

## Электроосаждение и интеркаляция

Понятия и явления:

- пересыщение
- активный центр
- нуклеация и рост фазы
- вторичная нуклеация

Что можно осаждать? Все, т.е.

- металлы и сплавы
- полупроводники
- диэлектрики

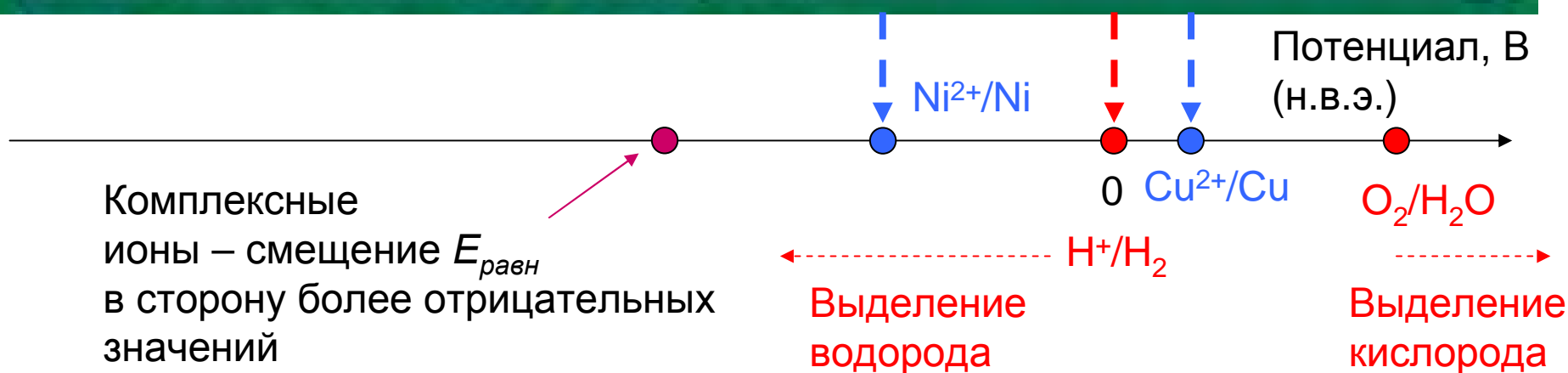
Электрохимически интеркалируемые материалы

- для хранения водорода
- для электрохромных устройств и сенсоров
- для источников тока

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ РЯД НАПРЯЖЕНИЙ МЕТАЛЛОВ

Li	Cs	K	Ba	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Fe	Co	Ni	Sn	Pb	H <sub>2</sub>	Cu	Ag	Hg	Pt	Au
-3,04	-3,01	-2,92	-2,90	-2,87	-2,71	-2,35	-1,66	-0,76	-0,44	-0,28	-0,25	0,14	-0,13	0	+0,34	+0,80	+0,85	+1,28	+1,50
Li <sup>+</sup>	Cs <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Sn <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	2H <sup>+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Ag <sup>+</sup>	Hg <sup>2+</sup>	Pt <sup>2+</sup>	Au <sup>3+</sup>

Восстановительная активность металлов (способность отдавать электроны) уменьшается, а окислительная способность их катионов (способность присоединять электроны) увеличивается в указанном ряду слева направо.



**1. Электролиты на основе простых солей.**

**2. Электролиты на основе комплексных соединений.**

**3. Электролиты с блескообразующими добавками.**

**Электролиты на основе неводных растворителей  
и низкотемпературных расплавов**

Пересыщение → Образование зародыша (nucleus)

$$\eta = \frac{RT}{nF} \ln \frac{c^*}{c_H}$$

Работа образования новой поверхности:

$$A = -\Delta G = 4\pi r^2 \sigma - \frac{4\pi r^3}{3V_M} RT \ln \frac{c^*}{c_H} \xrightarrow{d(\Delta G)/dr = 0} RT \ln \frac{c^*}{c_H} = \frac{2\sigma V_M}{r_3}$$

Формула Томсона

$$\ln I = \text{const} - \frac{k_1}{\eta^2} \xleftarrow{3D} r_3 = \frac{2\sigma V_M}{nF\eta}$$

$$\ln I = \text{const}_1 - \frac{k_2}{\eta} \xleftarrow{2D}$$

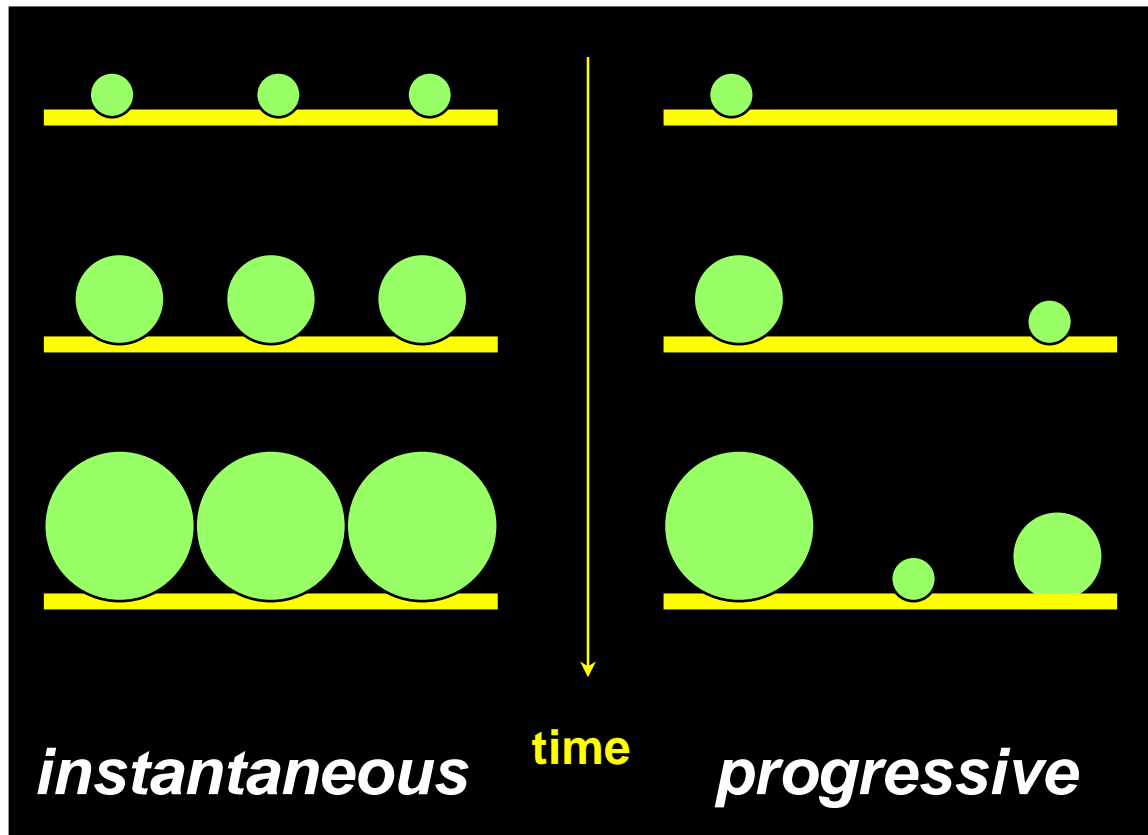
# Активные центры

$$N = N_0 [1 - \exp(-At)]$$

$$\longrightarrow I = nFkS(t)$$

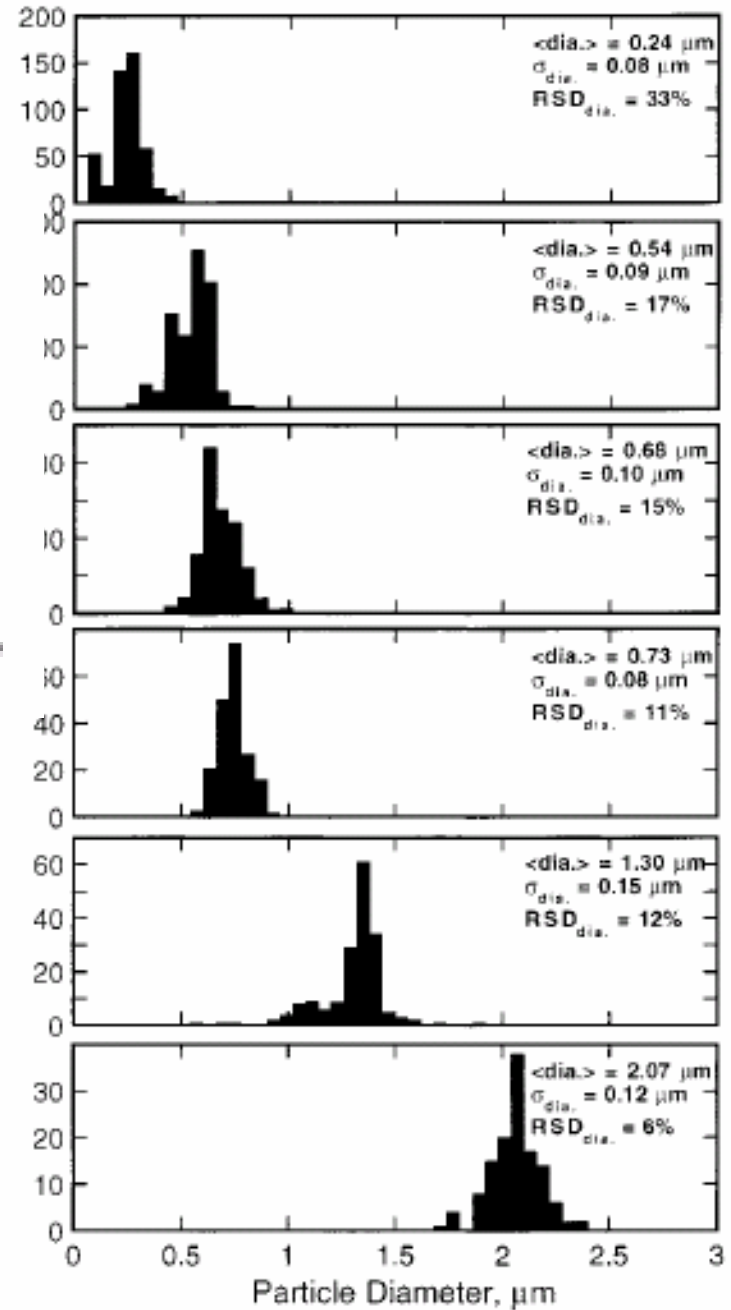
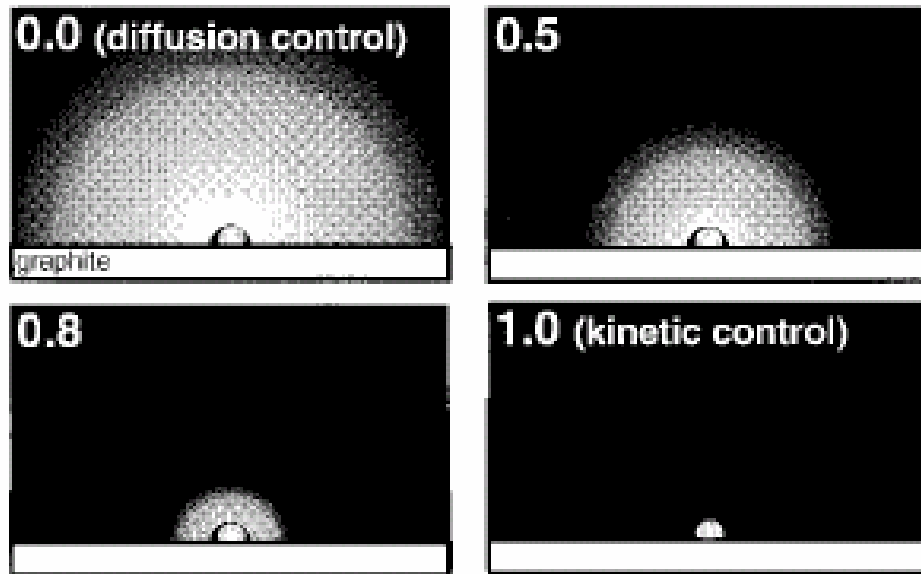
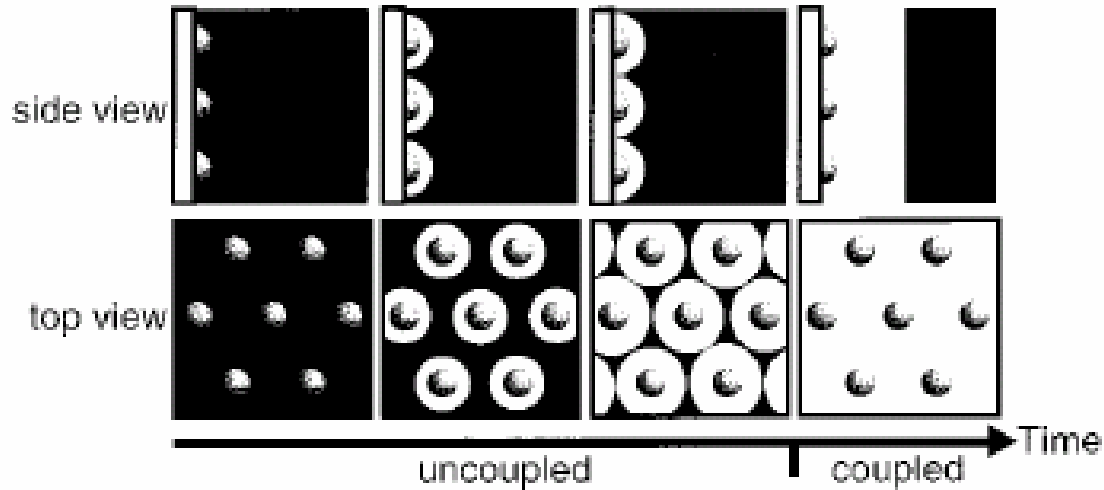
Перекрывание

$$I = \text{const} \cdot t^n \exp(-\text{const}' \cdot t^m)$$



$M(t)$  – по закону  
Фарадея

# Контроль размера частиц (прямой независимый метод)



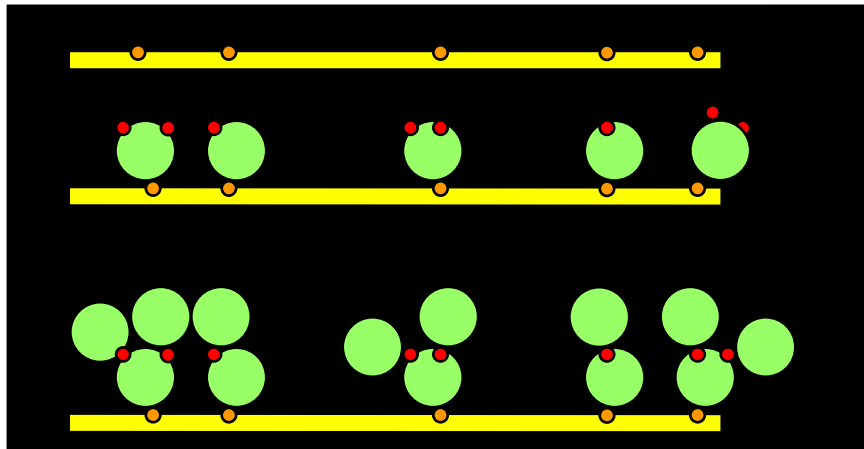
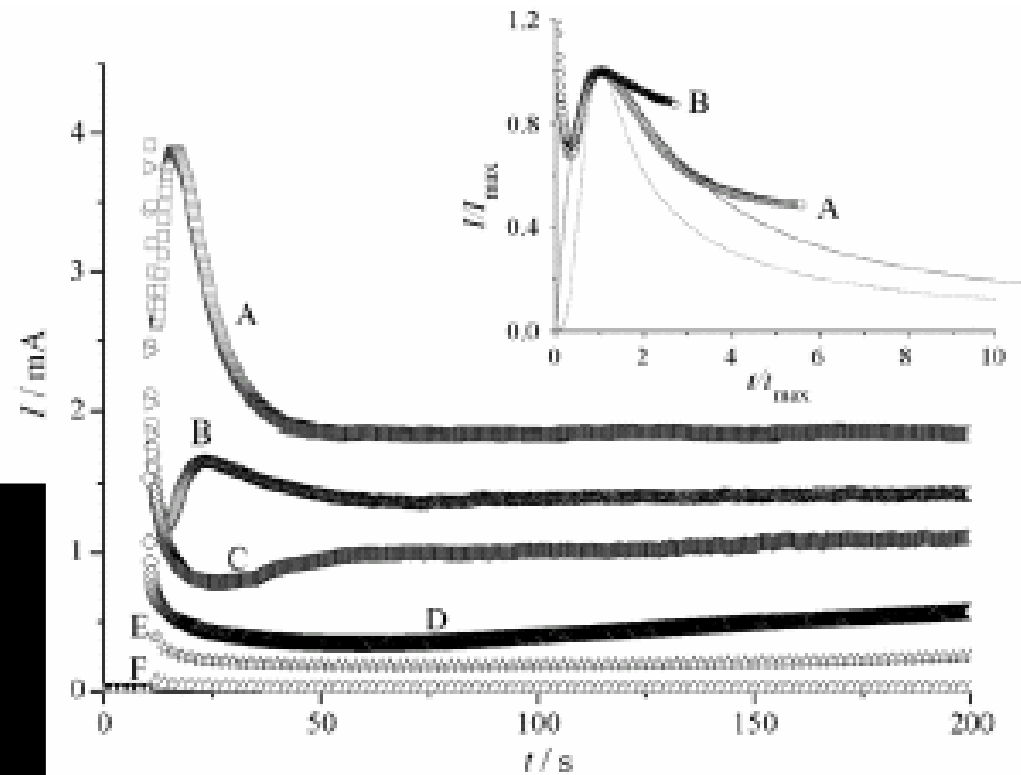
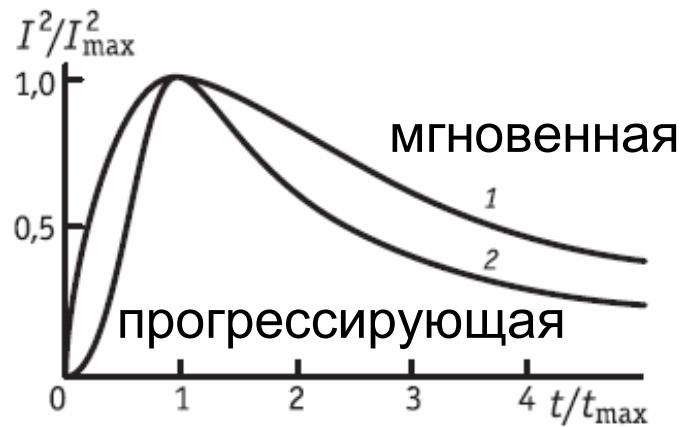
Начальные участки I,t-кривых (current transients):

