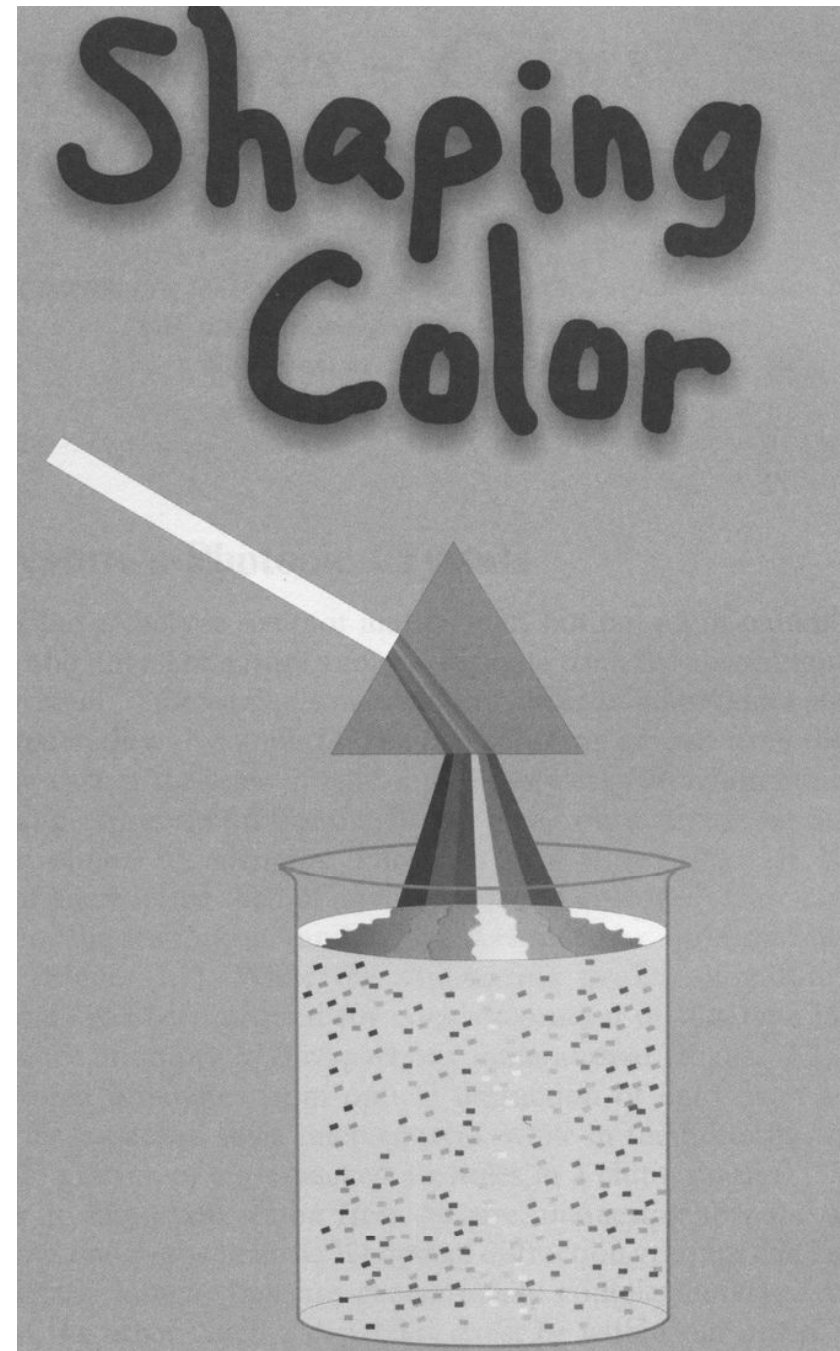
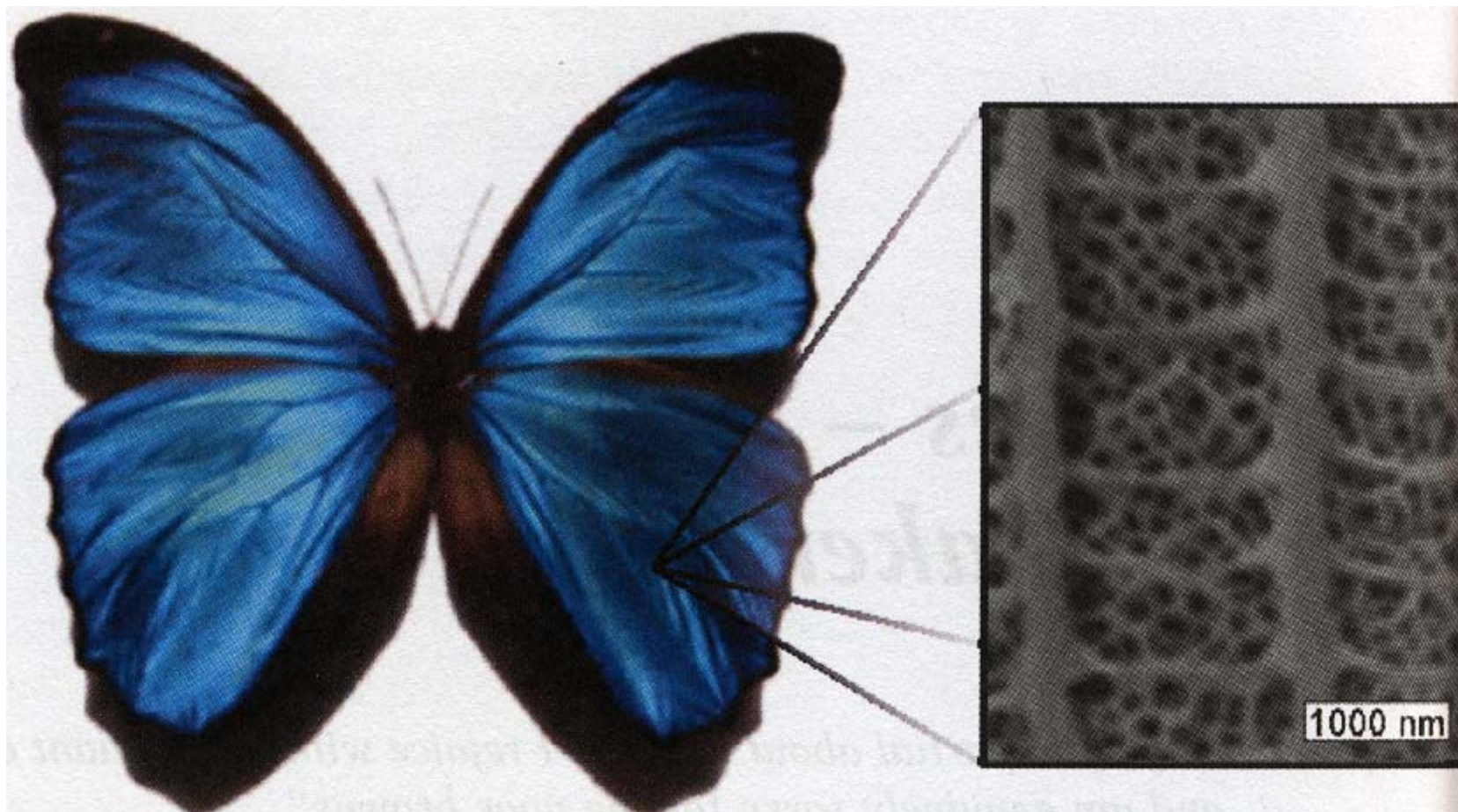


# Управление СВЕТОМ

- Фотоника?
- Фотонные кристаллы
- Получение микросфер
- Самосборка микросфер
- Частицы - янусы

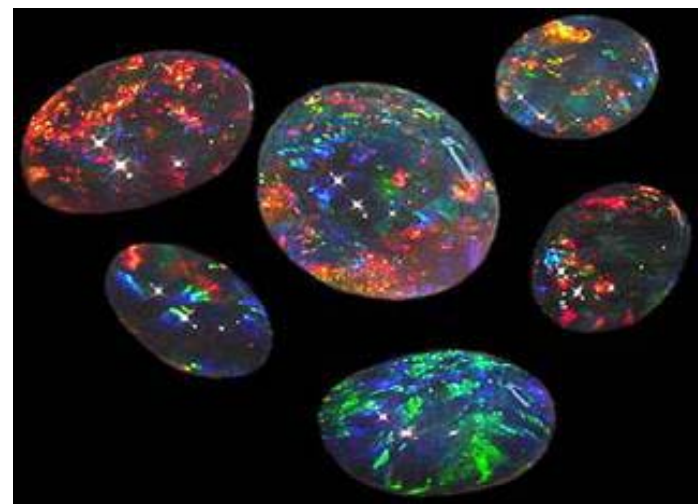
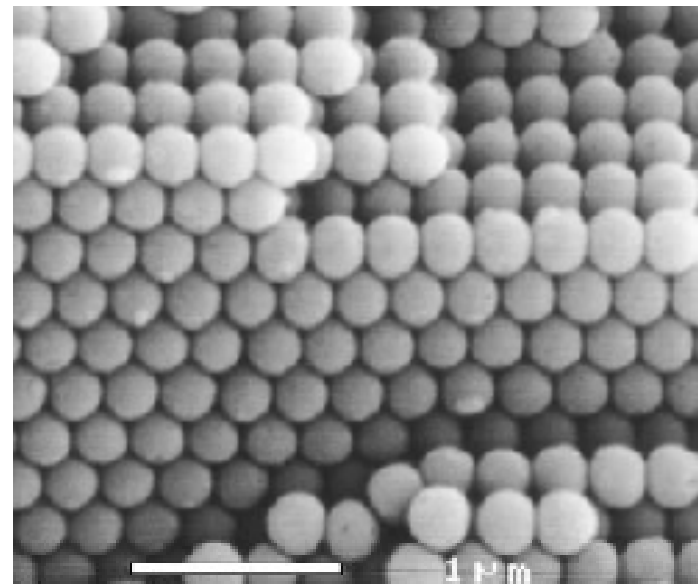
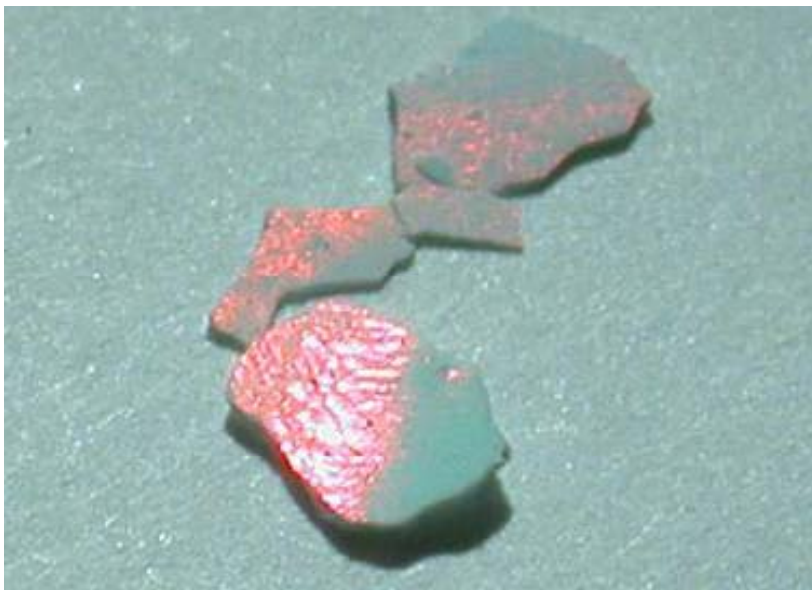


# Природа нам в пример...



# Опалы

Одними из первых материалов, которые стали рассматриваться в качестве фотонных кристаллов, были **синтетические опалы**. Опалы образованы монодисперсными сферическими частицами  $\text{SiO}_2$  ( $d = 150\text{--}900$  нм), упорядоченными в плотнейшей шаровой упаковке. Периодичность структуры опала в масштабе, сопоставимом с длиной волны видимого света, является причиной **иризации** – необычной игры света, связанной с дифракцией.



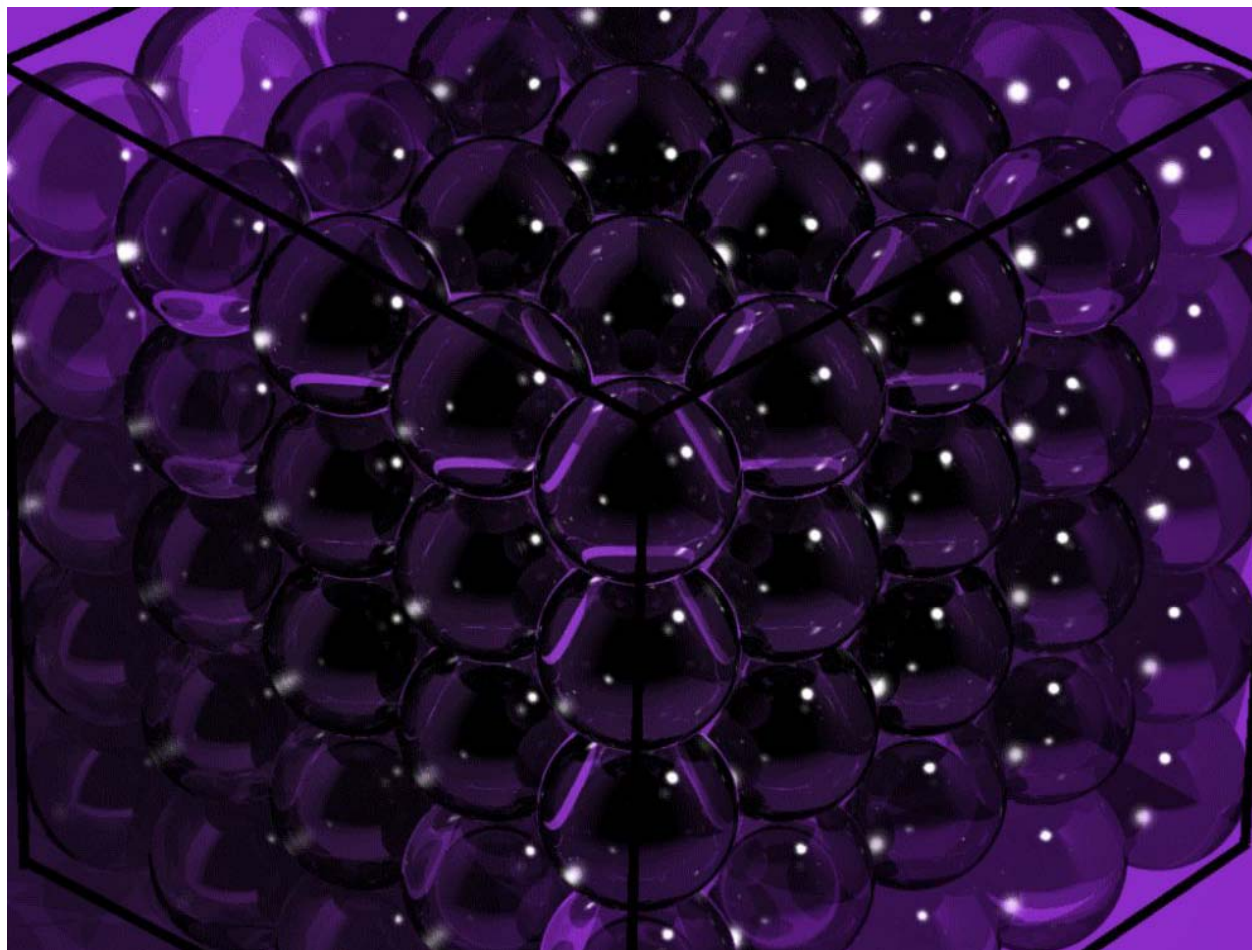


# Упаковки



**2D**

**3D**





# Г против К

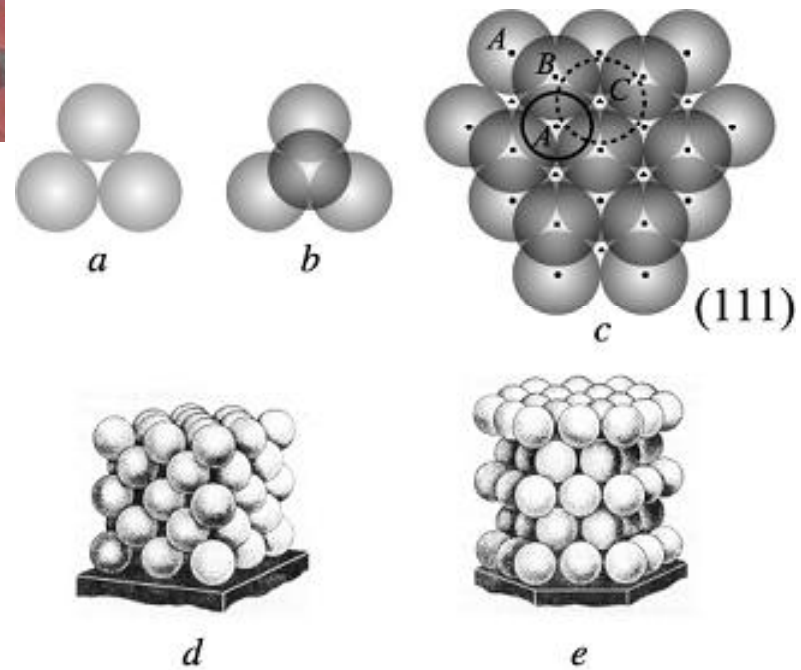
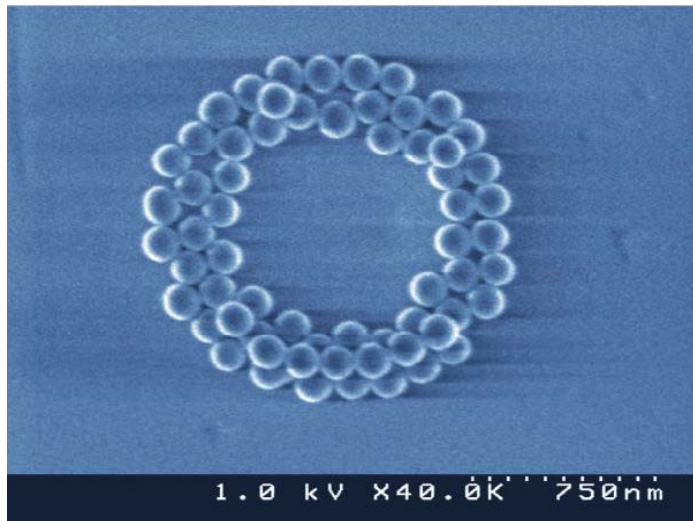
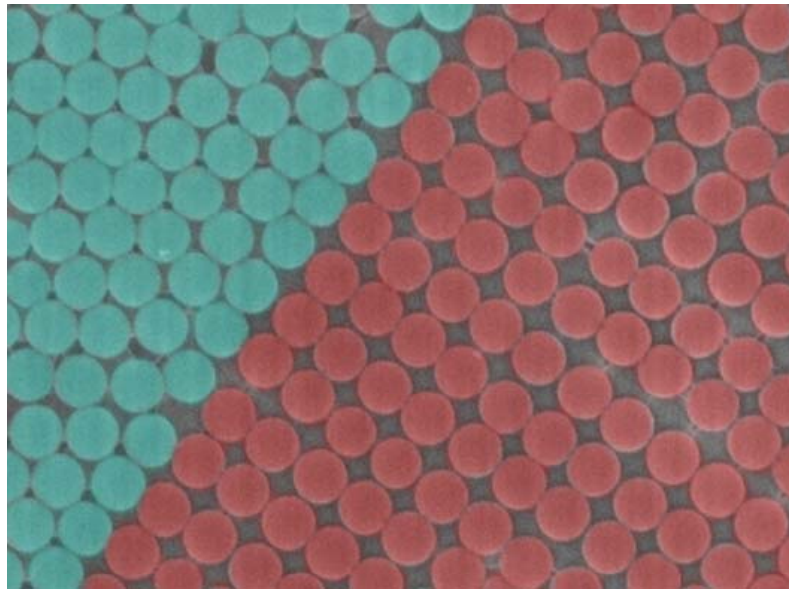
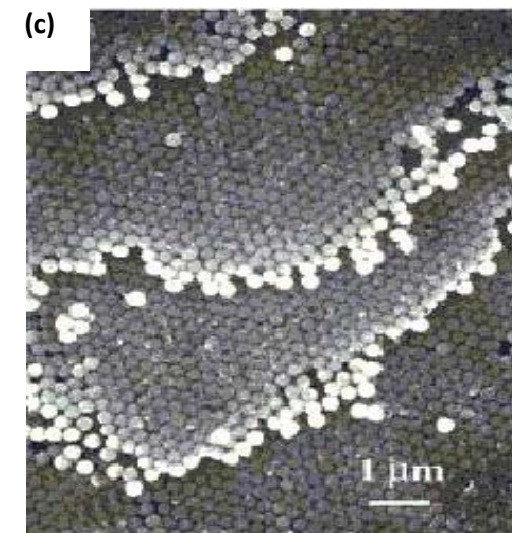
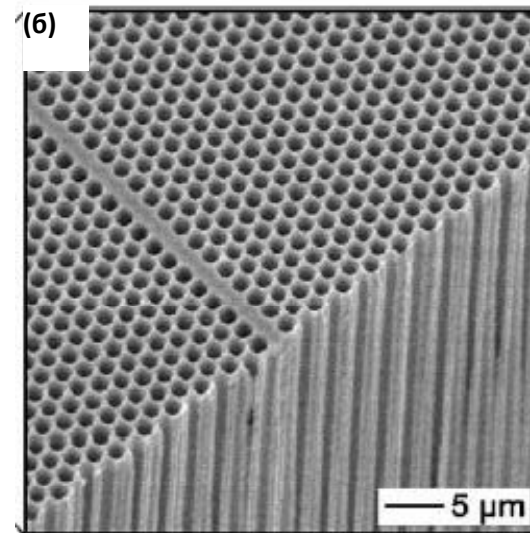
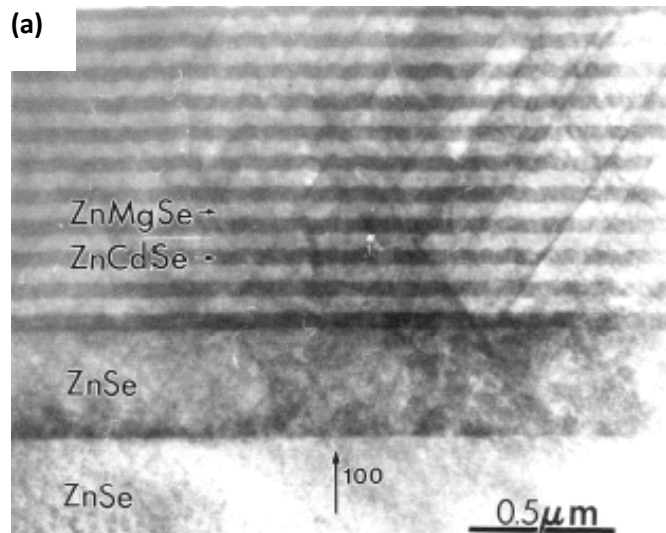
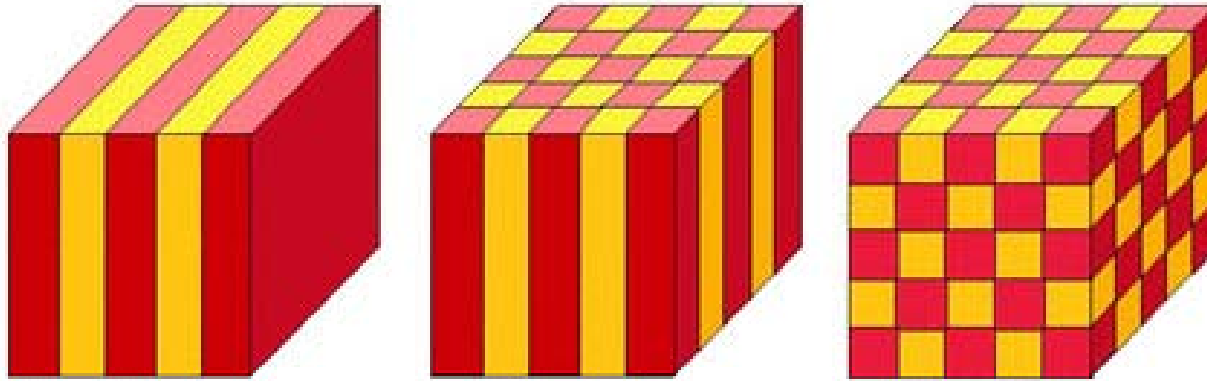


Рис. 19. Формирование плотноупакованной структуры сферических частиц  $\alpha$ -SiO<sub>2</sub>:  
*a* – образование первого слоя (A); *b* – второго слоя (B); *c* – третьего слоя (C); *d* – ГЦК структура; *e* – ГПУ структура

# 1, 2, 3 – мерные случаи



**Рис. 12.** Примеры фотонных кристаллов различной размерности:

а – одномерный фотонный кристалл (поперечное сечение, постоянная решетки 0,15 мкм);

б - двумерный фотонный кристалл на основе макропористого кремния (постоянная решетки 1,5 мкм, высота пор 100 мкм);

с - трехмерный фотонный кристалл на основе синтетического опала (постоянная решетки 300 нм)



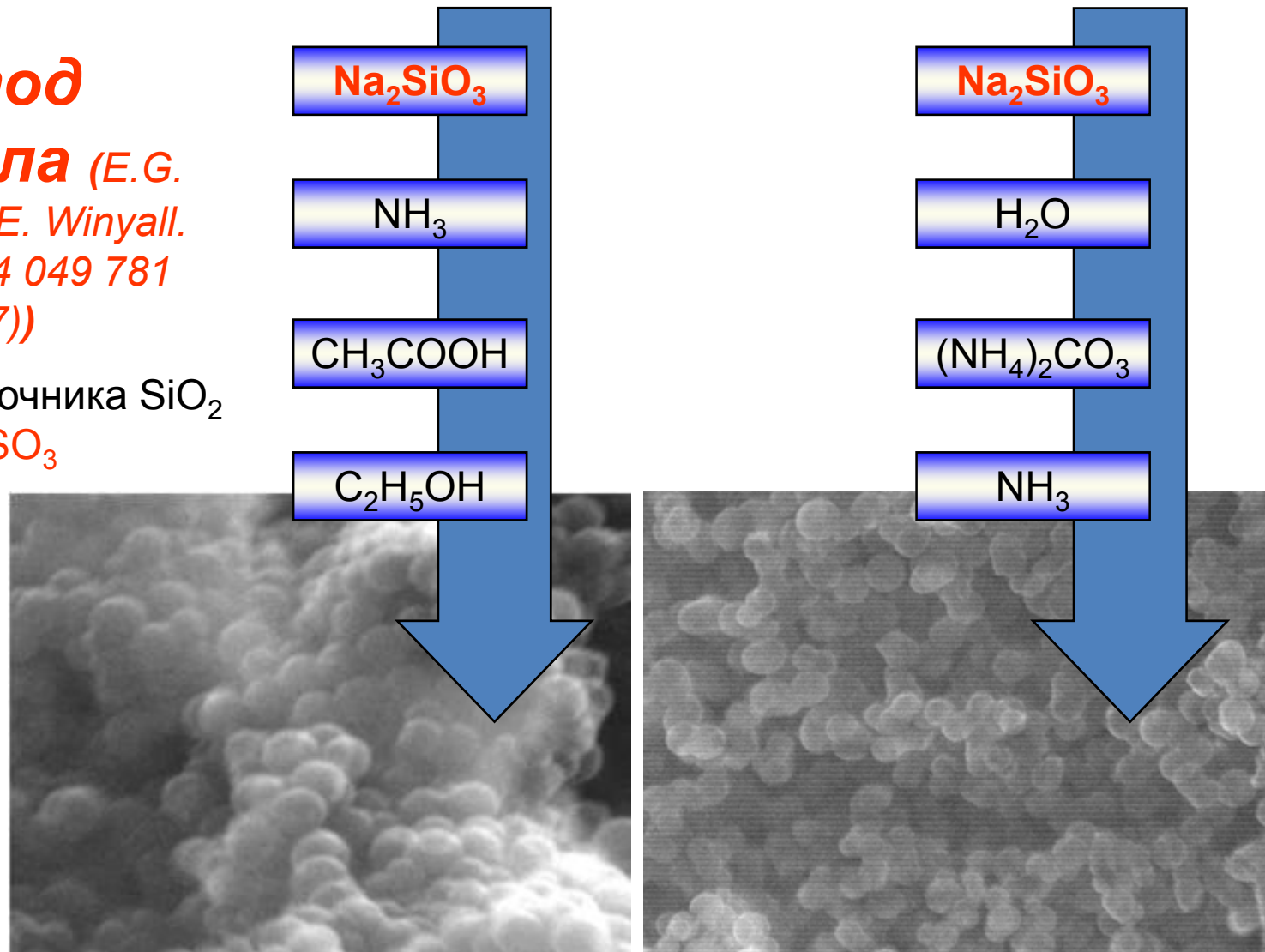
# Микросферы SiO<sub>2</sub>

## Метод

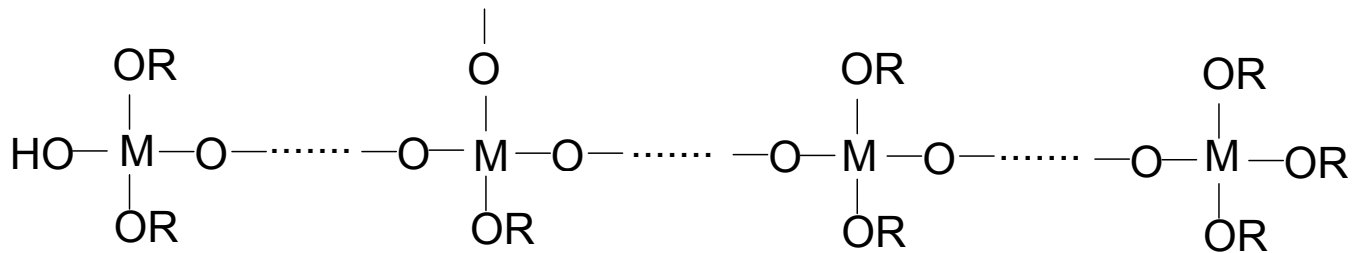
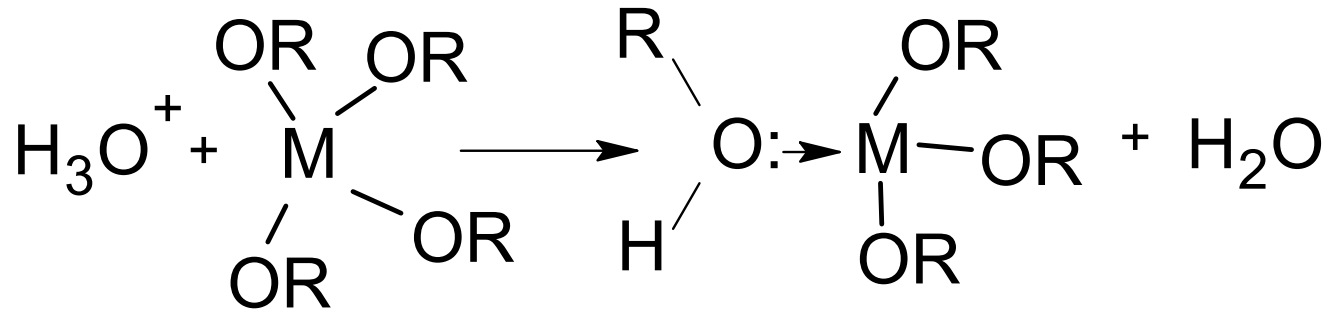
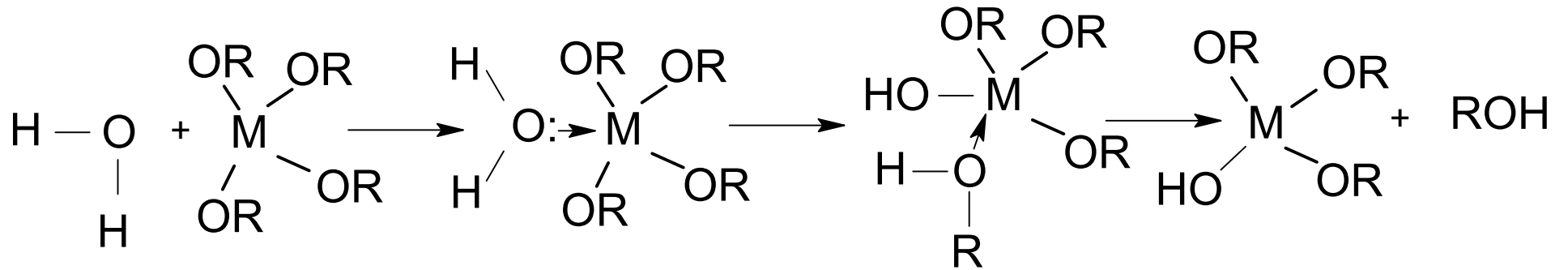
**Виньялла** (E.G. Acker and M.E. Winyall. U.S. Patent 4 049 781 (1977))

