

## 1. Аннотация

В настоящей работе представлен анализ резонансных откликов для золотых наноантенн прямоугольного сечения при взаимодействии с внешним электромагнитным полем, полученных полноволновым моделированием в системе Comsol Multiphysics. Известно, что субволновые металлические наночастицы имеют резонансный отклик на частотах, зависящих от геометрии и размера такой наночастицы. Такие резонансы обусловлены тем, что наночастицы могут «работать» как микро- и нано-резонаторы. Мы обнаружили, что у тонких наноантенн с определённым форм-фактором имеется двугорбый отклик в области коротких длин волн при падении электромагнитной волны, поляризованной вдоль короткой стороны наноантенны. При повороте наноантенны относительно поляризации падающей волны в длинноволновой области появляется третий максимум, который растёт с увеличением угла поворота и достигает предела при повороте на угол  $\pi/2$ . При этом максимумы в области коротких длин волн уменьшаются практически до нуля. Сечение рассеянного света при повороте наноантенны на угол  $\pi/4$  относительно вектора  $E$  падающей волны оказывается равным полусумме сечений рассеяния двух других задач, в которых вектор  $E$  направлен вдоль  $l$  и вдоль  $d$ . Описанный эффект может быть использован при разработке датчиков угла поворота на основе метаматериалов.

## 2. Тема работы

Исследование фазово-градиентных металл-диэлектрических структурированных пленок (метаповерхностей) при взаимодействии с электромагнитным полем в ближнем ИК и видимом диапазонах.

## 3. Состав коллектива

1. Вергелес Сергей Сергеевич, научный сотрудник ИТФ им. Л.Д.Ландау РАН, МФТИ, доцент кафедры теоретической физики, кандидат физико-математических наук, [vergeles@gmail.com](mailto:vergeles@gmail.com) – руководитель проекта
2. Ефремова Екатерина Александровна, доцент кафедры общей физики 1, физический факультет, Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ), [Efreмова.Kate@gmail.com](mailto:Efreмова.Kate@gmail.com) – программист
3. Крылов Игорь Ратмирович, доцент кафедры общей физики 1, физический факультет, Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ), [igor-krylov@yandex.ru](mailto:igor-krylov@yandex.ru) – научный консультант
4. Прохорова Ульяна Витальевна, ведущий инженер учебной лаборатории квантовой электроники, физический факультет, Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ), [ulianchic@yandex.ru](mailto:ulianchic@yandex.ru) – программист

## 4. Научное содержание работы

### 4.1. Постановка задачи

Нашей целью являлось исследовать преломляющие свойства периодических металл-диэлектрических структур со сложным периодом и освоить процесс расчёта структур для изготовления их с заданными свойствами. Также нашей задачей стояло выявить условия возникновения резонансного отклика для поверхностных волн, которые могут значительно ограничивать диапазон резонансного отклика для отраженного и проходящего излучения. Для достижения данных целей мы решали задачи численного моделирования электромагнитного резонансного отклика одиночных наноантенн с различной геометрией в видимом и ИК диапазоне и периодически упорядоченных метаповерхностей (состоящих из промоделированных, исследованных наноантенн).

### 4.2. Современное состояние проблемы

На сегодняшний день интенсивно ведутся исследования в области создания широкополосного отклика, в частности, за последнее время было опубликовано несколько интересных работ ориентированных на построение принципиальной схемы (геометрии) для получения широкополосного отклика для более или менее конкретных технологических приложений, таких как поляризационный конвертор, широкополосный поглотитель, управление хроматическими абберациями [1-4]. Тем не менее, полученные широкополосные отклики сильно ограничены частотным диапазоном и неоднородны внутри каждого рассматриваемого диапазона.

Отметим также, что в случае антенны прямоугольного сечения существует три независимых параметра для подстройки резонансной частоты и ширины резонанса: длина, ширина и глубина. Фиксируя, например длину и ширину, и меняя глубину антенны, мы можем подстраивать частоту резонансного отклика, в частности как это показано в работе [5], где исследовался оптический отклик наноантенны цилиндрической формы в зависимости от форм-фактора, который представляет собой отношение длины цилиндра к его диаметру. В работе [5] показано существенное изменение частоты отклика в зависимости от такого форм-фактора, но ширина полученного резонанса не входило в приоритетное рассмотрение авторов. Для геометрии, рассматриваемой в данной работе (см. рис 1.) можно ввести два форм фактора: отношение длины ( $l$ ) к толщине ( $h$ ) и отношение длины ( $l$ ) к ширине ( $d$ ). Появляющаяся в рассматриваемой геометрии еще одна независимая координата дает дополнительную степень свободы для подбора ширины резонанса.

