

# 11. Плазмонные нанотехнологии в оптике

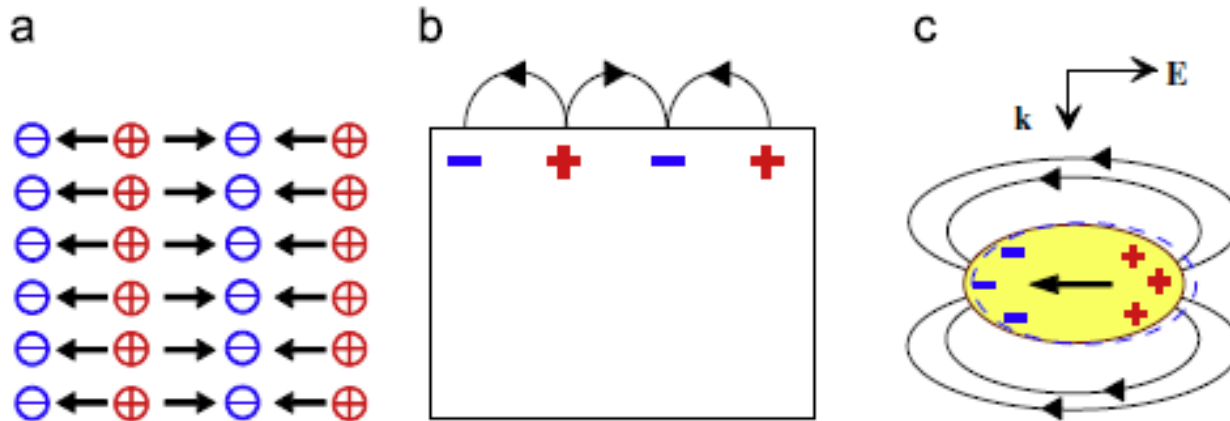


- **Плазменные колебания и волны.**
- **Генерация плазмон-поляритонных волн (ППВ) на периодически структурированной поверхности проводника.**
- **Плазмонные наночастицы в цветных стеклах. Загадки дихроизма.**
- **Гигантское комбинационное рассеяние.**

# Колебания в твердотельной плазме



## Колебания и волны в твердотельной плазме



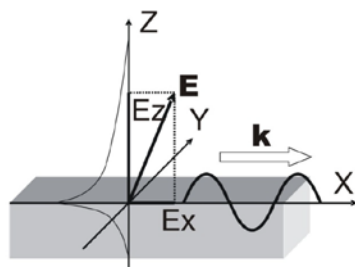
Объемные (a), поверхностные (b) плазмоны и плазменные колебания, локализованные в наночастице (c).

# 11. Плазмонные нанотехнологии в оптике



- **Плазменные колебания и волны.**
- **Генерация плазмон-поляритонных волн (ППВ) на периодически структурированной поверхности проводника.**
- **Плазмонные наночастицы в цветных стеклах. Загадки дихроизма.**
- **Гигантское комбинационное рассеяние.**

# Генерация ППВ на периодически структурированной поверхности проводника

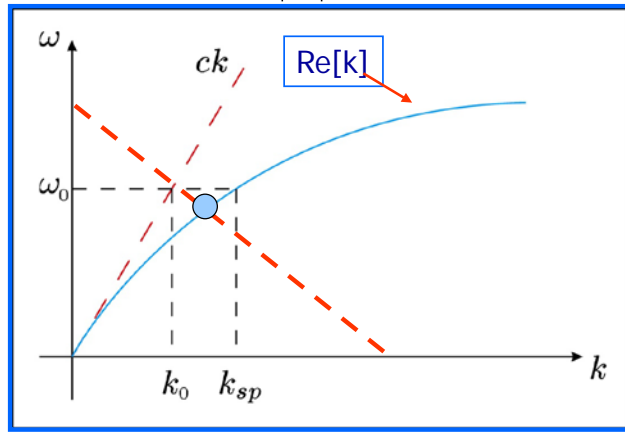
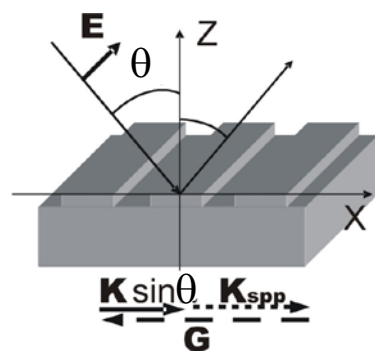


$$E_z^{(1)}(x, z) = E_0 \exp(-\alpha_1 z) \exp(ik_p x)$$

$$E_z^{(2)}(x, z) = E_0 \exp(\alpha_2 z) \exp(ik_p x)$$

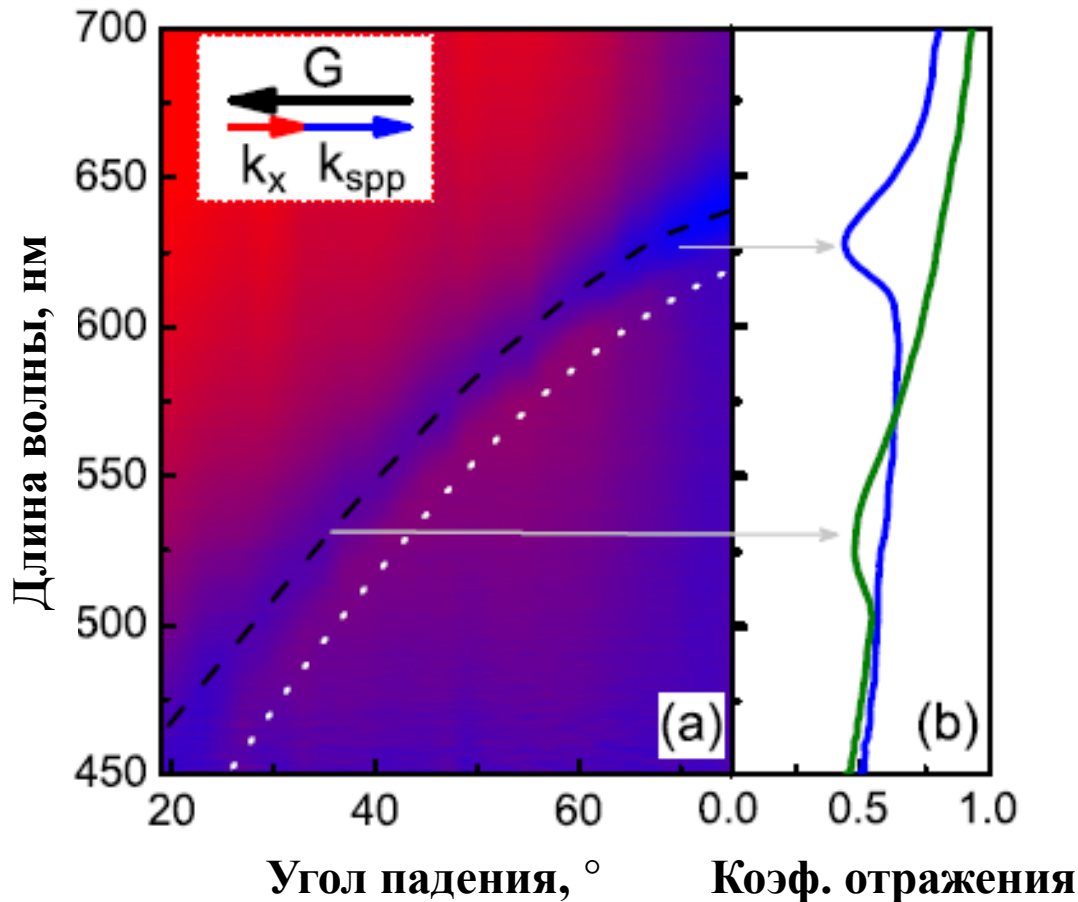
$$k_p = \left(\frac{\omega}{c}\right) \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad \alpha_{1,2} = \left(\frac{\omega}{c}\right) \sqrt{-\frac{\epsilon_{1,2}^2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$

