

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФОТОНИКИ И ФИЗИКИ МИКРОВОЛН

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМОННЫХ КРИСТАЛЛАХ, СОДЕРЖАЩИХ МАГНИТНЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЛОИ

*Дипломная работа
студента 628 гр.
Хохлова Н. Е.*

*Научный руководитель:
к.ф.-м.н. , доцент
Белотелов В.И.*

Содержание

- 1. Плазмонные кристаллы.**
- 2. Цели и задачи.**
- 3. Метод численного расчета. Улучшение сходимости метода.**
- 4. Плазмон-поляритоны.**
- 5. Обратный эффект Фарадея в плазмонных структурах.**
- 6. Плазмонные структуры в солнечных элементах.**
- 7. Выводы.**

Плазмонные кристаллы

периодические металло-диэлектрические структуры,
период которых сравним с длиной волны
возбуждаемых в них плазмонов

Управление светом на
масштабах, много меньших
длины волны

Локализация энергии
объемной
электромагнитной волны



Создание новых оптических и
магнитооптических устройств

Увеличение коэффициента
полезного действия солнечных
элементов

Цели работы

- исследование обратного эффекта Фарадея в плазмонных кристаллах, содержащих парамагнитные слои;
- изучение локализации электромагнитной энергии в полупроводнике при использовании плазмонных кристаллов;

Задачи работы

- развитие теоретического подхода к описанию оптических свойств плазмонных кристаллов;
- выявление особенностей магнитооптического обратного эффекта Фарадея в плазмонных кристаллах;
- определение условий концентрации электромагнитной энергии в тонком слое полупроводника при использовании плазмонных кристаллов.

Содержание

1. Плазмонные кристаллы.
2. Цели и задачи.
3. Метод численного расчета. Улучшение сходимости метода.
4. Плазмон-поляритоны.
5. Обратный эффект Фарадея в плазмонных структурах.
6. Плазмонные структуры в солнечных элементах.
7. Выводы.

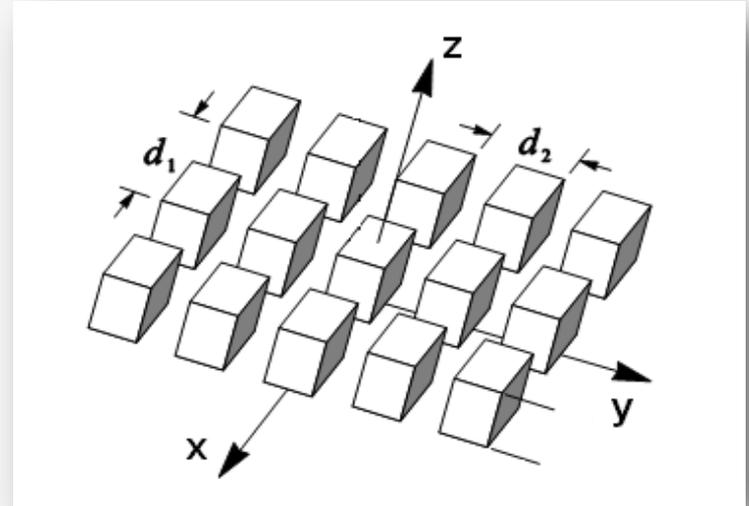
Методика численного расчета метод связанных мод в пространстве Фурье (RCWA)

$$A(\vec{r}, t) = A(\vec{r})e^{-i\omega t}$$

Все полевые вектора разложимы в ряд по волнам Блоха: $\vec{A}(\vec{r}) = \sum_{\vec{k}} \vec{U}_{\vec{k}}(\vec{r})e^{i\vec{k}\vec{r}}$

$\vec{U}_{\vec{k}}$ – периодические => разложимы в ряд Фурье:

$$\vec{U}_{\vec{k}}(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} \vec{A}_{\vec{G}\vec{k}} e^{i\vec{G}\vec{r}}$$



Поле внутри периодической среды в виде суперпозиции плоских волн:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \sum_{\vec{k}} \sum_{\vec{G}} \vec{A}_{\vec{G}\vec{k}} e^{i(\vec{k}+\vec{G})\vec{r}}$$

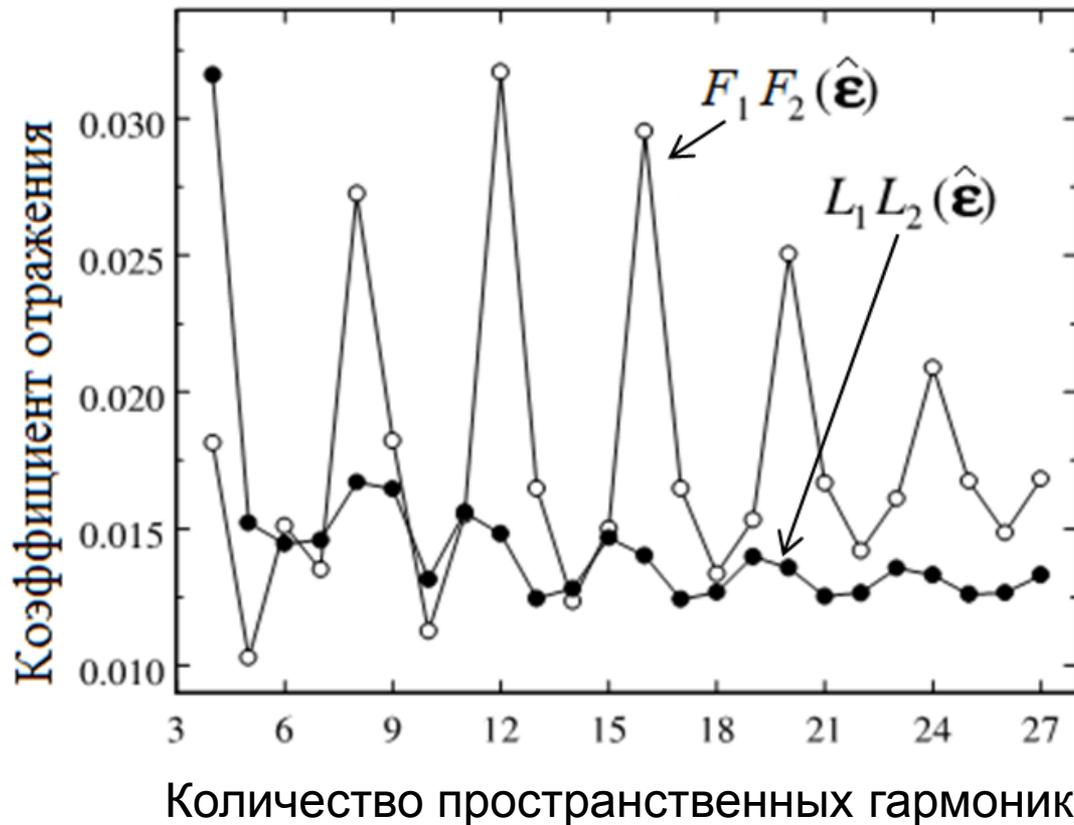
Уравнения Максвелла в матричном виде: $\frac{d}{dz}W = MW$