$$I = \text{const} * t^n$$

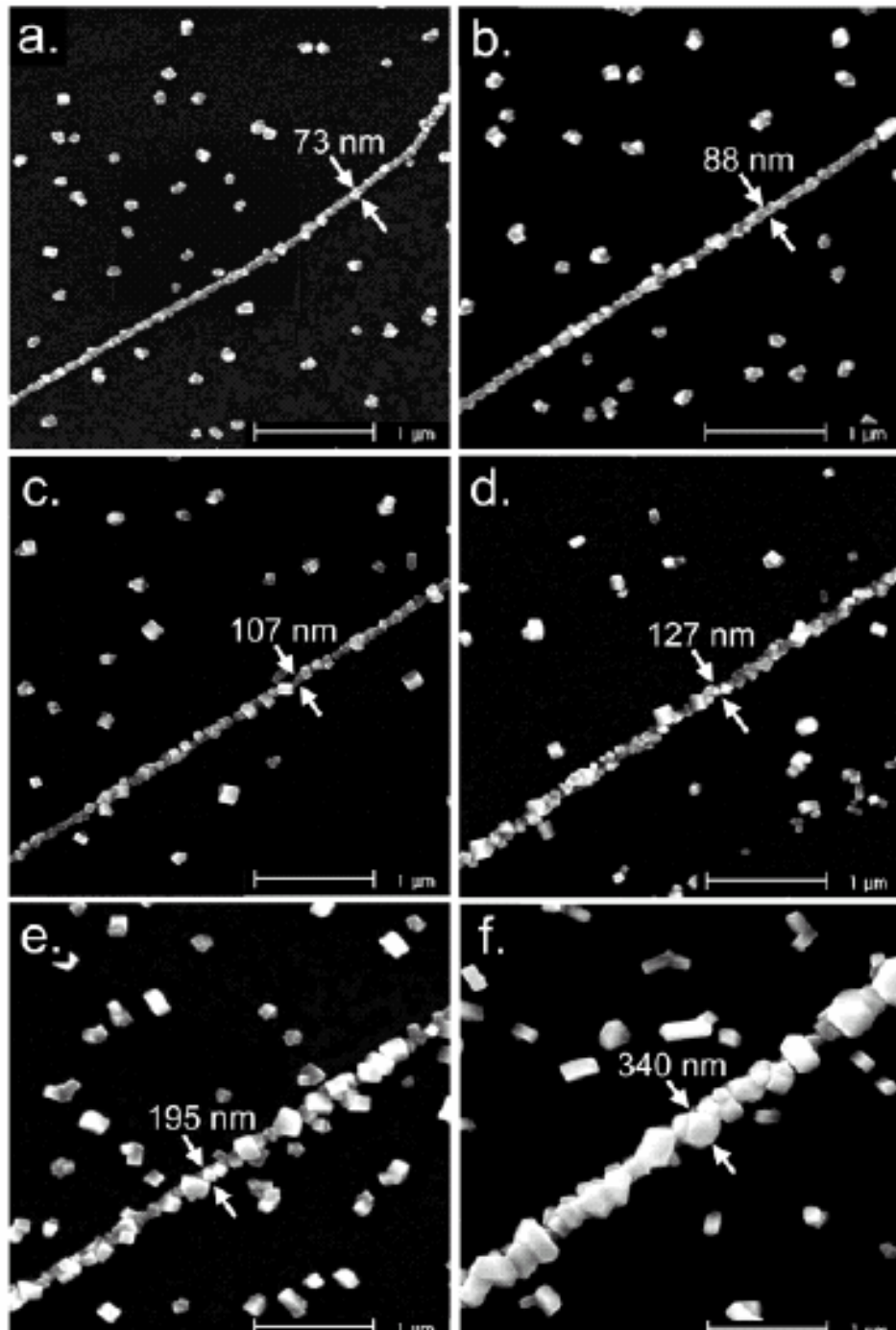
<i>n</i>	Контроль	Геометрия зародыша (роста)	Характер нуклеации
0	Диффузионный	2D	Мгновенная
1/2	Диффузионный	3D	Мгновенная
1	Кинетический	2D	Мгновенная
1	Кинетический	1D	Прогрессирующая
1	Диффузионный	2D	Прогрессирующая
3/2	Диффузионный	3D	Прогрессирующая
2	Кинетический	3D	Мгновенная
2	Кинетический	2D	Прогрессирующая
3	Кинетический	3D	Прогрессирующая

Анализ транзиентов тока в приведенных координатах  
(один из многочисленных примеров)

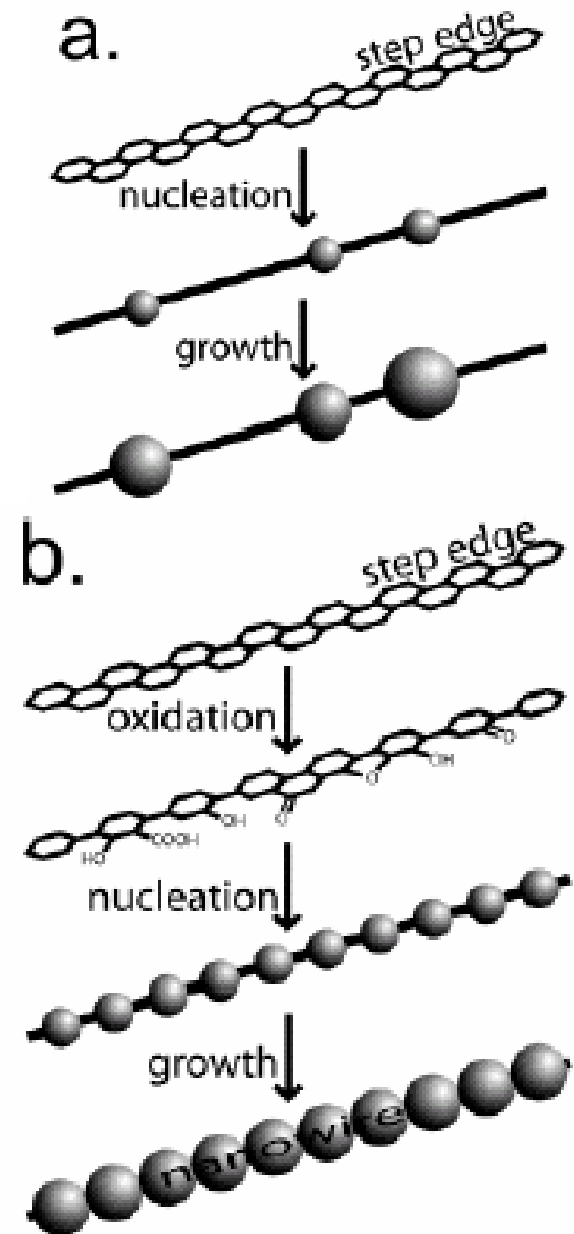
$$\left(\frac{I}{I_{\max}}\right)^2 = 1,9542 \frac{t_{\max}}{t} \cdot \left[1 - \exp\left(-1,2564 \frac{t}{t_{\max}}\right)\right]^2$$



вторичная нуклеация  
(рост дендритов)



## «Step decoration»





## Электроосаждение соединений



Катодная  
электрокристаллизация



Анодная электро-  
кристаллизация

Различие растворимостей окисленной и восстановленной форм

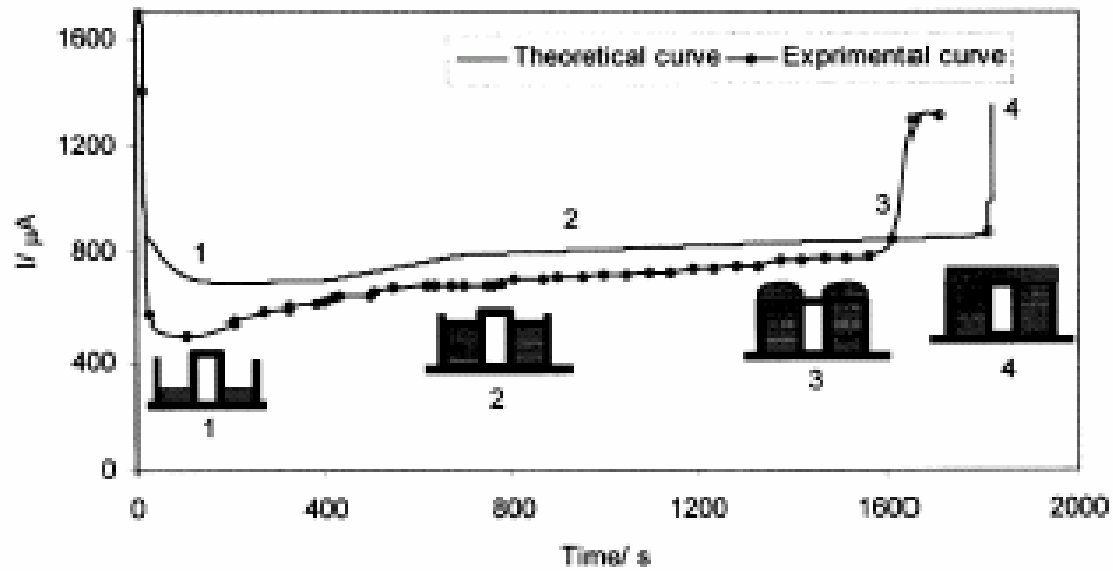
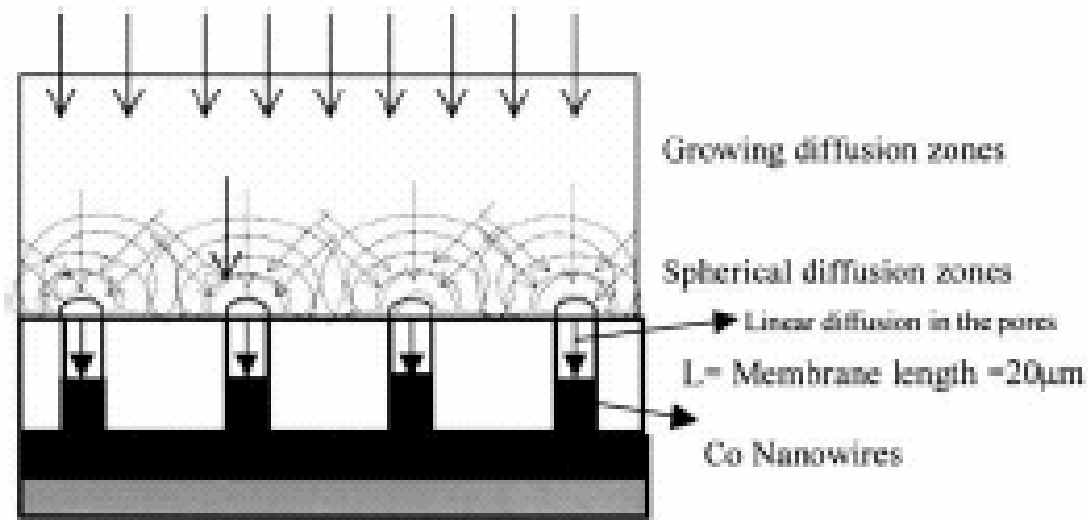


Метастабильный раствор  
изополивольфраматов в  
кислоте



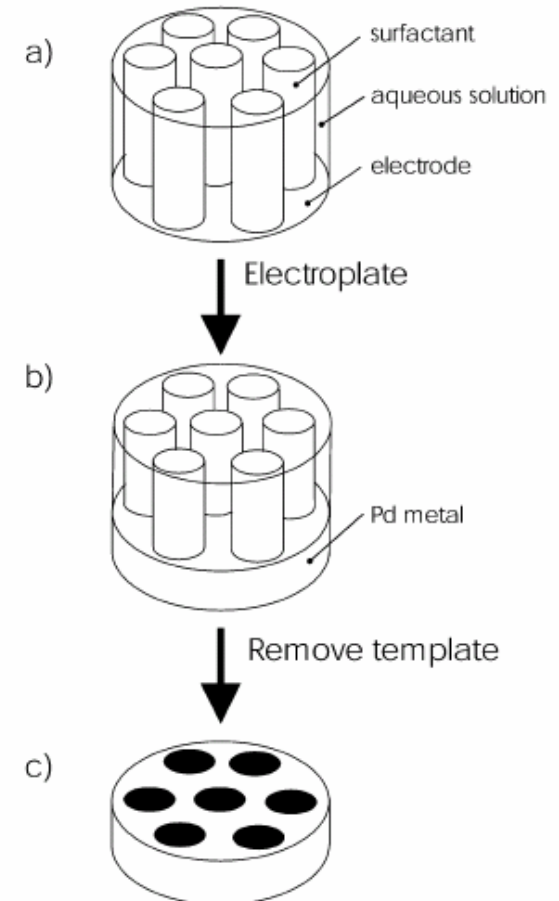
Единственных путей  
нет

# Темплатируемое осаждение

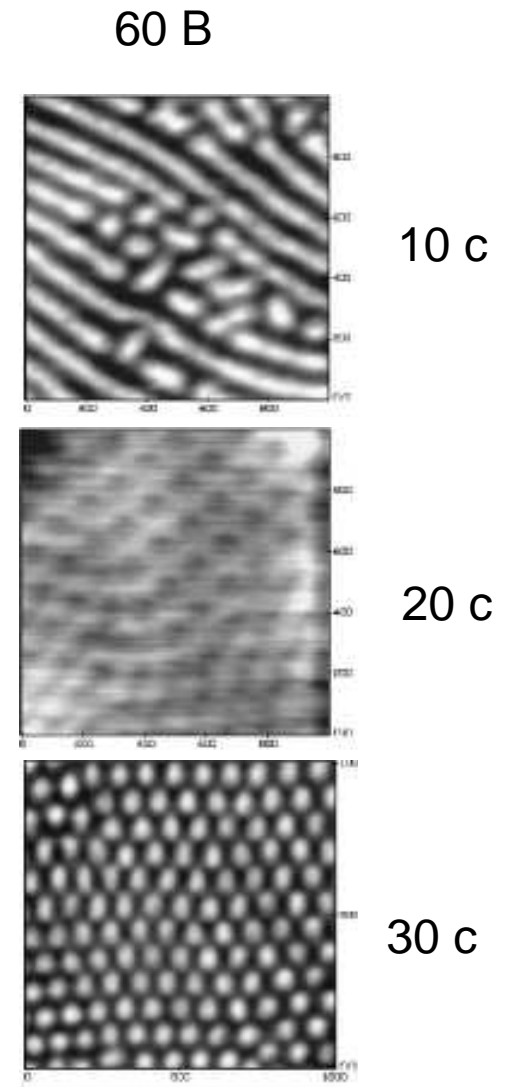
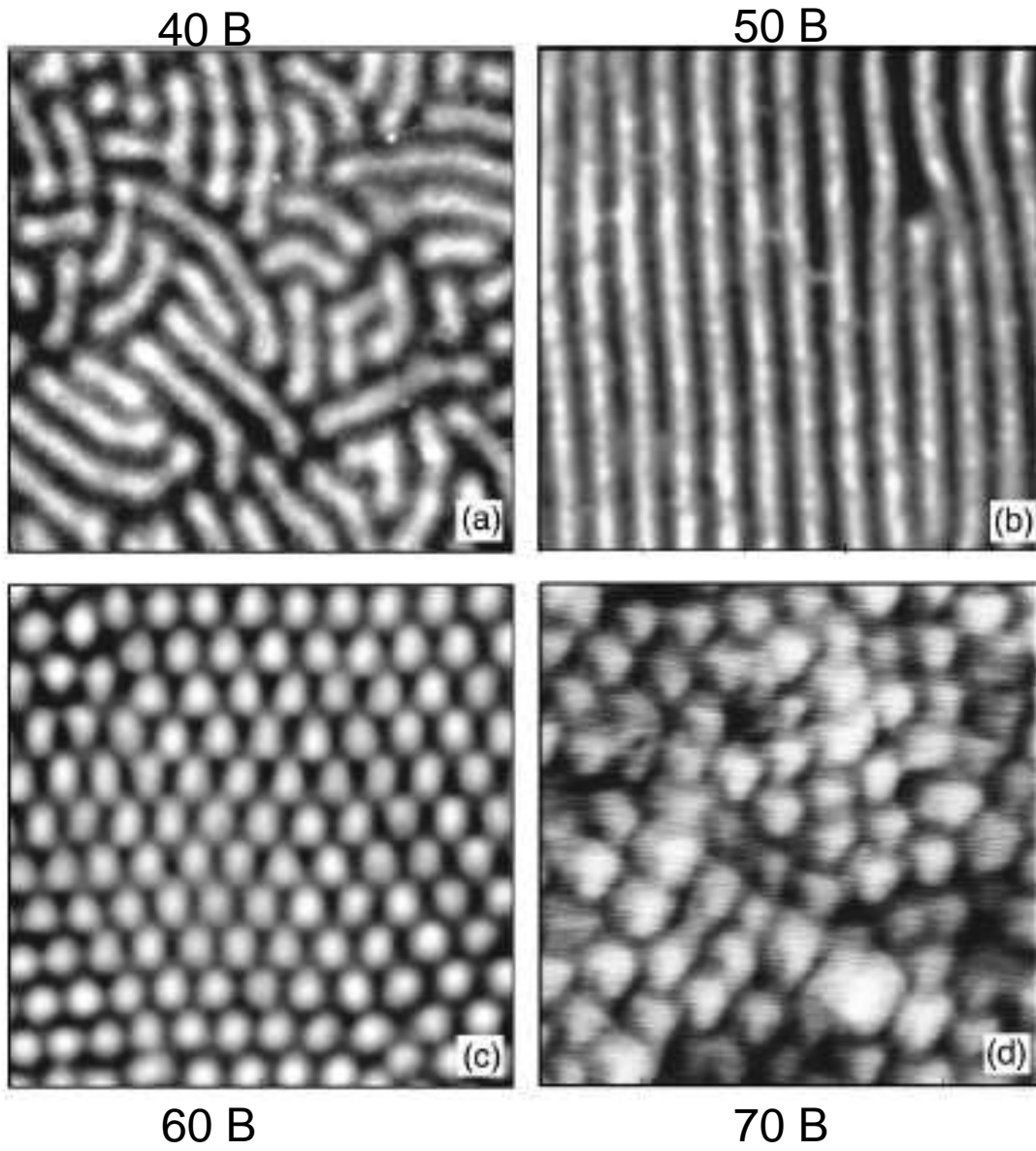


## Матрицы:

- твердые неорганические
- полимерные
- жидкие кристаллы



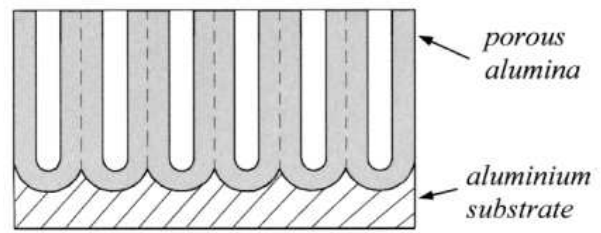
# Упорядочение пор при анодировании алюминия



