

Микроскопическая характеристика индивидуальных наноразмерных объектов

Электронная микроскопия

- просвечивающая (transmittance electron microscopy, TEM)
- сканирующая <растровая> (scanning electron microscopy, SEM)

Зондовая микроскопия

- туннельная (scanning tunneling microscopy, STM)
- атомно-силовая (atomic force microscopy, AFM)

Метрология наноразмерных объектов и наноструктур

Introductory guide to nanometrology (Ed. P.-E. Hansen and G. Roebben), 2010

R. Herrera-Basurto, B.M. Simonet, In 'Encyclopedia of Analytical Chemistry', 2013

A.F. Thünemann et al, review of existing calibration or reference materials, 2014

Meas. Sci. Technol. 28 (2017) 012001

Nature Electronics 1 (2018) 532



Standards

About us

News

Taking part

Store



EN



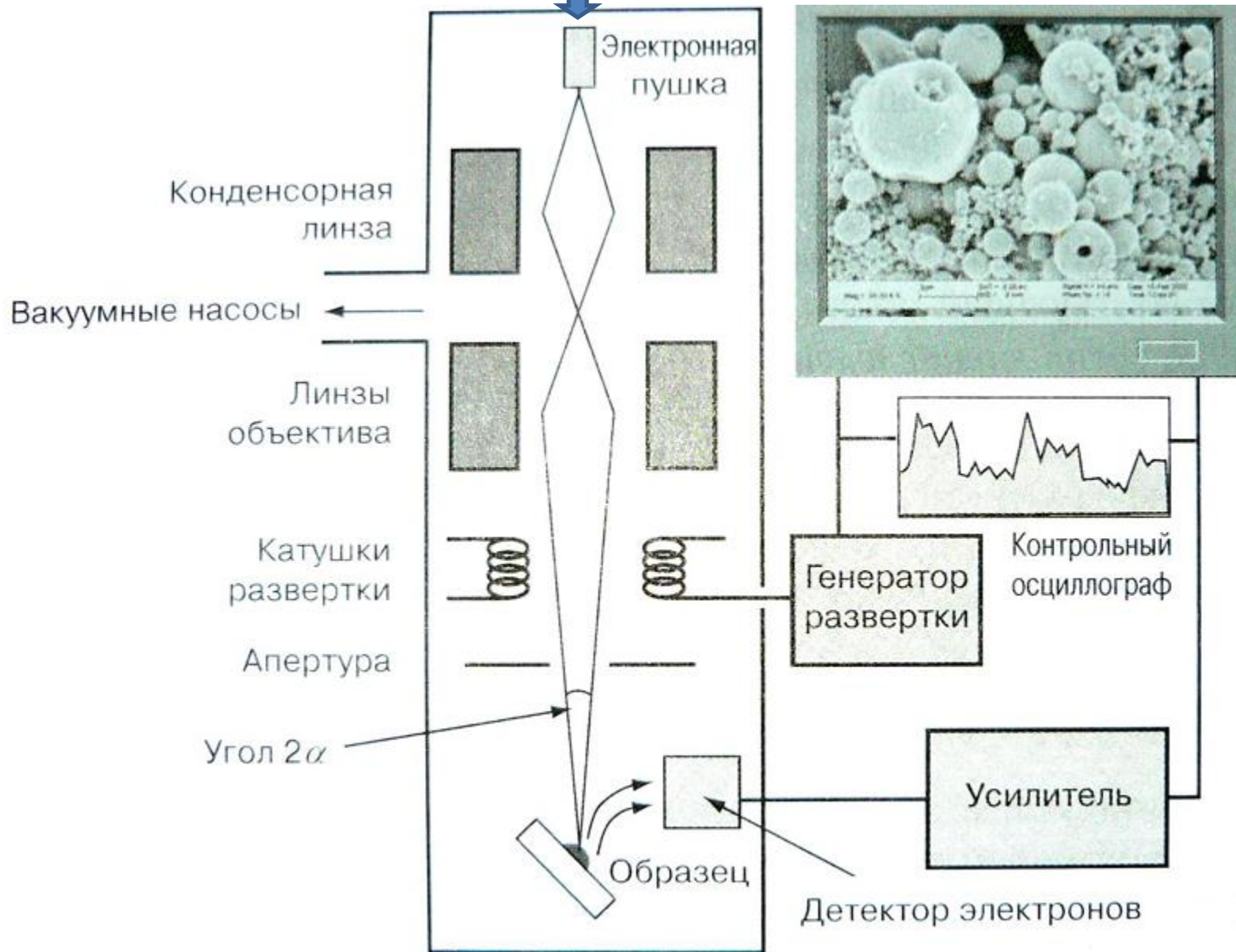
<https://www.iso.org/committee/381983/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>

TC > ISO/TC 229

ISO/AWI TR 18196

Nanotechnologies — Measurement technique matrix for the characterization of nano-objects