Решение задачи на собственные значения с учетом начальных и граничных условий для каждого слоя, получение характеристик прошедшей и отраженной волн

Улучшение сходимости метода. Правила факторизации

Перевод в пространство Фурье материальных уравнений Максвелла для структуры с двумерной периодичностью:

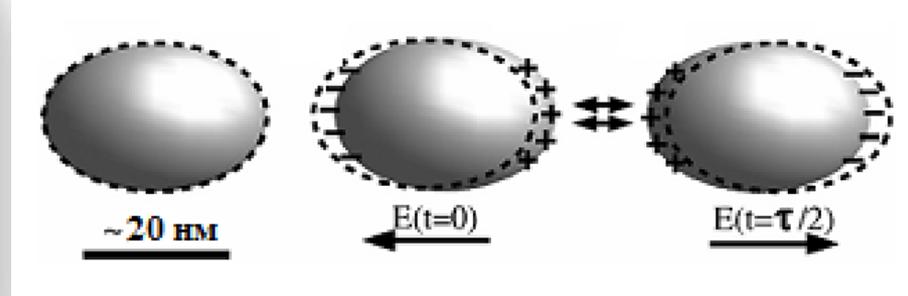
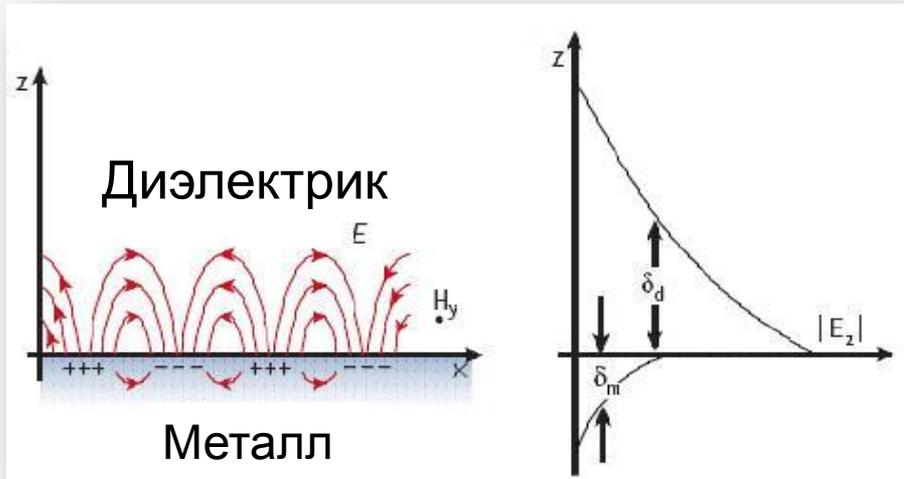
$$\tilde{\epsilon} = F_1 F_2 (\hat{\epsilon}) \quad \longrightarrow \quad \tilde{\epsilon} = l_1^+ F_1 l_1^- l_2^+ F_2 l_2^- (\hat{\epsilon}) = L_1 L_2 (\hat{\epsilon})$$



Содержание

1. Плазмонные кристаллы.
2. Цели и задачи.
3. Метод численного расчета. Улучшение сходимости метода.
4. **Плазмон-поляритоны.**
5. Обратный эффект Фарадея в плазмонных структурах.
6. Плазмонные структуры в солнечных элементах.
7. Выводы.

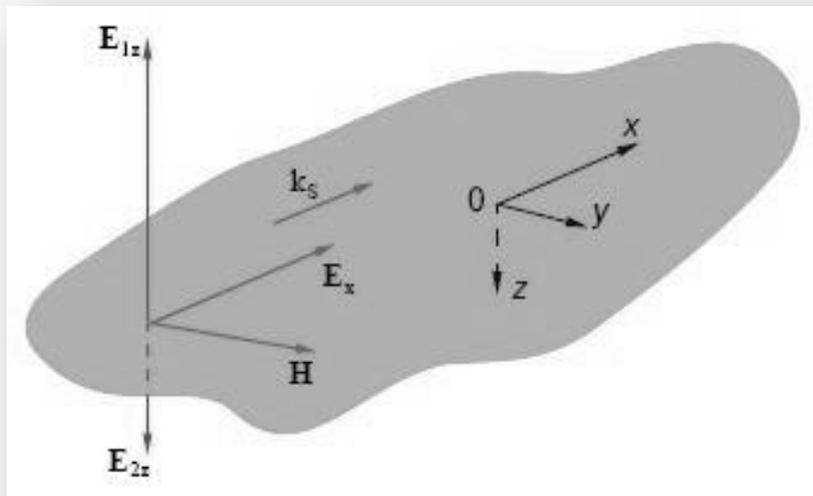
Плазмон-поляритоны



Условия существования
плазмон-поляритонов:

$$\epsilon_m \epsilon_d < 0$$

$$\epsilon_m + \epsilon_d < 0$$



$$E_{1z} = i \sqrt{\left| \frac{\epsilon_d}{\epsilon_m} \right|} E_x$$

Компоненты E_x и E_z сдвинуты по фазе на $\pi/2$.

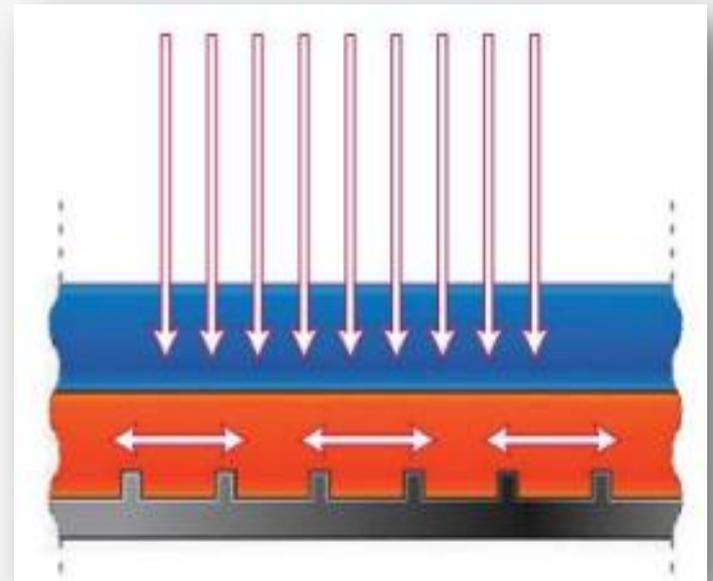
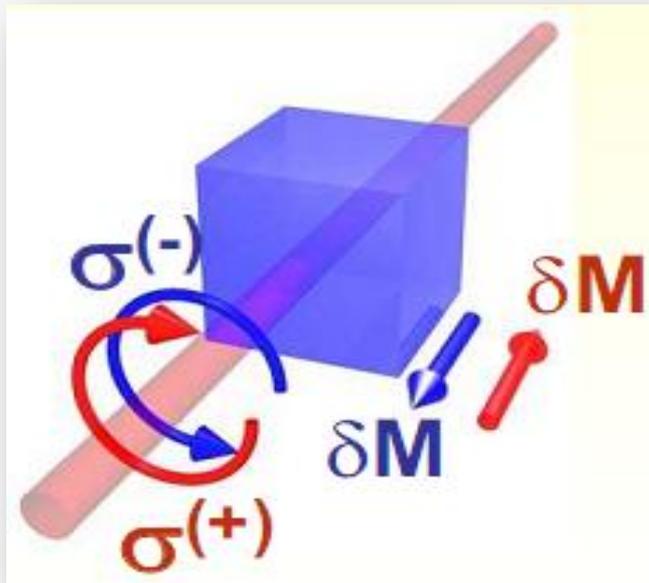
Плазмон-поляритоны

