Фундаментальные проблемы оптики - 2010

Усиление обратного эффекта Фарадея в плазмонных структурах

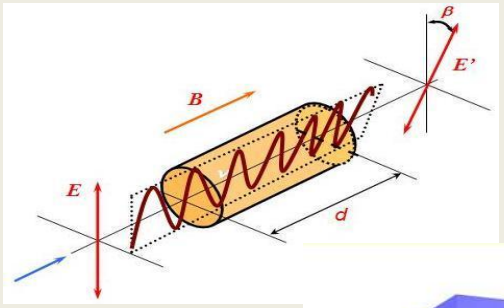
Хохлов Н.Е., Белотелов* В.И., Безус** Е.А., Досколович** Л.Л., Звездин****

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
**Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия
***Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

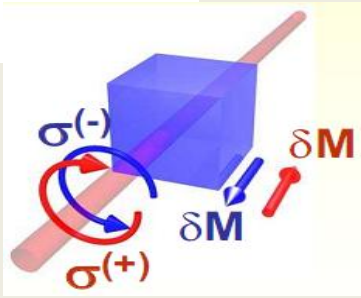
Санкт-Петербург, 2010

Эффекты Фарадея

прямой $\beta \sim V\left|\vec{B}\right|d$



обратный $\left|\vec{M}\right| \sim V\left|[\vec{E} \times \vec{E}^{*}]\right|$



E – амплитуды электрического и магнитного полей ЭМ волны;
V – константа Верде; ***d*** – путь, пройденный ЭМ волной в веществе.

Для усиления обратного эффекта Фарадея (ОЭФ) необходимо:

1. ***Наличие как можно большего по модулю векторного произведения*** $[\vec{E} \times \vec{E}^{*}]$ **.**
2. ***Усиление интенсивности ЭМ поля в среде.***

Векторное произведение $[\vec{E}\times\vec{E}^*]$

В ходе работы использовалось комплексное представление векторов:

$$\vec{E}(\vec{r},t)=\vec{E}_0(\vec{r})\cos(\omega t+\varphi(\vec{r}))\quad\Longrightarrow\quad\vec{E}(\vec{r},t)=\vec{E}_0(\vec{r})e^{i\omega t}$$

Для линейно поляризованной волны:

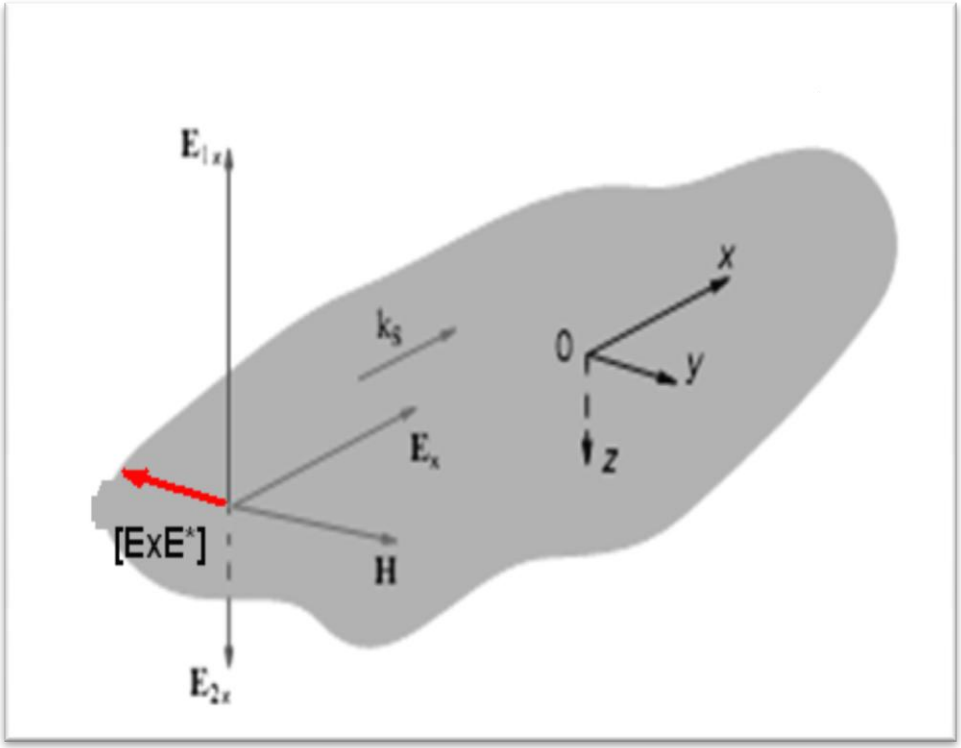
$$\vec{E}(\vec{r},t)=\begin{pmatrix}E_x\\0\\0\end{pmatrix}e^{i(\omega t-\vec{k}\vec{r})}\quad\Longrightarrow\quad\left|[\vec{E}\times\vec{E}^*]\right|=\left|\begin{pmatrix}E_x\\0\\0\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}E_x\\0\\0\end{pmatrix}\right|=0$$