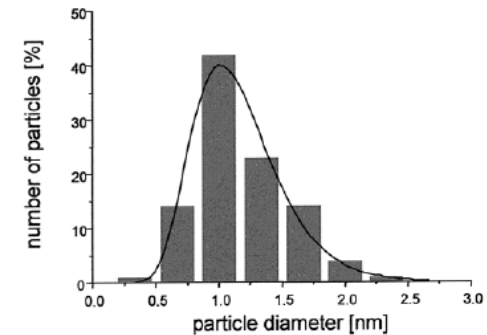
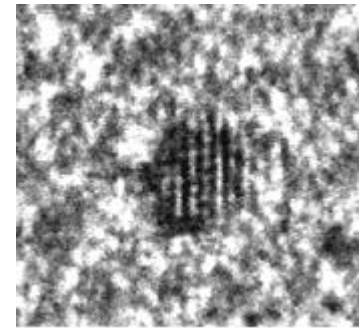
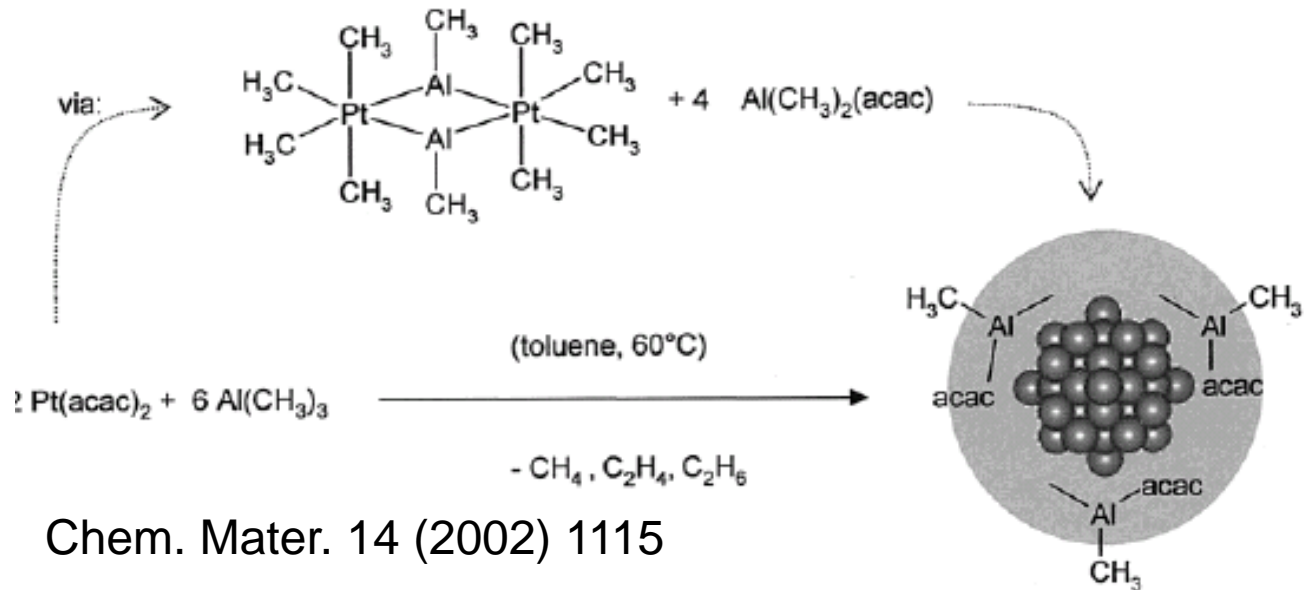
Катод из материала с высокой работой выхода электрона



ТЕМ – прошедшие через образец электроны, напряжение 50 – 200 кВ

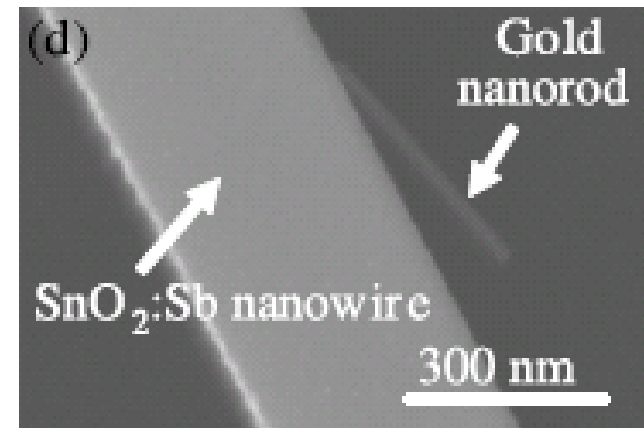
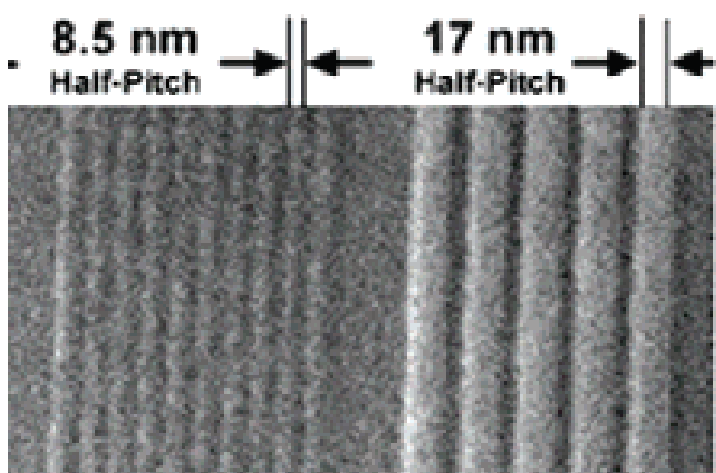
SEM – вторичные и обратнорассеянные электроны, напряжение 1 – 20 кВ

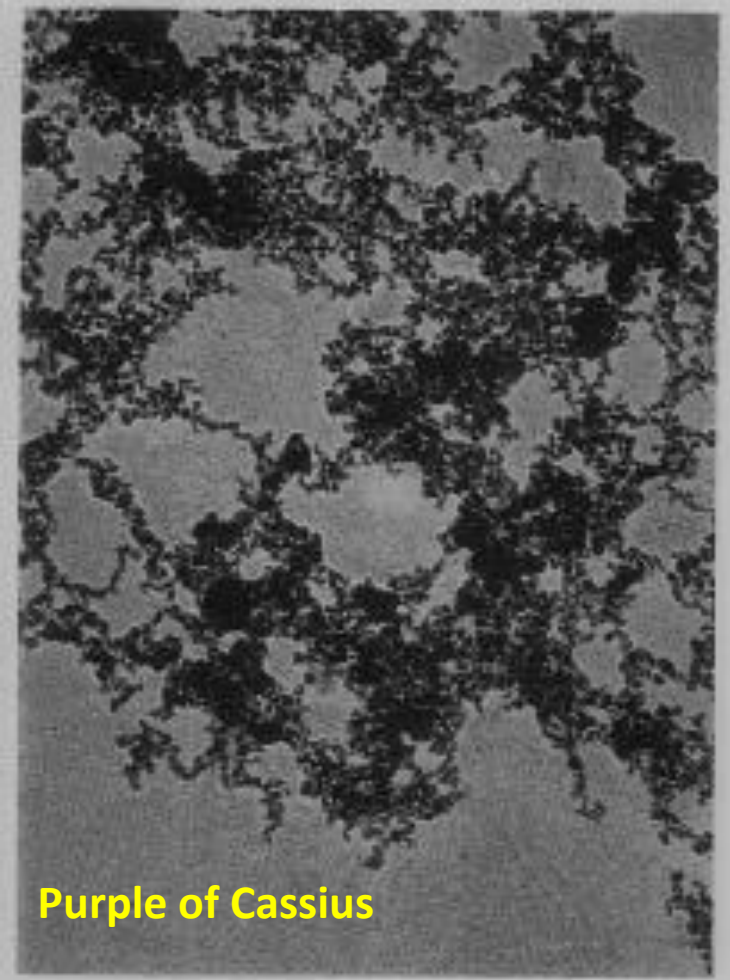
Самые маленькие стабильные частицы (TEM)