Компоненты E_x и E_z
сдвинуты по фазе на $\pi/2$

Локализация электромагнитной
энергии вблизи границы
металла

Возникновение
обратного эффекта
Фарадея

Увеличение
поглощения в тонком
слое полупроводника

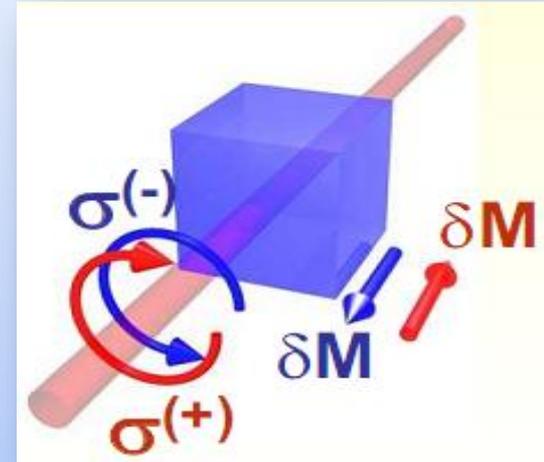


Содержание

1. Плазмонные кристаллы.
2. Цели и задачи.
3. Метод численного расчета. Улучшение сходимости метода.
4. Плазмон-поляритоны.
5. Обратный эффект Фарадея в плазмонных структурах.
6. Плазмонные структуры в солнечных элементах.
7. Выводы.

Обратный эффект Фарадея

$$|\delta \vec{M}| \sim V |[\vec{E} \times \vec{E}^*]|$$

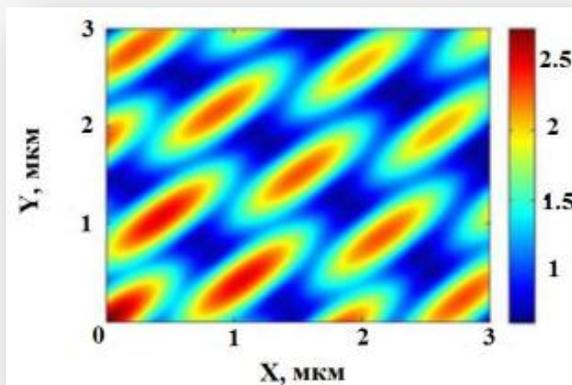
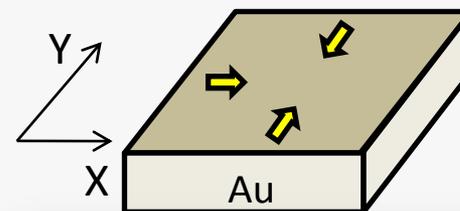
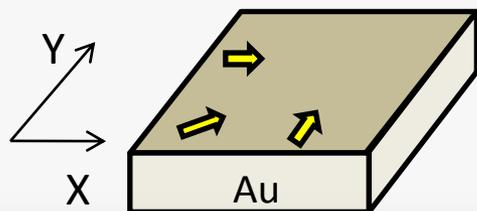


\vec{E} – комплексная амплитуда электрического поля ЭМ волны
 V – константа Верде

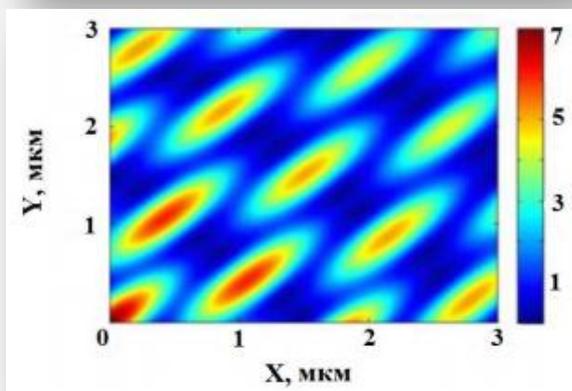
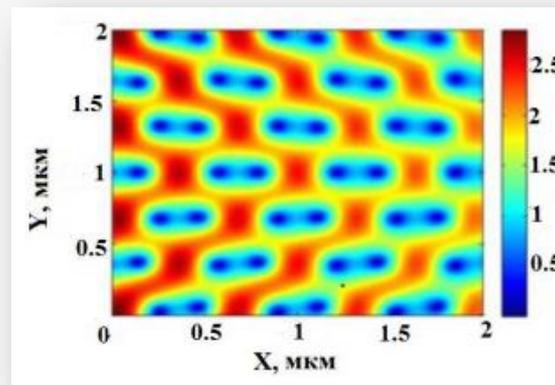
**Для усиления обратного эффекта Фарадея (ОЭФ)
необходимо:**

- 1. Наличие ненулевого векторного произведения $[\vec{E} \times \vec{E}^*]$**
- 2. Увеличение интенсивности ЭМ поля в среде**

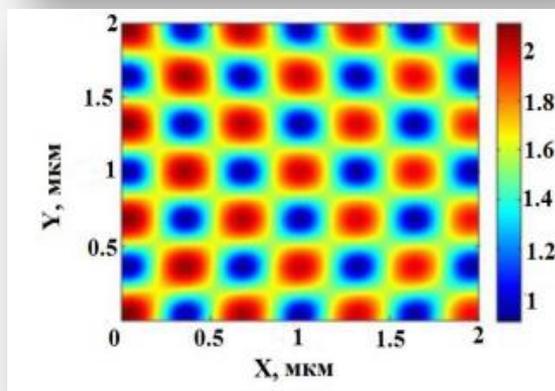
Обратный эффект Фарадея при распространении поверхностных плазмон-поляритонов



Величина ОЭФ

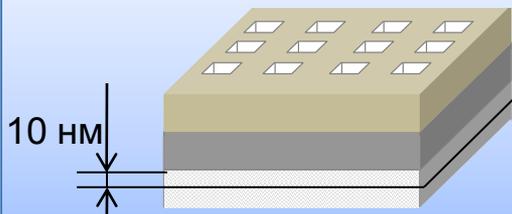


Интенсивность



ППП возбуждаются светом с длиной волны 640 нм на границе золото-парамагнетик.
Направление распространения каждого ППП указано стрелкой.