$$\epsilon_1 > 0, \quad \epsilon_2 < 0, \quad |\epsilon_2| > \epsilon_1$$



**Условия генерации ППВ на поверхности металла**  
 (А.Г. Жданов и др., ICFM-2009, Партенит, Украина).

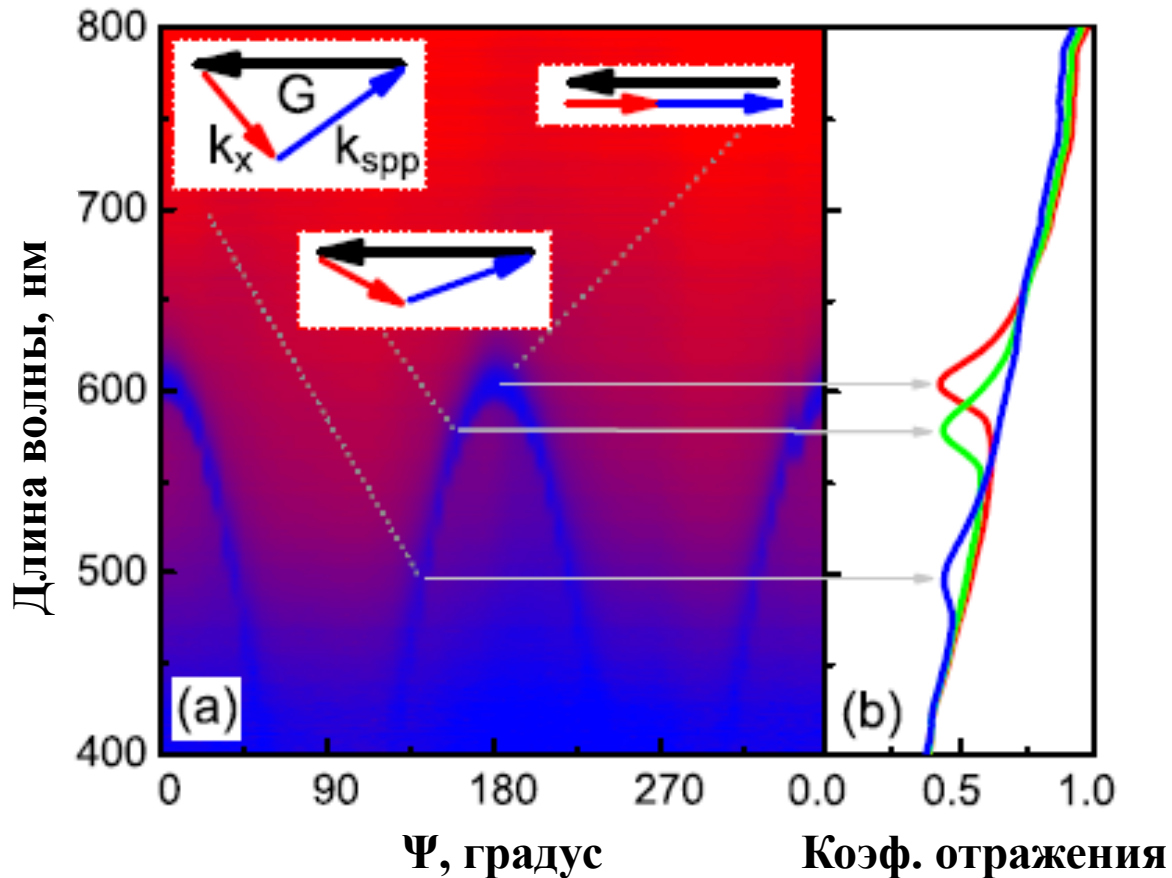
# Генерация ППВ на периодически структурированной поверхности проводника



**Особенность Вуда для одномерной периодической структуры (период  $d = 320$  нм)**

(A.A. Grunin et al., *Appl. Phys. Lett.*, **97** (2010) 261908).

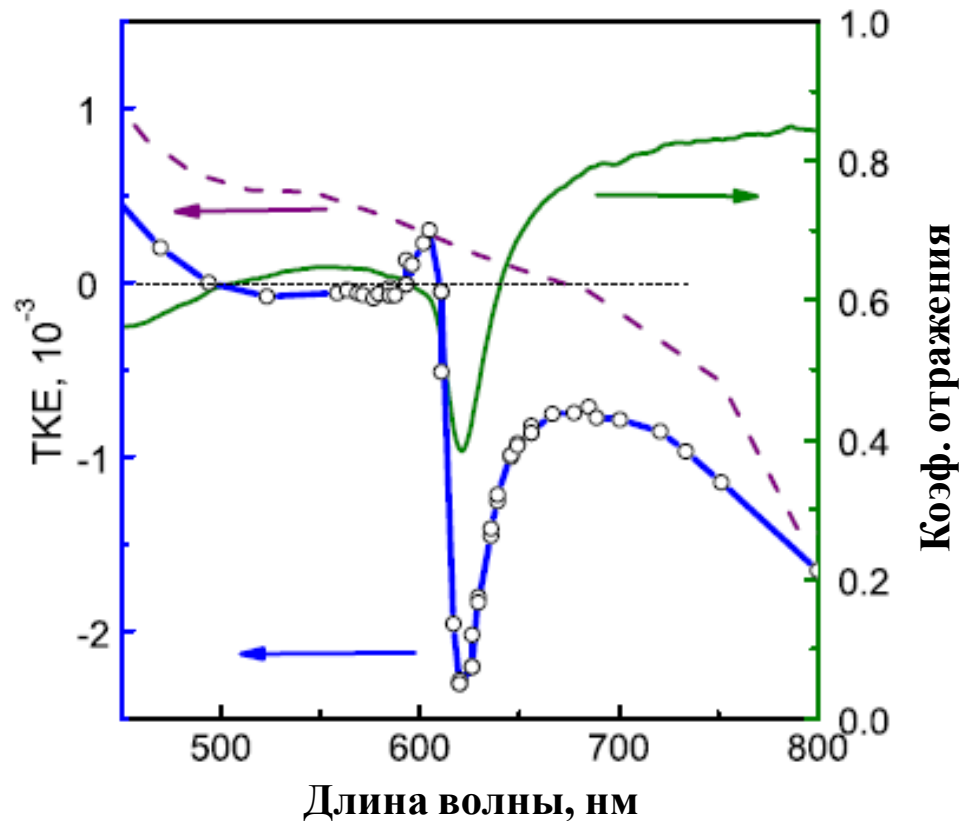
# Генерация ППВ на периодически структурированной поверхности проводника



**Особенность Вуда при модуляции структуры под разными азимутальными углами  $\Psi$  к плоскости падения света ( $d = 320$  нм) (А.А. Grunin et al., *Appl. Phys. Lett.*, **97** (2010) 261908).**



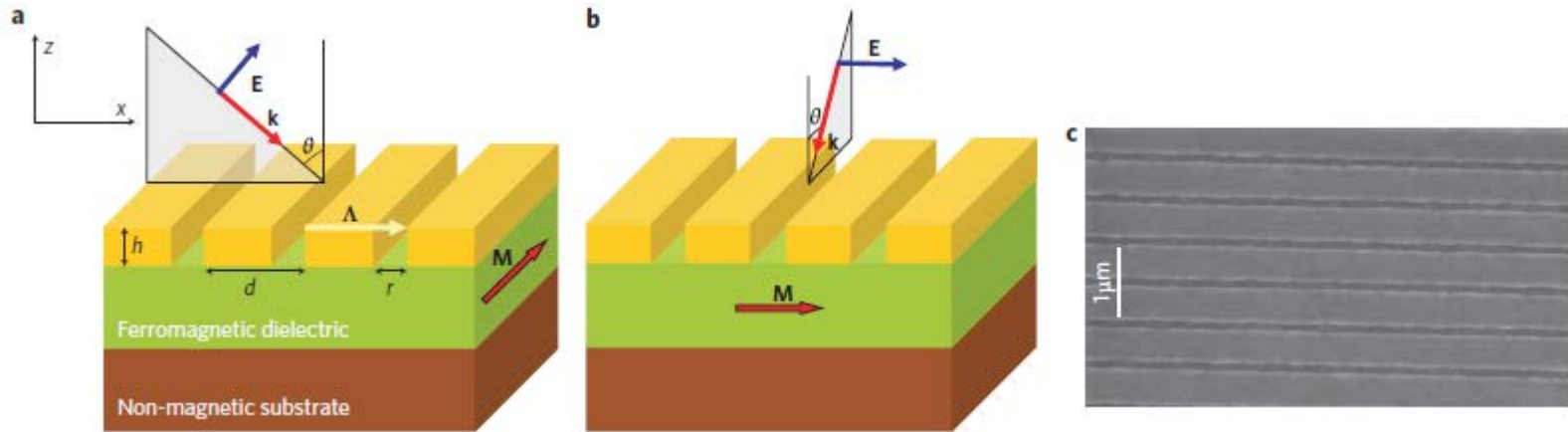
# Экспериментальное наблюдение усиления магнитооптического эффекта Керра



Спектры поперечного эффекта Керра для неструктурированного (пунктирная кривая) и одномерно периодически структурированного (синяя сплошная кривая) образцов из никеля; спектр отражения структурированного образца (зеленая кривая) (Grunin A.A. et al., Appl. Phys. Lett., 97 (2010) 261908).