Chem. Mater. 14 (2002) 1115

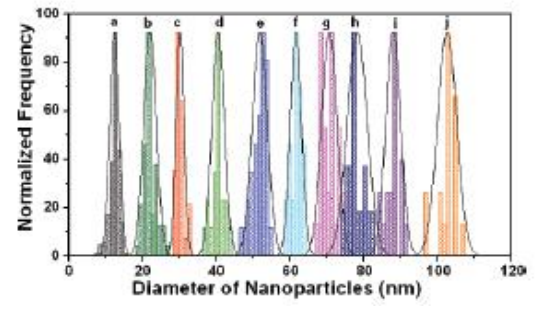
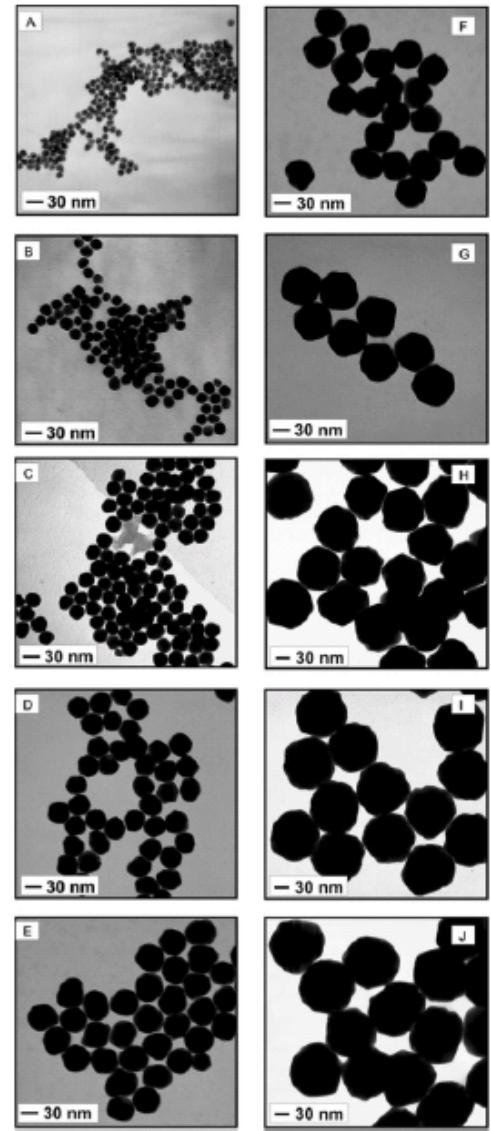
Типичные фрагменты наноструктур (SEM)





Purple of Cassius

Figure 3. Purple of Cassius, 100,000X
Fine particles of stannic hydroxide supporting particles of colloidal gold