В качестве источника SiO<sub>2</sub>  
– Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>

Частицы  
поли-  
дисперсны и  
сильно  
агрегиро-  
ваны



# Гидролиз





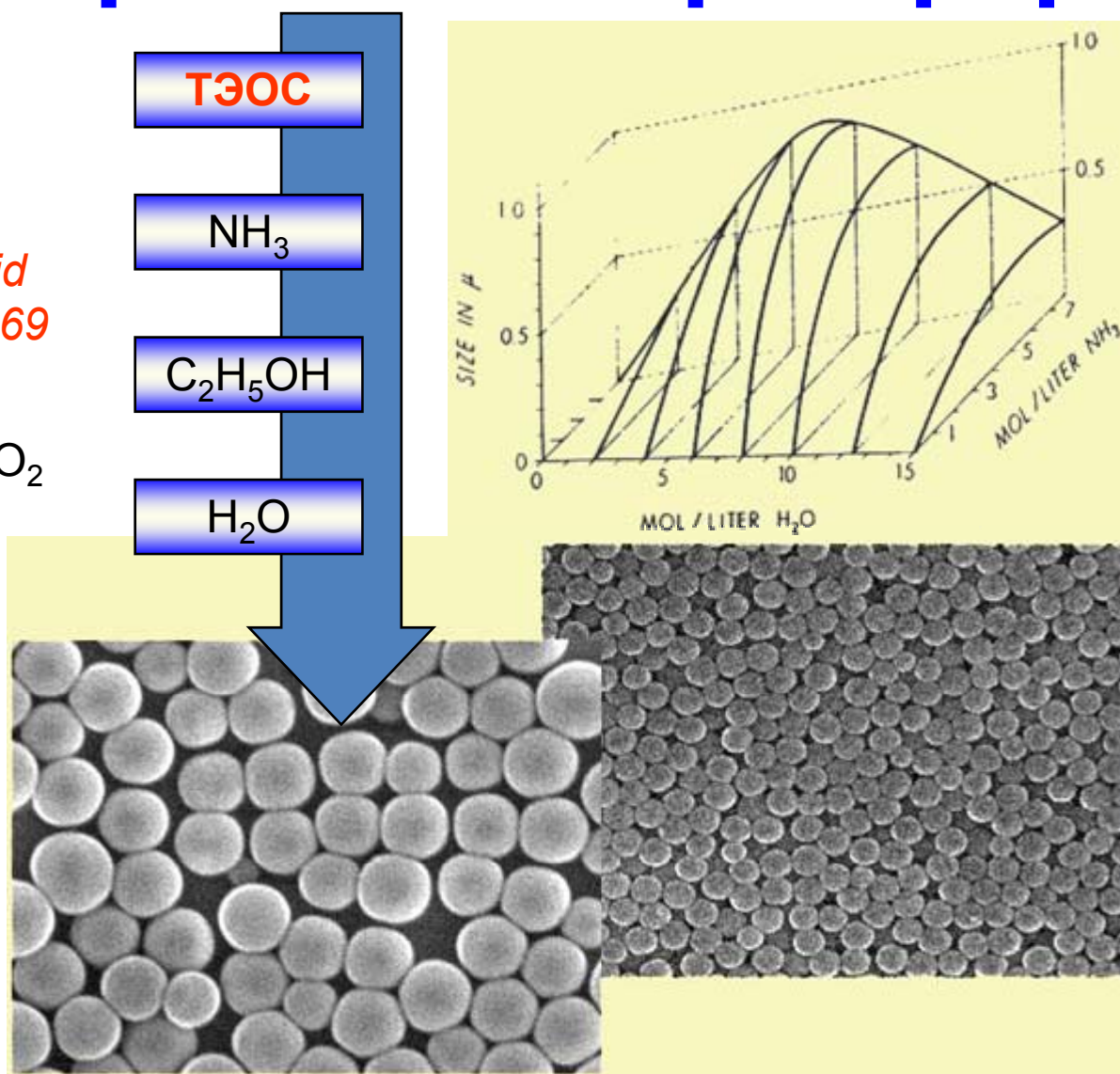
# Монодисперсные микросферы

## Метод Штебера

(W. Stöber et al. *J. Colloid and Interface Sci.*, **26**, 62-69 (1968).)

В качестве источника  $\text{SiO}_2$   
– TEOS ( $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ )

Метод Штебера  
предпочтительнее  
ввиду  
экспрессности и  
монодисперсности  
частиц



# Внутренняя структура сфер

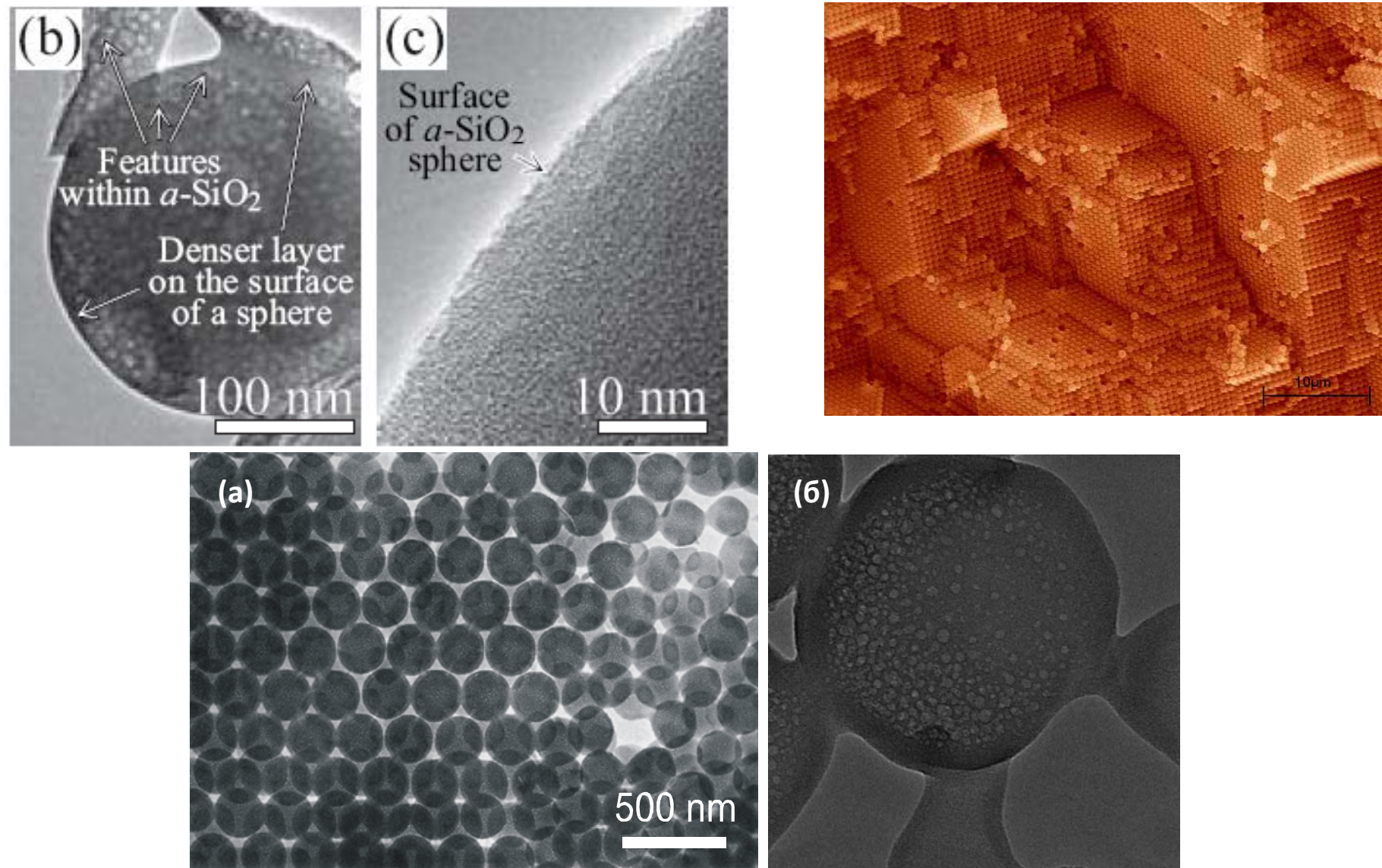
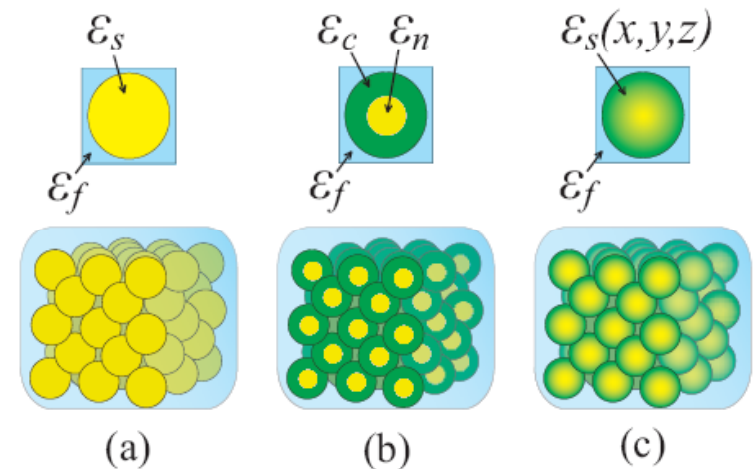


Рис. 17. Микрофотографии опала в просвечивающем режиме (а) и внутренняя структура опаловых шаров (б).

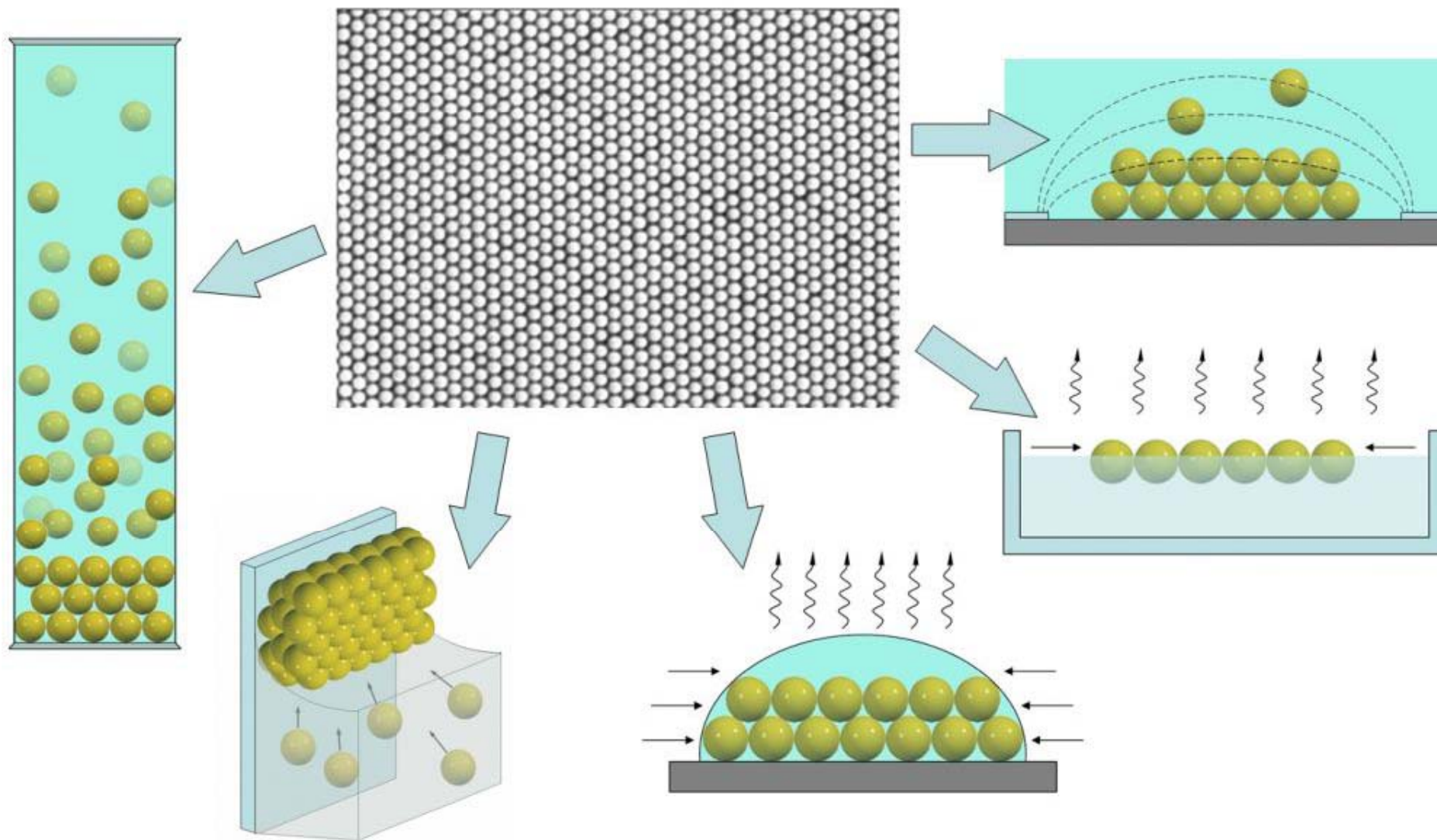


# Типы фотонных кристаллов

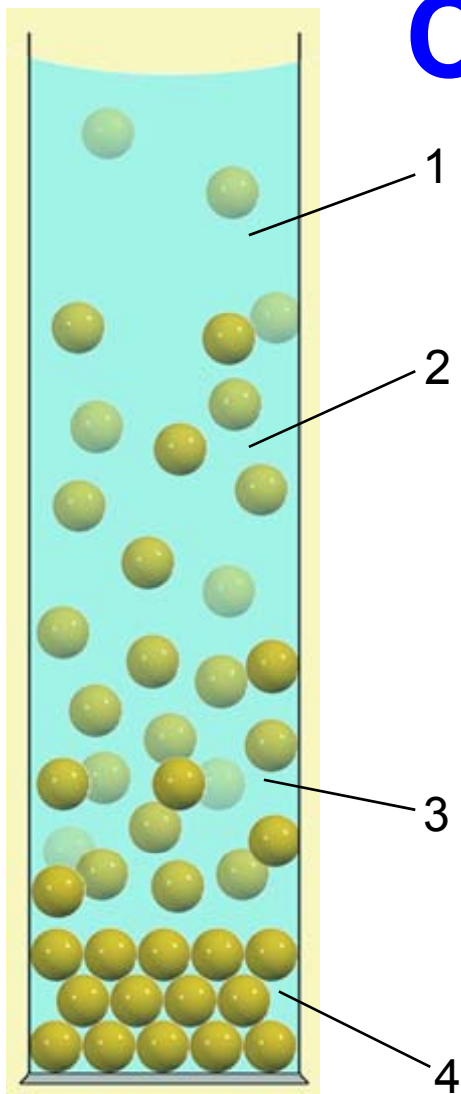
Схематическое представление двухкомпонентного ФК (a) и МФК (b, c), образованных плотноупакованными сферами. В трехкомпонентном ФК (b) сферы состоят из однородного ядра (с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_n$ ), покрытого однородной оболочкой ( $\varepsilon_c$ ). Межсферное пространство содержит однородный наполнитель ( $\varepsilon_f$ ). МФК, представленный на рис (c), состоит из неоднородных сфер, окруженных однородным наполнителем. В верхнем ряду приведены профили диэлектрической проницаемости рассеивателя.



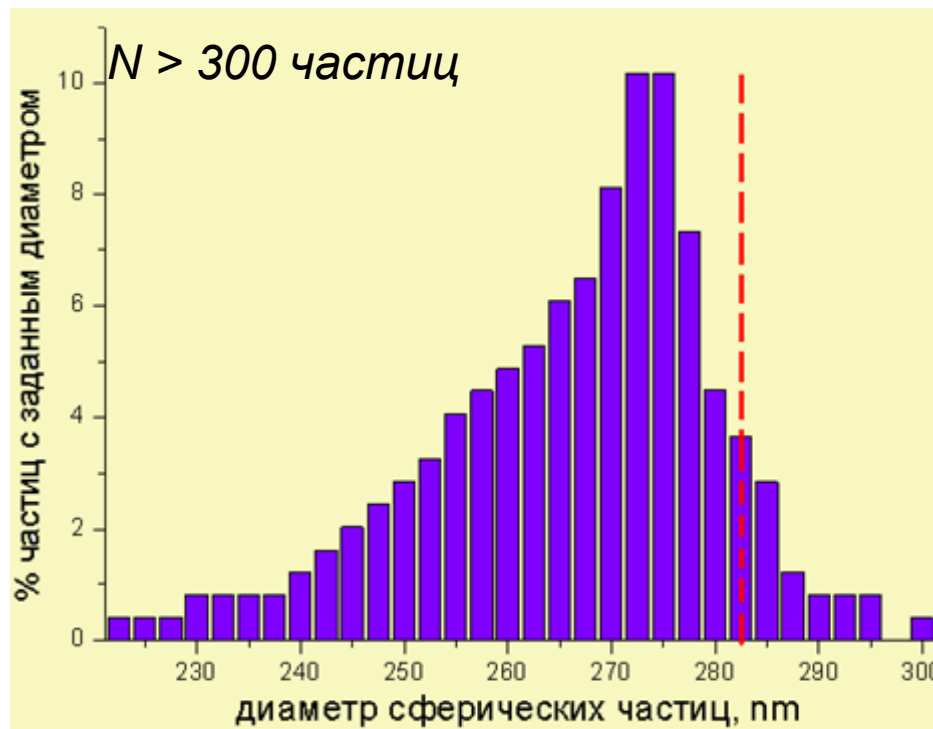
# Методы самосборки



# Седиментация (сепарирование)



- 1 – осветленная зона
- 2 – зона свободного осаждения
- 3 – зона стесненного осаждения
- 4 – осадок



$$F_A = \frac{1}{6} \pi \rho_{жс} g a^3$$

$$F_c = 3\pi\mu Va$$

$$F_T = \frac{1}{6} \pi \rho_{SiO_2} g a^3$$

Для области 2 (закон Стокса)

$$V = \frac{(\rho_{SiO_2} - \rho_{жс}) g a^2}{18\mu}$$

**Скорость осаждения  
микросфер  
250-400 нм - 2,3-7,7 мм/сут**



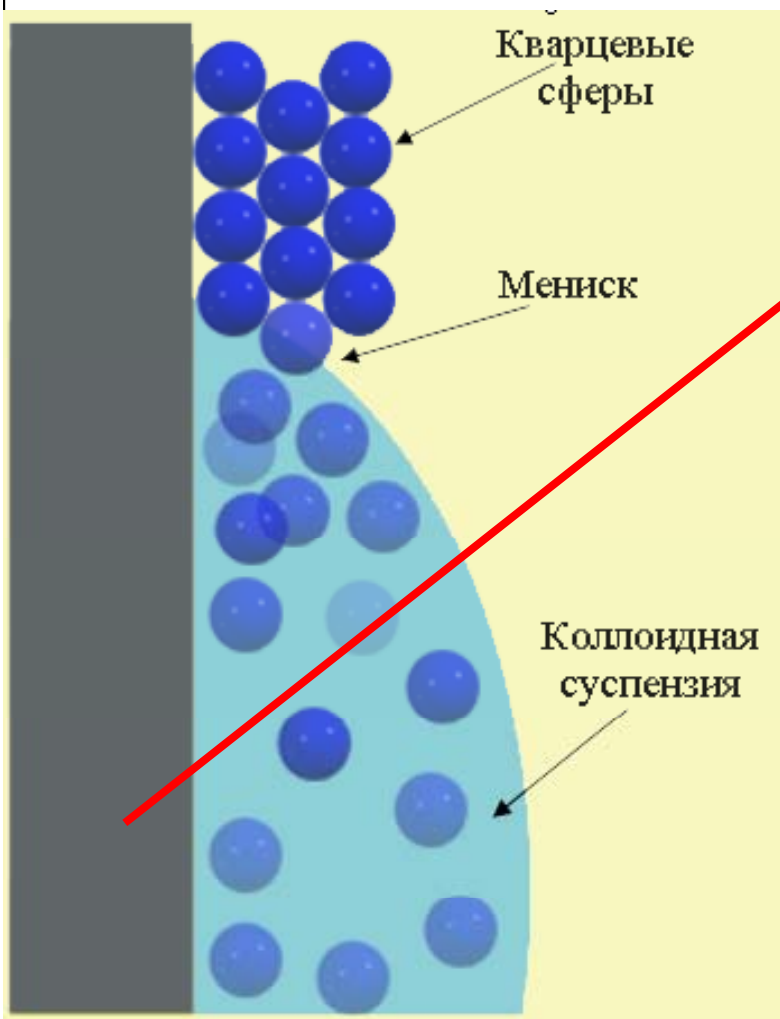
# Упорядоченные пленки

Естественная седиментация

Центрифугирование

Электроосаждение

Самосборка в мениске



Подложка:

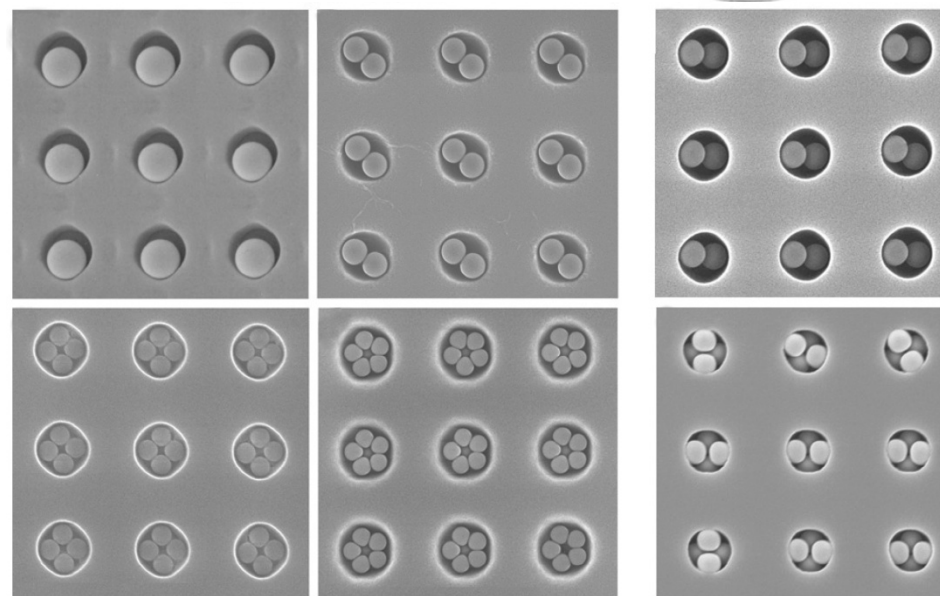
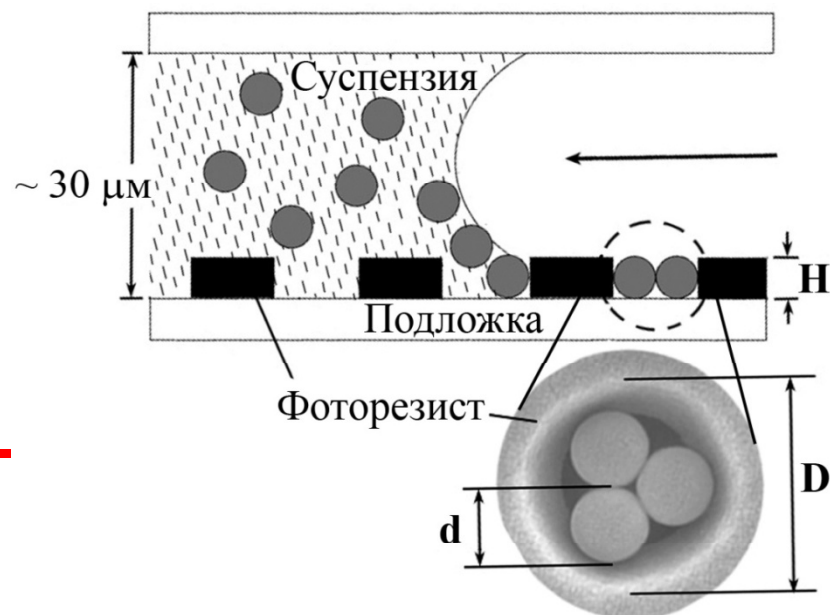
Al

$Al_2O_3$

Стекло

Cu

Pb

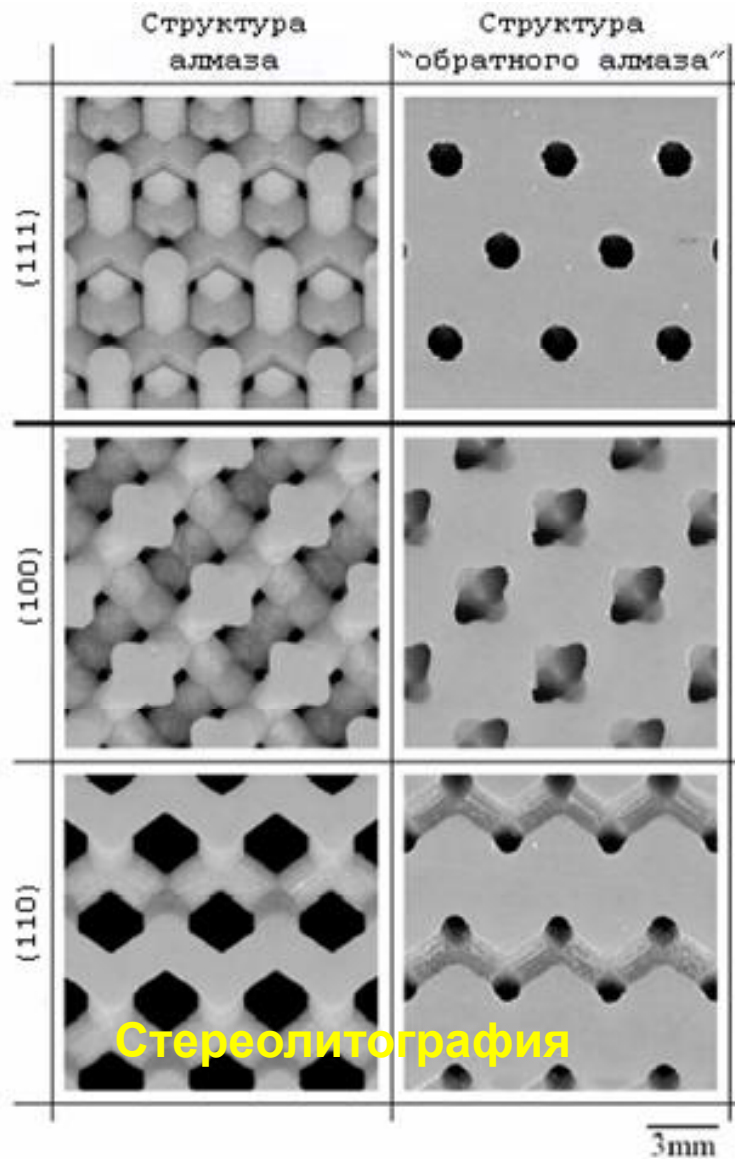


— 2 μm

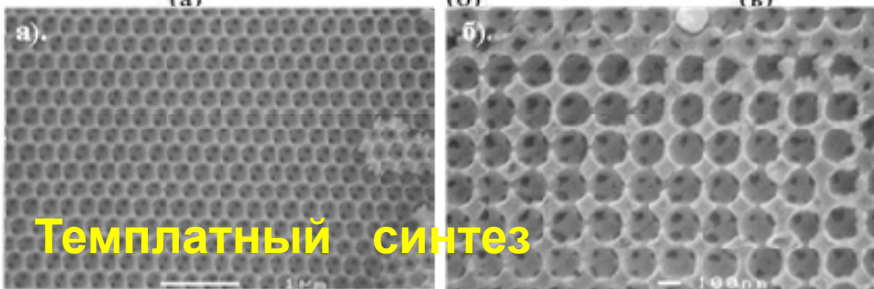
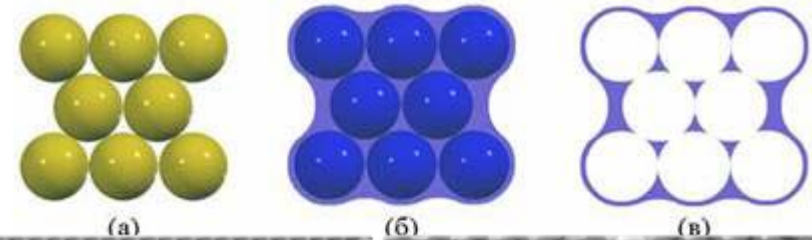
$0,5d \leq H \leq 1,37d$