Усиление ОЭФ в плазмонных кристаллах



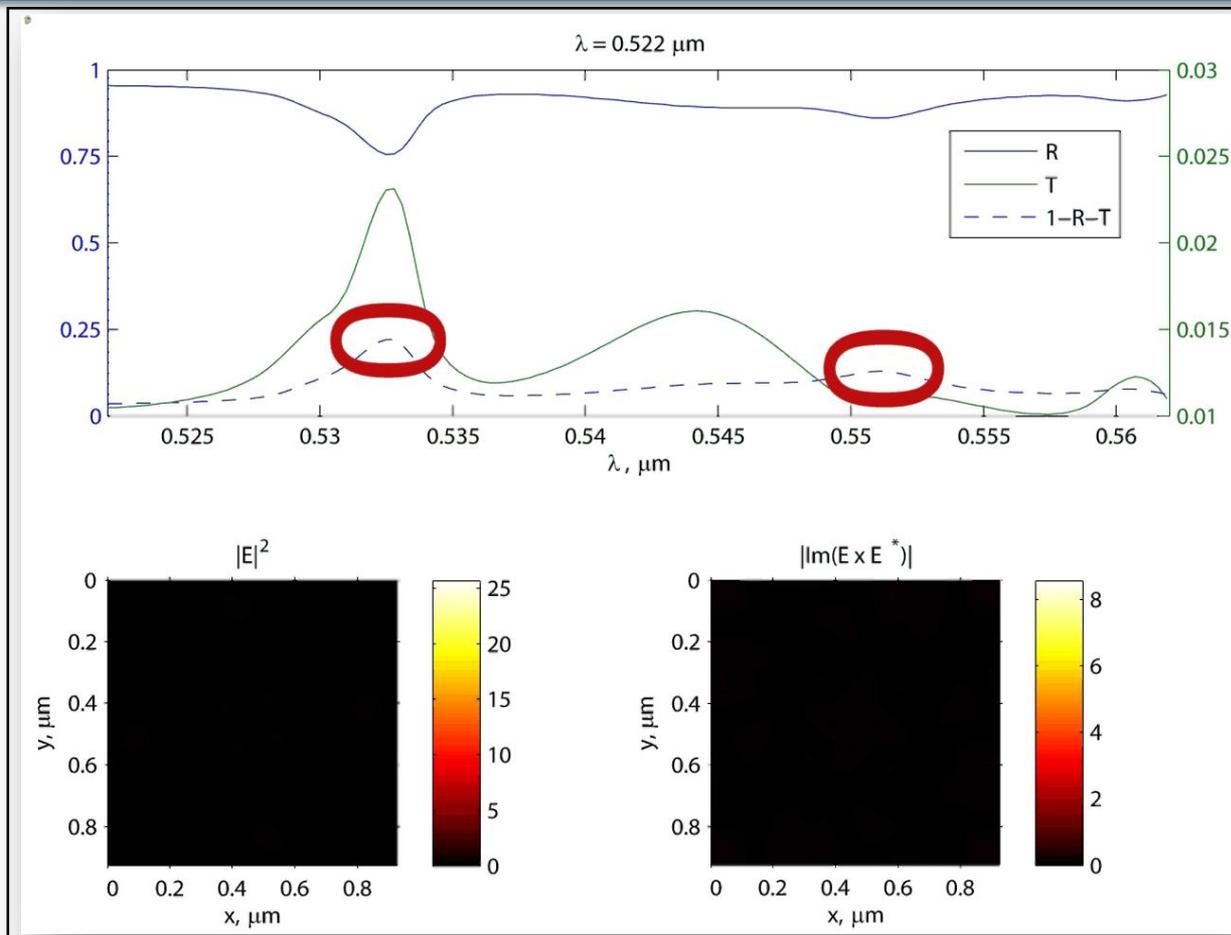
- ← перфорированный диэлектрик ($h=250$ нм)
- ← гладкий металл (серебро, $h=70$ нм)
- ← парамагнетик (полубесконечный, $\epsilon=2.5$)

Параметры решетки:

период – 920 нм

размер отверстий – 230x230 нм

Длина волны падающего излучения – от 522 до 562 нм.
Размеры изображения распределения равны периоду решетки.



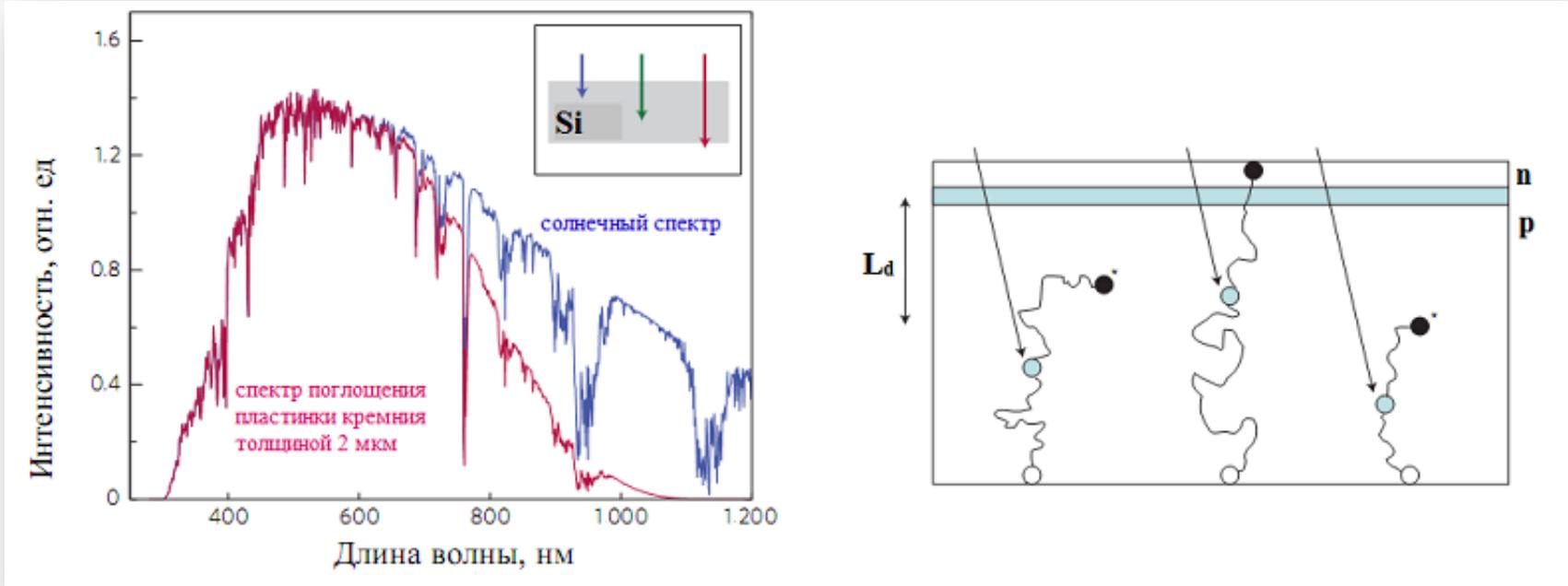
Интенсивность

Величина ОЭФ

Содержание

1. Плазмонные кристаллы.
2. Цели и задачи.
3. Метод численного расчета. Улучшение сходимости метода.
4. Плазмон-поляритоны.
5. Обратный эффект Фарадея в плазмонных структурах.
6. Плазмонные структуры в солнечных элементах.
7. Выводы.

