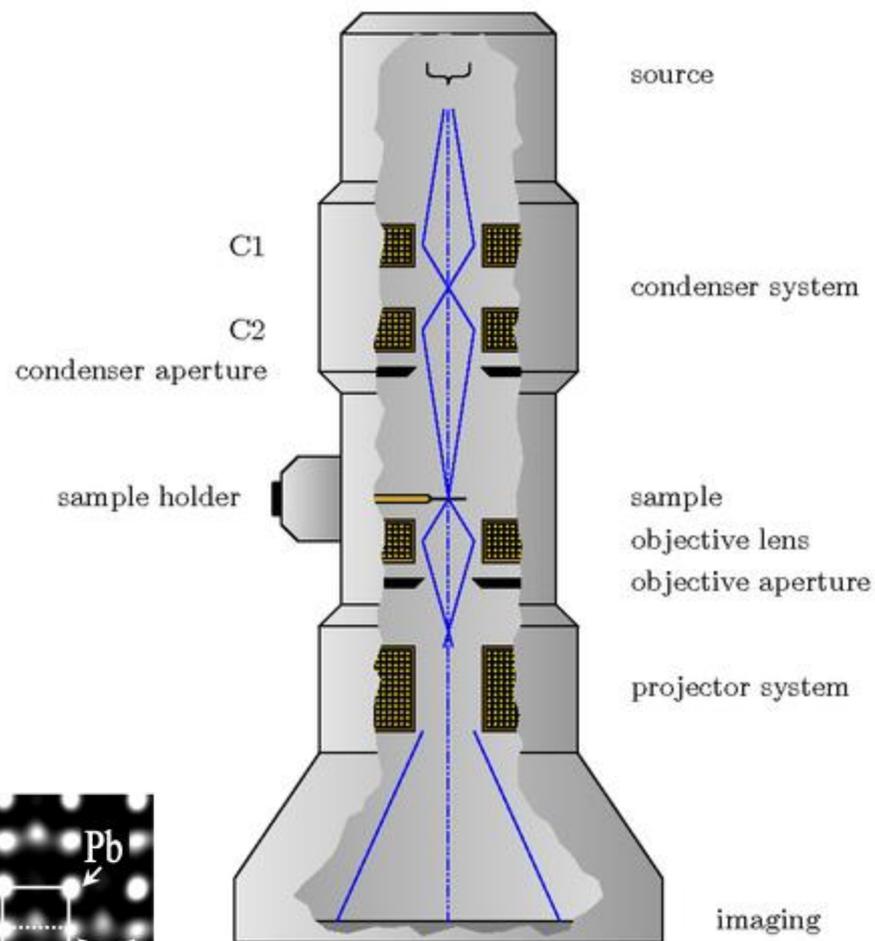
# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

## МОДУЛЬ 1. СТРУКТУРНЫЕ МЕТОДЫ АТТЕСТАЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

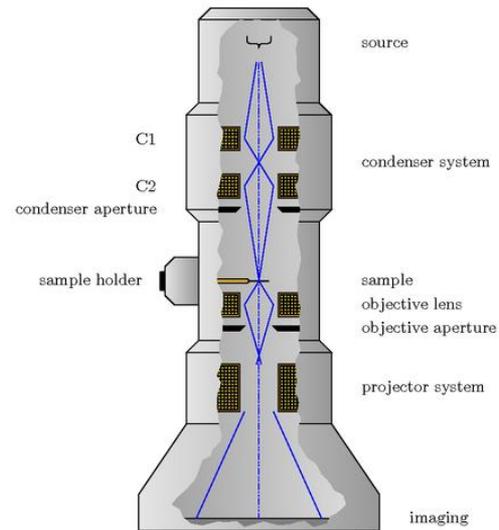
### Лекция 2.

Просвечивающая электронная микроскопия. Принцип получения изображений.  
Формирование дифракционной картины и изображений в сканирующем  
электронном микроскопе. Светлопольные и темнопольные изображения.  
Электроннография. Пробоподготовка.

# Просвечивающий электронный микроскоп



## Наблюдение образцов



**Вакуумная система** служит для откачки воздуха до низкого давления (обычно до  $10^{-4}$  Па) и увеличения таким образом длины свободного пробега электронов.

Вакуумная система откачки состоит из нескольких ступеней:

- роторный или мембранный насос;
- турбомолекулярный или диффузионный насос.