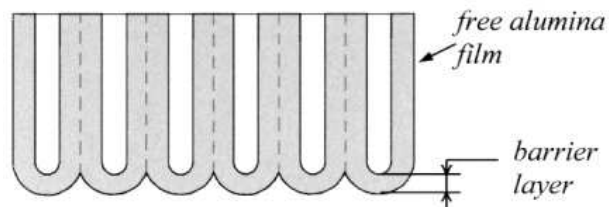
Этанол+вода+HClO<sub>4</sub>

Phys. Rev. B 56 (1997) 12608

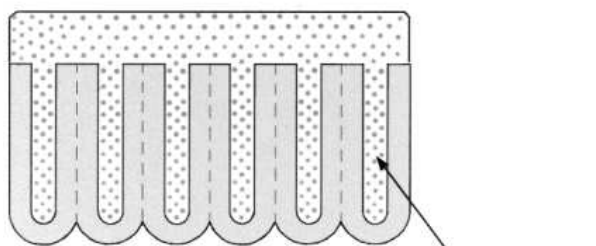
# При гексагональном упорядочении возникает возможность формирования вертикальных пор



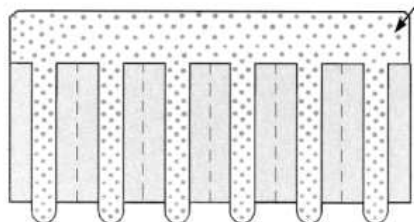
A



B



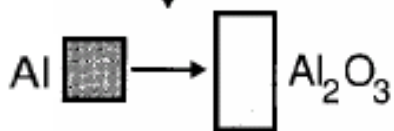
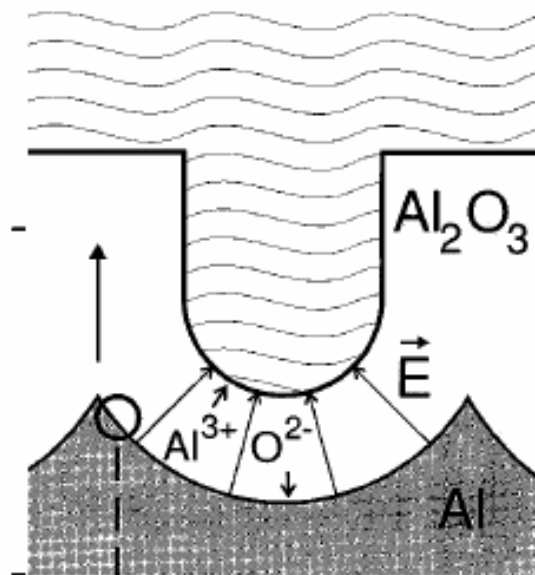
C



D

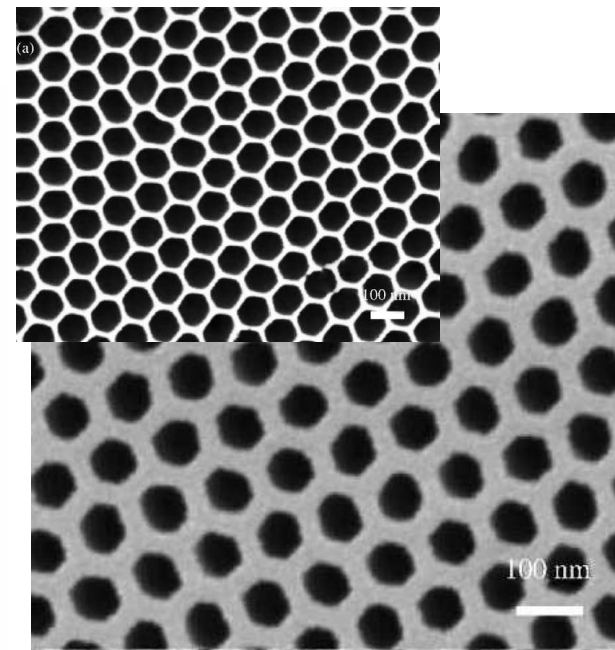


E

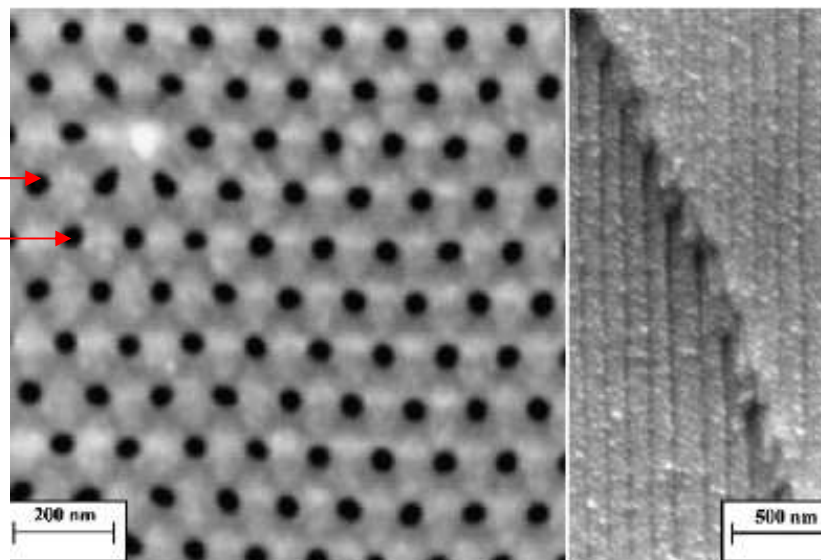


60-150 нм

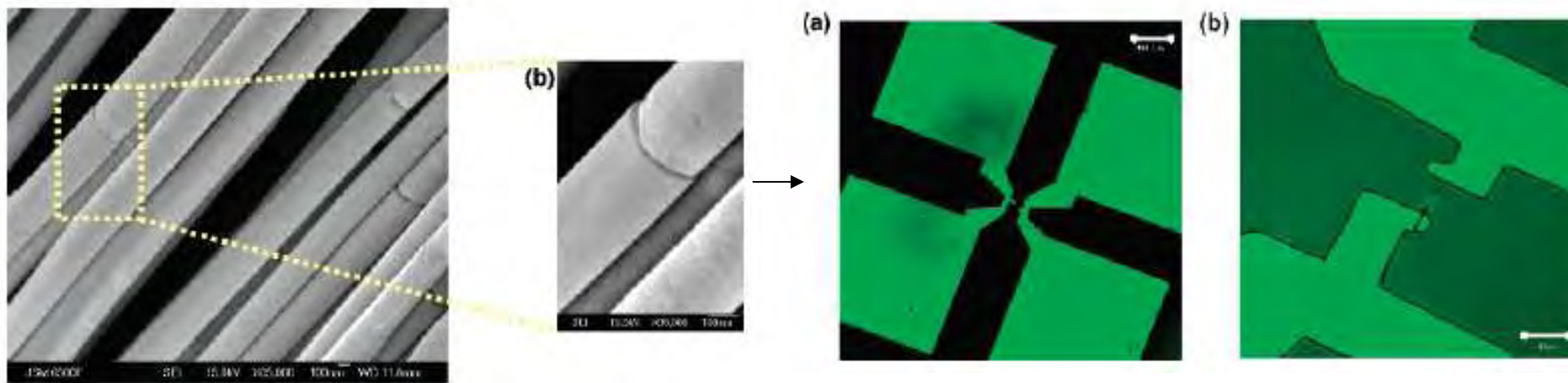
до 100-150 мкм



Диаметры от 15-20 нм

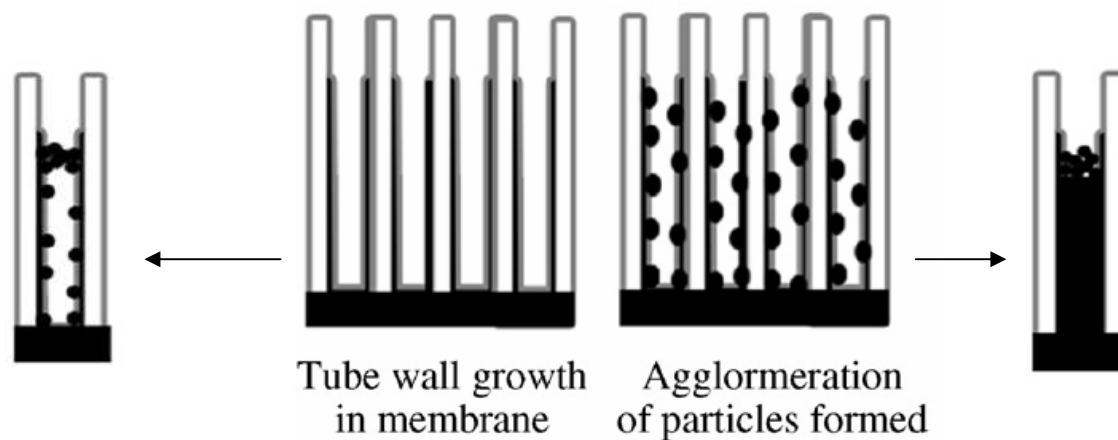
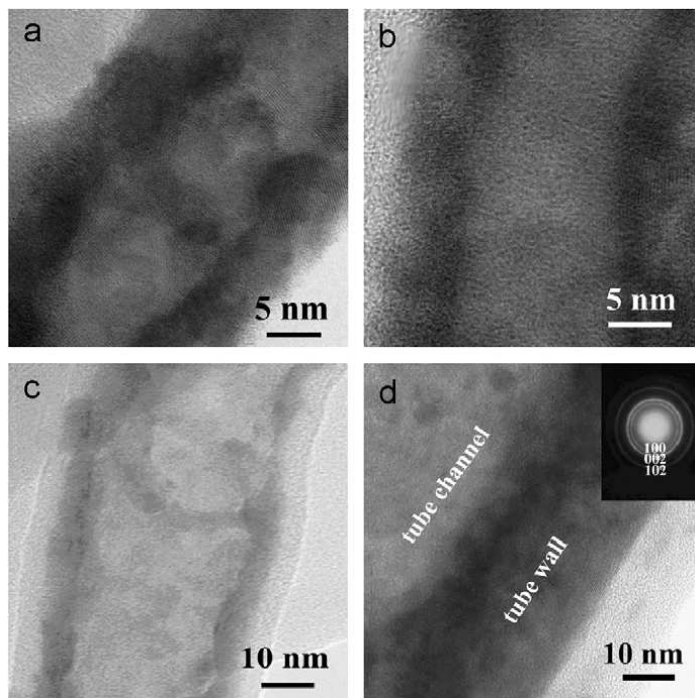


## Золото в оксидно-алюминиевых матрицах



Anal. Chem. 78 (2006) 951

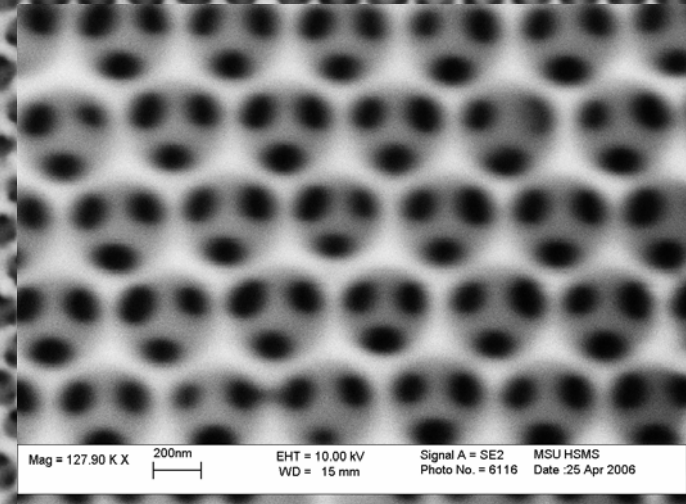
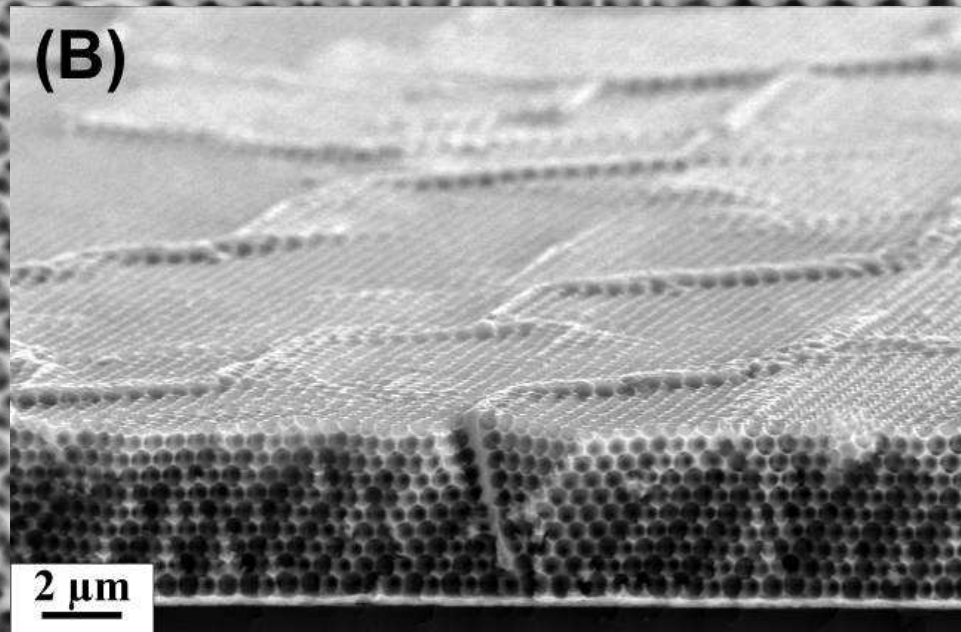
## CdS в трековых мембранах



J. Crystal Growth 310 (2008) 612



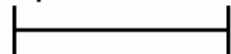
(B)



## Инвертированные опалы

Mag = 20.00 K X

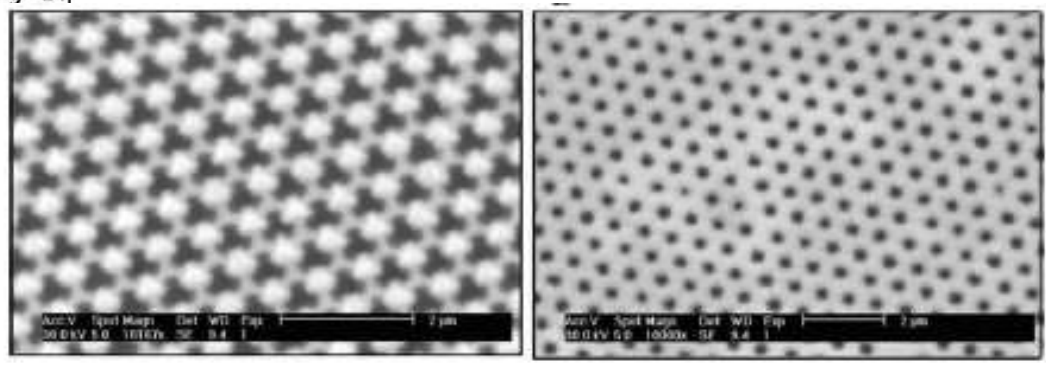
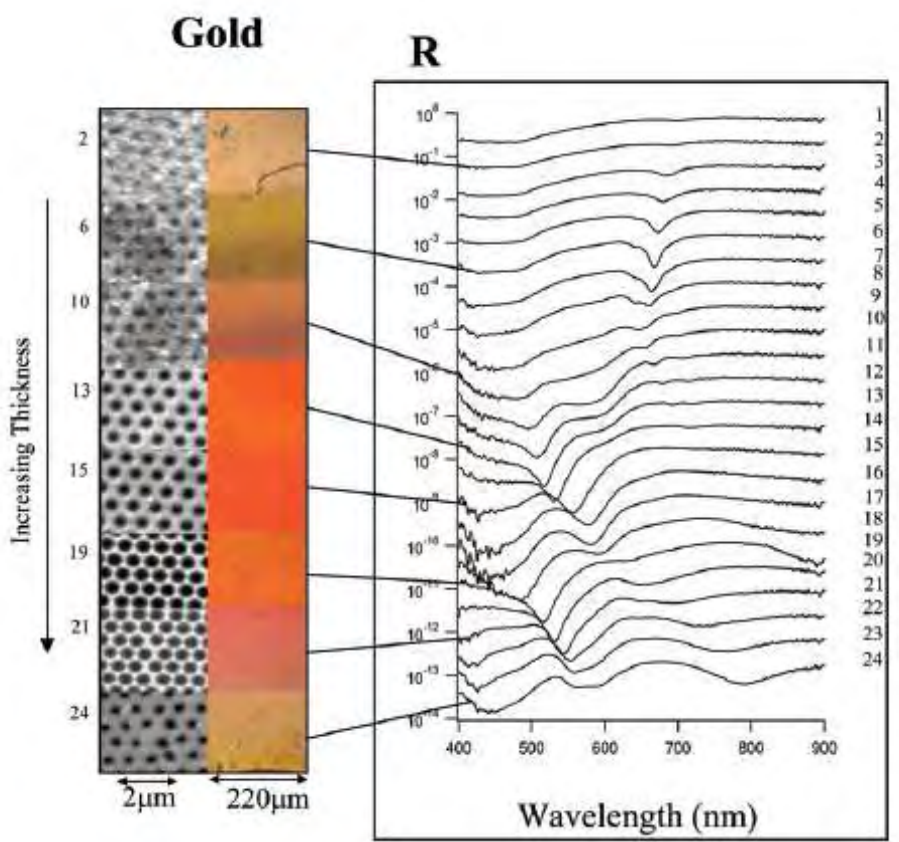
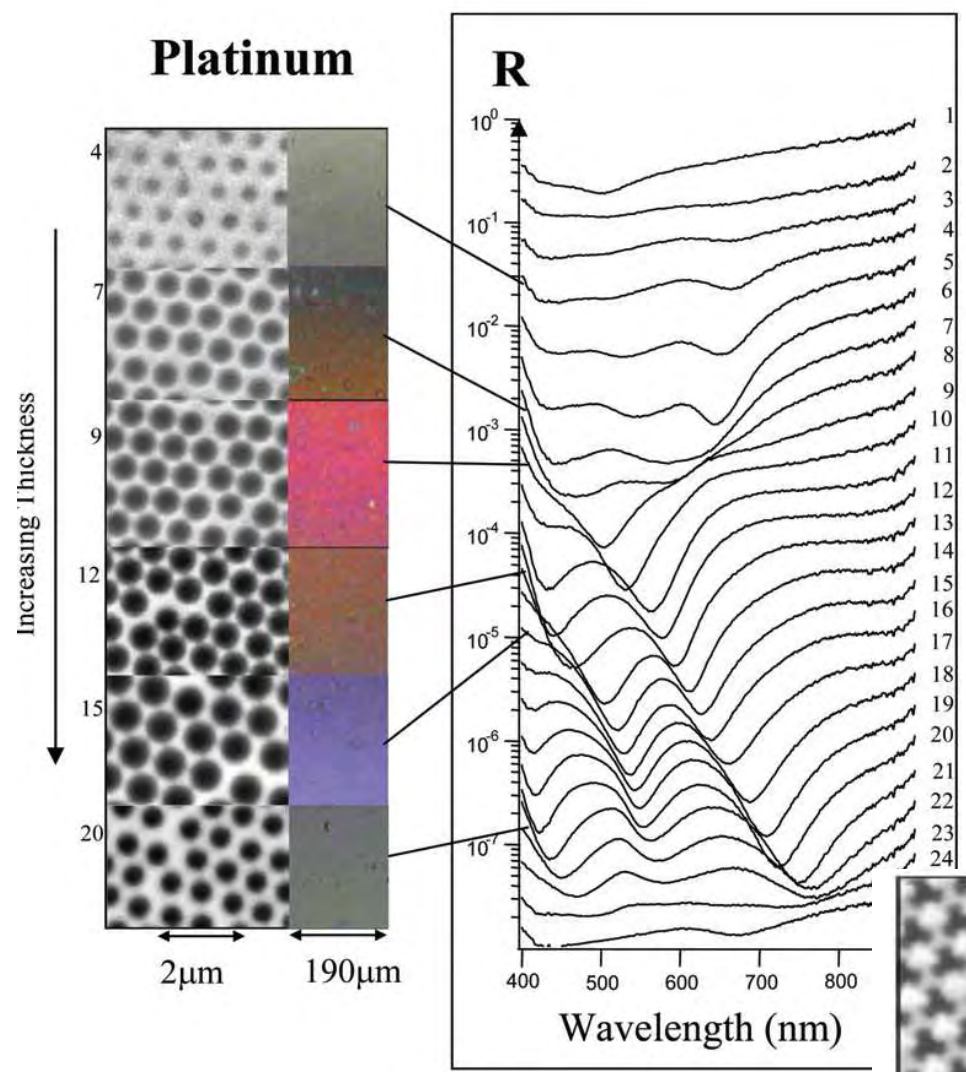
2 μm



