



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



Плазмонные волноводы

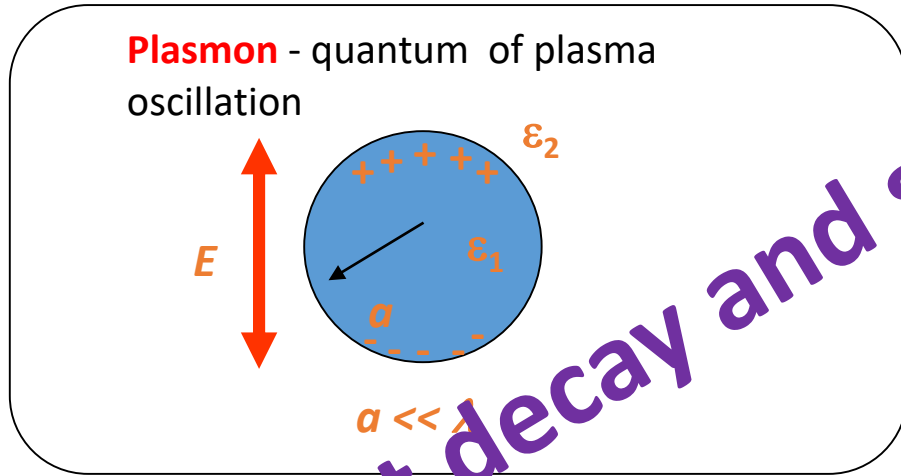
Калмыков Алексей

Семинар НУГ «Квантовая оптика и нанофотоника»

ИСАН, Троицк

Plasmonics

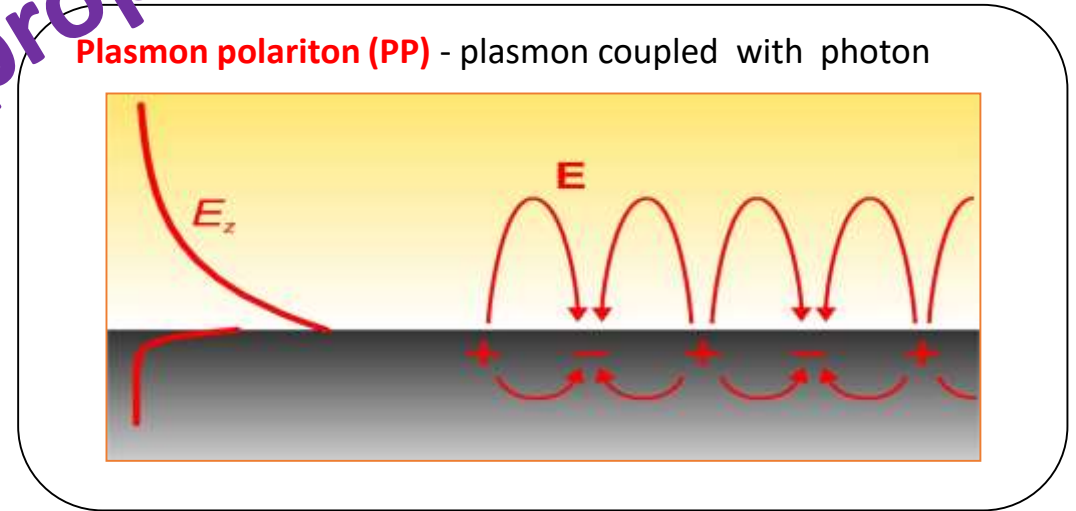
Metal nano structure



**Localized
surface plasmon polariton**

$$\delta r \sim 10 \text{ nm}$$
$$\delta t \sim 0.1 \text{ fsec}$$

Metal nano surface

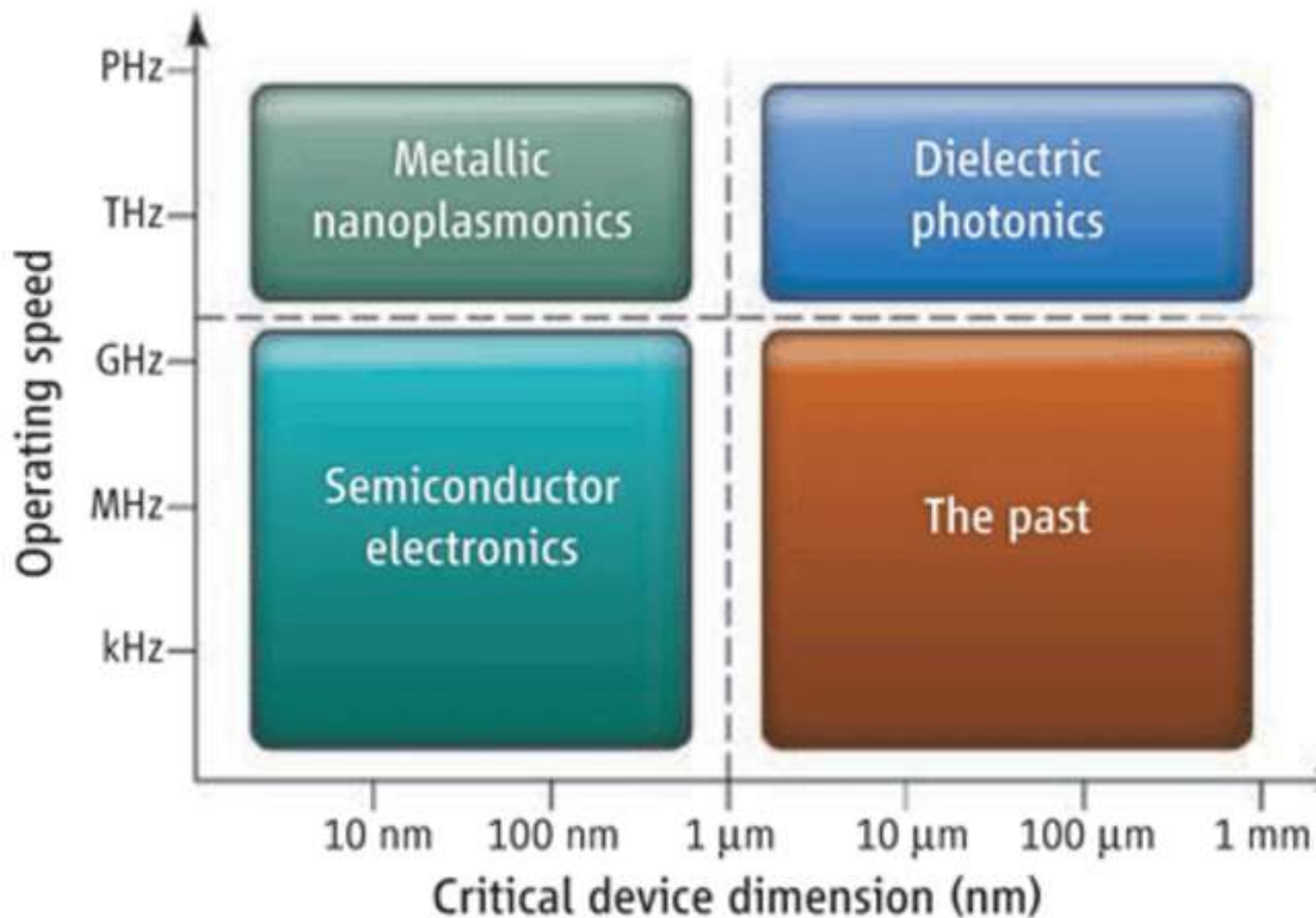


**Propagating
surface plasmon polariton**

$$\delta r \sim 100 \text{ nm}$$
$$\delta t \sim 10 \text{ fsec}$$

Fast decay and short propagation

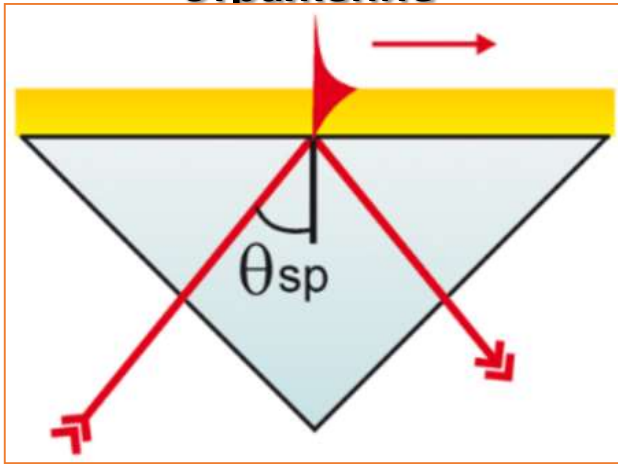
Поверхностные плазмоны



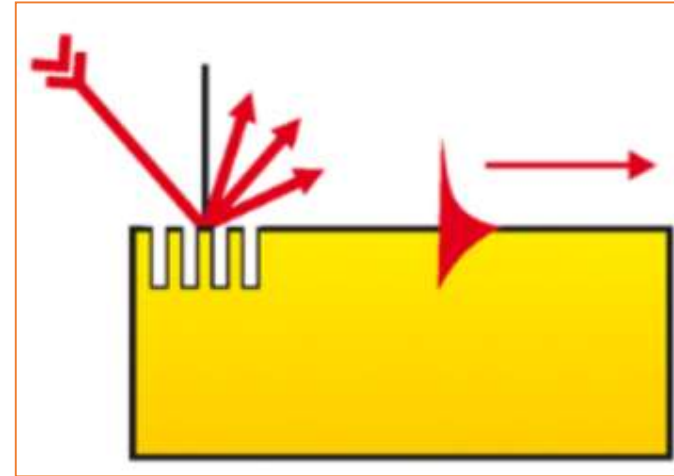
Возбуждение SPPs

$$k_{\text{SPP}}(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m(\omega)\epsilon_d}{\epsilon_m(\omega) + \epsilon_d}}$$

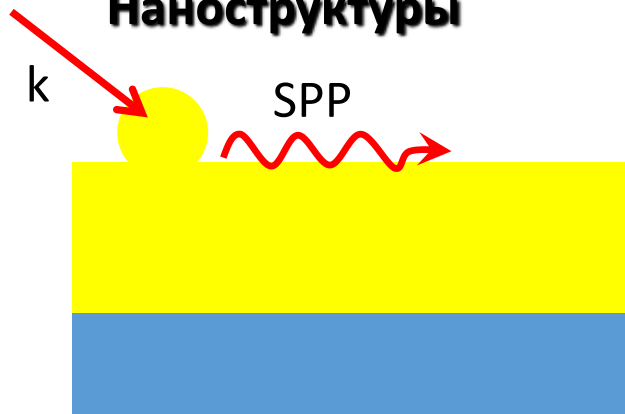
Полное внутреннее отражение



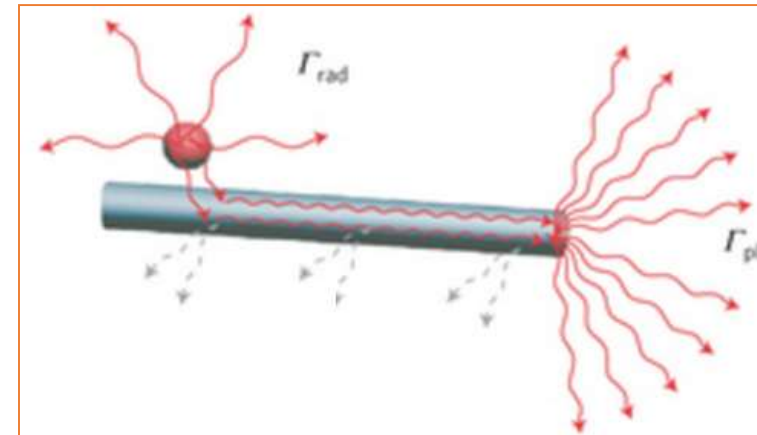
Решётки



Наноструктуры



Молекулы, QD



Затухание поверхностных плазмонов

Потери в металле:

$$k_x'' = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_1' \epsilon_2}{\epsilon_1' + \epsilon_2} \right)^{3/2} \frac{\epsilon_1''}{2(\epsilon_1')^2}$$

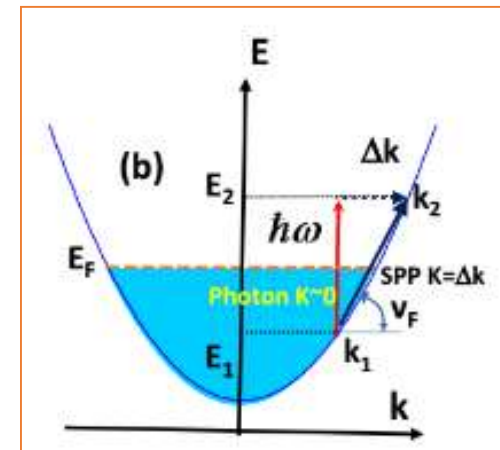
$$L_i = (2k_x'')^{-1}$$

Рассеяние на шероховатостях:

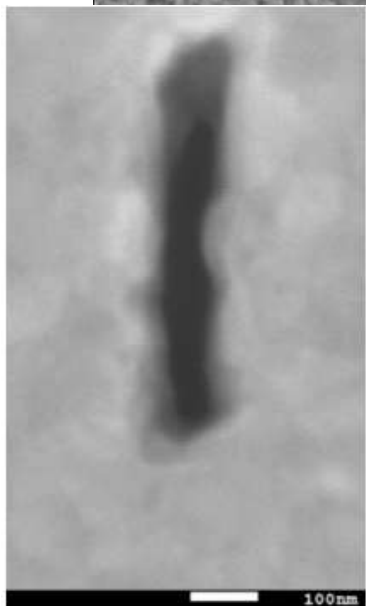
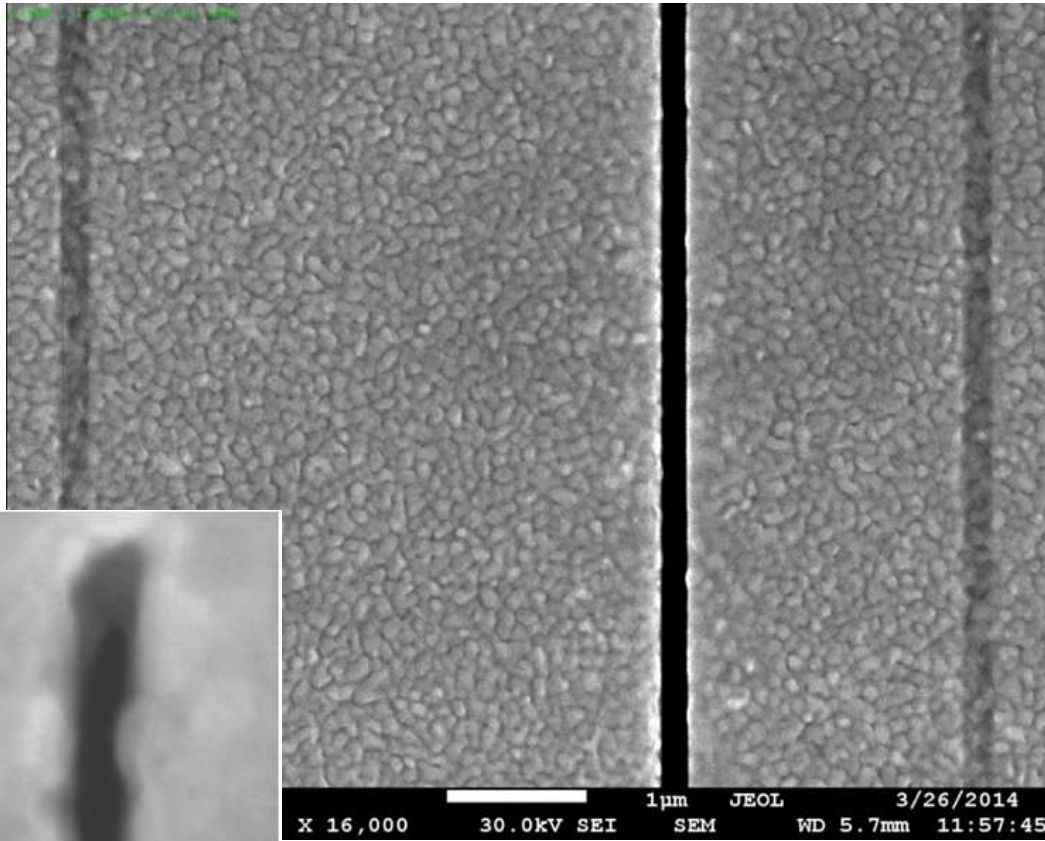
$$\alpha = R^3 \frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d}$$

$$\sigma_{tot} = 2\pi \frac{\omega}{c} \text{Im} \alpha$$

Landau damping (потери Ландау):

