



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# Теоретическое исследование эффективной генерации второй гармоники бирезонансной металл-диэлектрической наноантенной

Гончаров А. С.

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Петров М. И.

# Генерация второй гармоники

$$P_i = \chi_{ij}^{(1)} E_j + \chi_{ijk}^{(2)} E_j E_k + \dots$$

- Макрокристаллы • Микро- и нанокристаллы

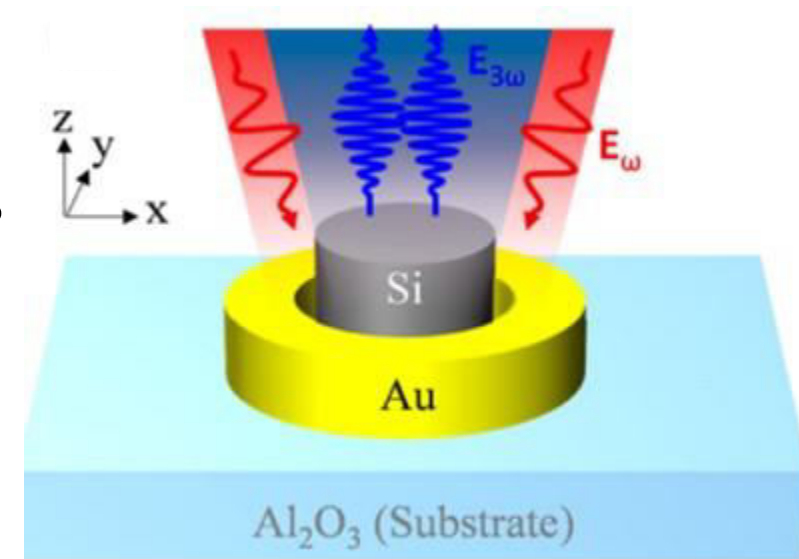


- Визуализация биологических объектов  
(D. Staedler et al., 2012 ACS Nano; L. Bonacina et al., 2013 Mol. Pharm.)
- Оптоэлектроника на микромасштабах  
(S. Kim et. al., 2008 Nature)

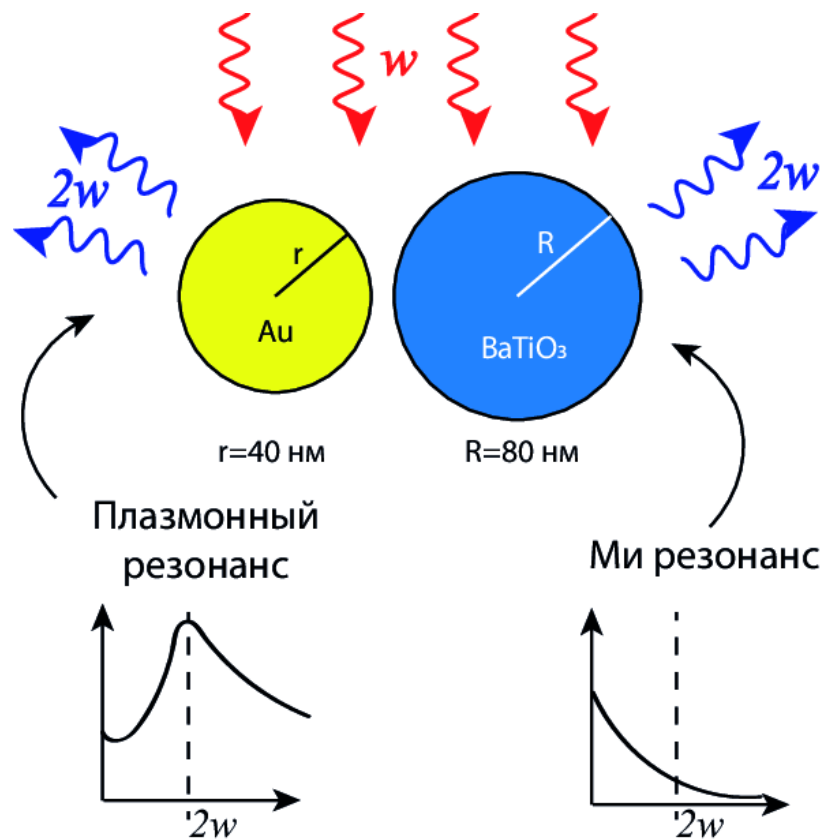
Проблема:

- маленькая эффективность нелинейных процессов( $\eta$ )

$$\eta = \frac{\sigma_{SHG}}{\sigma_{geom}}; \quad \eta \approx 10^{-9}$$



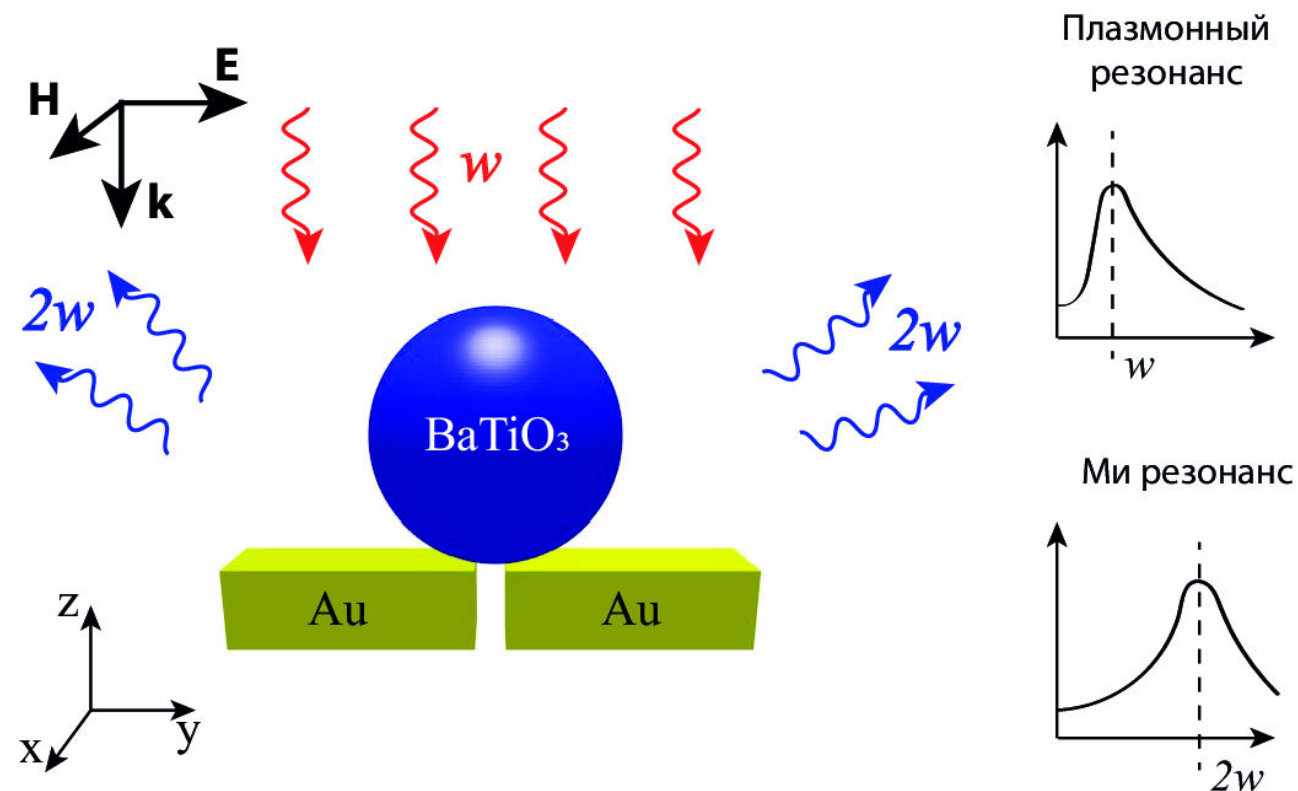
# Металл-диэлектрические наноантенны



Усиление генерации второй гармоники – до 15 раз

Монорезонансная гибридная наноантенна

F. Timpu et al., Nano Lett., 2017

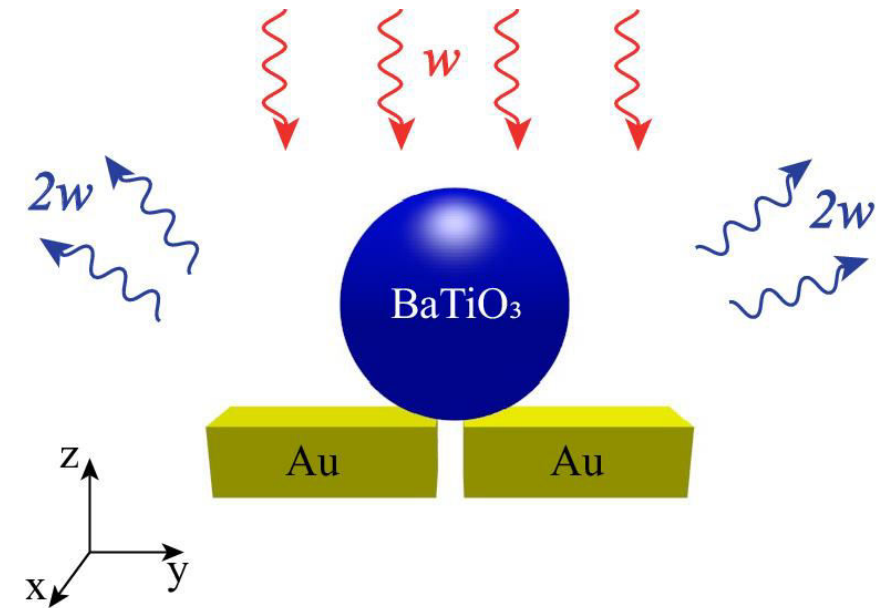


Усиление генерации второй гармоники – ?