EHT = 10.00 kV  
WD = 15 mm

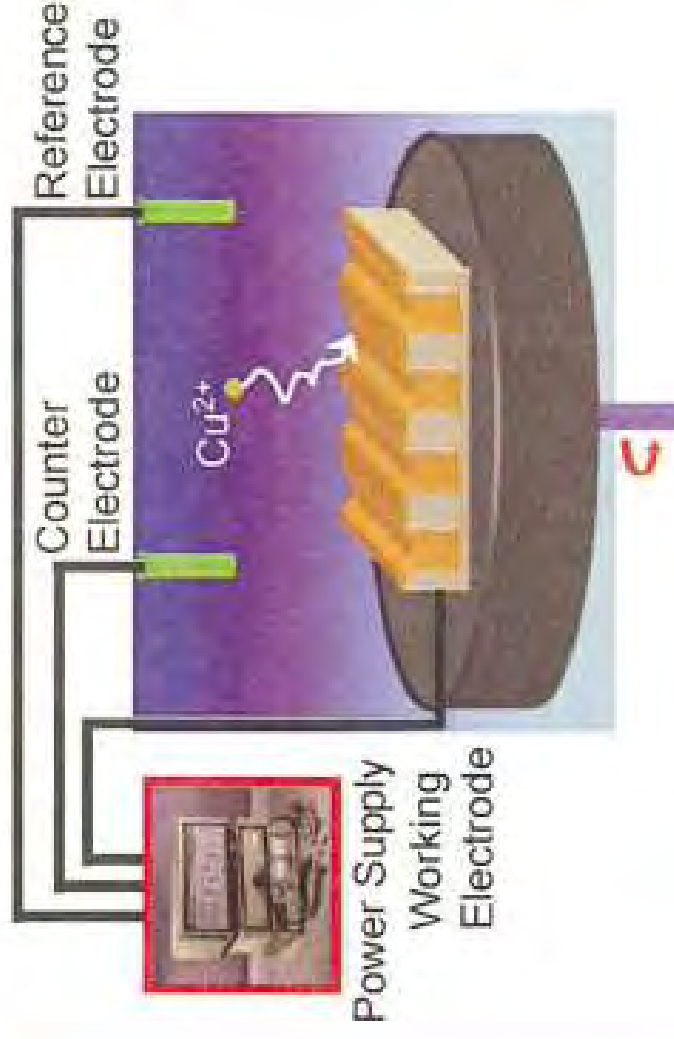
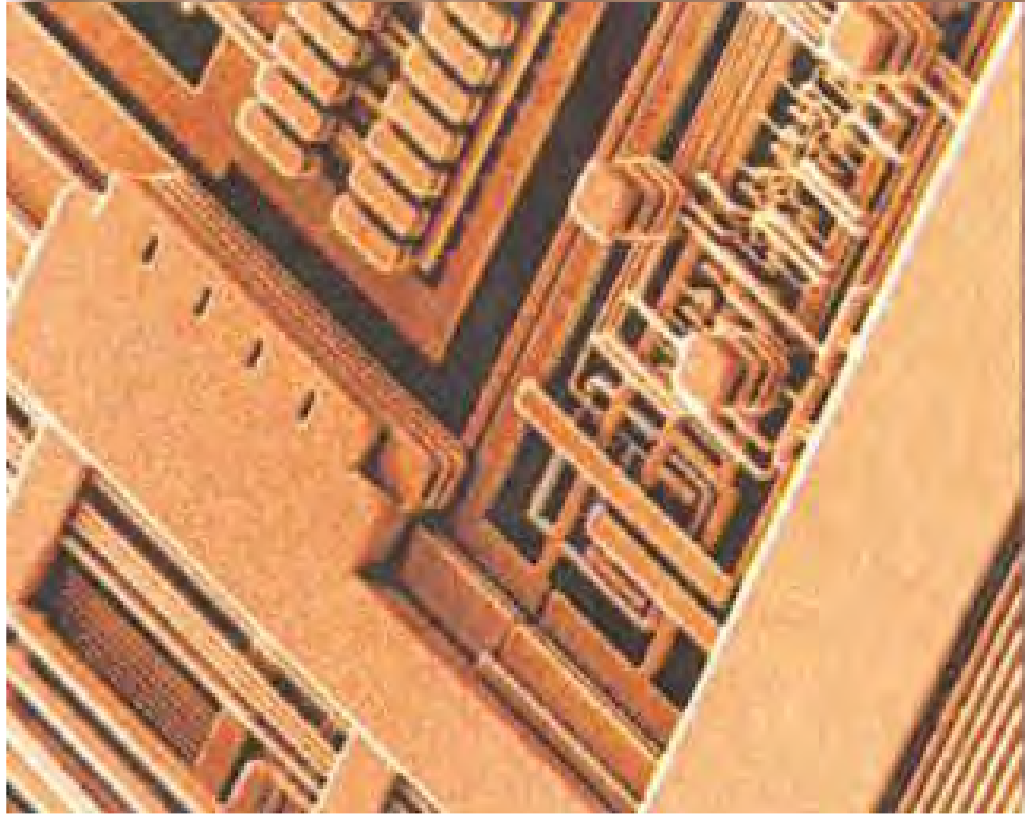
Signal A = SE2  
Photo No. = 6129

MSU HSMS  
Date :25 Apr 2006

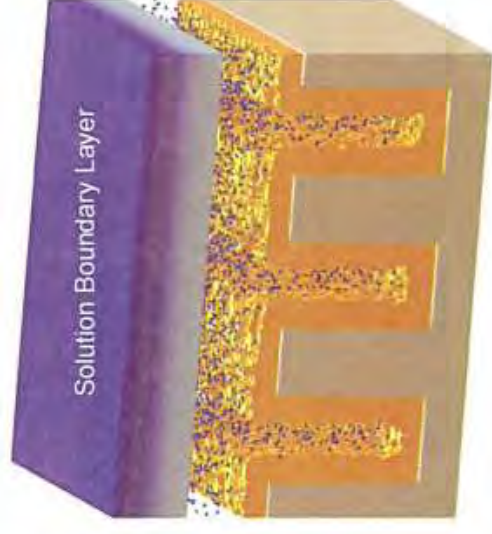


Faraday Discuss. 125 (2004) 117





**Electrochemical process for manufacturing on-chip interconnects, in which a rotating disk creates a boundary layer above the wafer surface (not drawn to scale).**



**Multiple layers of electrodeposited copper wires (the non-copper materials have been etched away) that provide the on-chip 3-D network for interconnecting the transistors.**

Copper interconnect technology was introduced by IBM in 1998, and is now widely used throughout the industry.

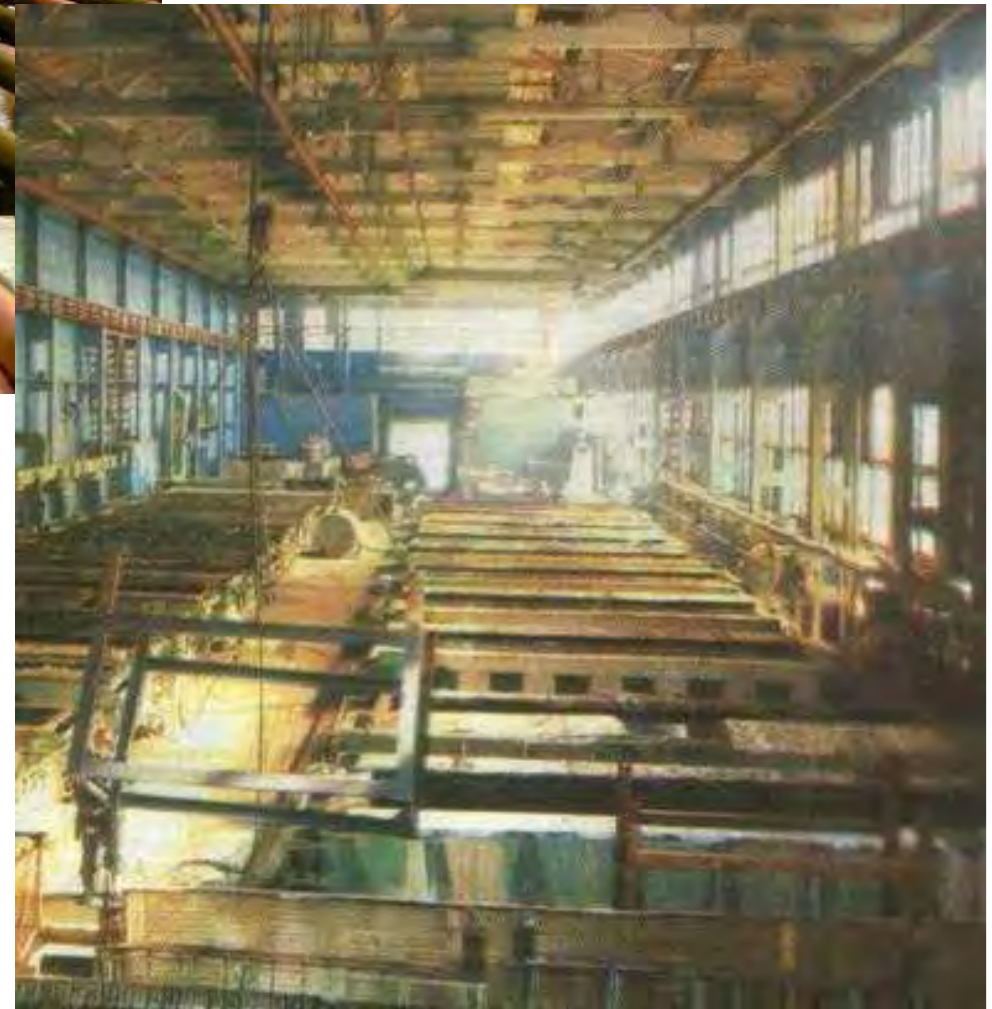




До 30 кА/м<sup>2</sup>

Потребители:

- Автомобилестроение
- Авиационная промышленность
- Радиотехника и электроника



## Промышленные электролиты (пример)

### Состав электролита (г/л):

оксид цинка — 6-10

гидроксид натрия — 90-150

блескообразующая добавка "ЭКОМЕТ-Ц1"  
(марка "А" — для полублестящего цинка  
или "Б" — для блестящего) — 3-4 мл/л



### Режим осаждения:

плотность тока — 0,5-20 А/дм<sup>2</sup>

температура электролита — 20-35 °С

выдерживает перегрев до 50 °С





<http://www.galvanicworld.com/consultforum/>

«Покрyтия металлические и неметаллические  
неорганические. Операции технологических  
процессов получения покpытий»

ГОСТ 9.305 - 84

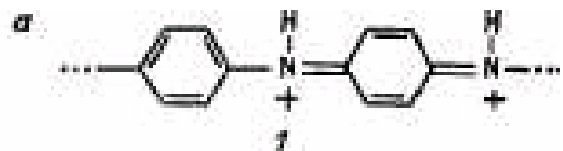
- The accidental discovery of polyacetylene, along with subsequent research on doping it to achieve conducting properties ranging from an insulator to a semiconductor to a metallic conductor (Nigrey et al., 1981), led to the invention of “polymer batteries” based on polyaniline, as well as the awarding of the 2000 Nobel Prize in Chemistry to A. MacDiarmid, A. J. Heeger, and H. Shirakawa.

Nigrey, P. J., D. MacInnes, Jr., D. P. Nairns, A. G. MacDiarmid, and A. J. Heeger, “Lightweight Rechargeable Storage Batteries Using Polyactelene, (CH)<sub>x</sub>, as the Cathode-Active Material,” *J. Electrochem. Soc.*, **128**, 1651 (1981).

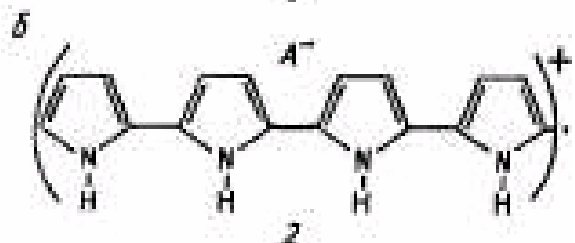


Проводящие полимеры – электродные материалы

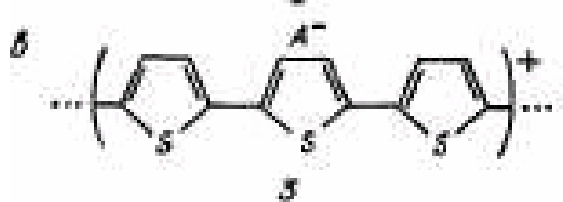
# Осаждение полимеров (анодное)



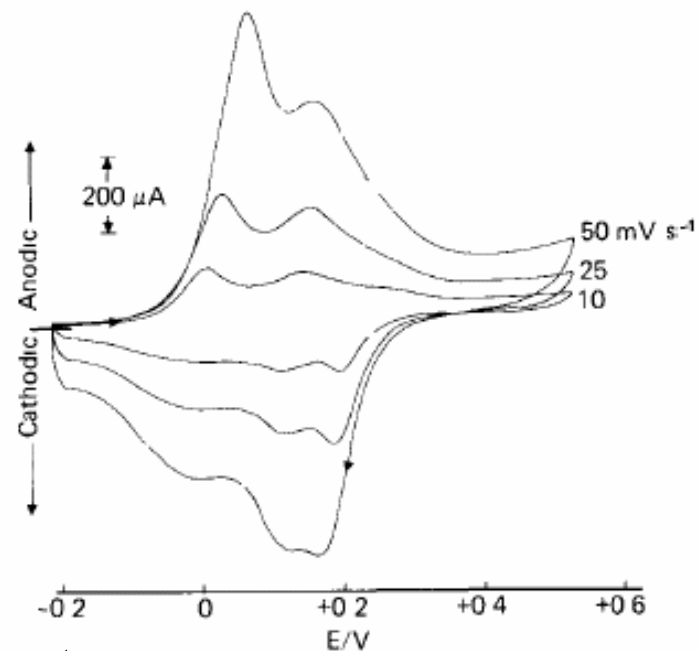
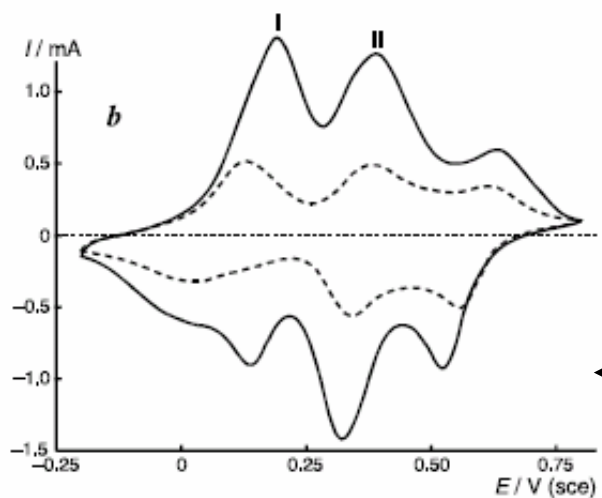
полианилин



полипиррол

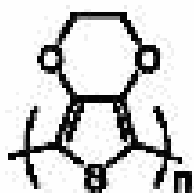


политиофен



перезаряджение  
полимеров и олигомеров

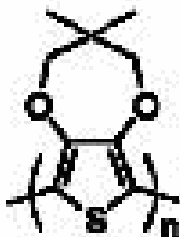
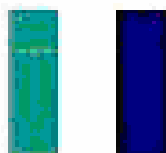
# Популярные электрохромные материалы – - электронпроводящие полимеры



**PEDOT**

1

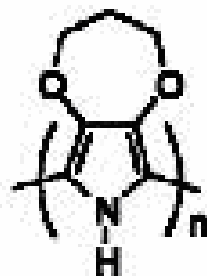
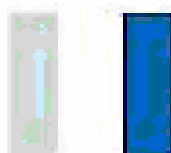
**D N**



**PProDOT-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>**

2

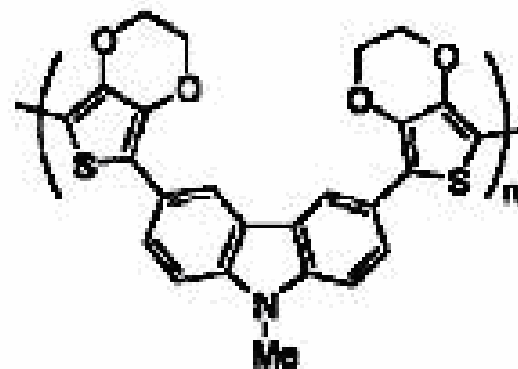
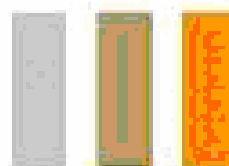
**D N**



**PProDOP**

6

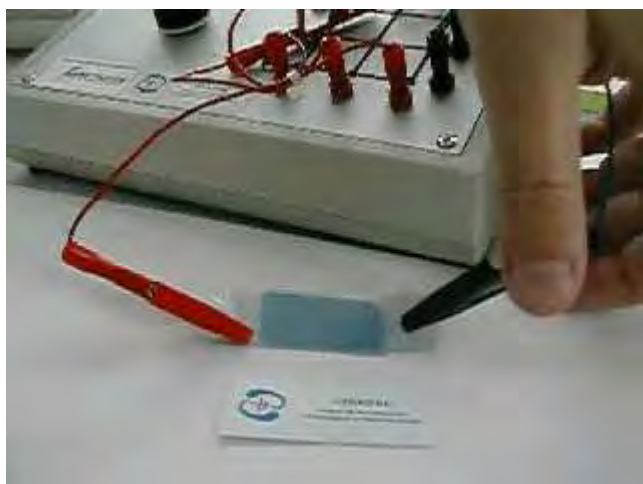
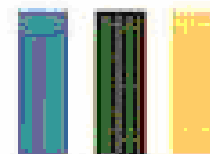
**D I N**