60 лет спустя –
- ничего особо
НОВОГО

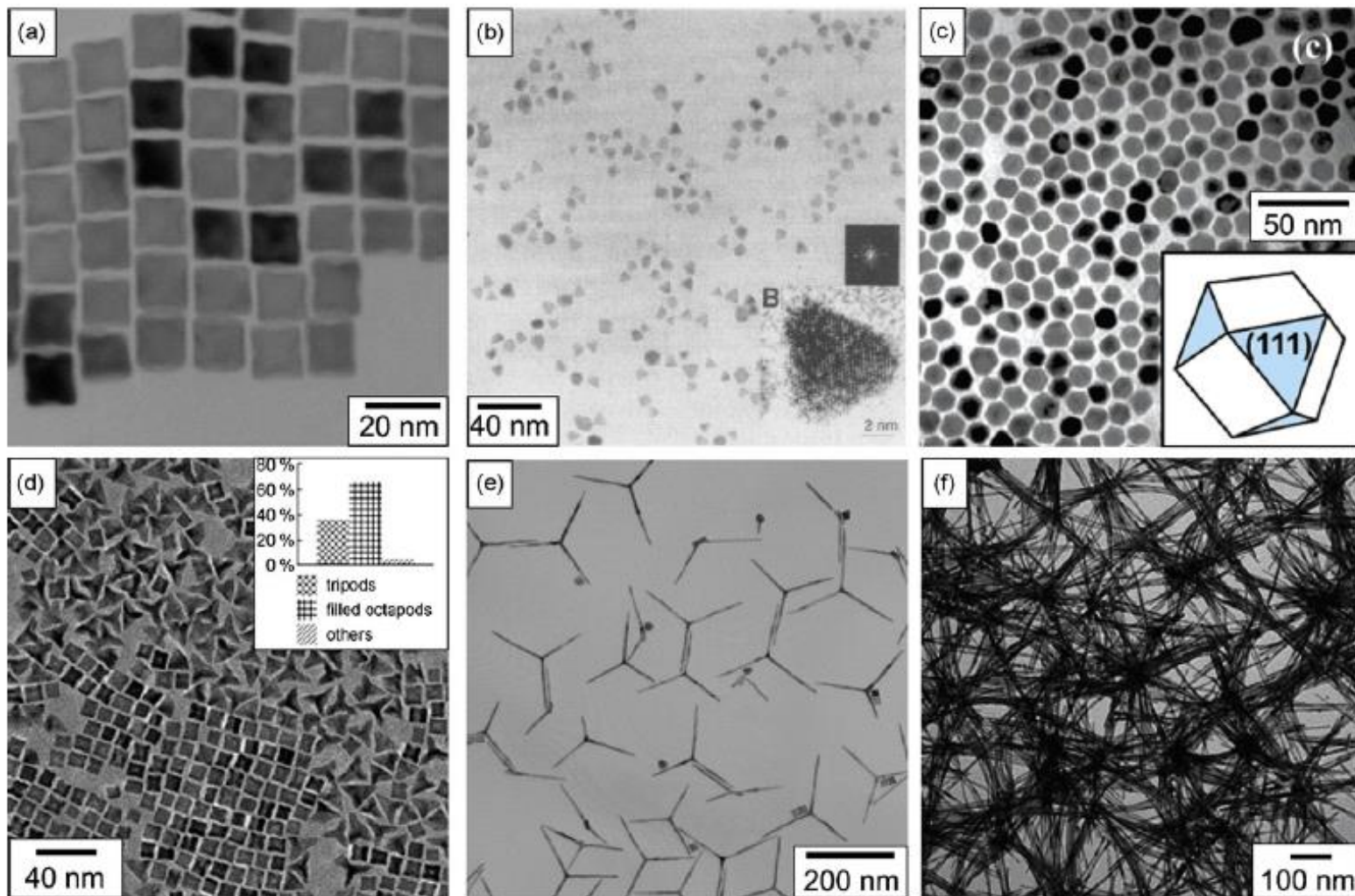


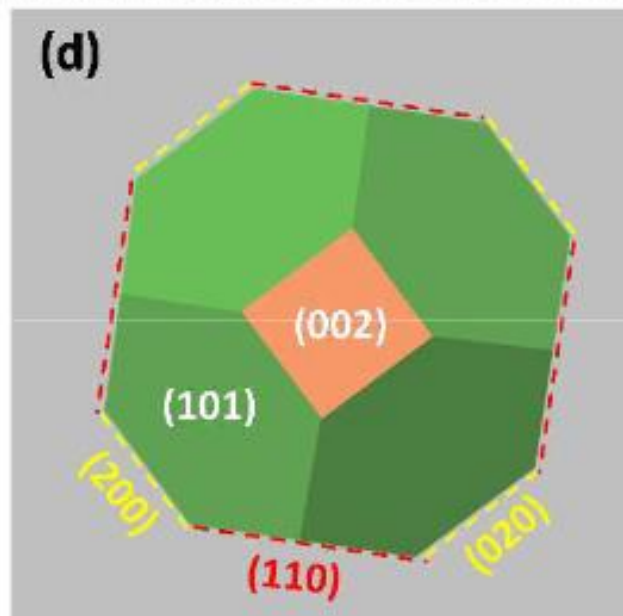
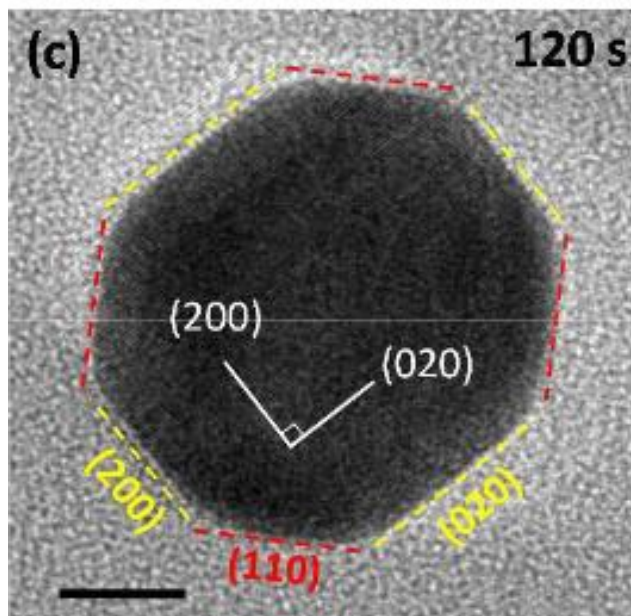
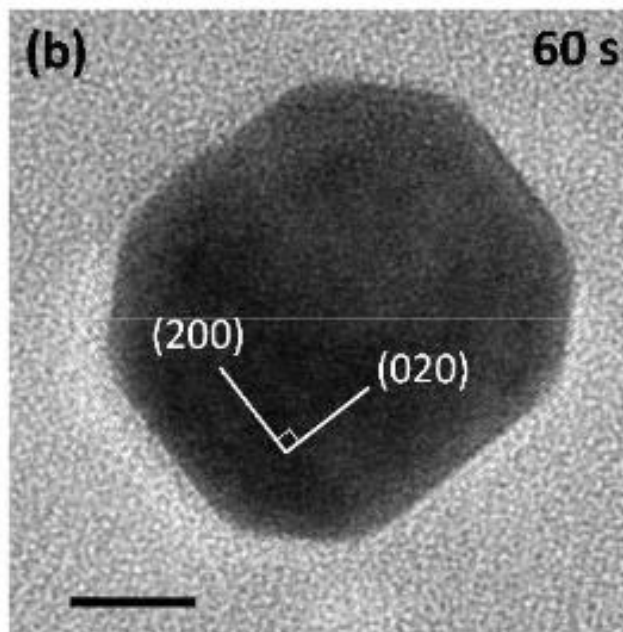
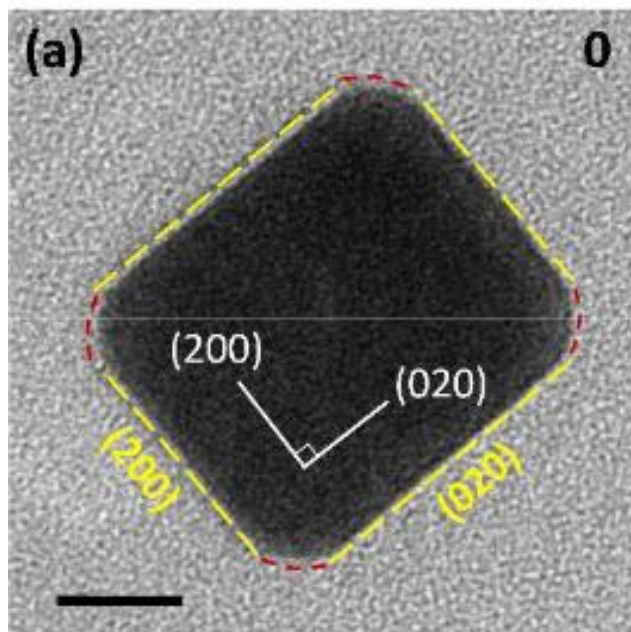
Anal. Chem. 21 (1949) 475 - 485

Electron Microscopy of Colloidal Systems

JOHN TURKEVICH, Princeton University, AND JAMES HILLIER, RCA Laboratories, Princeton, N. J.

**Устойчивые частицы разнообразной формы –
– экспериментальные наблюдения (Pt)**





Динамика изменения
огранки (прямые
наблюдения методом
ТЕМ)

Фильм – в открытом
доступе (Supplementary
File avi)