1. Linbo Zhang, Peiheng Zhou, Haipeng Lu, Li Zhang, Jianliang Xie, and Longjiang Deng Realization of broadband reflective polarization converter using asymmetric cross-shaped resonator. OPTICAL MATERIALS EXPRESS Vol. 6 № 4, (2016). DOI:10.1364/OME.6.001393
2. Arvind Nagarajan, Kumar Vivek, Manav Shah, Venu Gopal Achanta, and Giampiero Gerini. A Broadband Plasmonic Metasurface Superabsorber at Optical Frequencies: Analytical Design Framework and Demonstration. Adv. Optical Mater. 1800253, (2018), DOI: 10.1002/adom.201800253
3. Hui-Hsin Hsiao, Yu Han Chen, Ren Jie Lin, Pin Chieh Wu, Shuming Wang, Bo Han Chen, and Din Ping Tsai, Integrated Resonant Unit of Metasurfaces for Broadband Efficiency and Phase Manipulation. Adv. Optical Mater. 6, 1800031 (2018), DOI: 10.1002/adom.201800031
4. Fei Zhang, Ming Zhang, Jixiang Cai, Yi Ou, and Honglin Yu Metasurfaces for broadband dispersion engineering through custom-tailored multi-resonances. Applied Physics Express 11, 082004 (2018) DOI: 10.7567/APEX.11.082004

6. G. W. Bryant, F. J. G.de Abajo, and J. Aizpurua. NanoLetters 8, 631-636 (2008).

7. Q. Zhang, J. You and Ch. Liu, Equivalent Nanocircuit Theory and Its Applications. Chapter 10, <http://dx.doi.org/10.5772/67681>

8. S. W. Prescott et al. // J. of Appl. Phys. 2006 V. 99, P.123504.

#### 4.3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Рассчитывался отклик золотой наночастицы (рис. 1а) на падающее под разными углами электромагнитное излучение. Золото задаётся таким образом, что его диэлектрическая проницаемость и мнимая и вещественная части зависят от длины волны (рис. 1б).

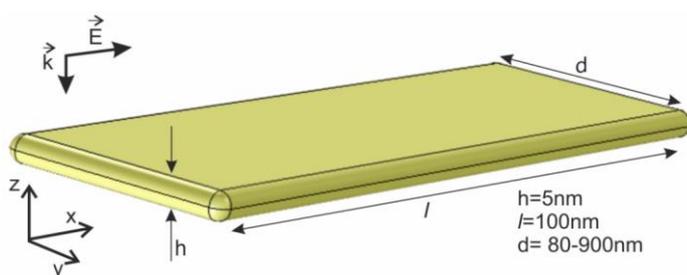


Рисунок 1а исследуемая золотая наночастица

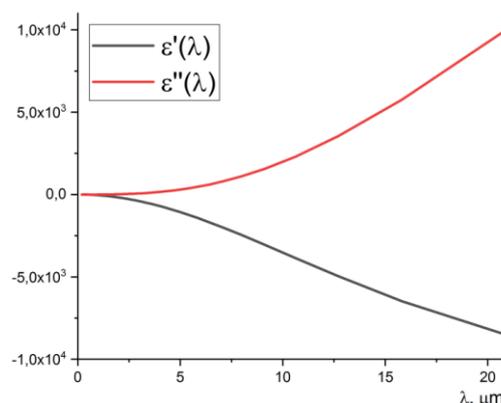


Рисунок 1б

A.Ciesielski, L. Skowronski, M. Trzinski, E. Gorecka, P. Trautman, T. Szoplik. Evidence of germanium segregation in gold thin films, [Surf. Sci. 674, 73-78 \(2018\)](#)

$$E_x = E_0 \cdot e\left(\frac{-i \cdot 2\pi}{\lambda}\right)z$$

$$\nabla \times (\mu_{Au}^{-1}(\nabla \times \vec{E})) - k_0^2(\epsilon_{Au})\vec{E} = 0$$

$$\epsilon_{Au} = \epsilon'(\lambda) - i\epsilon''(\lambda)$$

$$\mu_{Au} = 1$$

$$\sigma_{scatt} = \frac{1}{I_0} \iint [\vec{E} \times \vec{H}] ds \text{ [M}^2\text{]}$$