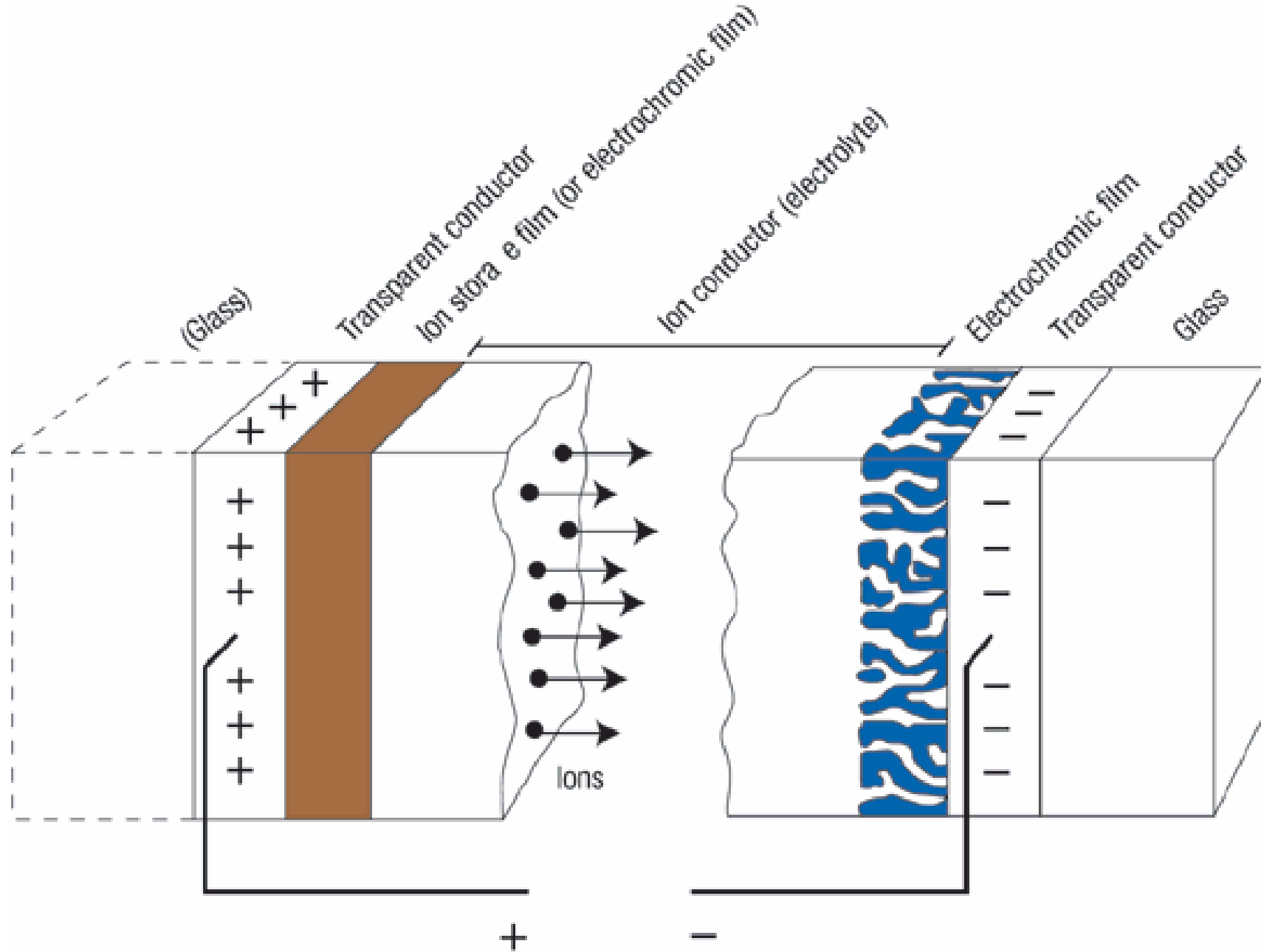
**PBEDOT-NMeCz**

10

**D I N**

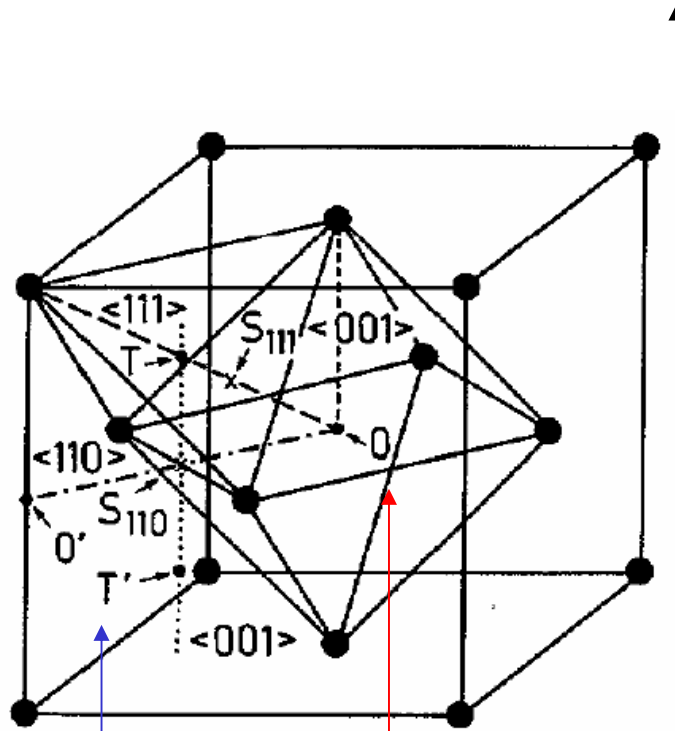


# Электрохромные устройства





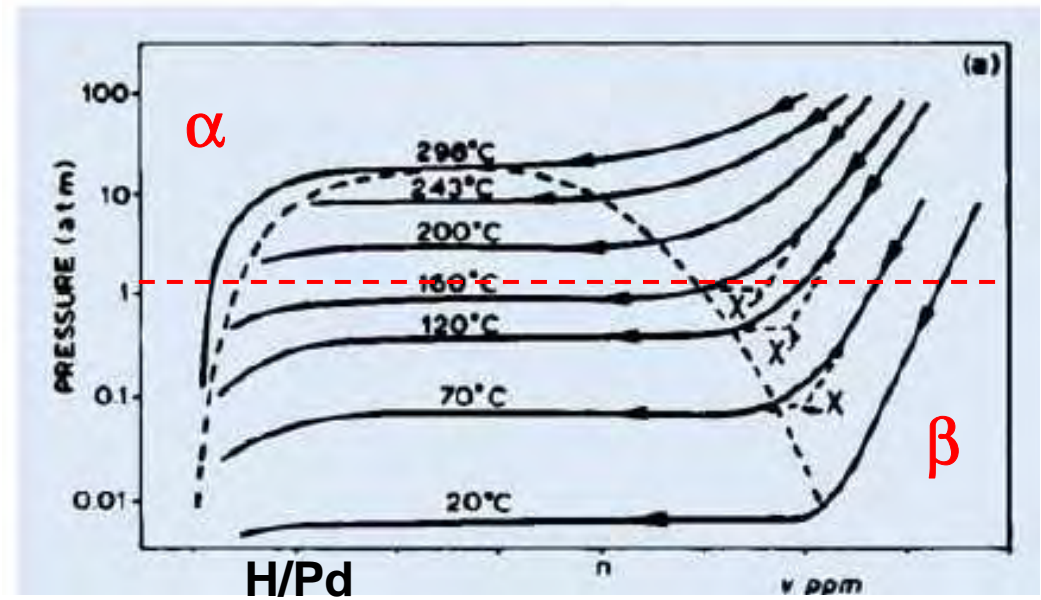
# Прямая аналогия между сорбцией из газовой фазы и электрохимической интеркаляцией: гидриды



Октаэдрические  
пустоты ( $x \leq 1$  в  $\text{PdH}_x$ )

Тетраэдрические  
пустоты ( $x > 1$  в  $\text{PdH}_x$ )

давление

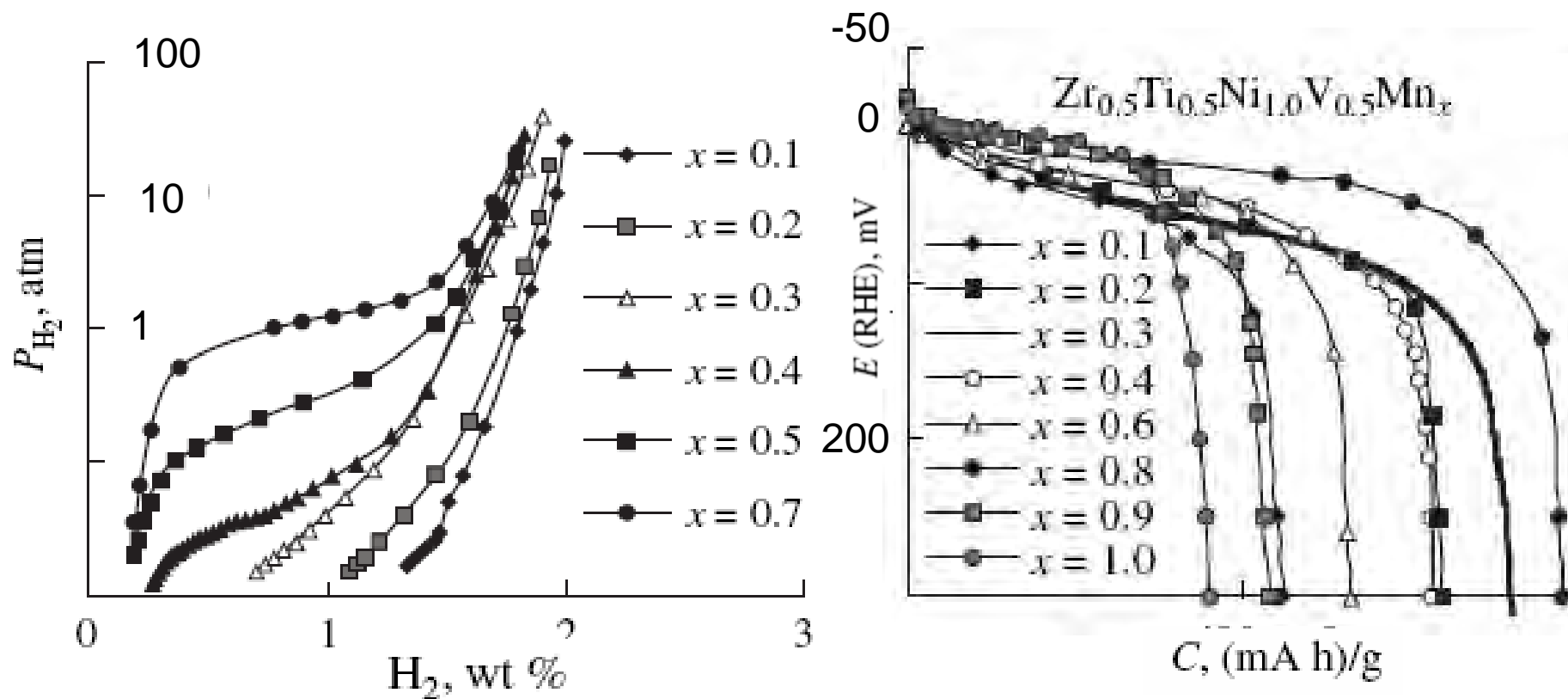


потенциал





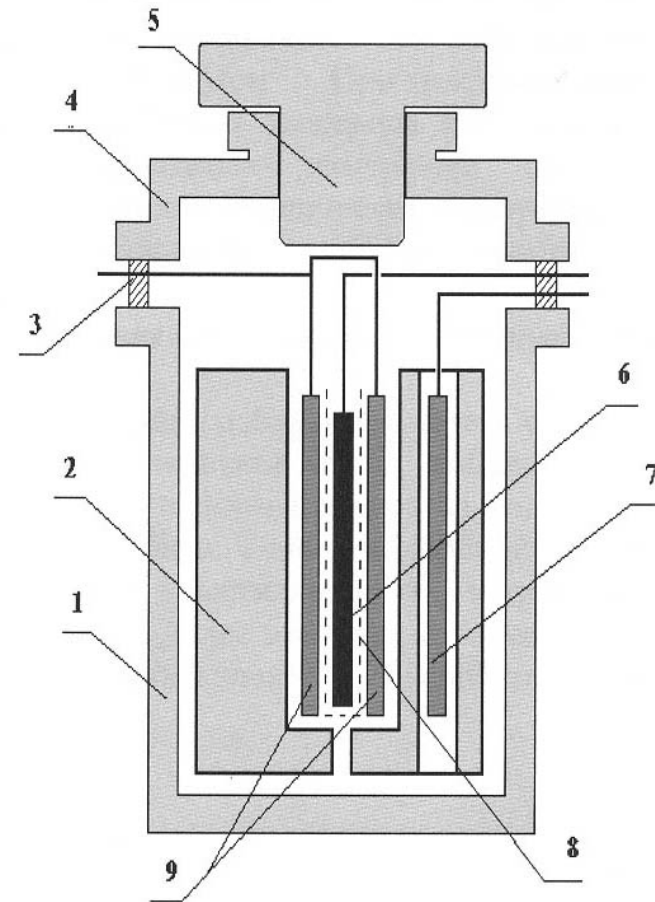
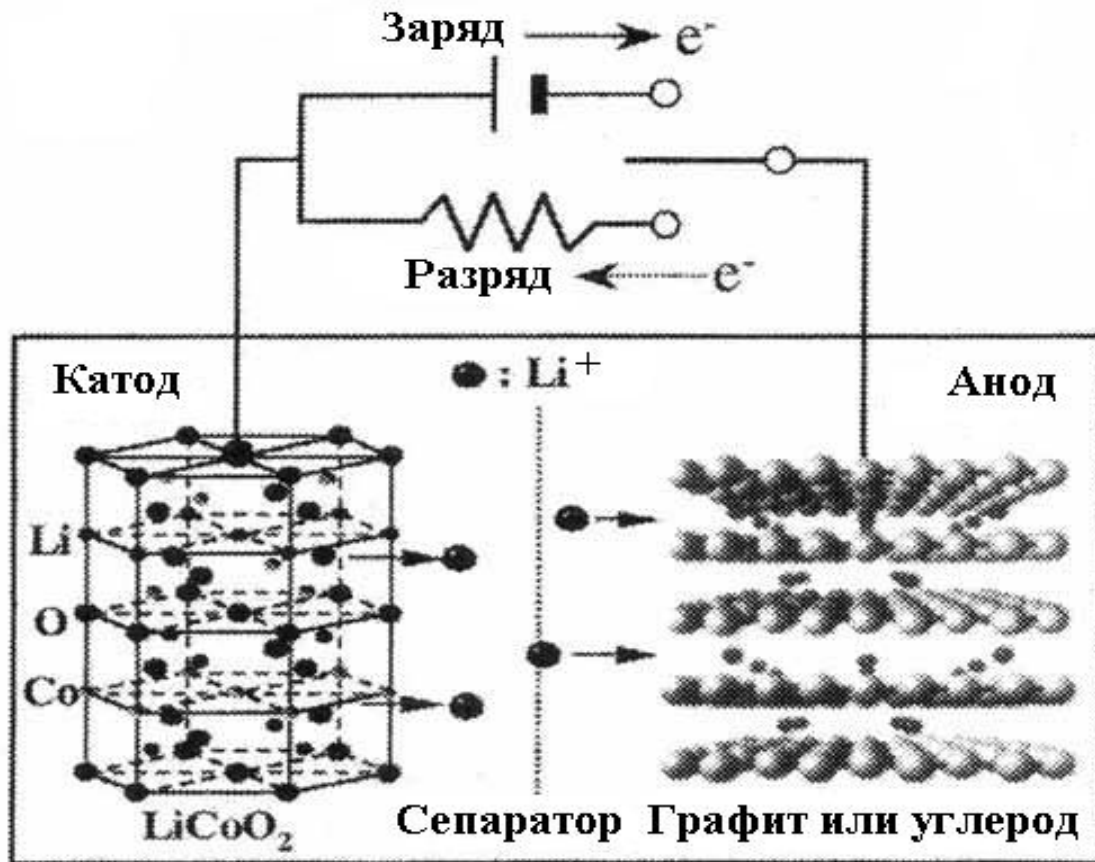
## Интерметаллиды $AB_2$ (A = Zr+Ti, B = Ni+V+Mn)



Функционируют в щелочных растворах!

Второй электрод –  $NiOOH/Ni(OH)_2$

# Литий-ионные аккумуляторы



- 1- Teflon case; 2- bush;
- 3- rubber gasket; 4- cylinder head; 5- screw-top;
- 6- working electrode;
- 7- reference electrode;
- 8- separator;
- 9- counter electrodes.