Для волны, поляризованной по кругу:

$$\vec{E}(\vec{r},t)=\begin{pmatrix}E_x\\iE_y\\0\end{pmatrix}e^{i(\omega t-\vec{k}\vec{r})}\quad\Longrightarrow\quad\left|[\vec{E}\times\vec{E}^*]\right|=\left|\begin{pmatrix}E_x\\iE_y\\0\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix}E_x\\-iE_y\\0\end{pmatrix}\right|=2\left|E_xE_y\right|$$

Обратный эффект Фарадея проявляется при прохождении через вещество ЭМ волны с круговой или эллиптической поляризацией из-за наличия сдвига по фазе между компонентами электрического поля

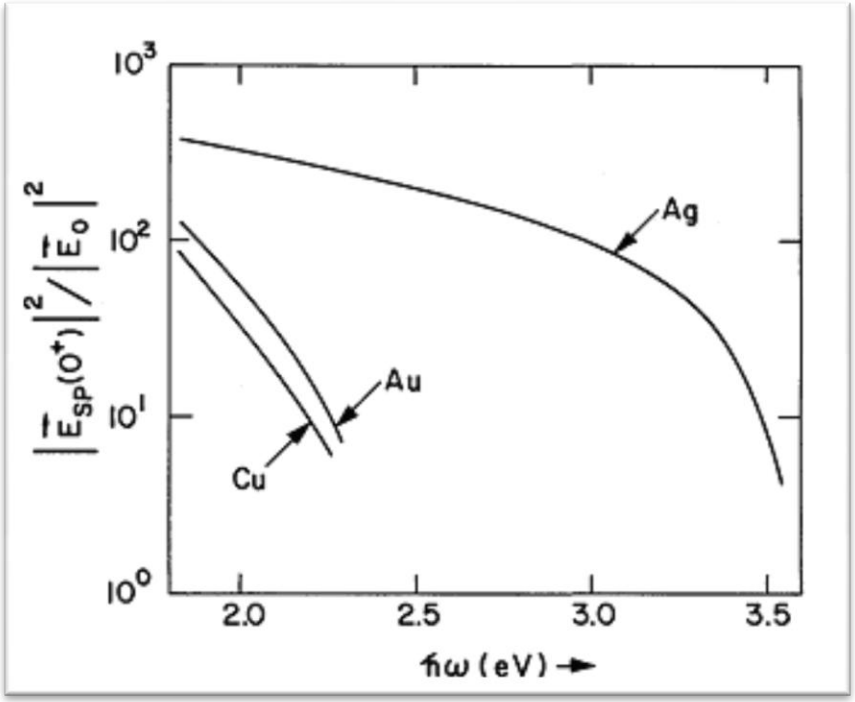
Возможность усиления ОЭФ при распространении поверхностных плазмон-поляритонов



Компонента электрического поля, лежащая в плоскости границы раздела сред (E_x), и компонента, перпендикулярная этой плоскости (E_z), сдвинуты между собой по фазе на $\pi/2$.

При распространении уединенного поверхностного плазмон-поляритона (ППП) присутствует ненулевое векторное произведение $[\vec{E}\times\vec{E}^*]$