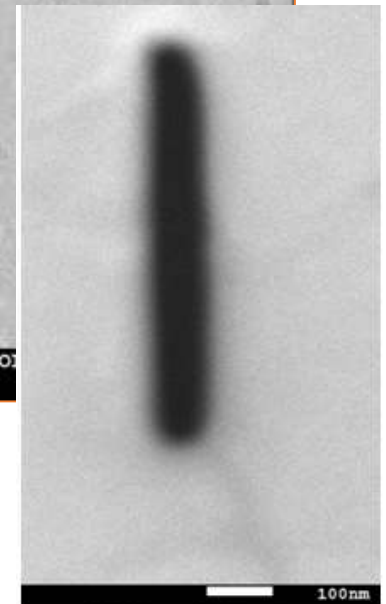
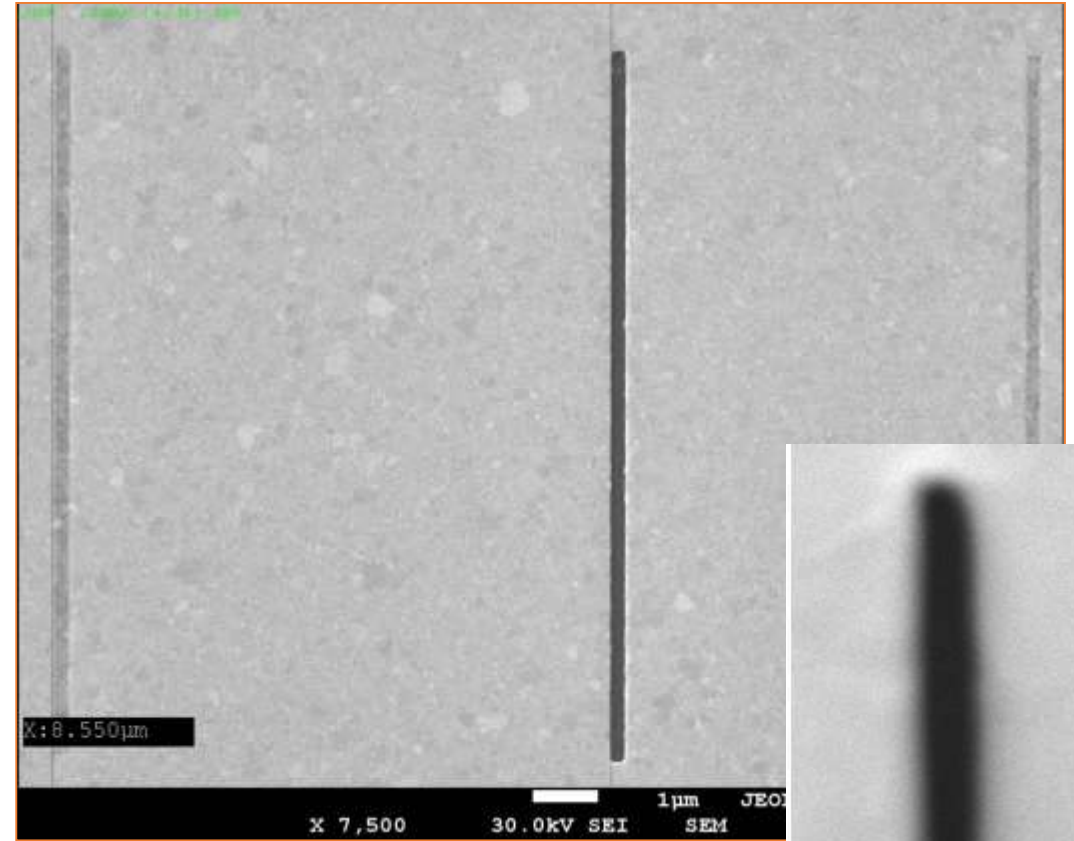


Рассеяние на шероховатостях



nanoslit in
polycrystalline
nanofilm

$$\alpha = R^3 \frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d}$$



nanoslit in
monocrystalline
nanofilm

$$\sigma_{tot} = 2\pi \frac{\omega}{c} \text{Im} \alpha$$

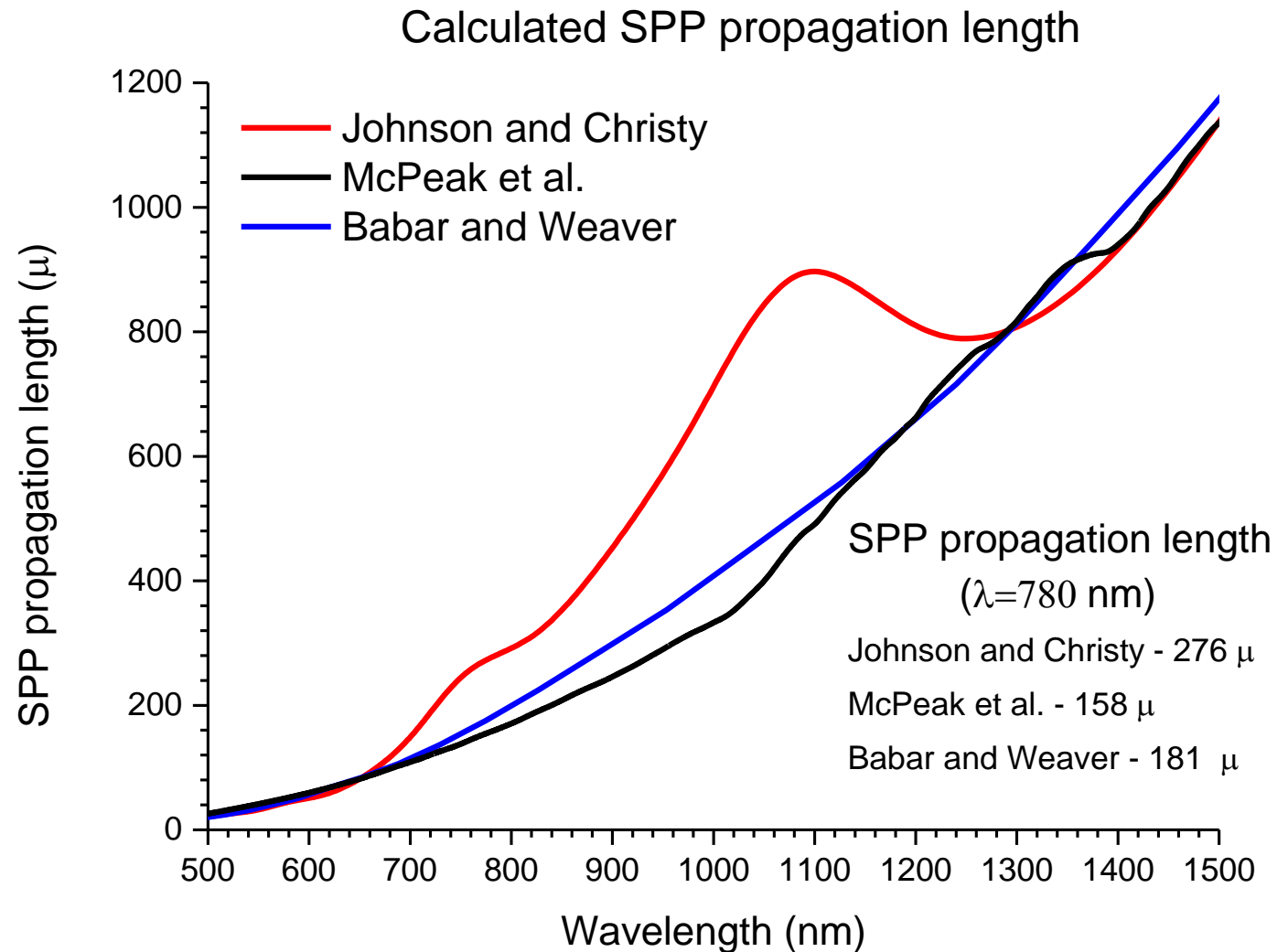
Теоретическая оценка длины распространения плазмонной волны

$$k_x'' = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\epsilon_m' \times \epsilon_d}{\epsilon_m' + \epsilon_d} \right)^{3/2} \frac{\epsilon_m''}{2(\epsilon_m')^2}$$

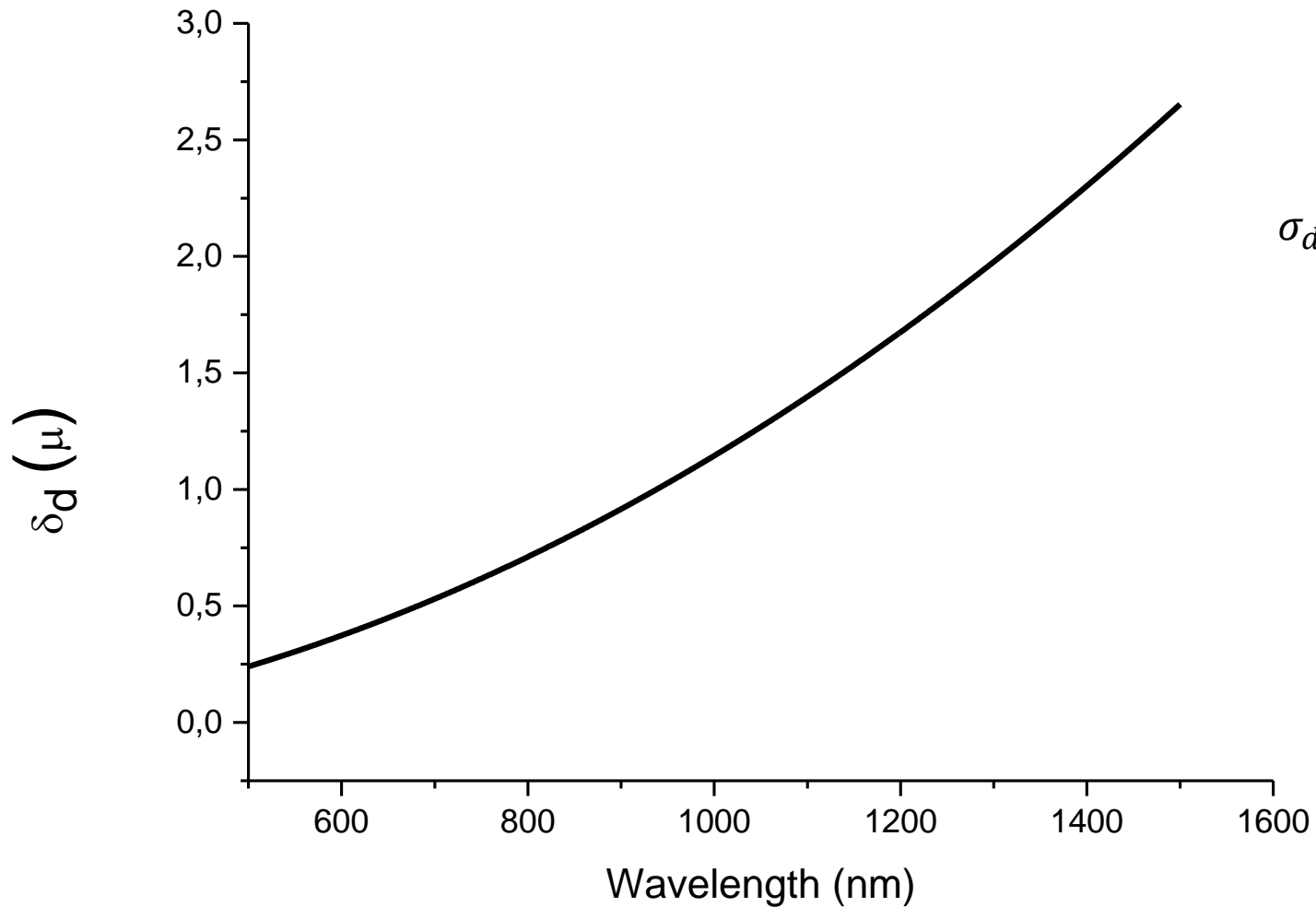
$$L_{prop} = \frac{1}{2k_x''}$$

Длина волны в вакууме 780 нм

	ϵ'	ϵ''	L_{prop}
Johnson and Christy 1972	-29,38	0,37	278,70
McPeak et al. 2015	-30,39	0,70	155,89
Babar and Weaver 2015	-29,69	0,58	180,30



Теоретическая оценка локализации плазмонной волны



$$\sigma_d(\omega) = \frac{1}{\left| \sqrt{\epsilon_d(\omega)(\omega/c)^2 - k_{spp}^2} \right|}$$

$$k_{spp}(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \times \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}}$$

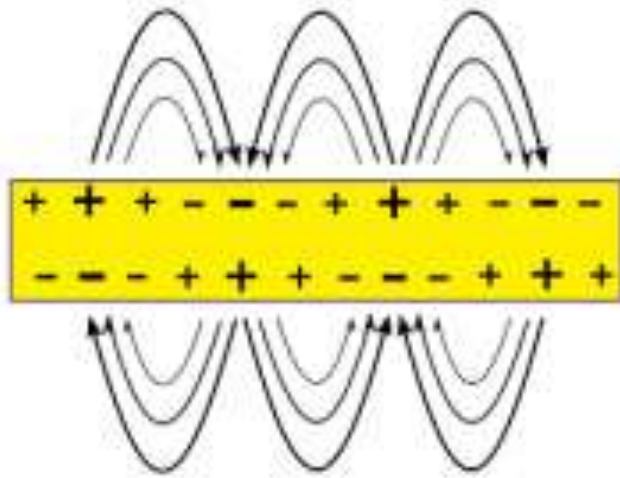
Основные параметры плазмонных волноводов

- Длина распространения плазмонной волны
- Поперечный размер волновода, размер моды
- Пропускная способность, дисперсия групповой скорости
- FoM (figure of merit) $\sim L_{prop} / \sqrt{S_{mode}}$

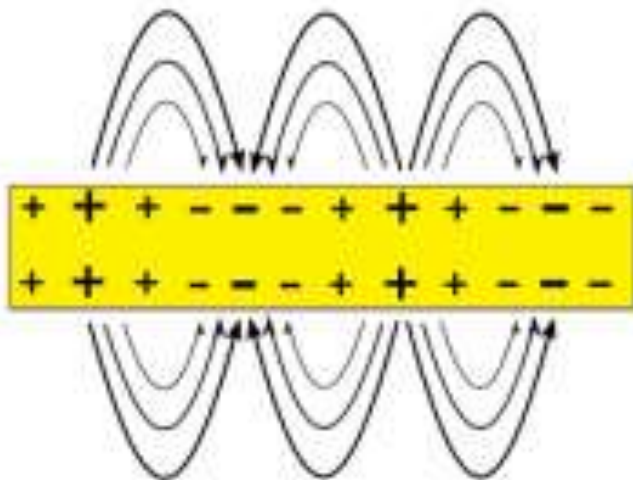
Основные виды плазмонных волноводов

- Волноводы диэлектрик-металл-диэлектрик (LRSPS waveguide)
- Волноводы металл-диэлектрик-металл (Gap SPPs waveguide, channel waveguide)
- Диэлектрические нагруженные волноводы
- Гибридные плазмонные волноводы
- SPP guided by metal stripes
- Nanowire plasmonic waveguides

Волноводы диэлектрик-металл-диэлектрик



Антисимметричная
мода
(Long-range SPPs)



Симметричная мода
(Short-range SPPs)

$$\tanh(k_z^{(m)} t / 2) = -(\varepsilon_m k_z^{(d)}) / (\varepsilon_d k_z^{(m)})$$

$$k_z^{(m,d)} = \sqrt{k_{\text{LRSPP}}^2 - \varepsilon_{m,d} k_0^2}$$

$$k_{\text{LRSPP}} \approx k_0 \sqrt{\varepsilon_d + (t k_0 \varepsilon_d / 2)^2 \cdot [1 - (\varepsilon_d / \varepsilon_m)]^2}$$

При ($t \rightarrow 0$) $k_{\text{LRSPP}} \rightarrow \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_d}$

$$\tanh(k_z^{(m)} t / 2) = -(\varepsilon_d k_z^{(m)}) / (\varepsilon_m k_z^{(d)})$$

$$k_z^{(m,d)} = \sqrt{k_{\text{SRSPP}}^2 - \varepsilon_{m,d} k_0^2}$$

$$k_{\text{SRSPP}} \approx k_0 \sqrt{\varepsilon_d + [2\varepsilon_d / (t k_0 \varepsilon_m)]^2}$$