Угол падения света –  $68^\circ$ .

# Экспериментальное наблюдение усиления магнитооптического эффекта Керра



**Магнитоплазмонная гетероструктура с периодической решеткой из золота на поверхности.**

V.I. Belotelov et al. Nature nanotechnology **6** (2011) 370.

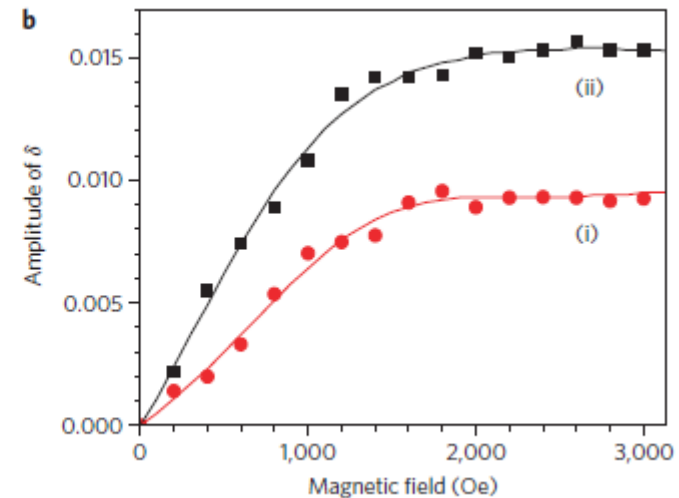
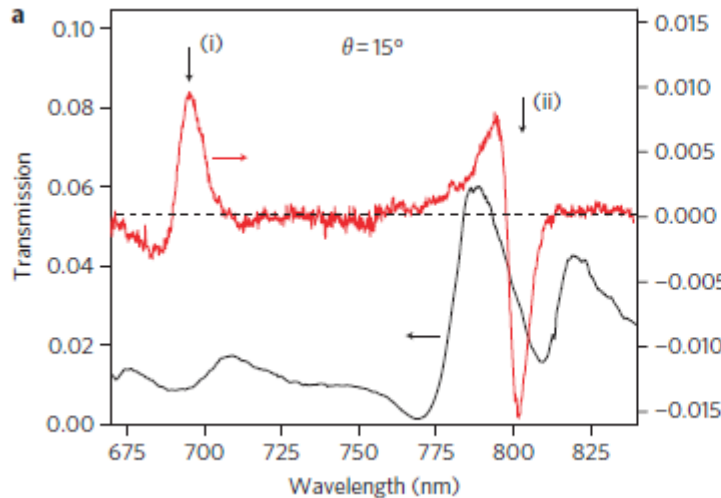


# Экспериментальное наблюдение усиления магнитооптического эффекта Керра



$H = 2000 \text{ Oe}$

$\theta = 15^\circ$



**Поперечный магнитооптический эффект Керра для магнитоплазмонной гетероструктуры с периодической решеткой из золота на поверхности.**

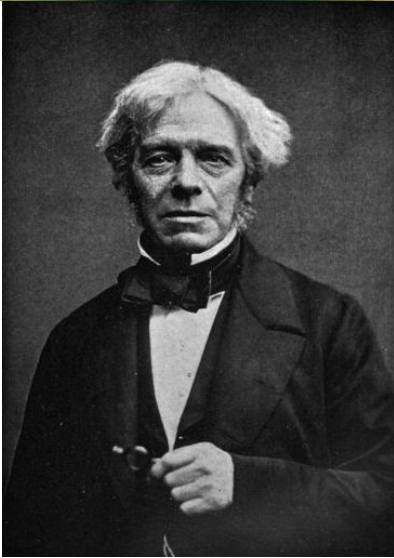
V.I. Belotelov et al. Nature nanotechnology **6** (2011) 370.

# 11. Плазмонные нанотехнологии в оптике



- **Плазменные колебания и волны.**
- **Генерация плазмон-поляритонных волн (ППВ) на периодически структурированной поверхности проводника.**
- **Плазмонные наночастицы в цветных стеклах. Загадки дихроизма.**
- **Гигантское комбинационное рассеяние.**

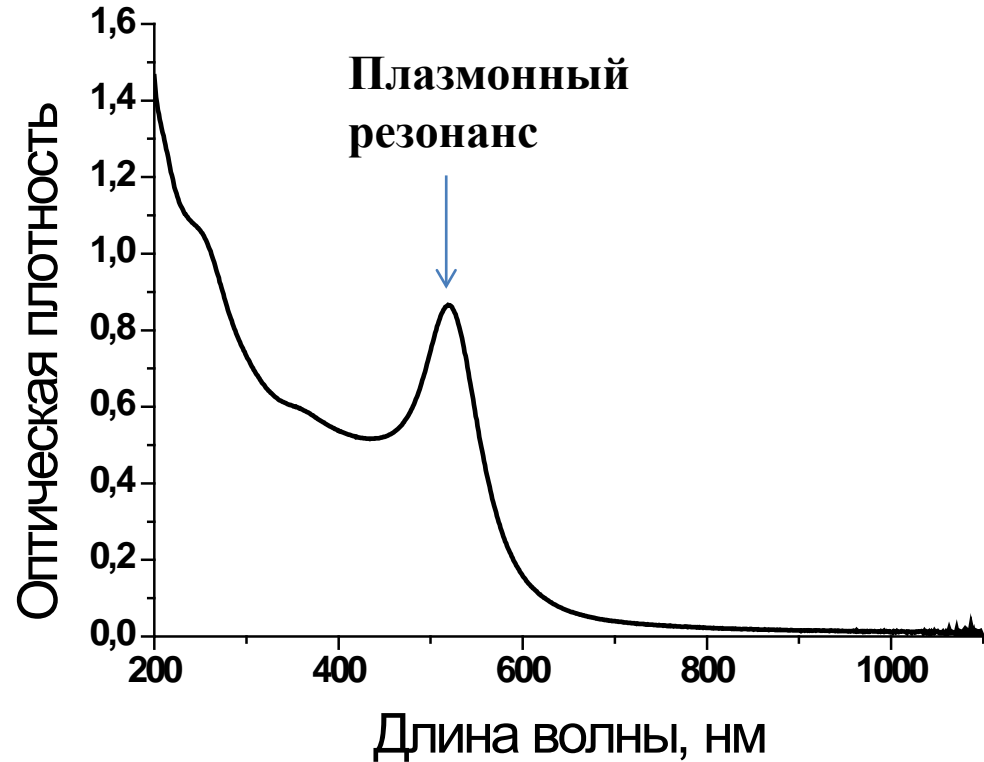
# Свойства наночастиц золота



**М. Фарадей**



**Коллоидный  
раствор золота**



**Спектр поглощения наночастиц  
золота в коллоидном растворе**

# Стекла с наночастицами золота

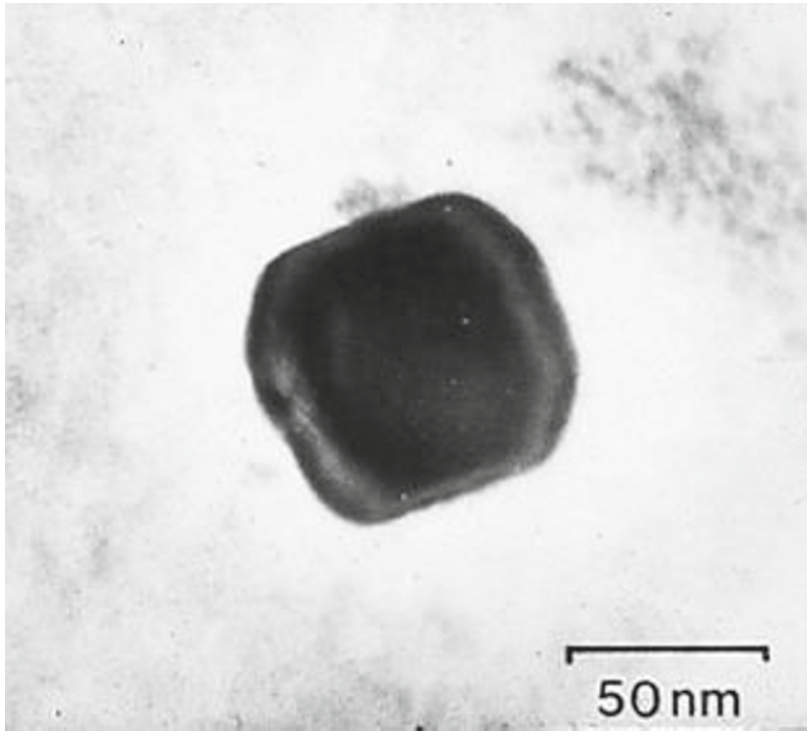


**Кубок Ликурга  
(Британский музей,  
IV век н.э.)**



**Образец, воспроизводящий  
свойства кубка Ликурга  
(химфак МГУ)**

# Стекла с наночастицами золота



**Просвечивающая электронная микроскопия** состоящей из серебра и золота наночастицы, найденной в стекле кубка Ликурга (Barber D.J. and Freestone I.C., *Archaeometry*, **32** (1990) 33).