$1,37d \leq H \leq 2,23d$

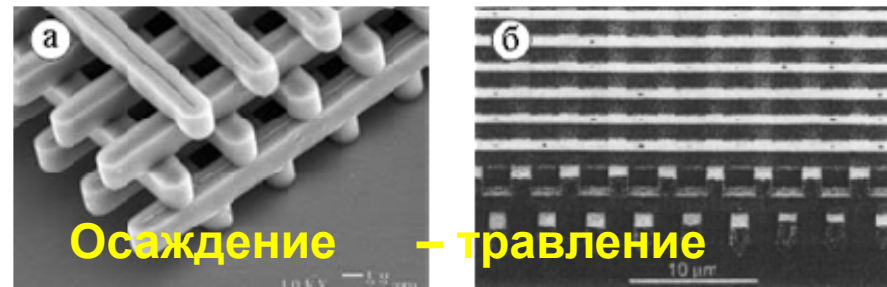
# Другие методы получения



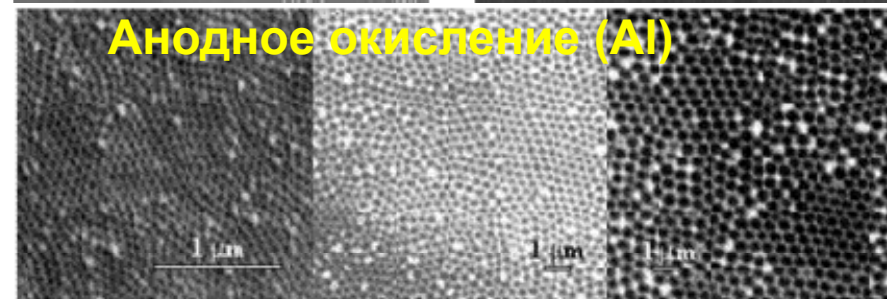
Стереолитография



Темплатный синтез



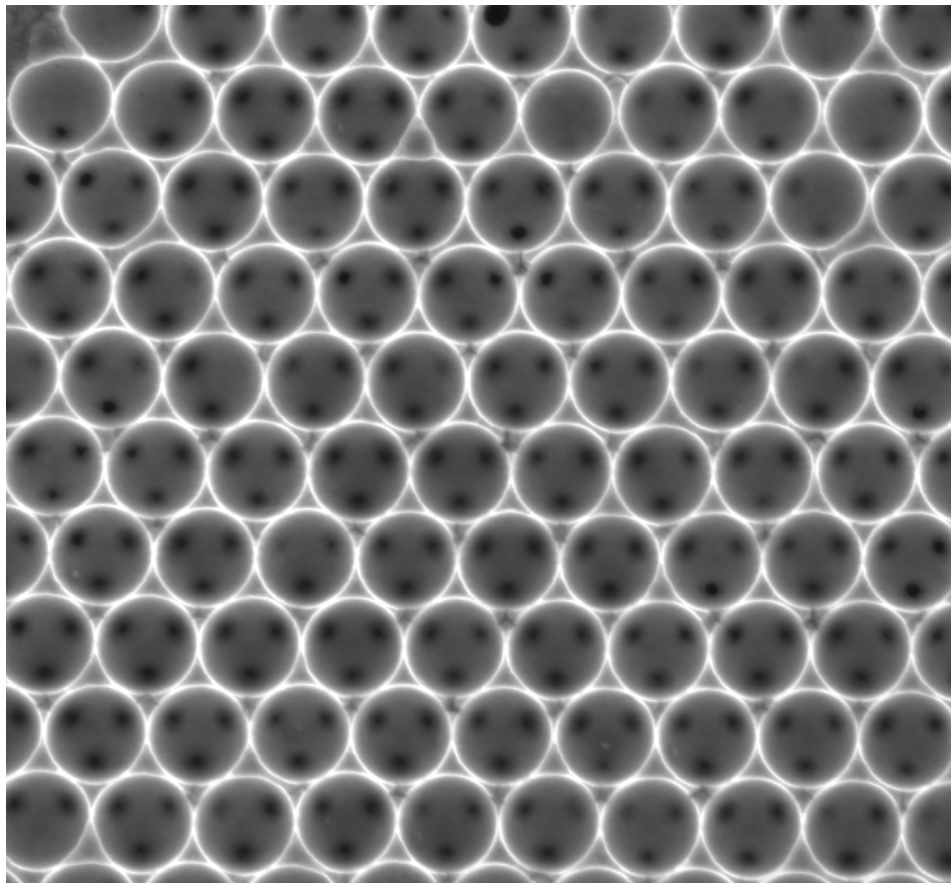
Осаждение – травление



Анодное окисление (AO)



# «Инvertированный» опал



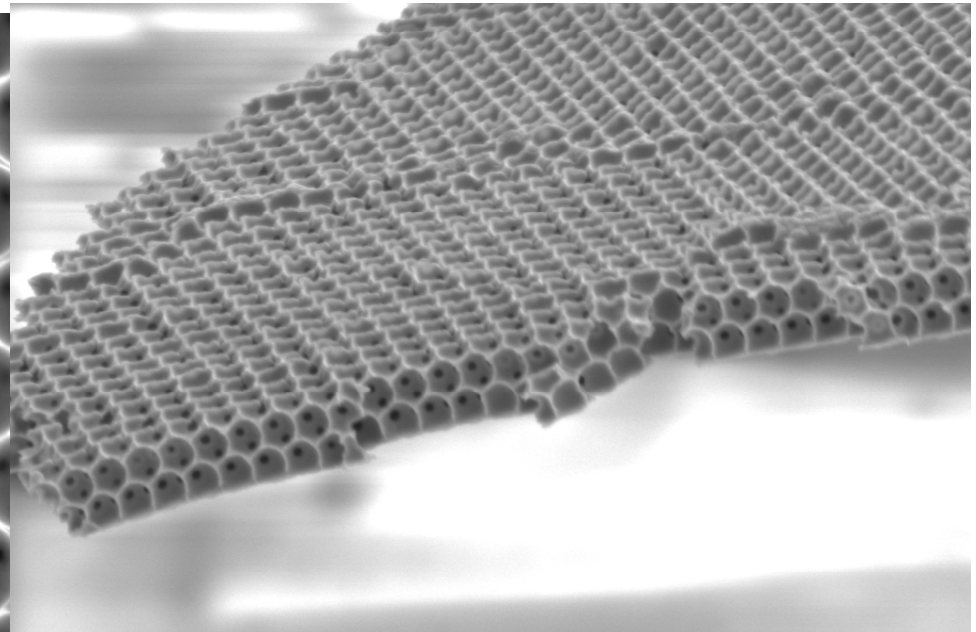
Mag = 50.00 K X

1 $\mu$ m

EHT = 5.00 kV  
WD = 6 mm

Signal A = InLens  
Photo No. = 4063

MSU HSMS  
Date :15 May 2009



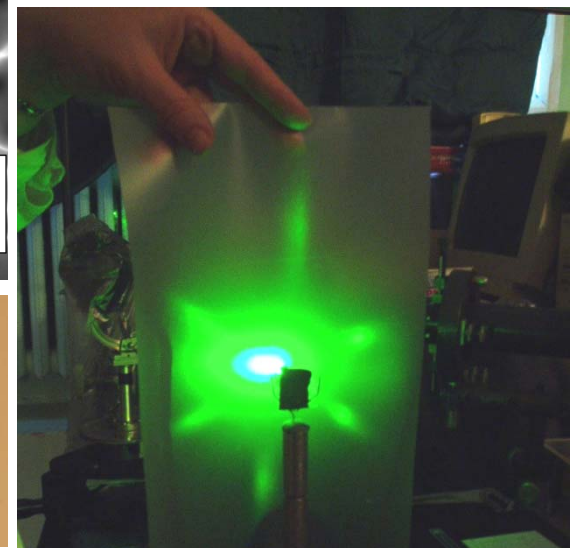
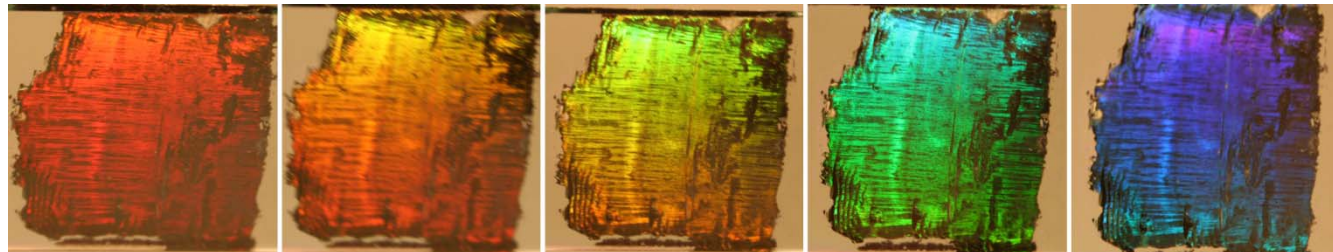
Mag = 25.00 K X

1 $\mu$ m

EHT = 5.00 kV  
WD = 20 mm

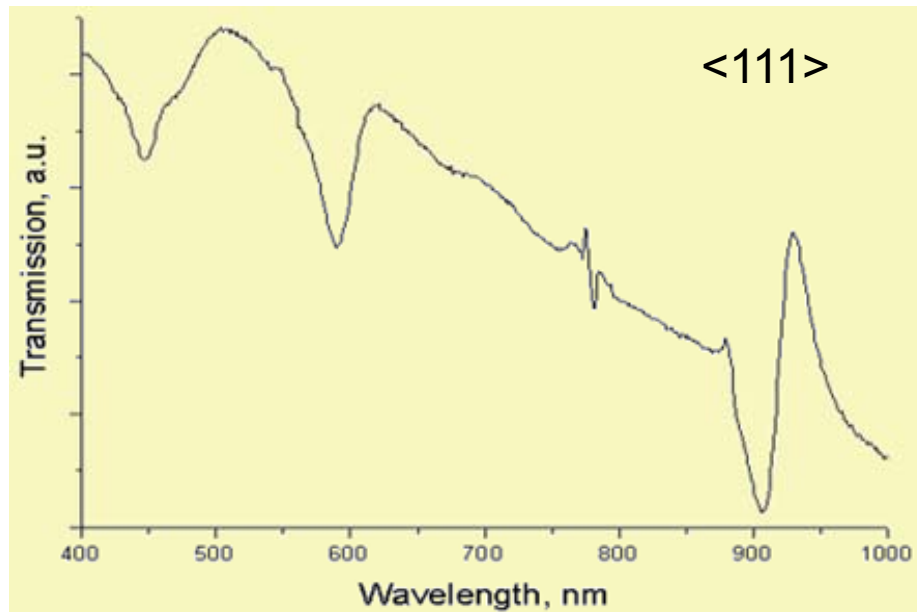
Signal A = SE2  
Photo No. = 4090

MSU HSMS  
Date :15 May 2009





# Оптические свойства

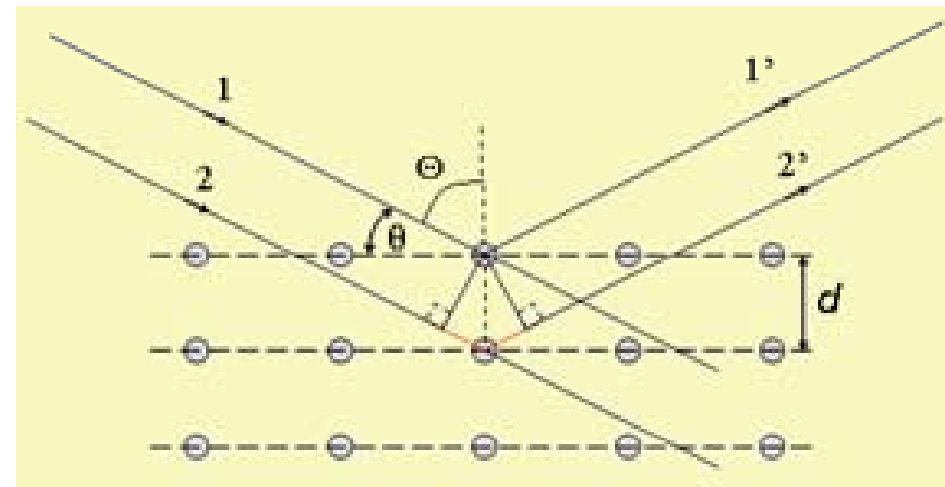


Дисперсия коэффициента преломления аморфного SiO<sub>2</sub>:



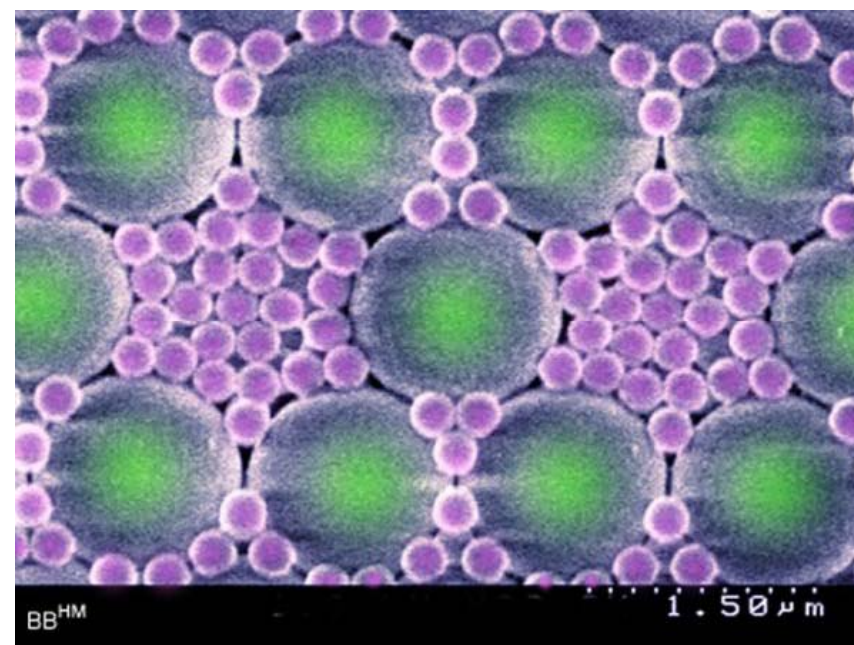
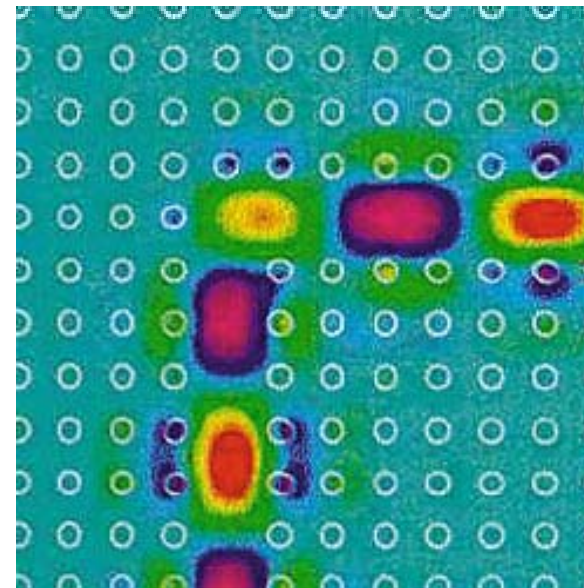
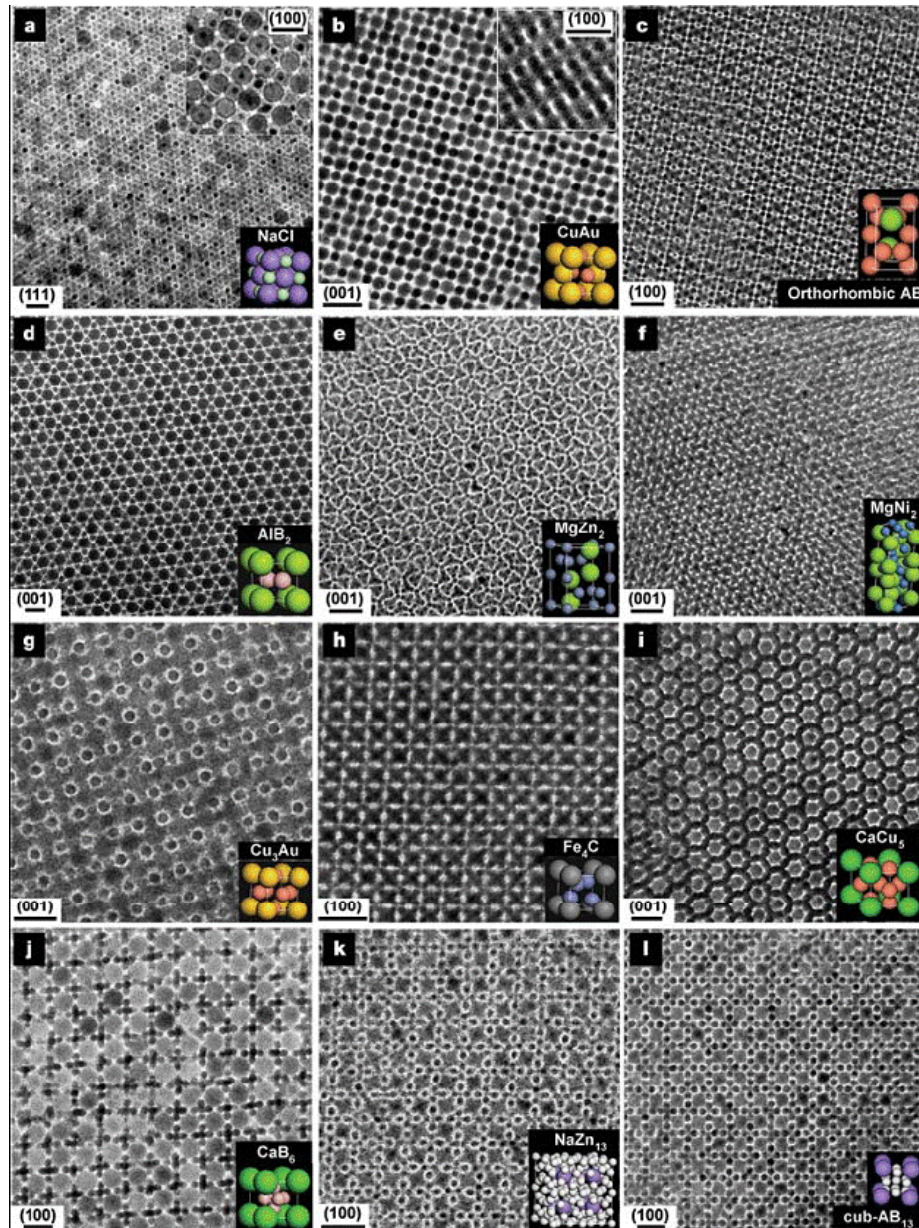
Закон Брэгга-Вульфа:

$$\lambda = \frac{2d}{k} \sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \Theta}$$



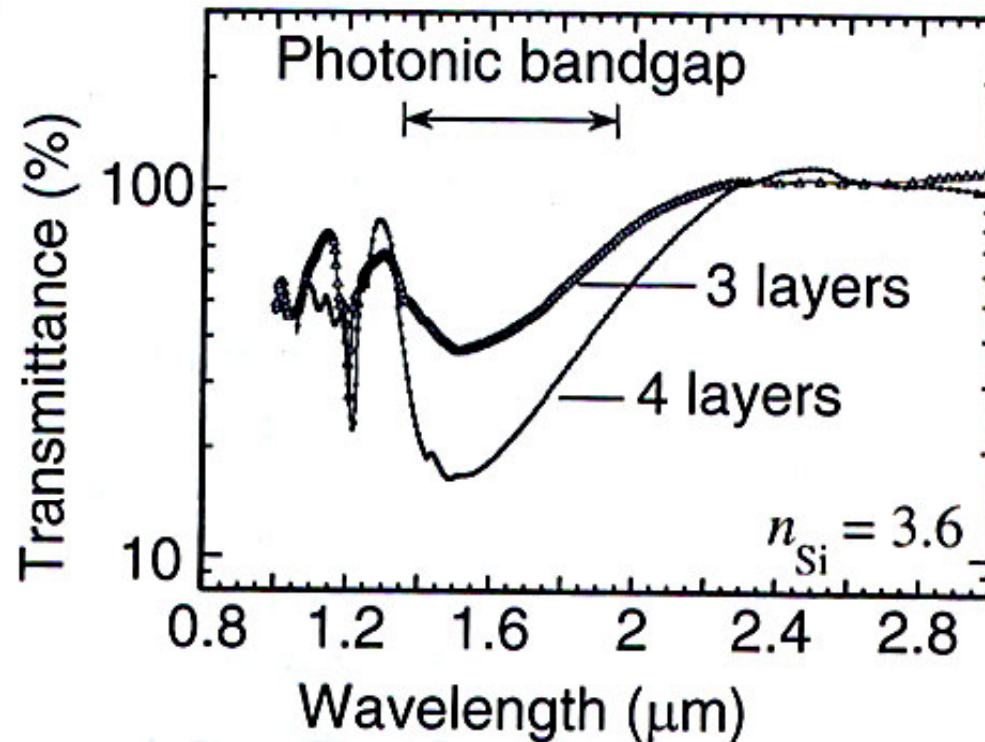


# Сверхрешетки

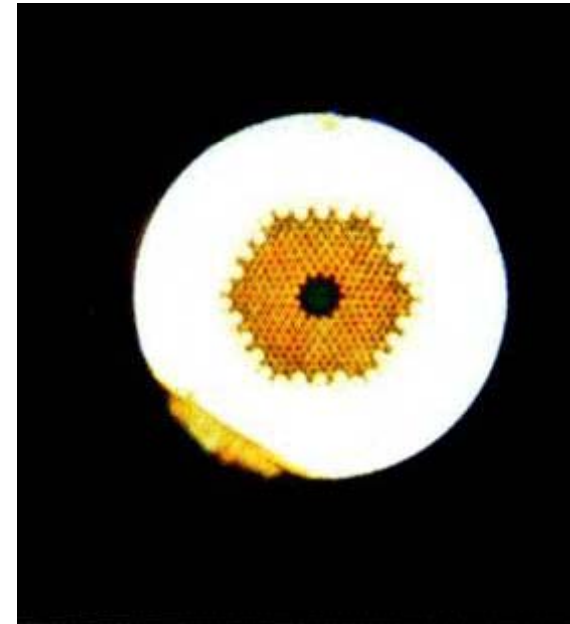




# ОПТОВОЛОКНО



*Transmission spectra of a 3D photonic crystal for three- and four-layer thicknesses ( $n$  is the refractive index).*



*Optical micrograph of the output face of an air-core photonic-bandgap fiber illuminated at the input face using a white-light source. The core is surrounded by the photonic-crystal cladding, which is embedded within a pure silica jacket. The air core has an area of seven unit cells. The strongly colored light in the core is confined by the bandgap of the surrounding photonic crystal. The outer diameter of the fiber is 110 μm.*



# Потенциальные применения



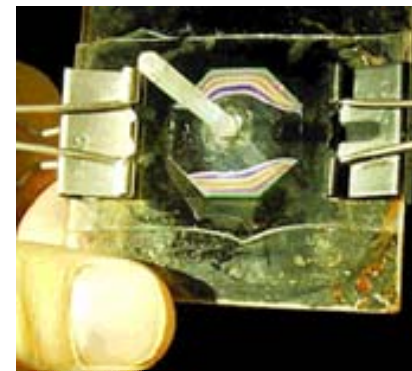
*Светодиоды  
(КПД ~ 50%)*



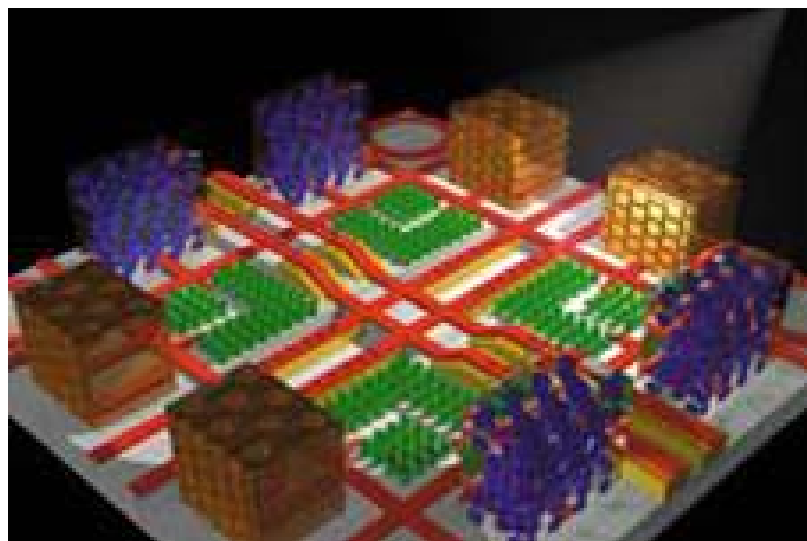
*Лазеры с низким  
порогом генерации*



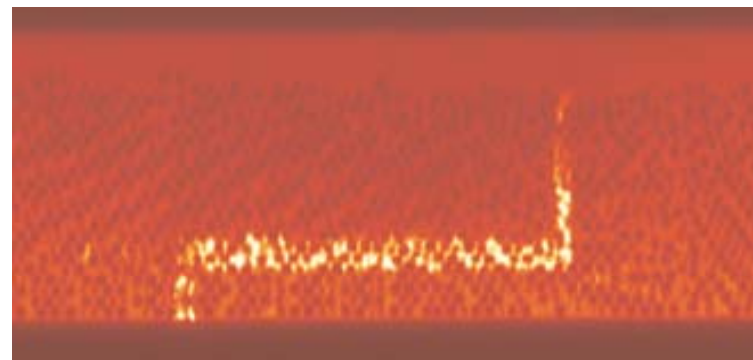
*Новые оптические  
волноводы*



*Устройства  
быстрого  
оптического  
переключения*

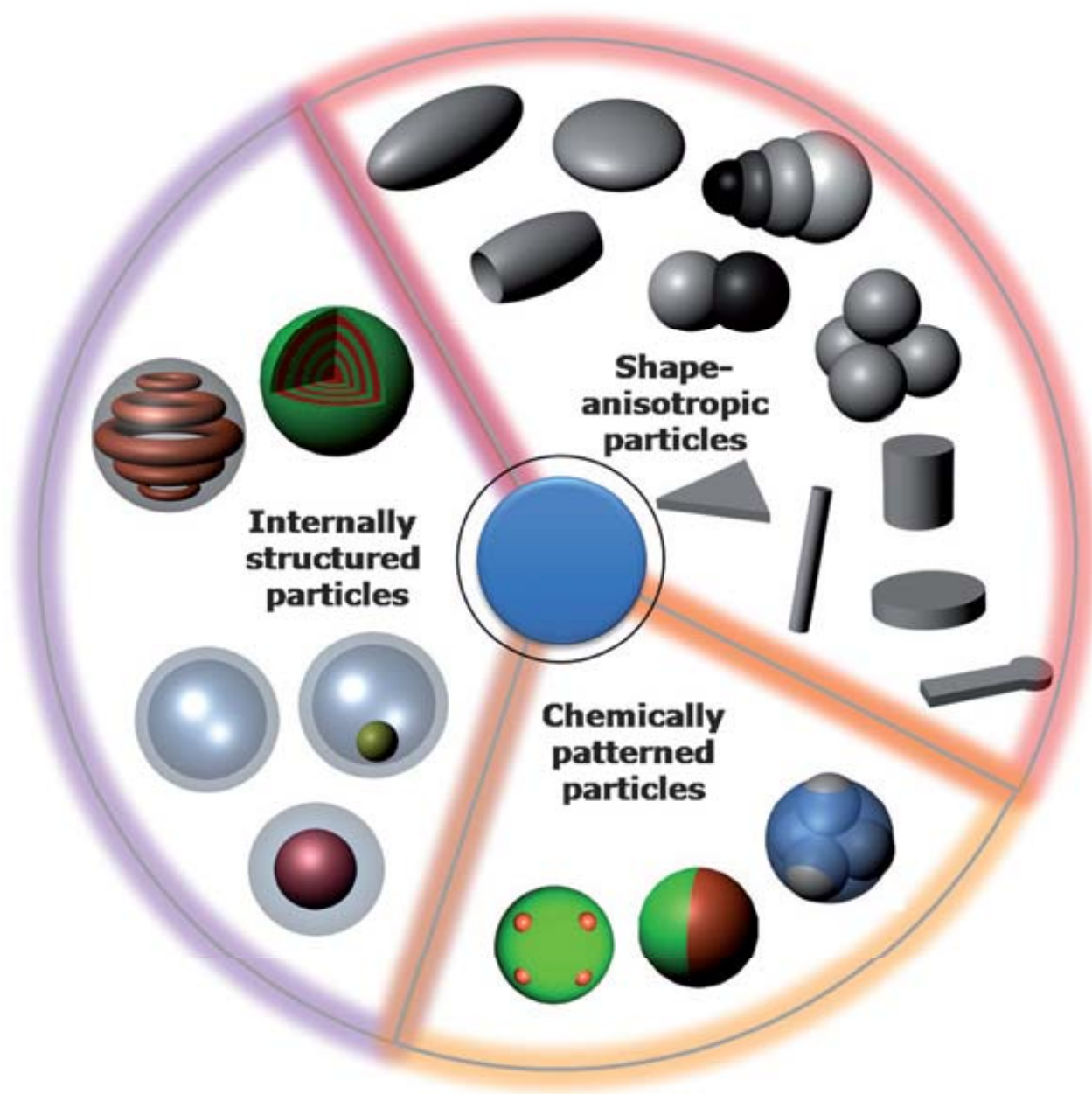


*Оптические устройства хранения и  
обработки информации, фотонные  
интегральные схемы*