Core-shell (ядро-оболочка) частицы – золото-серебро

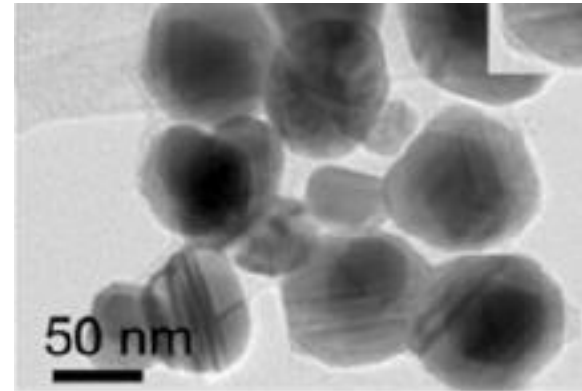
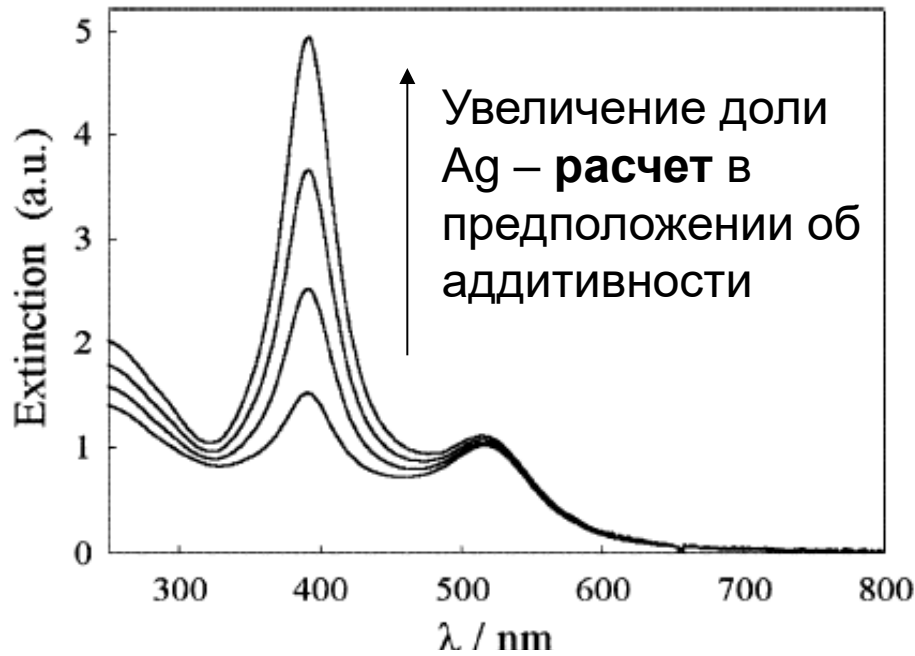
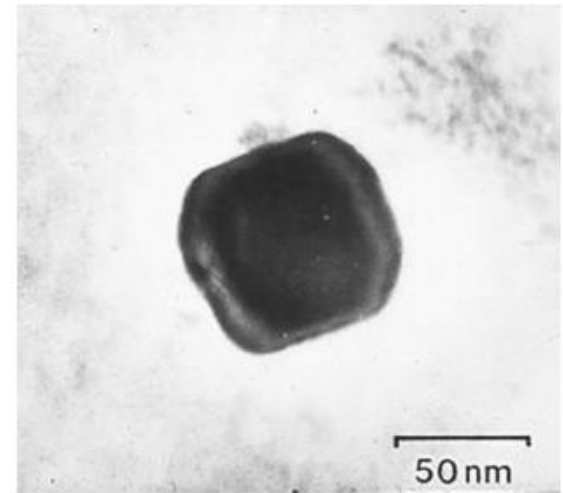
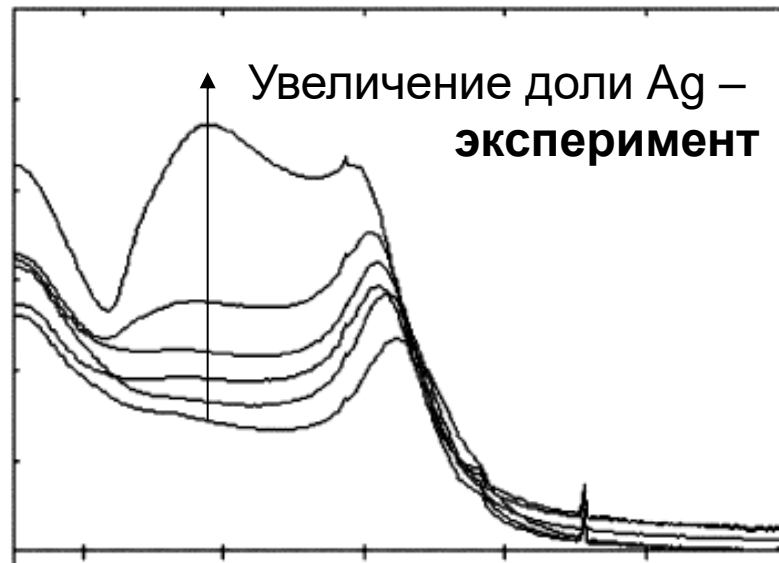


Figure 4

Transmission electron microscopy (TEM) image of a silver-gold alloy particle within the glass of the Lycurgus Cup [21]. © The Trustees of the British Museum.



А это, для сравнения, частица из кубка

Принципиальные проблемы TEM и SEM:

- измерения в вакууме
- воздействие электронного пучка на образец

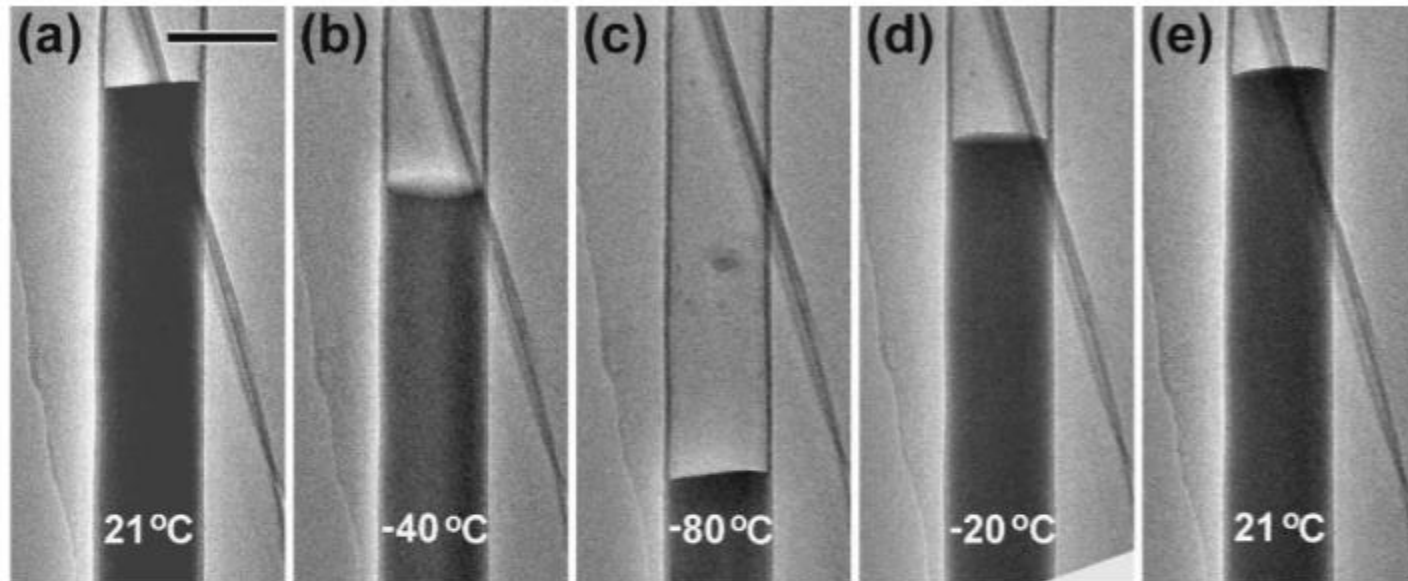
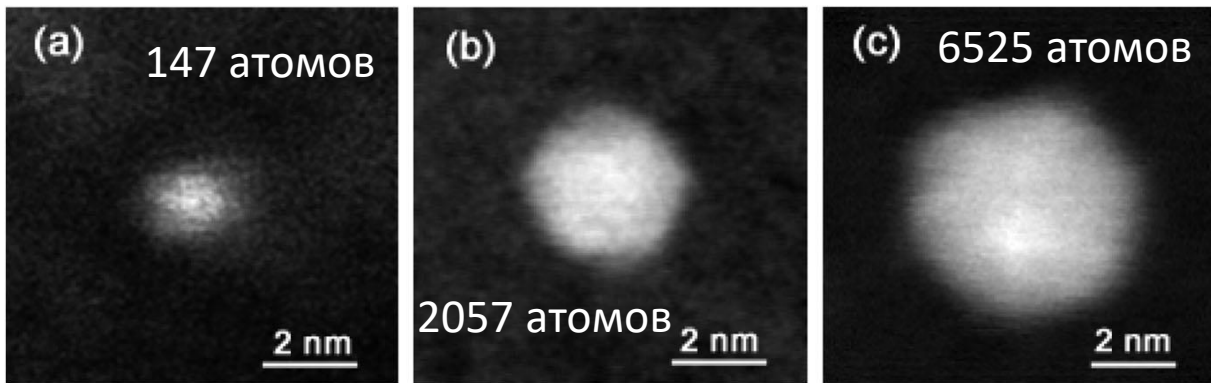
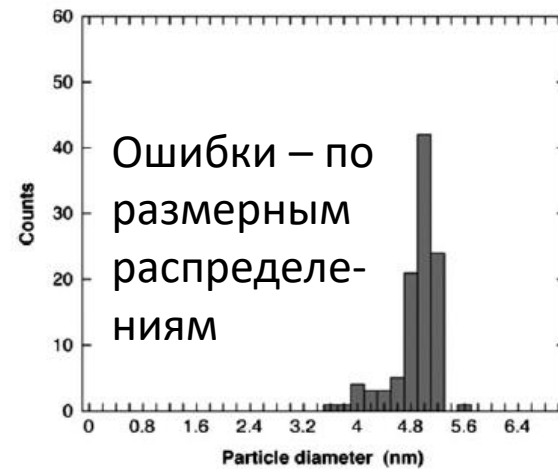
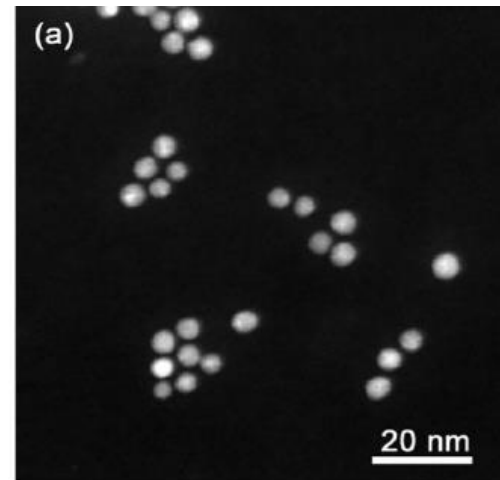
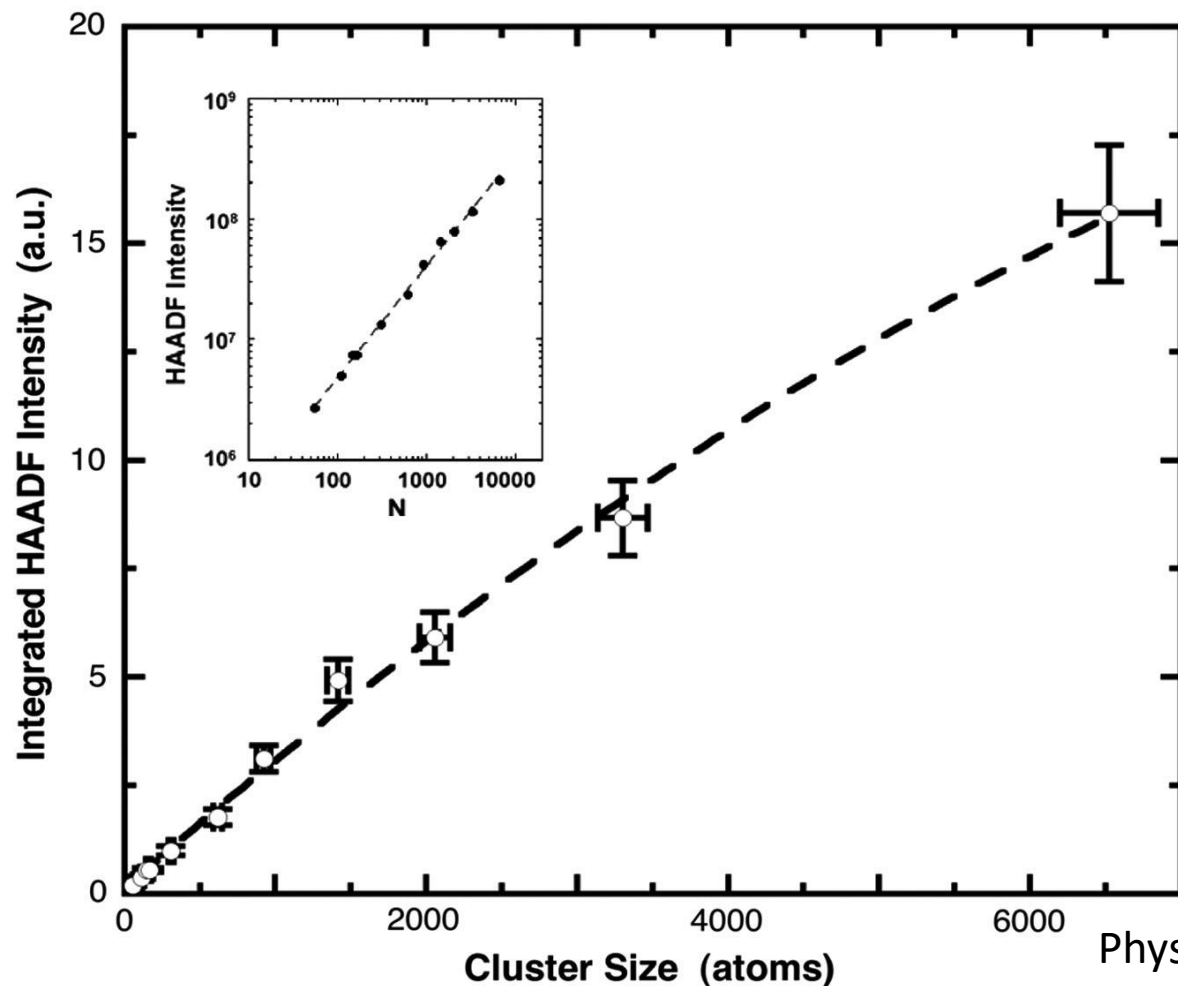