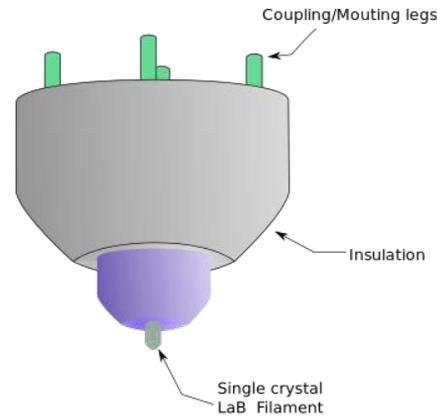
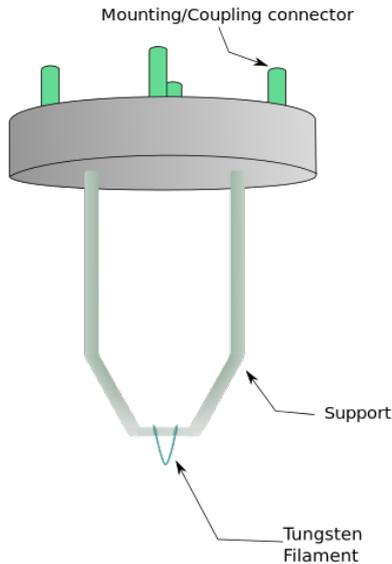


# Электронная пушка

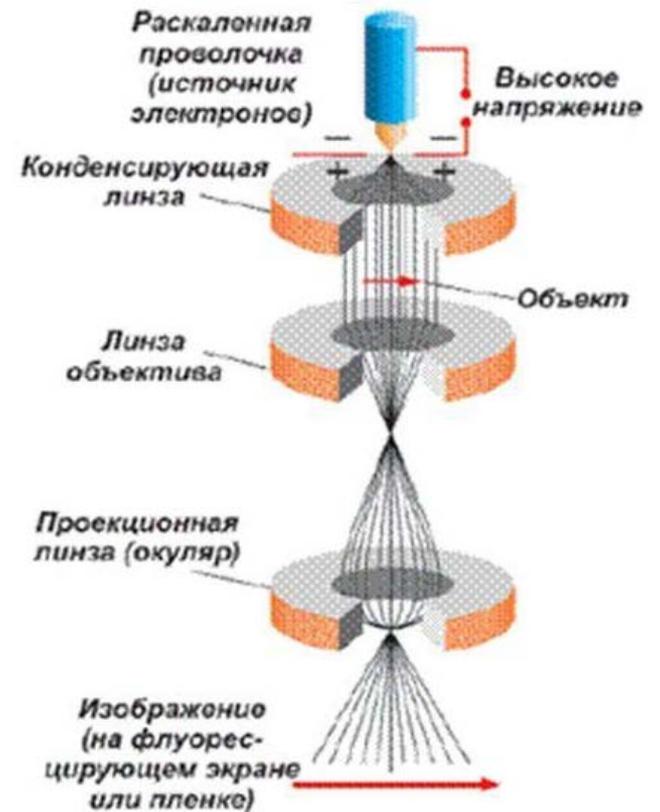
## Термоэлектронная пушка

## Автоэмиссионная пушка

(туннелирование электронов сквозь потенциальный барьер при приложении внешнего поля)



При нагревании вольфрамовая нить или заостренный монокристалла LaB6 (гексаборида лантана) испускают (эмитируют) электроны



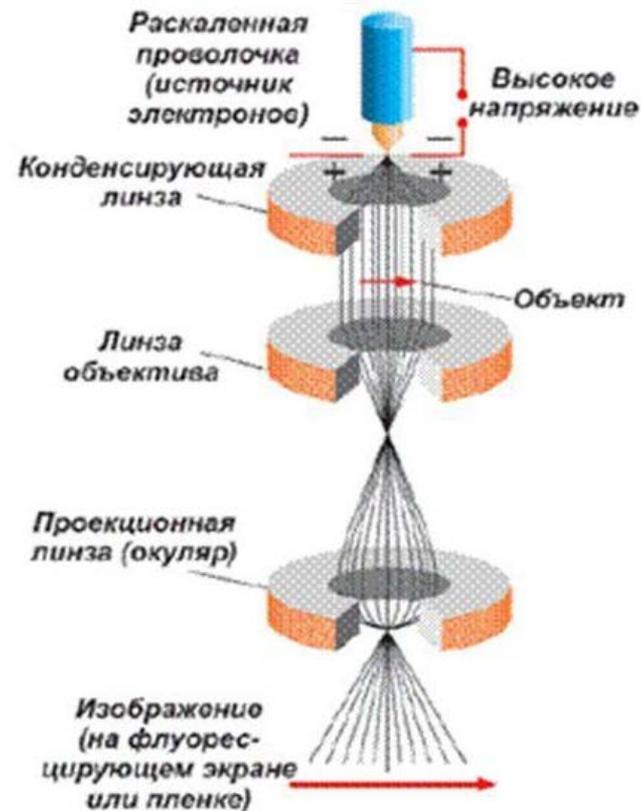
## Магнитные линзы:

Первая линза — **конденсорная** (такая же линза есть и в оптическом микроскопе) — собирает электроны, летящие из электронной «пушки», в узкий пучок и направляет их на рассматриваемый предмет.

Пройдя сквозь образец, электроны попадают во **вторую магнитную линзу - объективную**. Она даёт первое сильно увеличенное изображение предмета.