**Нанотехнологии существовали уже в древнем Риме!**





## Состав кубка Ликурга, вес. %

✘ SiO <sub>2</sub>	✘ Na <sub>2</sub> O	✘ CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	✘ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	✘ P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
73.5	14	6.5	0.9	0.55	2.5	1.5	0.2	
MnO <sub>2</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	PbO	✘ SnO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	✘ Ag	✘ Au
0.45	0.3	0.04	0.2	0.01	0.1	0.07	0.03	0.004

Базовый состав шихты:

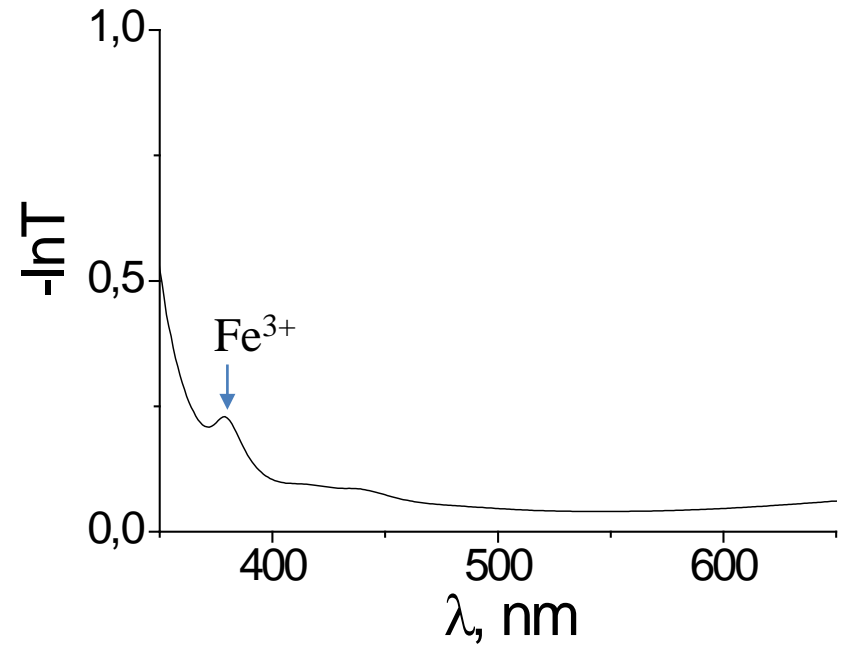




# Загадки дихроизма



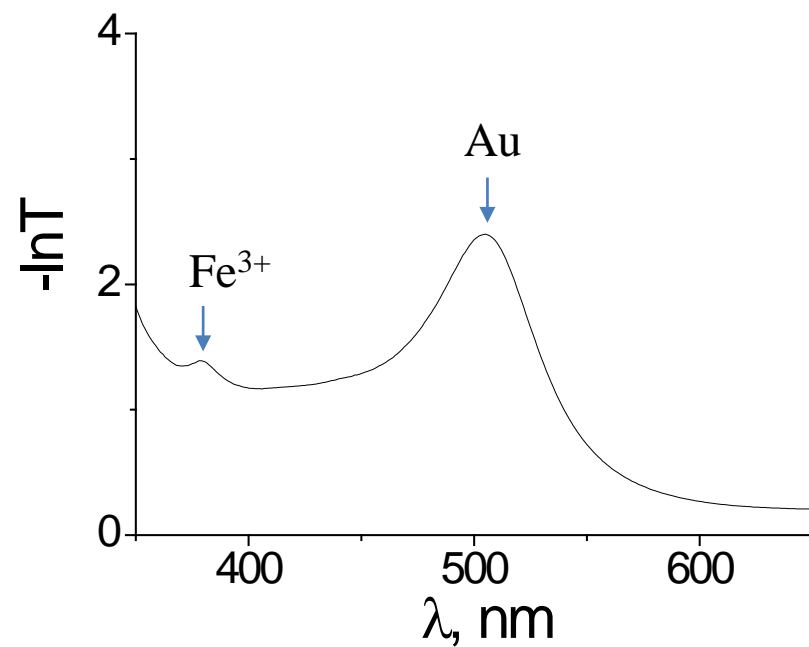
~~Au~~



# Загадки дихроизма



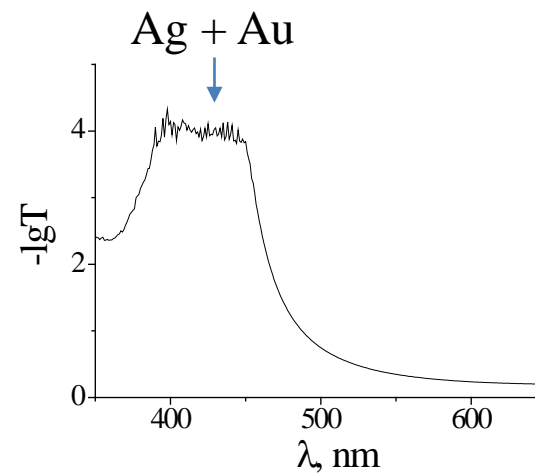
~~Ag~~



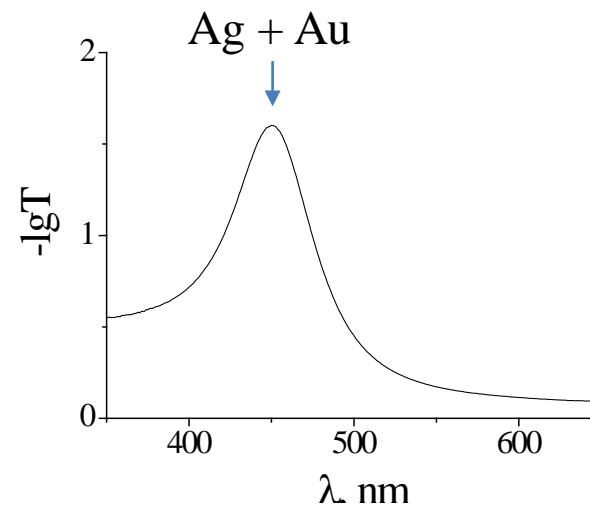
# Загадки дихроизма



~~P~~

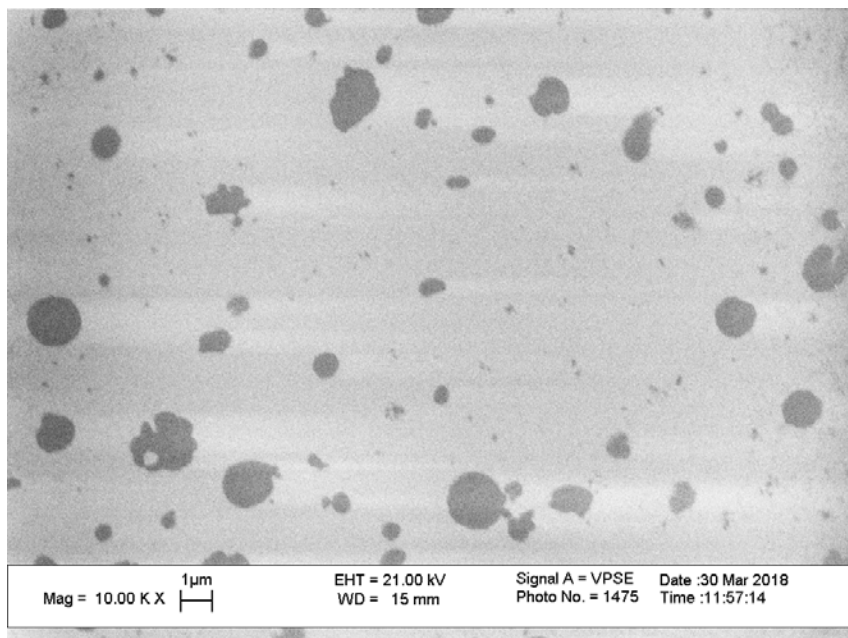


~~P~~ ~~Fe~~

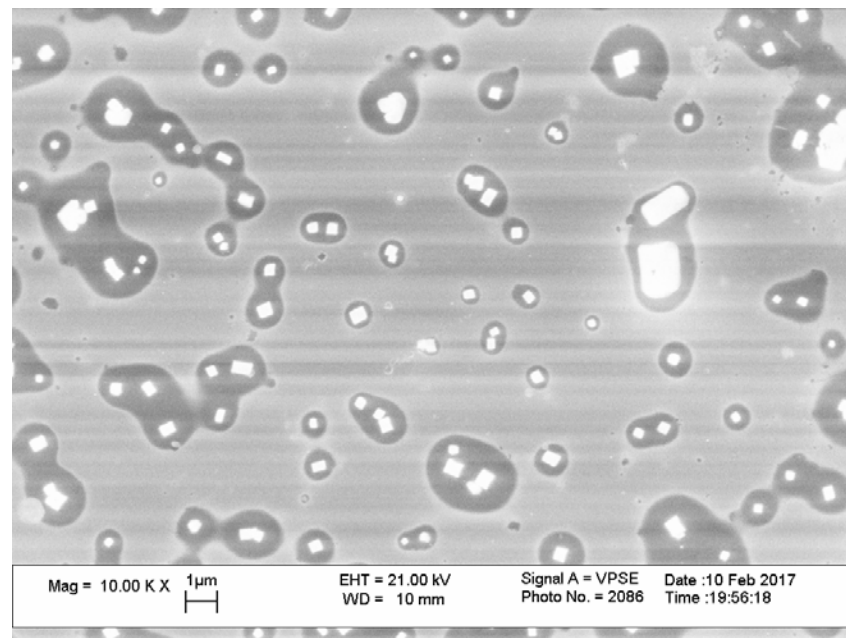