#### 4.4. Полученные результаты.

##### 1. Изменение ширины антенны

Рассчитывались зависимости сечения рассеяния от ширины нанополоски. Толщина и длина в данном случае оставались неизменными. Было обнаружено, что при определённых соотношениях длины и ширины появляется второй резонансный максимум,

который увеличивается с увеличением ширины антенны. При увеличении ширины наночастицы уменьшается резонансная длина волны рассеиваемого света.

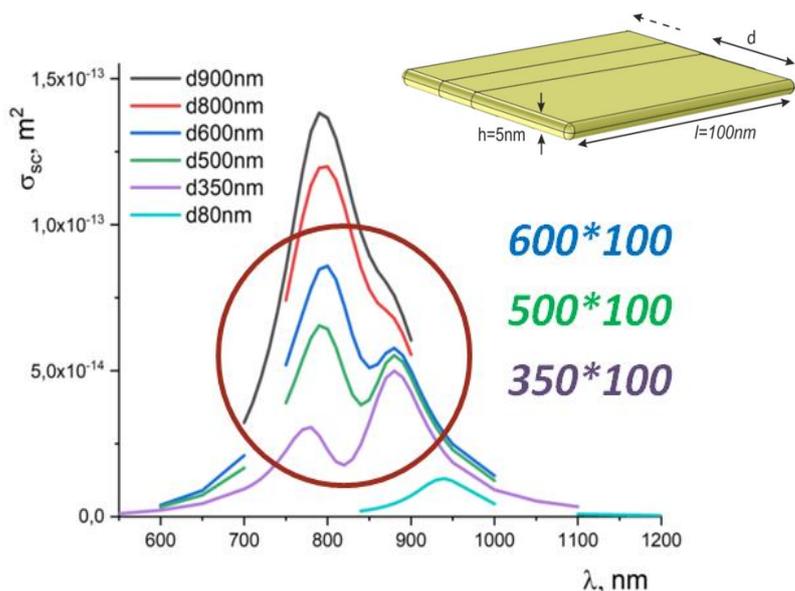


Рисунок 2 Зависимость сечения рассеяния на золотой наночастице от её ширины  $d$

## 2. Изменение толщины антенны

Рассчитывались зависимости сечения рассеяния при увеличении толщины антенны в 2 раза. Резонанс смещается влево по оси длин волн и становится несколько выше.