**Третья магнитная линза — проекционная** — увеличивает изображение ещё больше.

Из проекционной линзы электроны попадают на фотопластинку или на экран, покрытый веществом, светящимся под ударами электронов или на фотодетектор.



## Апертуры

Апертуры представляют собой металлические пластины с отверстиями для прохождения электронов. Толщина пластин подбирается так, чтобы сквозь отверстия проходили только электроны, отклоняющиеся от оптической оси не более чем на выбранный угол.

Апертурная диафрагма после конденсорной линзы собирает электроны в узкий пучок

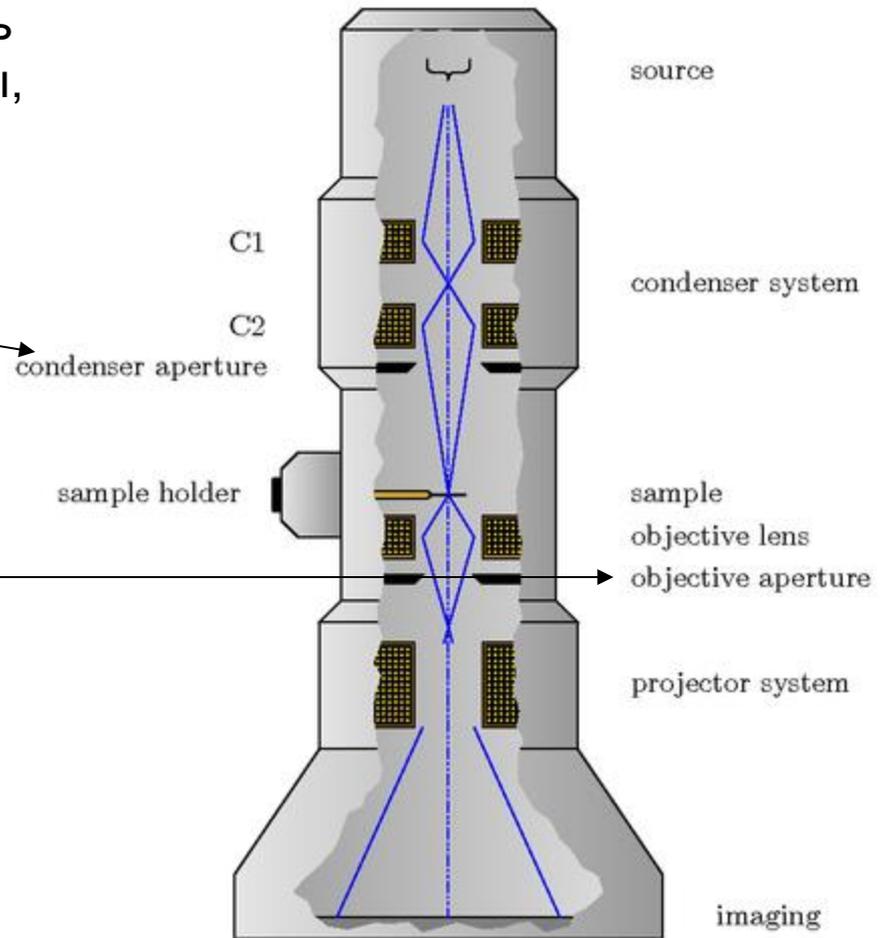
Апертурная диафрагма после объективной линзы  
- определяет **контраст** изображения и **разрешающую способность** микроскопа  
- осуществляет **выбор** пучка

прямой

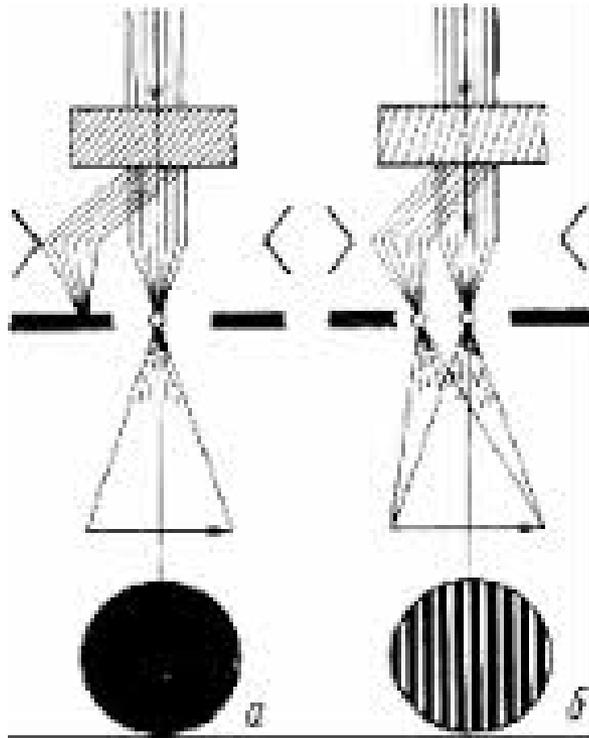
(светлопольное изображение)