## Фазовое разделение в «наведенном» матовом стекле



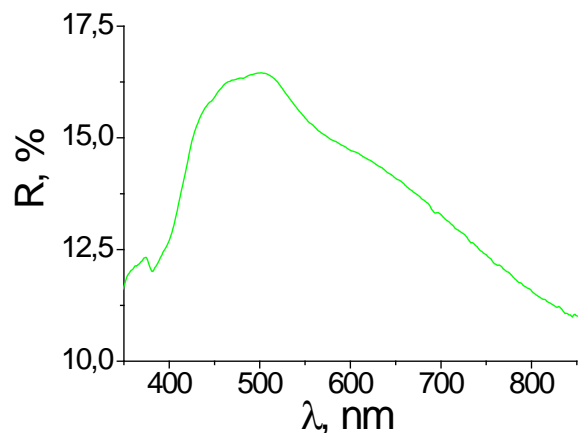
600 °C, 1 h



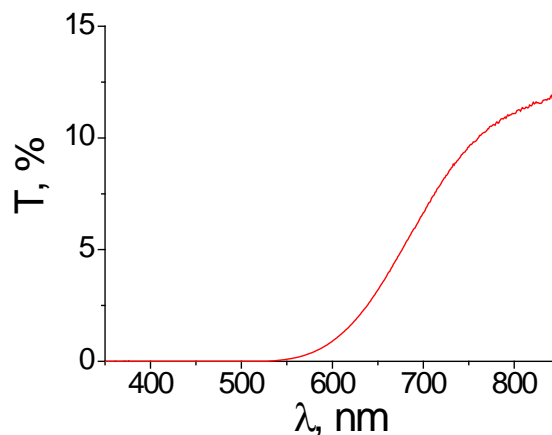
650 °C, 25 h



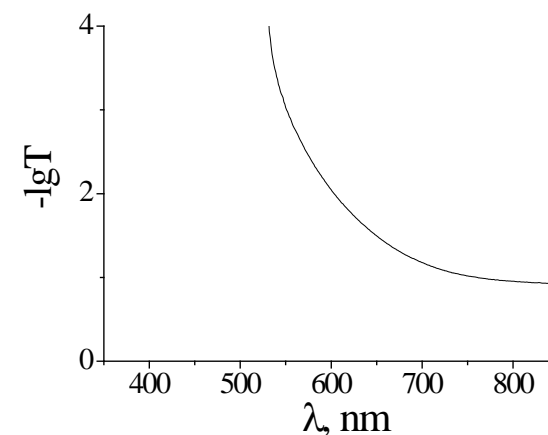
## Свойства дихроичного стекла



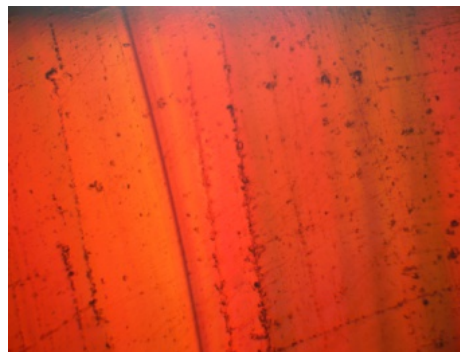
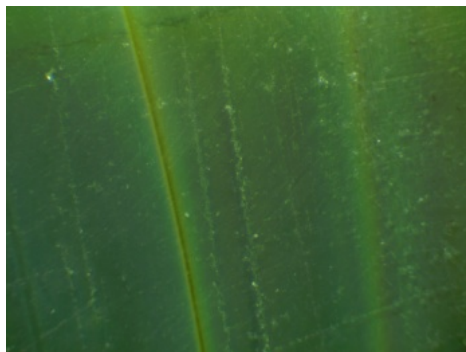
Спектр отражения



Спектр пропускания



Спектр поглощения



A. Drozdov et al.,  
*J. of Cultural Heritage*  
**51** (2021) 71.



# 11. Плазмонные нанотехнологии в оптике



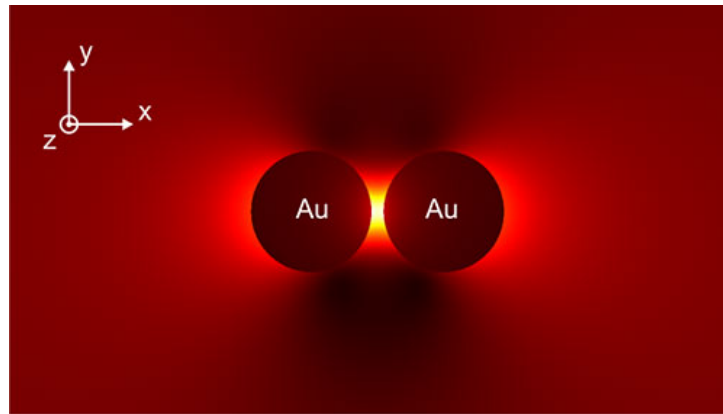
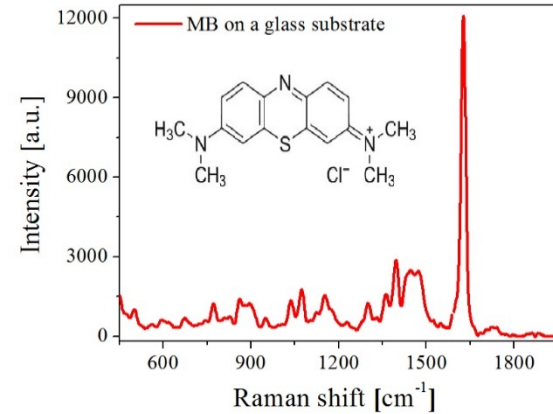
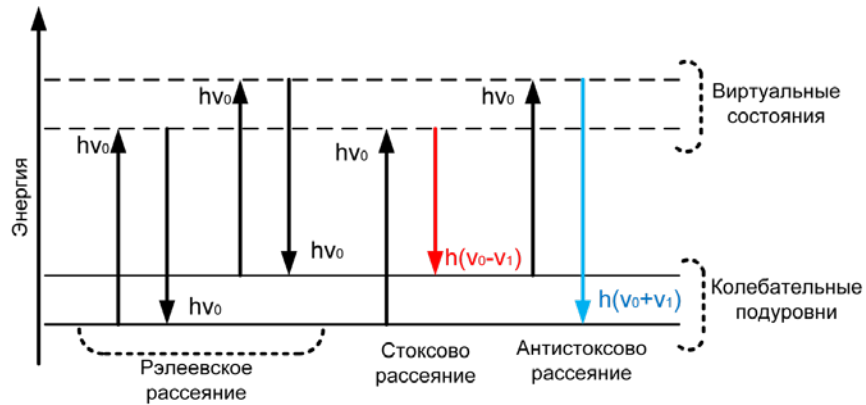
- **Плазменные колебания и волны.**
- **Генерация плазмон-поляритонных волн (ППВ) на периодически структурированной поверхности проводника.**
- **Плазмонные наночастицы в цветных стеклах. Загадки дихроизма.**
- **Гигантское комбинационное рассеяние.**