Бирезонансная гибридная наноантенна

Цель:

Теоретически исследовать генерацию второй гармоники бирезонансной гибридной наноантенной

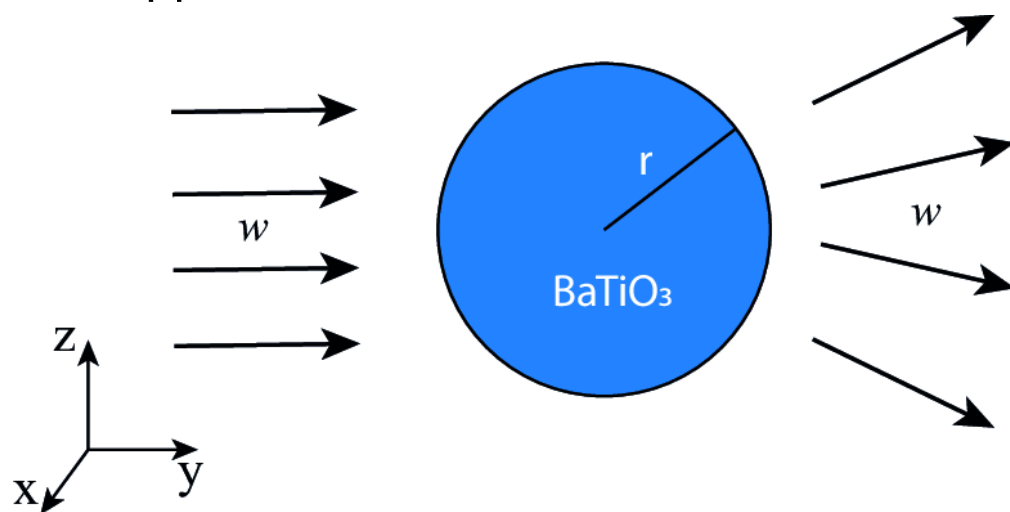


Задачи:

- 1) Подобрать конфигурацию с плазмонным резонансом на частоте падающего поля и Ми резонансом на частоте генерации второй гармоники
- 2) Рассчитать эффективность генерации второй гармоники гибридной наноантенной и сравнить ее с отдельной наночастицей  $\text{BaTiO}_3$
- 3) Исследовать зависимость генерации второй гармоники от конфигурации наноантенны
- 4) Сравнить полученные данные с экспериментом

# Рассеяние диэлектрическим шаром

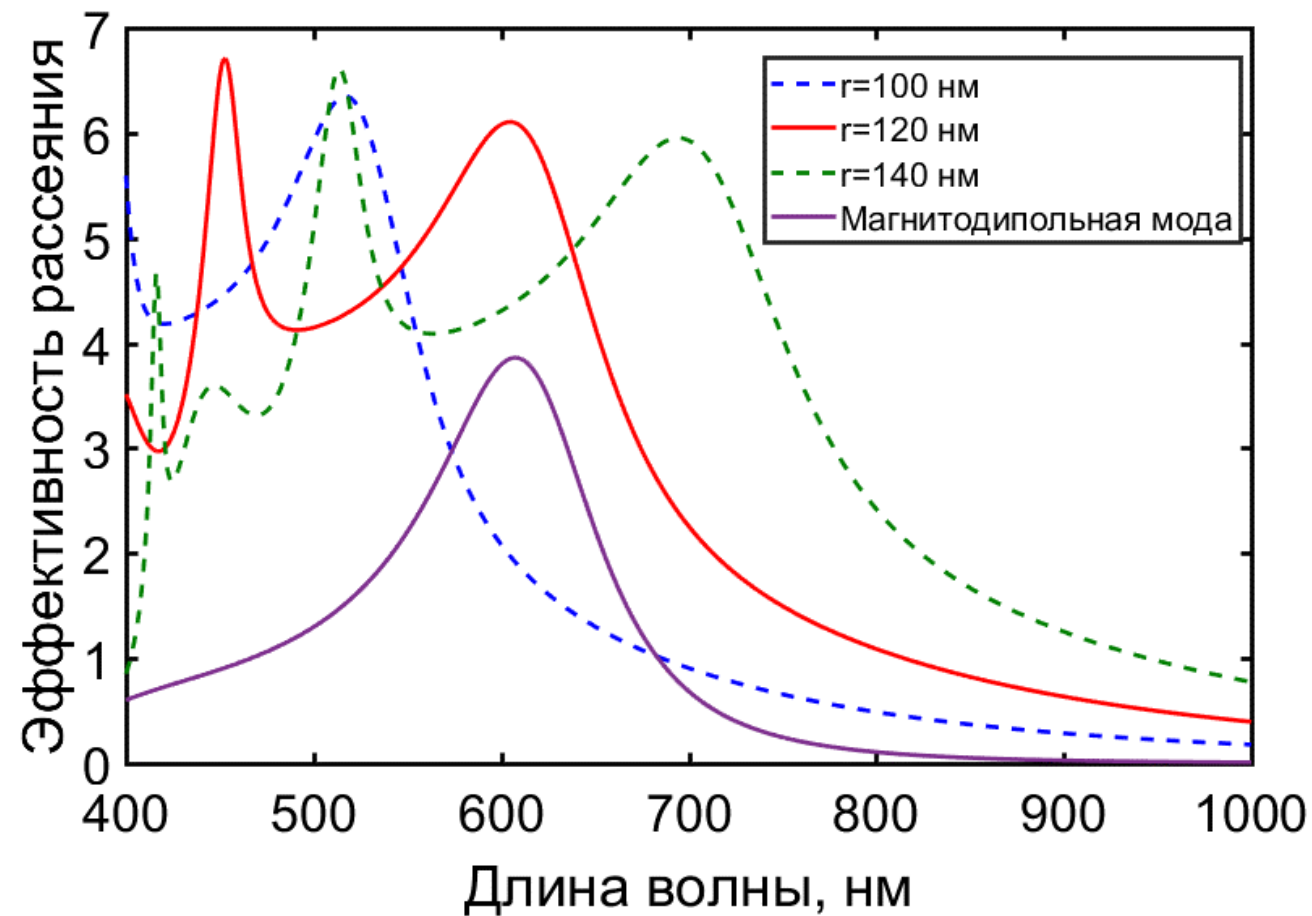
Задача Ми



Сечение рассеяния:  $\sigma_{scat} = \frac{P_{scat}}{|S_{inc}|}$

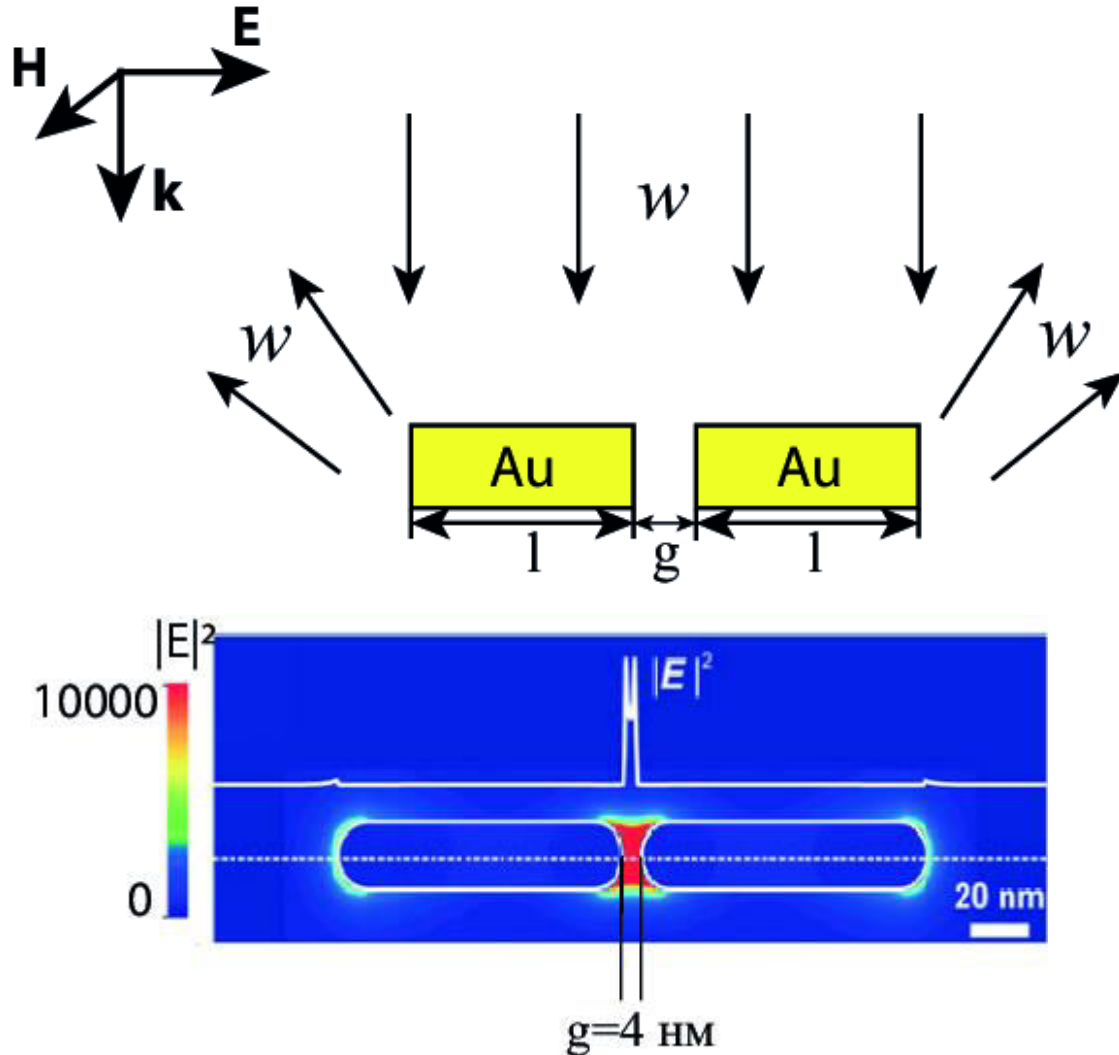
Эффективность рассеяния:  $\eta = \frac{\sigma_{scat}}{\sigma_{geom}}$