Возможность усиления ОЭФ при распространении поверхностных плазмон-поляритонов

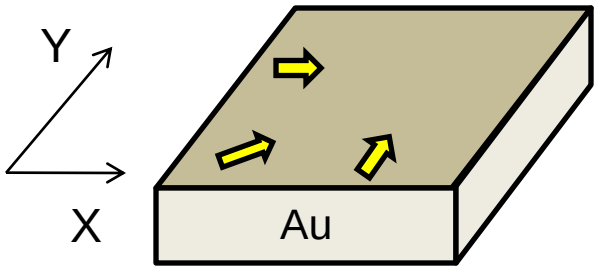


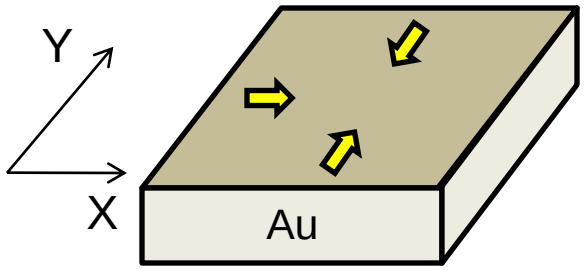
Результаты численного расчета для усиления электрического поля при возбуждении плазмона в металлических пленках толщиной 800 нм.

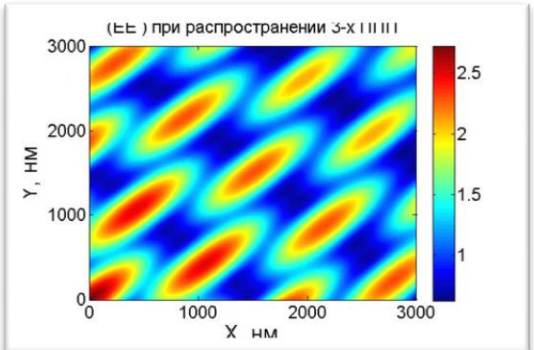
W.H. Weber, G.W. Ford. Opt.Lett. 6, (1981).

Усиление интенсивности при распространении уединенного плазмон-поляритона происходит вследствие локализации поля ЭМ волны в тонком приграничном слое

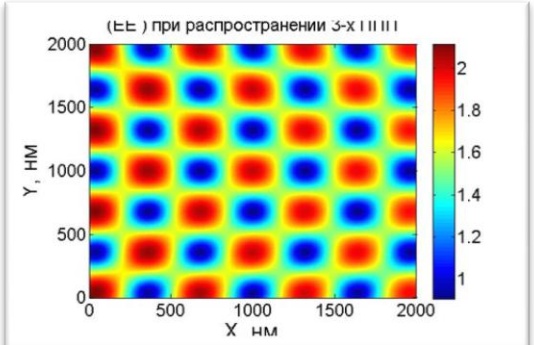
Интерференция нескольких поверхностных плазмон-поляритонов

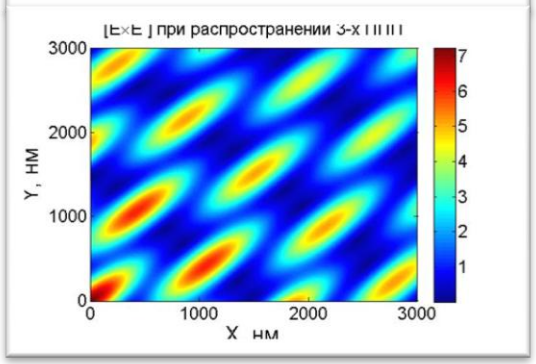




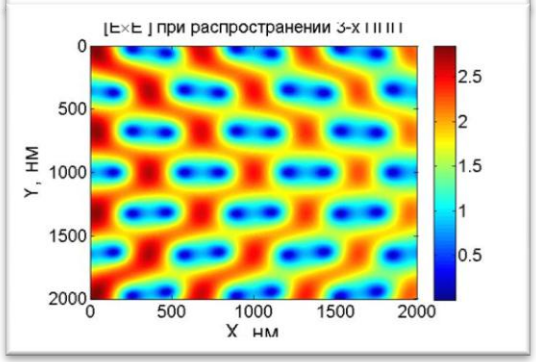


$$\left|(\vec{E}\vec{E}^{*})\right|$$



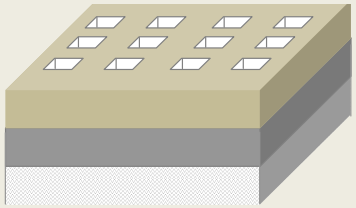


$$\left|[\vec{E}\times\vec{E}^{*}]\right|$$



Распределение интенсивности ЭМ поля и модуля $[\vec{E}\times\vec{E}^{*}]$ на границе золото/воздух при распространении вдоль нее трех ППП, возбужденных светом с длиной волны 640 нм (теоретический расчет). Направление волнового вектора каждого ППП указано стрелкой.

