

Терагерцовые локализованные поверхностные плазмоны на субволновых металлических структурах

В.В. Булгакова^{1,2}, В.В. Герасимов^{1,3}, Б.Г. Голденберг¹, А.Г. Лемзяков¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, Россия, 630090

²Новосибирский государственный технический университет, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирск, Россия, 630073

³Новосибирский государственный университет, Пирогова, 1, Новосибирск, Россия, 630090

Аннотация. Возбуждение мультипольных локализованных поверхностных резонансов (ППР) на субволновых структурах может значительно расширить возможности применения плазмонных биосенсоров. В работе с помощью численного моделирования проведено исследование ППР на гофрированных металлических дисках в соединении с С-образным резонатором в инфракрасном и терагерцовом диапазонах. Найдены параметры структур, при которых возбуждаются мультипольные резонансы. Порядок и интенсивность резонанса зависят от величины диэлектрической проницаемости металла.

1. Введение

Получение информации о веществе является важнейшей задачей в таких областях, как, например, биология и медицина. На сегодняшний день данное направление, получившее название «биосенсорика» активно развивается, это связано прежде всего с тем, что использование биологических сенсоров позволяет производить качественный и количественный анализ в реальном масштабе времени с минимальной дополнительной подготовкой анализируемого материала. Несмотря на многообразие биологических сенсоров, лидирующие позиции занимают биосенсоры, действие которых основано на зондировании объектов поверхностными электромагнитными волнами, называемыми поверхностными плазмонами–поляритонами (ППП). Методы, основанные на ППП зондировании, привлекают исследователей прежде всего, возможностью регистрации взаимодействий без использования меток, высокой чувствительностью, точностью и воспроизводимостью результатов. Поверхностный плазмон–поляритон представляет собой самосогласованную комбинацию перемещающихся свободных электронов вблизи поверхности проводника и электромагнитной волны [1]. В видимом и среднем ИК диапазонах поверхностные плазмоны достаточно хорошо изучены, однако в дальнем и терагерцовом (ТГц) диапазонах ППП изучены далеко не полностью из-за отсутствия до недавнего времени источников и приемников этого излучения. Однако, ТГц диапазон, к которому относятся длины волн от 30 до 300 мкм интересен тем, что в нем лежат линии поглощения как простых, так и сложных биологических молекул (ДНК, белки и др.). Одним из недостатков ТГц биосенсорики является ее низкая чувствительность из-за локализации поля ТГц электромагнитной волны ППП у поверхности проводника. Таким образом необходимым условием для создания биологических сенсоров является удержание

ТГц поля в течении относительно длительного времени, что позволит повысить эффективность связи излучения с веществом. Этого можно добиться с помощью замедления фазовой скорости электромагнитной волны. Пендри и его коллеги доказали [2], что любая периодическая модуляция плоской поверхности идеального проводника приведет к образованию связанных поверхностных состояний даже при низких частотах. Так к поверхностям, которые могут поддерживать поверхностные плазмоны на низких частотах можно отнести, например: наночастицы, наностержни, гофрированные и плоские нанодиски и т.д. Если размер наноструктуры меньше длины волны излучения, то возбуждается только дипольный плазмонный резонанс. По мере увеличения размера наночастиц могут возбуждаться более высокие резонансные моды (мультипольные) из-за фазового запаздывания поля внутри частиц. Мультипольные плазмонные резонансы по сравнению с дипольными имеют более высокую добротность и низкие радиационные потери [3]. Однако для возбуждения мультипольных резонансов необходимо создать определенные условия возбуждения, например, нарушить симметрию структуры, поддерживающей плазмонный резонанс, т.к симметричные структуры могут поддерживать только дипольные резонансы. Так в статье [4] теоретически и экспериментально было исследовано возбуждение ТГц мультипольных резонансов на гофрированном металлическом диске в соединении с С-образным резонатором. Однако, в данном методе возбуждения существуют недостатки: интенсивность таких мультипольных резонансов гораздо меньше, по сравнению с попутно возбуждаемым дипольным резонансом. Поэтому важным аспектом является реализация схемы селективного возбуждения мультипольных плазмонных резонансов. В статье [3] был описан теоретический метод избирательного возбуждения. Было показано, что нормально падающий на золотой нанодиск пучок с круговой поляризацией, имеющий Лагер-Гаусово распределение интенсивности, может возбуждать мультипольные резонансы разных порядков, в зависимости от полного углового момента закрученного пучка. Таким образом можно сделать вывод, что использование гофрированных металлических дисков для поддержания плазмонного резонанса является перспективным в приложении биосенсорике, поскольку селективное возбуждение мультипольных резонансов дает возможность зондировать различные биологические образцы на одной поверхности.