При ($t \rightarrow 0$) $k_{\text{SRSPP}} \rightarrow \infty$

Волноводы диэлектрик-металл-диэлектрик

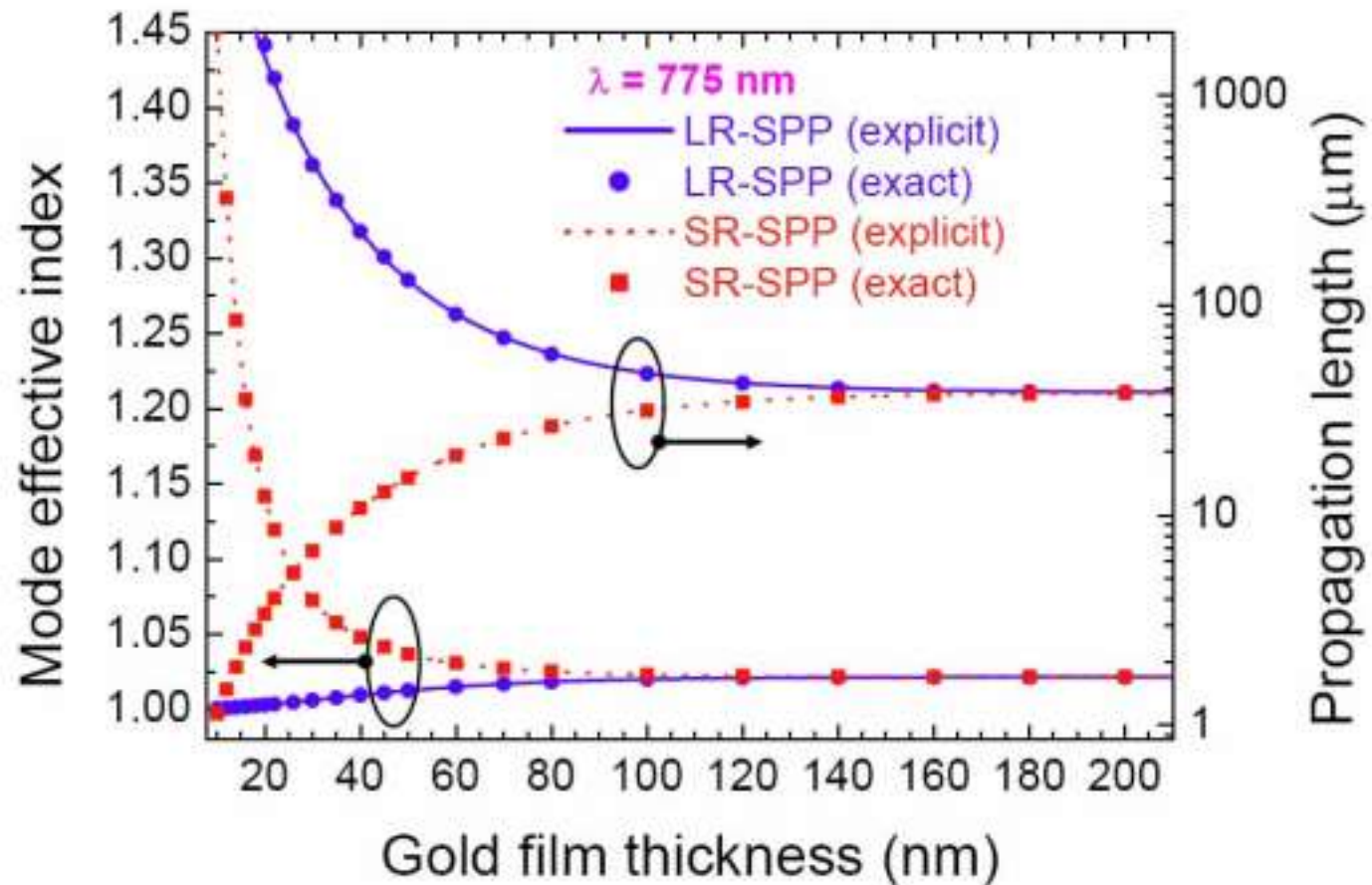
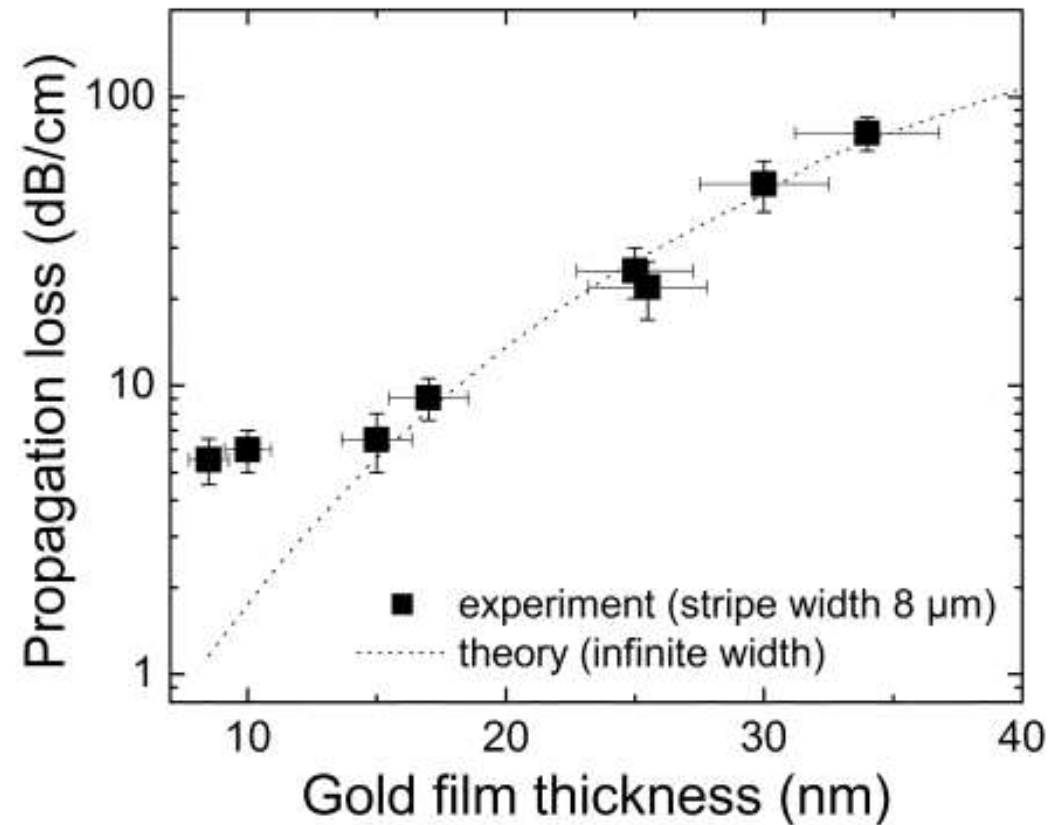
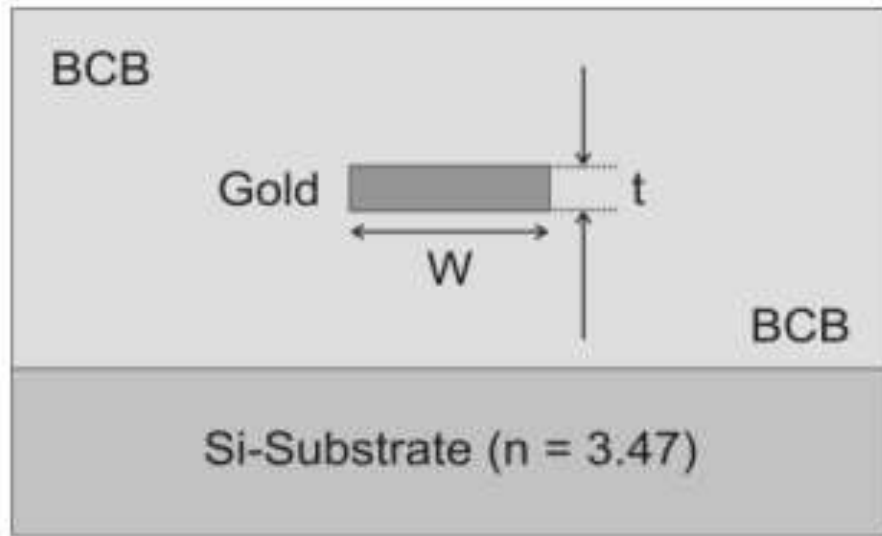


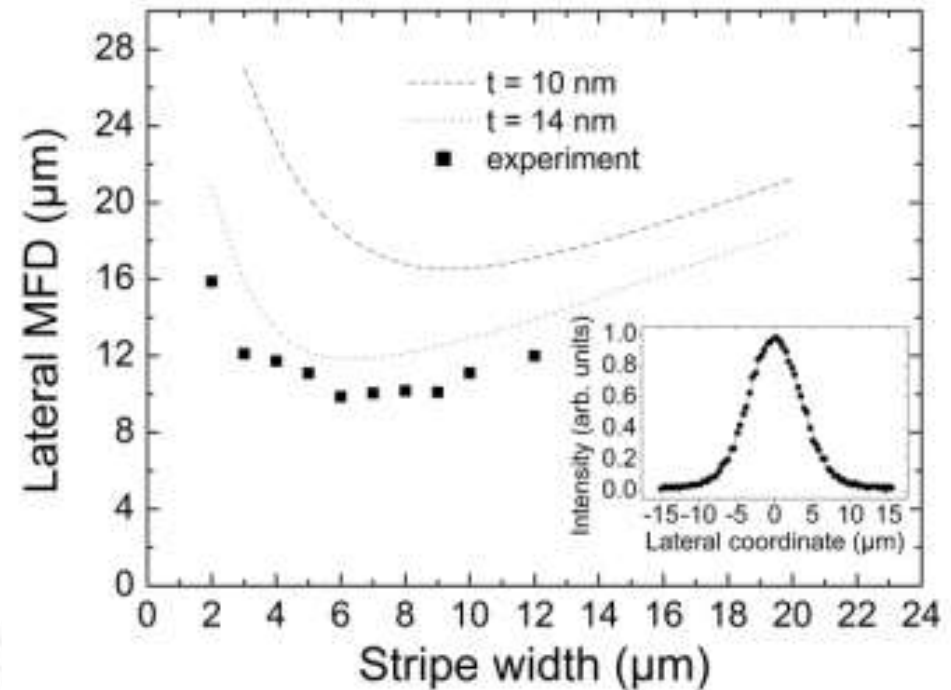
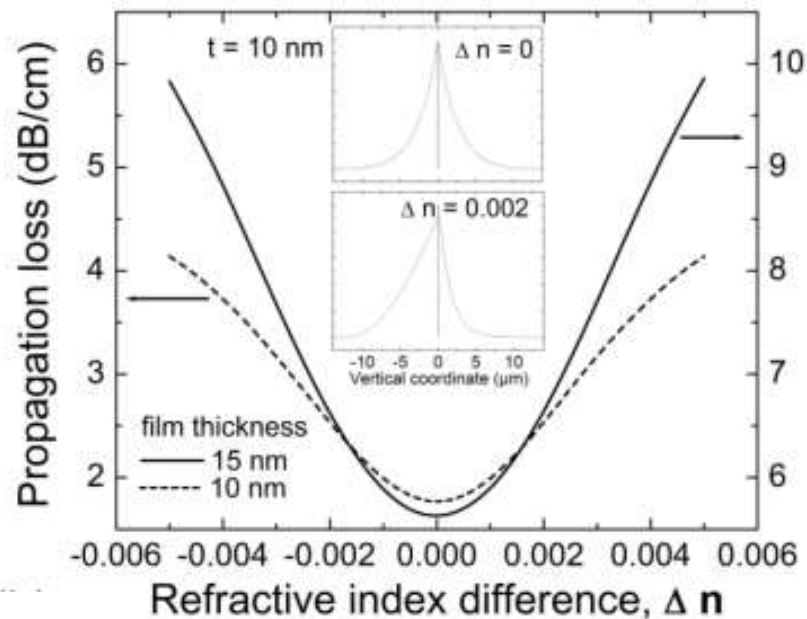
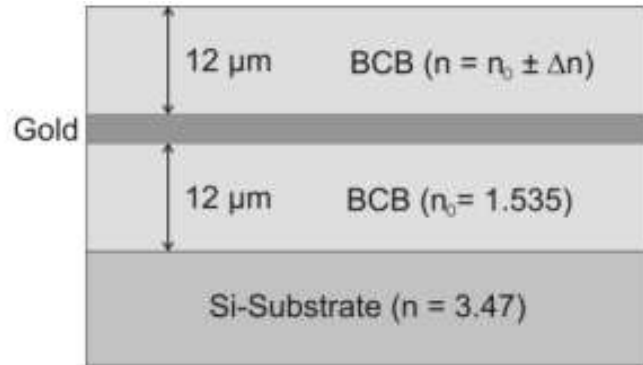
Fig. 2. The effective indexes of SPP modes and their propagation lengths at the excitation light wavelength of 775 nm for a thin gold film surrounded by air.

Волноводы диэлектрик-металл-диэлектрик



Experimental measurements of the propagation loss dependence on the thickness of the 8- μ m-wide stripe at the wavelength of 1550 nm

Волноводы диэлектрик-металл-диэлектрик

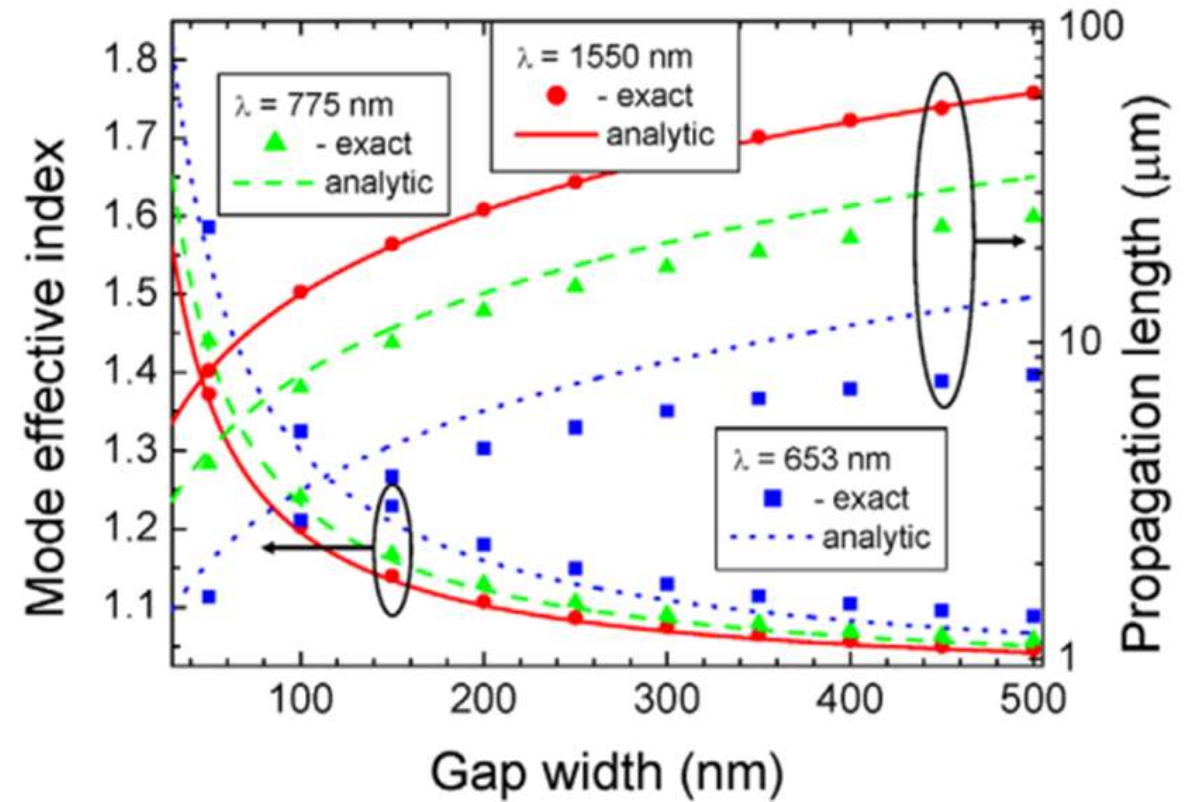
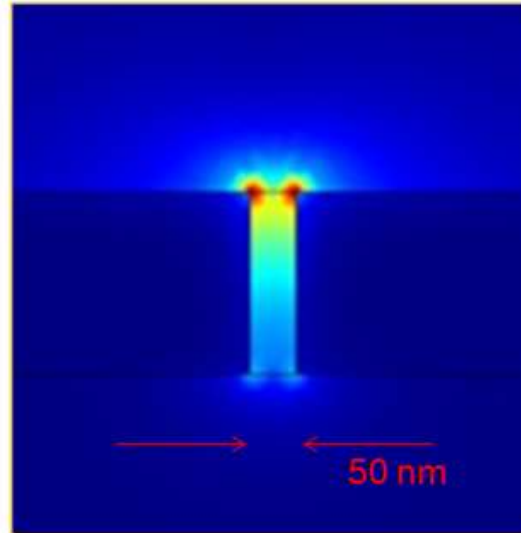
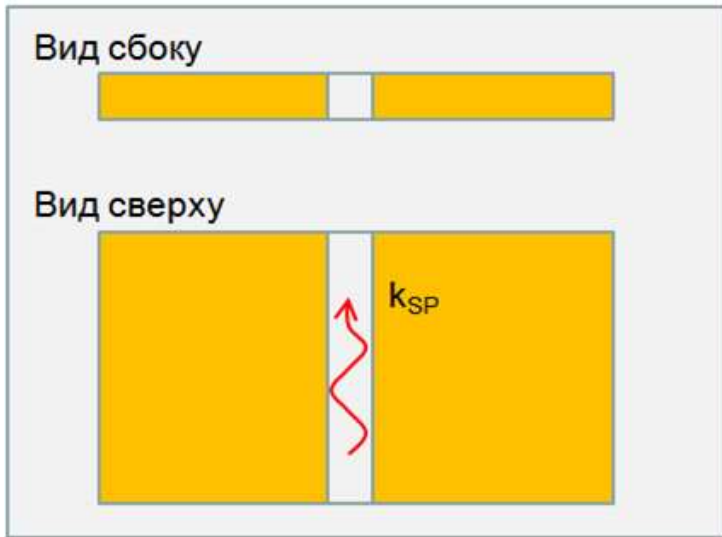


Lateral mode-field diameter (MFD)

Dependence of the LR-SPP propagation loss on the refractive-index difference between two polymer claddings

Волноводы металл-диэлектрик-металл

Gap SPPs waveguide



$$\tanh(k_z^{(d)} t/2) = -(\varepsilon_d k_z^{(m)}) / (\varepsilon_m k_z^{(d)})$$

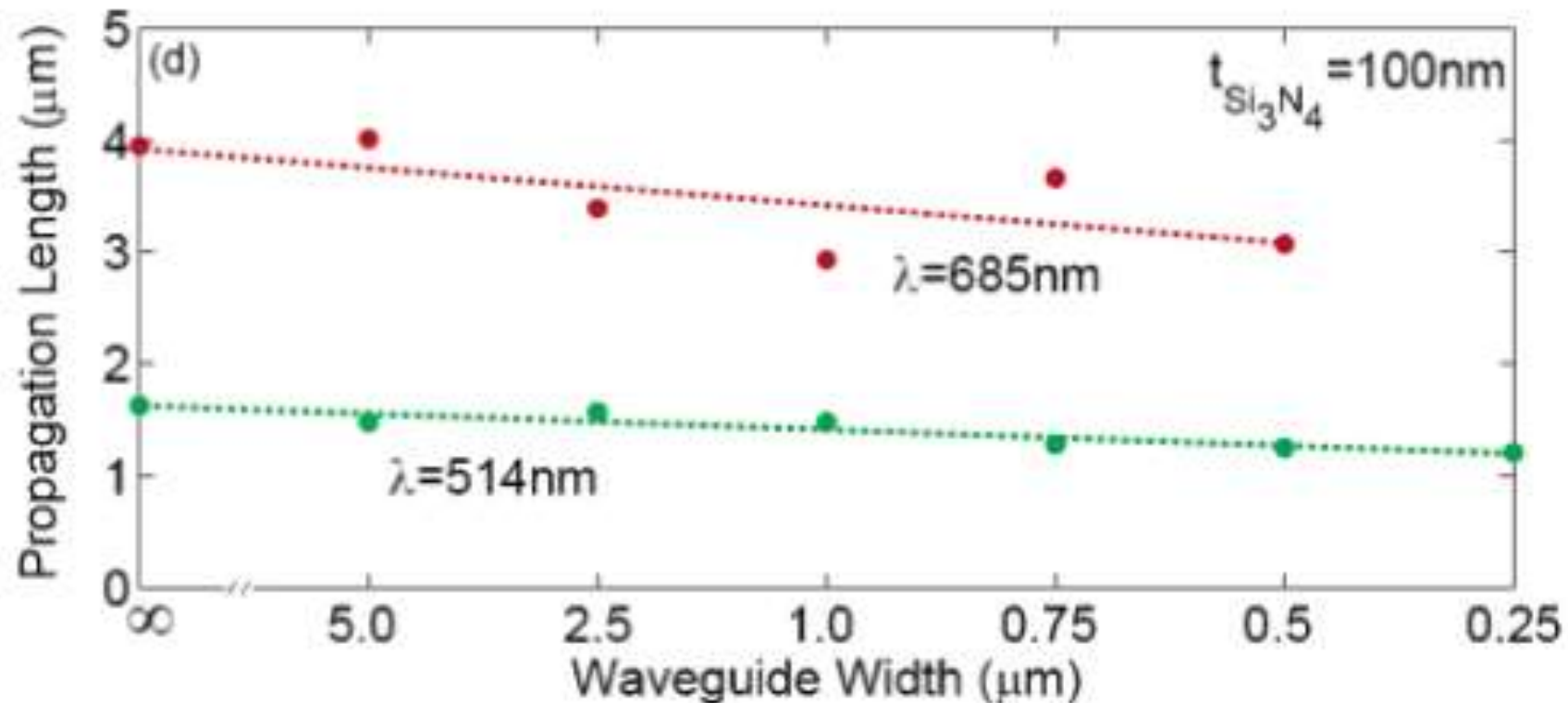
$$k_z^{(m,d)} = \sqrt{k_{GSPP}^2 - \varepsilon_{m,d} k_0^2}$$

$$k_{GSPP} \approx k_0 \sqrt{\varepsilon_d + \frac{2\varepsilon_d \sqrt{\varepsilon_d - \varepsilon_m}}{k_0 t (-\varepsilon_m)}}$$