Распределение $(\vec{E}\vec{E}^*)$ и $[\vec{E}\times\vec{E}^*]$ после прохождения ЭМ волны через гетероструктуры



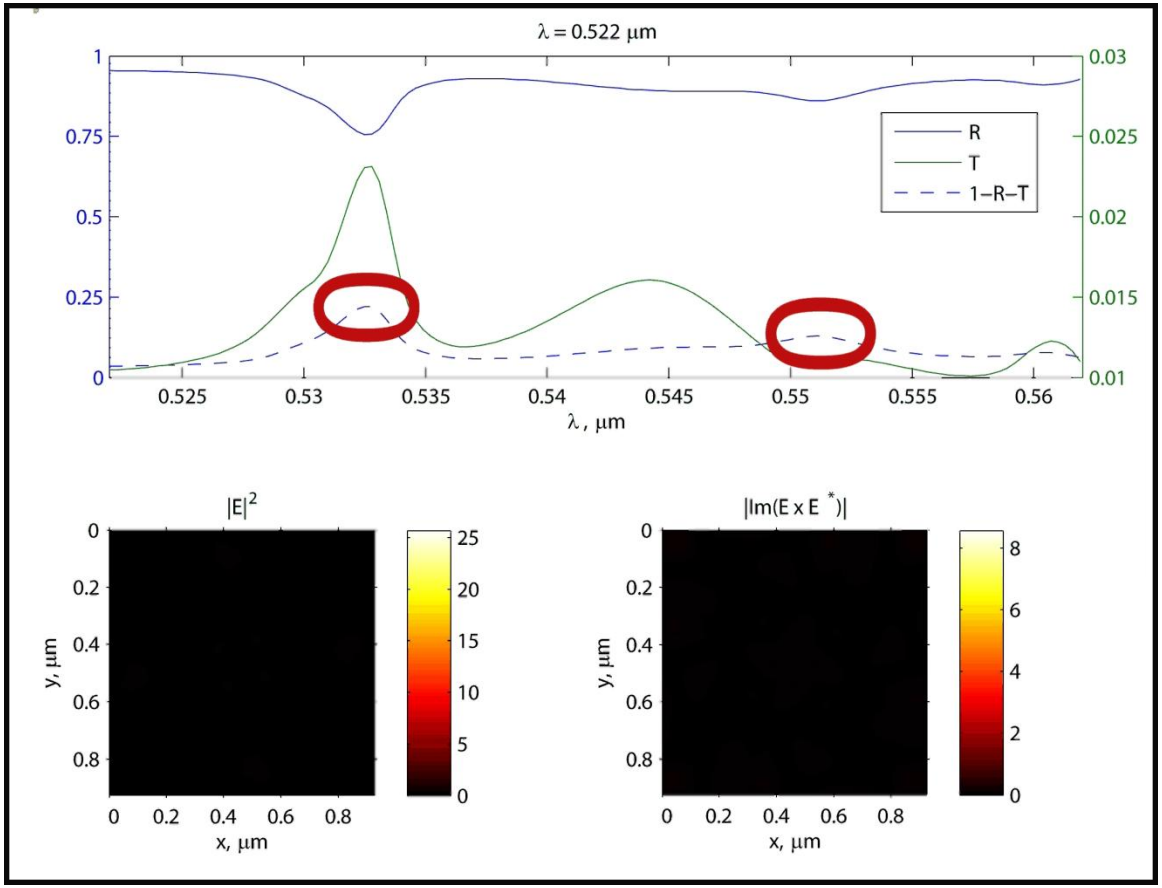
←перфорированный диэлектрик (h=260 нм)
←гладкий металл (h=70 нм)
←парамагнетик (полубесконечный, ε=2.56)

Параметры решетки:
период– 924 нм
размер отверстий – 236x236 нм

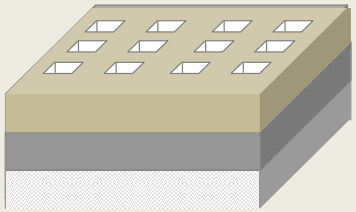
Распределение интенсивности ЭМ поля и модуля $[\vec{E}\times\vec{E}^*]$ в парамагнетике на глубине 10 нм в плазмонной структуре с параметрами, указанными на вставке.

Длина волны падающего излучения – от 522 до 562 нм.

Размеры изображения распределения равны периоду решетки; координаты центра изображения совпадают с центром отверстия.