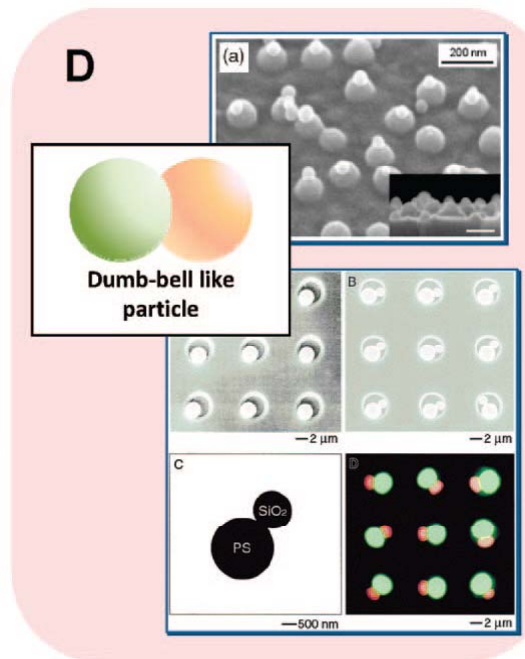
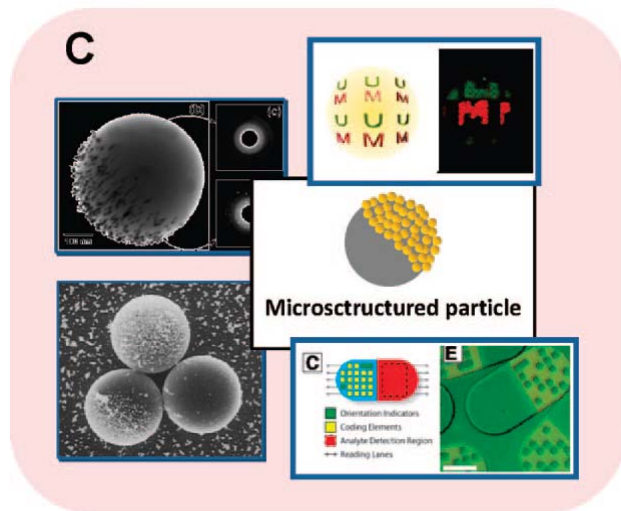
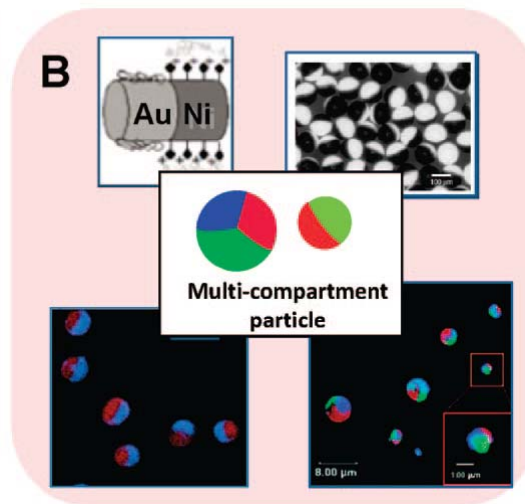
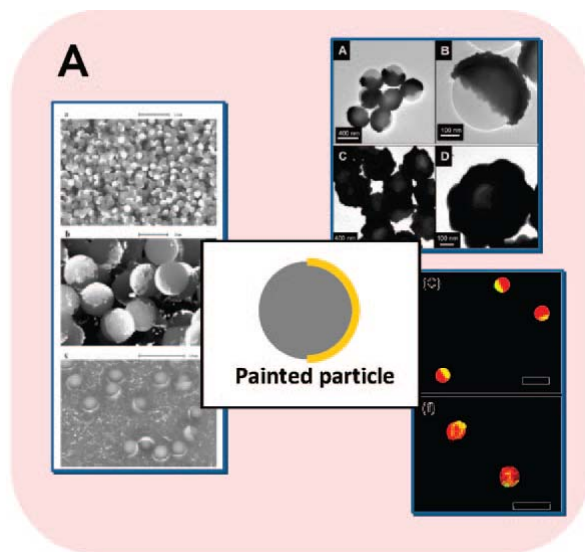


*Оптические фильтры,  
микроустройства  
для направления света*

# Типы частиц - янусов

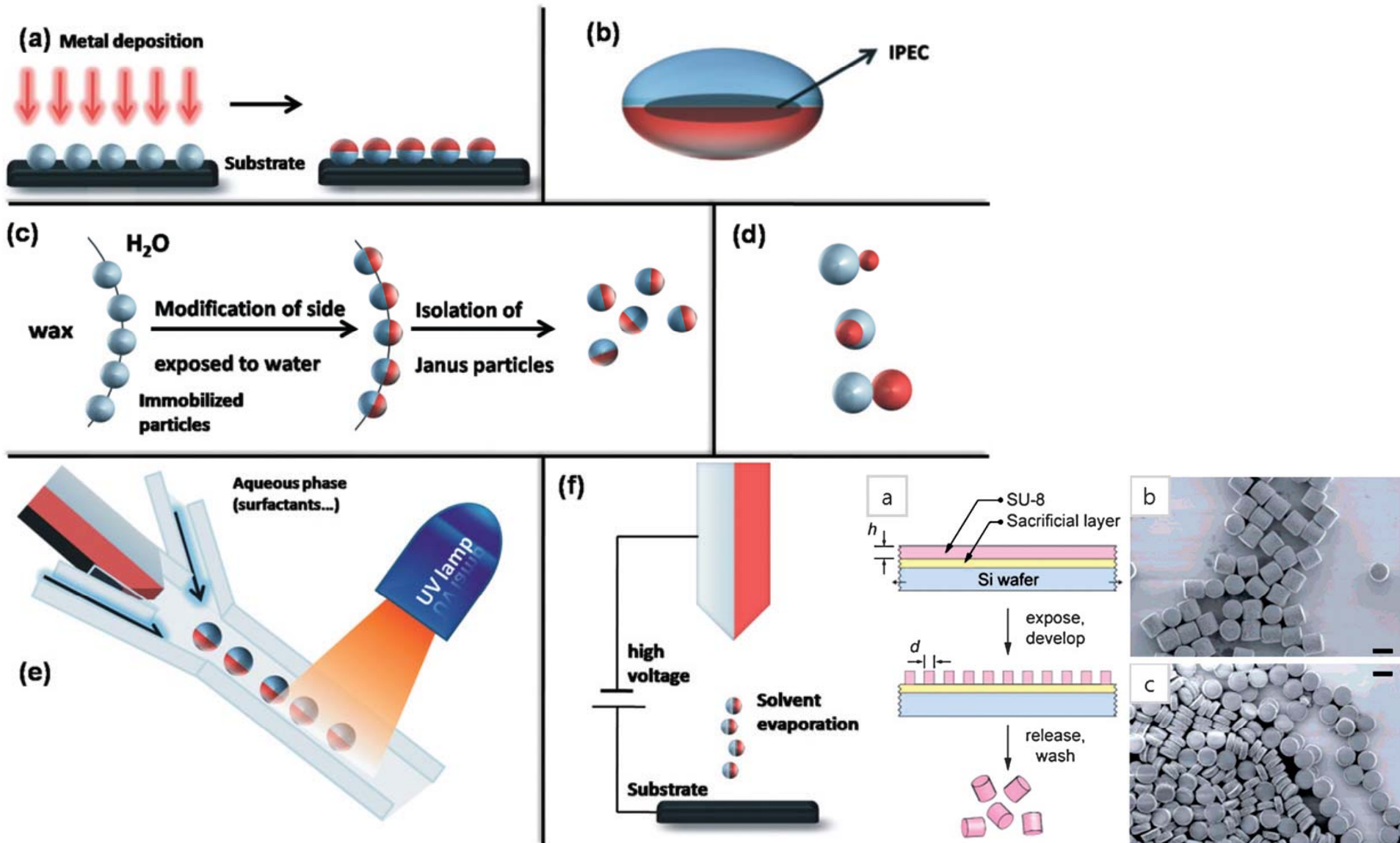


# Классификация

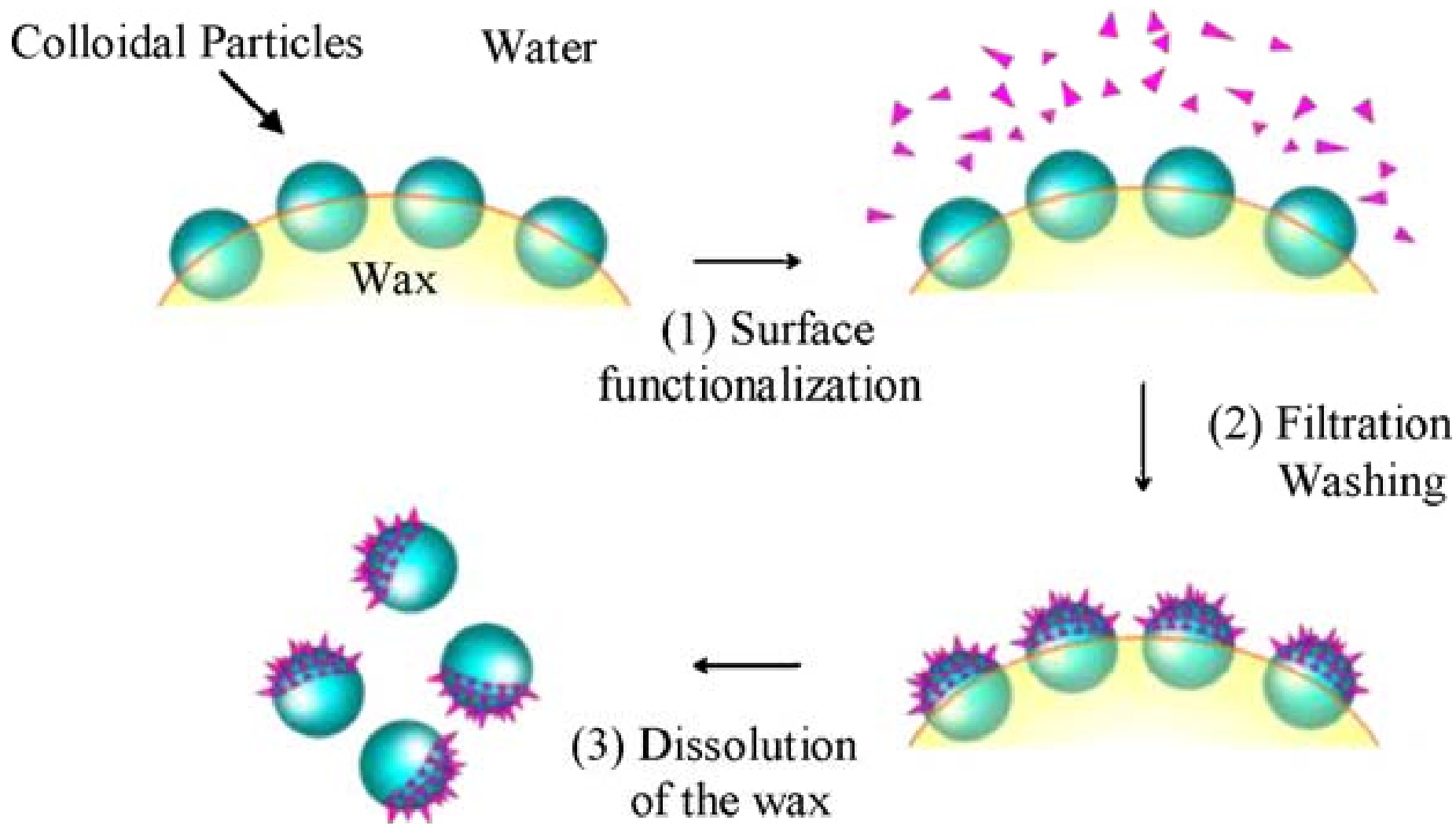




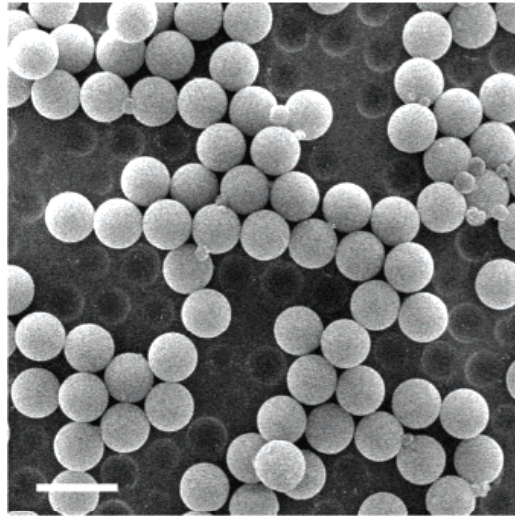
# Методы получения частиц - янусов



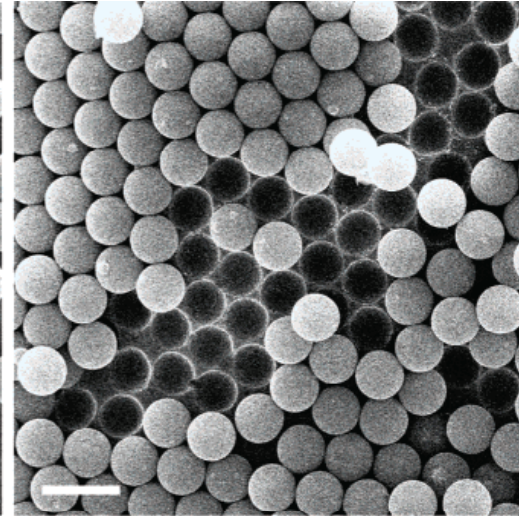
# Частицы – янусы в парафине / масле



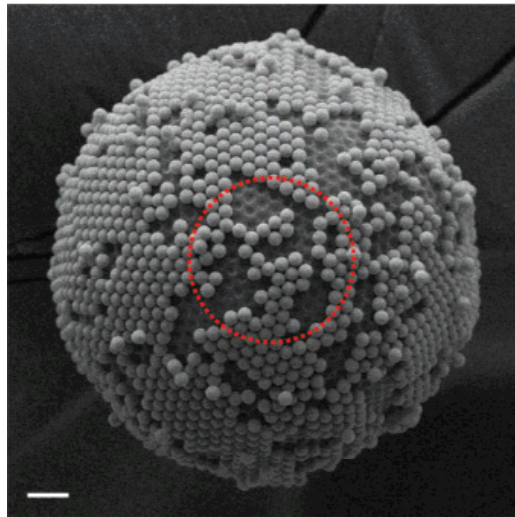
# Парафинная технология



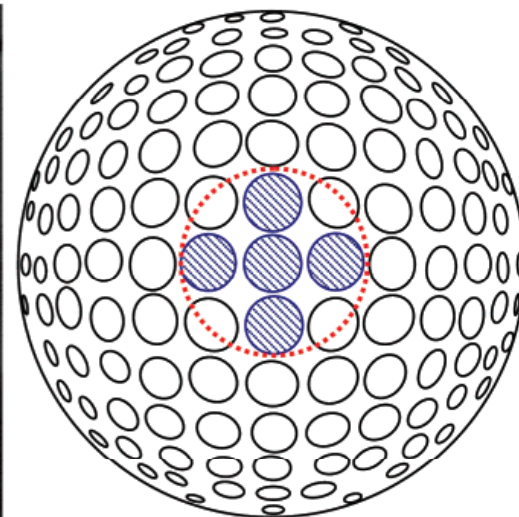
(a)



(b)

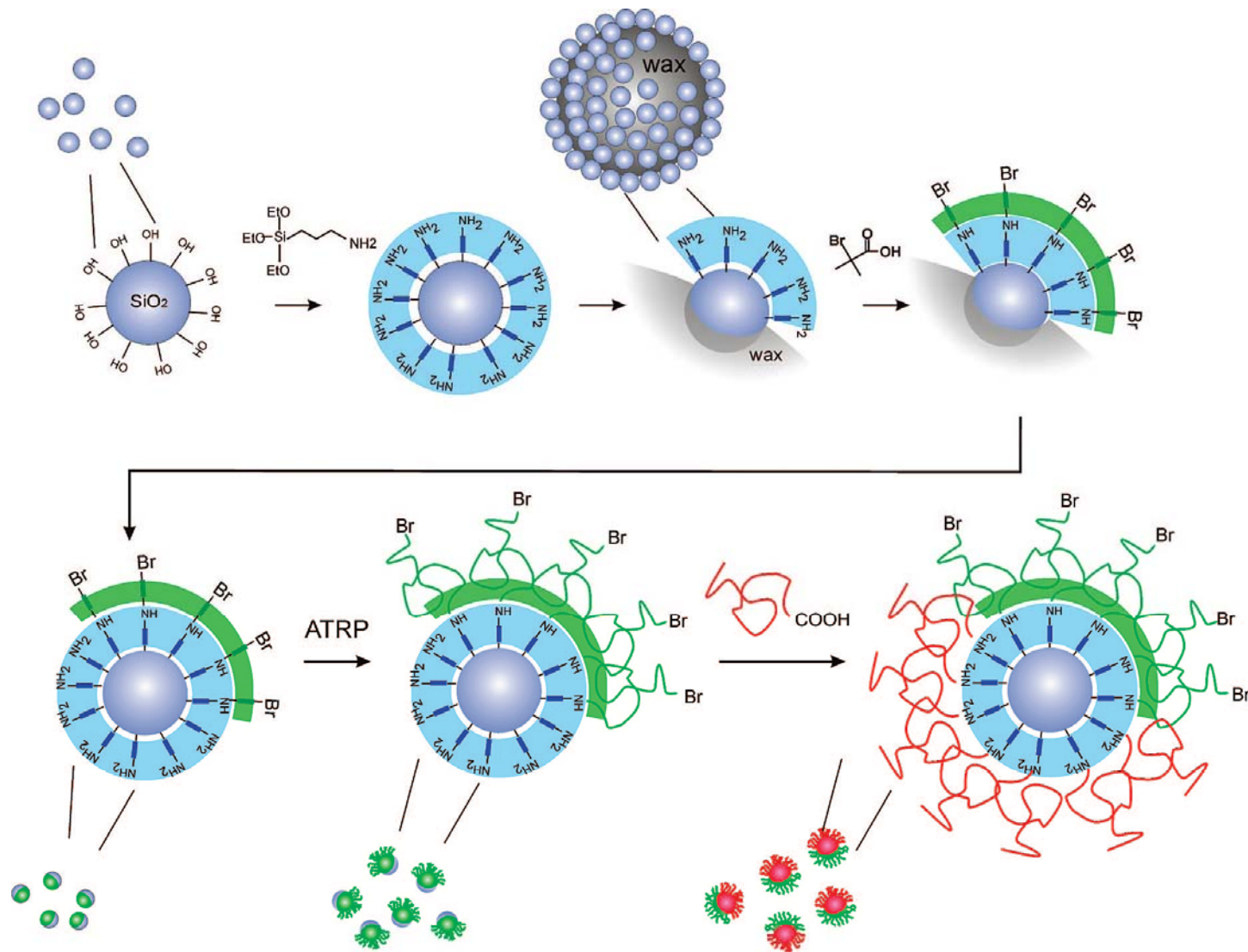


(c)



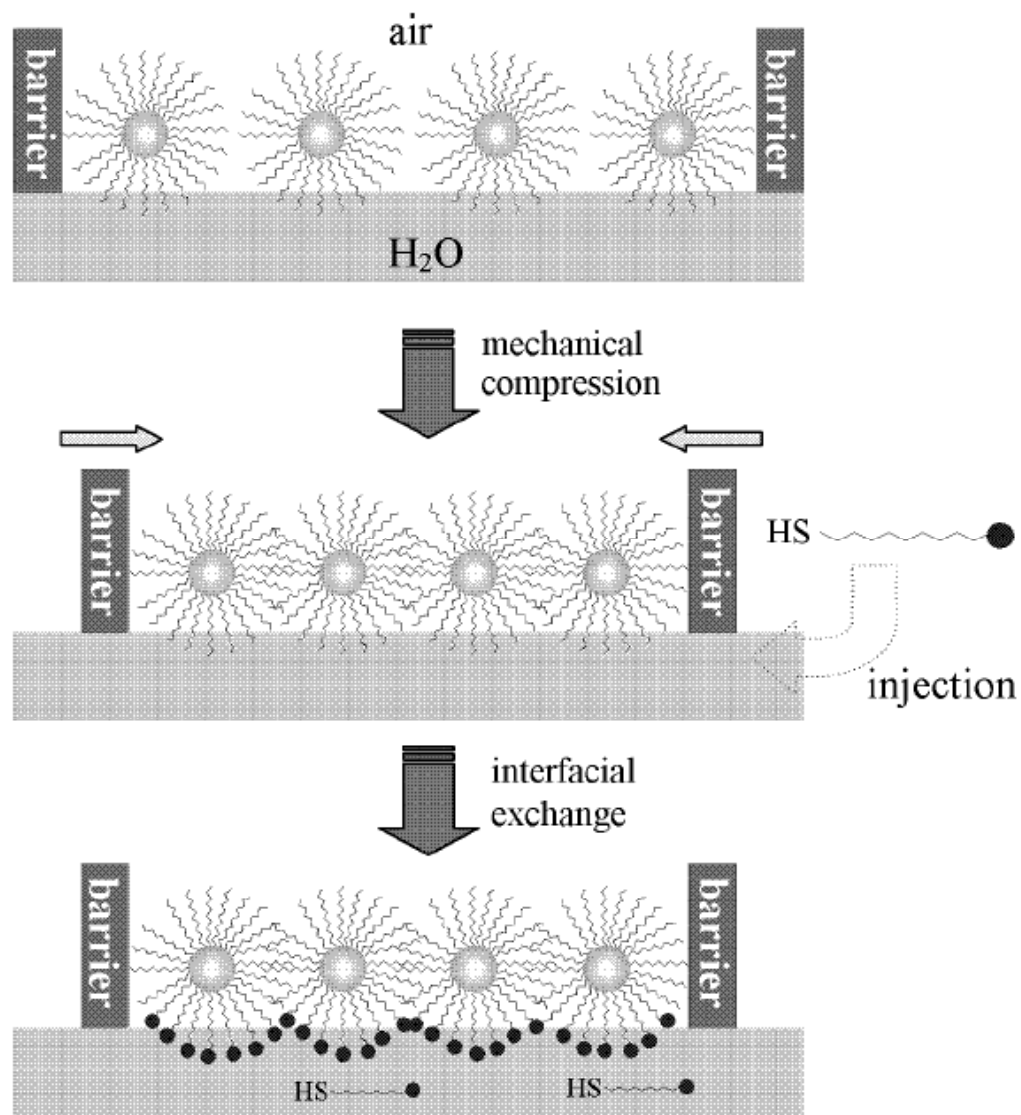
(d)





Scheme of the synthesis of bicomponent Janus particles by “grafting from” and “grafting to” approaches. The bare silica particles are coated by APS, assembled around wax colloidosomes and selectively modified by ATRP initiator at one side (upper panel). The first polymer (PtBA or PNIPAAm) is grafted by surface-initiated ATRP. The carboxyl-terminated second polymer (P2VP) is grafted to free amino groups on silica particles by the “grafting to” approach.

# ЛБ и частицы - янусы

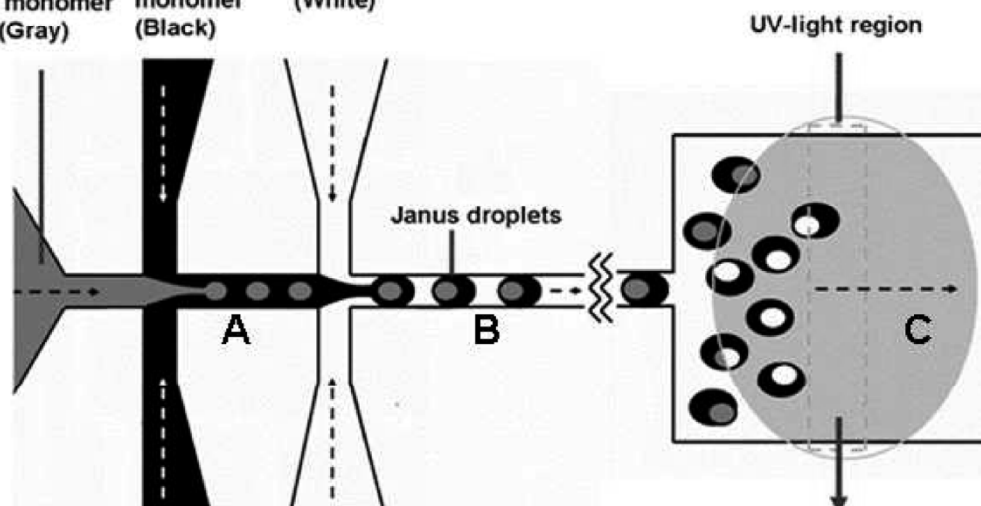


**Scheme 2.** Schematic of the preparation of Janus nanoparticles based on the Langmuir technique.

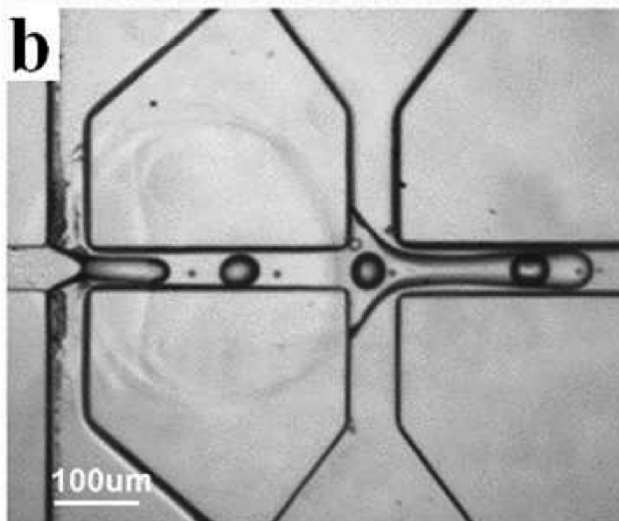
# Микрофлюидная машина

**a**

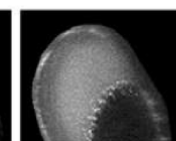
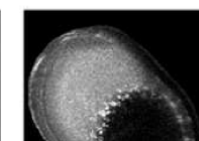
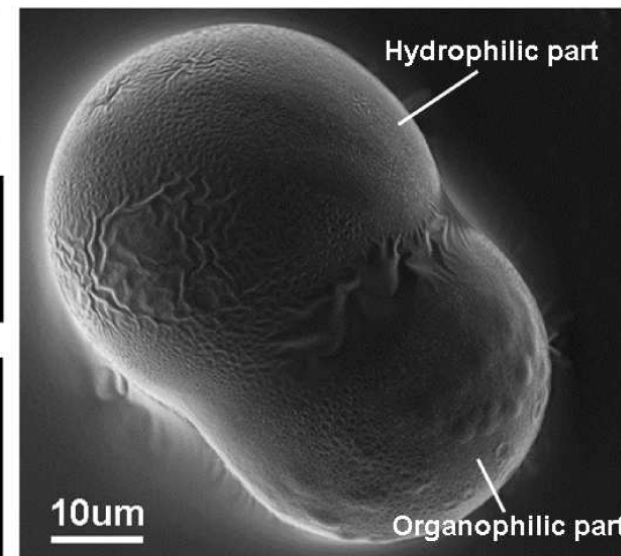
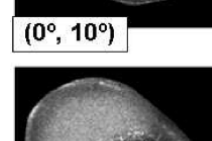
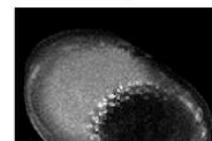
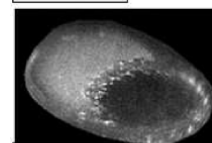
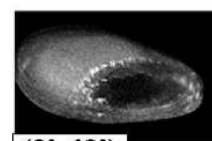
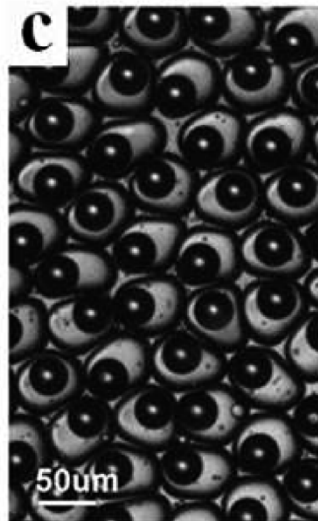
Oleophilic monomer (Gray)  
Hydrophilic monomer (Black)  
Oil solution (White)