При $(t \rightarrow 0)$ $k_{GSPP} \rightarrow \infty$

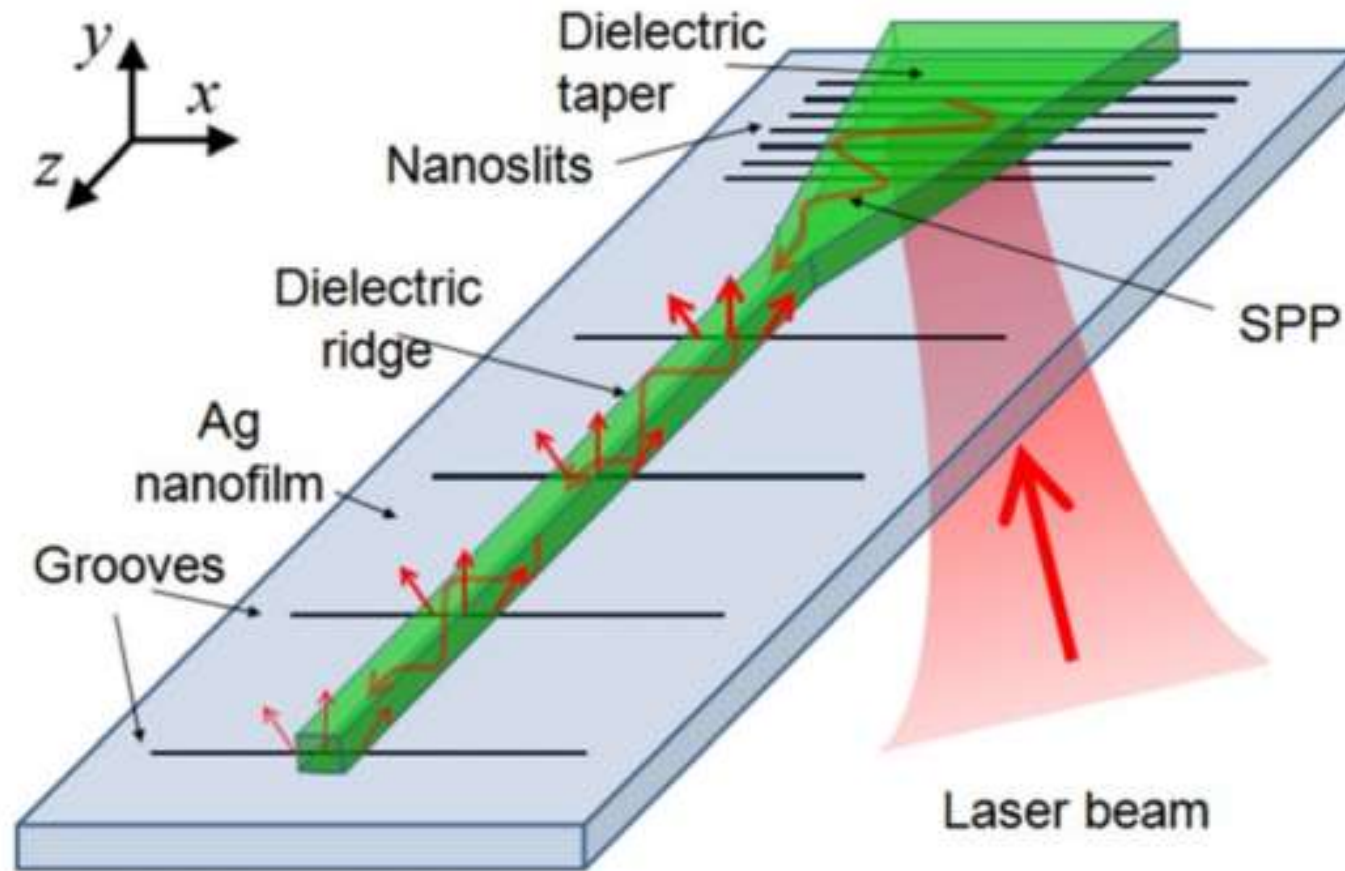
Figure 6. The G-SPP mode effective index and propagation length as a function of the width t of air gap in gold for several light wavelengths calculated exactly (equation (13)) and with the analytic expression. Adapted with permission from [40]. Copyright 2008 The Optical Society of America.

Волноводы металл-диэлектрик-металл Gap SPPs waveguide



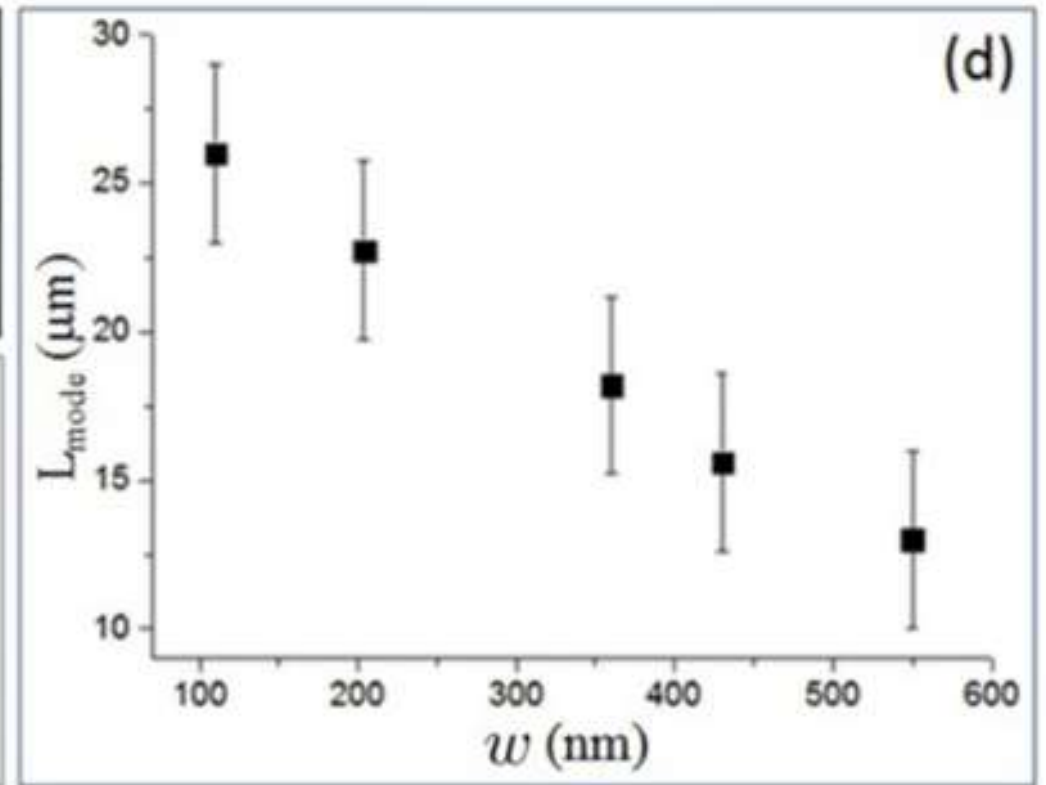
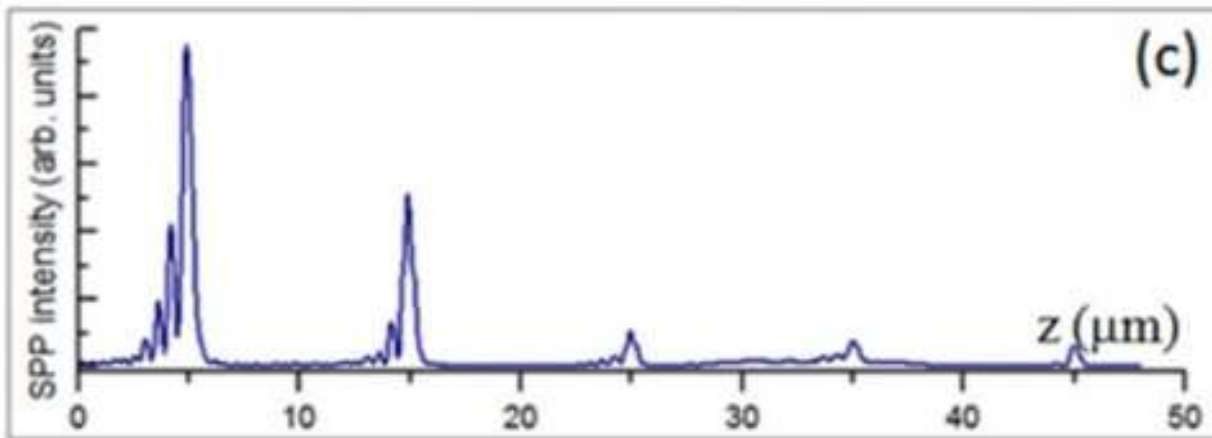
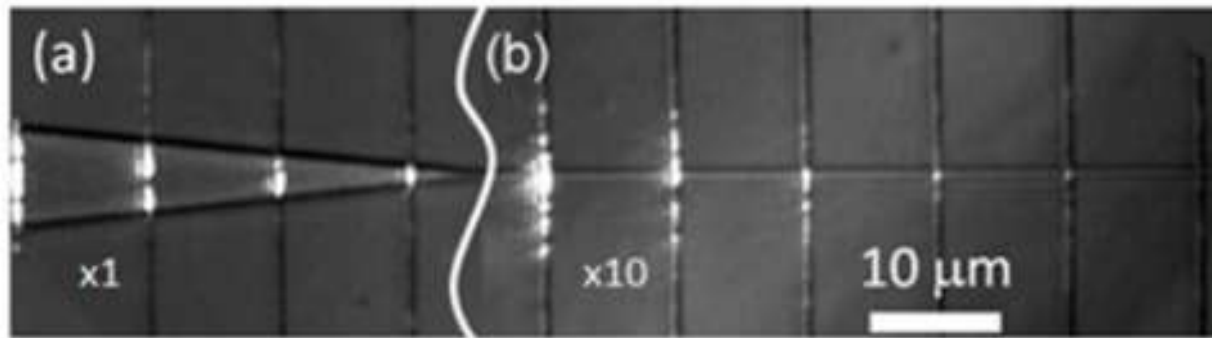
Dionne J. A., Lezec H. J., Atwater H. A. Highly confined photon transport in subwavelength metallic slot waveguides //Nano letters. – 2006. – T. 6. – №. 9. – С. 1928-1932.

Диэлектрические нагруженные волноводы

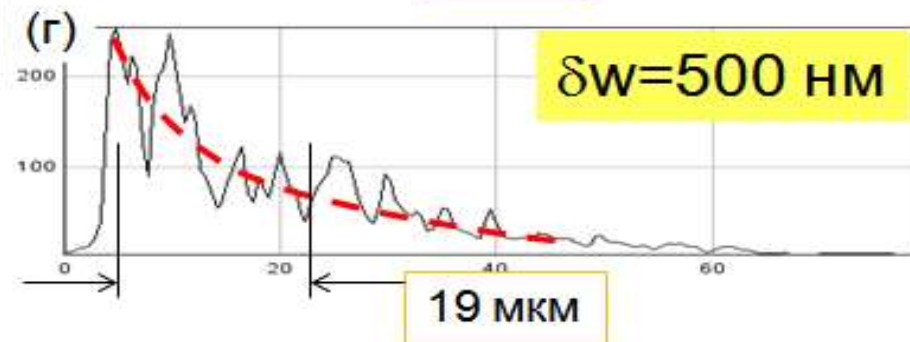
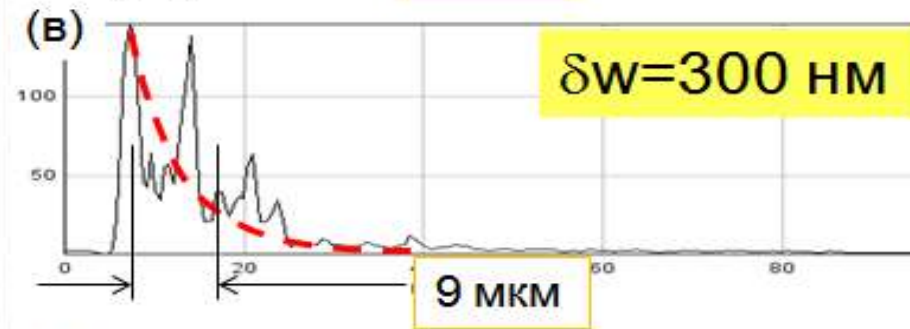
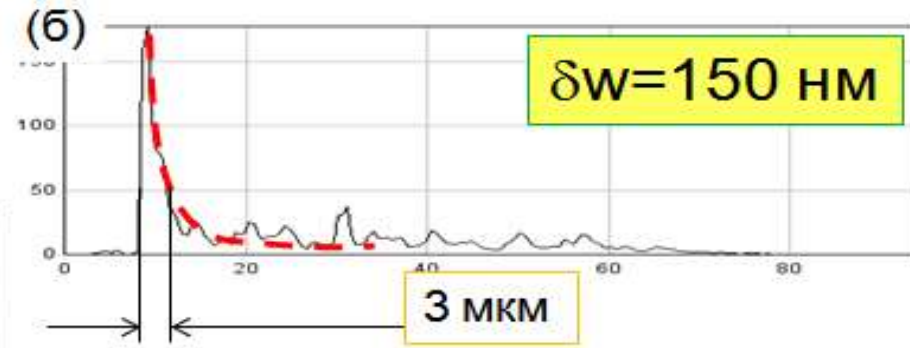
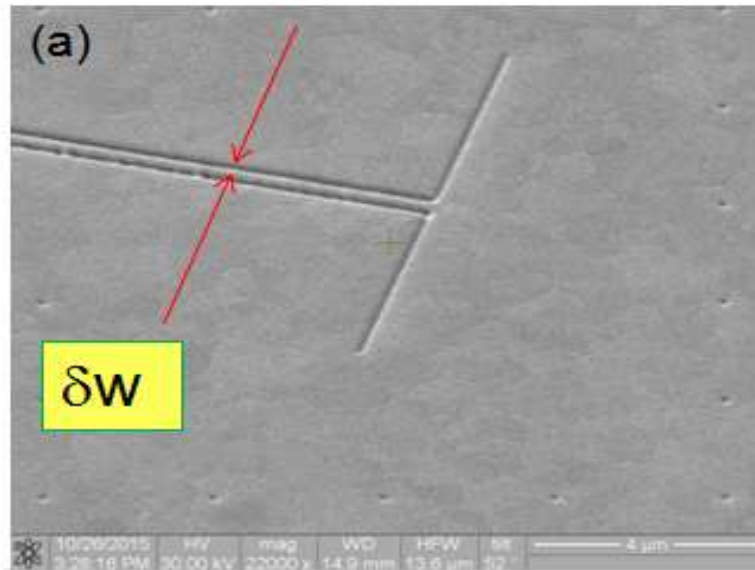


Melentiev P. N. et al. Dielectric-loaded plasmonic waveguide in the visible spectral range //Laser Physics Letters. – 2017. – T. 14. – №. 12. – С. 126201.