$\epsilon(\text{BaTiO}_3) \approx 5$



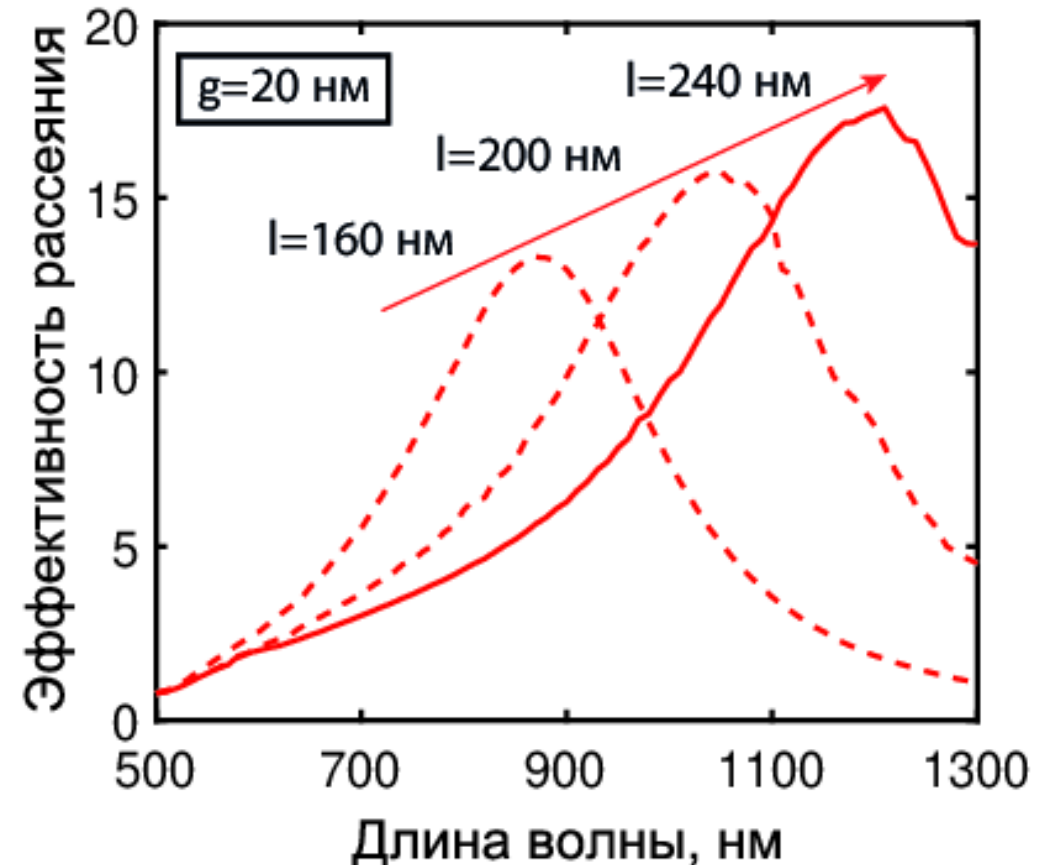
Ми резонанс на 600 нм:  $r=120$  нм

# Рассеяние на металлической наноантенне

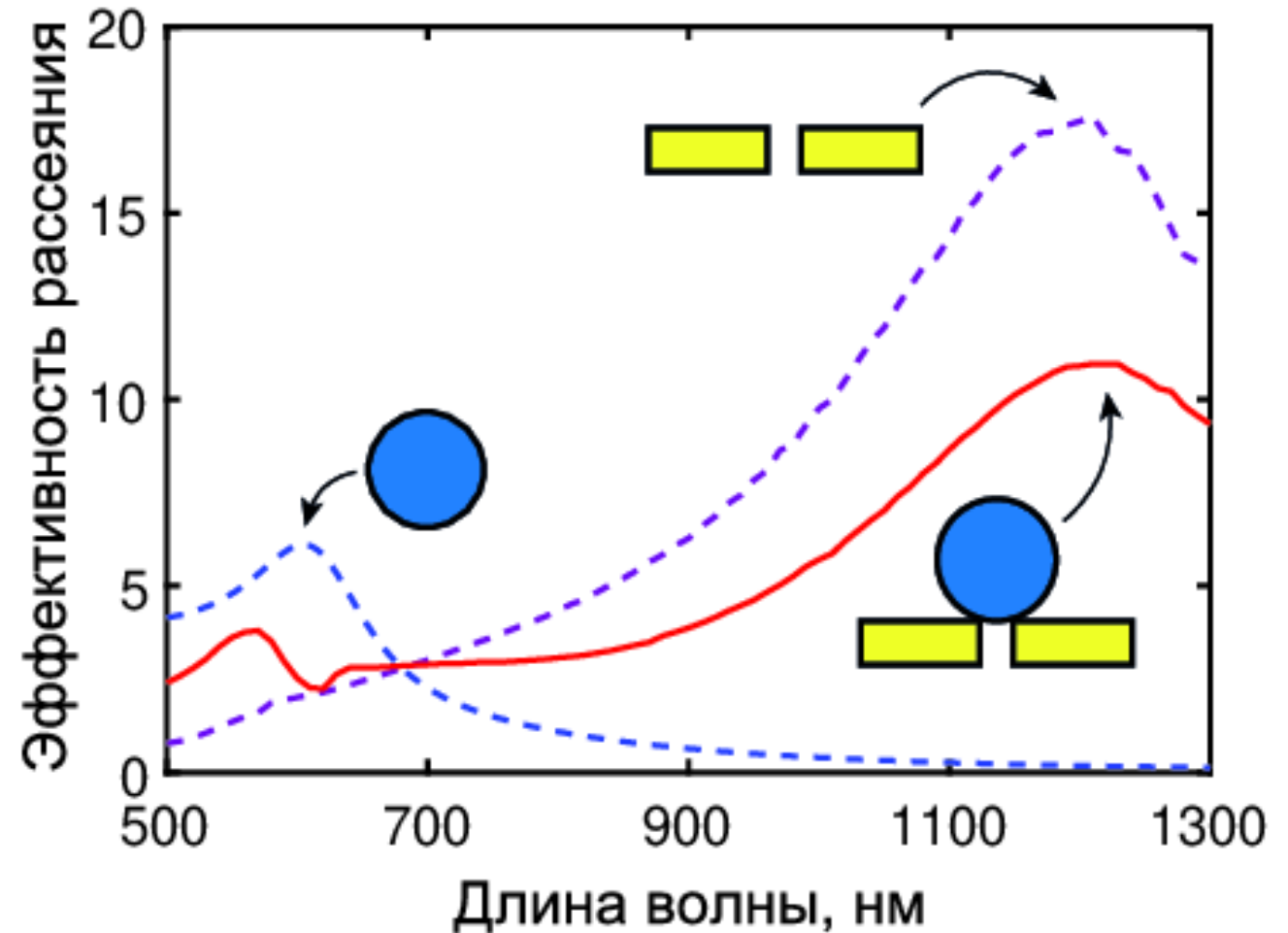
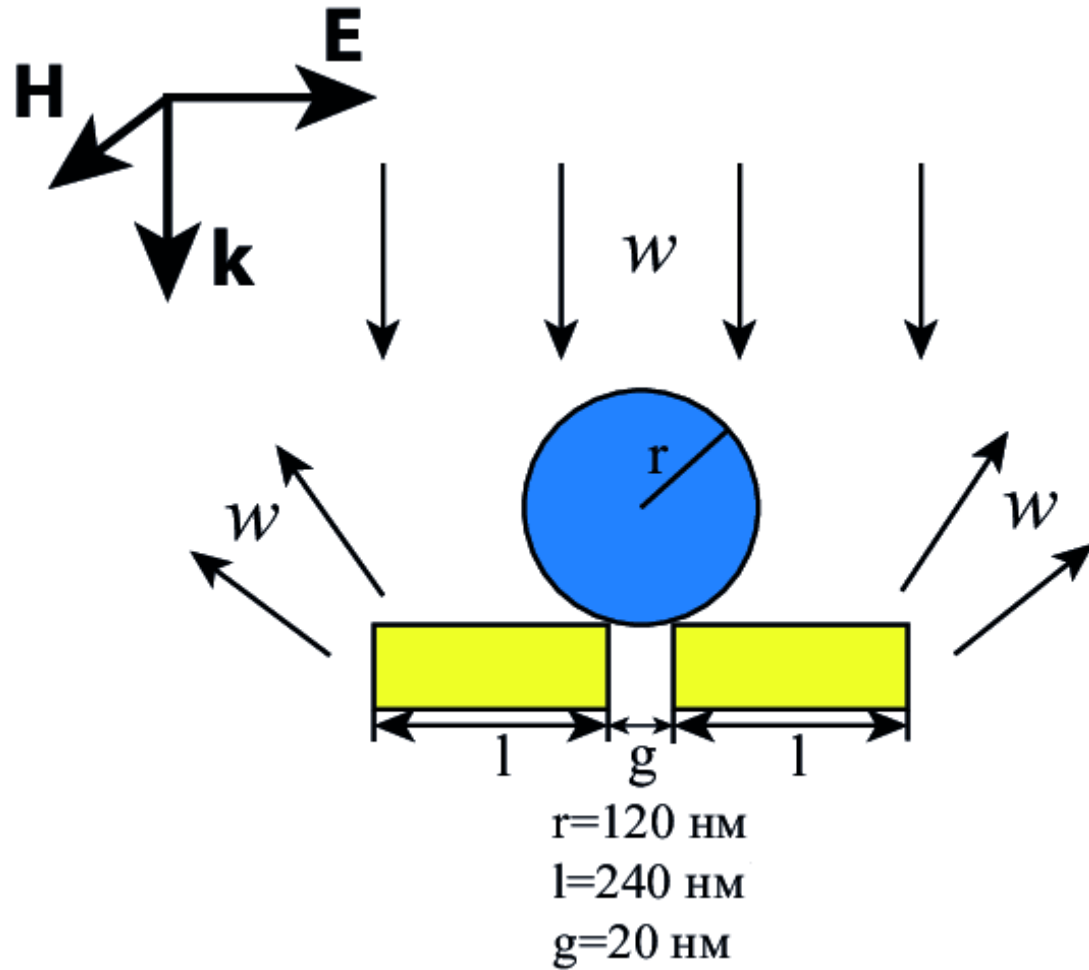


P. Biagioni, et. al., NCBI, 2012

- Решаем численно
- Используется метод конечных элементов
- Длина волны: 500-1300 нм, шаг – 10 нм



# Рассеяние света на гибридной системе



# Генерация второй гармоники

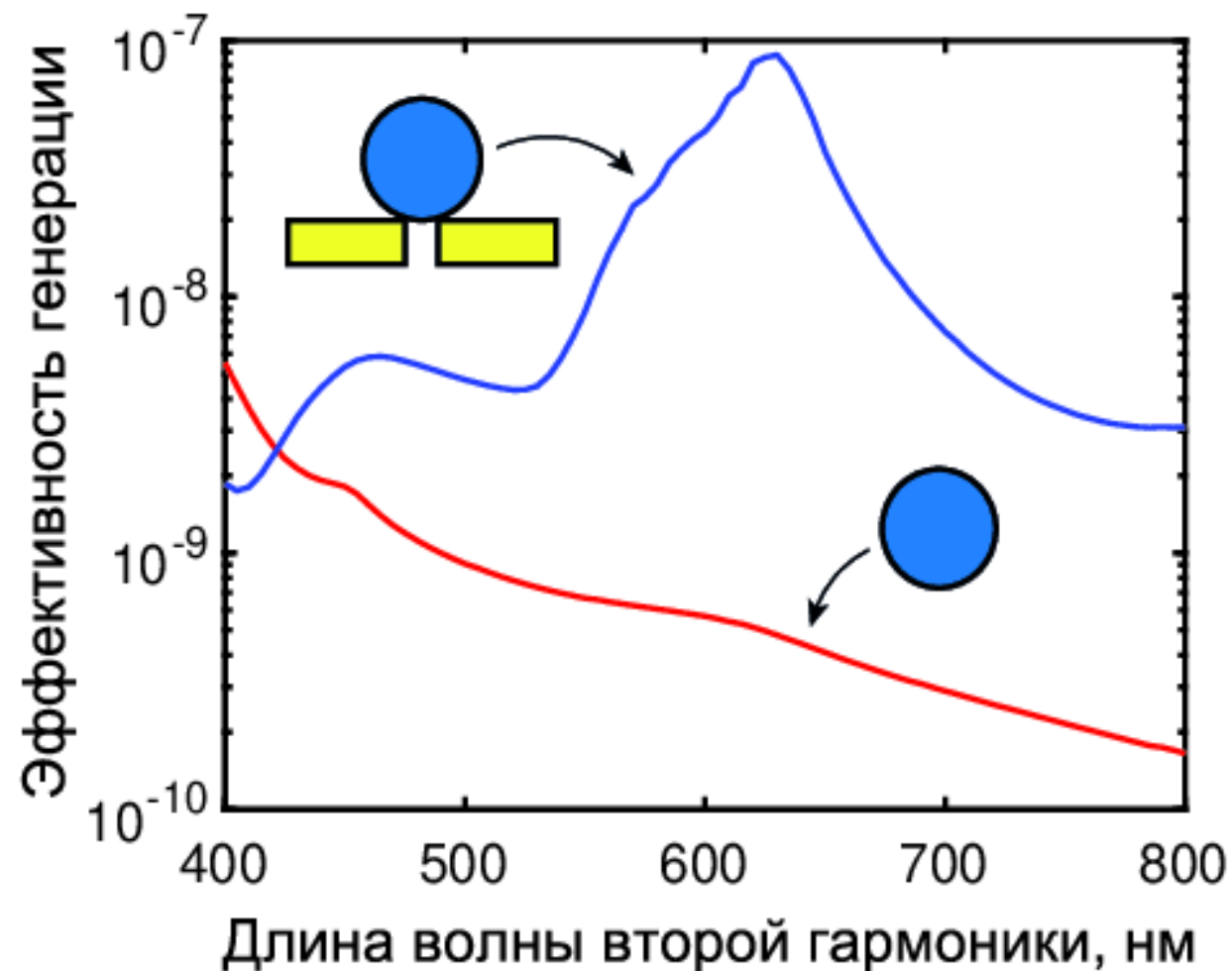
$$\frac{\chi_{Au}^{(2)}}{\chi_{BaTiO_3}^{(2)}} \sim 10^{-4}$$

$$P_i^{(2)} = \chi_{ijk}^{(2)} E_j E_k$$

$$\text{BaTiO}_3: \chi_{ijk}^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \chi_{15} & 0 & 0 \\ \chi_{13} & \chi_{13} & \chi_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{Эффективность: } \eta = \frac{\sigma_{SHG}}{\sigma_{geom}} (I = 10^{12} \text{ Вт/м}^2)$$