**b**

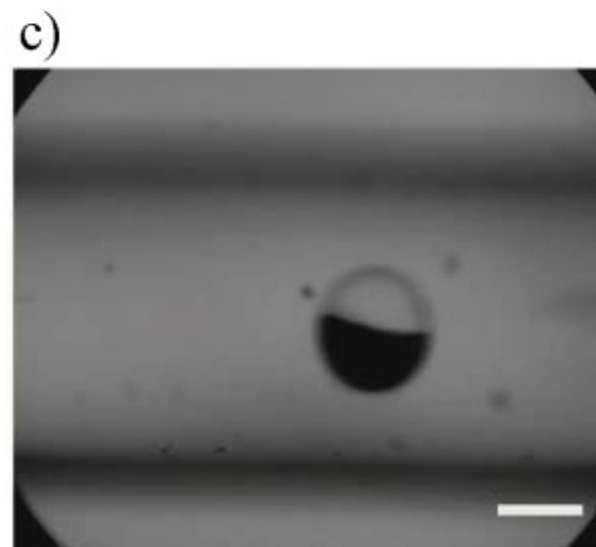
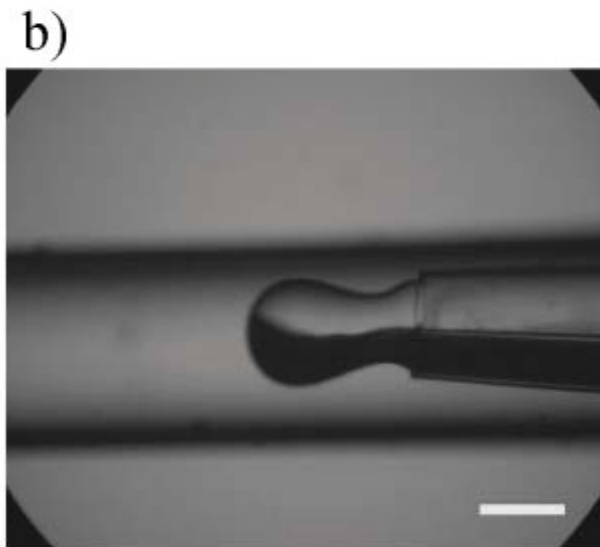
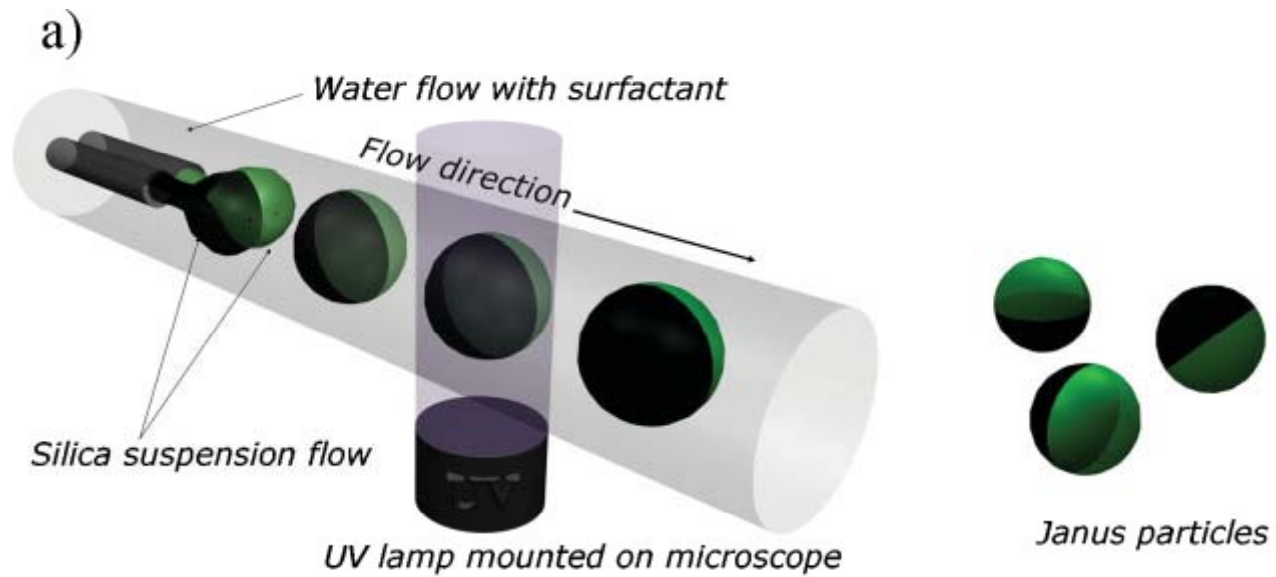


**c**

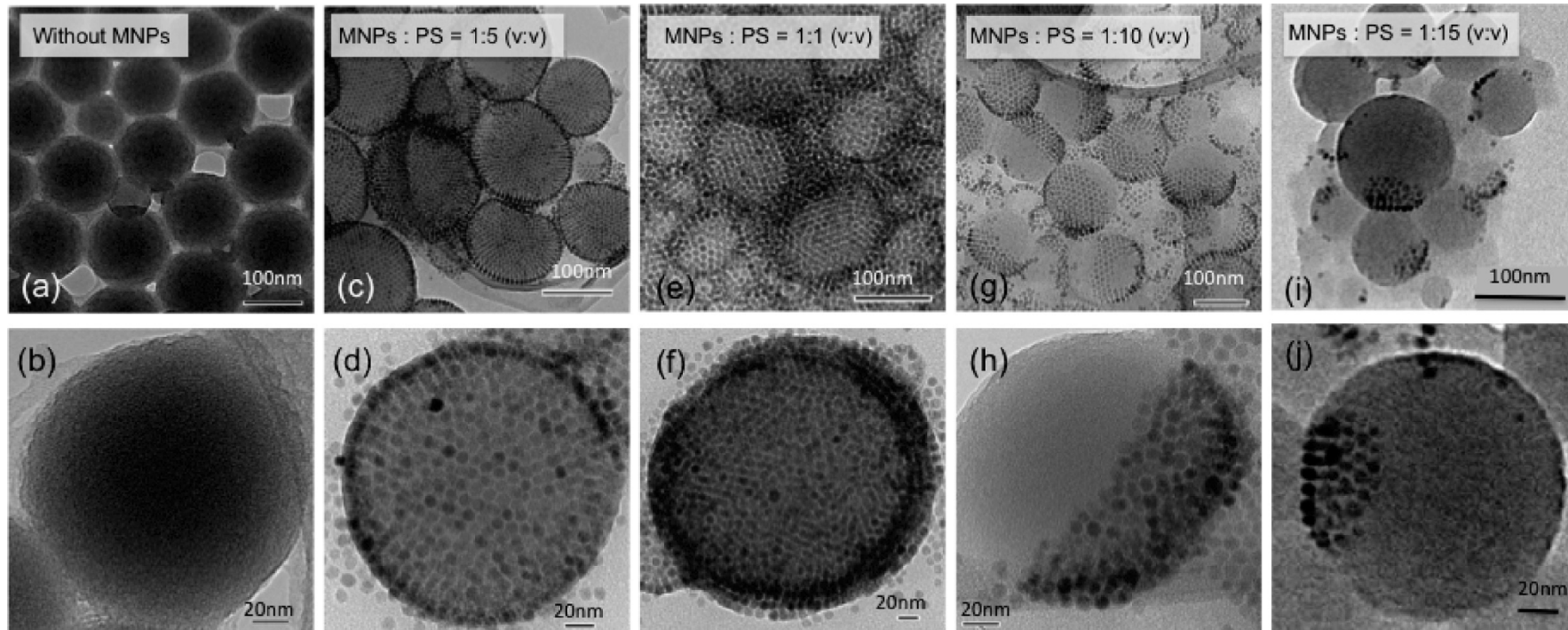
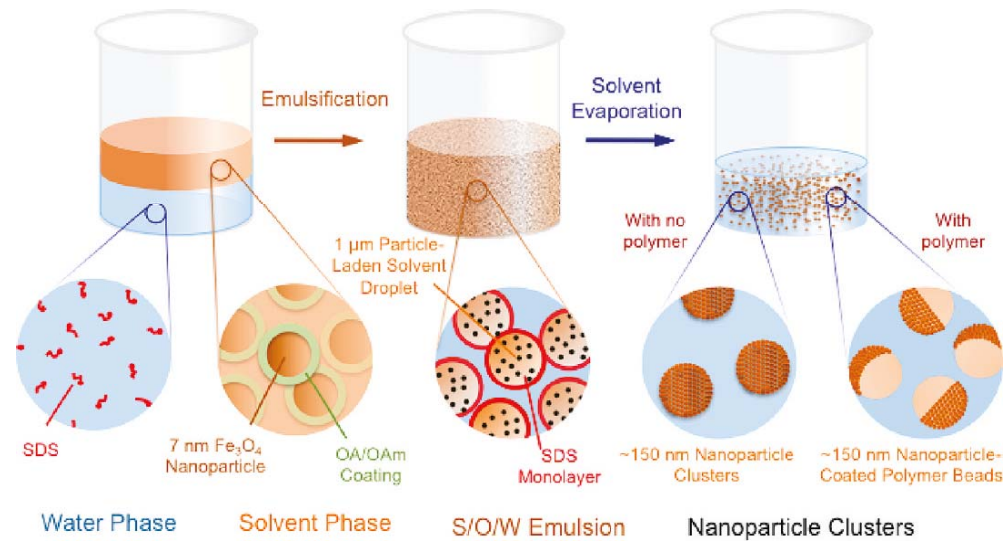




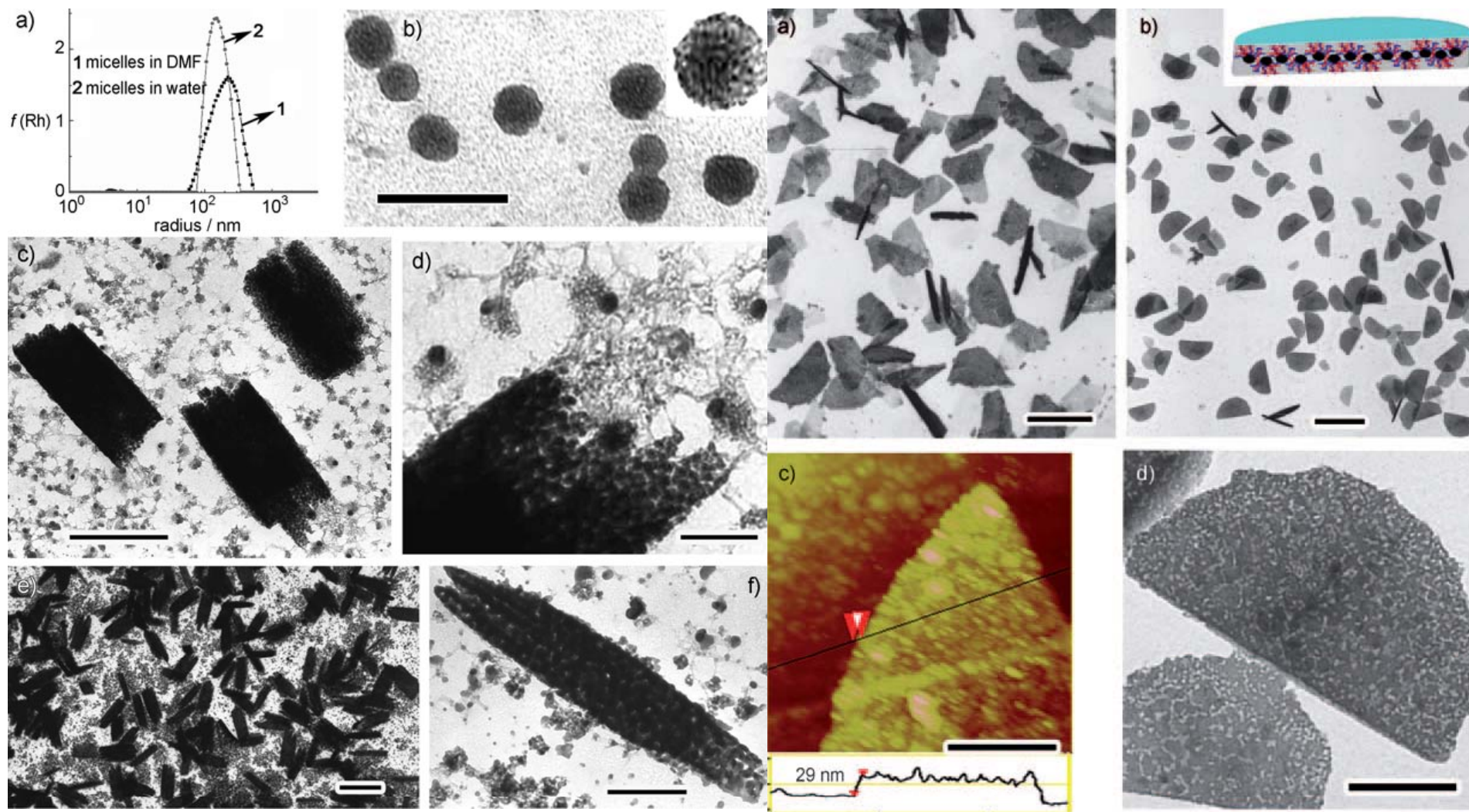
# Управление светом ориентацией



# Магнитные сверхкластеры

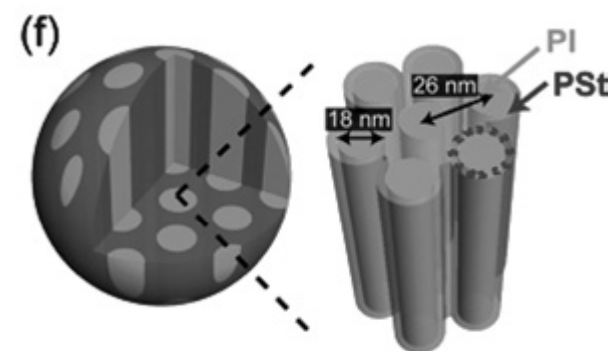
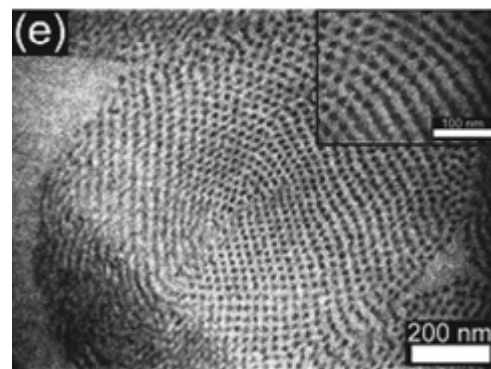
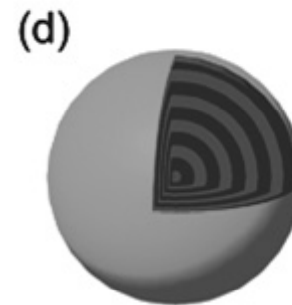
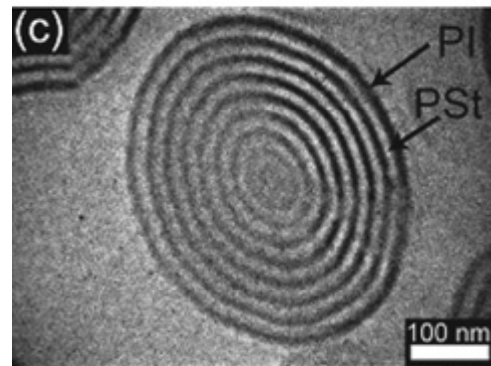
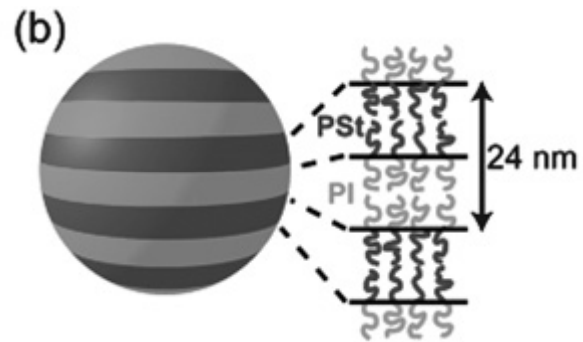
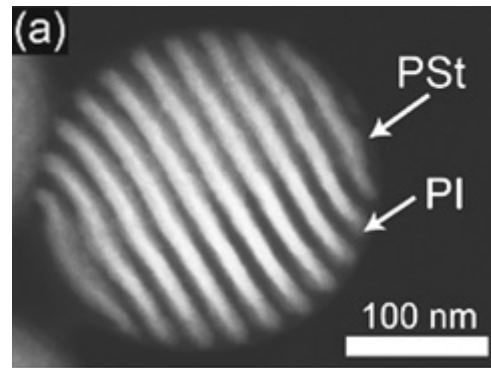


# Самосборка частиц - янусов

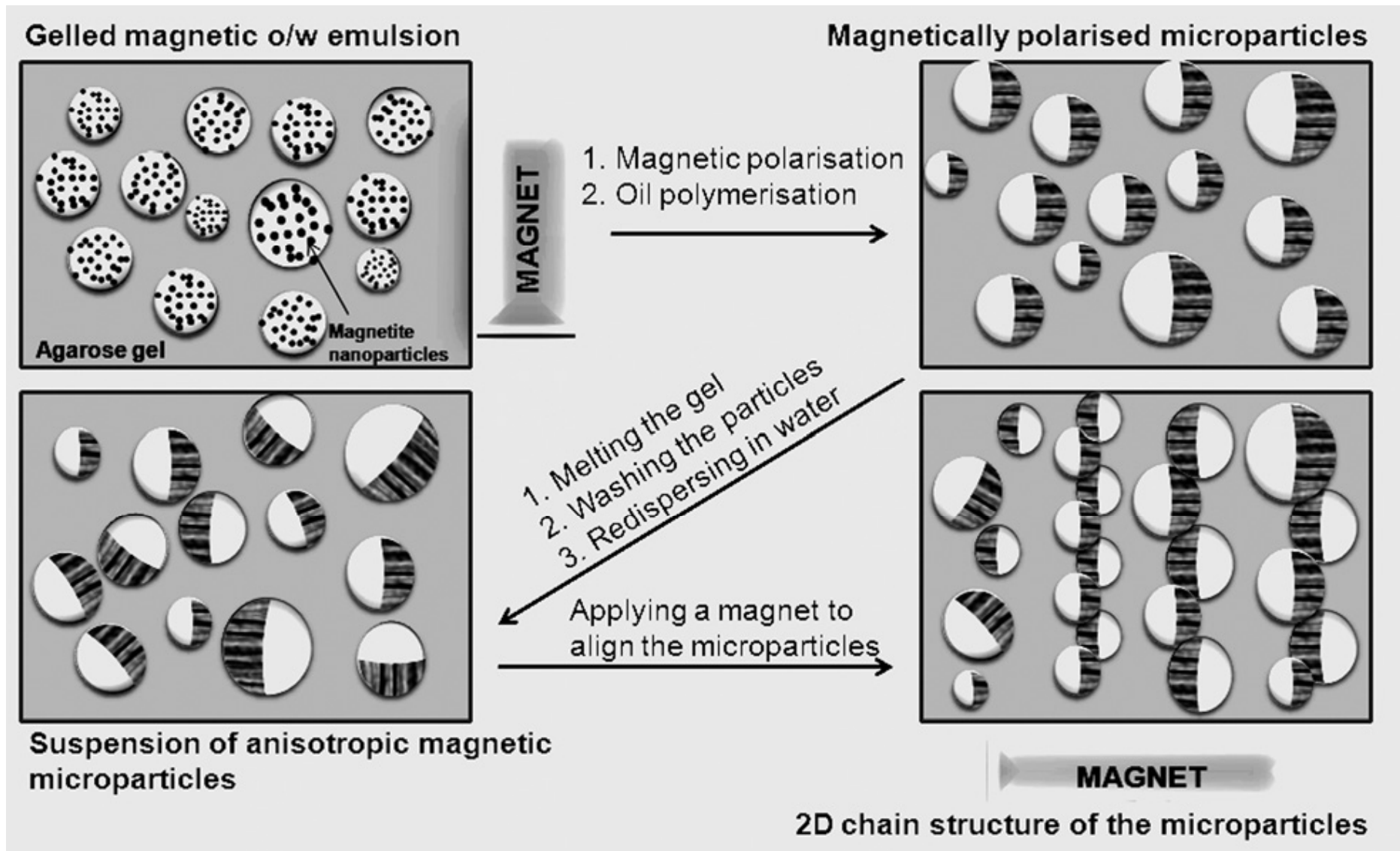




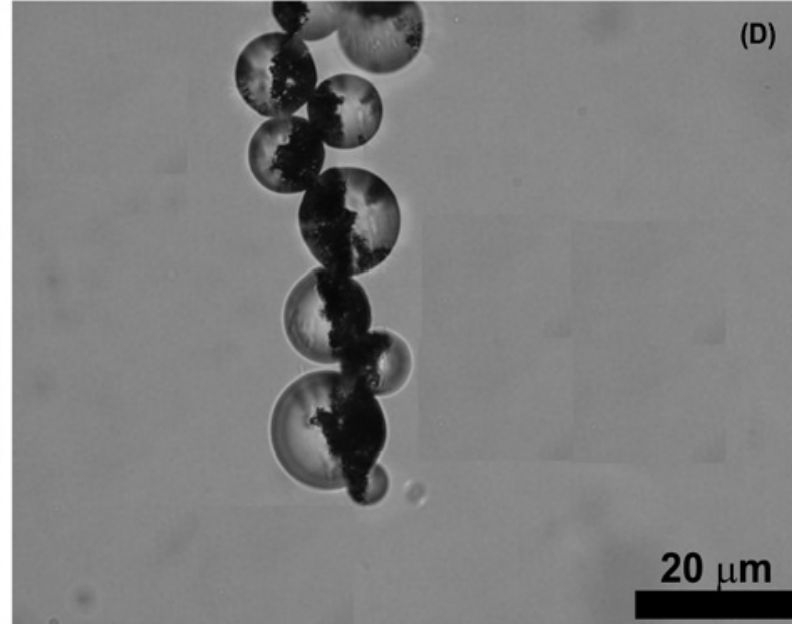
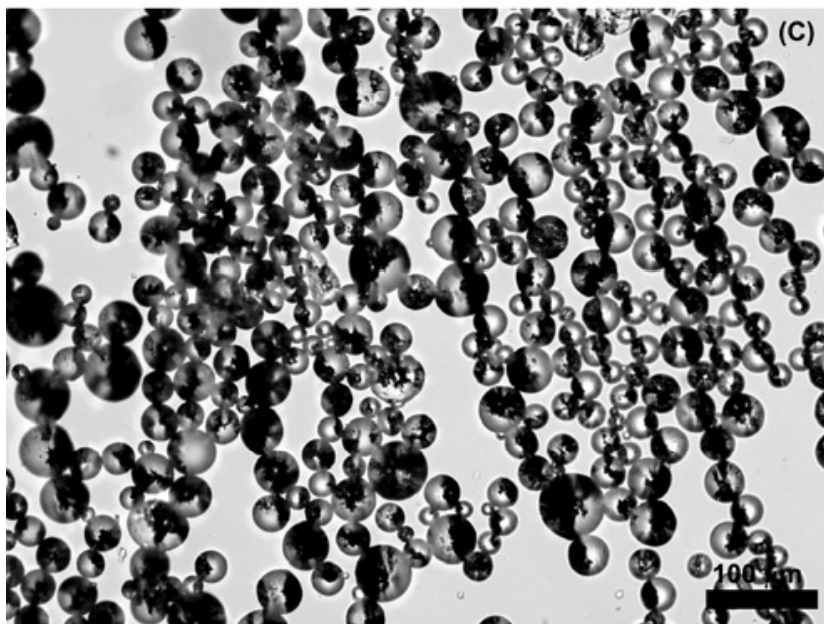
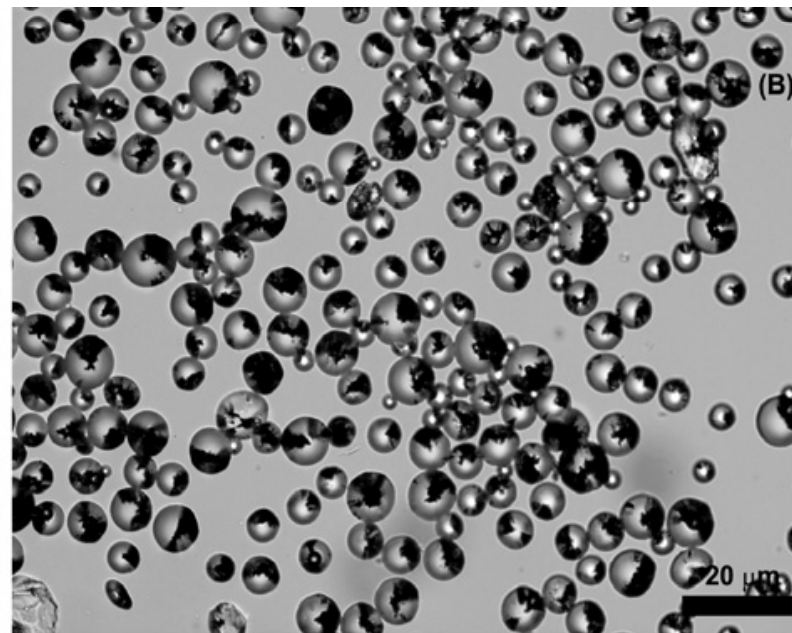
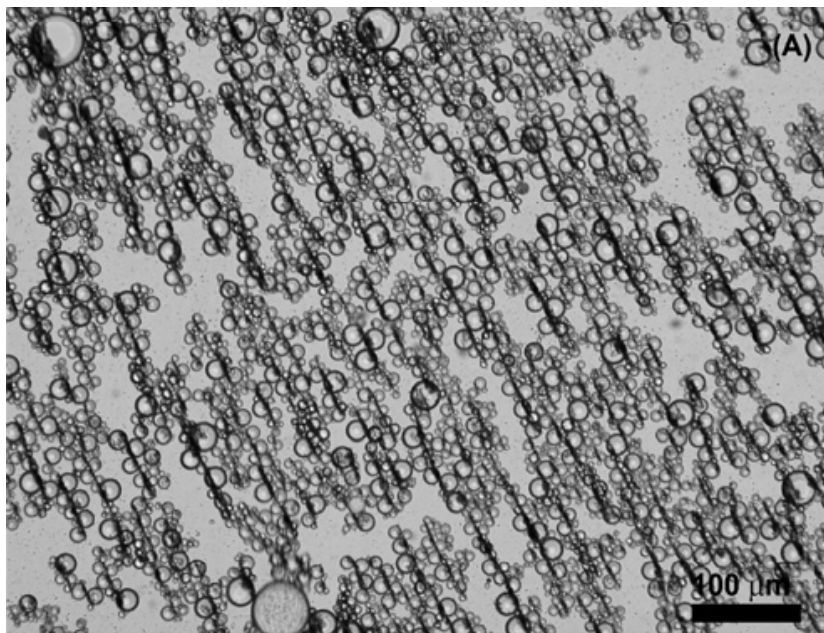
# Расслоение полимерных частиц