растворители

Этиленкарбонат (EC)

Пропиленкарбонат (PC)

Диэтилкарбонат (DEC)

Диметилкарбонат (DMC)

$\gamma$ -бутиролактон

Тetraгидрофуран (THF)

Диметоксиэтан (DME)

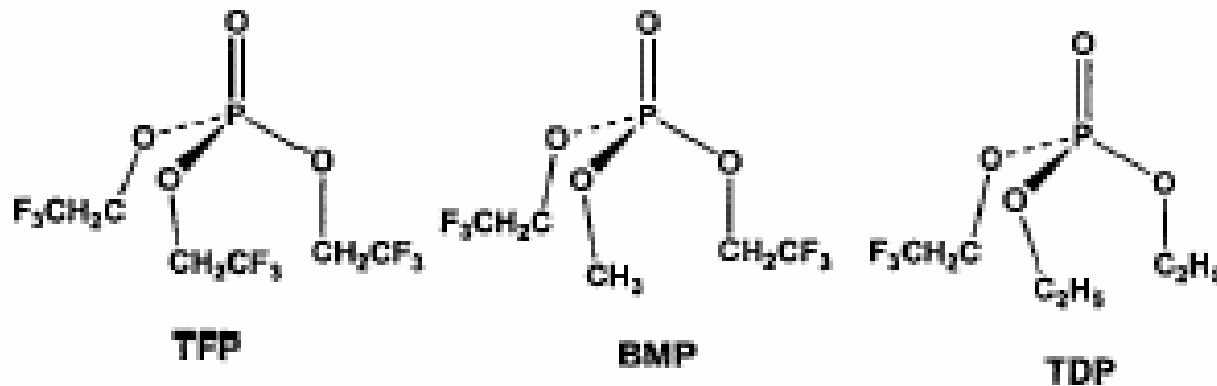
Диэтоксиэтан

Диоксан

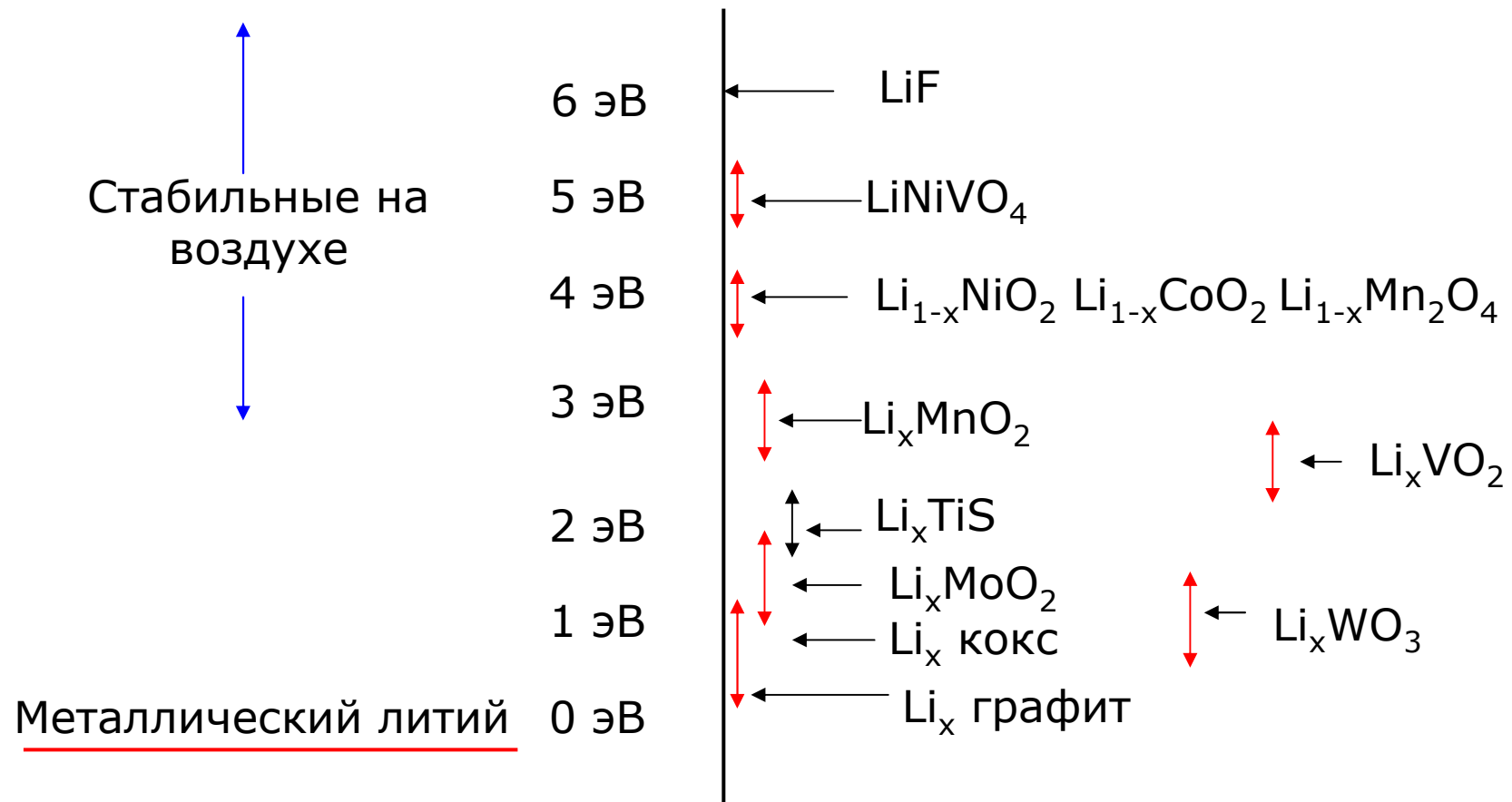
электролиты

$\text{LiAsF}_6$ ,  $\text{LiClO}_4$ ,  $\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ ,  $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$ ,  $\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_3$

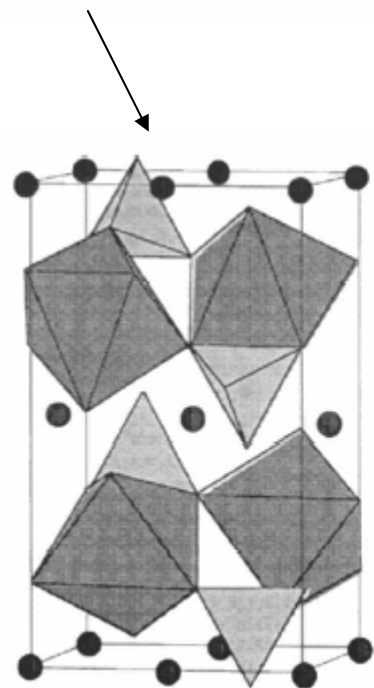
Flame retardants



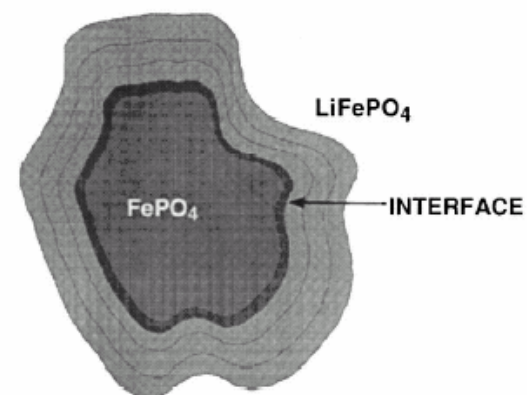
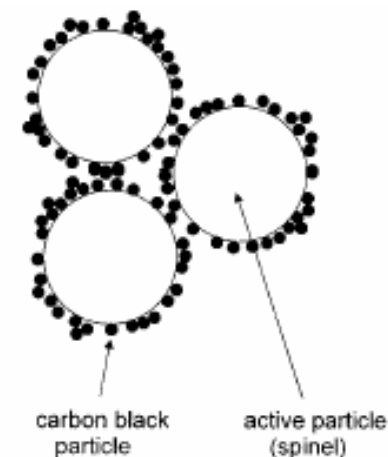
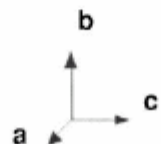
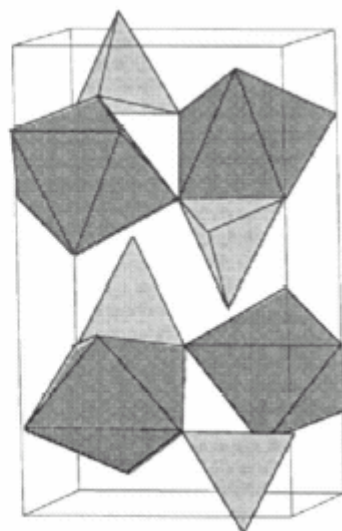
# Равновесные потенциалы ЛИТИЕВЫХ ИНТЕРКАЛЯТОВ



# Новое поколение: сложные фосфаты

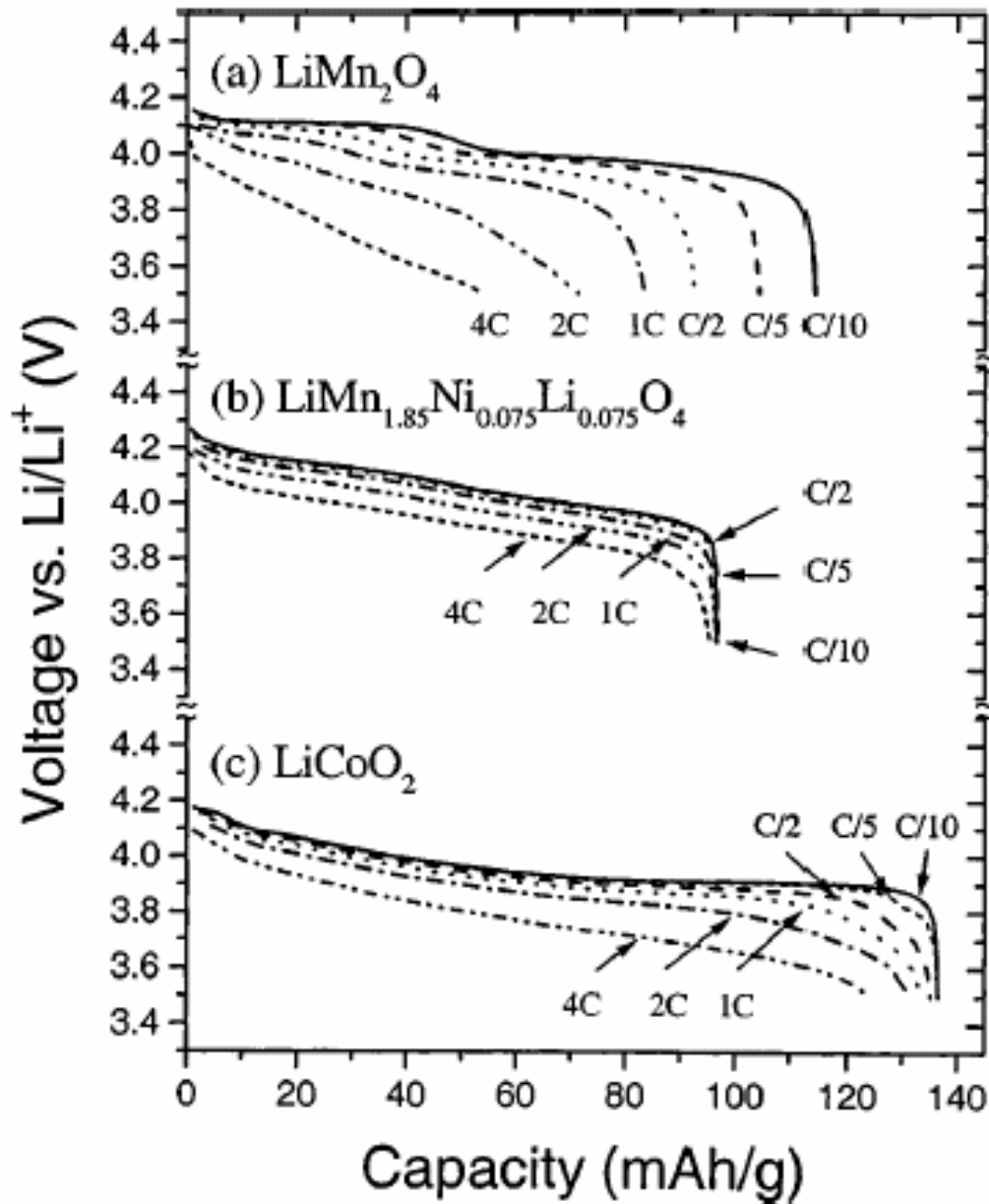


$X = 1$



	LiFePO <sub>4</sub>	FePO <sub>4</sub>
Space Group	Pb nm	Pb nm
a (Å)	6.008 (3)	5.792 (1)
b (Å)	10.334 (4)	9.821 (1)
c (Å)	4.693 (1)	4.788 (1)
Volume (Å <sup>3</sup> )	291.392 (3)	272.357 (1)

# Кинетика интеркаляции-деинтеркаляции



Общепринятое обозначение плотности тока:

$$C/(\text{число часов})$$



Оценка эффективного коэффициента диффузии:

$$\text{Время} \cong \frac{(\text{размер частиц})^2}{D_{\text{eff}}}$$

Определяется транспортом лития и электронным транспортом

## Интеркаляция в графитизированные углеродные материалы

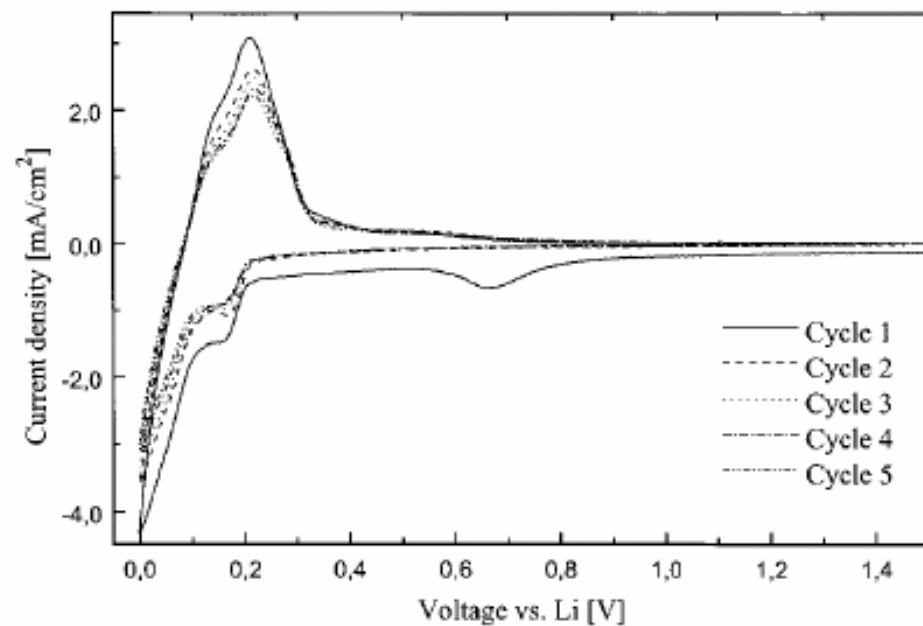
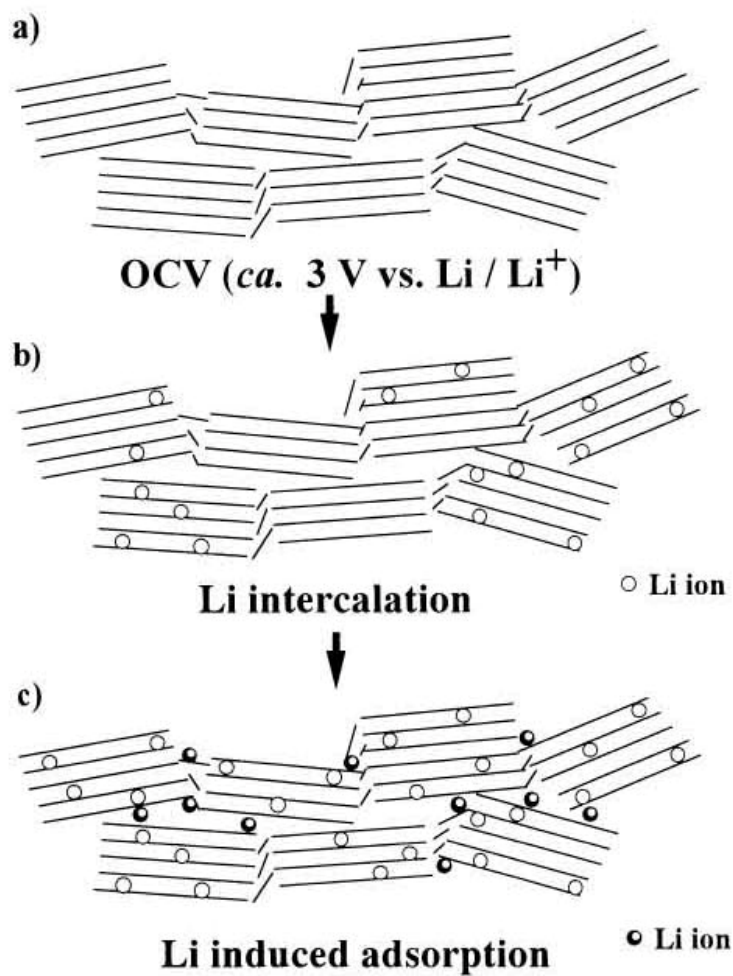
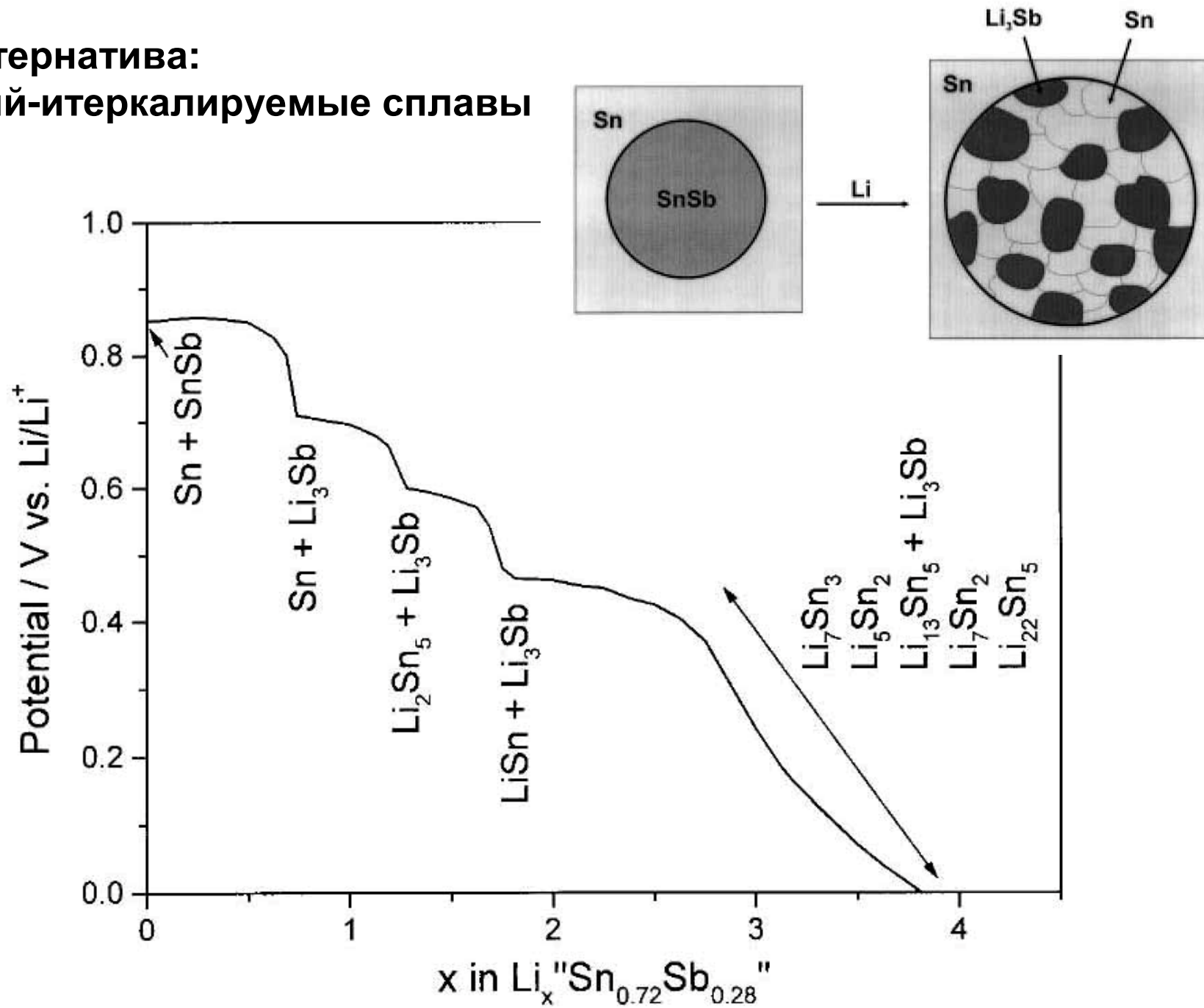