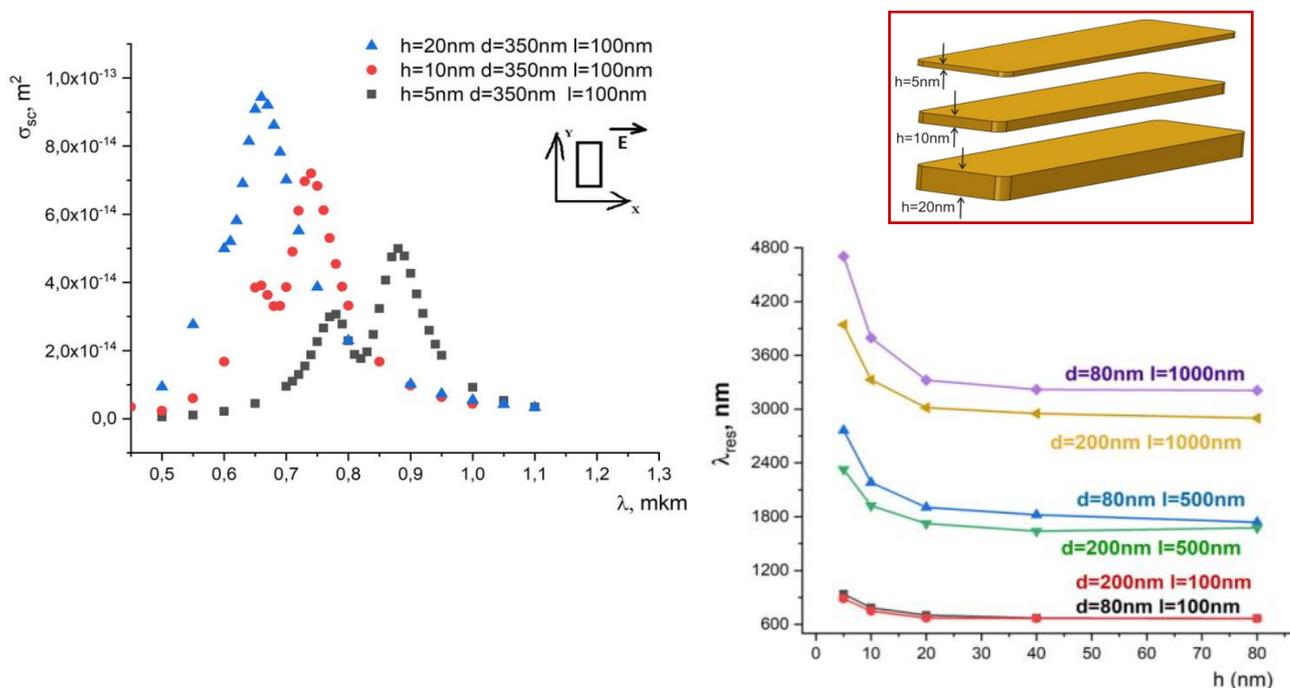


Рисунок 3 Зависимость сечения рассеяния на золотой наночастице от её толщины  $h$

3. Рассчитывались зависимости сечения рассеяния от ширины/длины наночастицы, увеличенной в 2 раза.

На рис. 4 видно, что при увеличении длинной стороны в 2 раза резонансы разбегаются, при увеличении короткой стороны в 2 раза резонансы сближаются.

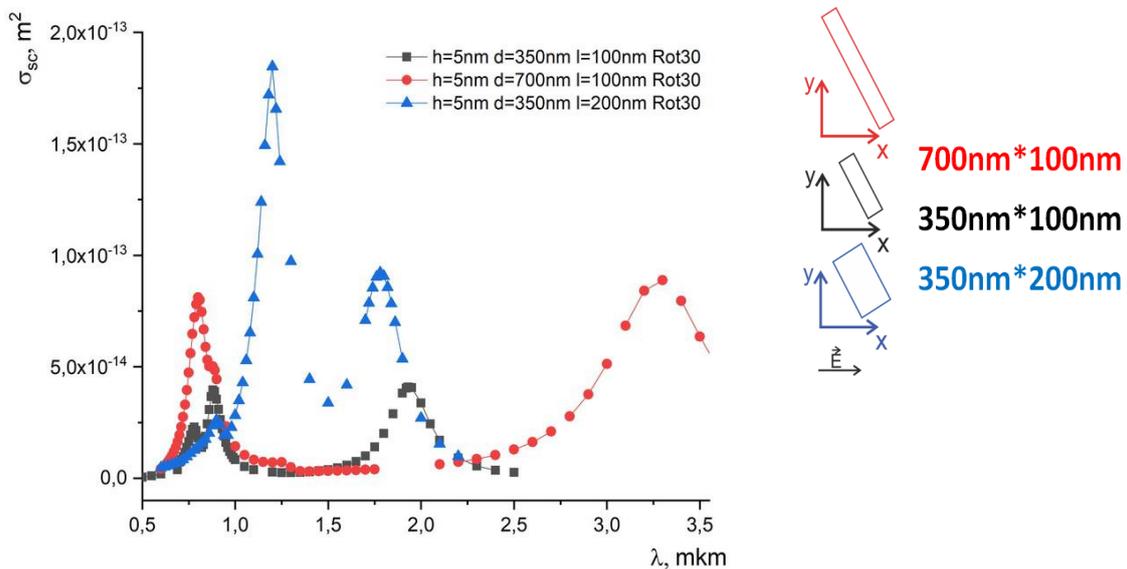


Рисунок 4 Зависимость сечения рассеяния при увеличении ширины/длины в 2 раза

4. Рассчитывались зависимости сечения рассеяния при изменении угла между падающей волной и наночастицей.