# Ориентация в магнитном поле



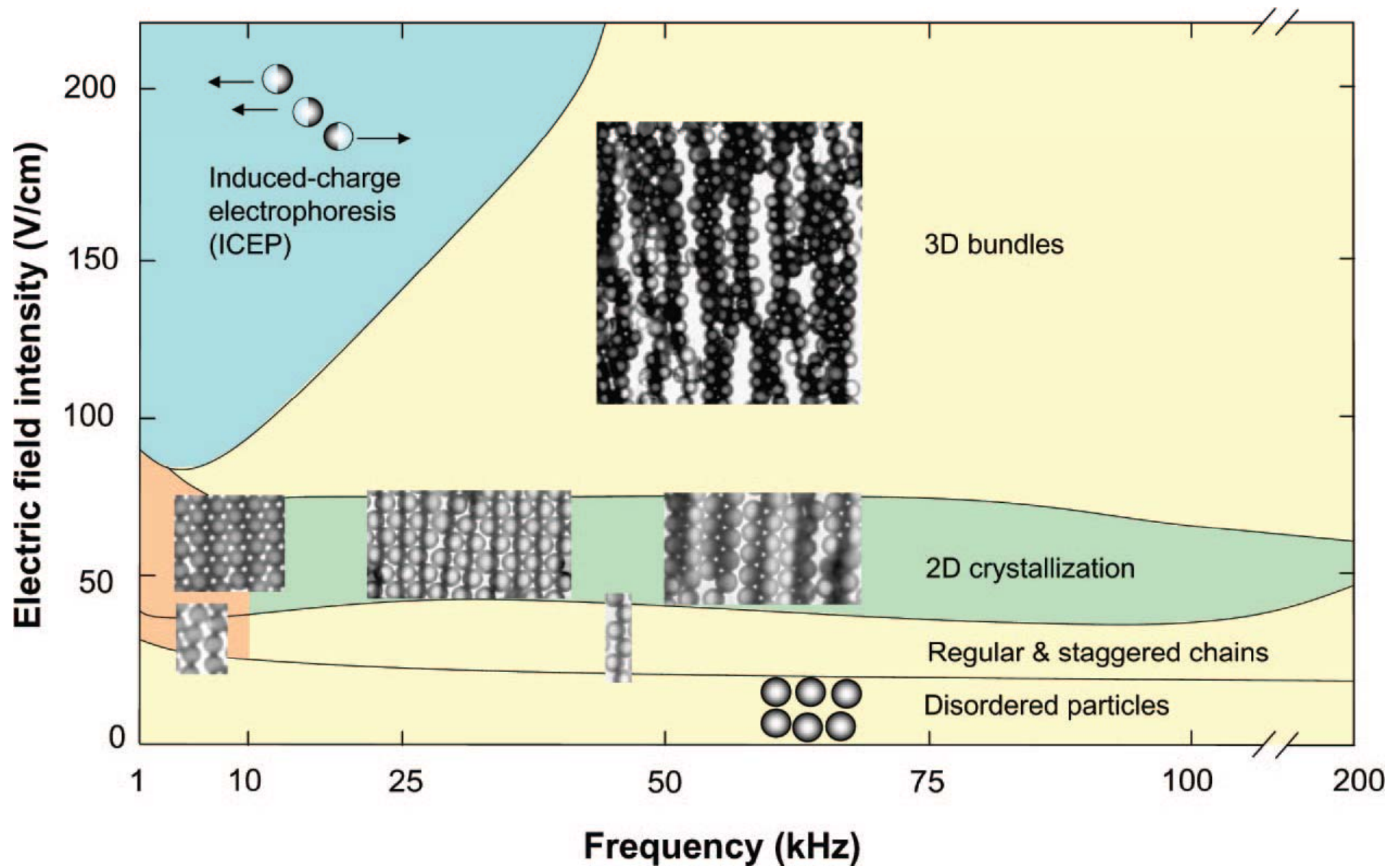
# Микроструктуры





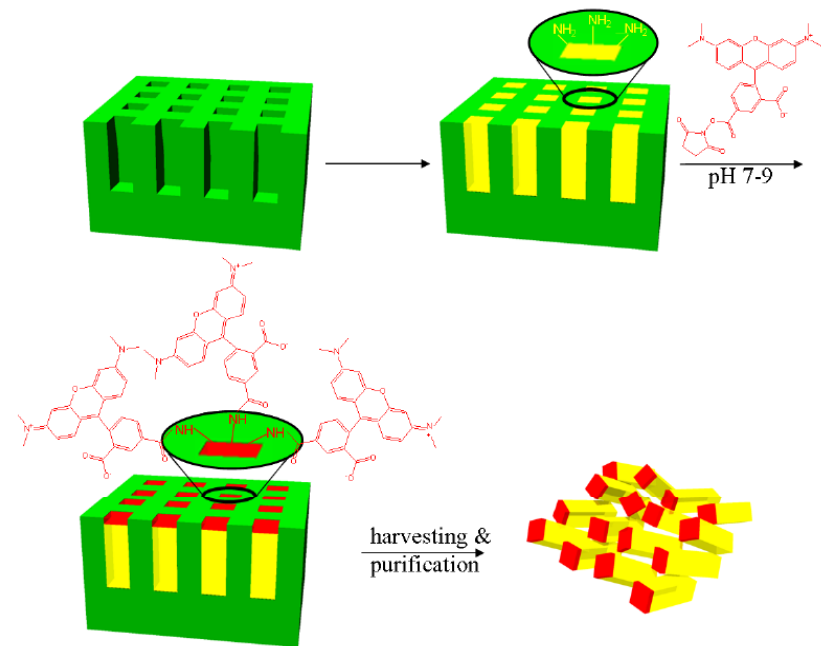
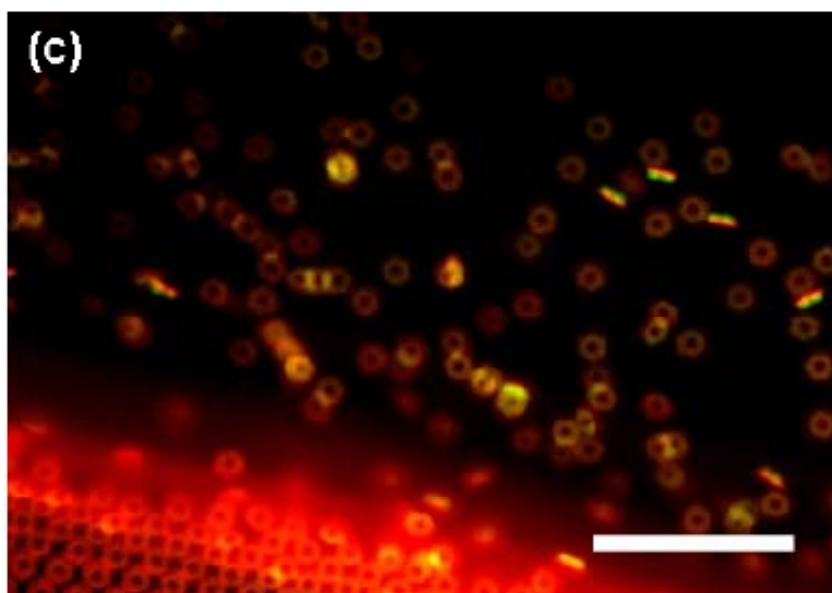
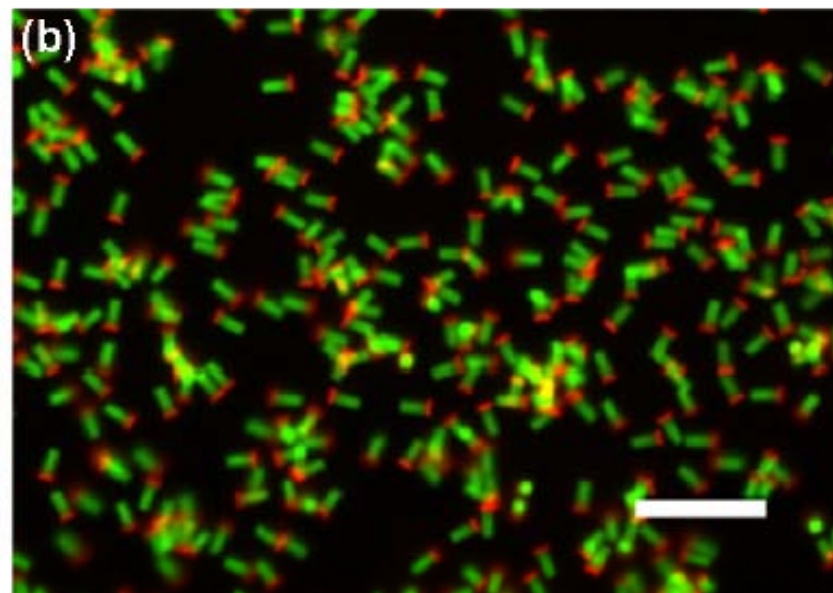
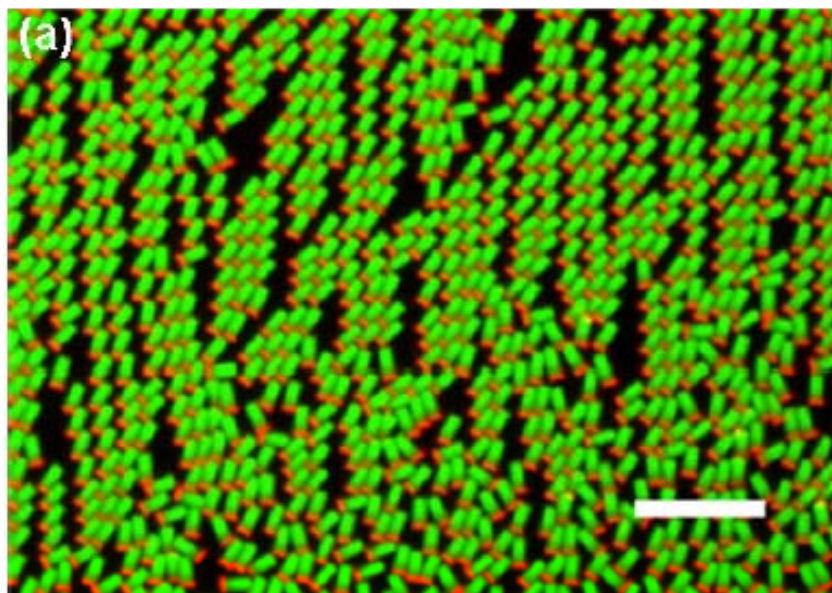


# «Фазовая» диаграмма





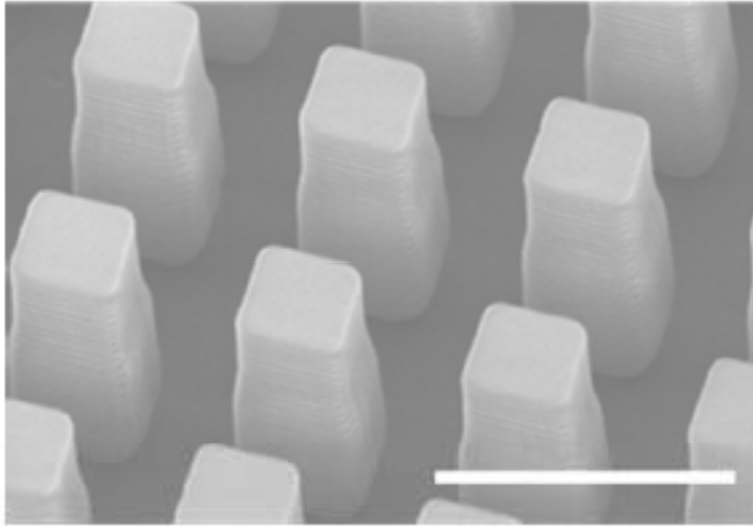
# Литография и модифицирование



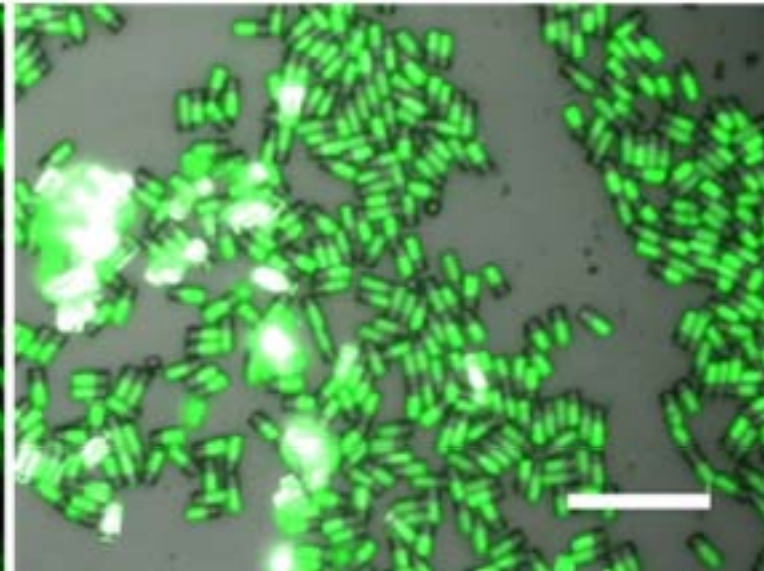
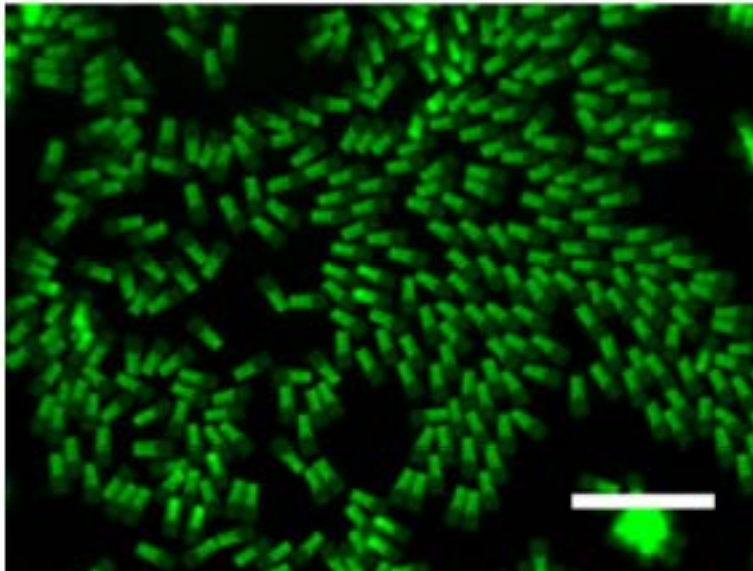
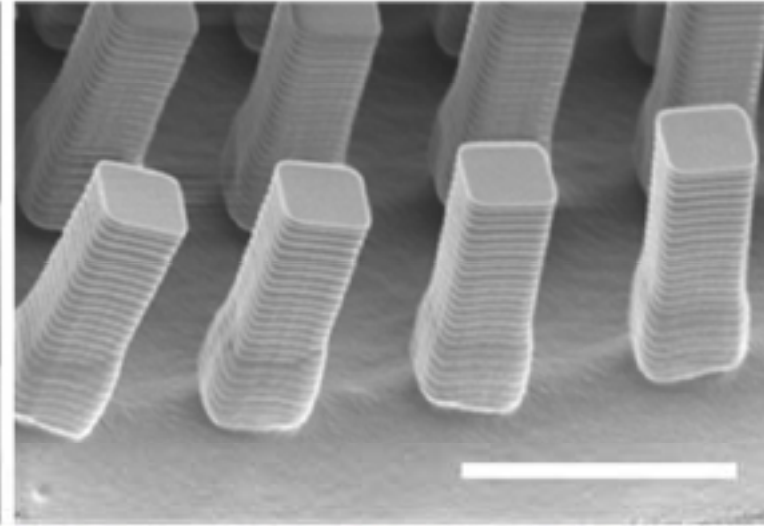


# Бифункциональность

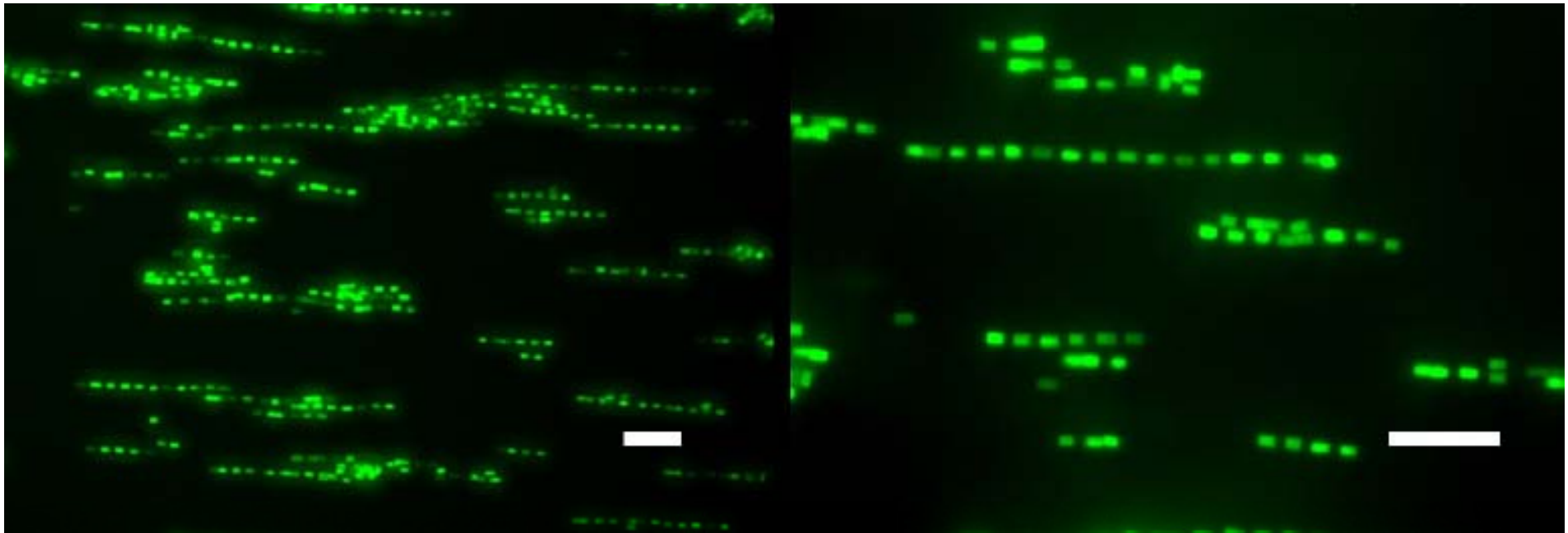
Amphiphilic Janus particles



Polar Janus particles

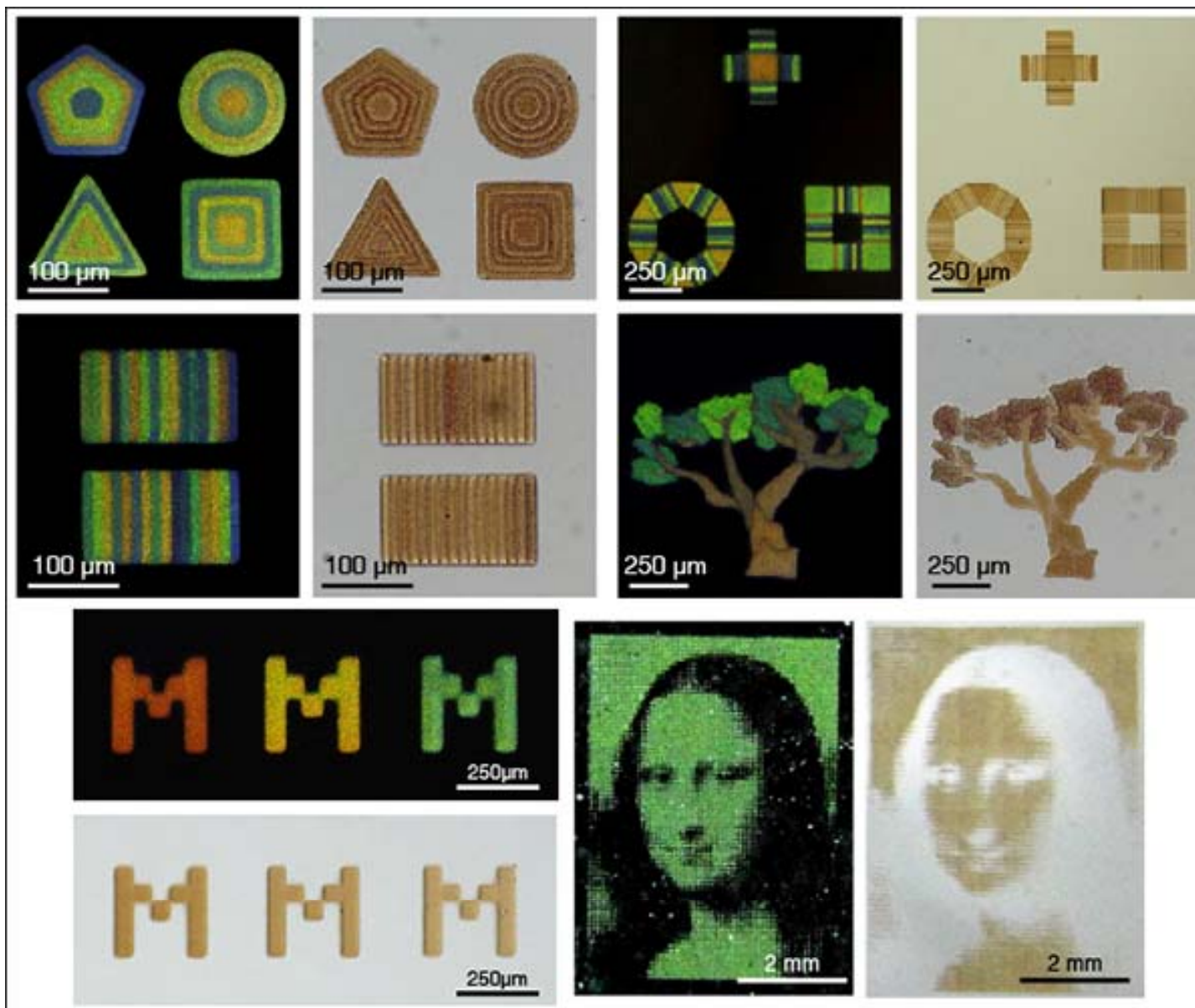


# Упорядоченные цепочки



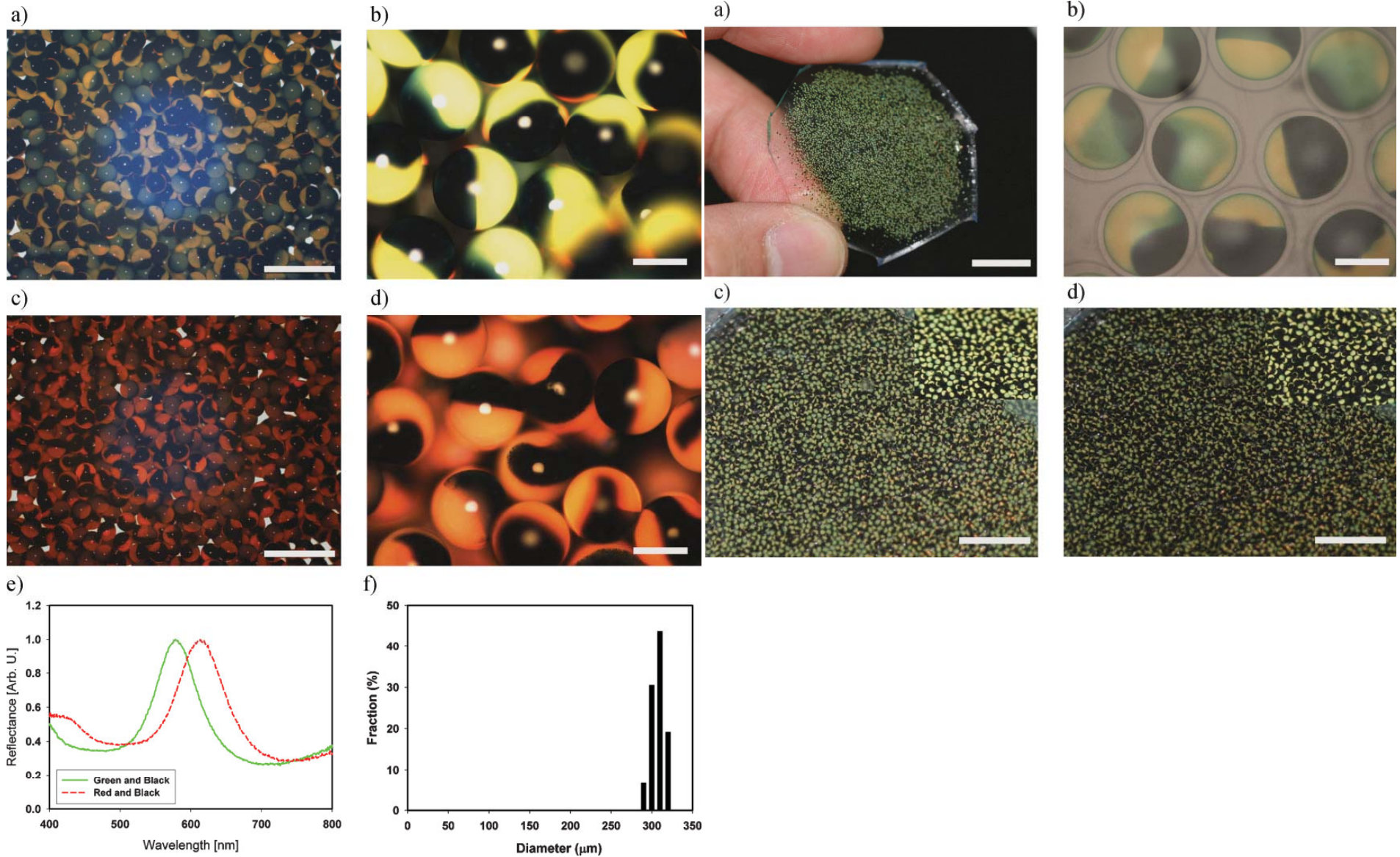
**Figure 5.** Fluorescence microscope images of dipolar Janus particles aligned in a  $250 \text{ V cm}^{-1}$  ac electric field. Note only one half of the particle fluoresces. Particles were dispersed in 1% Pluronic (non-ionic surfactant) aqueous solution. The scale bars represent  $20 \mu\text{m}$ .

# «Умные» чернила (магнитные)

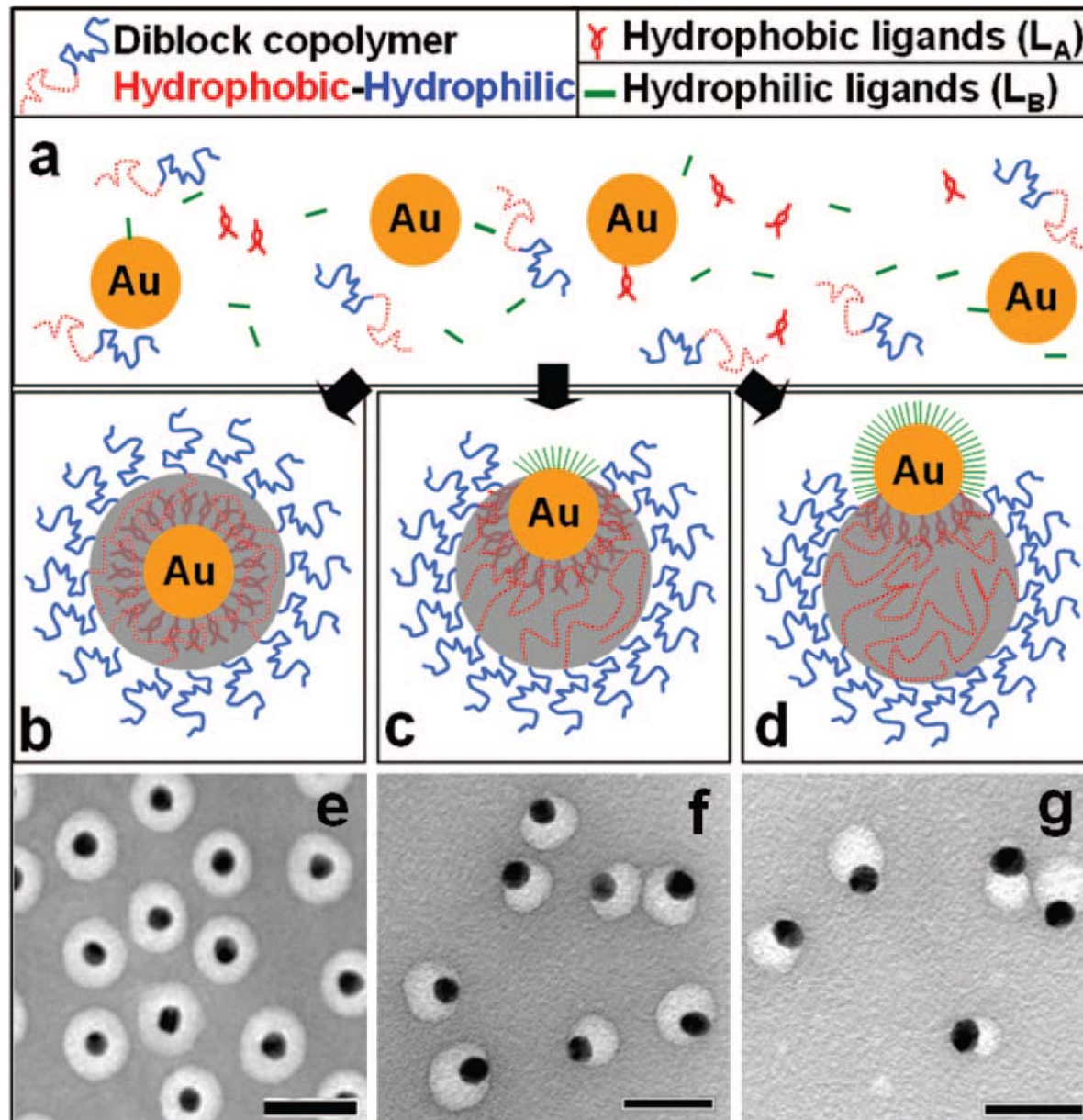




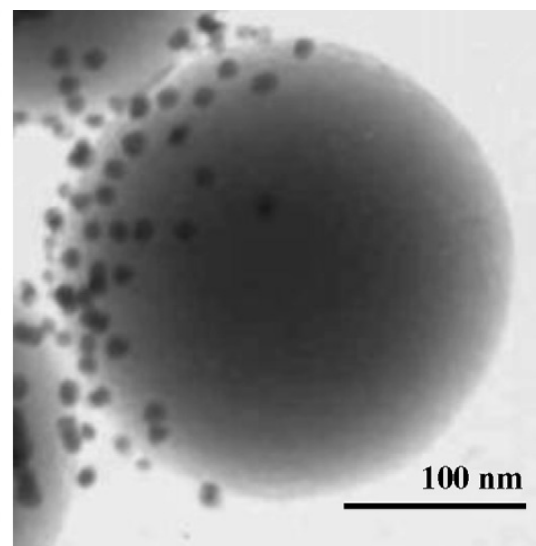
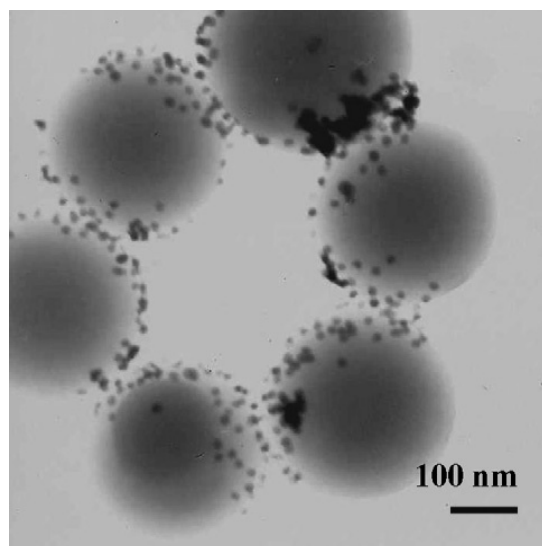
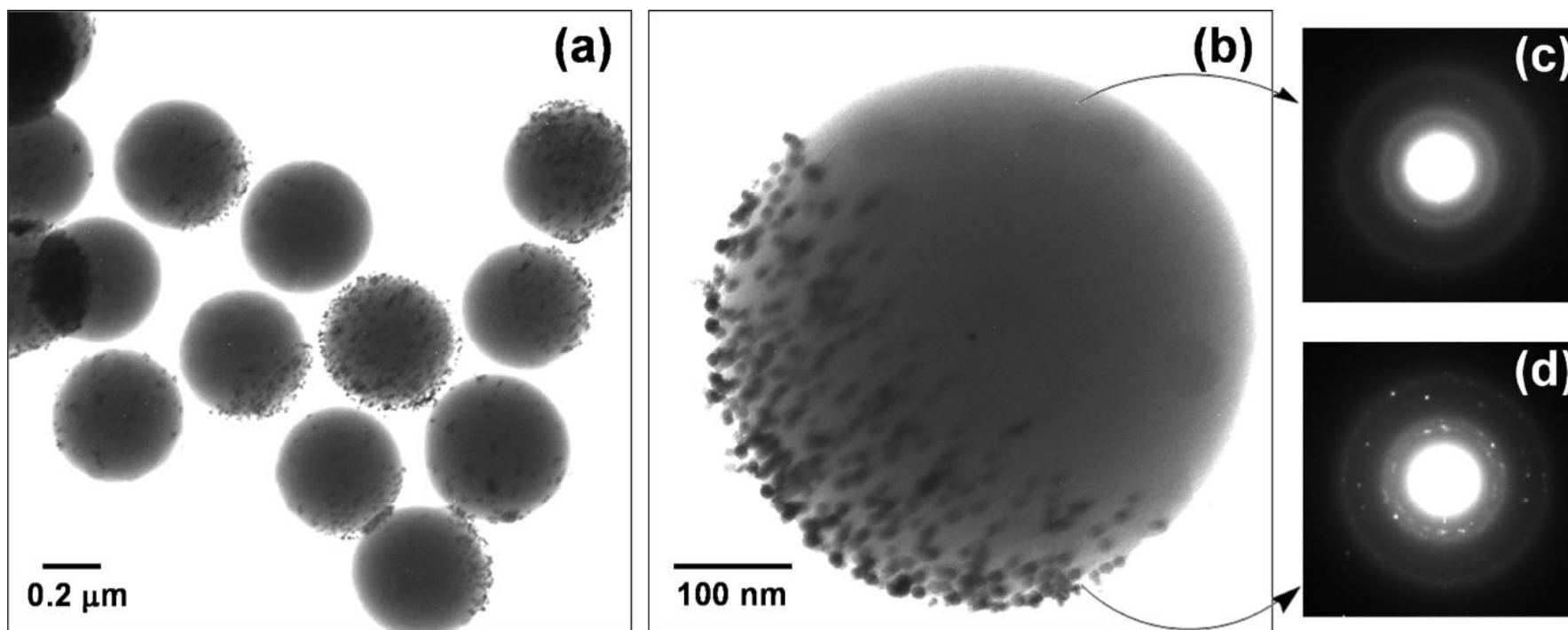
# «Умные» чернила (амфифильные)