# Гигатское комбинационное рассеяние (ГКР)

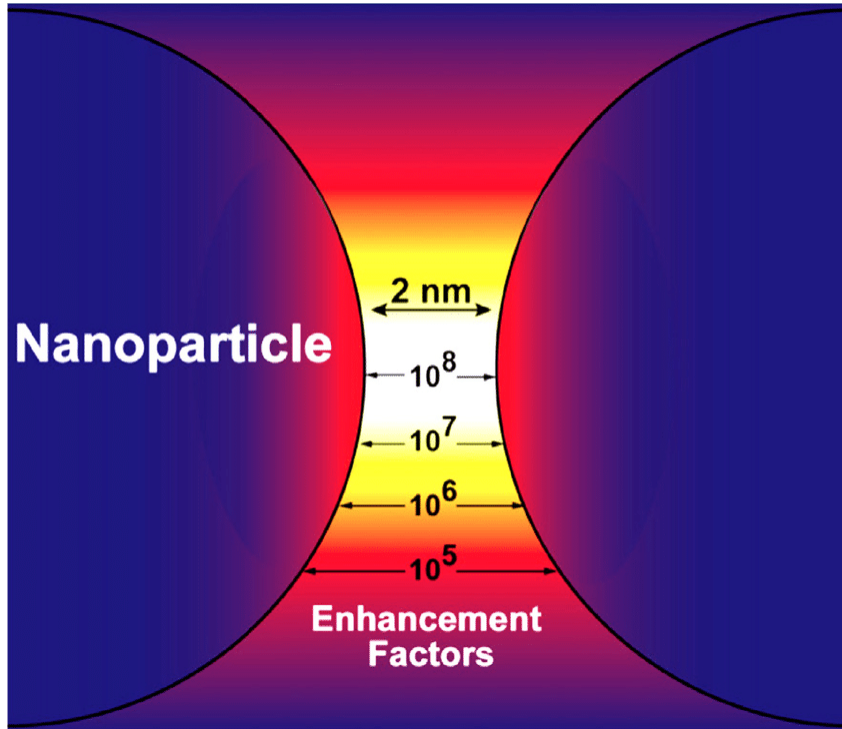


## Комбинационное рассеяние



## «Горячая точка» ГКР

# Гигатское комбинационное рассеяние (ГКР)

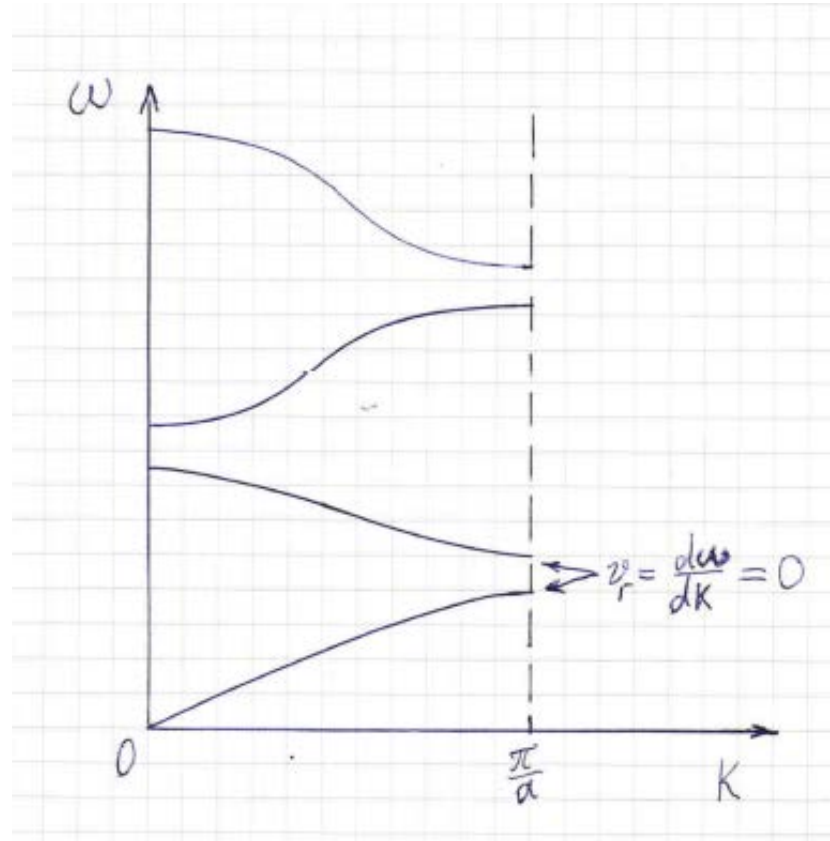


Степень усиления

$$SMEF \approx \frac{|E_{loc}(\omega_L)|^4}{|E_{inc}|^4}$$

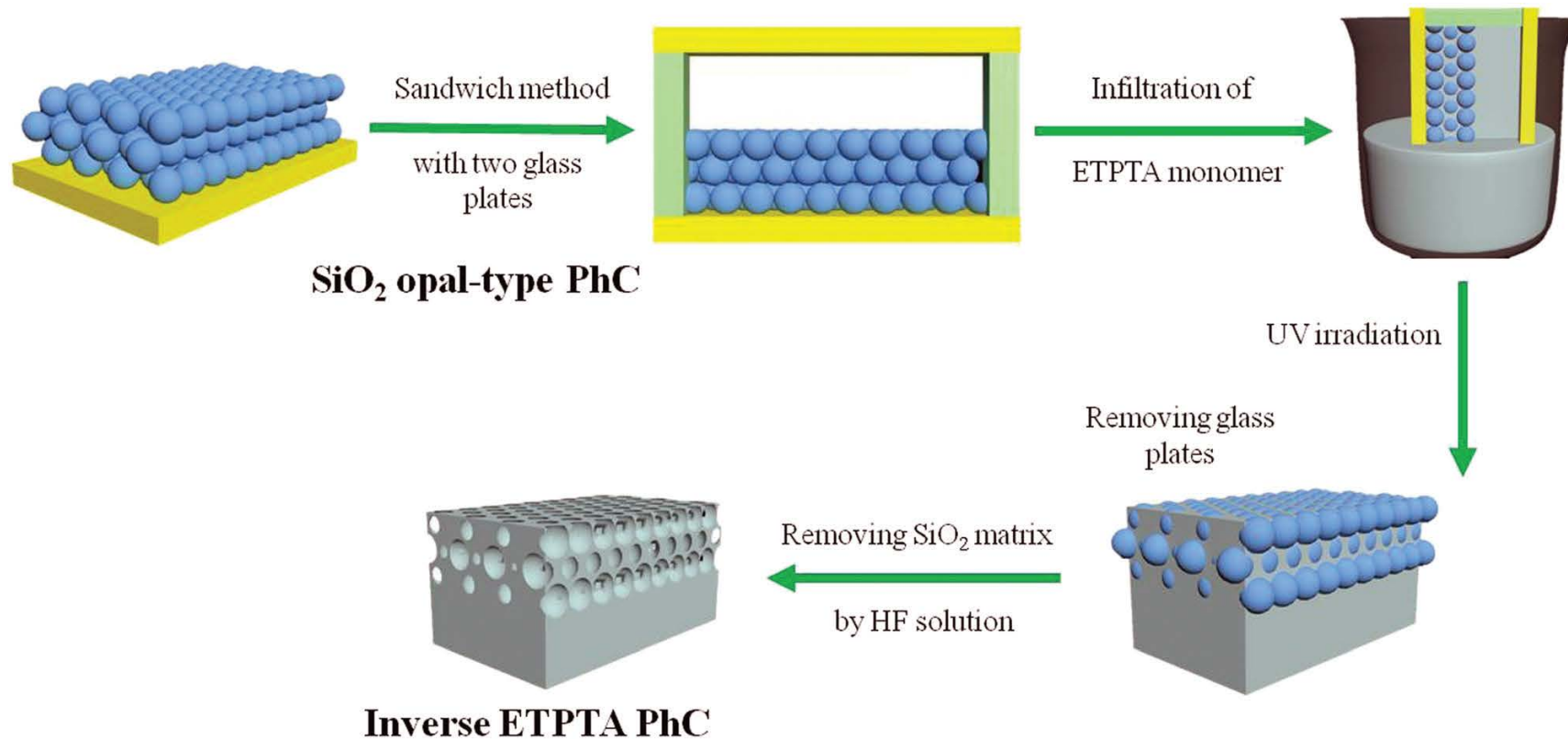
«Горячая точка» ГКР

# Усиление взаимодействия света с веществом в фотонных кристаллах



Замедление света на границе зоны Бриллюэна