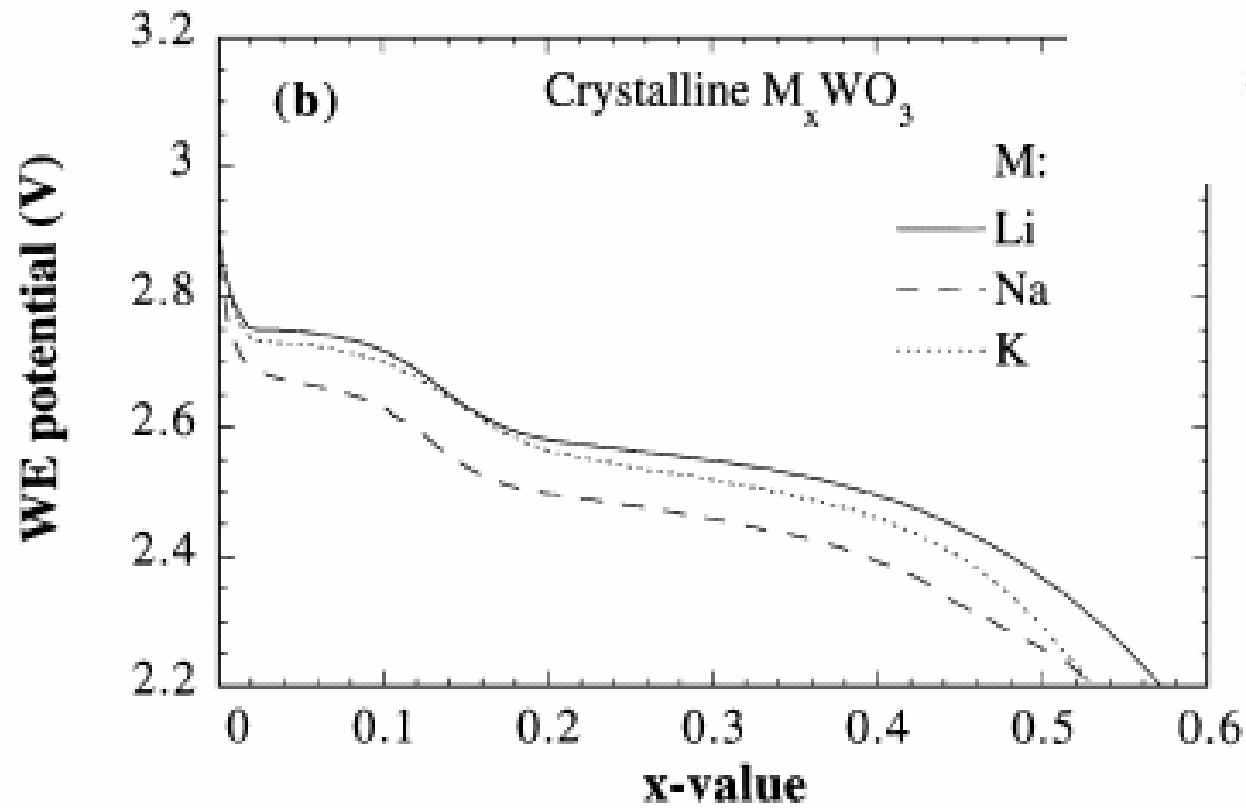
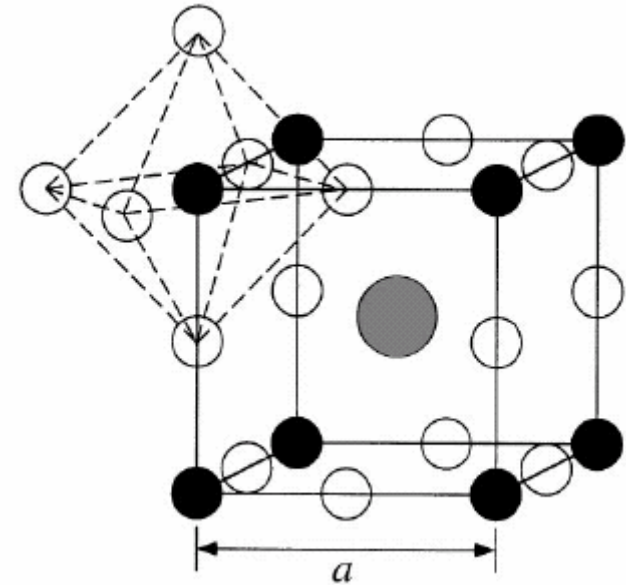
Fig. 2 Cyclic voltammograms of an  $\text{Li}_x\text{C}_6$  electrode (graphite material) in propylene carbonate – 1 M  $\text{LiClO}_4$  electrolyte (sweep rate 0.1 mV/s)

# Альтернатива: литий-итеркалируемые сплавы

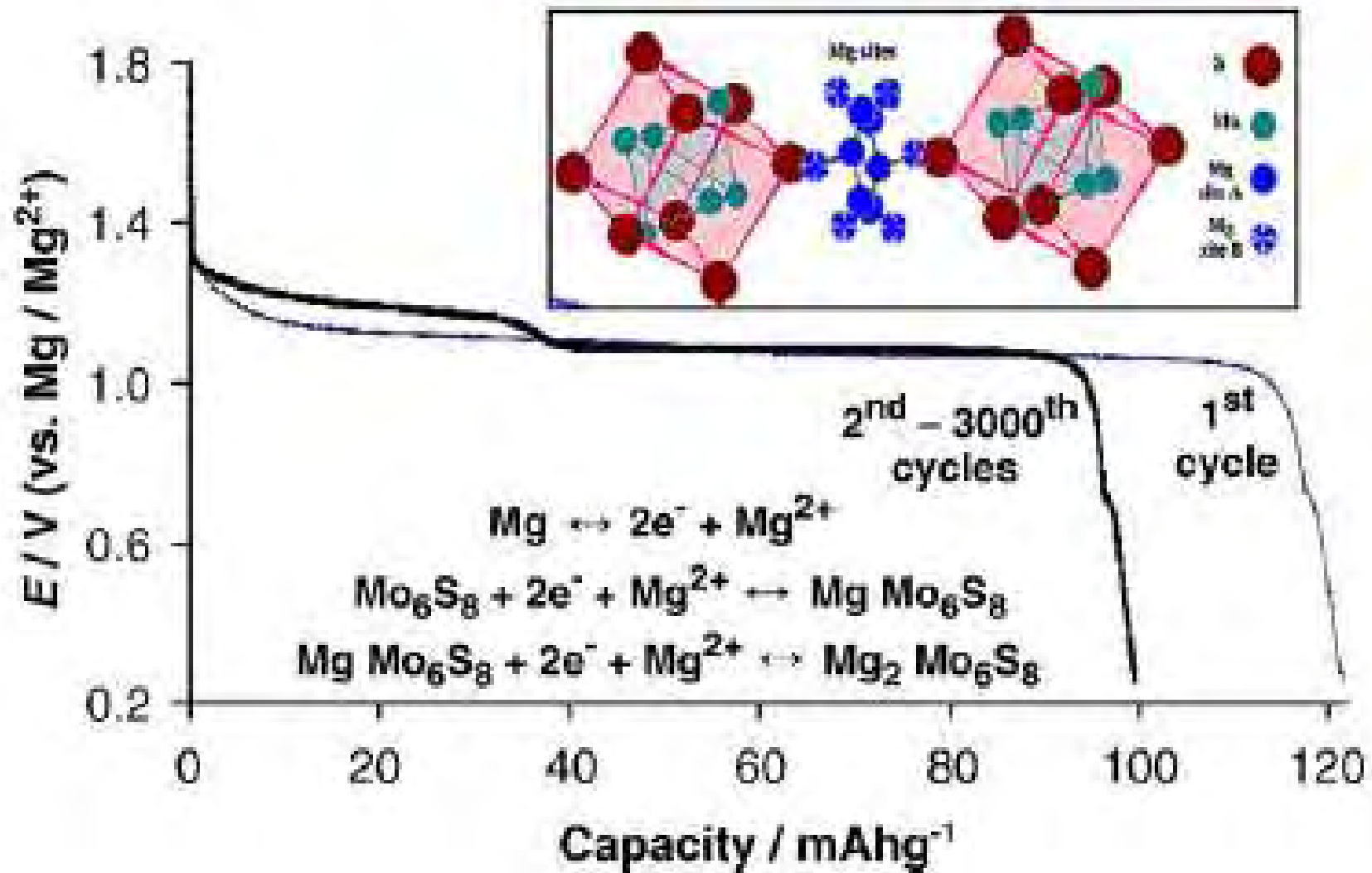




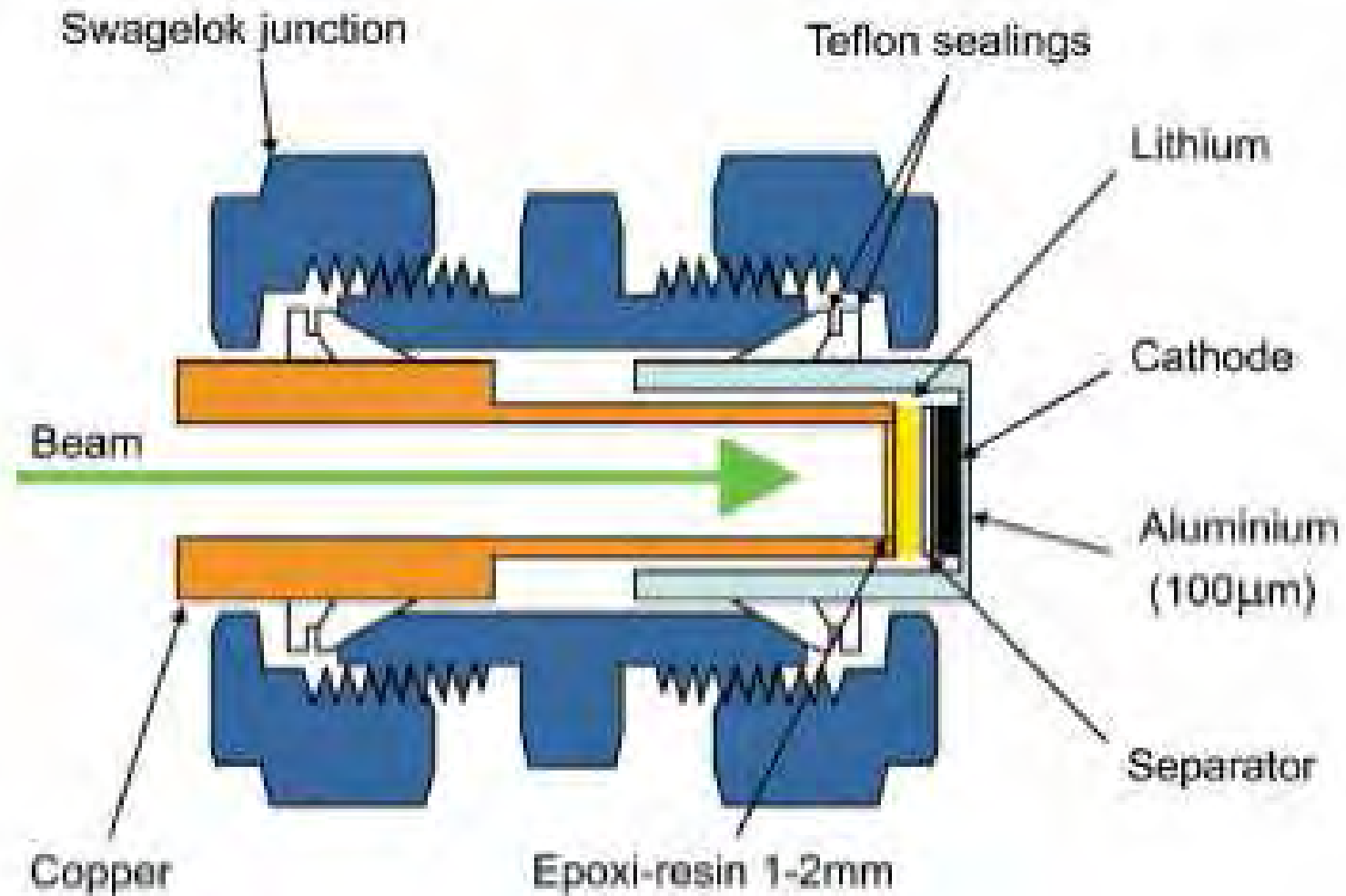
**Альтернатива:  
нестехиометрические оксиды  
вольфрама**

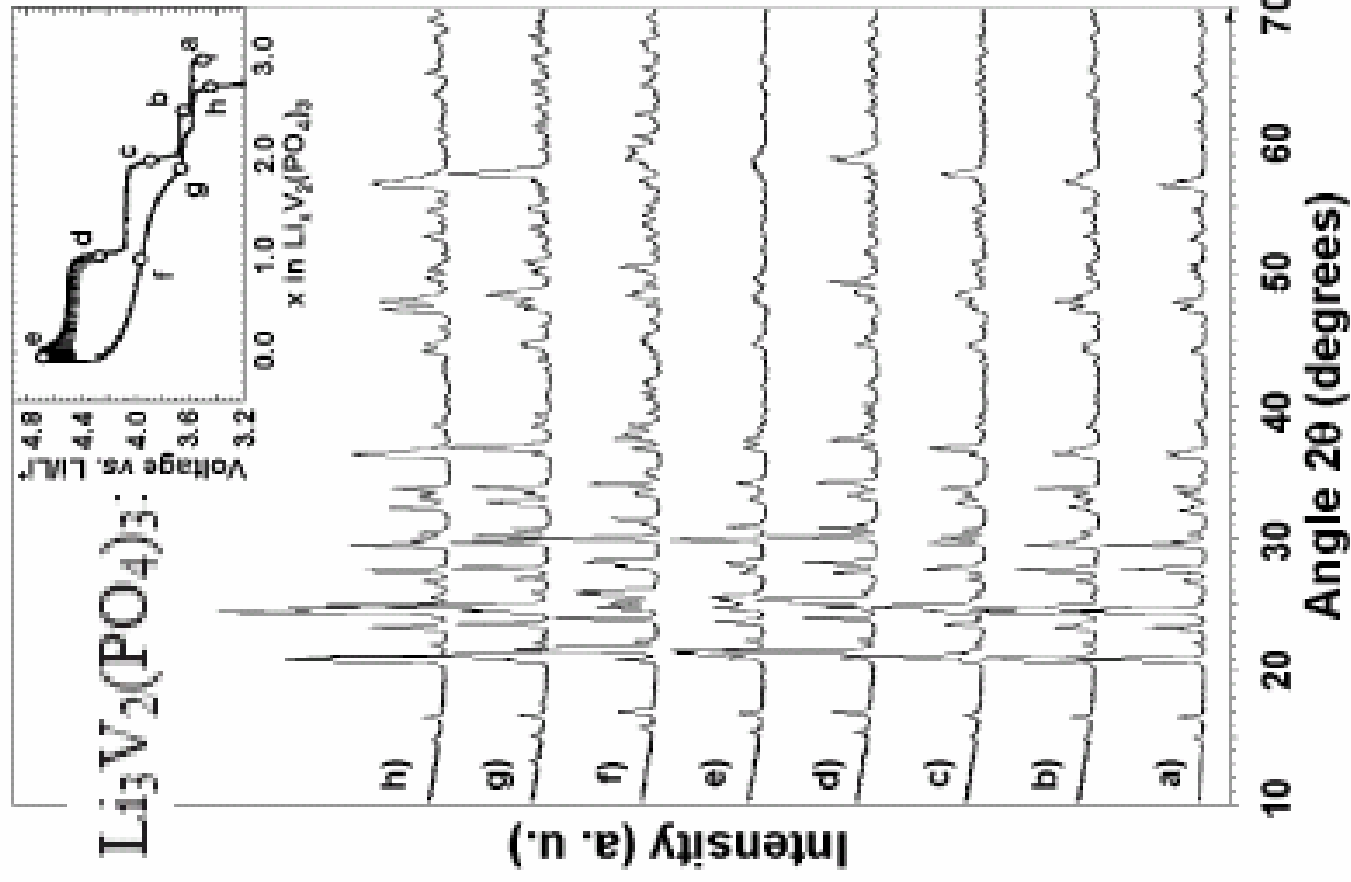
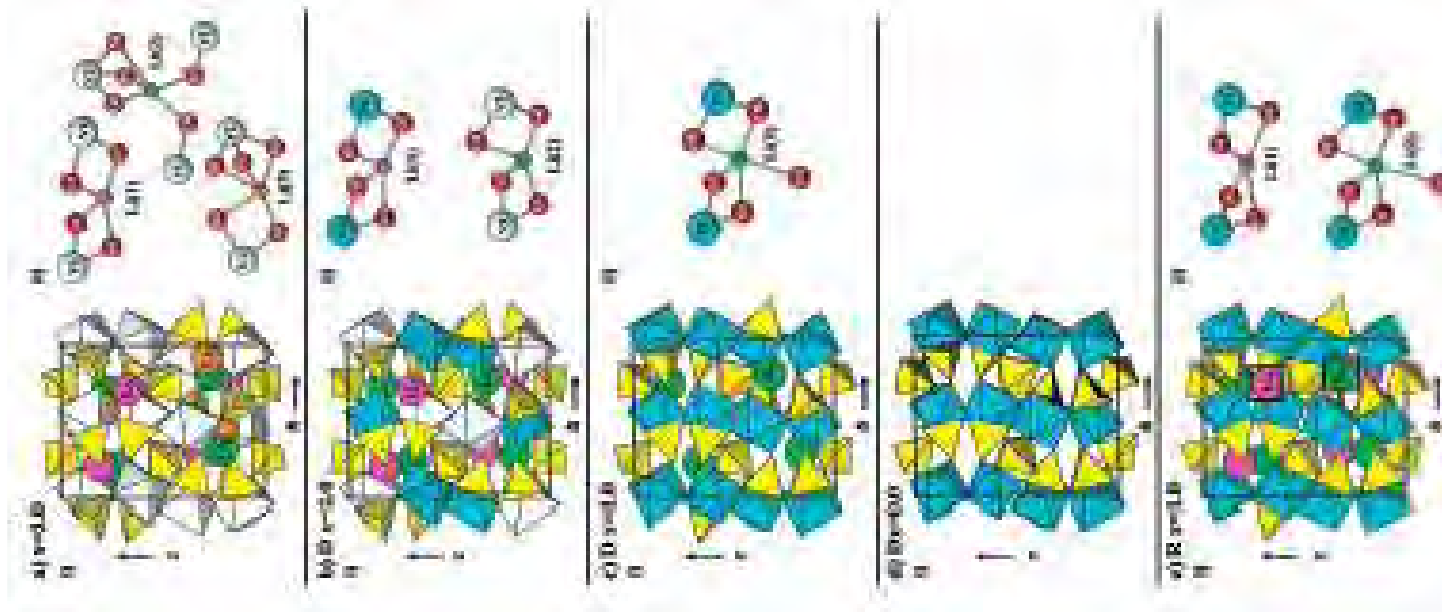