дифрагированный

(темнопольное изображение)



## Контраст в изображении кристаллических объектов

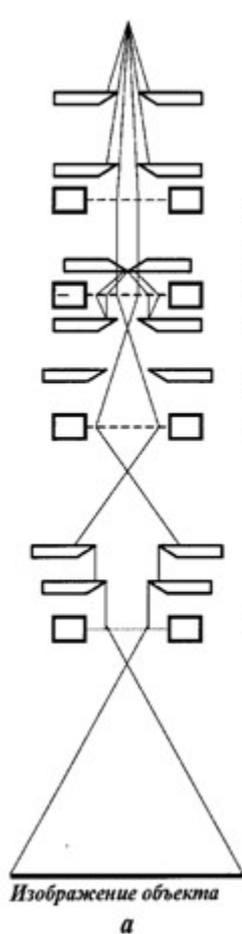
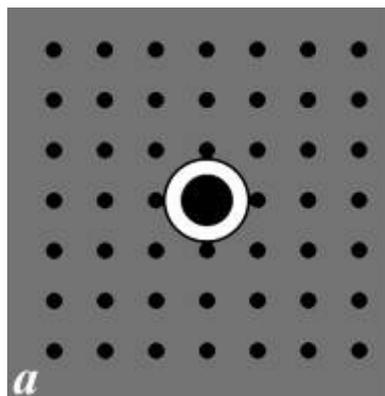


**а – амплитудный контраст** — через апертурную диафрагму объектива проходит один прямой пучок (пучки, дифрагировавшие на кристаллической решетке, задерживаются апертурной диафрагмой);

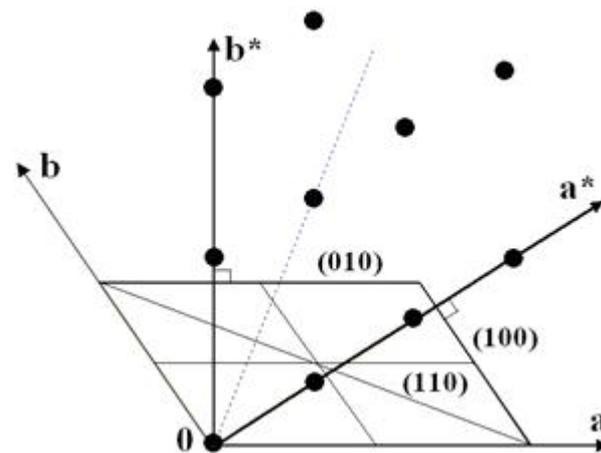
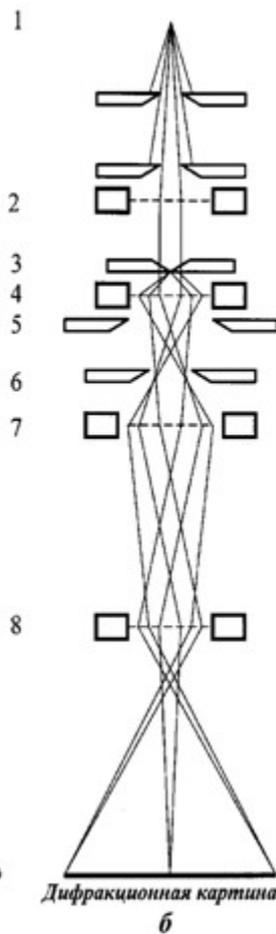
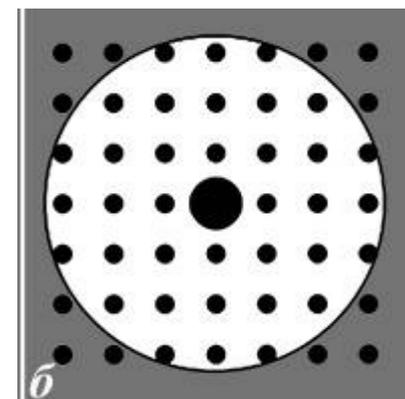
**б — фазовый контраст** — через апертурную диафрагму проходят **два** и более пучка, дифрагировавших на решетке (на экране возникает изображение плоскостей, на которых произошла дифракция падающего пучка).