Диэлектрические нагруженные волноводы

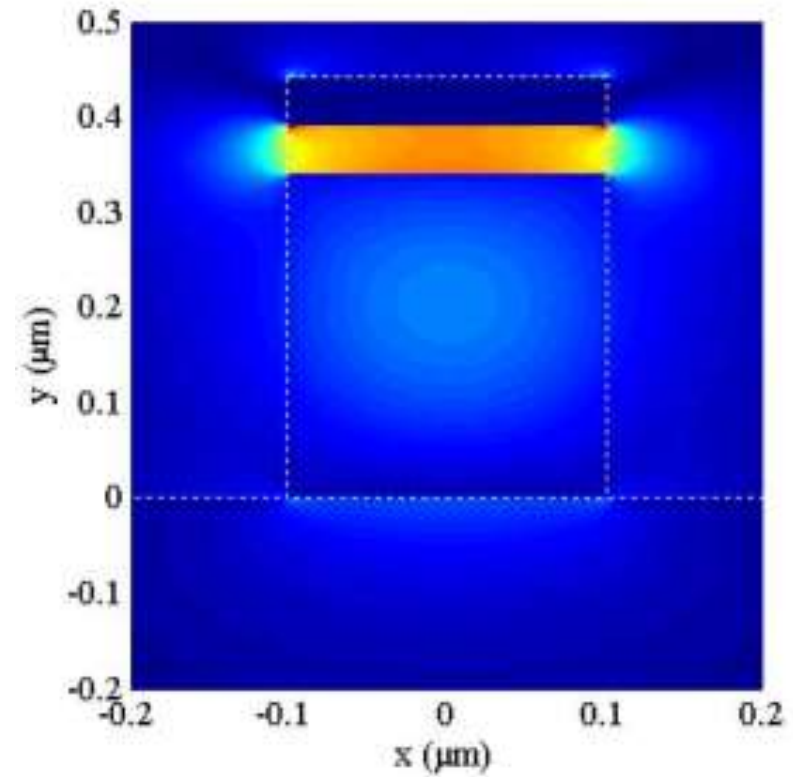
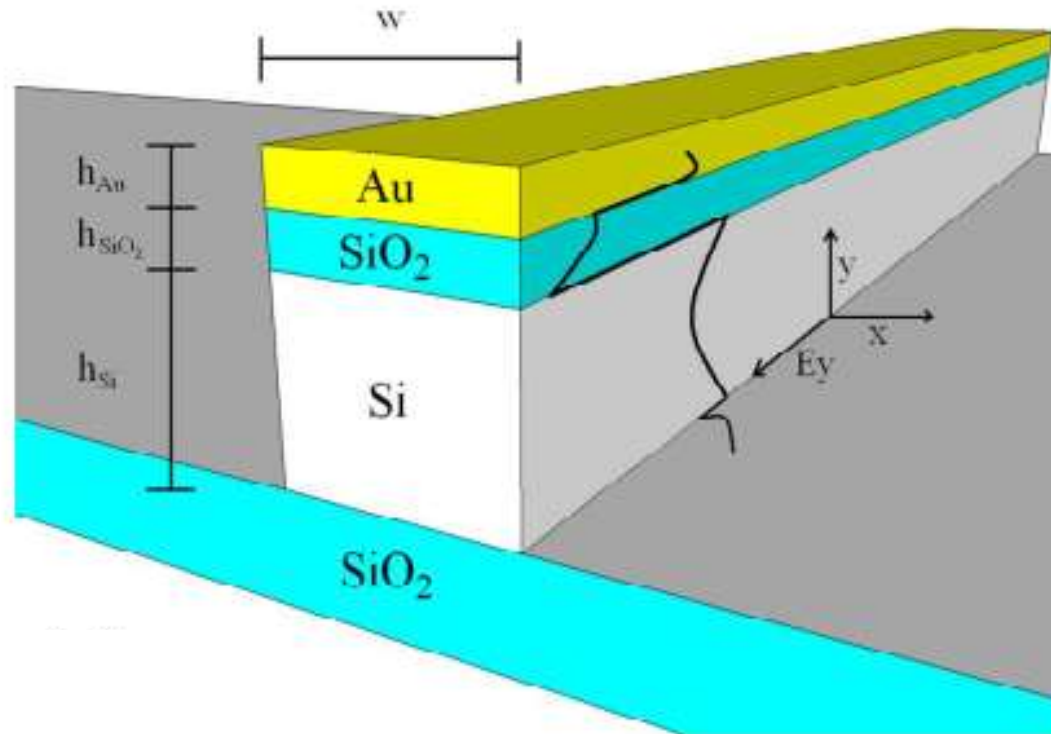


Волноводы образованные металлическими полосками SPP guided by metal stripes

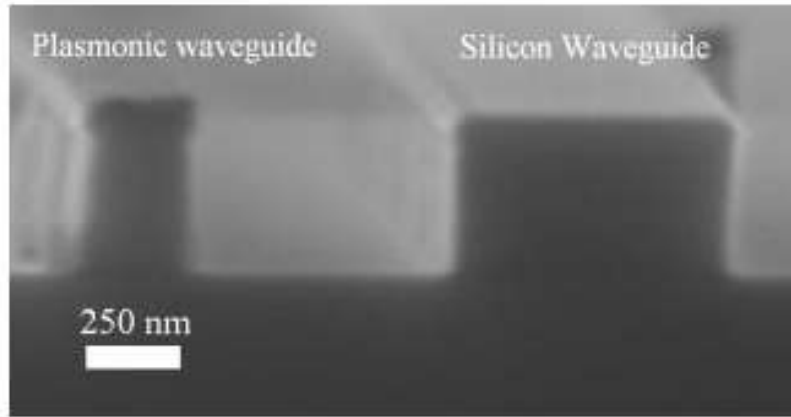


Гибридные плазмонные волноводы

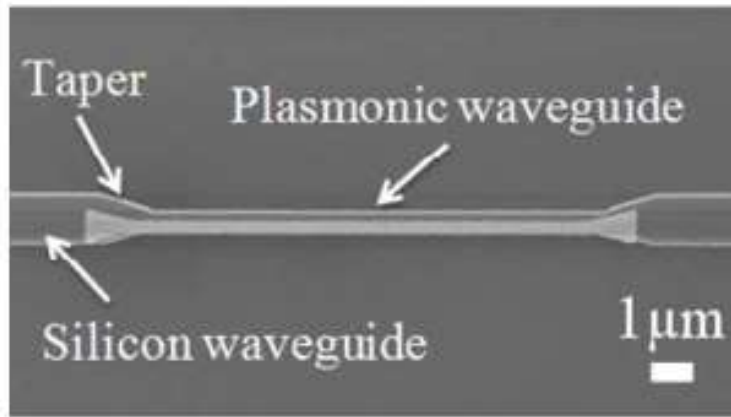
Hybrid SPP waveguides



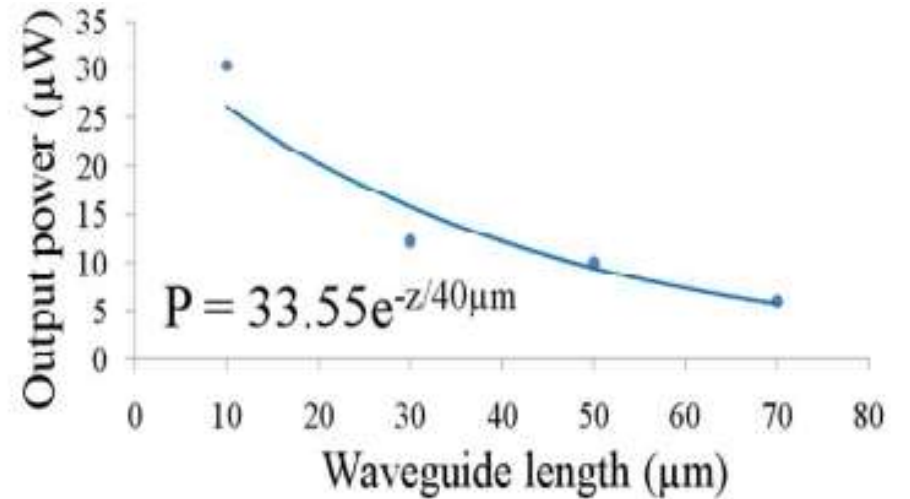
Волноводы образованные металлическими полосками SPP guided by metal stripes



(a)



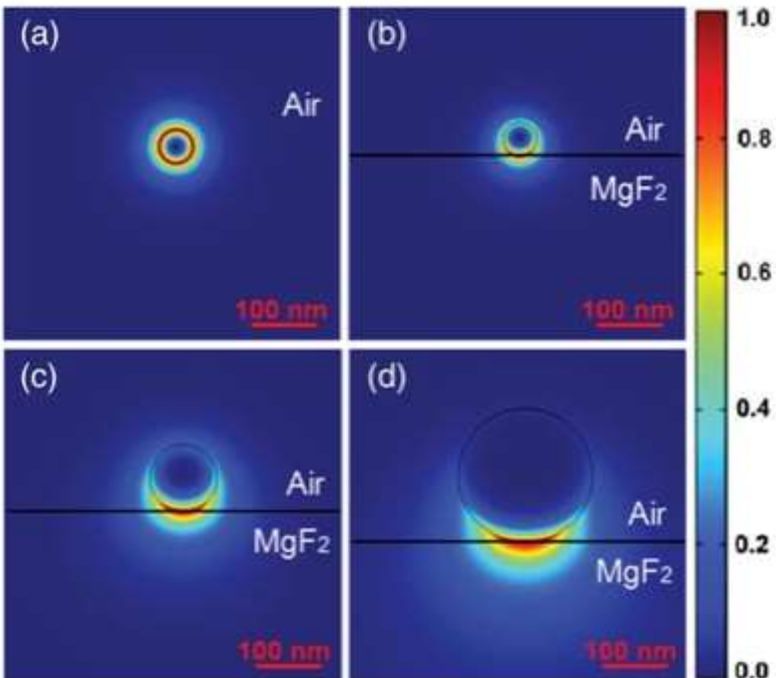
(b)



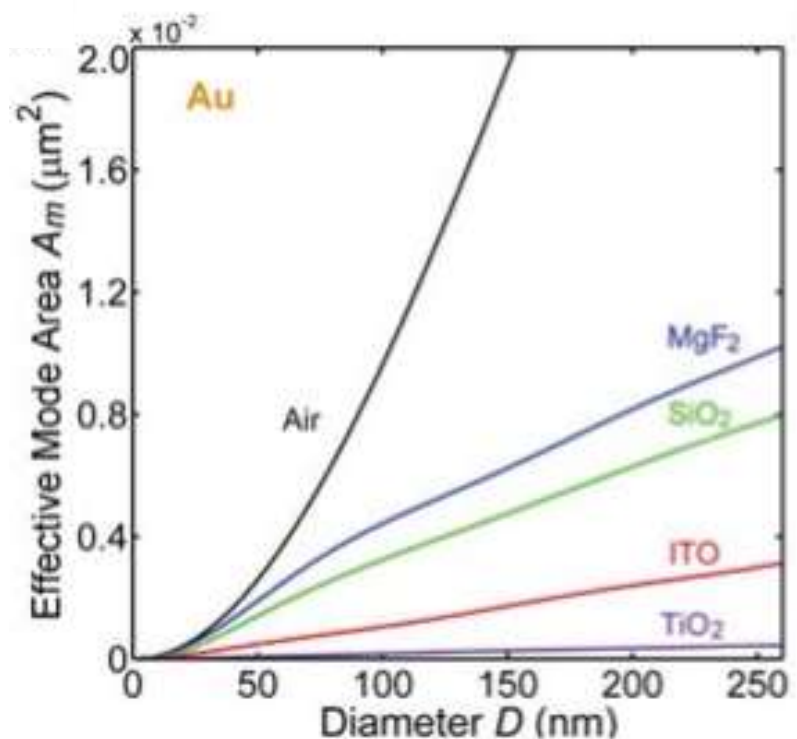
(c)

(a) SEM image showing the cross section of a 250nm-wide CGS plasmonic waveguide (left) beside a 600nm-wide Si waveguide for comparison. The Si layer is 340nm high with a 50nm-thick layer of SiO_2 on top. The plasmonic waveguide is capped with an extra 50nm-thick gold layer. (b) Top-view SEM image showing the CGS waveguide, the taper couplers and I/O silicon waveguides. (c) Measured values (dots) and fitted curve (blue line) of the transmitted powers of CGS waveguides of different lengths.

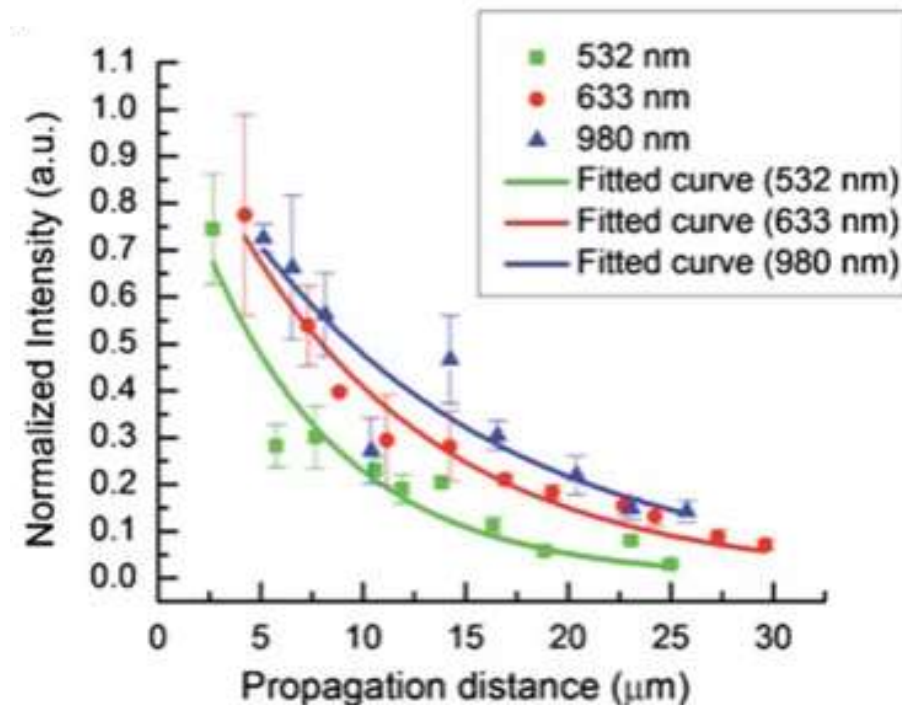
Nanowire plasmonic waveguides



Energy distribution. The diameters of the nanowire from (a) to (d) are 50, 50, 100 and 200 nm



Effective mode area



Experimental measuring of propagation losses in a Ag nanowire

Y. P. Wang, Y. G. Ma, X. Guo, and L. M. Tong, Opt. Express **20**, 19006–19015 (2012)

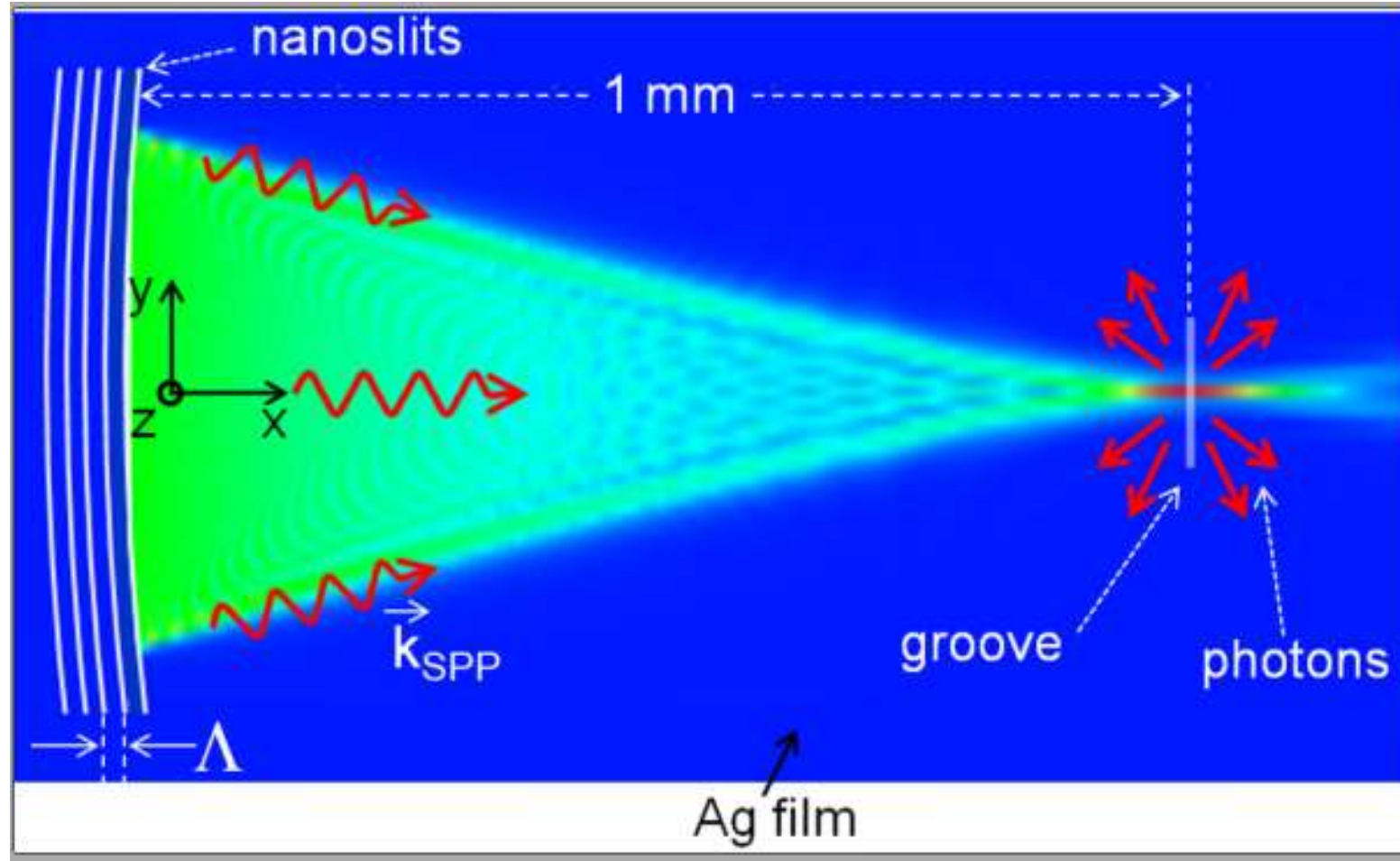
Y. G. Ma, X. Y. Li, H. K. Yu, L. M. Tong, Y. Gu, and Q. H. Gong, Opt. Lett. **35**, 1160–1162 (2010).