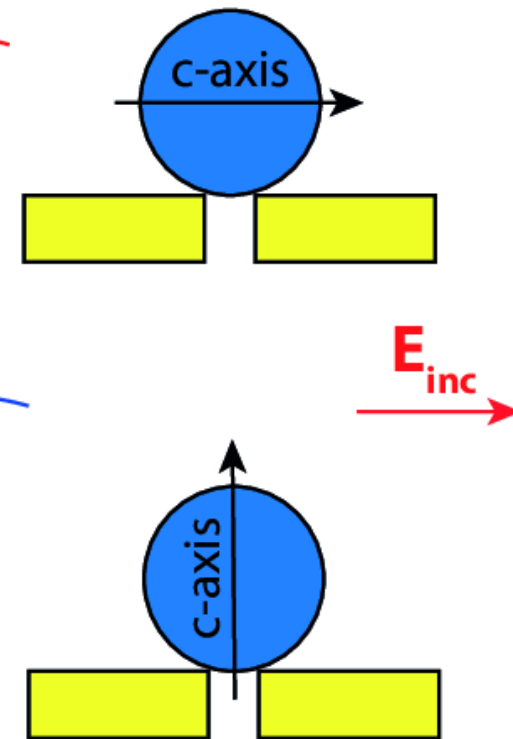
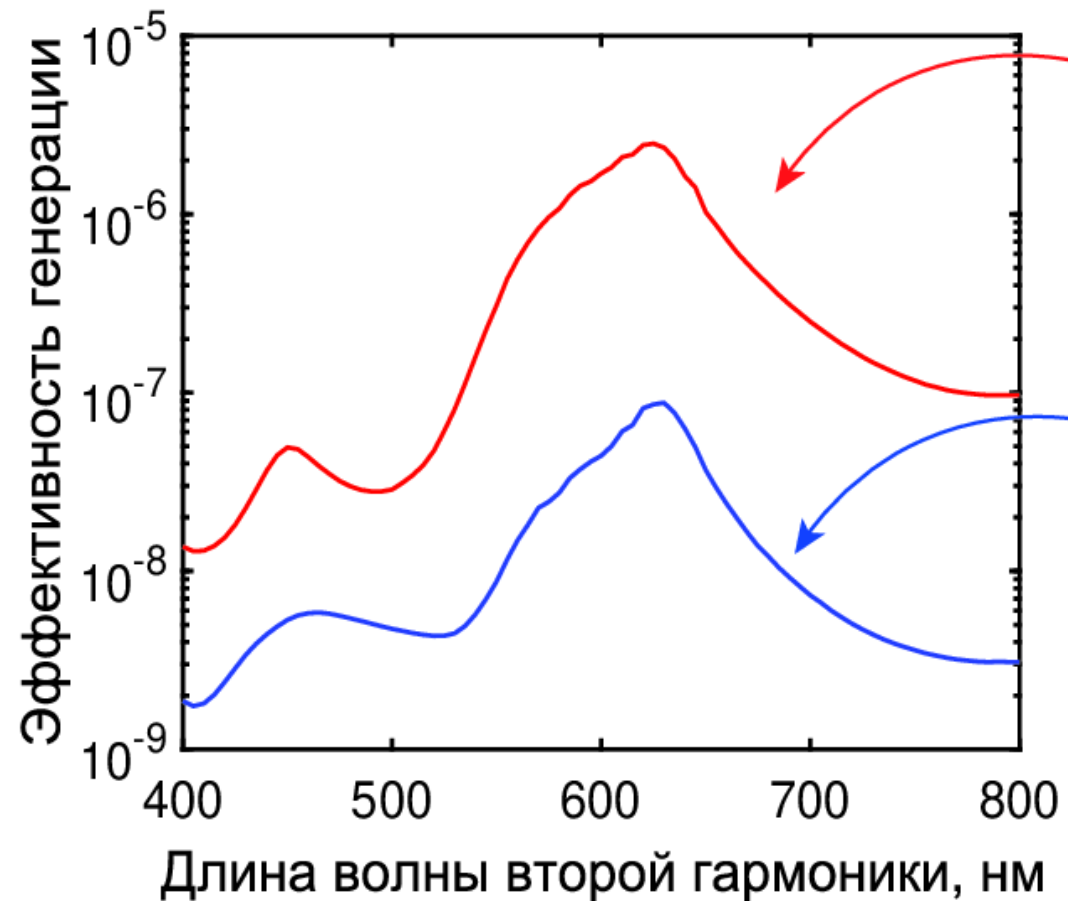
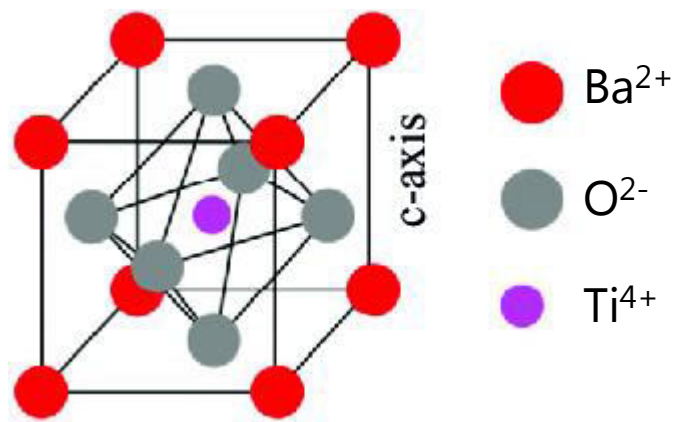
М. J. Weber, Handbook of optical materials, 2002



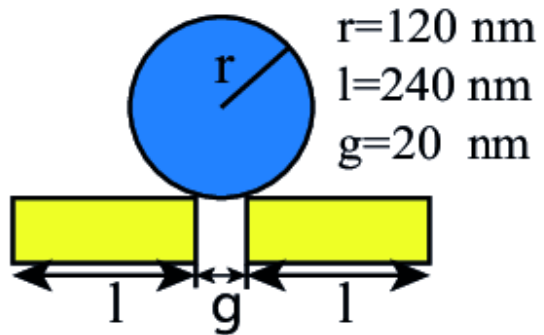


# Зависимость генерации второй гармоники от ориентации $\text{BaTiO}_3$

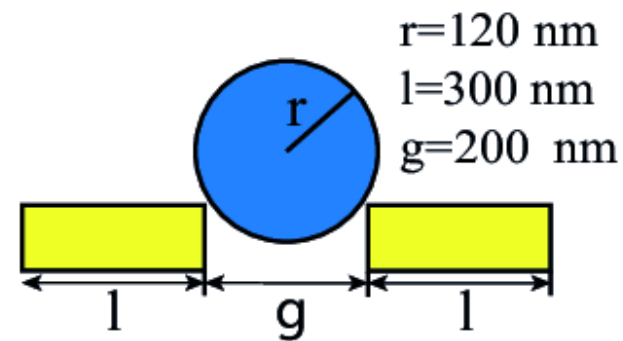
$$\chi_{ijk}^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \chi_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \chi_{15} & 0 & 0 \\ \chi_{13} & \chi_{13} & \chi_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



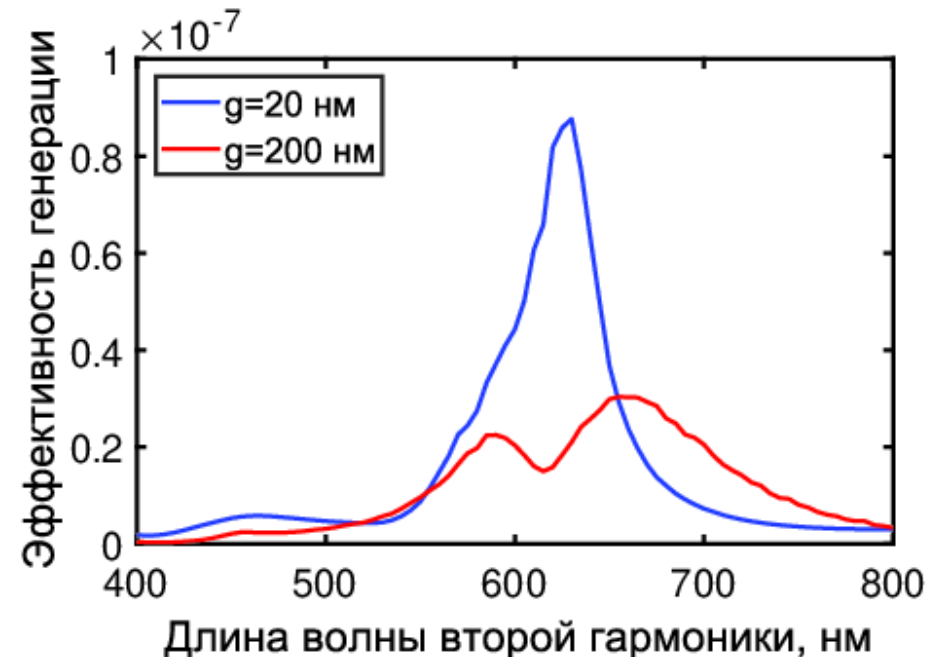
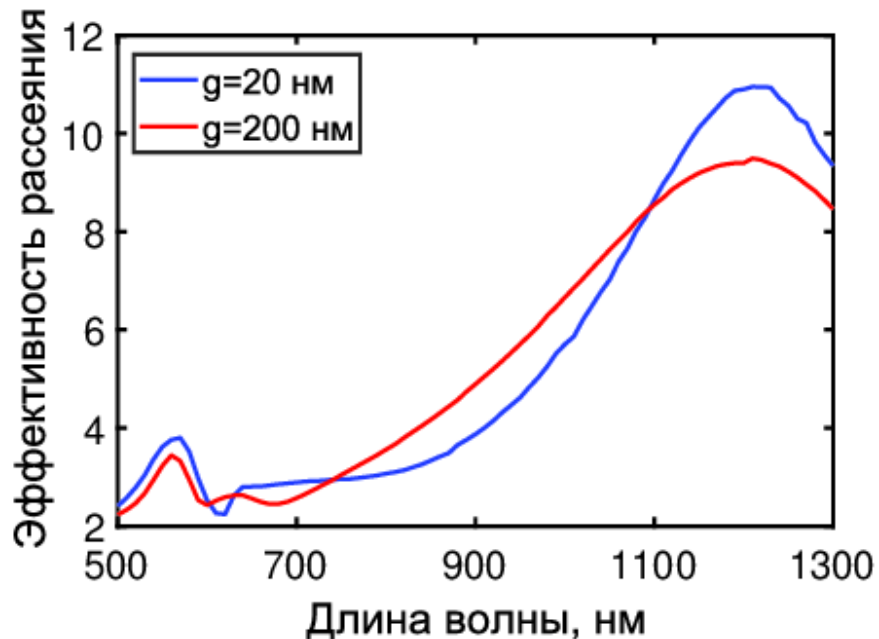
# Зависимость генерации второй гармоники от зазора между плазмонными частицами