# Золотые янусы

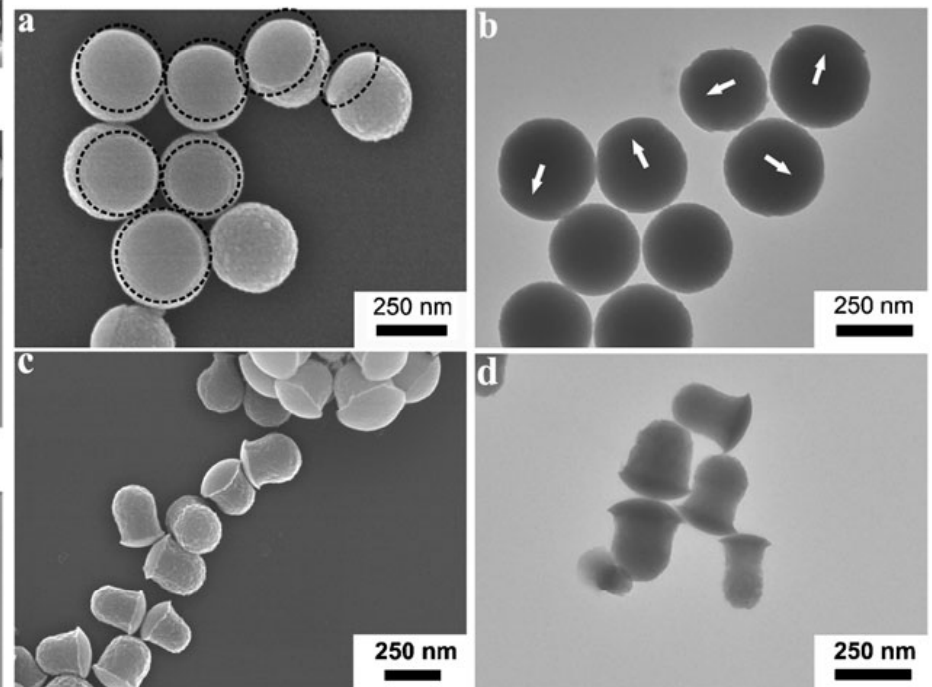
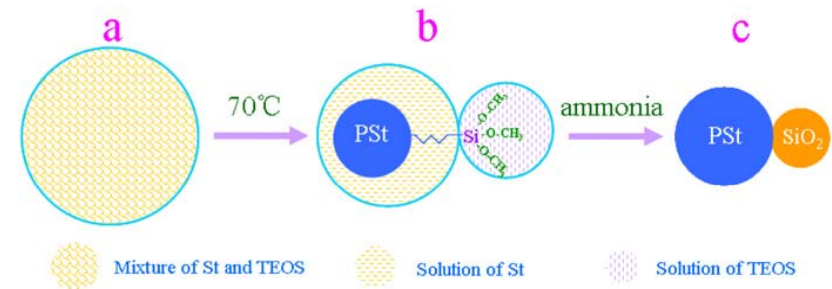
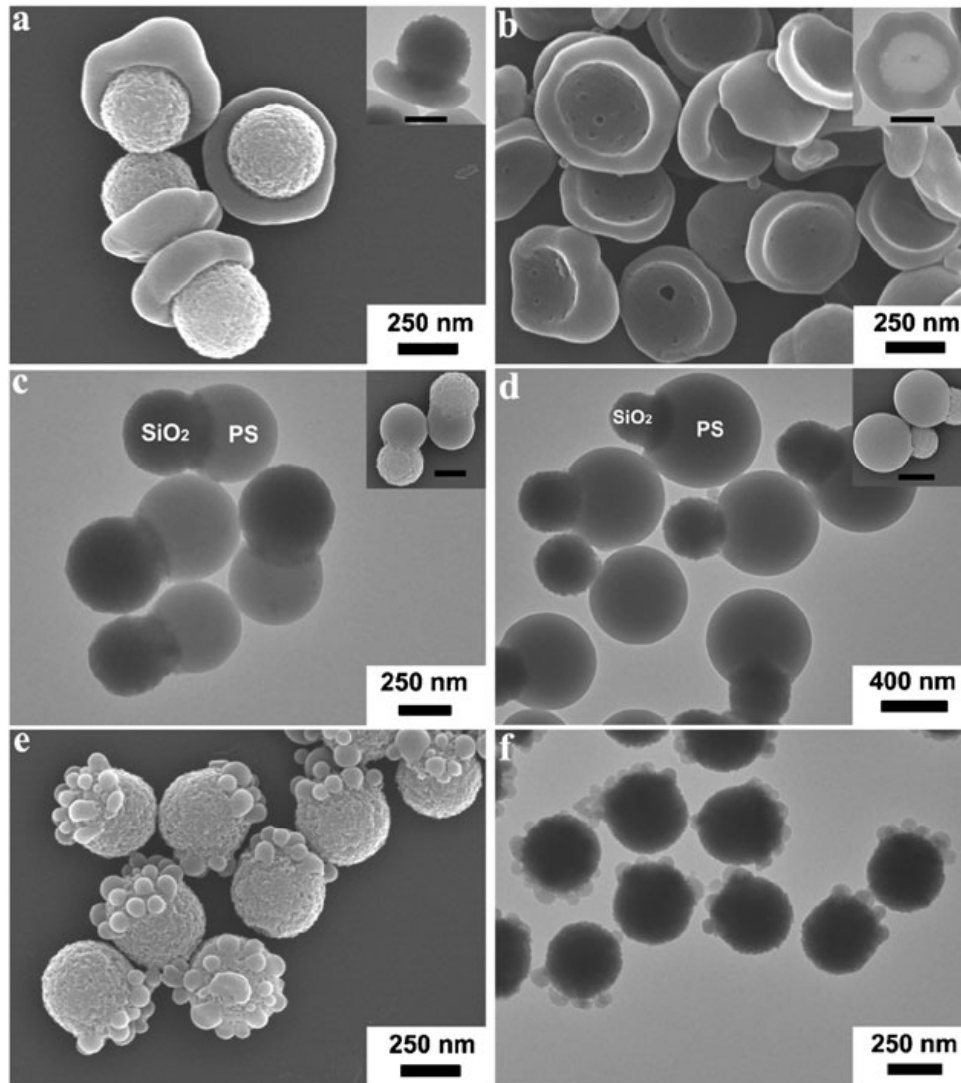


# Золотые наночастицы в полимере

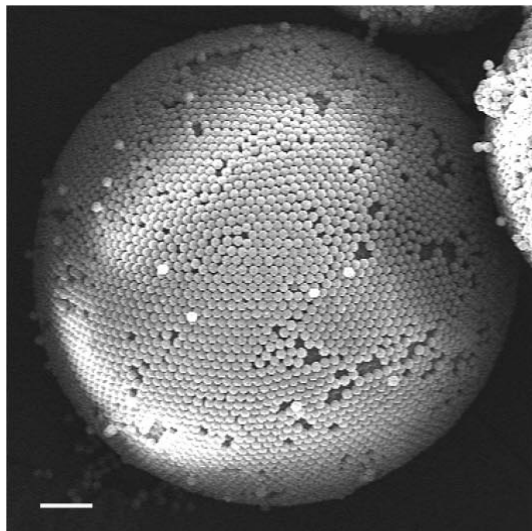
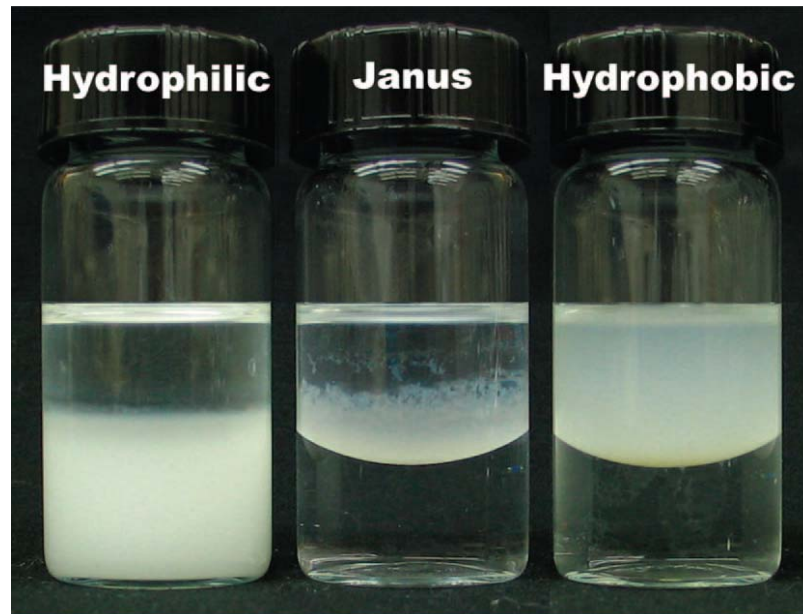
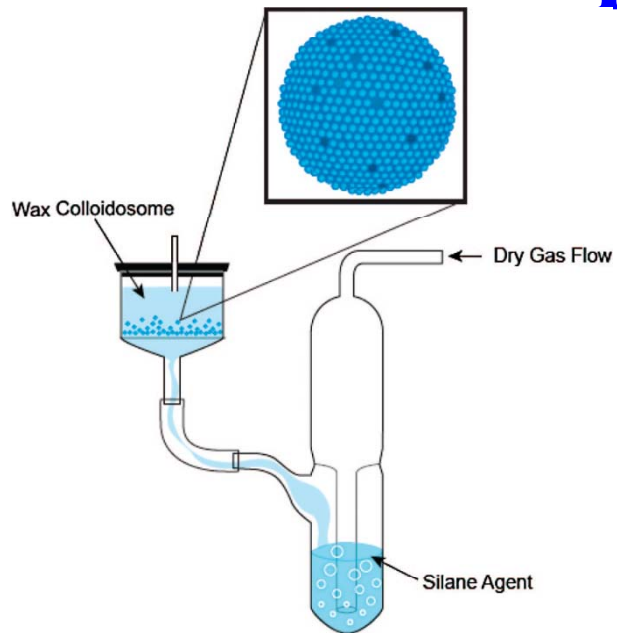




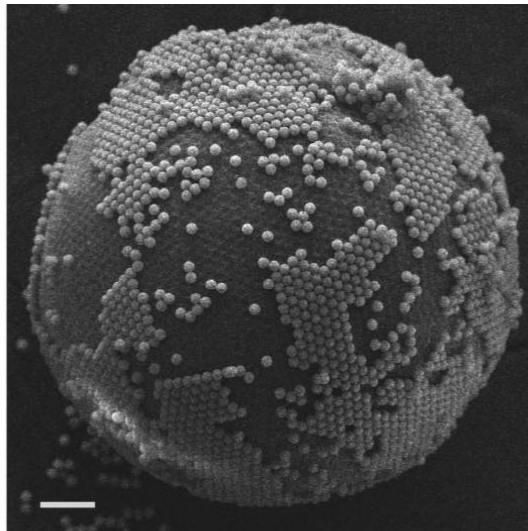
# SiO<sub>2</sub>-полистирол



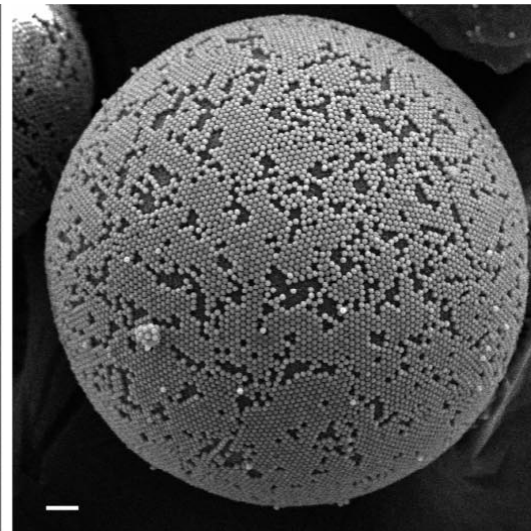
# Границы раздела



(a)



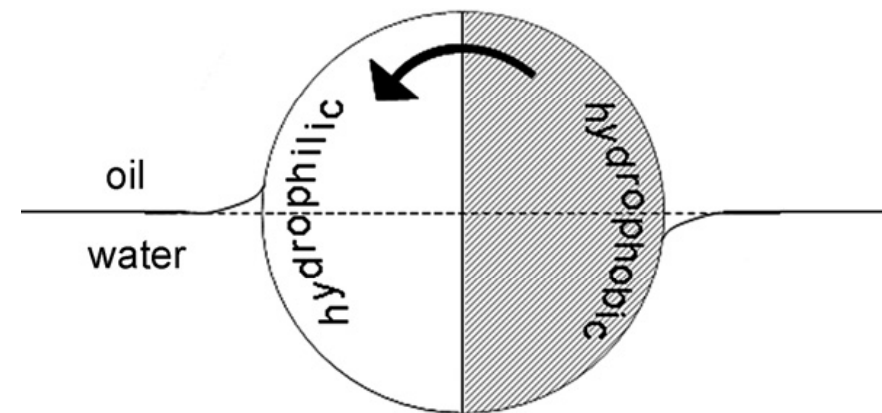
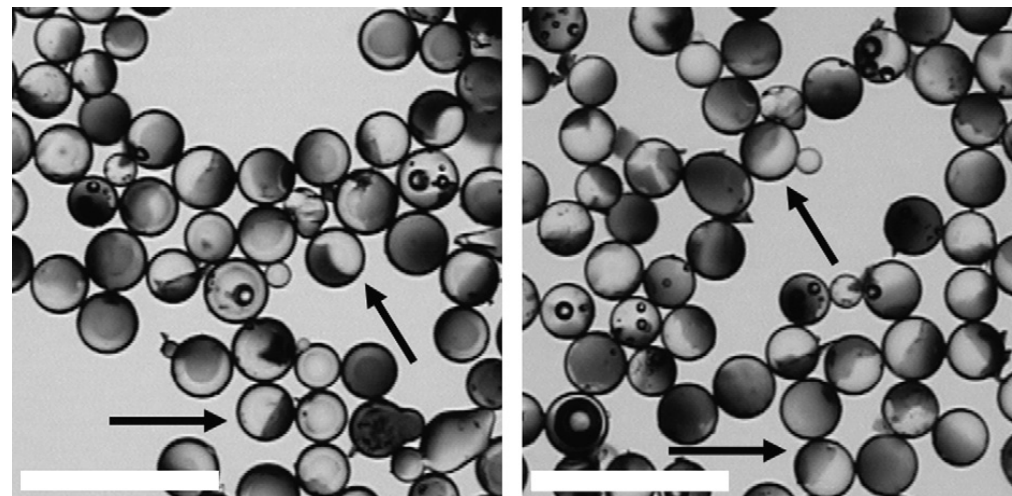
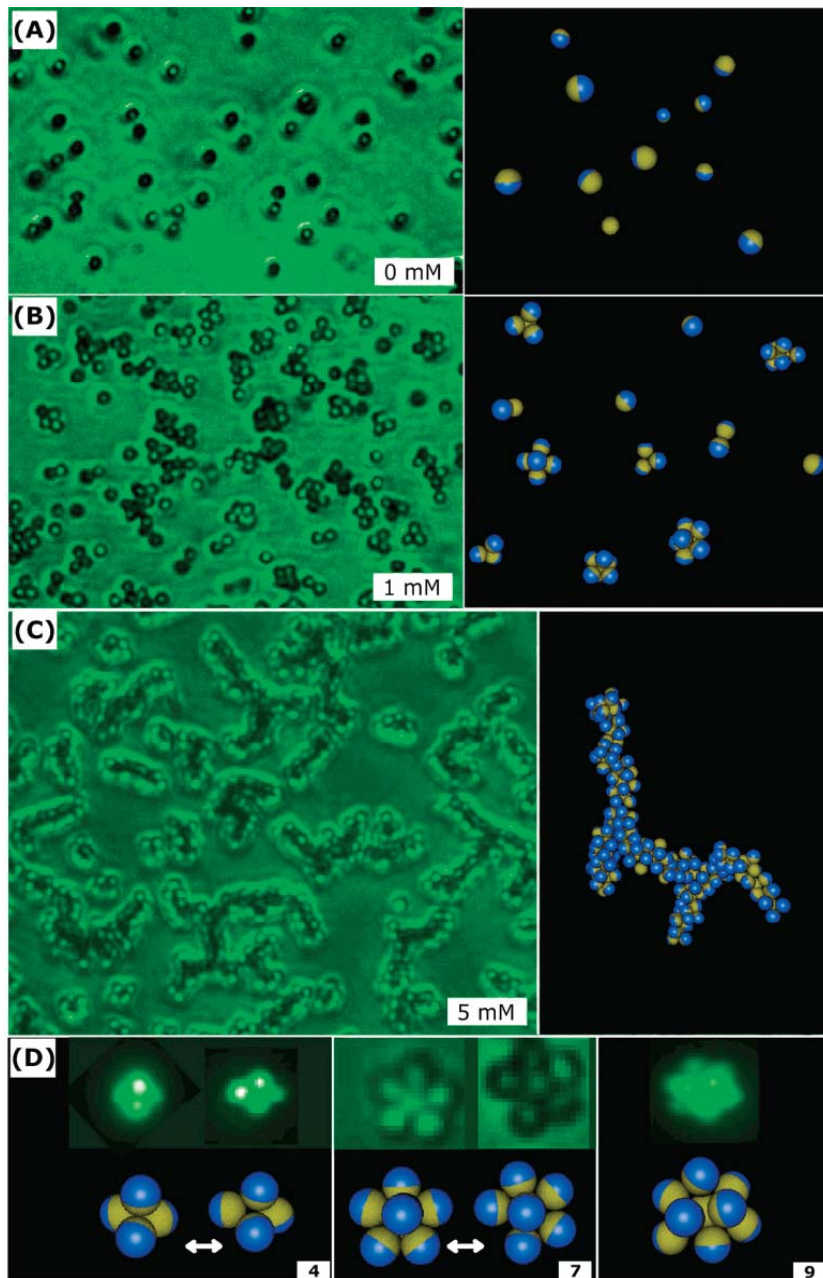
(b)



(c)

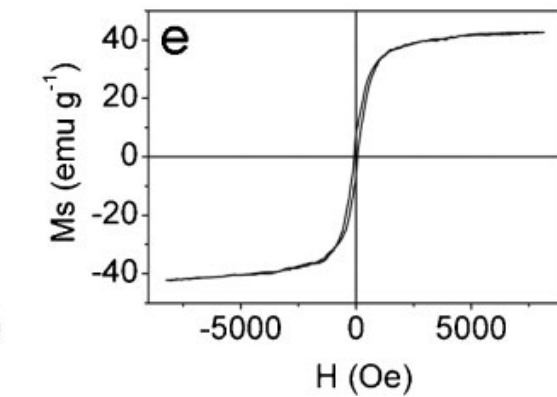
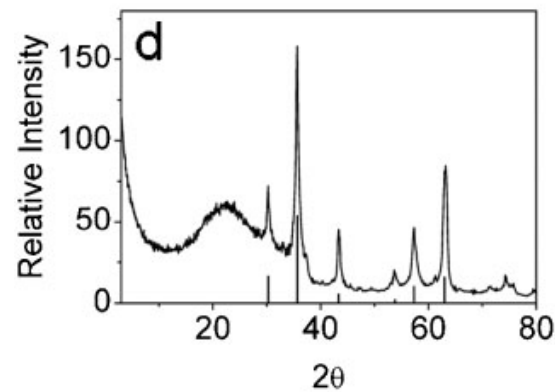
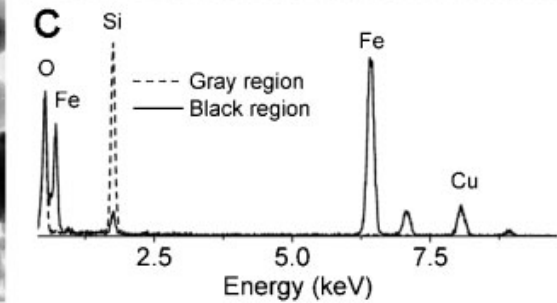
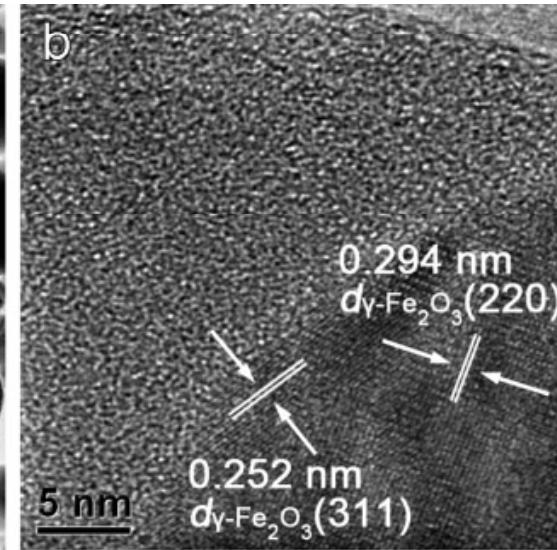
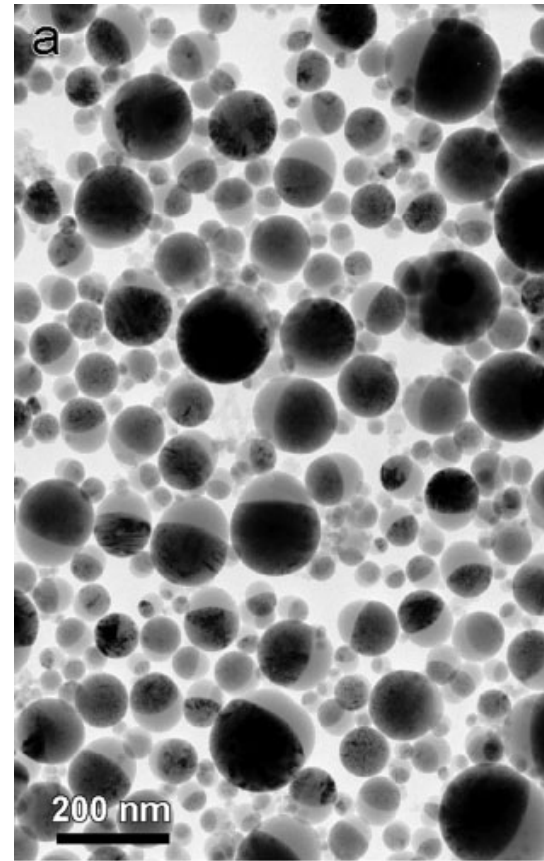
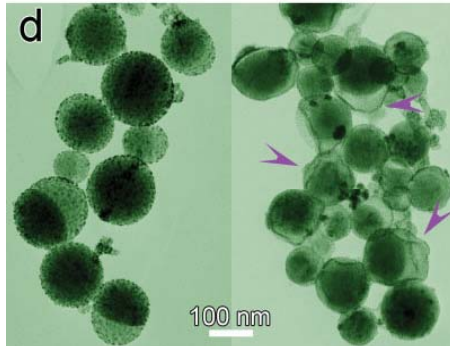
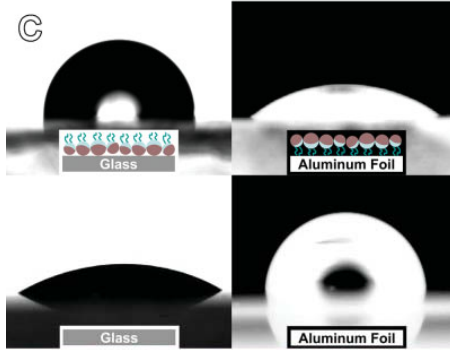
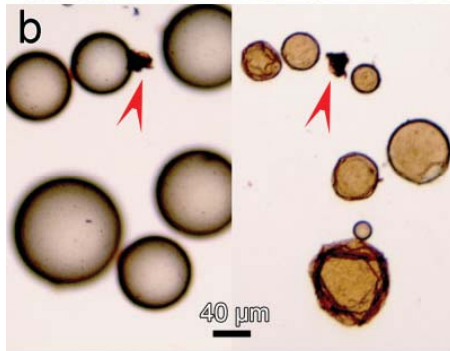
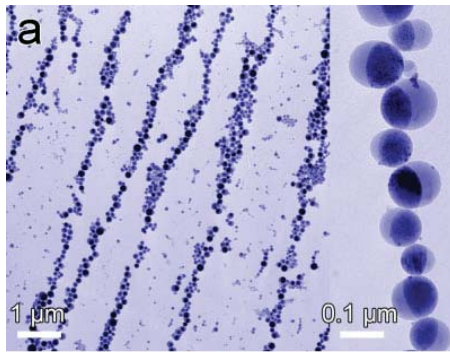


# Кластеры амфифильных частиц

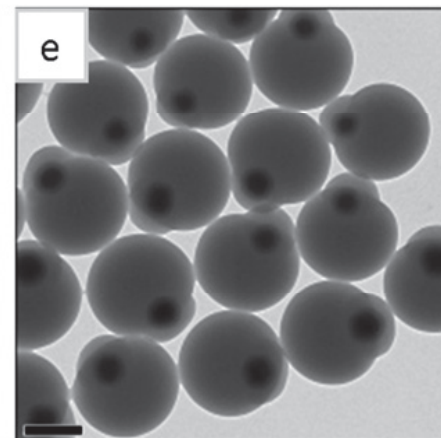
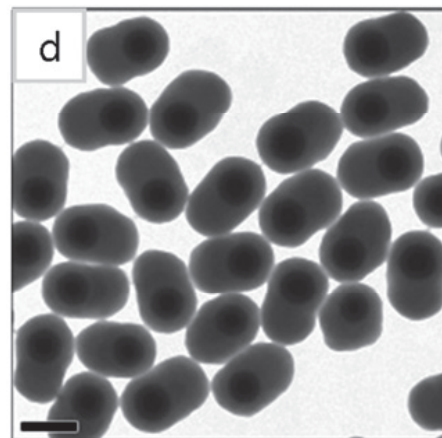
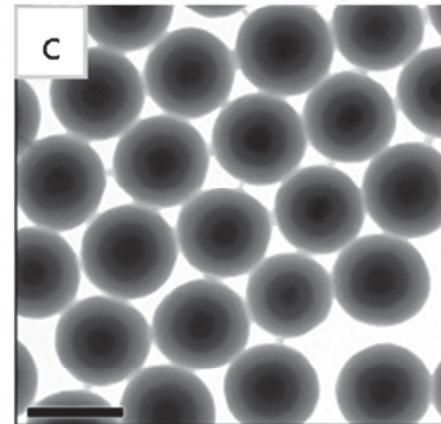
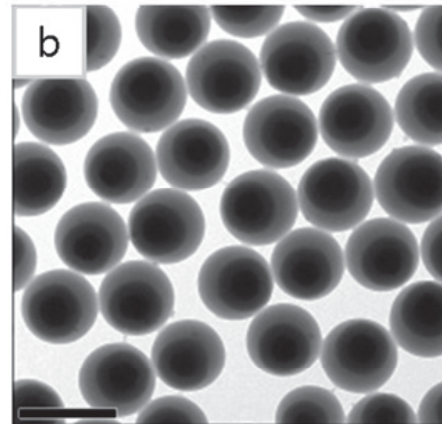
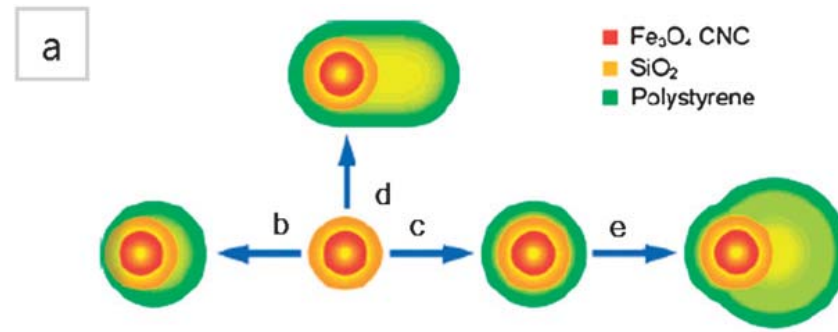