Сравнение плазмонных волноводов

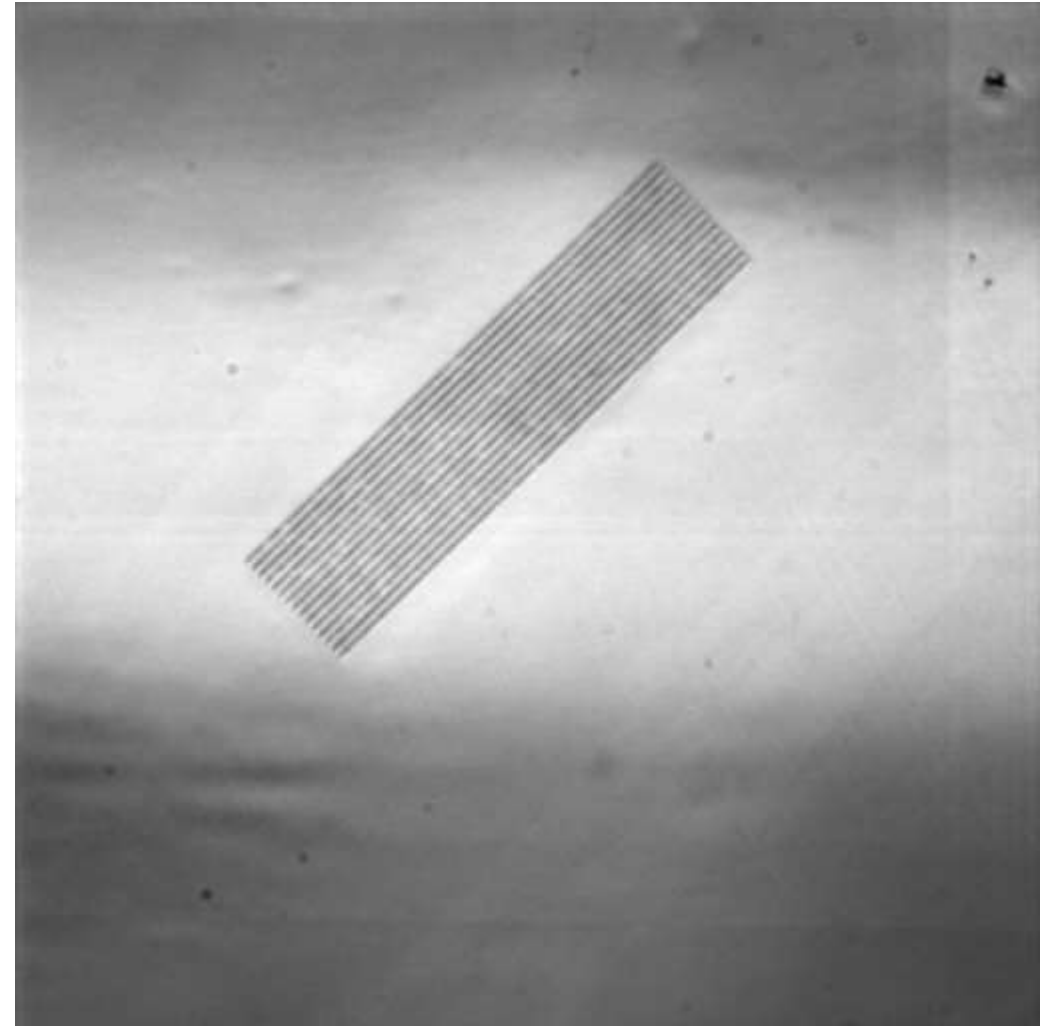
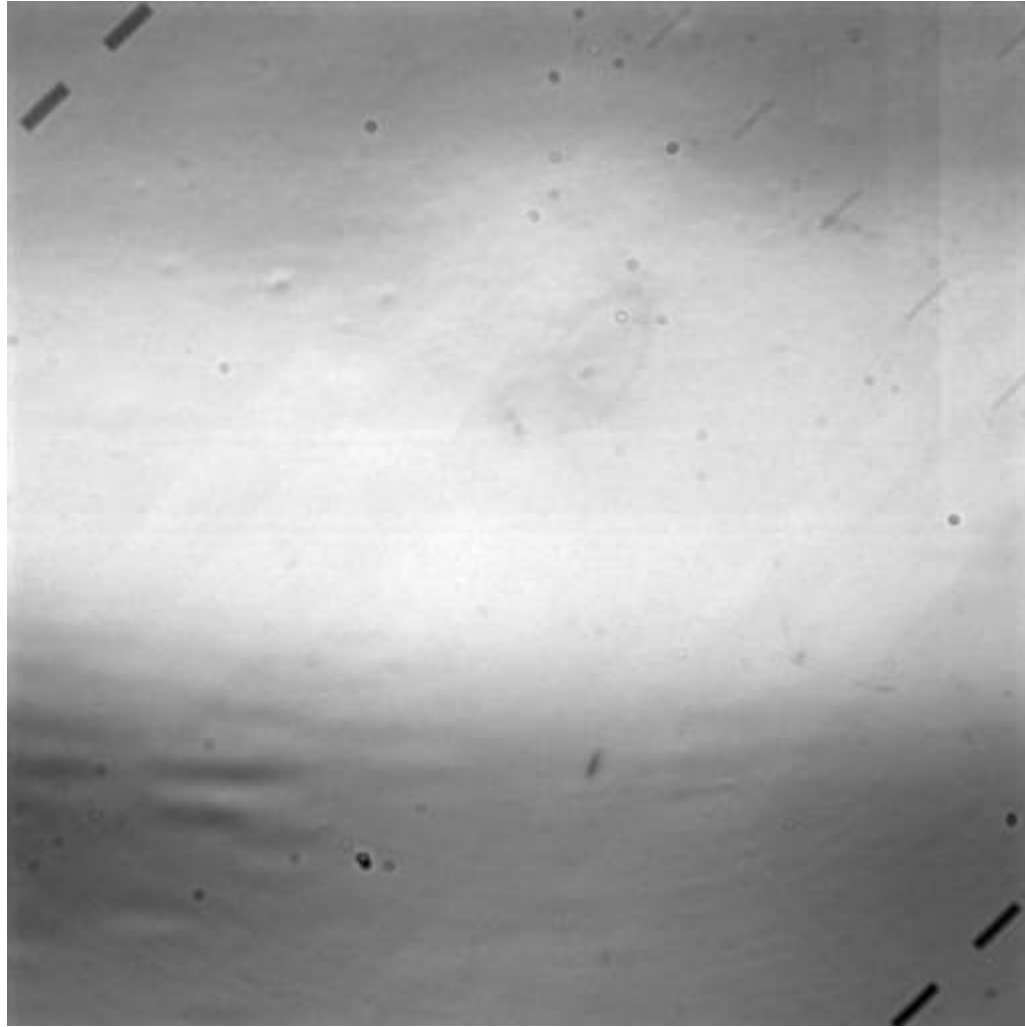
Waveguide	LR-SPPW	DLSPWP	LR-DLSPWP	CPP	HSPPW
A_e (μm^2)	62.3	0.241	1.16	0.182	0.0588
w_0 (μm)	12.3	0.96	1.51	0.27	0.367
L_p (μm)	7451	49.4	3125	19.7	26.7

Han Z., Bozhevolnyi S. I. Radiation guiding with surface plasmon polaritons
//Reports on Progress in Physics. – 2012. – Т. 76. – №. 1. – С. 016402.

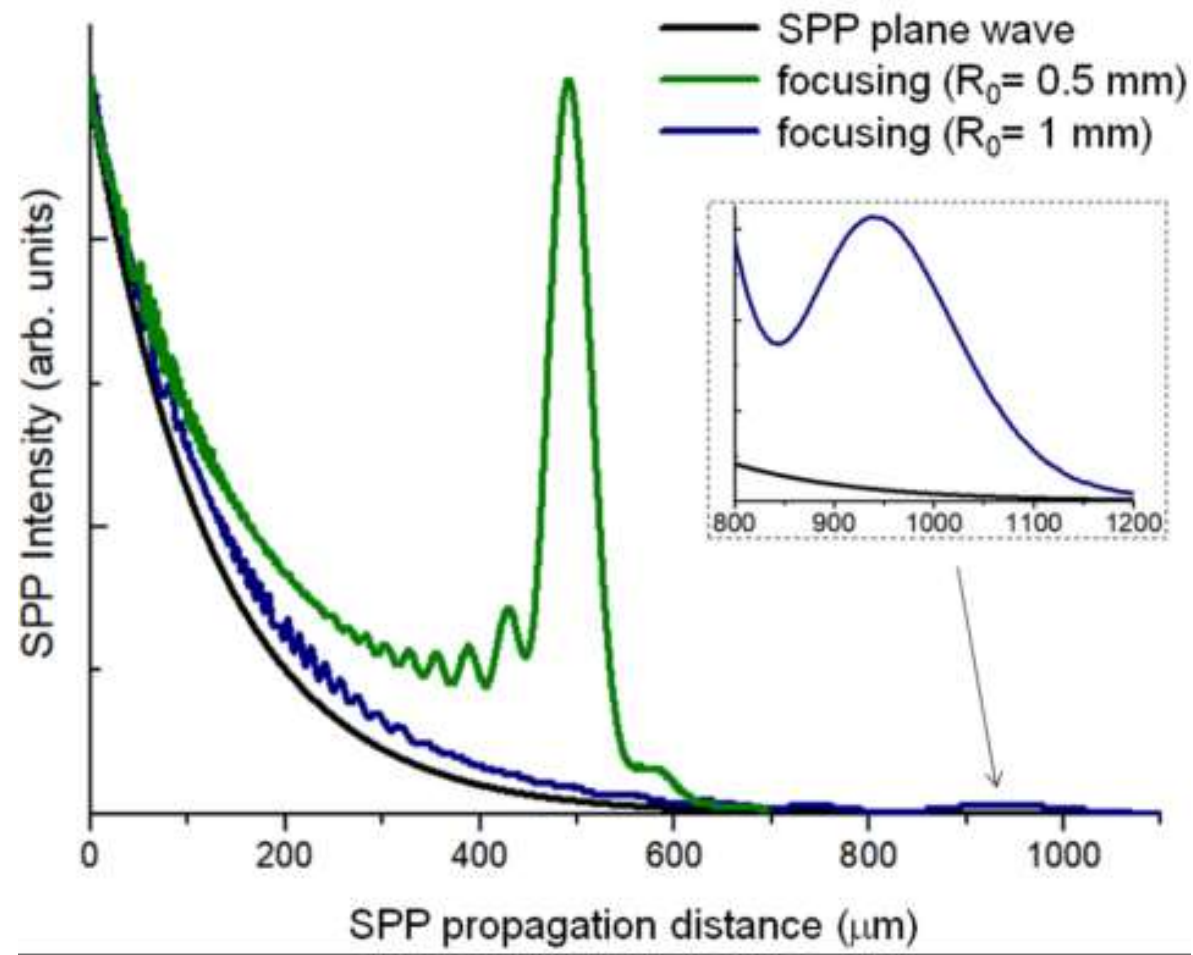
Open-type waveguide for SPP waves



Open-type waveguide for SPP waves



Open-type waveguide for SPP waves



Intensity distribution of the SPP waves

Open-type waveguide for SPP waves

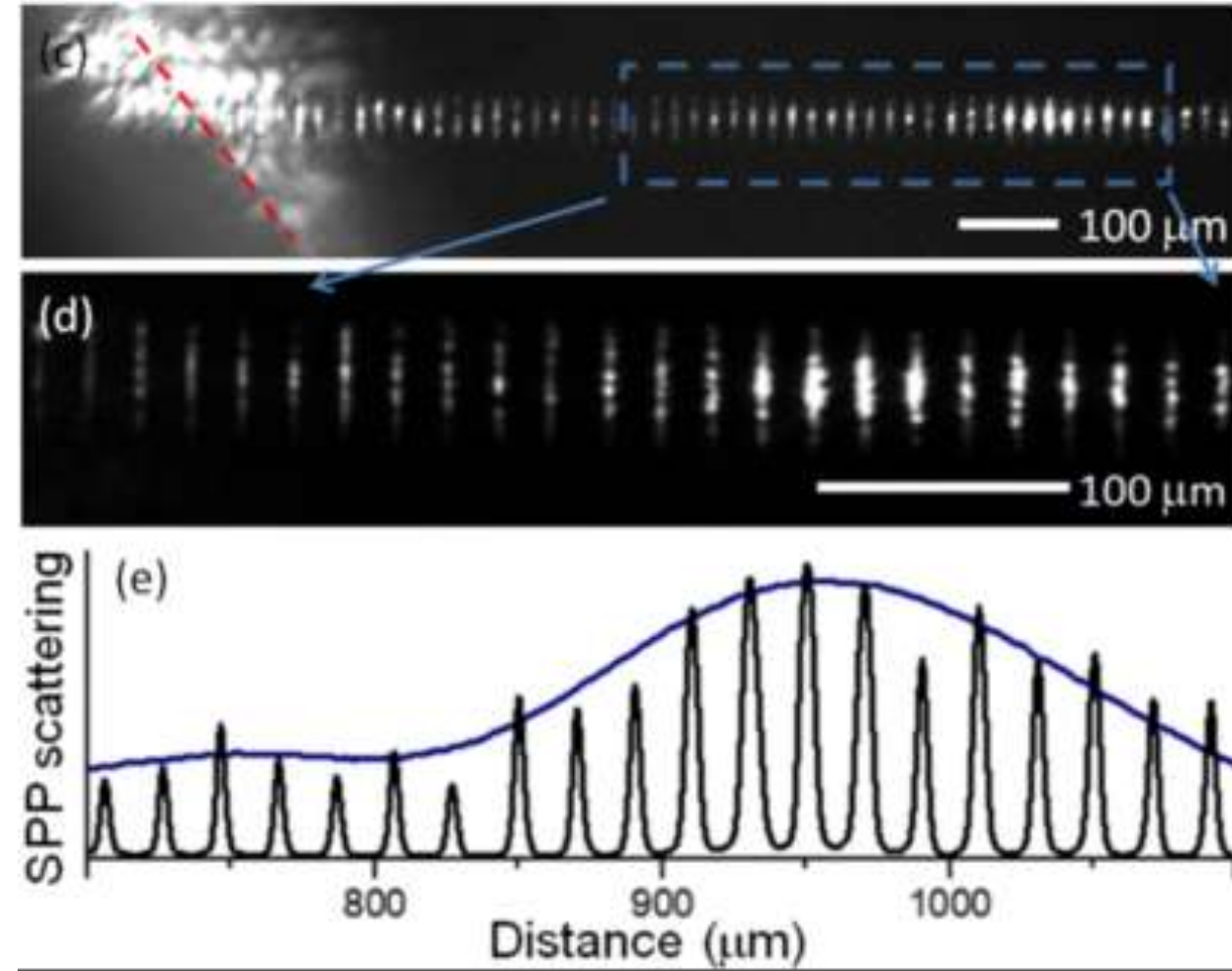
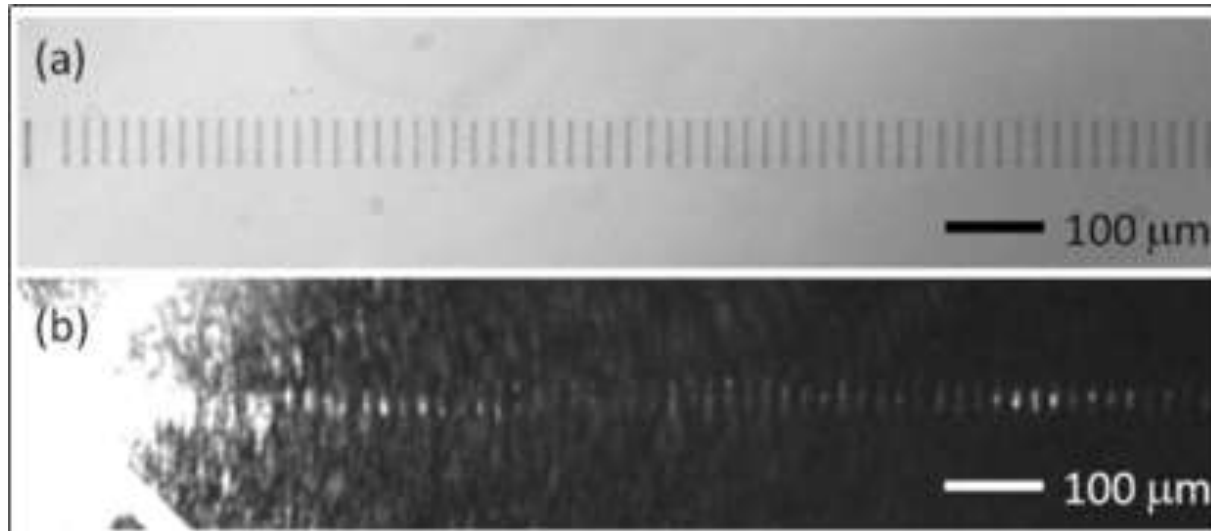
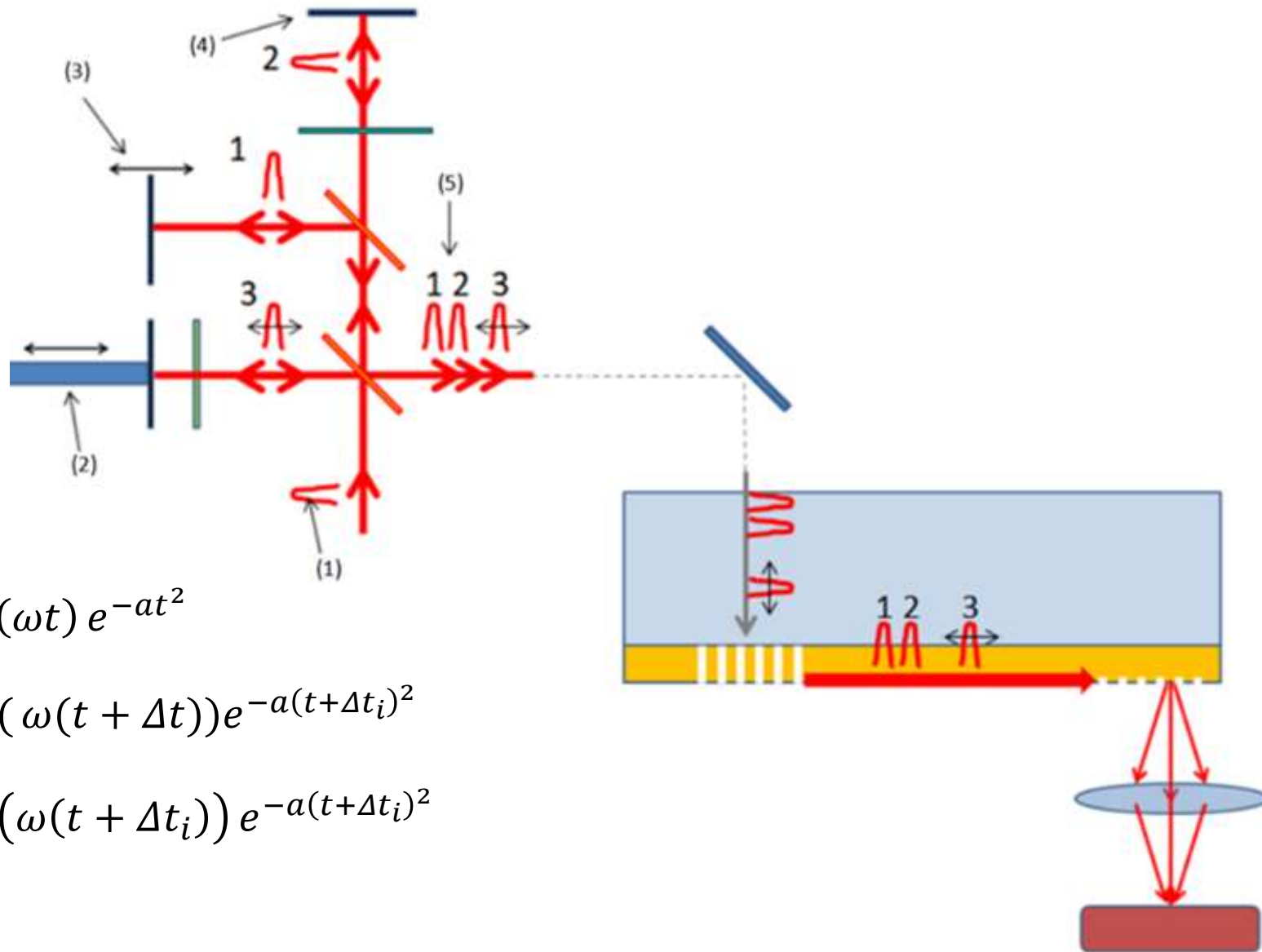