Фотовольтаики

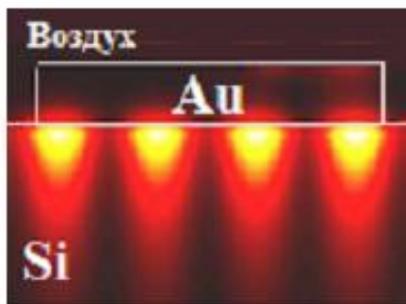
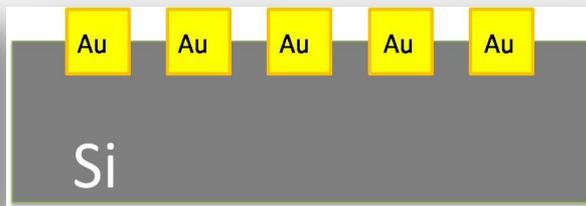
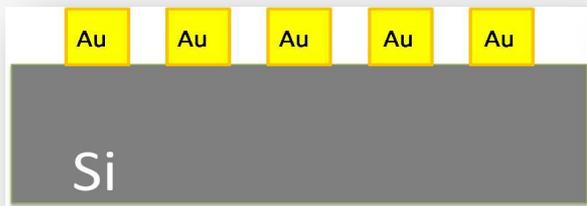
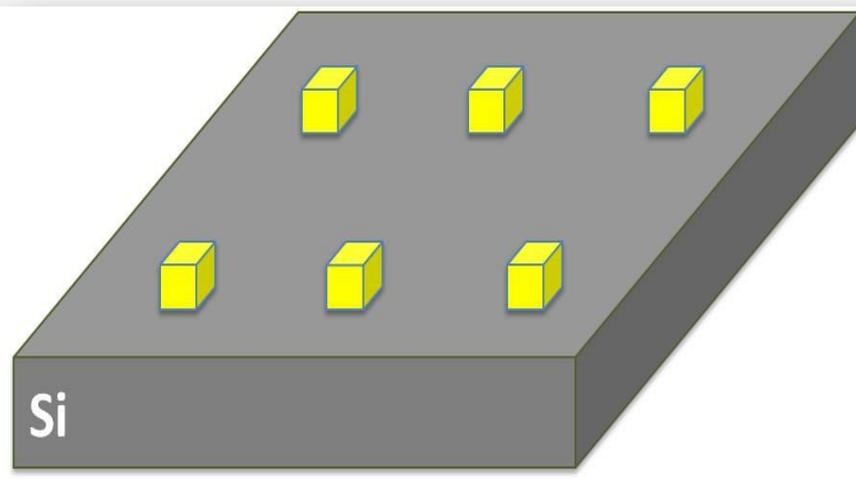
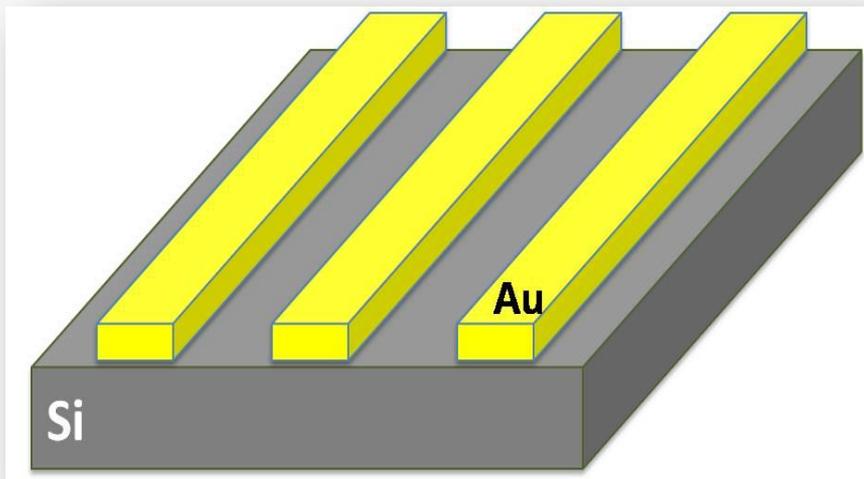


Слой полупроводника

ОПТИЧЕСКИ
ТОЛСТЫЙ

ТОНЬШЕ
длины диффузии L_d

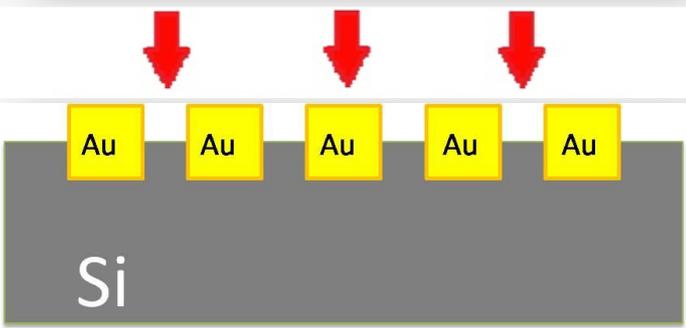
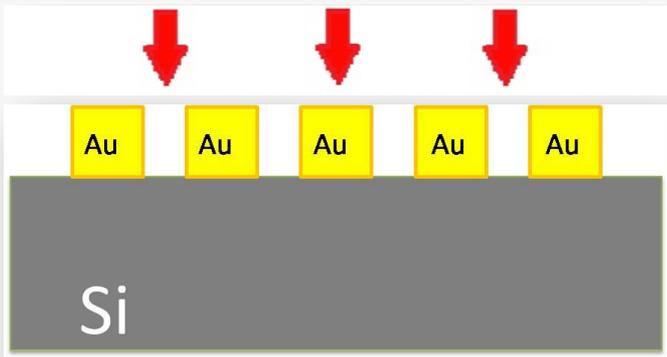
Плазмонные кристаллы в солнечных элементах