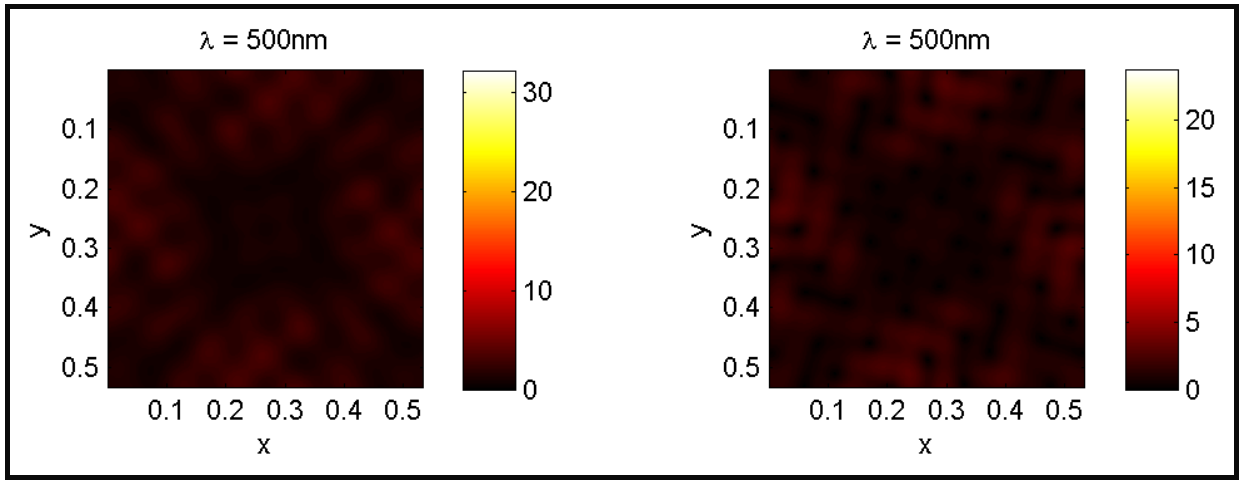


Распределение $(\vec{E}\vec{E}^*)$ и $[\vec{E}\times\vec{E}^*]$ после прохождения ЭМ волны через гетероструктуры



←перфорированный диэлектрик (h=147 нм)
←гладкий металл (h=57 нм)
←парамагнетик (полубесконечный, ε=5.5)

Параметры решетки:
период– 533 нм
размер отверстий – 272x272нм



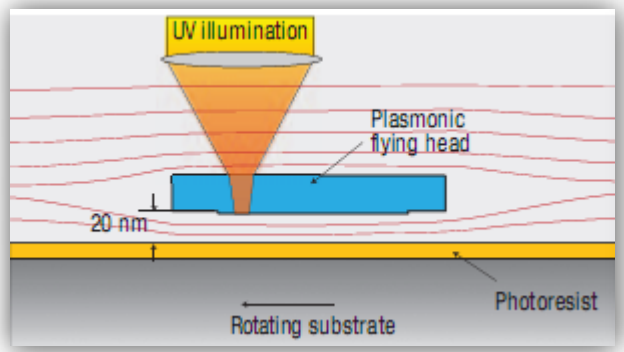
$\left|(\vec{E}\vec{E}^*)\right|$ $\left|[\vec{E}\times\vec{E}^*]\right|$

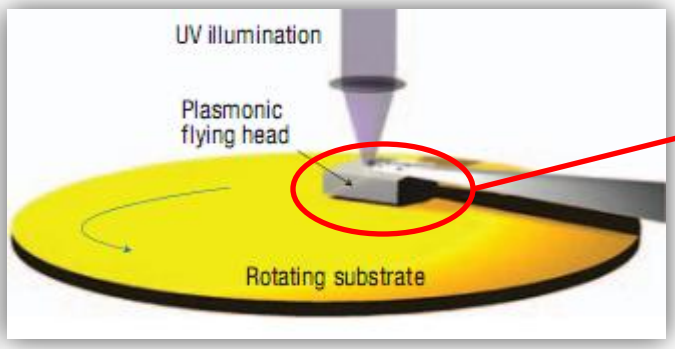
Распределение интенсивности ЭМ поля и модуля $[\vec{E}\times\vec{E}^*]$ в парамагнетике на глубине 10 нм в плазмонной структуре с параметрами, указанными на вставке.