Схема измерения скорости передачи информации

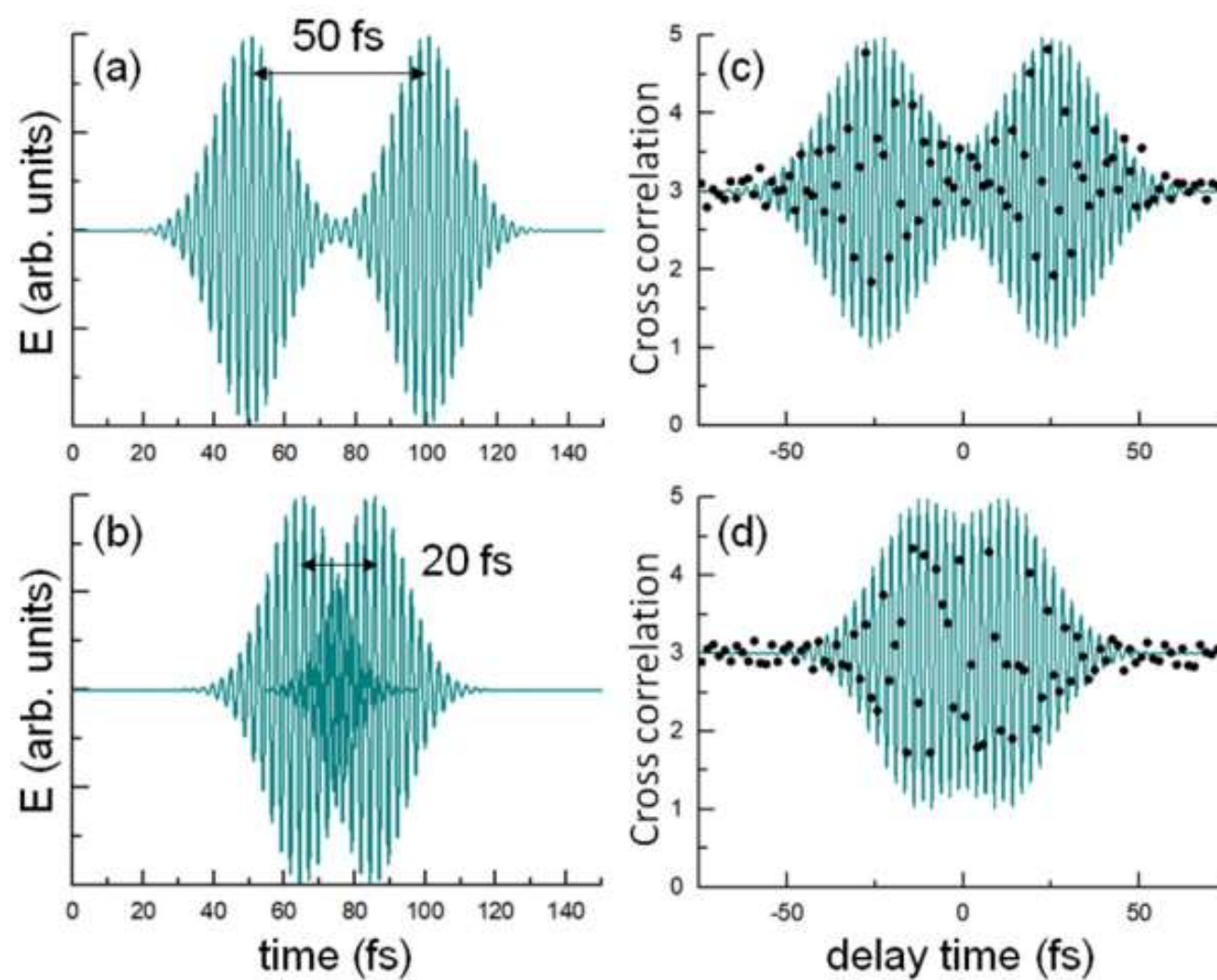


$$E_1(t) = E_0 \sin(\omega t) e^{-at^2}$$

$$E_2(t) = E_0 \sin(\omega(t + \Delta t)) e^{-a(t + \Delta t)^2}$$

$$E_3(t) = E_0 \sin(\omega(t + \Delta t_i)) e^{-a(t + \Delta t_i)^2}$$

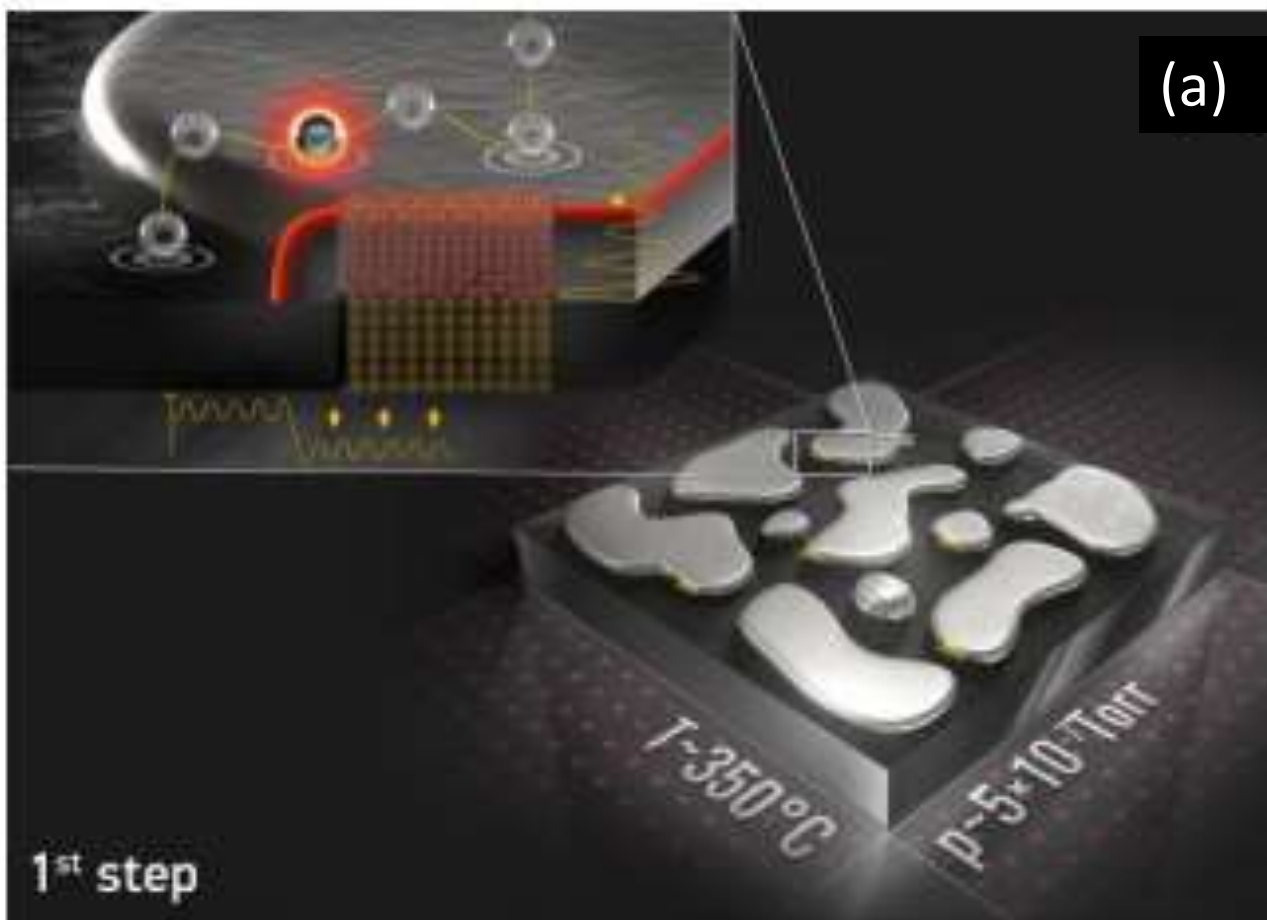
Измерение скорости передачи информации



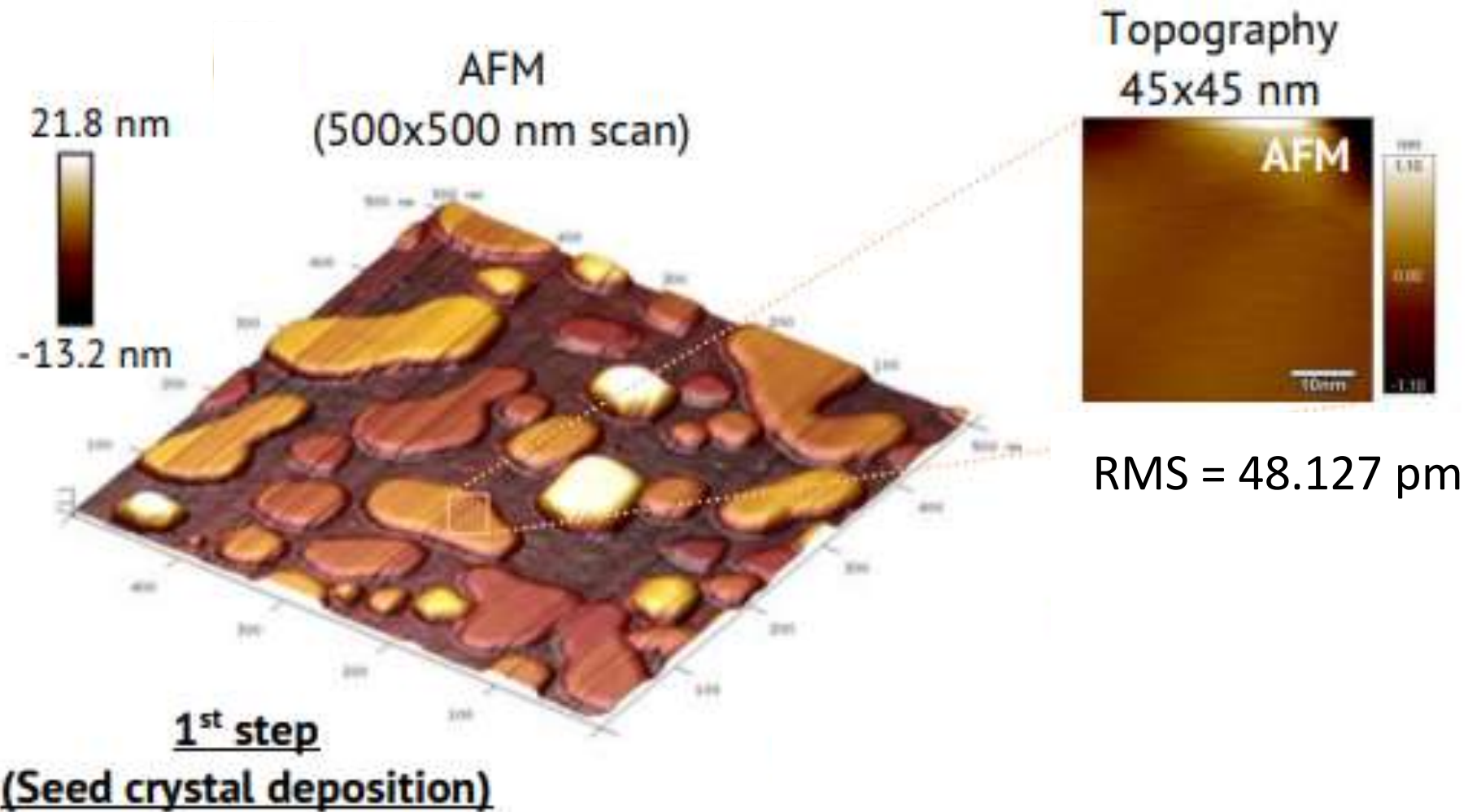
$$F_1^{SPP}(\tau) \sim \int_{-\infty}^{+\infty} \left(E_1^{spp}(t) + E_2^{spp}(t) + E_3^{spp}(t - \tau) \right)^2 dt$$

SCULL-метод создания монокристаллических серебряных пленок

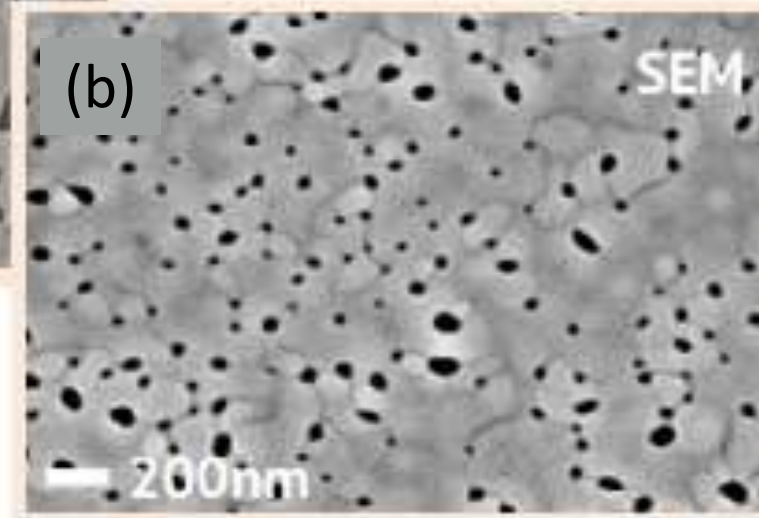
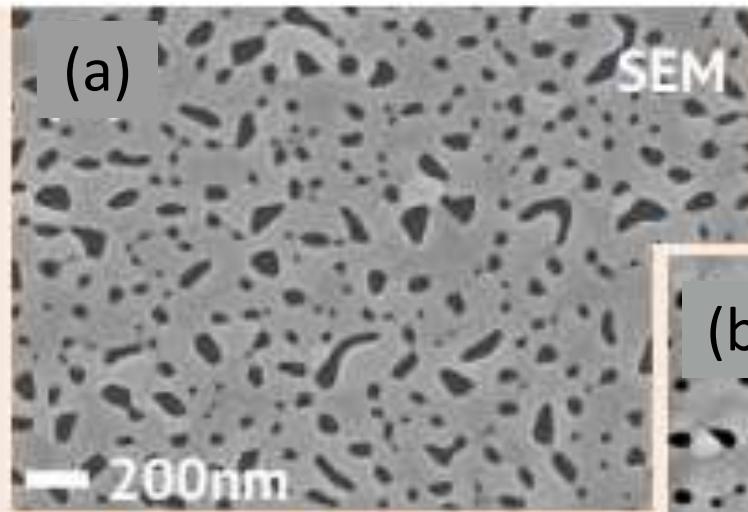
SCULL - Single-crystalline Continuous Ultra-smooth Low-loss Low-cost



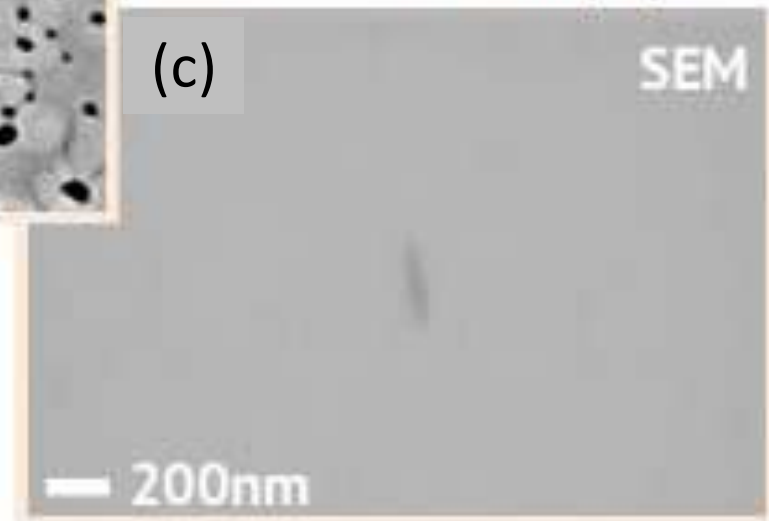
1-ый этап SCULL-процесса



2-ой этап SCULL процесса



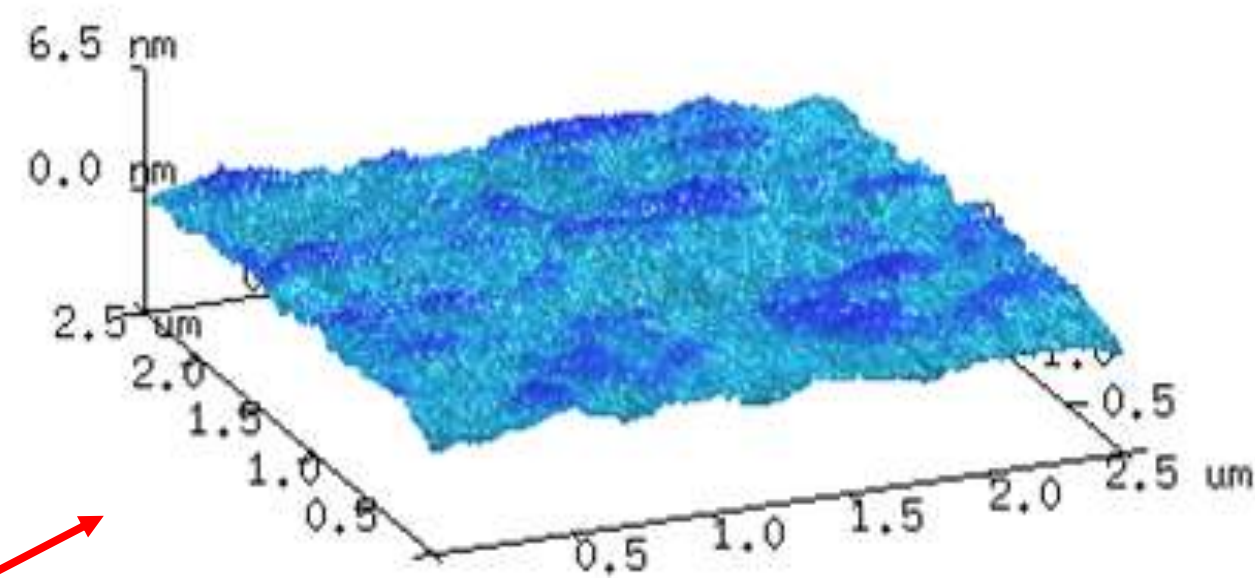
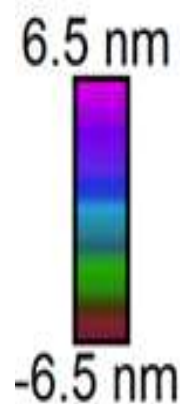
Nominally 35-nm-thick
SCULL silver film (S1)