а) Было обнаружено, что при вращении антенны относительно поляризации падающего поля  $E$  в длинноволновой области появляется ещё один резонансный максимум. Он увеличивается с ростом угла поворота антенны.

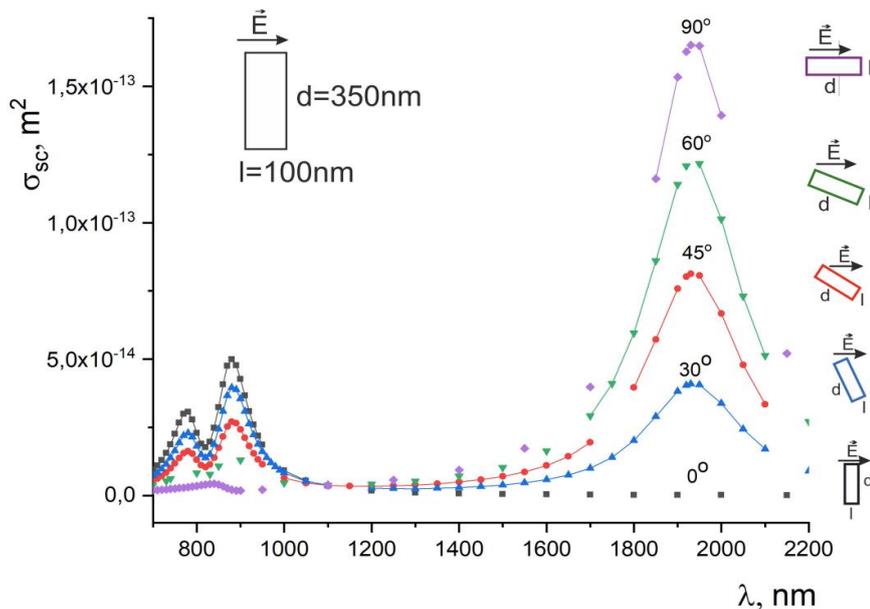


Рисунок 5 Зависимость от угла поворота наночастицы относительно поляризации падающего поля  $E$ . Толщина наночастицы  $h=5\text{nm}$

б) Было обнаружено, что при повороте наночастицы на  $\pi/4$  относительно вектора  $\mathbf{E}$  падающей волны  $\sigma_{\text{scatt}}$  оказывается равным полусумме сечений рассеяния двух других задач, в которых вектор  $\mathbf{E}$  направлен вдоль  $l$  и вдоль  $d$ .