Исходная конфигурация



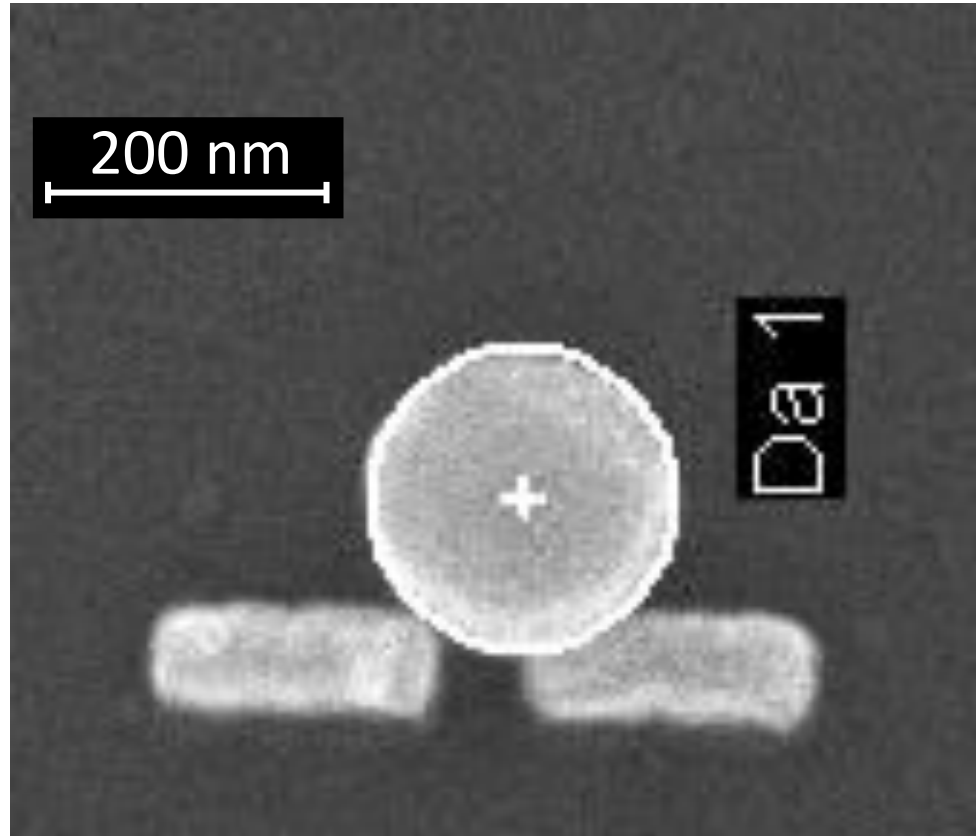
Конфигурация без усиления  
поля в зазоре



# Экспериментальная часть

**ETH Zürich**

Optical Nanomaterial Group



Dr. Rachel Grange

<http://www.ong.ethz.ch/>

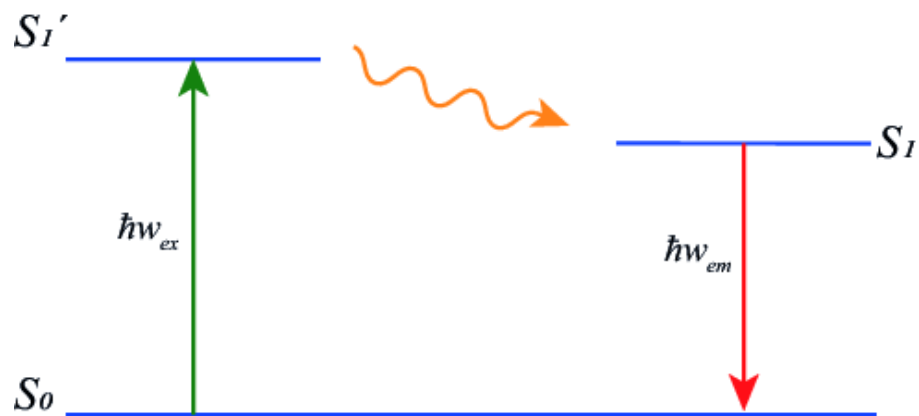
# Выводы

- Подобрана бирезонансная конфигурация с резонансами на частоте падающего поля и частоте генерации второй гармоники
- Теоретически получено максимальное усиление генерации второй гармоники на два порядка
- Теоретически показана зависимость генерации второй гармоники от ориентации кристаллической решетки нелинейной частицы и от зазора между плазмонными частицами

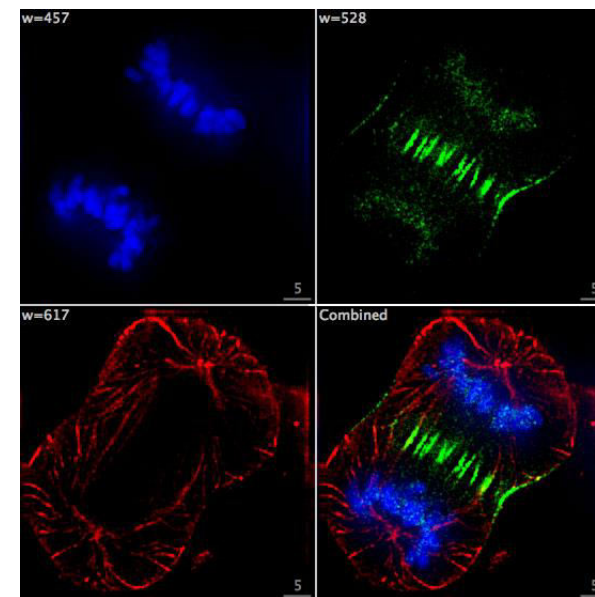
Спасибо за внимание

# Микроскопия

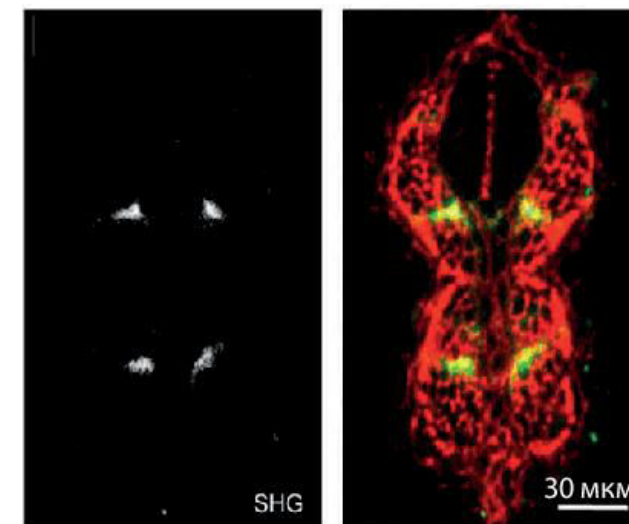
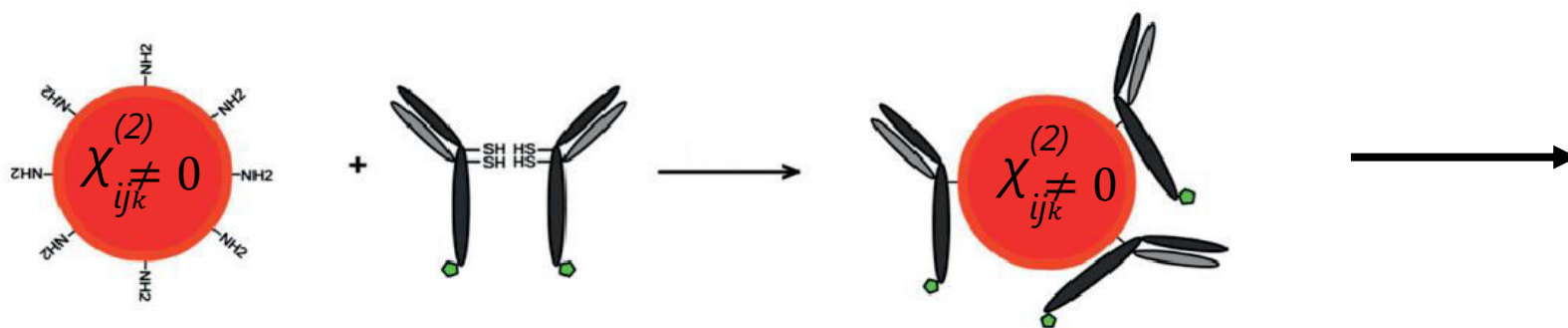
## Флуоресцентная микроскопия



Визуализация  
процесса  
деления клетки



## Генерация второй гармоники в микроскопии



Генерация второй  
гармоники

Профиль исследуемой  
ткани

# Генерация второй гармоники в микроскопии

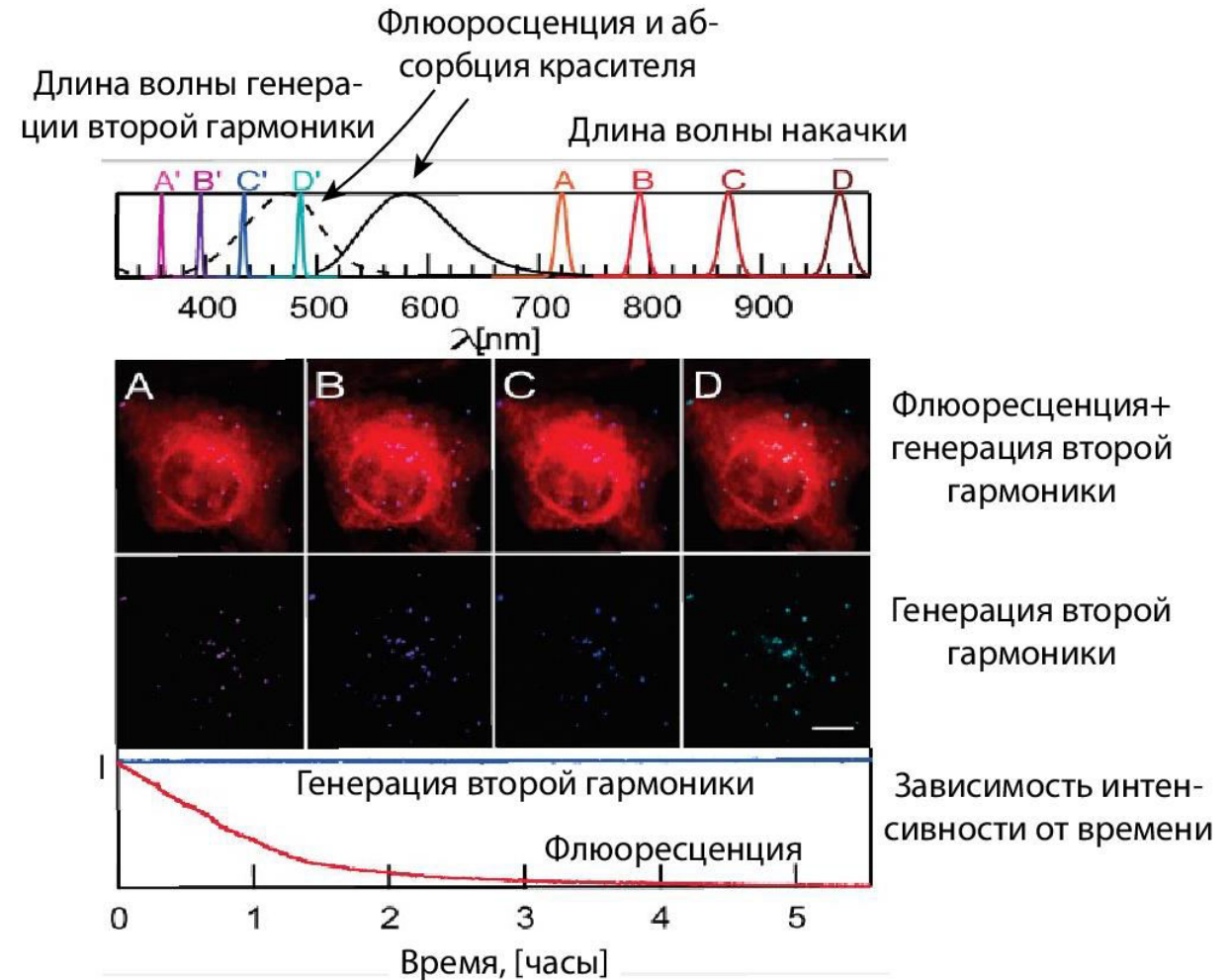
## ■ Преимущества:

- отсутствие выгорания
- отсутствие прерывистой флюоресценции

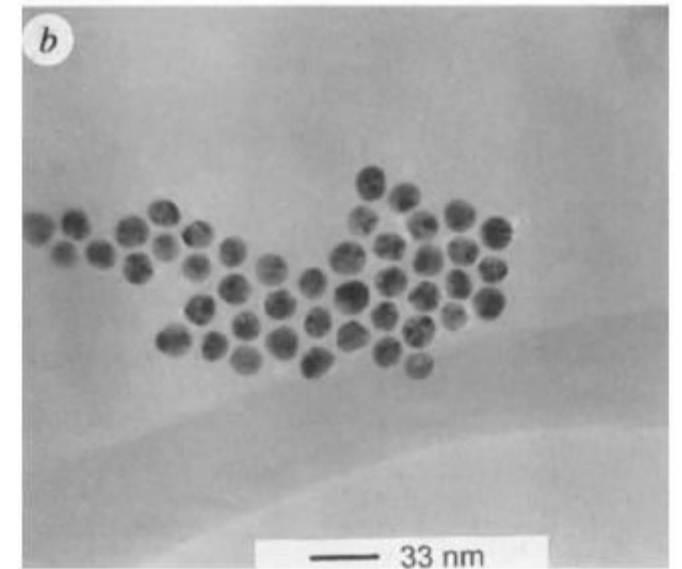
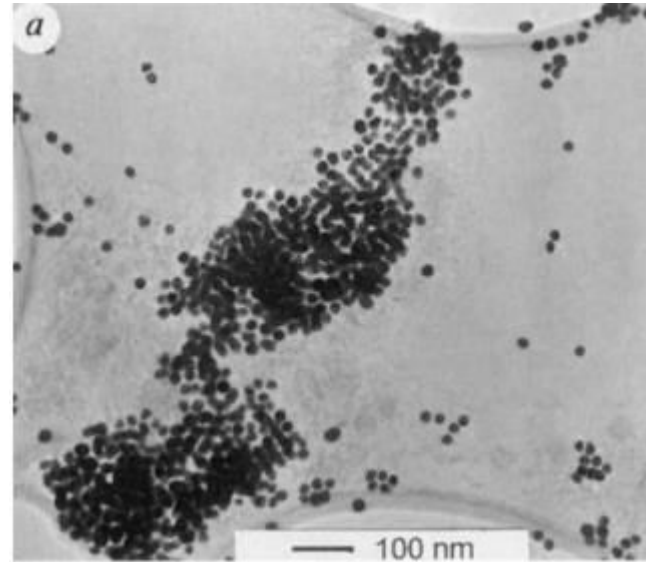
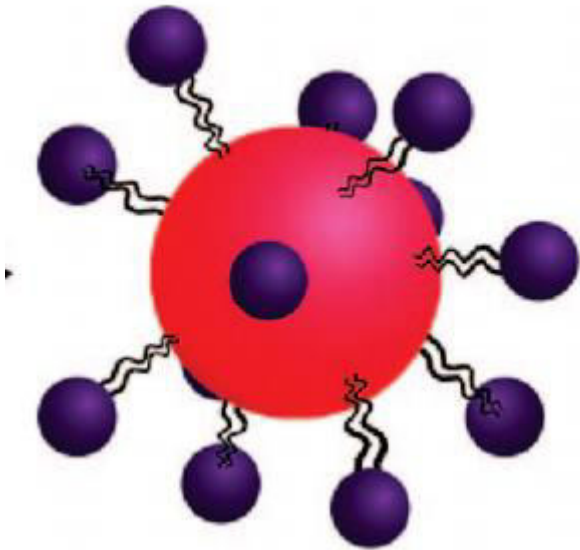
## ■ Недостатки:

- маленькая эффективность генерации второй гармоники ( $\eta$ )

Глубина наблюдения – до 120 мкм



# Создание кластеров золотых частиц

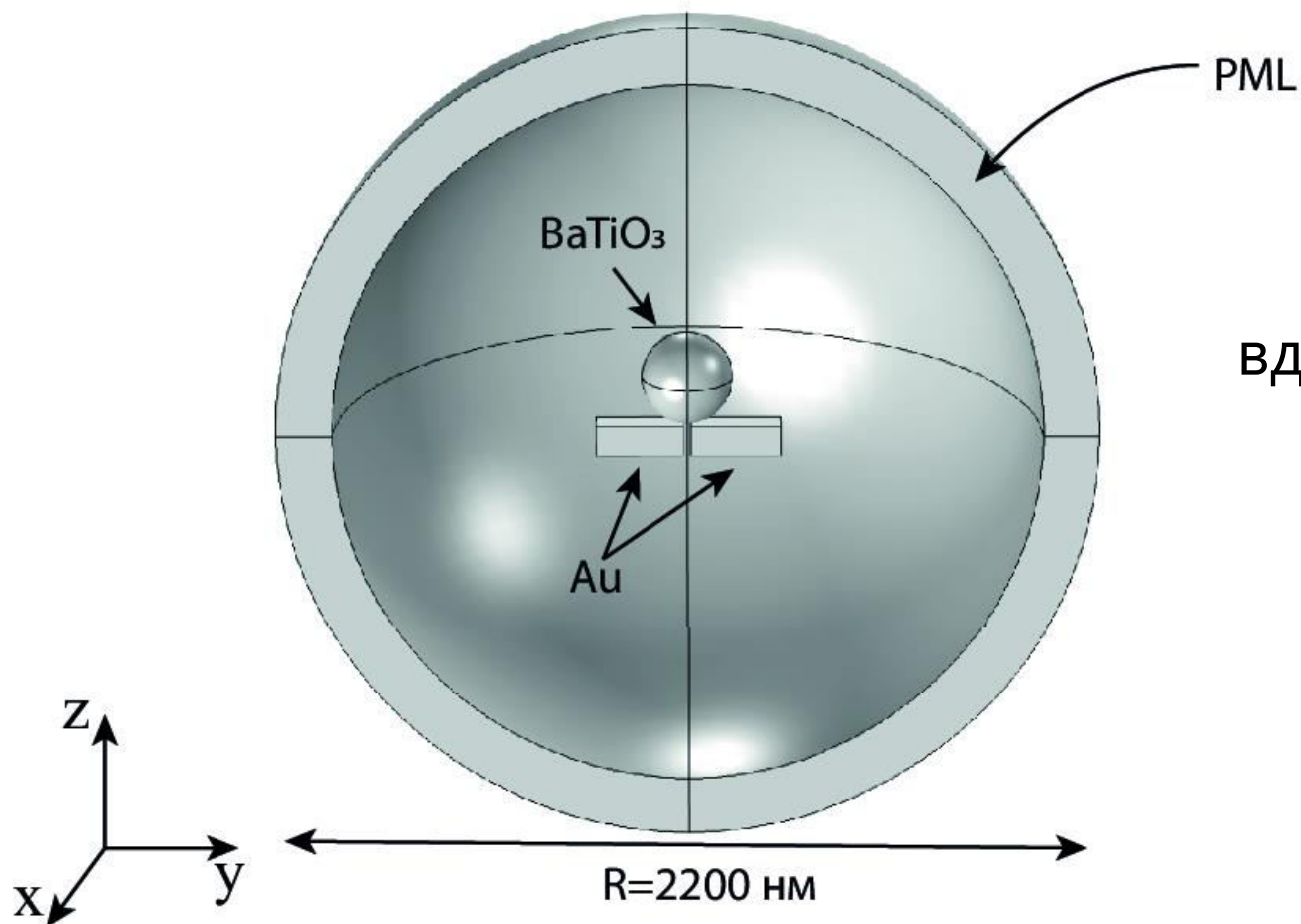


D. S. Sebba, et al, Nano Lett., 2008

C. A. Mirkin, et al, Nature, 1996



# Моделирование

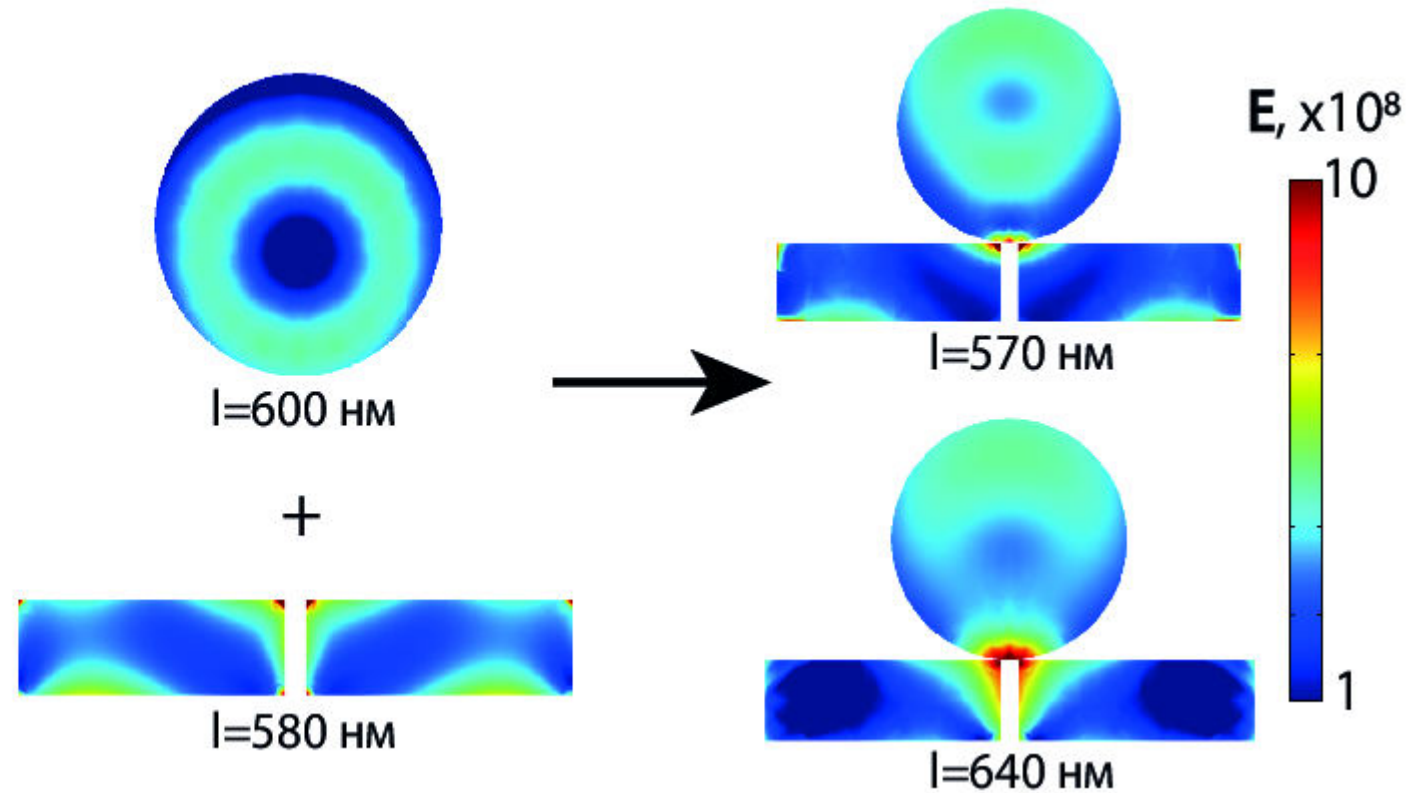
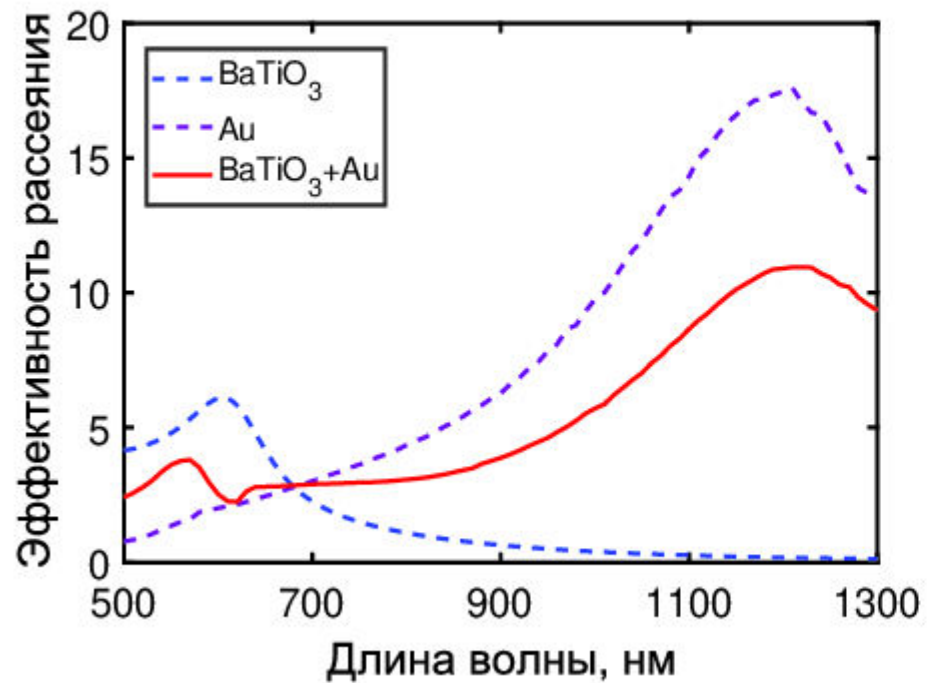