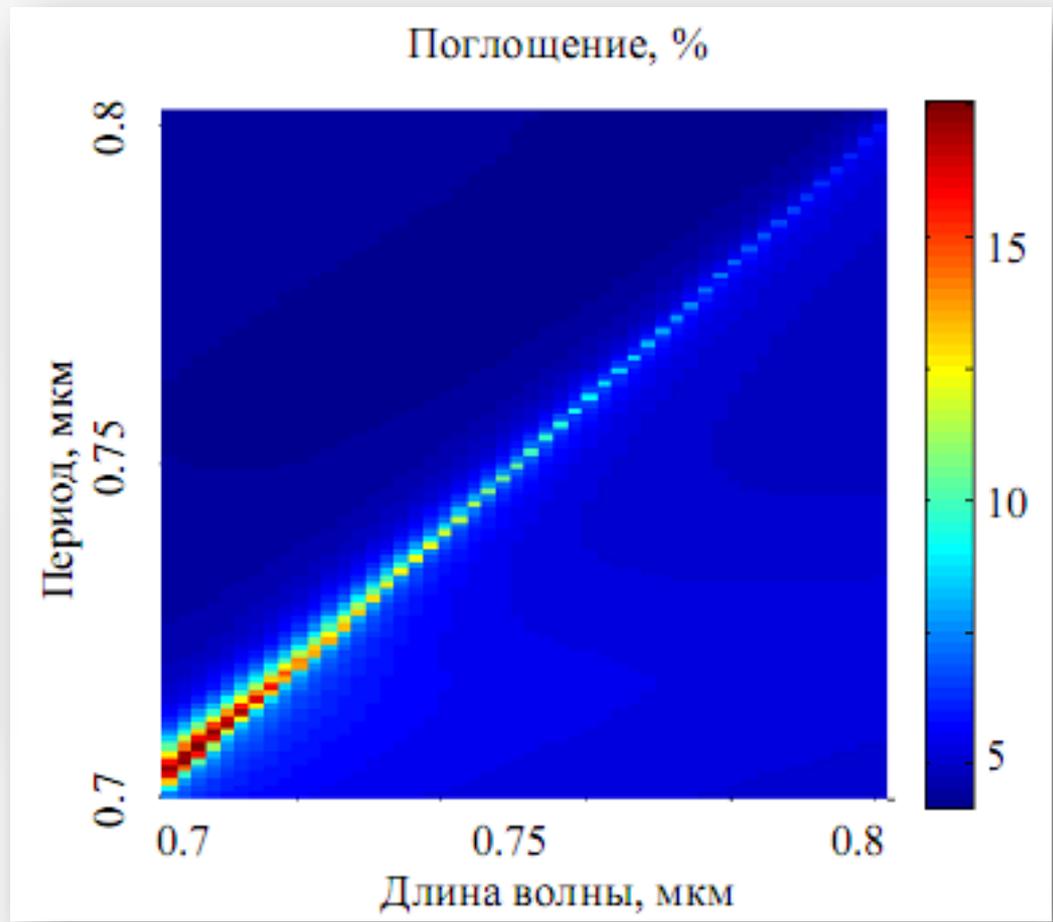
Поверхностные плазмон-поляритоны на горизонтальной границе металл-воздух

Условие возбуждения
поверхностных плазмон-поляритонов:

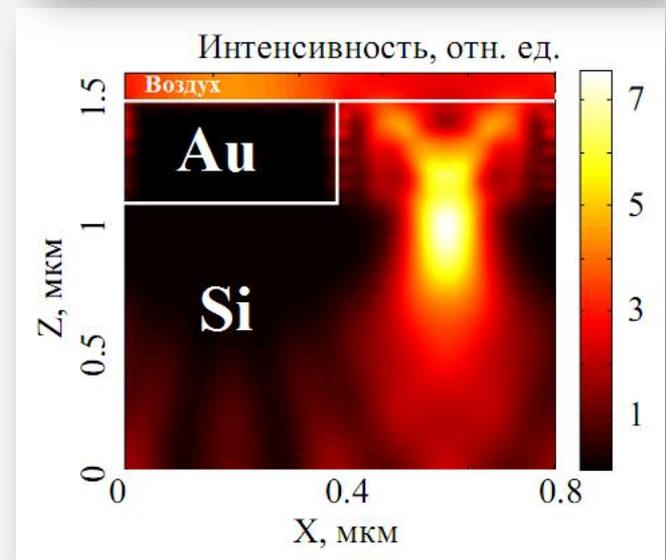
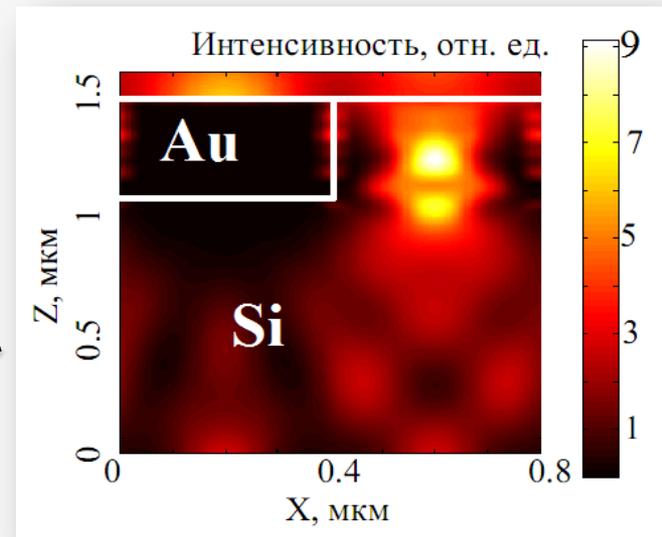
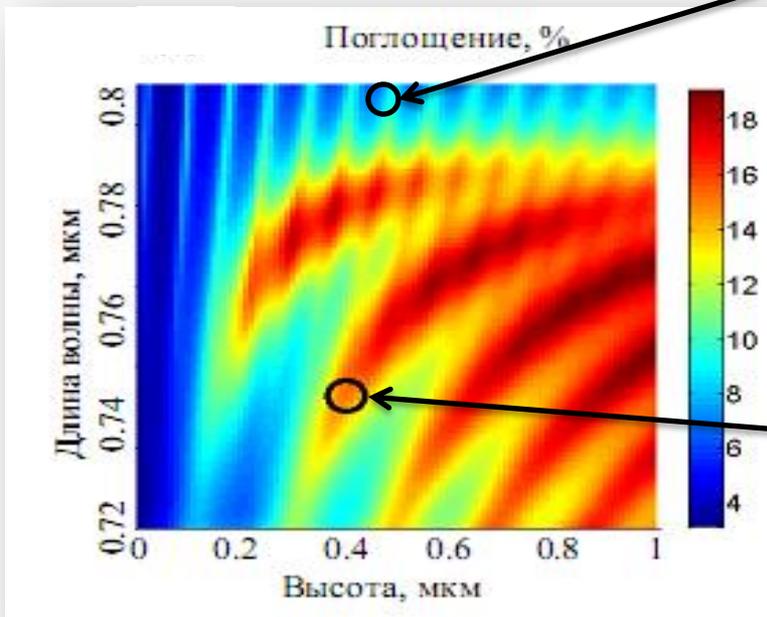
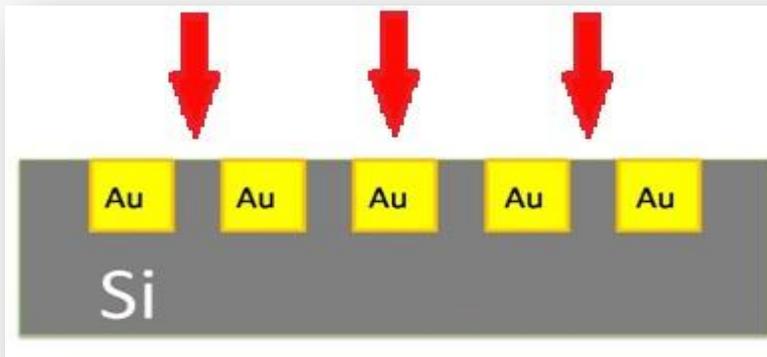
$$d = \sqrt{\frac{\epsilon_m + \epsilon_d}{\epsilon_m \epsilon_d}} \lambda N \approx \lambda N$$



Ширина стержня составляет 90%
от периода,
высота стержня 400 нм.