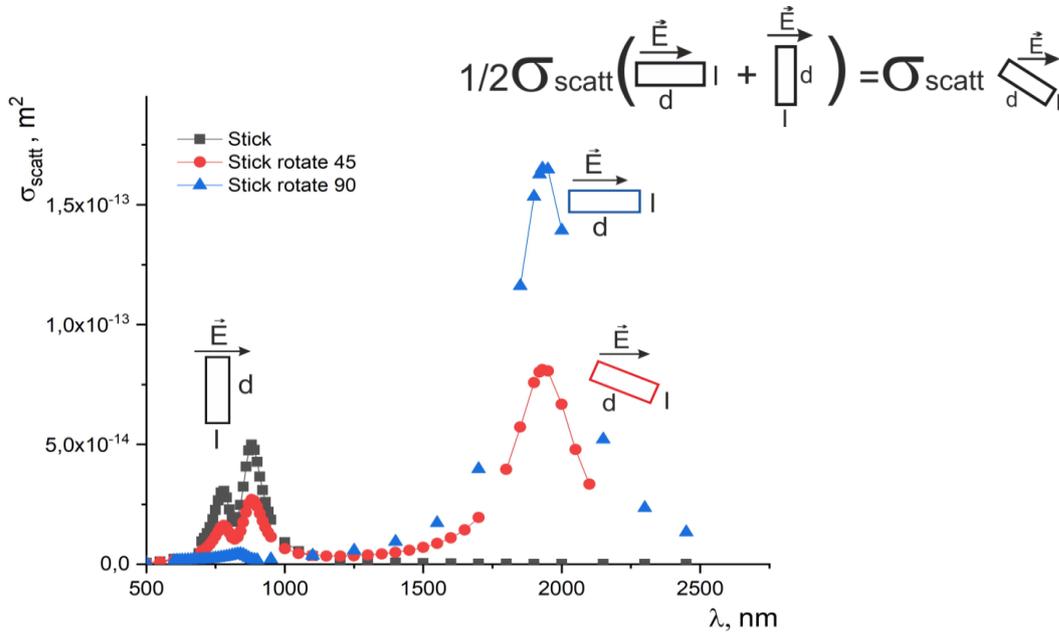


Рисунок 6 Зависимость сечения рассеяния на золотой наноантенне от угла поворота.

### 5. Рассчитывался резонансный отклик комбинации двух наноантенн.

Был рассчитан отклик от разных комбинаций двух одинаковых наноантенн. Все дают отклик, по виду похожий на отклик от одинарной антенны, повернутой относительно поляризации падающего поля.