$$\nabla \times \mu^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left( \varepsilon - \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon_0} \right) \mathbf{E}$$

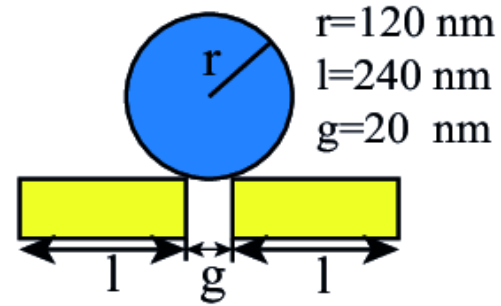
+

вдали от наноантенны поле – сумма полей  
плоской и сферической волн

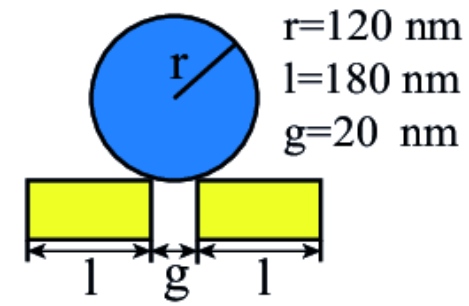
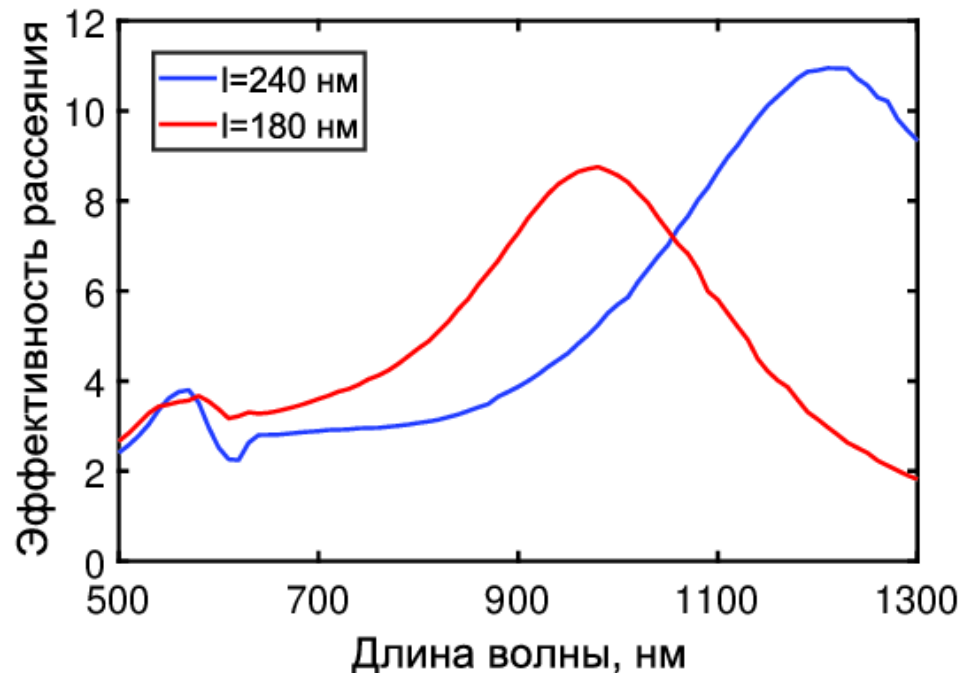
# Моды гибридной наноантенны



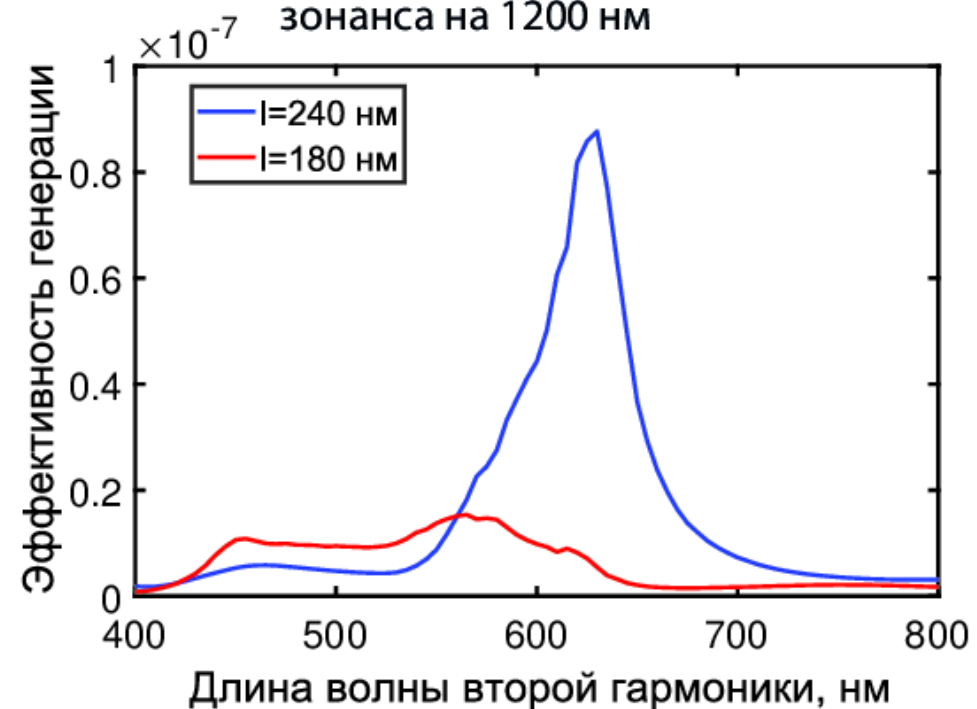
# Зависимость генерации второй гармоники от резонансной структуры