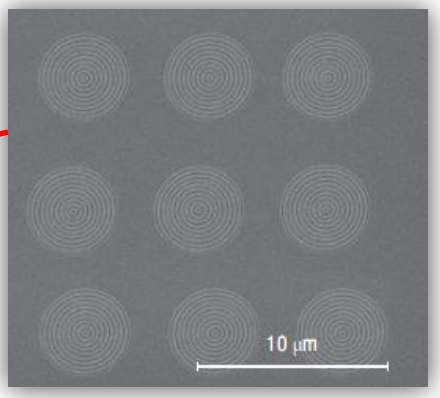
Длина волны падающего излучения – от 500 до 570 нм.

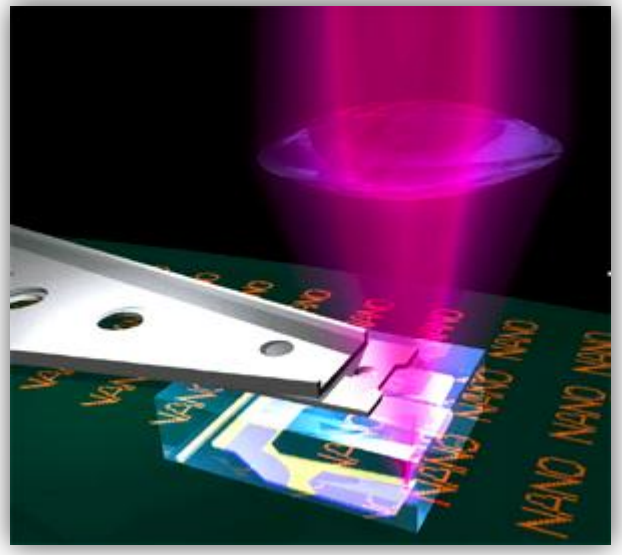
Размеры изображения распределения равны периоду решетки; координаты центра изображения совпадают с центром отверстия.

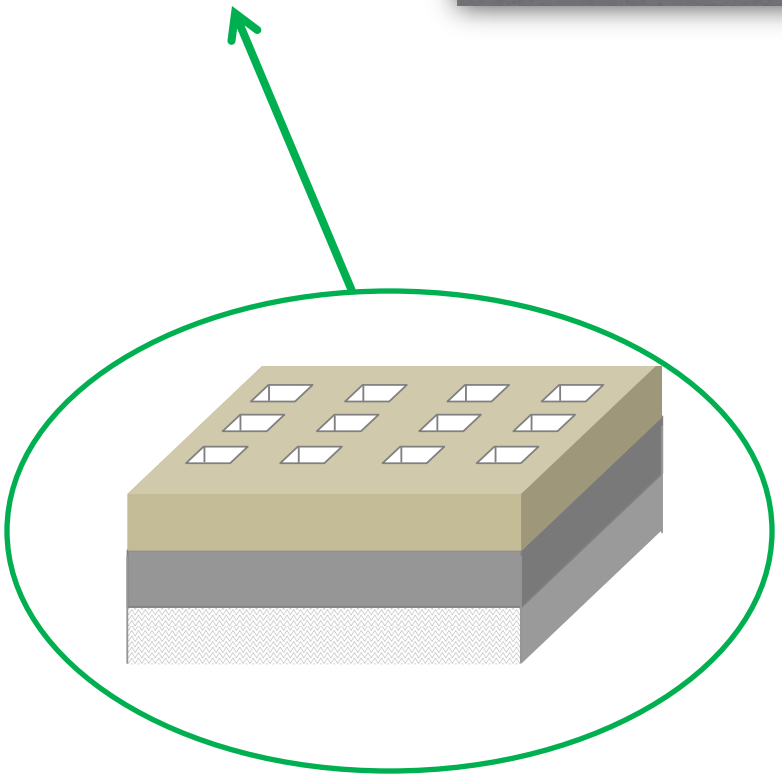
Возможная реализация сверхбыстрой записи информации











W. Srituravanich, L.Pan, Y. Wang et al.
Flying plasmonic lens in the near field for high-speed nanolithography
Nature nanotechnology vol. 3, (2008)

Выводы

- Показано, что при распространении поверхностных плазмон-поляритонов вдоль границы раздела металла и магнитного диэлектрика возникает ОЭФ
- При интерференции нескольких поверхностных плазмон-поляритонов происходит локальное усиление ОЭФ
- В плазмонных структурах можно осуществить управление ОЭФ посредством изменения длины волны падающего излучения или угла падения