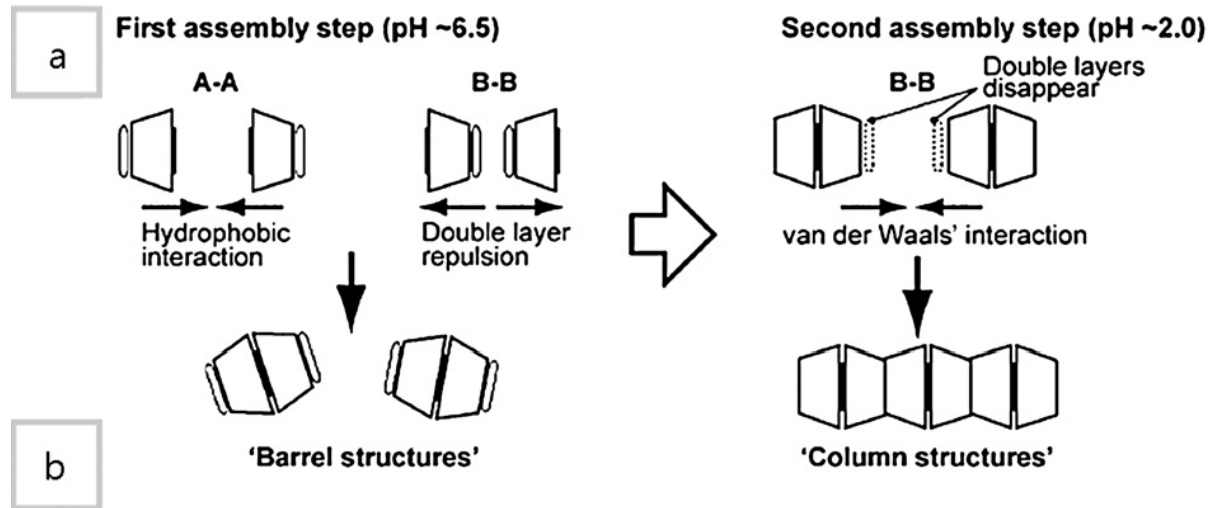
# Умные жидкости



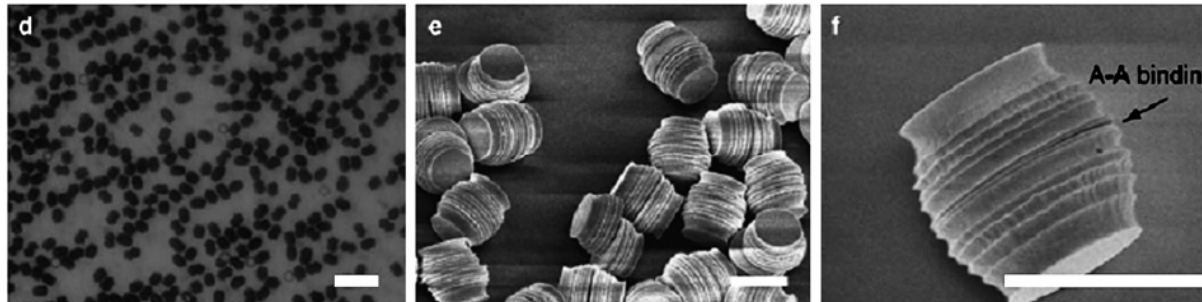
# Многослойные частицы



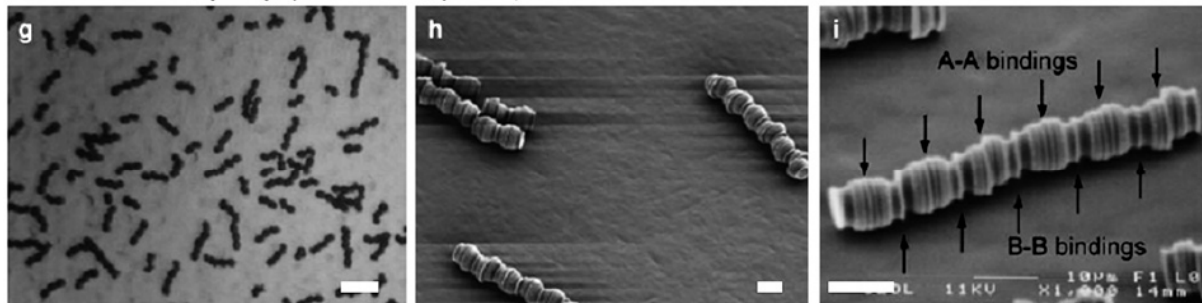
# Нестандартные формы



First assembly step (DI water, pH6.5)



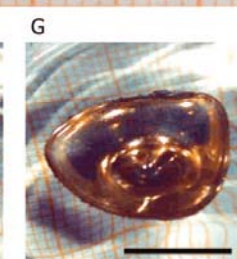
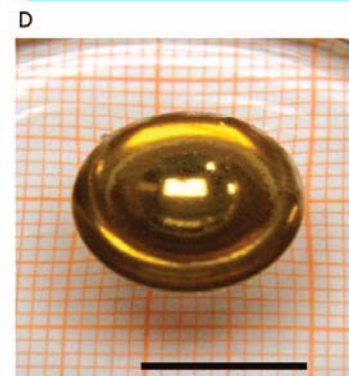
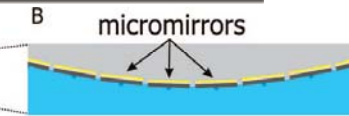
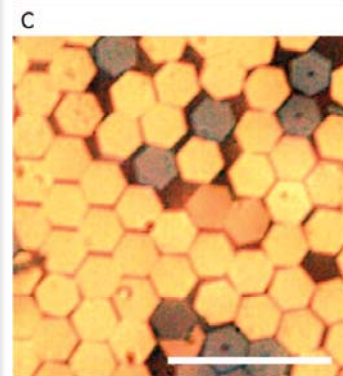
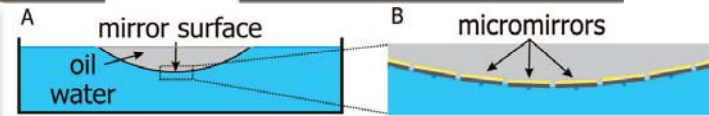
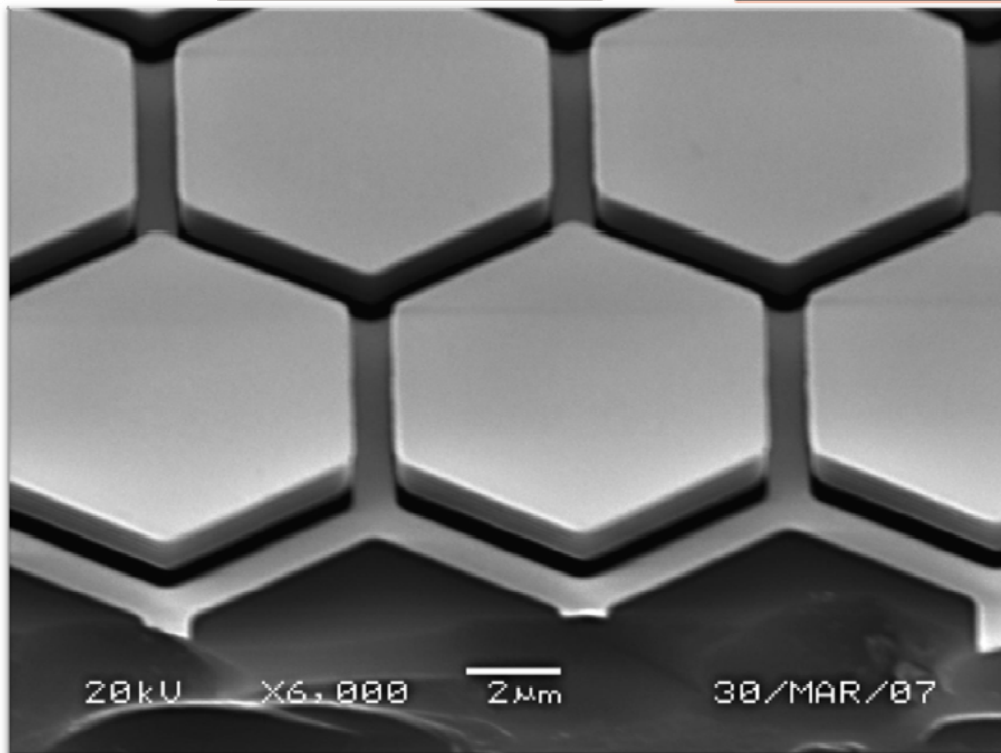
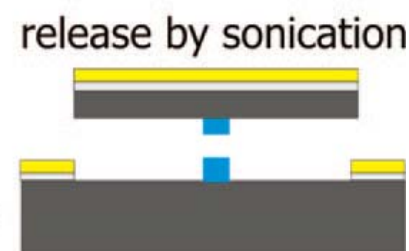
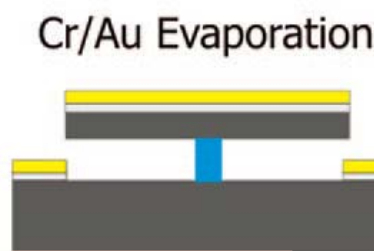
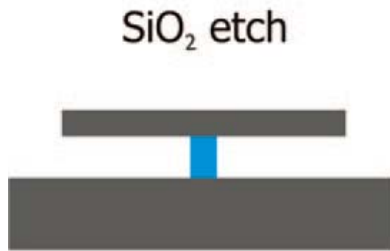
Second assembly step (0.01 M HCl, pH2.0)



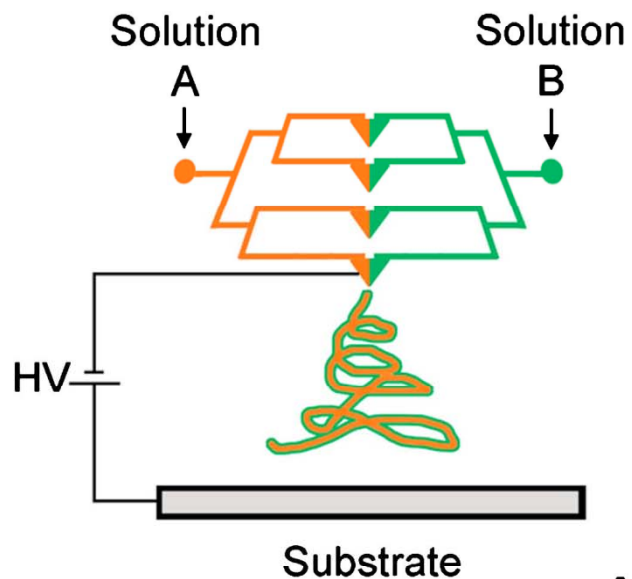


# Кривое зеркало из микрозеркал

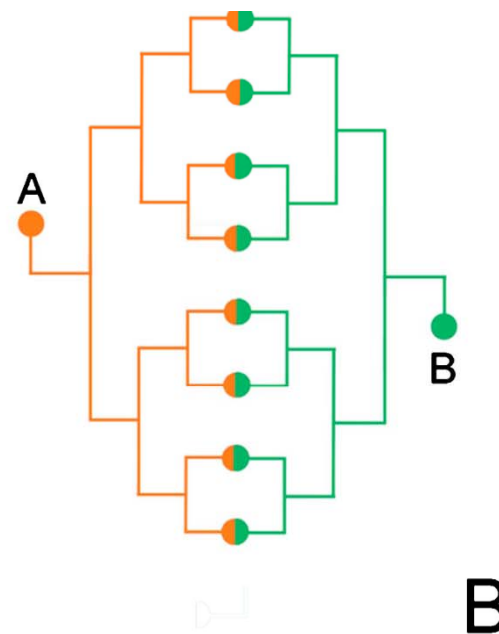
- resist
- SiO<sub>2</sub>
- Si
- Cr
- Au



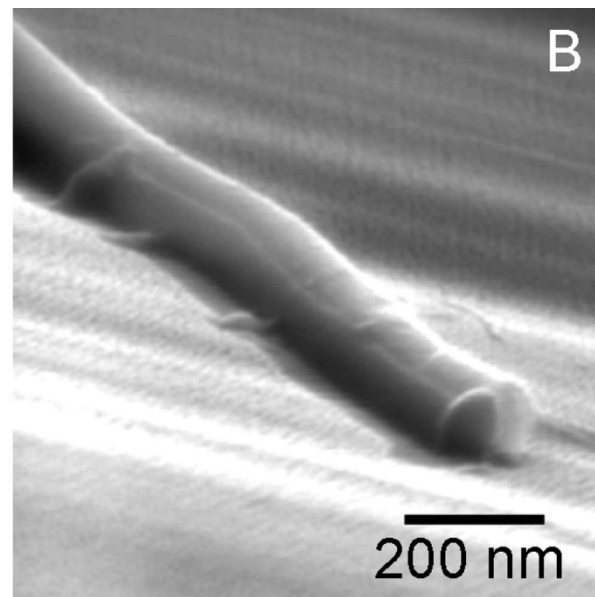
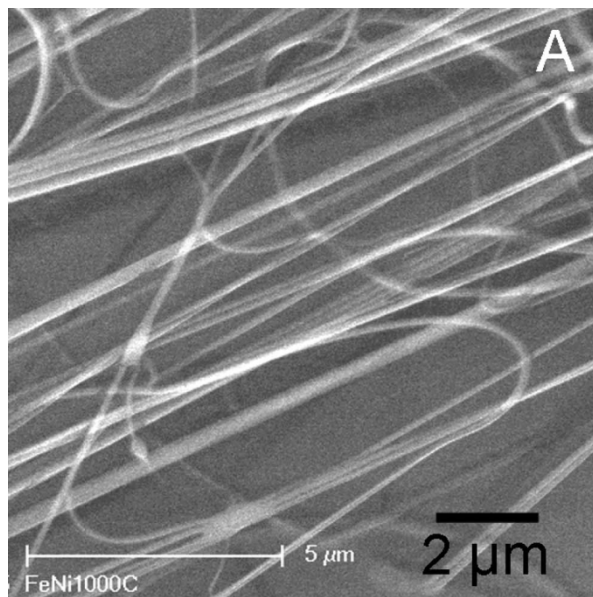
# Нити - янусы



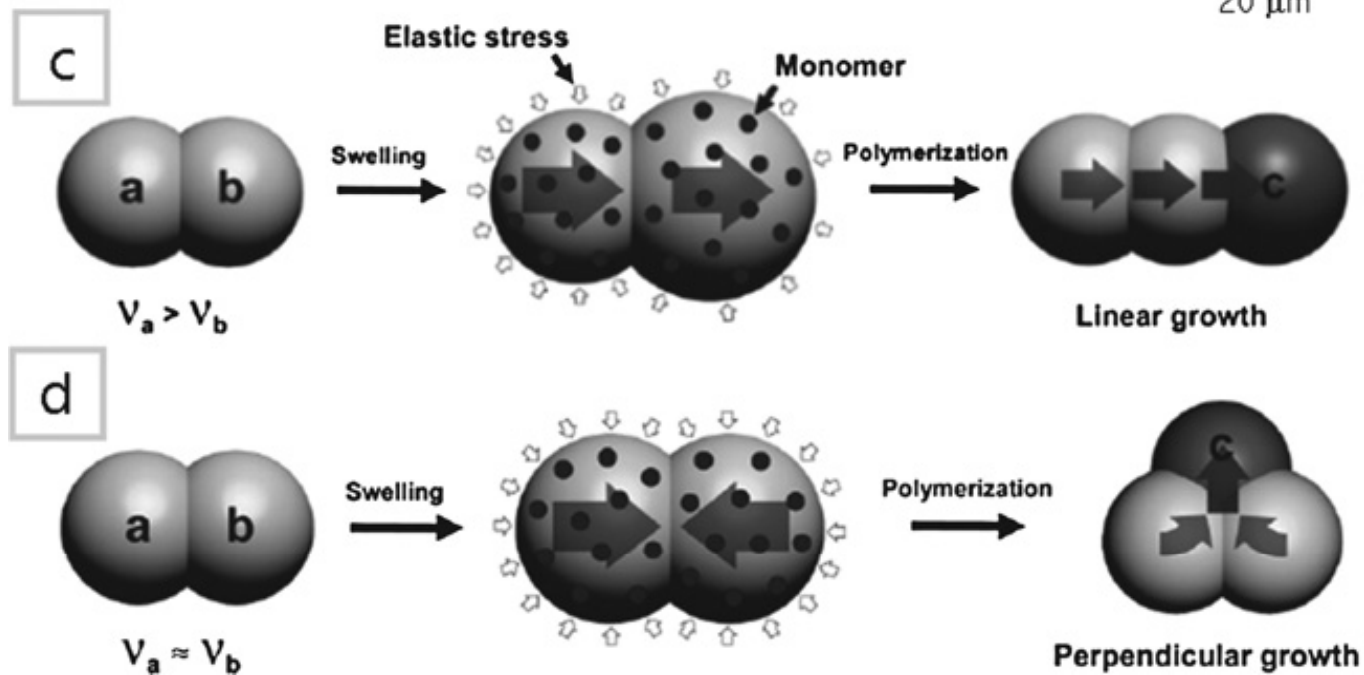
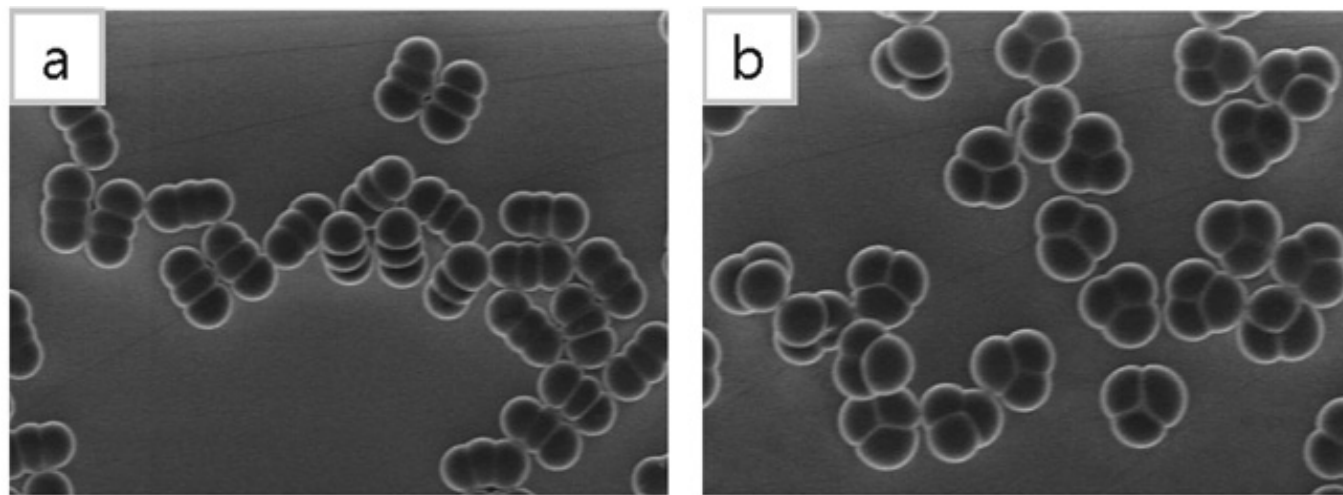
A



B

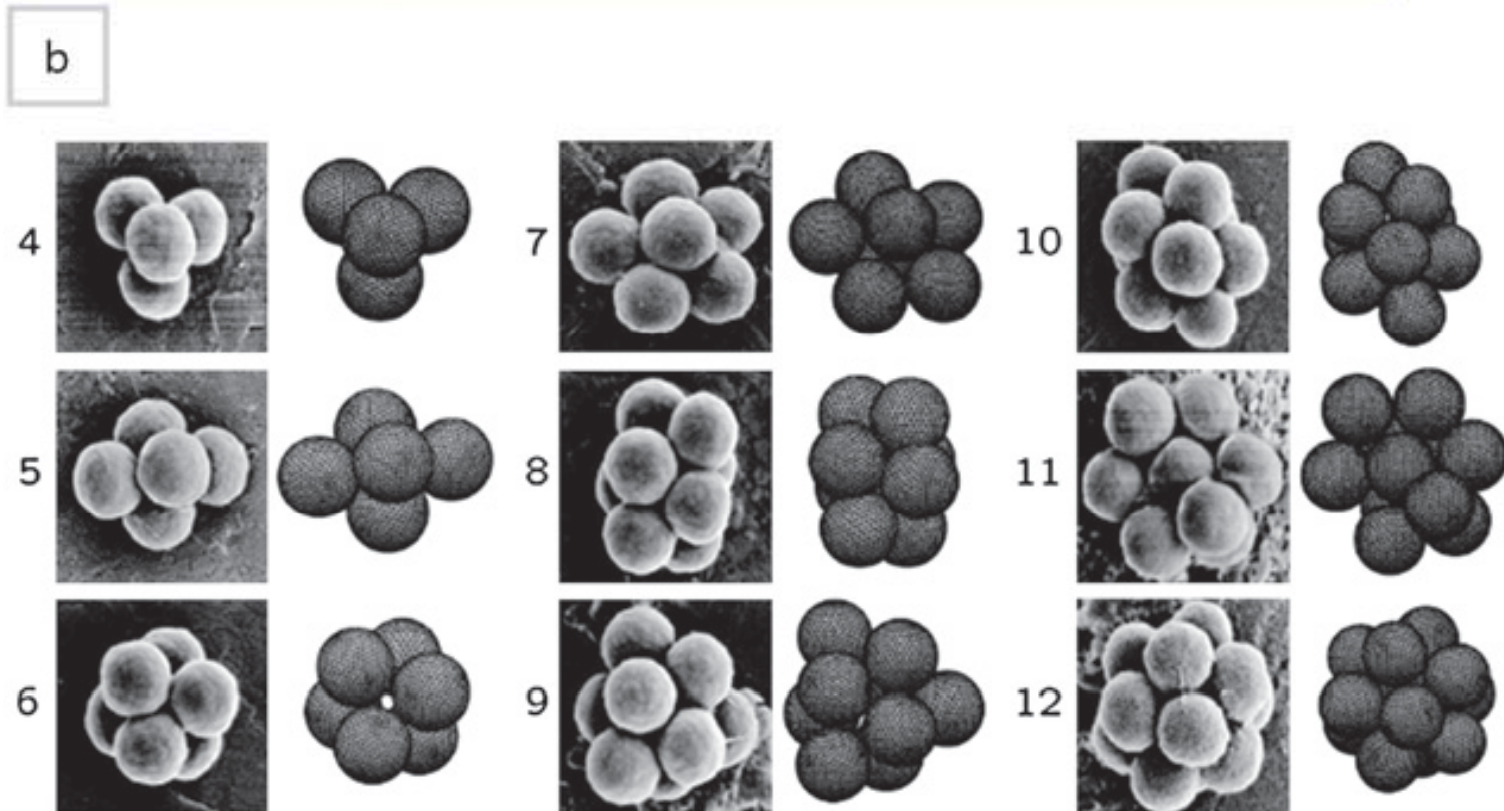
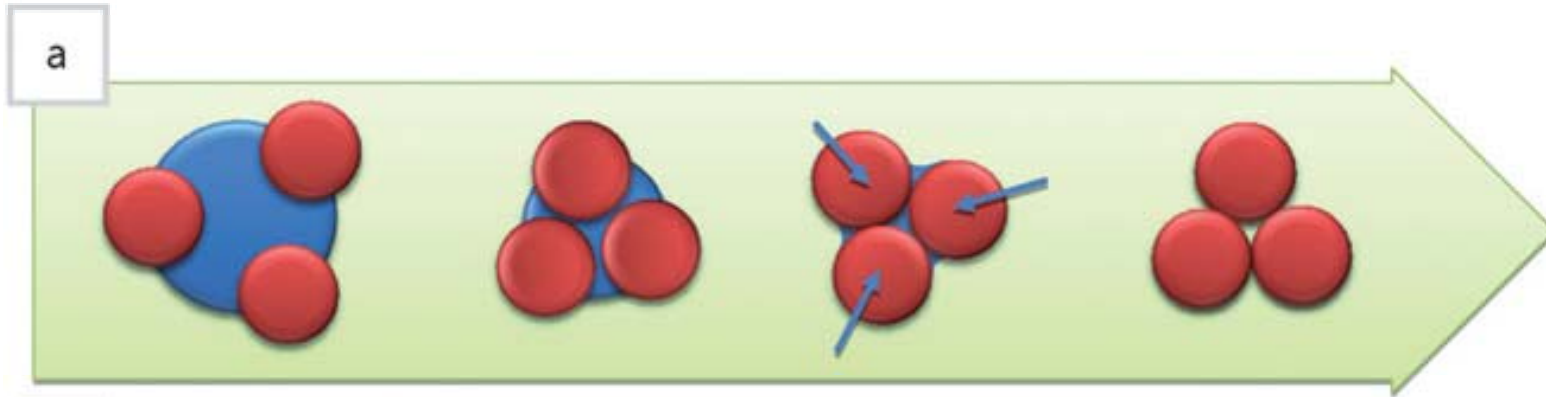


# Тройняшки

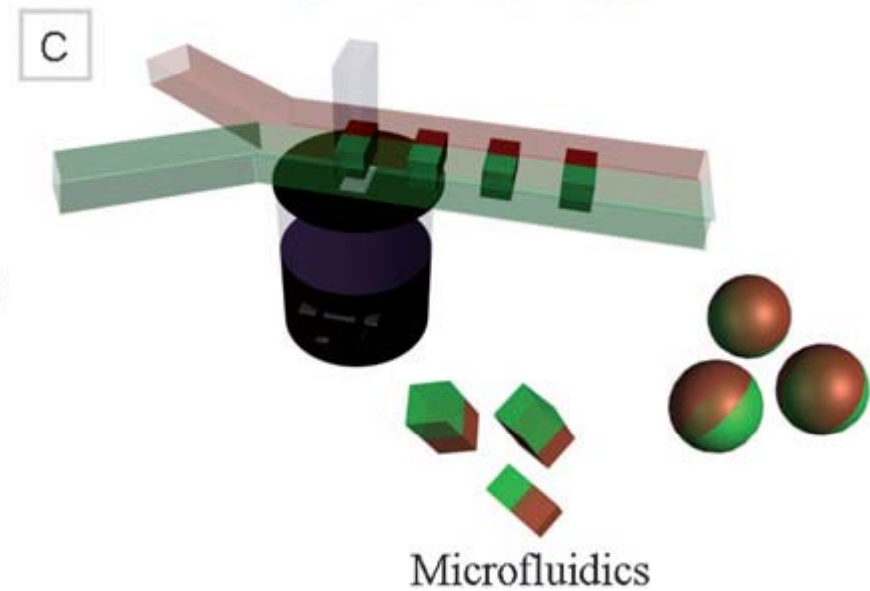
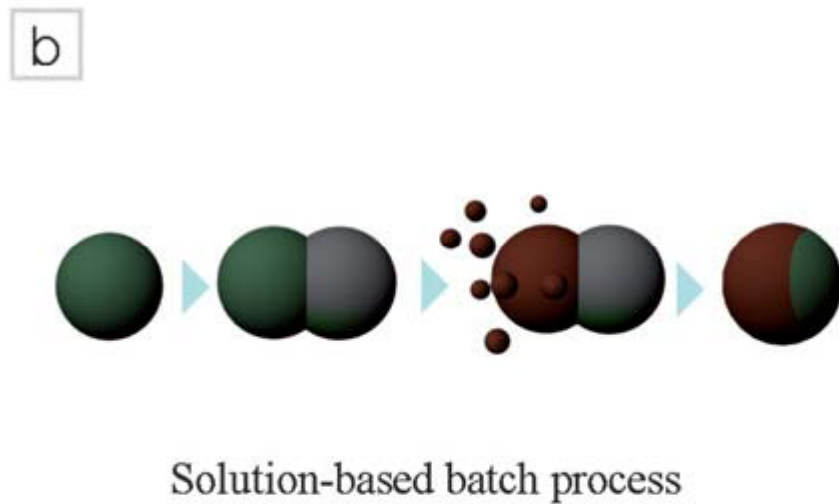
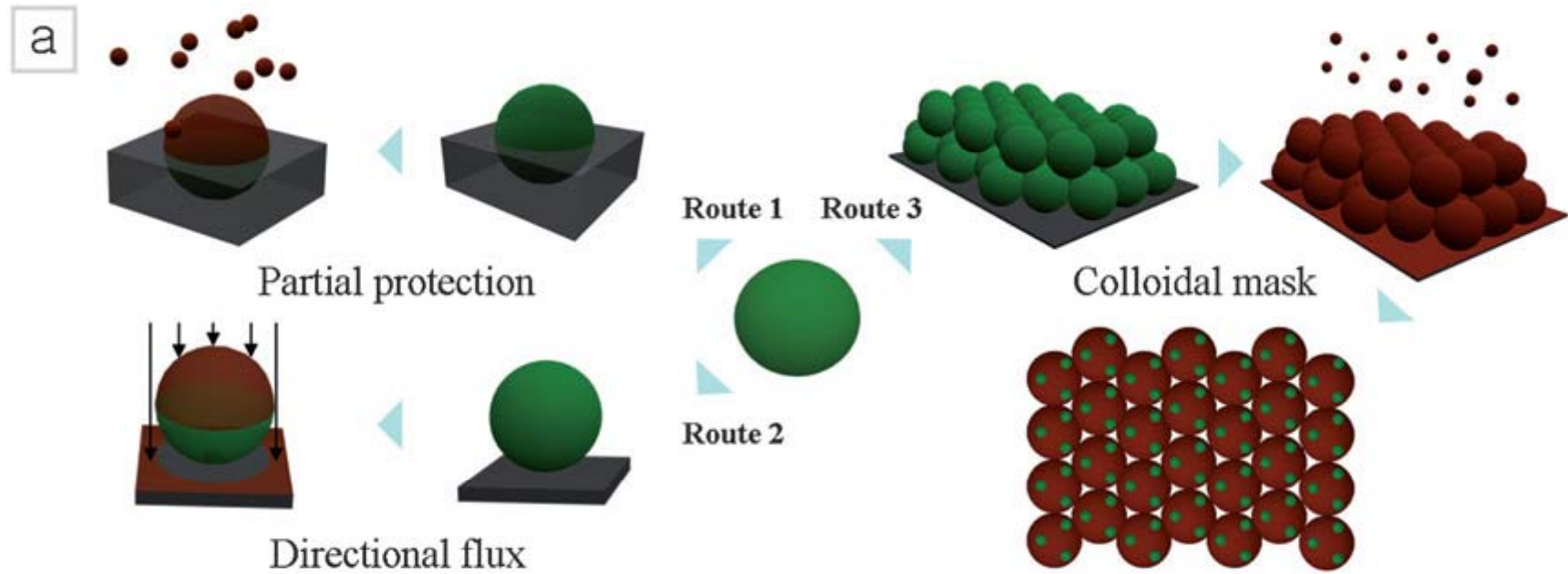




# Ассоциаты



# Массовое производство



# Основное содержание

- Получение монодисперсных микросфер и частиц – янусов основано на комбинации давно известных закономерностей
- Монодисперсные микросферы и частицы – янусы в процессе самосборки могут формировать упорядоченные и иерархически – сложные структуры
- Области применения монодисперсных микросфер и частиц – янусов: фотоника, «умные» жидкости, медицина