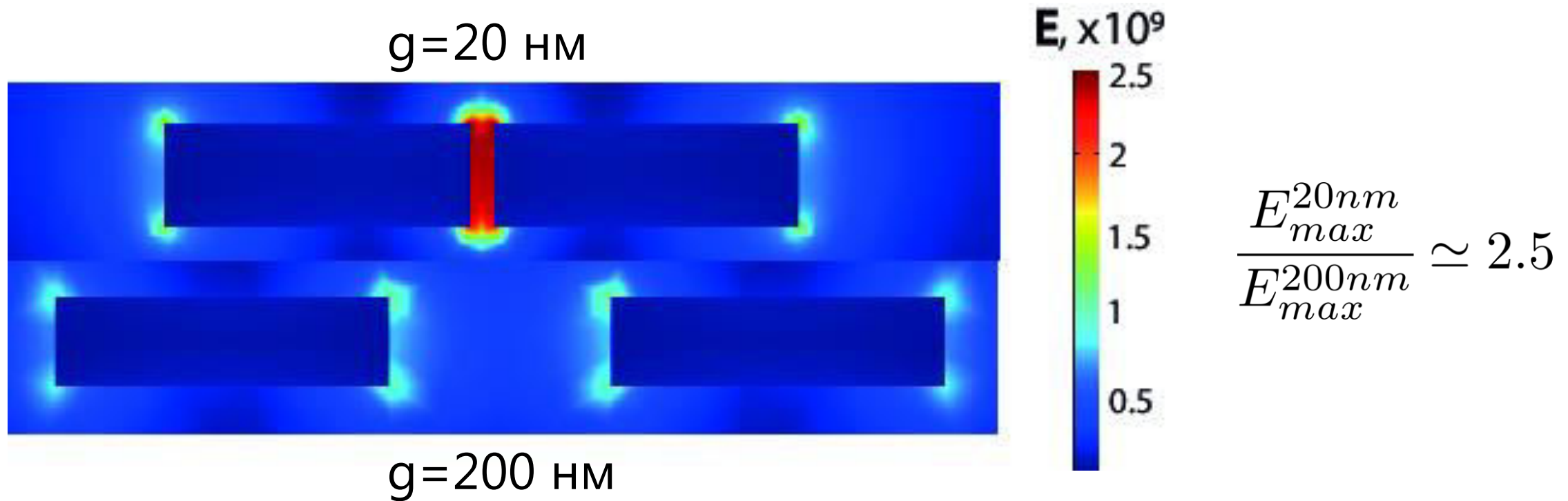
Исходная конфигурация



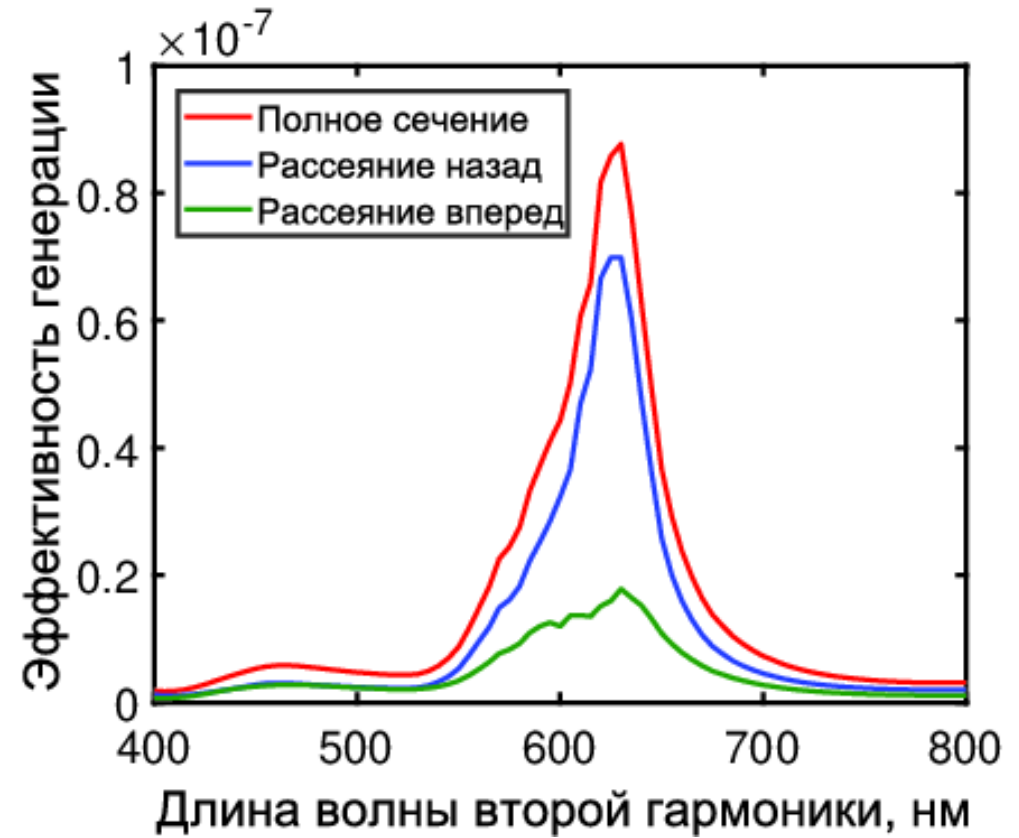
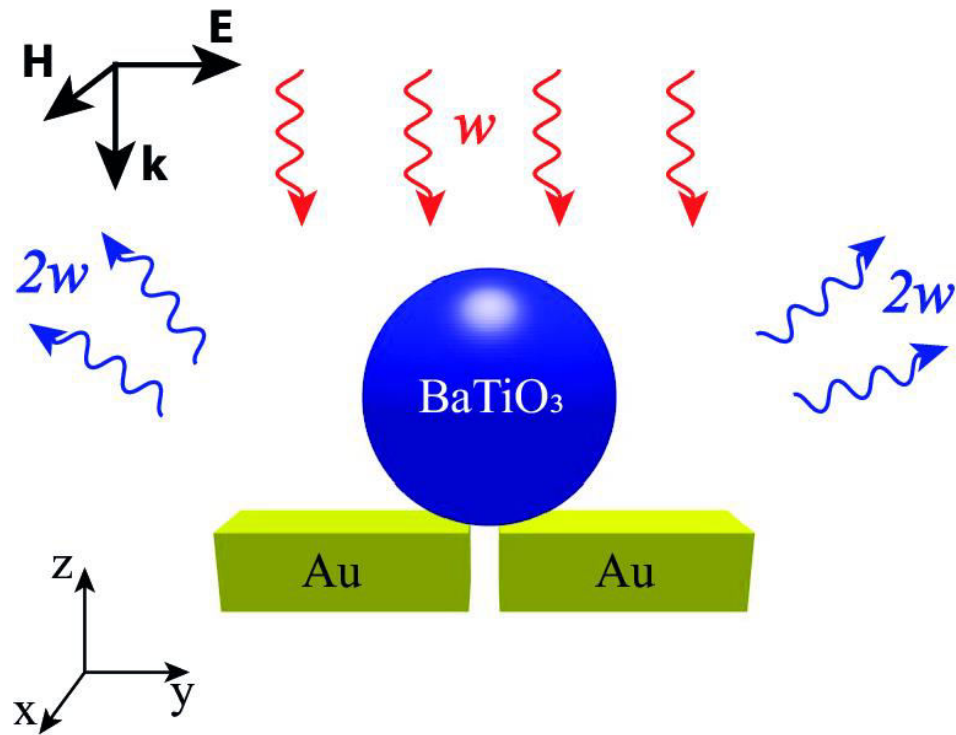
Конфигурация без плазмонного резонанса на 1200 нм



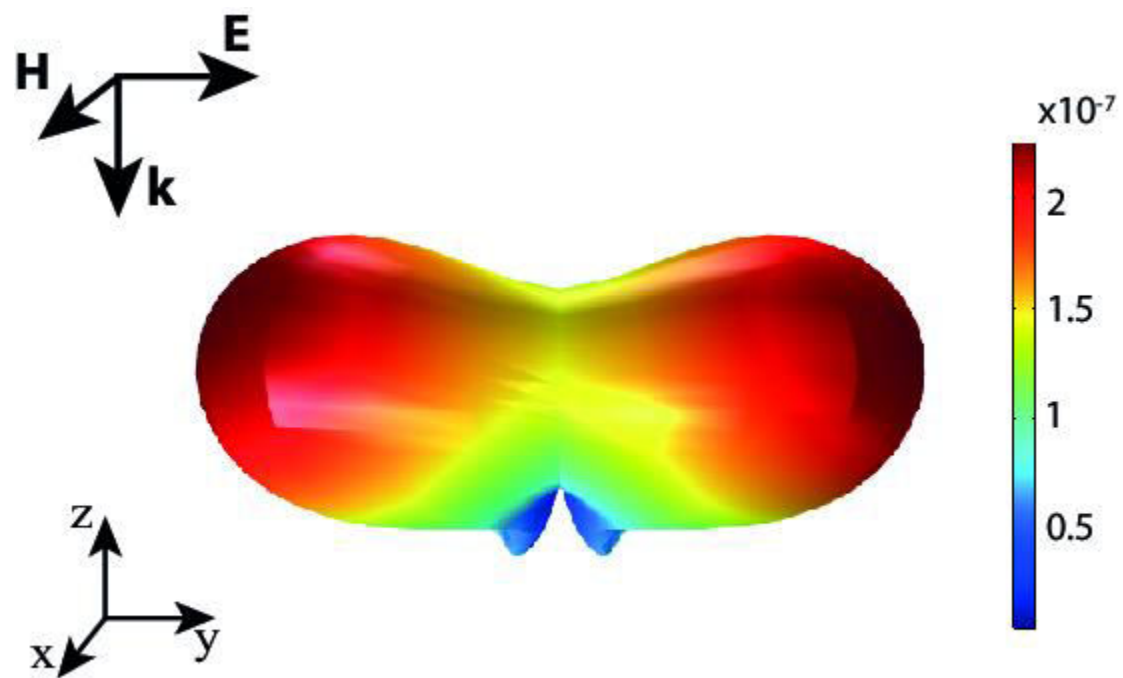
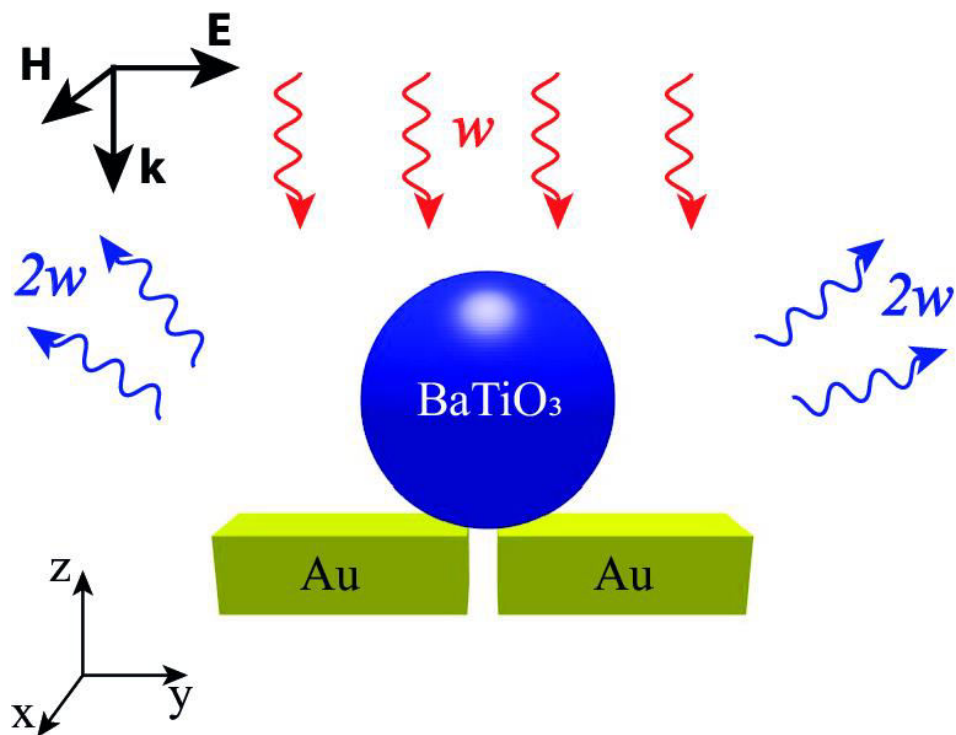
# Усиление поля в зазоре



# Генерация второй гармоники вперед и назад



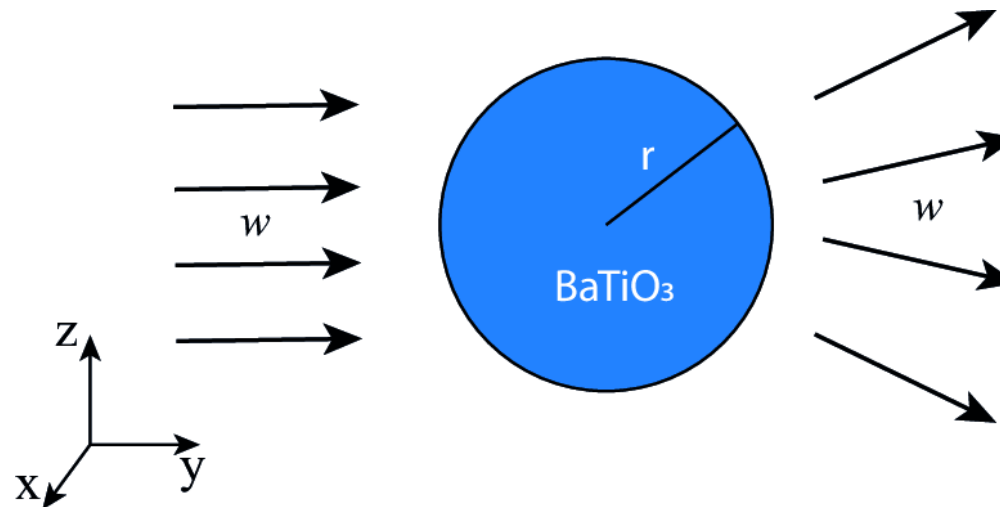
# Диаграмма направленности



# Задача Ми

$$E_s = \sum_{n=1}^{\infty} a_n M_{e1n}^{(3)} + b_n N_{o1n}^{(3)}$$

$$\eta = \frac{\sigma_{SCA}}{\sigma_{geom}} \sim \sum |a_n|^2 + |b_n|^2$$



$a_1$  – электрическая дипольная мода

$b_1$  – магнитная дипольная мода

$a_2$  – электрическая квадрупольная мода

$b_2$  – магнитная квадрупольная мода