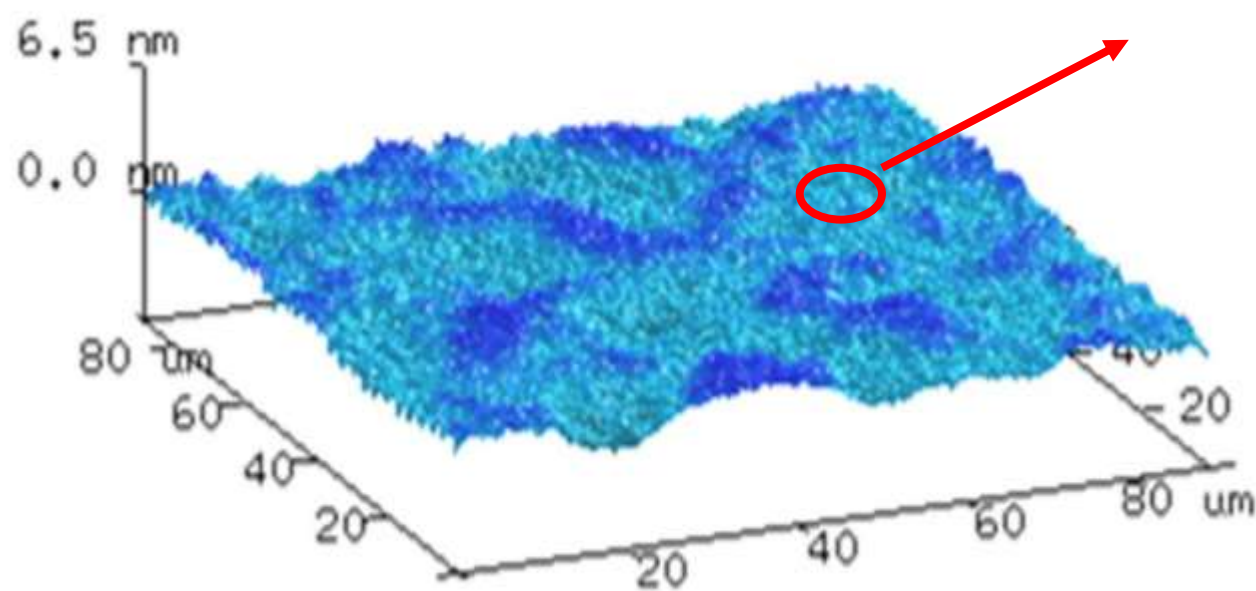
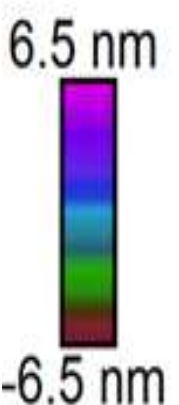
2nd step
(Continuous film deposition)

Атомно-силовая микроскопия серебряных пленок

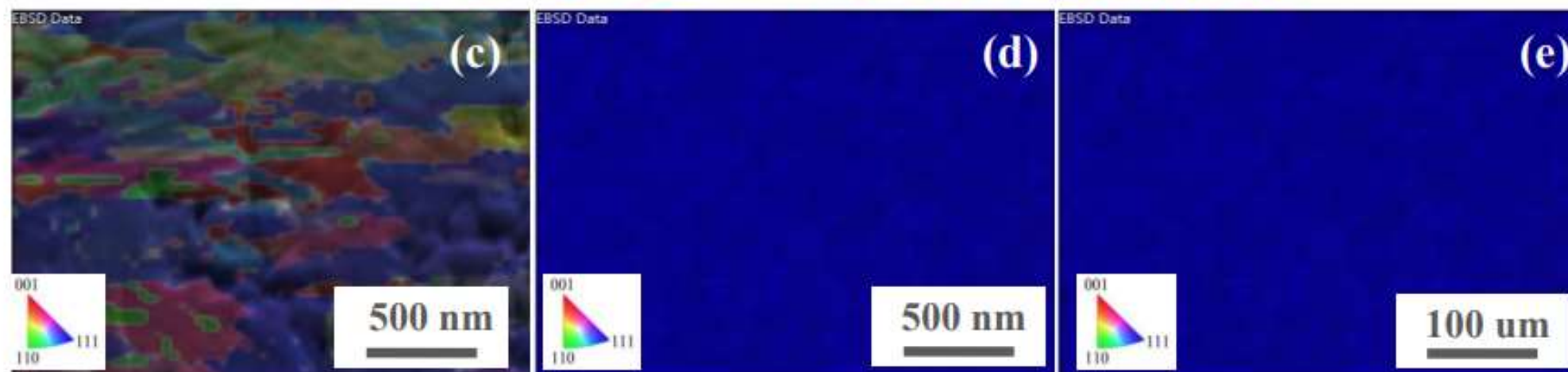
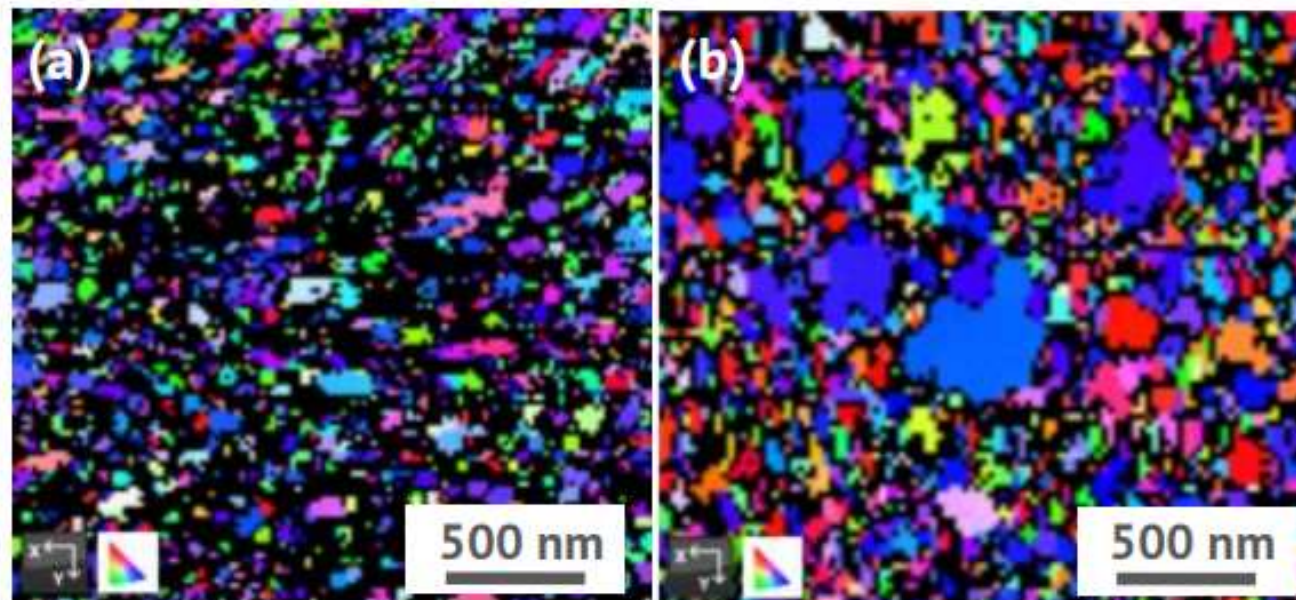
RMS = 0.51 nm



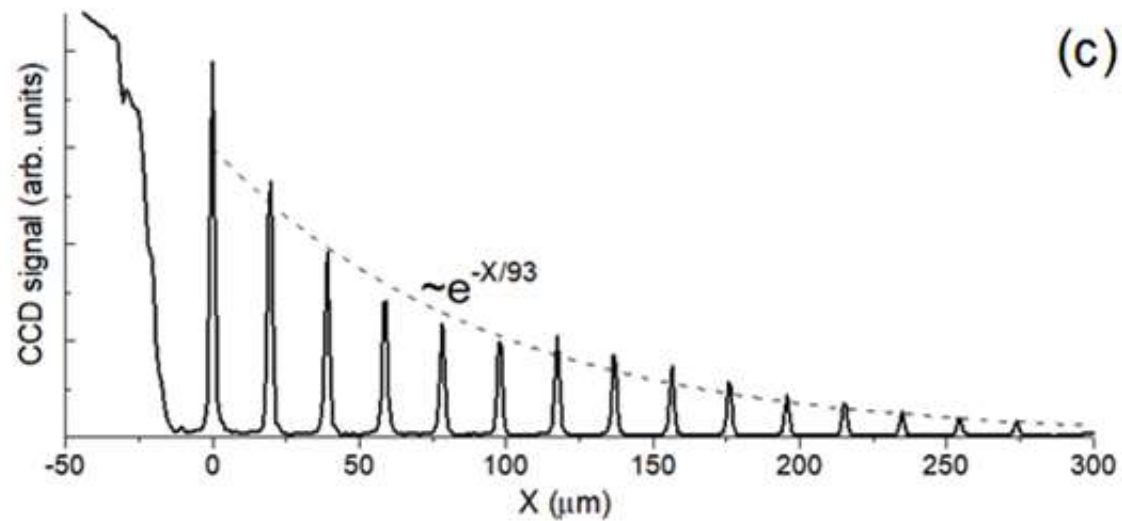
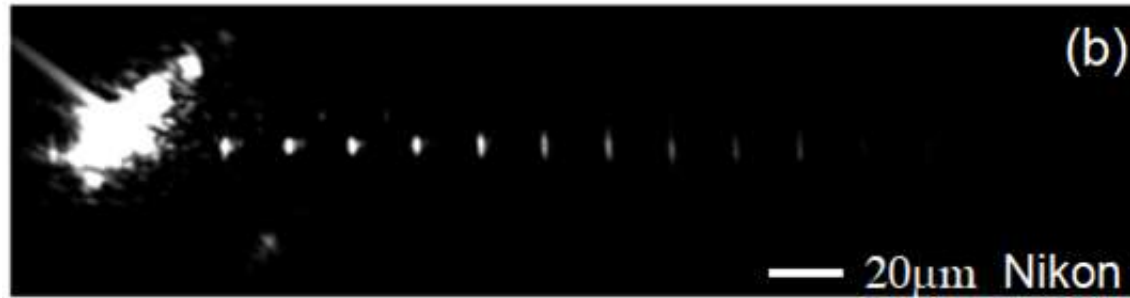
RMS = 0.18 nm



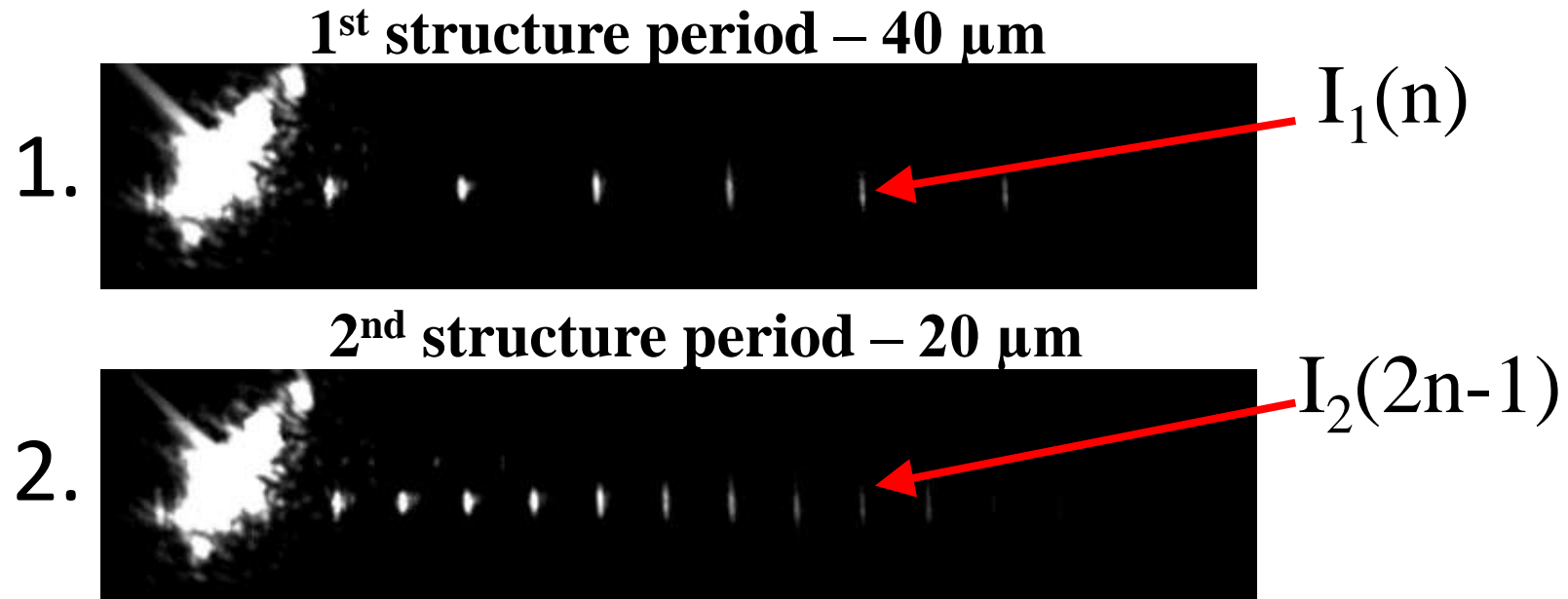
Дифракция отражённых электронов



Результат измерения длины распространения плазмонной волны



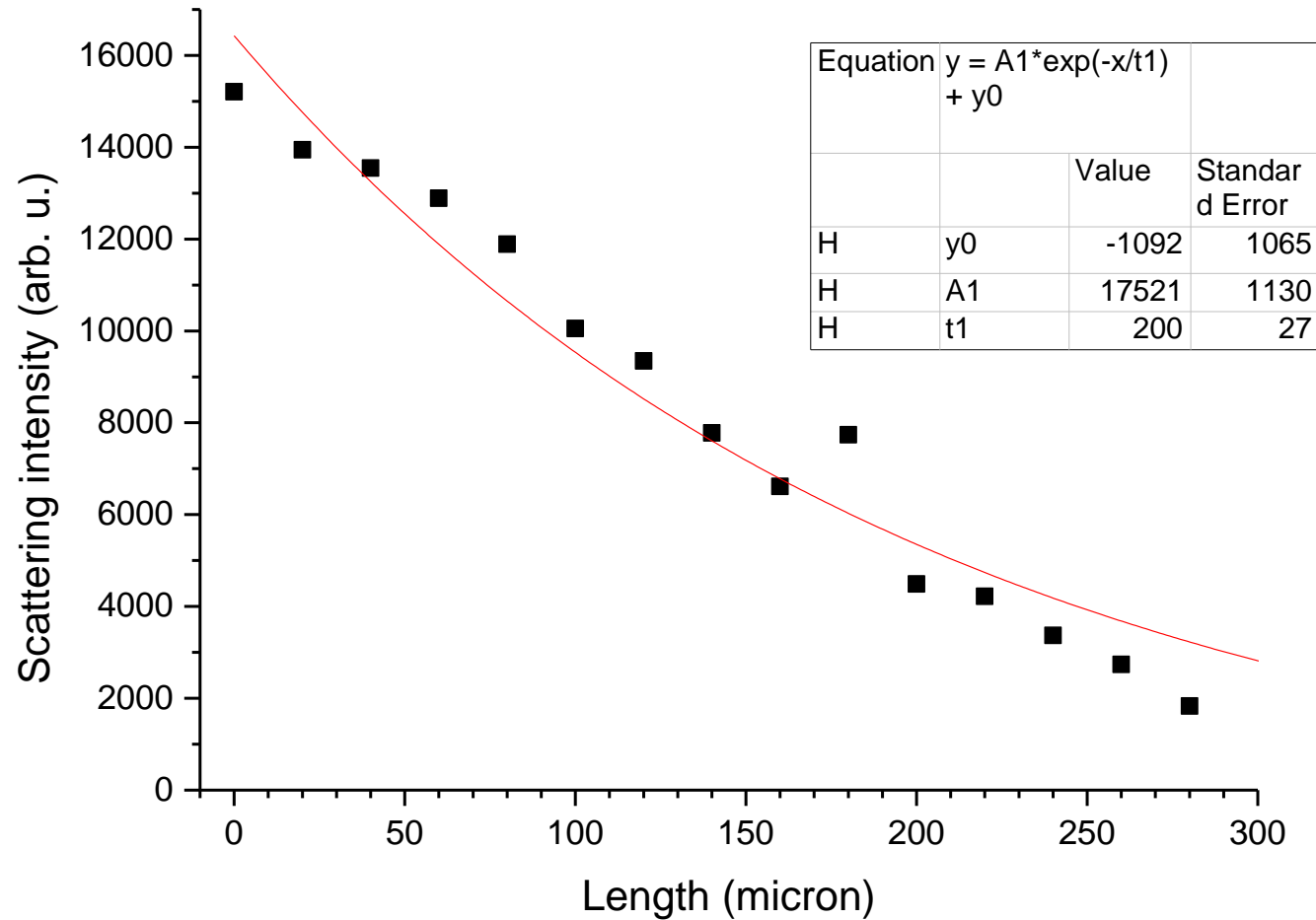
Оценка потерь на щелях



$$\text{Slit transmission} = \left(\frac{I_2(2n-1)}{I_1(n)} \right)^{1/(n-1)}$$

Slit losses ~ 4.8 %

С учетом потерь на щелях 4.8 % длина распространения SPP ~ 200 ± 27 микрон



AS Baburin, AS Kalmykov, RV Kirtaev, DV Negrov, DO Moskalev, IA Ryzhikov, PN Melentiev, IA Rodionov, and VI Balykin, "Toward a theoretically limited SPP propagation length above two hundred microns on an ultra-smooth silver surface [Invited]," Opt. Mater. Express 8, 3254-3261 (2018)