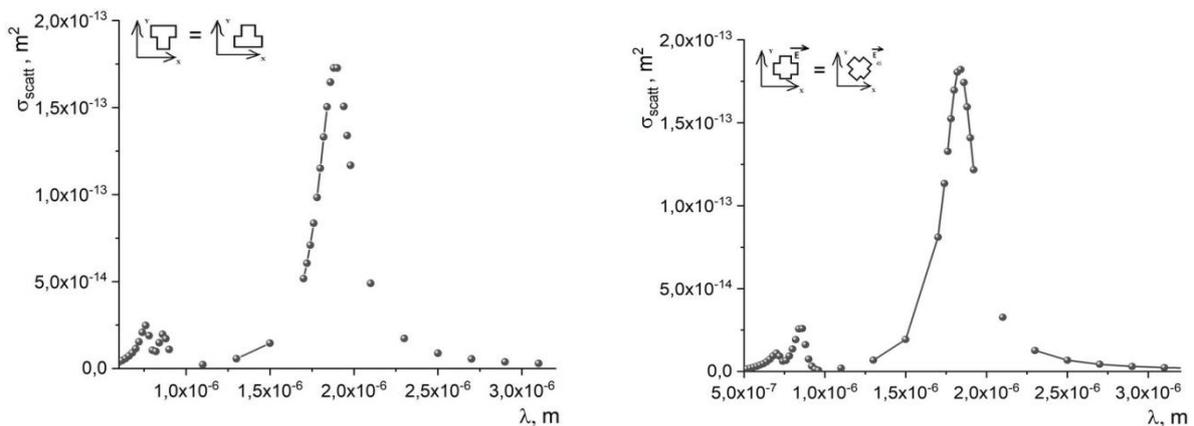
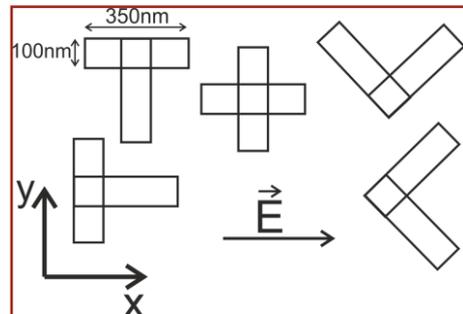
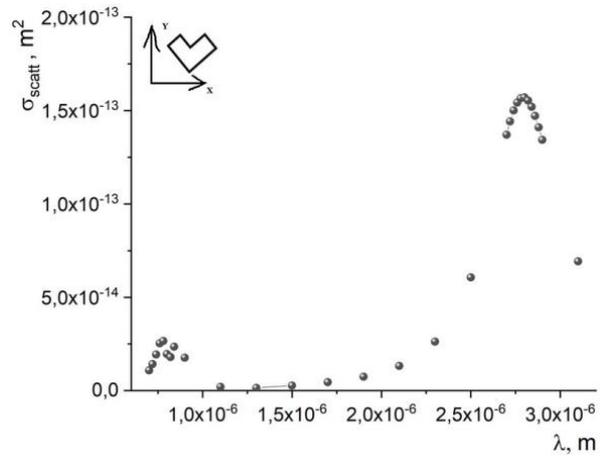
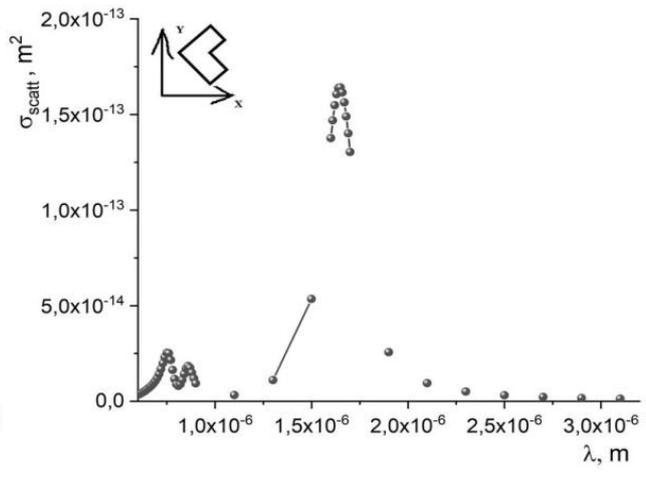
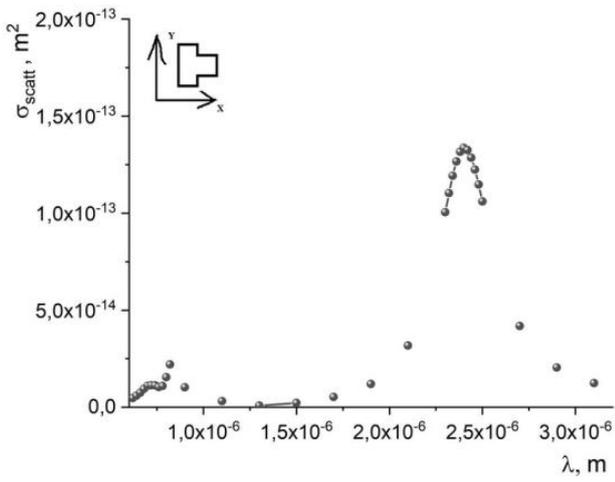
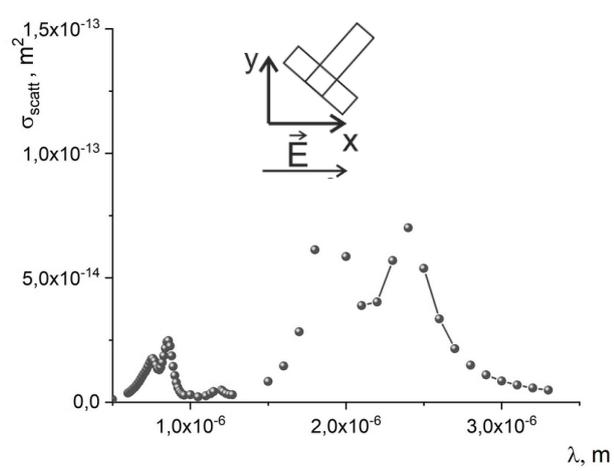
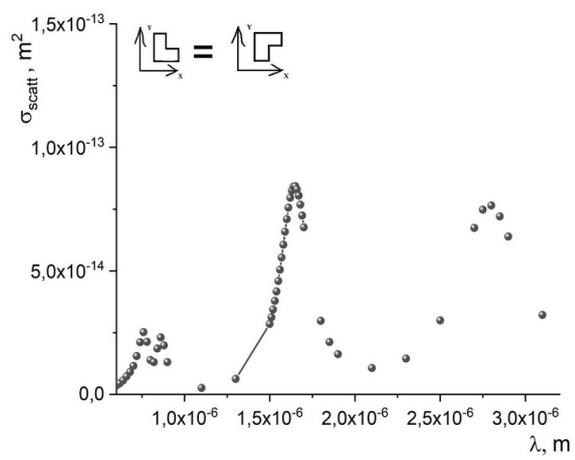