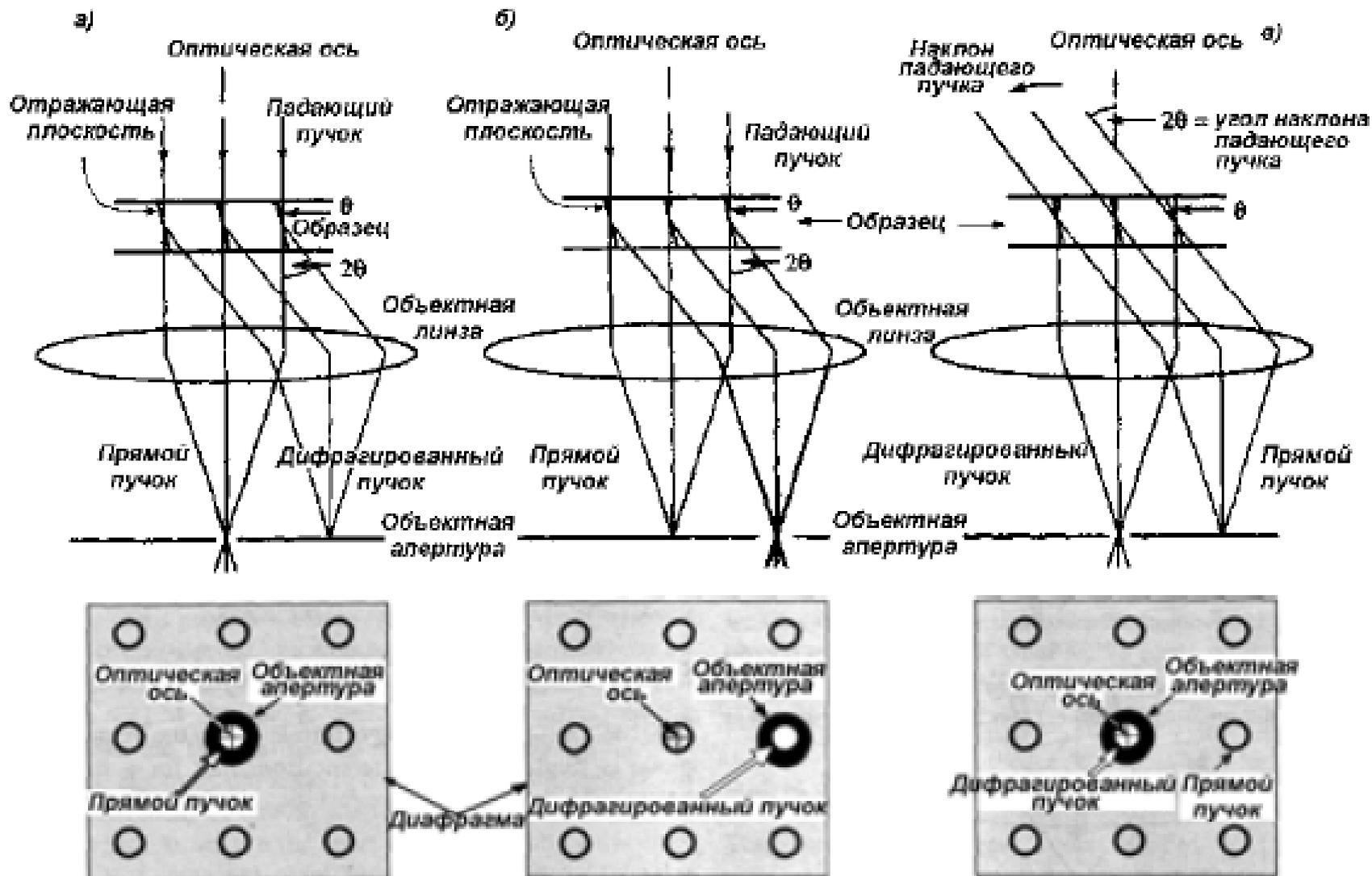
## Амплитудный контраст

**светлопольное изображение**  
(через апертурную диафрагму  
проходит прямой пучок)

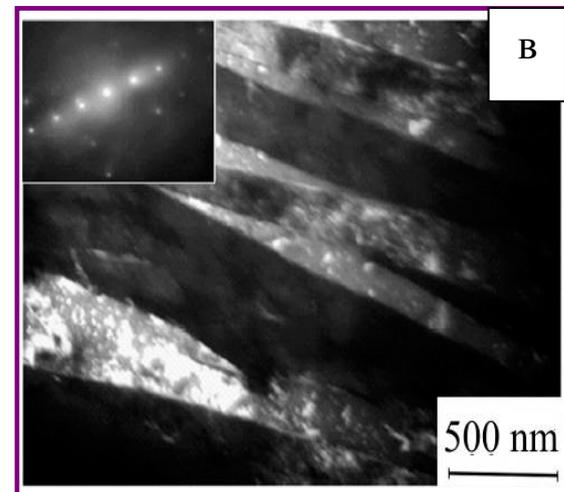
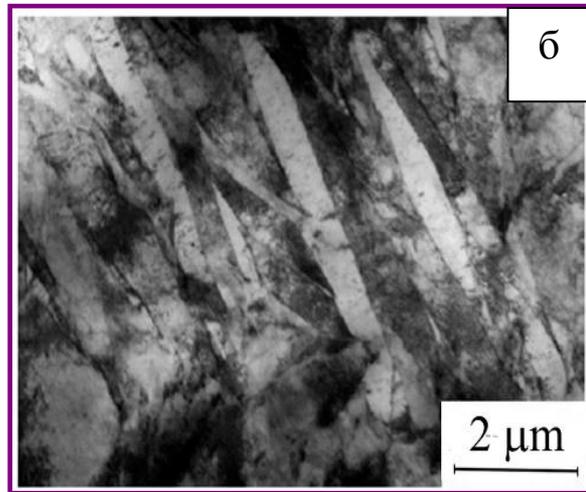
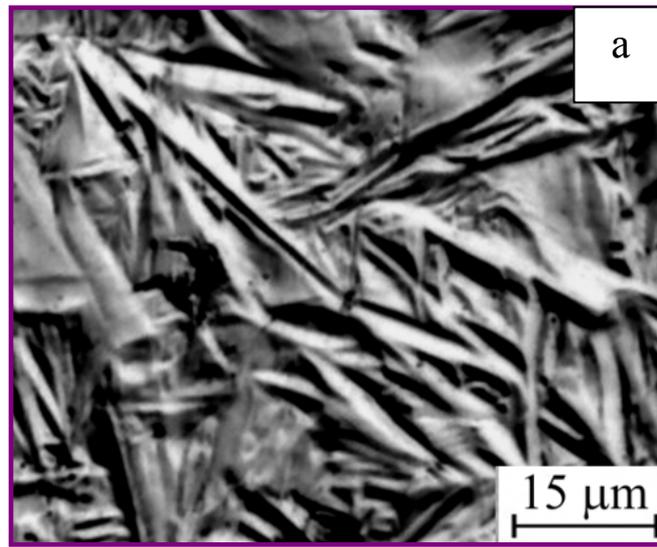


**темнопольное изображение**  
(через апертурную диафрагму  