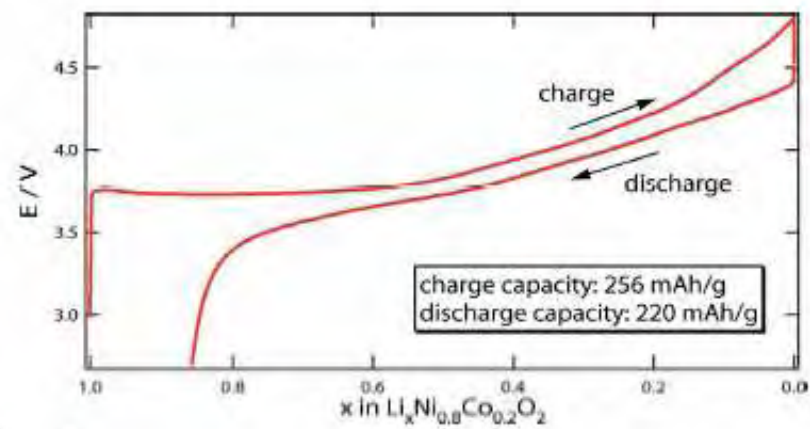
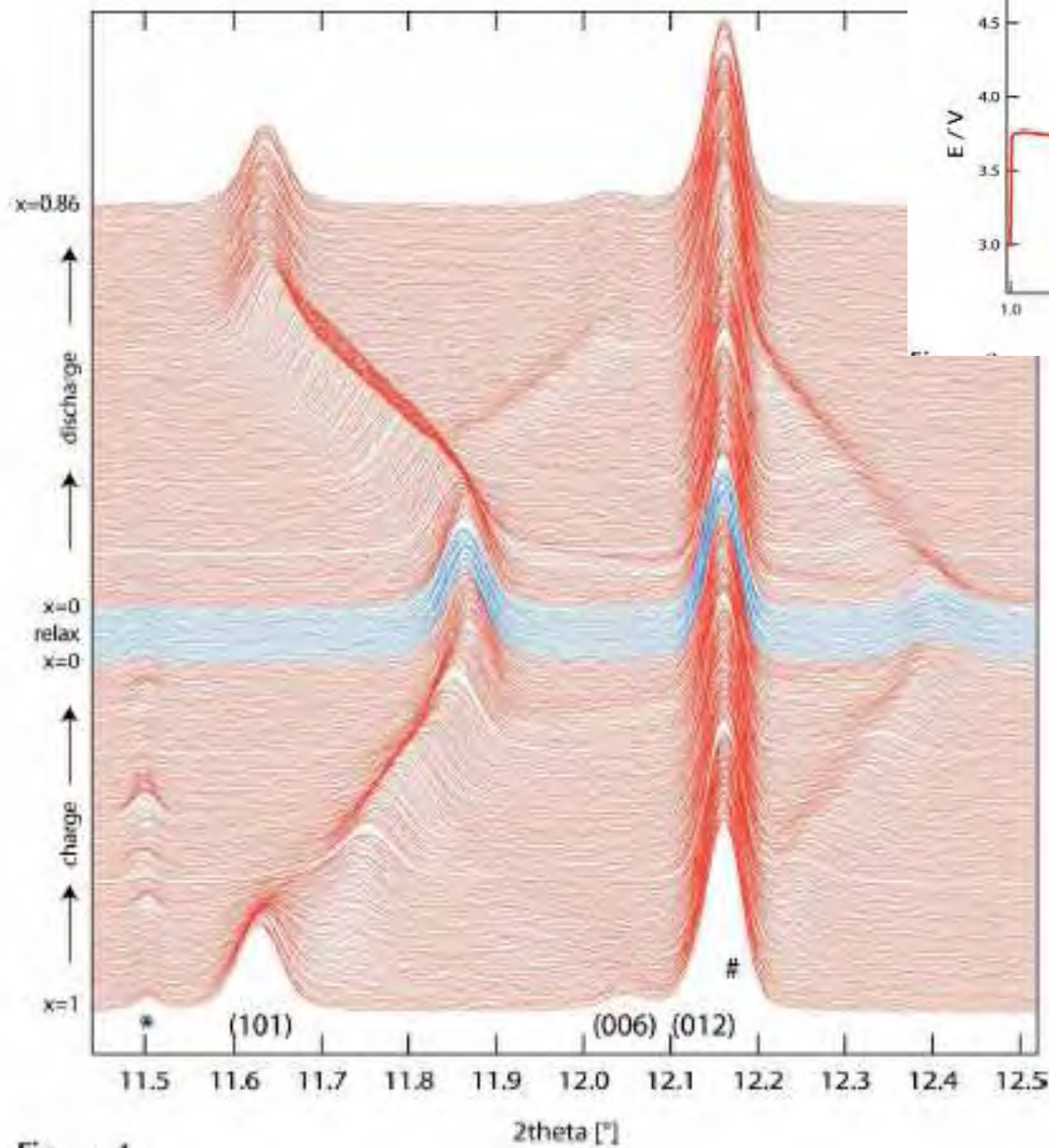
# Интеркаляция магния



## In situ дифракция







**In situ дифракция**

# Электрохимическая интеркаляция в электросинтезе

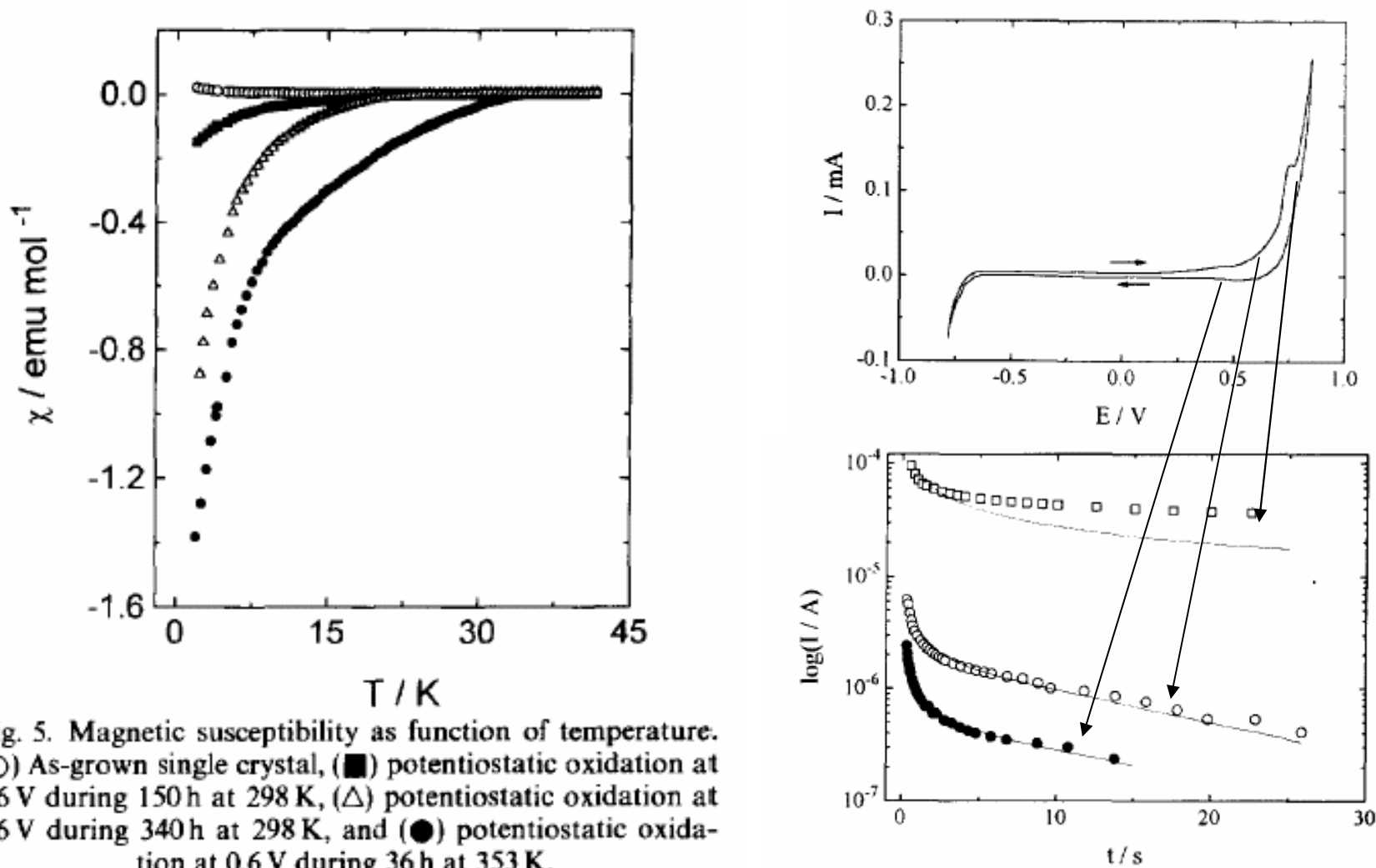
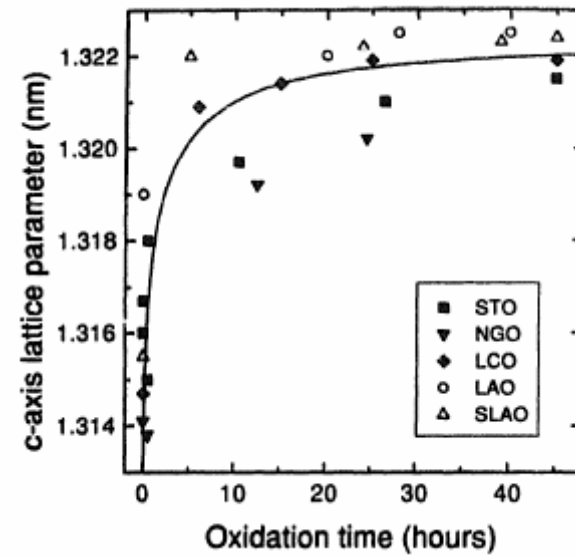
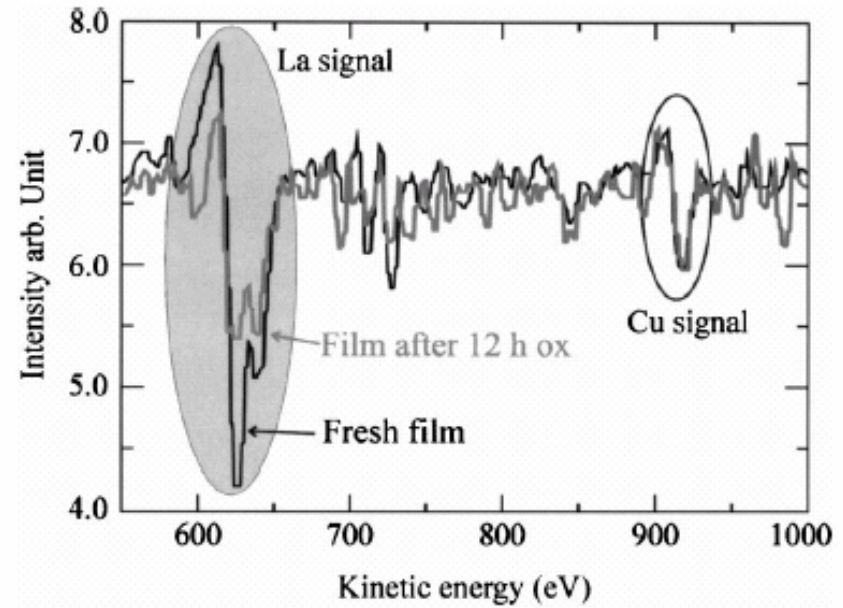
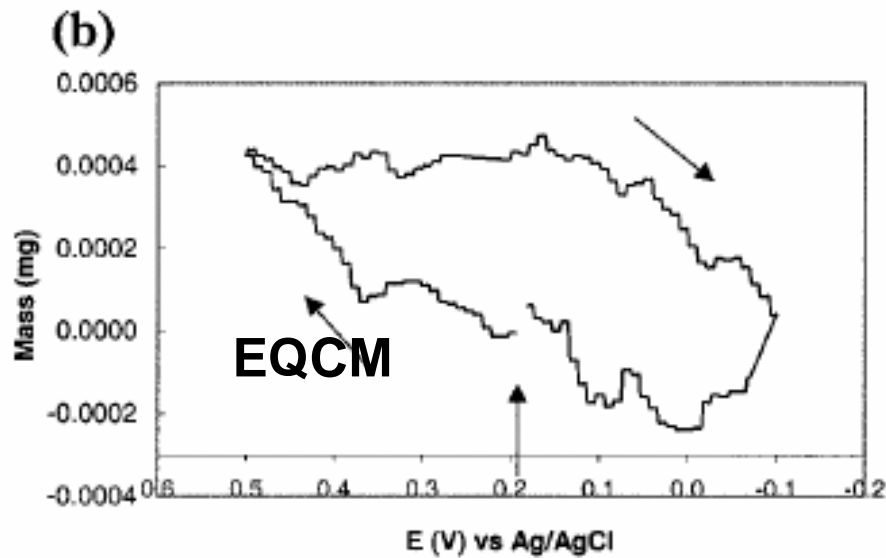
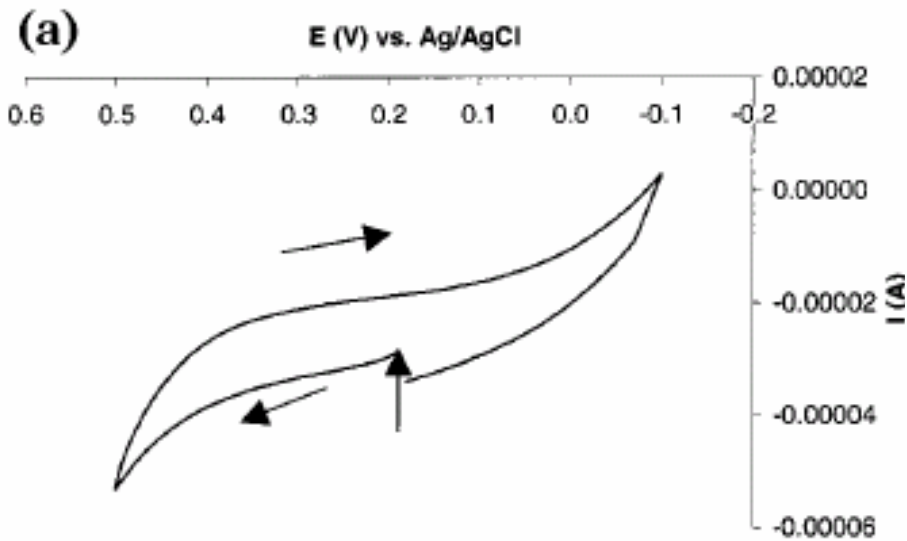
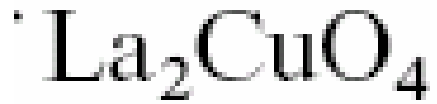
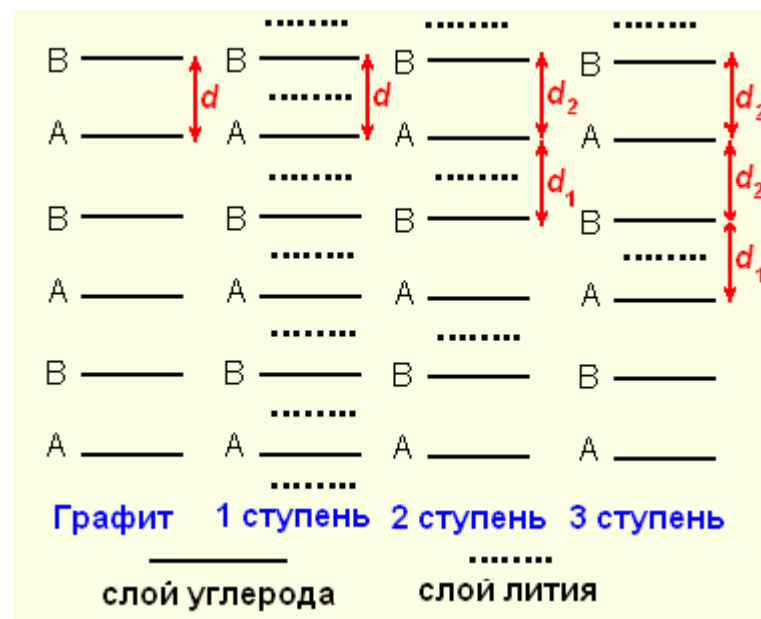
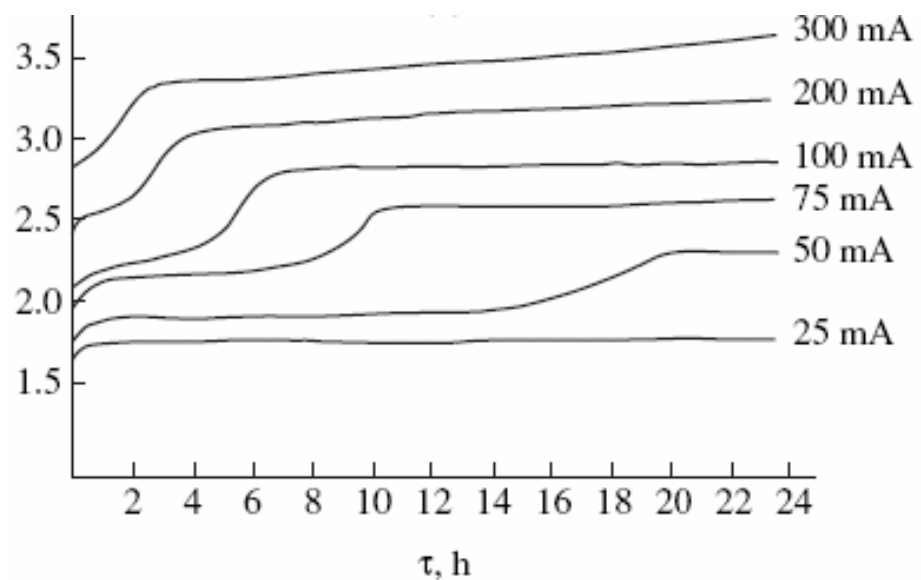


Fig. 5. Magnetic susceptibility as function of temperature. (○) As-grown single crystal, (■) potentiostatic oxidation at 0.6 V during 150 h at 298 K, (△) potentiostatic oxidation at 0.6 V during 340 h at 298 K, and (●) potentiostatic oxidation at 0.6 V during 36 h at 353 K.





## Получение расширенного графита



## Модифицирование слоистых гидроксидов

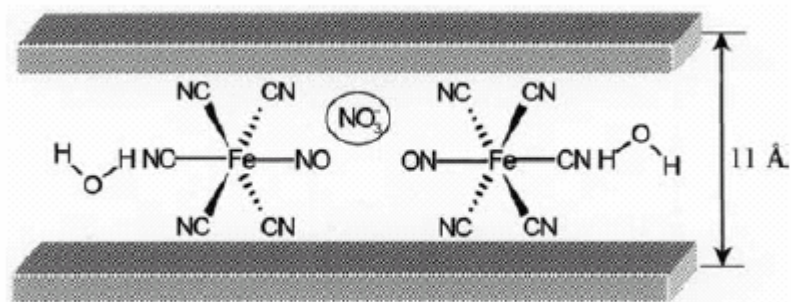


Figure 2. Proposed model for the structure of ZnAl-NP-LDHs.