Рисунок 7а Резонансный отклик комбинации двух антенн



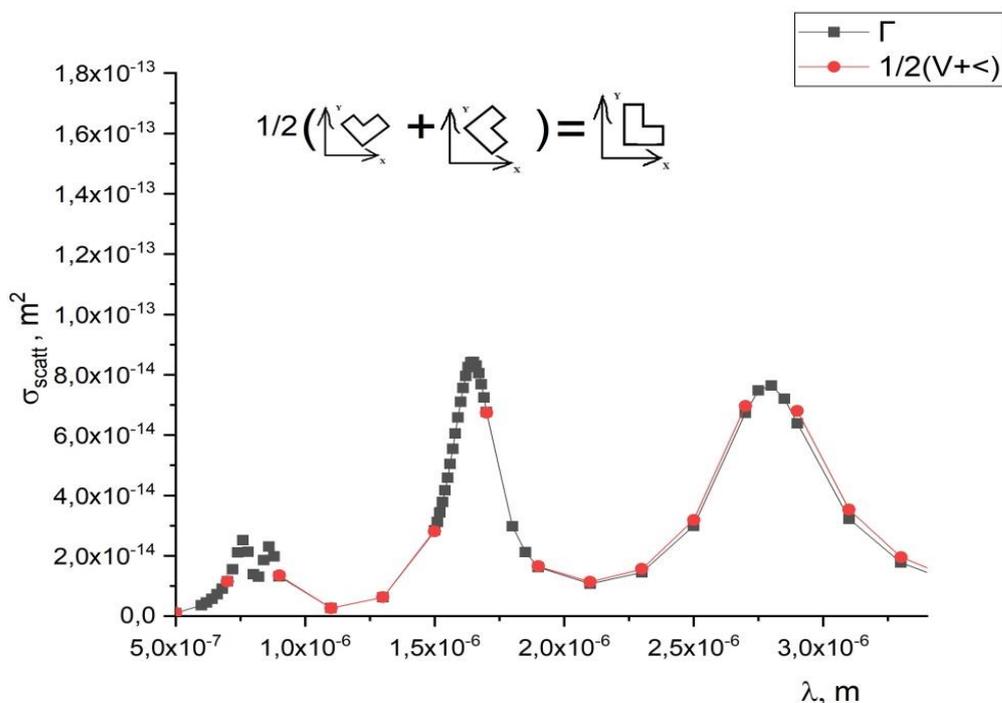
**Рисунок 76 Резонансный отклик комбинации двух наномантенн**

Для двух вариантов конфигураций расчёт дал 4 максимума (рис. 8)



**Рисунок 8 Резонансный отклик комбинации двух антенн**

Было сделано предположение, что сложение отклика от конфигурации формы **V** и формы **<** даст отклик, такой же, как от конфигурации формы **L**. Расчёт показал, что предположение было сделано верно (рис. 9).



**Рисунок 9**

## 5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Проведение численного моделирования на обычных рабочих компьютерах невозможно как вследствие большого объема требуемой памяти, так и по времени счета. Поэтому использование кластера является определяющим для успешного достижения целей работы.

## 6. Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Если имеется, указать импакт-фактор журнала.

1. Труды конференции "Фундаментальные проблемы оптики" ФПО-2019 «Особенности рассеяния на тонкой золотой наноантенне» Ефремова Е.А., Крылов И.Р., Прохорова У.В.
2. Ефремова Е.А., Крылов И.Р., Прохорова У.В., Влияние угла поворота на рассеяние на золотых наноантеннах. Сборник научных трудов IX международной конференции по фотонике и информационной оптике, НИЯУ МИФИ 30.01.2020, ISBN 978-5-7262-2648-4
3. Ефремова Е.А., Крылов И.Р., Прохорова У.В. Труды школы-семинара «Волны-2019» Москва, Рассеяние на тонкой золотой наноантенне,

4. Ekaterina. A. Efremova,, Igor. R. Krylov and Ulyana.V. Prokhorova, The possibility of managing the width of resonance for simple single nanoparticle AIP Conference Proceedings 2064, 040002 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5087681>
5. V.Yu. Venediktov, E.A. Efremova, I.R. Krylov, U.V. Prokhorova, Analysis of the use of the LCR circuit model for evaluating the resonant response of thin rectangular nanoantennas Quantum Electronics 49 (7) 676 – 682 (2019) <https://doi.org/10.1070/QEL16867>