Плазмонные резонансы Фабри-Перо



ширина щели 400 нм

Выводы

- Разработана и реализована программа, позволяющая рассчитывать оптические характеристики плазмонных кристаллов, содержащих парамагнитные и полупроводниковые слои.
- Установлено, что при распространении поверхностных плазмон-поляритонов вдоль границы раздела металла и парамагнетика возникает обратный эффект Фарадея.
- Выявлено, что в плазмонных кристаллах можно добиться локального усиления обратного эффекта Фарадея в 10-35 раз в областях с размерами порядка 100 нм при длинах волн 400-700 нм.
- Установлено, что при использовании плазмонных структур поглощение в слое кремния возрастает в 5-7 раз при длинах волн света, больших 700 нм.
- Показано, что наибольшее усиление поглощения в плазмонном кристалле возникает при одновременном возбуждении резонансов Фабри-Перо и поверхностных плазмон-поляритонов на границе металл-полупроводник.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

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:

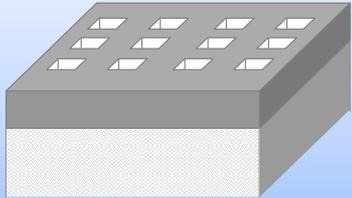
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad \Longrightarrow \quad |[\vec{E} \times \vec{E}^*]| = \left| \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} E_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right| = \underline{0}$$

Для волны, поляризованной по кругу:

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

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

Распределение $(\vec{E}\vec{E}^*)$ и $[\vec{E} \times \vec{E}^*]$ после прохождения электромагнитной волны через плазмонные структуры



←перфорированный металл (серебро, h=151 нм)

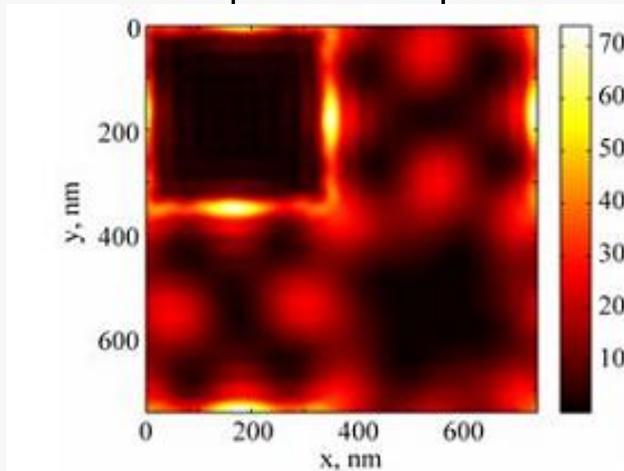
←парамагнетик (полубесконечный, $\epsilon=5.5$)

Параметры решетки:

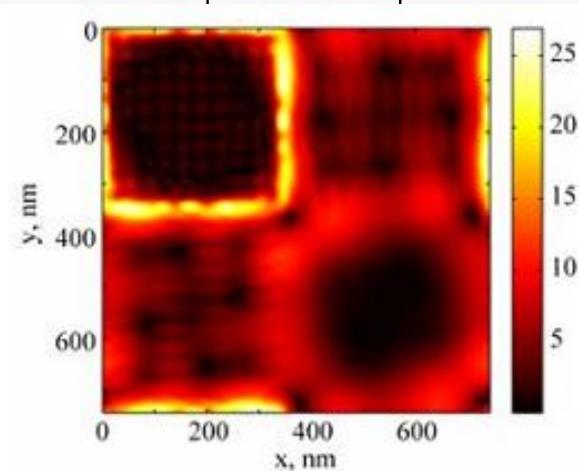
период– 743 нм

размер отверстий – 345x345нм

$$|\vec{E}\vec{E}^*|$$



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

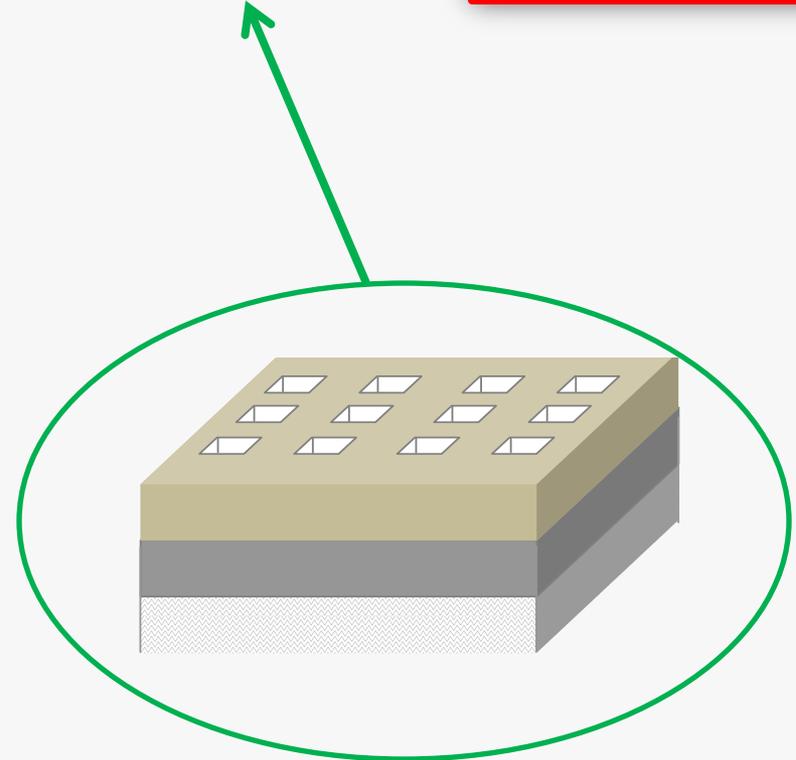
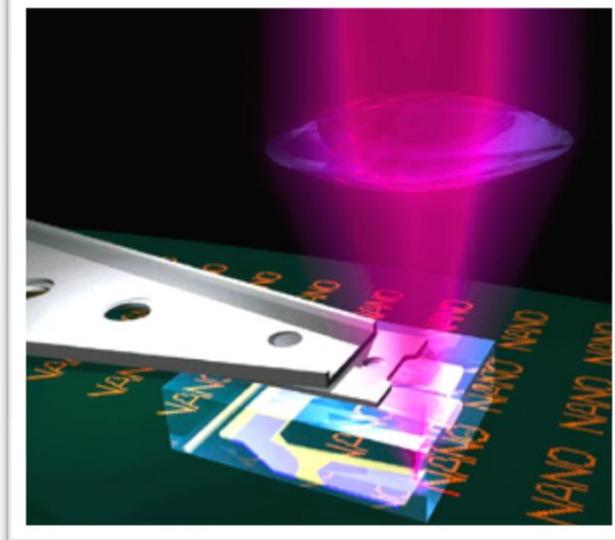
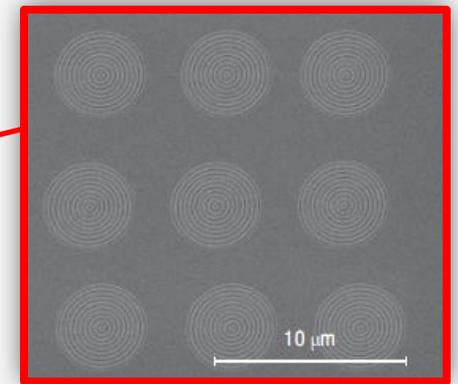
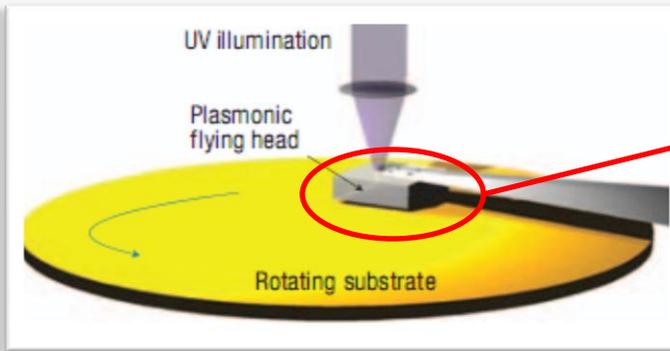
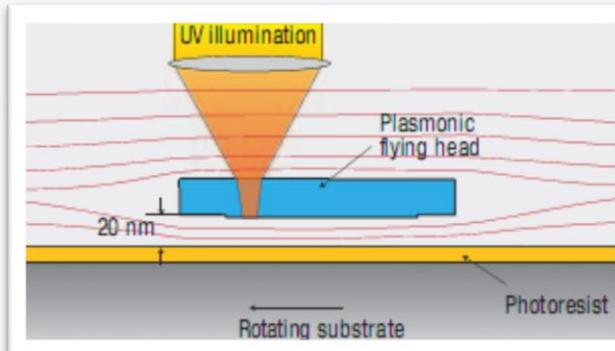