# Усиление комбинационного рассеяния в фотонных кристаллах



**Синтез пленок фотонных кристаллов со структурой инвертированного опала**

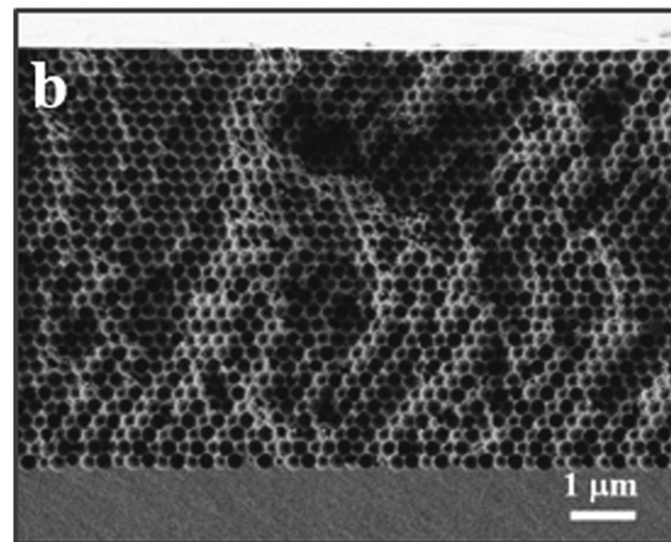
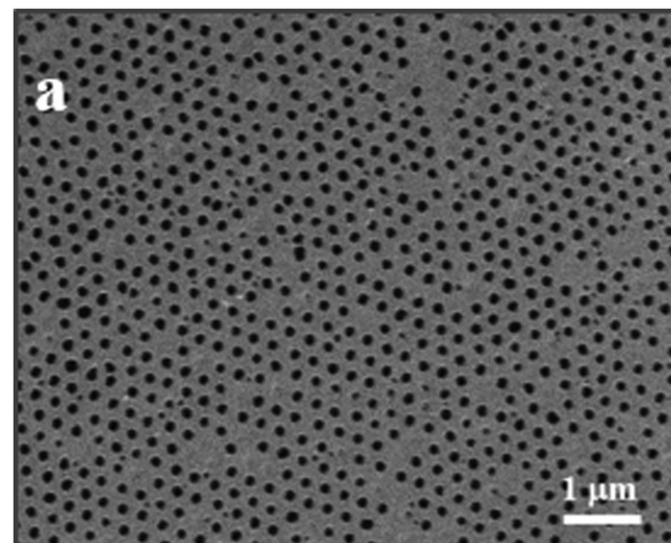
A. Ashurov, A. Baranchikov, S. Klimonsky, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2020, **22**, 9630—9636.

# Усиление комбинационного рассеяния в фотонных кристаллах



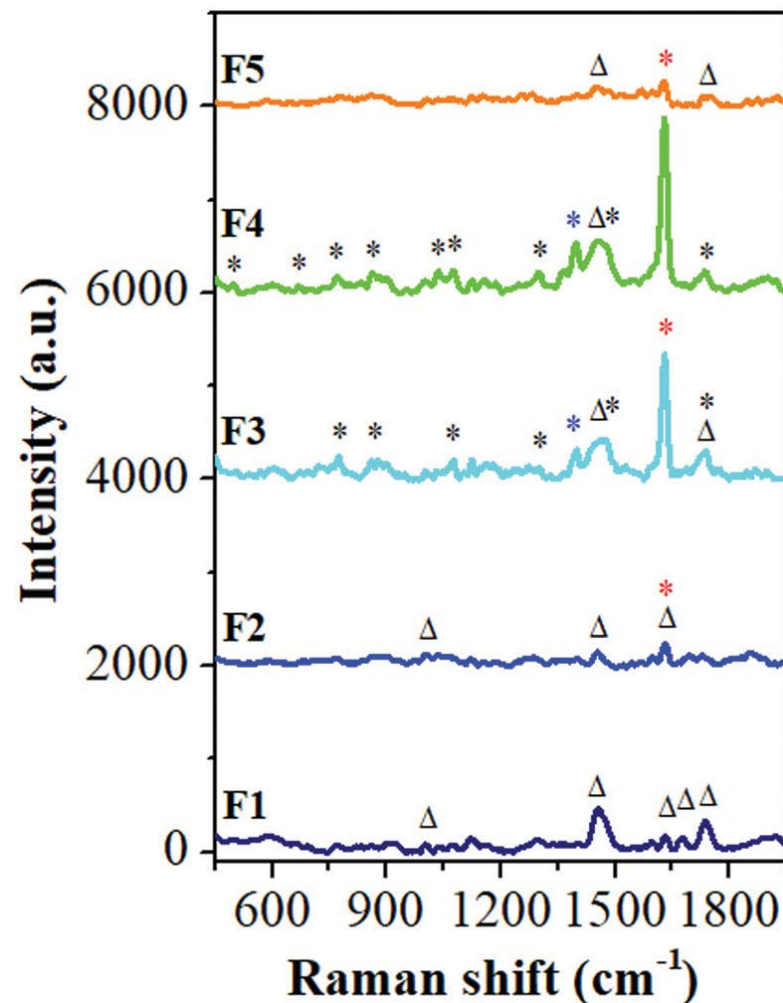
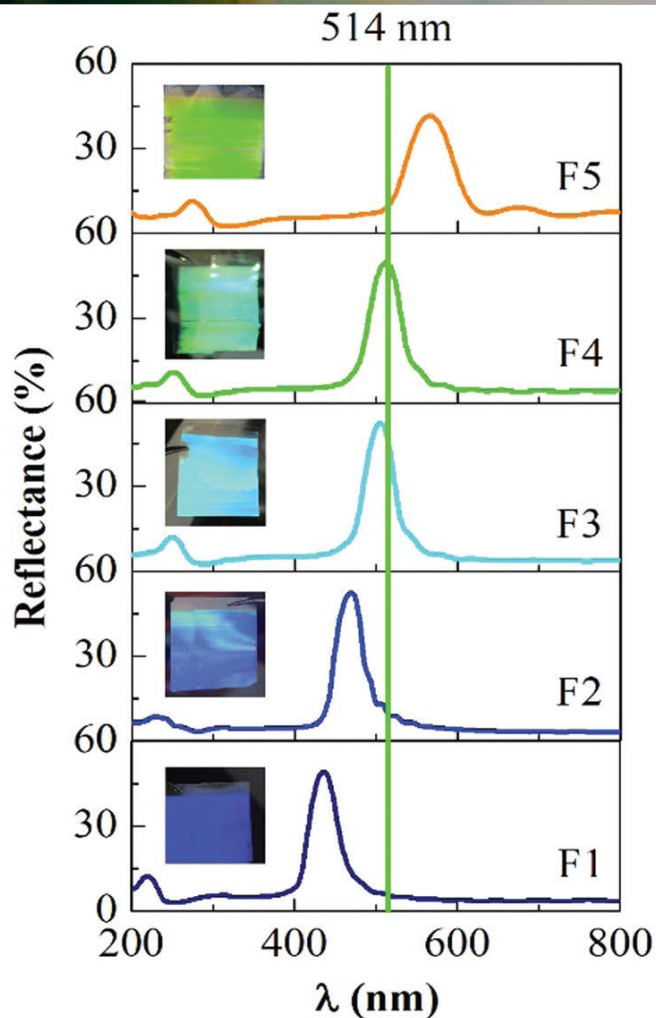
## Электронно-микроскопическое изображение получаемых образцов