Figure 6–3. The Ga thermometer. Ga contraction and expansion inside a carbon nanotube upon cooling and heating. The background feature is part of the carbon support film. Scale bar = 100 nm. (a) At room temperature, 21°C. (b) At –40°C. (c) At –80°C, when solidification occurred. (d) The crystallized Ga was melted at –20°C. (e) Reheated to room temperature, 21°C. (Reprinted with permission from Z. Liu et al., © 2004 by the American Physical Society)



Калибровка интенсивности
 изображений ТЕМ (просвечивающая электронная микроскопия) по золотым частицам известной массы на графите.



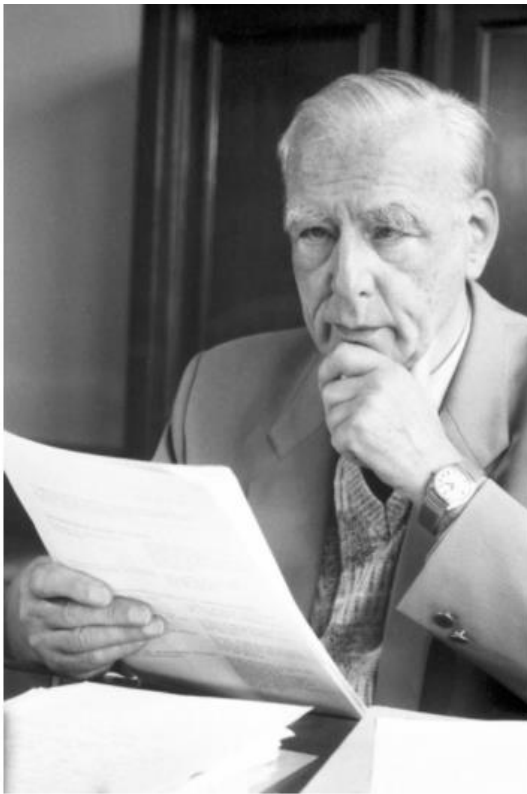


Photo from the Nobel
Foundation archive.

Ernst Ruska

Prize share: 1/2



Photo from the Nobel
Foundation archive.

Gerd Binnig

Prize share: 1/4

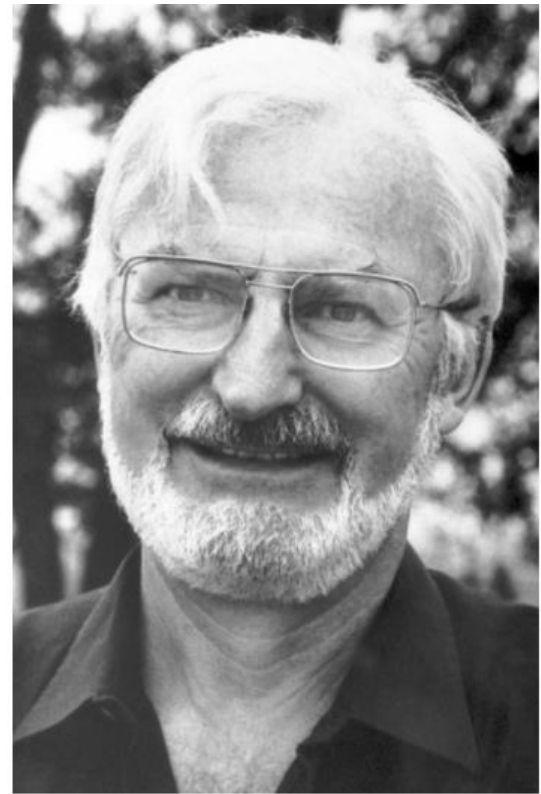


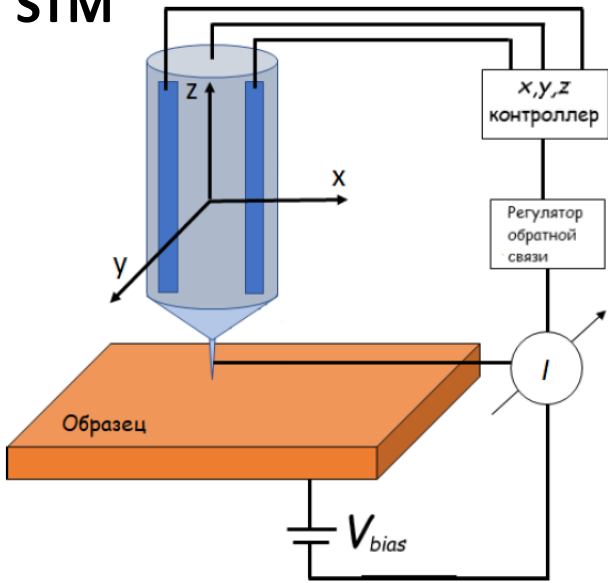
Photo from the Nobel
Foundation archive.