проходит дифрагированный пучок)



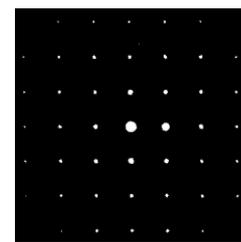
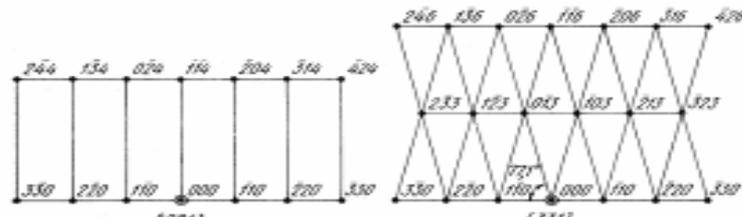
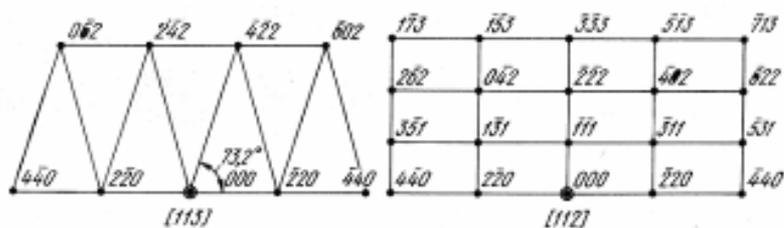
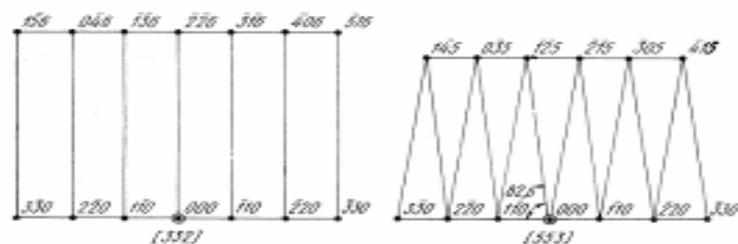
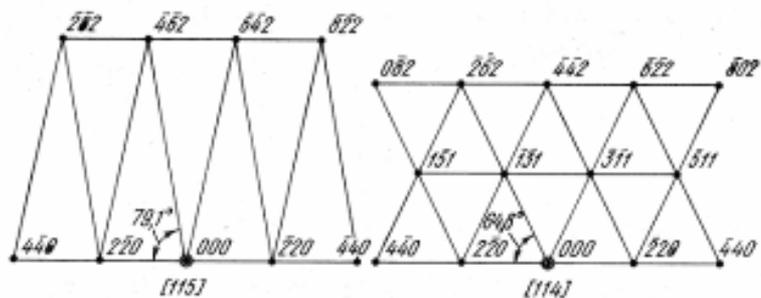
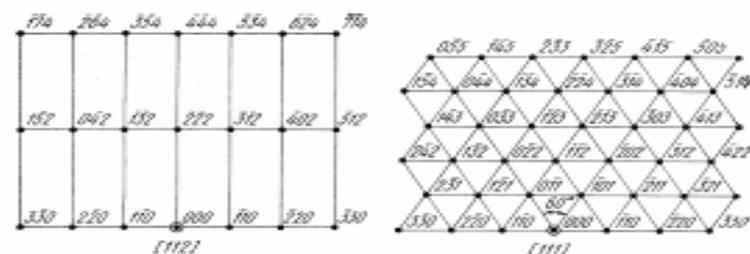
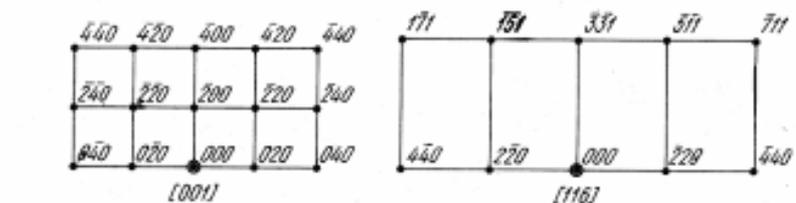