A. Ashurov, A. Baranchikov, S. Klimonsky,  
*Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2020, **22**, 9630.





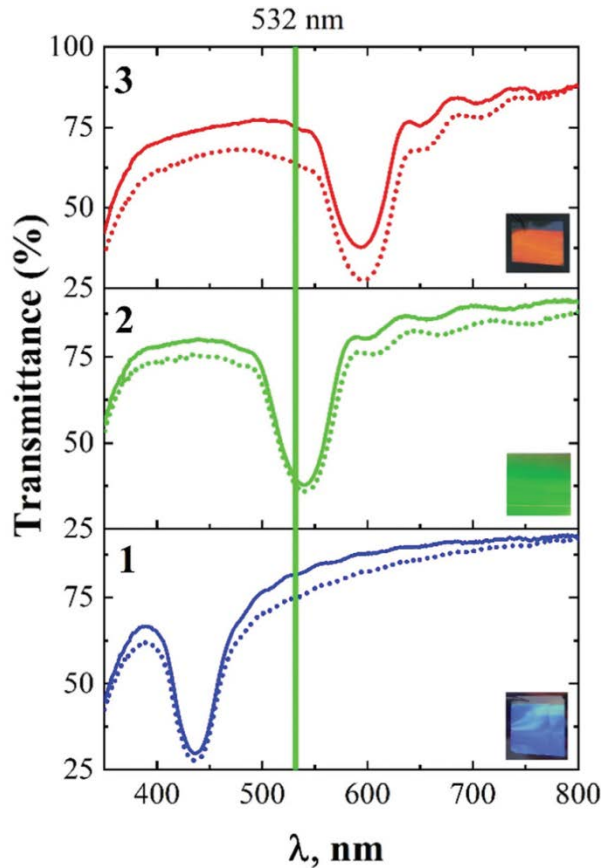
# Усиление комбинационного рассеяния в фотонных кристаллах



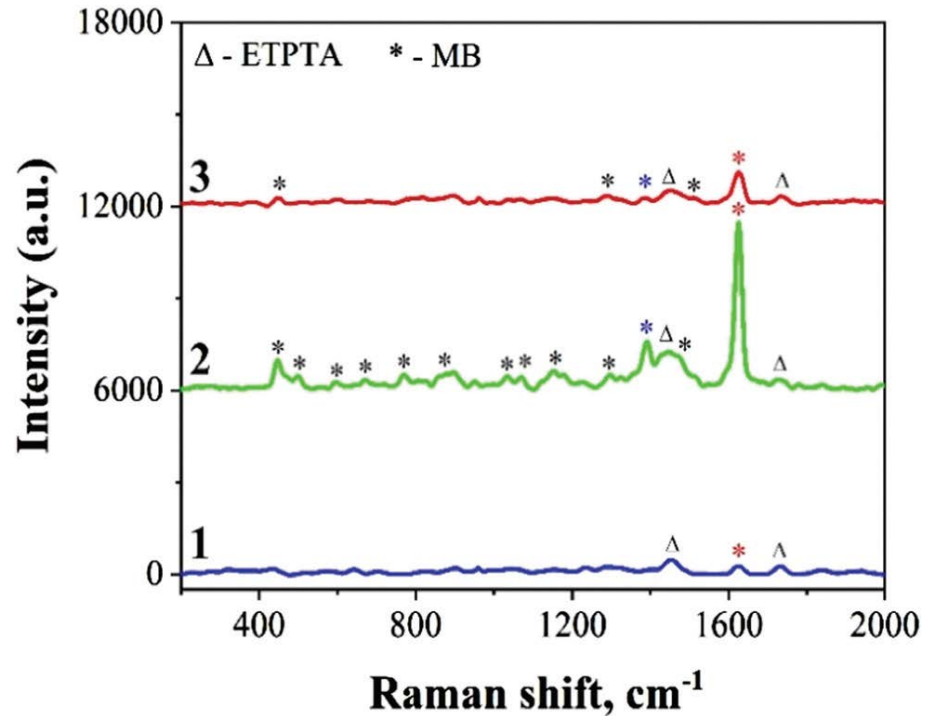
Корреляция спектров отражения и комбинационного рассеяния для разных образцов (A. Ashurov et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2020, 22, 9630).



# Усиление гигантского комбинационного рассеяния при наличии наночастиц золота



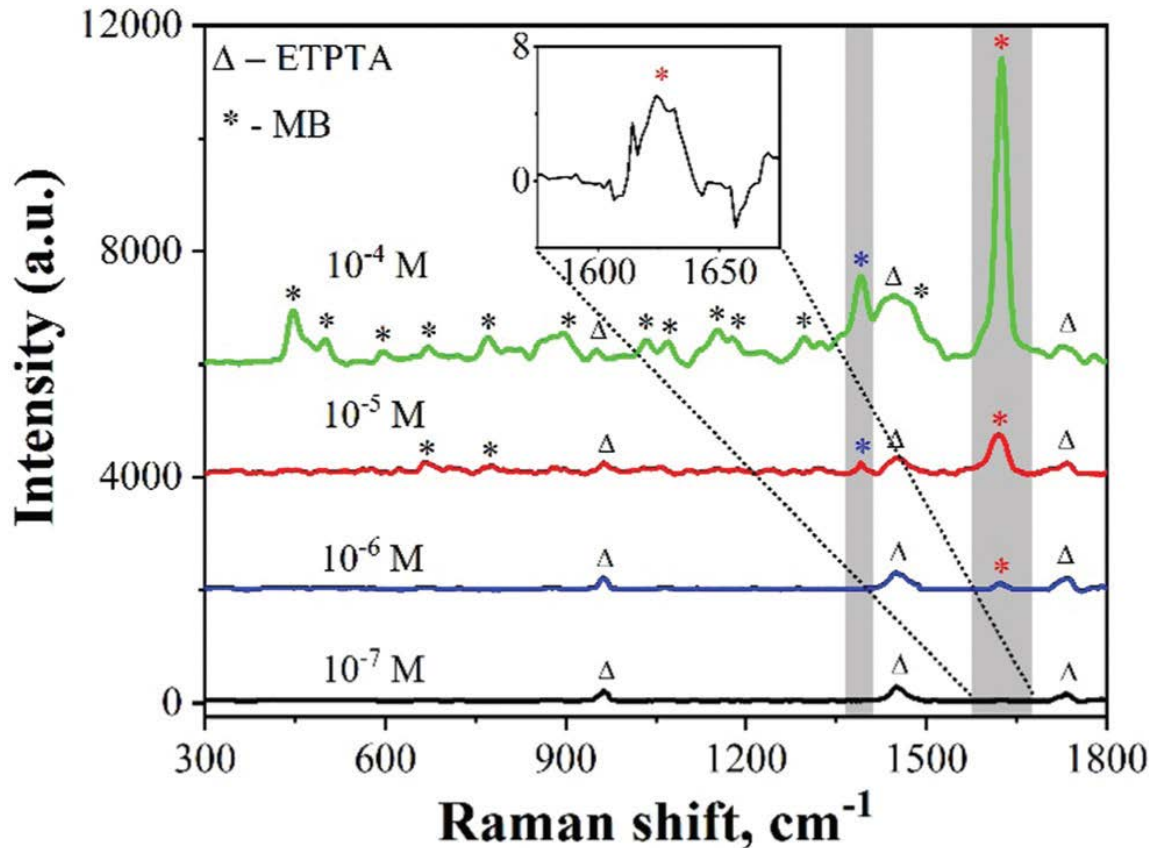
Transmittance spectra of various samples before (solid lines) and after (dotted lines) of Au NPs embedding. The laser wavelength is 532 nm.



Raman spectra of the same samples after double impregnation with  $10^{-4}$  M MB ethanol-based solution.

- \* - the main peak of the MB dye.
- Δ - ETPTA peaks.

# Усиление гигантского комбинационного рассеяния при наличии наночастиц золота



Raman spectra for various concentrations of MB in solutions impregnating sample 2.

Enhancement factor due to SPE  $\approx 20$ .

The total enhancement factor (SERS + SPE):

$$EF = \frac{I_{SERS}/N_{SERS}}{I_0/N_0} \sim 10^5$$

( $N = C_I \cdot N_A \cdot S_{scat} \cdot h$ ,  
 $h \approx 2 \mu\text{m}$  for Au enriched layer in the sample,  
 $h_0 \approx 6 \mu\text{m}$  for  $C_I = 0.2 \text{ M}$  MB reference solution).

The detection limit for MB  $\approx 10^{-7} \text{ M}$ .