Heinrich Rohrer

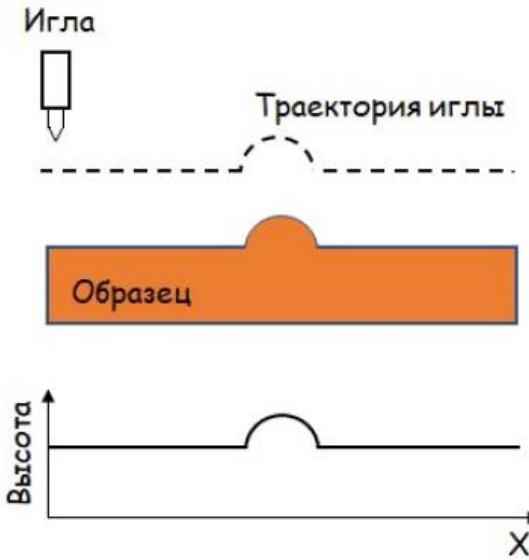
Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 1986 was divided, one half awarded to Ernst Ruska "for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first **electron microscope**", the other half jointly to Gerd Binnig and Heinrich Rohrer "for their design of the **scanning tunneling microscope**."

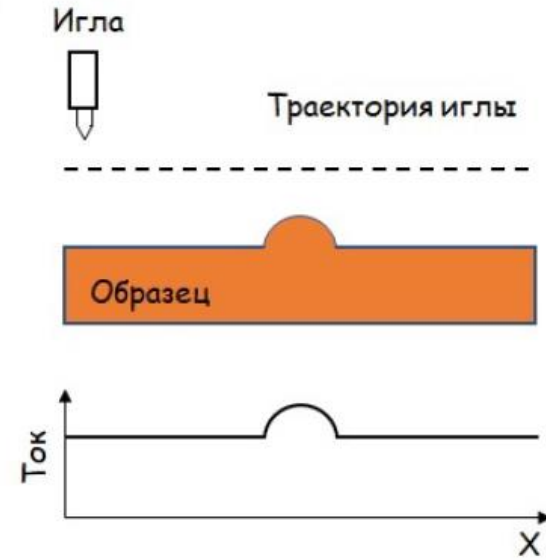
STM



Постоянный ток



Постоянное расстояние

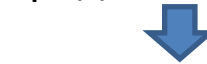


Зависимость туннельного тока от высоты (приближение малых V_{bias} и низких температур)

Коэффициент прохождения электронов через барьер

$$D(\epsilon) \propto e^{-\frac{2\sqrt{2m(U-\epsilon)}d}{\hbar}}$$

усредненная работа выхода электрона



высота



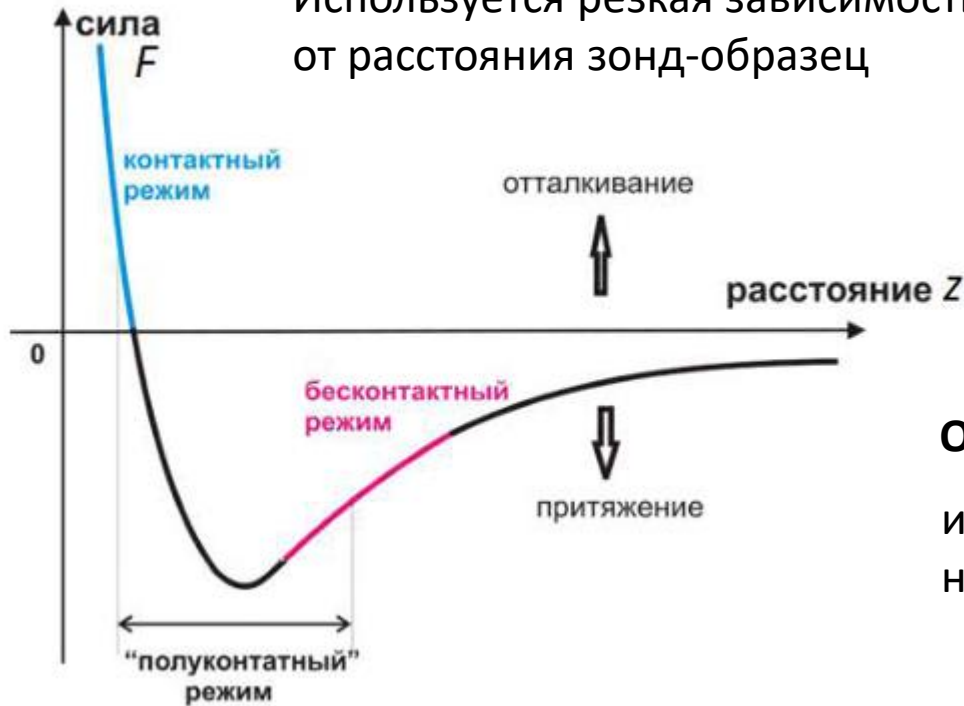
m, ϵ – масса и энергия электрона

$$I(V_{bias}) = \frac{2e}{\hbar} \int_{-\infty}^{+\infty} D(\epsilon)(f_L(\epsilon) - f_R(\epsilon))d\epsilon$$

Функции Ферми-Дирака материалов зонда и образца

AFM (в отличие от STM, позволяет исследовать непроводящие образцы)

Используется резкая зависимость Ван-дер-Ваальсовой силы от расстояния зонд-образец



Общая проблема зондовых методов:
искажение изображений вследствие неидеальности зондов

Общая проблема всех микроскопических методов:

локальность, поэтому недостаточная репрезентативность

Вывод: необходимы сочетания микроскопических и «интегральных» методов (лекция 01.04.2022)

Э.В. Суворов, Методы исследования реальной структуры и состава материалов, М., МИСИС, 2011

В.Л. Миронов
Основы сканирующей зондовой
микроскопии. Н.Новгород, 2004

См. [Зондовая микроскопия](#)

В.Л. Миронов
Магнитно-резонансная силовая
микроскопия ферромагнитных
наноструктур. Н.Новгород, 2016

[Магнитно-силовая микроскопия](#)

на <https://mipt.ru/education/chairs/kvantovye-nanostrukturny-materialy-i-ustroystva/>
--- Образование --- Библиотека

Ресурс П.С. Чижова

<https://www.xraysonweb.ru/xrd>



X-Rays on Web

Рентгеновские методы и не только...

- [Практическое руководство по исследованию наночастиц](#)
- [Практическое руководство по исследованию пленок](#)

П.С. Чижов, Э.Е. Левин, А.С. Митяев, А.В. Тимофеев, Приборы и методы рентгеновской и электронной дифракции, М., МФТИ, 2011.

С.В. Цыбуля, С.В. Черепанова, “Введение в структурный анализ нанокристаллов”, Новосибирск, НГУ, 2008.