а – светлопольное, б – темнопольное, в – темнопольное центрированное изображения



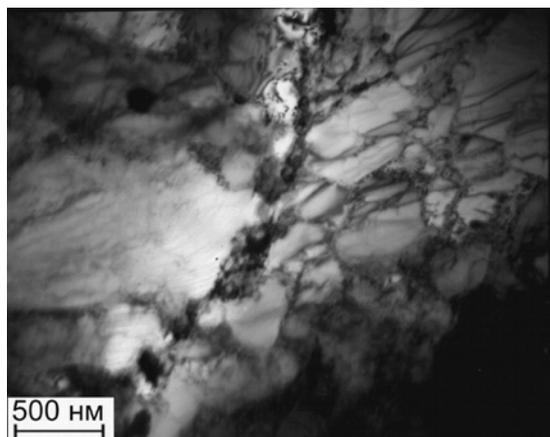
**АСМ-(а) и ПЭМ-изображения (б,в) поверхности образцов технического титана ВТ1-0, подвергнутых обработке электронными пучками с плотностью энергии  $W=18 \text{ Дж/см}^2$**

# Расчетные электронограммы для ГЦК структур.

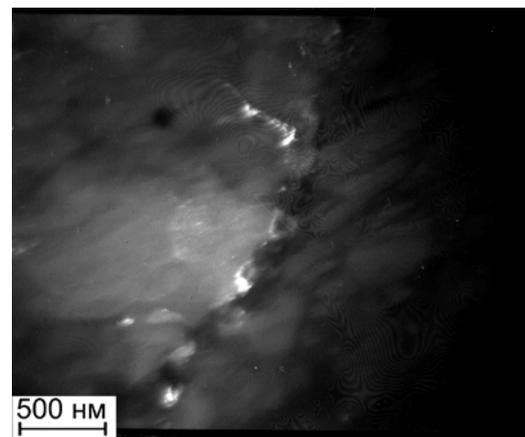


Частицы фазы Лавеса  $\text{TiCr}_2$ , расположенные по границам ферритных зерен малоактивируемой стали ЭК-181:

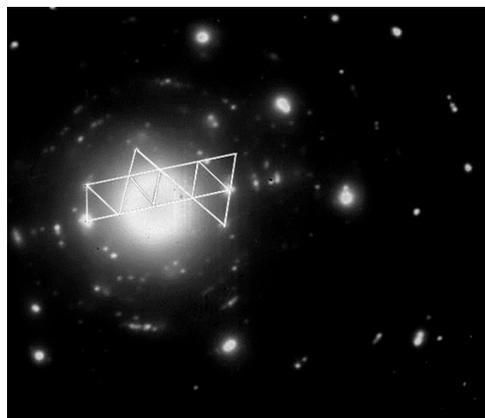
а – светлопольное изображение, б – темнопольное изображение, полученное в близкорасположенных рефлексах  $[\bar{2} \bar{2} 2] \text{TiCr}_2$ , и  $[110] \alpha\text{-Fe}$ , в – микроэлектронограмма, г – соответствующая схема микроэлектронограммы с рефлексами, принадлежащими плоскости  $(011)$  обратной решетки фазы Лавеса  $\text{TiCr}_2$