Распределение интенсивности электрического поля и модуля $[\vec{E} \times \vec{E}^*]$ в парамагнетике на глубине 10 нм в плазмонной структуре с параметрами, указанными на вставке.

Длина волны падающего излучения – 855 нм .

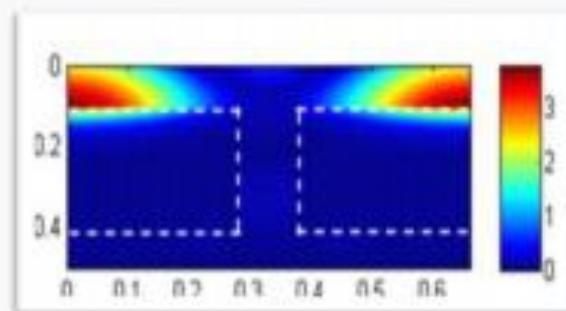
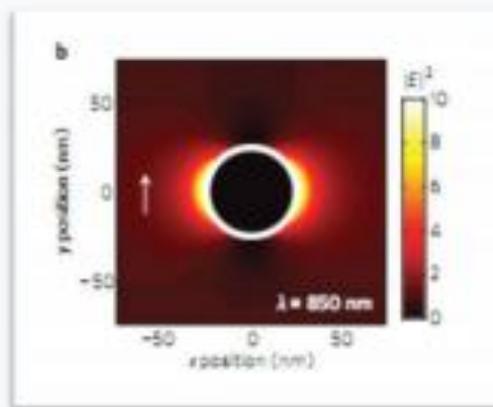
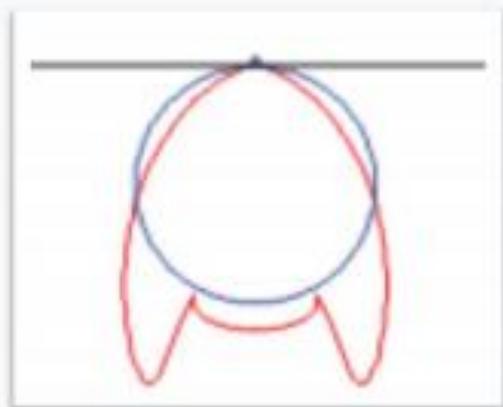
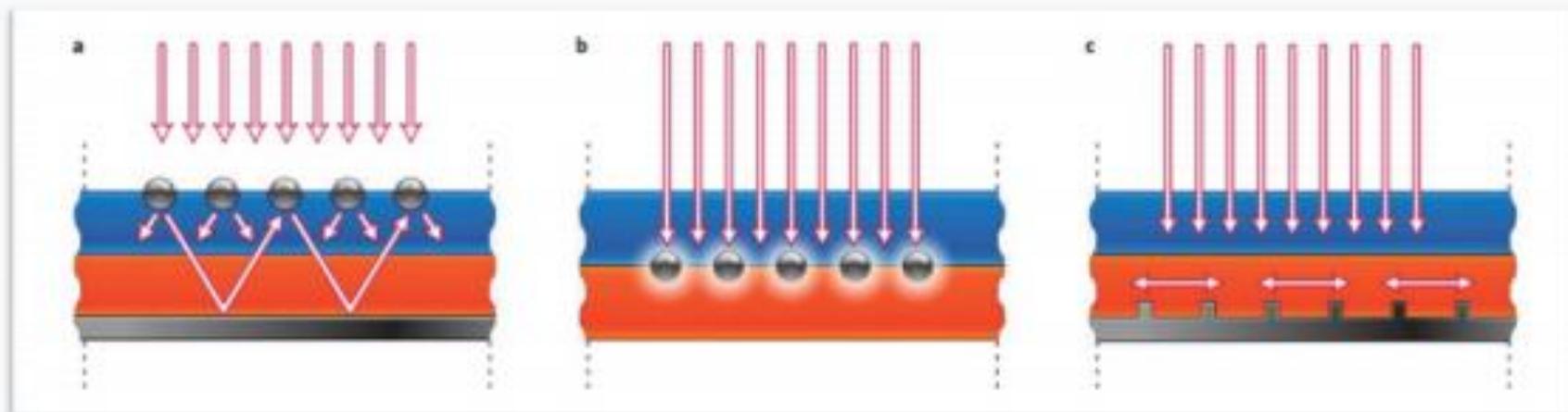
Размеры изображения распределения равны периоду решетки; отверстие решетки располагается в левом верхнем углу.

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)

Увеличение поглощения в солнечных элементах при использовании плазмонных структур



Конфигурации плазмонных структур для увеличения длины эффективного взаимодействия света с кремнием

(б) Поглощение, %