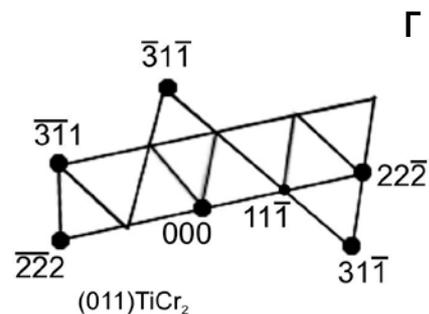
а



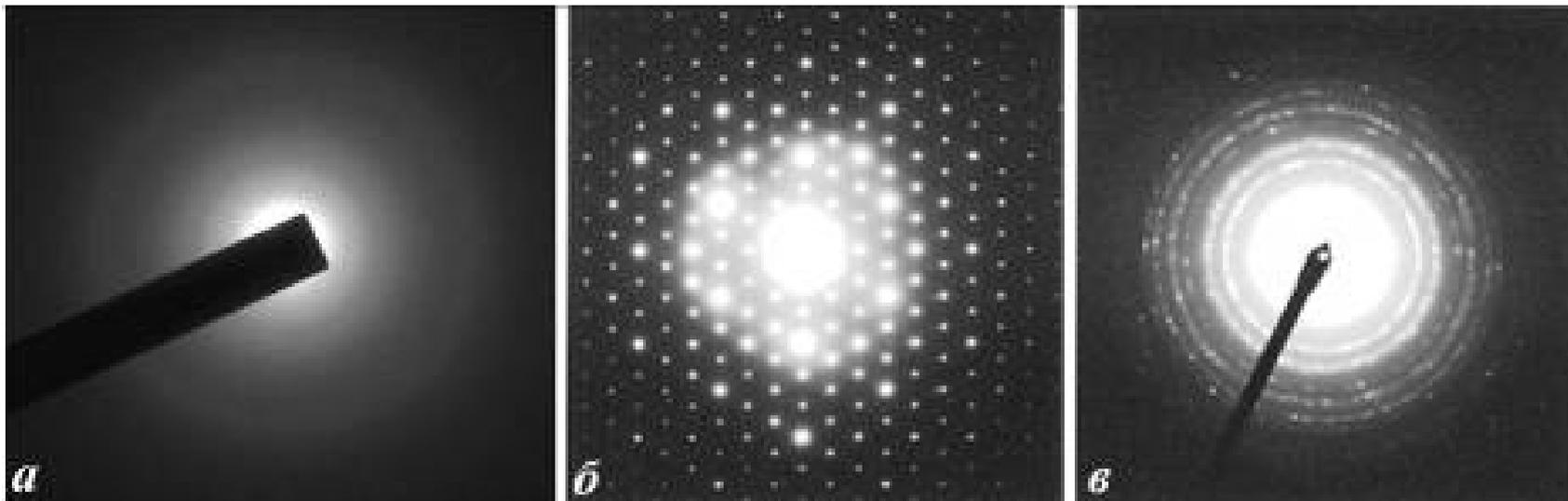
б



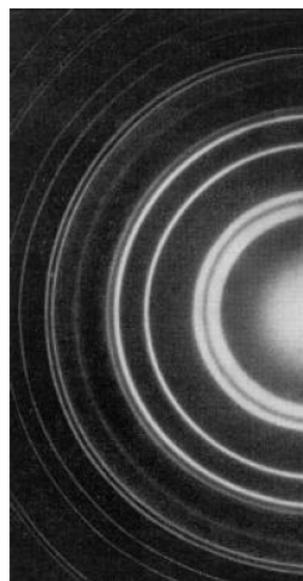
в



г



Типичные дифракционные картины аморфного материала (а), монокристалла (б) и поликристаллического образца (в)



/ 420  
 / 331  
 / 400  
 / 222  
 / 311  
 / 220  
 / 200  
 / 111

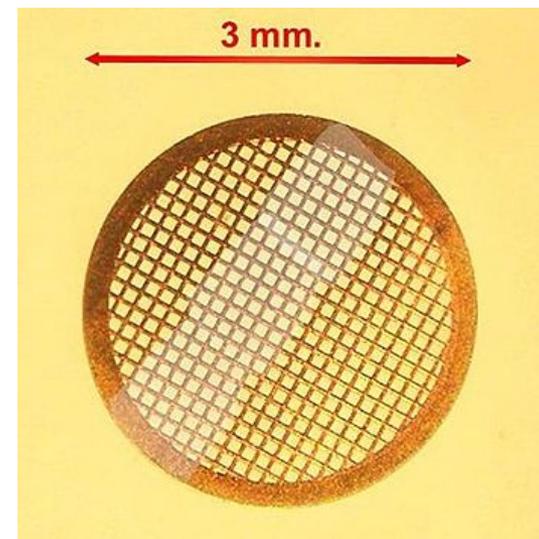
$hkl$	$d, \text{Å}$
1 1 1	2,355
2 0 0	2,039
2 2 0	1,442
3 1 1	1,230
2 2 2	1,1774
4 0 0	1,0196
3 3 1	0,9358
4 2 0	0,9120

Электроннограмма золота

## Пробоподготовка

ПЭМ образцы должны иметь толщину 20-200 нм.

Материалы, имеющие достаточно малые размеры, такие как порошки или нанотрубки, могут быть быстро приготовлены нанесением крошечного количества вещества на поддерживающую **сетку** или пленку.



В случае массивных образцов применяются **механическое утончение, химическое травление, ионное травление**



## Просвечивающий электронный микроскоп