В данной работе было проведено исследование локализованных поверхностных плазмонных резонансов (ППР) на гофрированных дисках в соединении с С-образным резонатором с помощью компьютерного моделирования. Были найдены параметры, необходимы для возбуждения резонансов в терагерцовом диапазоне.

2. Поверхностный плазмонный резонанс на гофрированных металлических дисках с С-образным резонатором

Для возбуждения ППР была выбрана геометрия гофрированного металлического диска в соединении с С-образным резонатором, которая схематично изображена на рис.1. Основываясь на данные из литературы [4], были выбраны следующие параметры структуры: внутренний радиус металлического диска $r = 8.7$ мкм, внешний радиус гофрированного металлического диска: $R = 21.7$ мкм, количество лучей $N=36$, период структуры $d = 2\pi R/N$, расстояние между лучами $a = 0.4d$, внутренний радиус С-образного резонатора $R_c = 24.6$ мкм, ширина С-резонатора $w = 2.9$ мкм, угол С-резонатора $\theta = 60^\circ$, толщина структуры $t = 0.4$ нм, период единичной ячейки $p = 61$ мкм. При данных параметрах диапазон частот, при которых должны возбуждаться мультипольные резонансы, лежит в интервале $f = 1.5-10$ ТГц. Период ячейка был выбран таким образом, чтобы резонансы соседних гофрированных дисков не влияли друг на друга.

Моделирование проводилось с помощью пакета «MW & RF& Optical» CST (см. раздел 3).

3. Моделирование

Был проведен расчет электромагнитного поля вблизи периодических гофрированных поверхностей с помощью модуля CST Microwave studio 2015. Моделирование проводилось в

частотной области с использованием единичной ячейки и периодических граничных условий. Исследовалось взаимодействие с периодической структурой нормально падающего излучения с длиной волны в диапазоне $f = 1.5 - 10$ ТГц, открытое граничное условие принималось в направлении z . В качестве материала гофрированного металлического диска и С-резонатора были использованы экспериментальные и теоретические (модель Друде) значения диэлектрической проницаемости $\epsilon_{Au}(\lambda)$ (см. раздел 4).

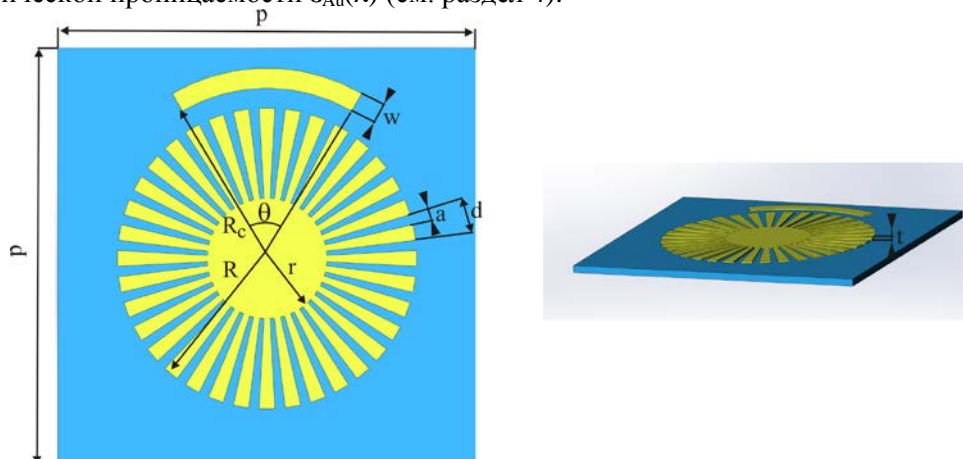


Рисунок 1. Гофрированный металлический диск в соединении с С-образным резонатором.

4. Диэлектрическая проницаемость металлов в терагерцовом диапазоне

В видимой и средней инфракрасной областях диэлектрические свойства большинства обычных металлов хорошо описываются моделью Друде. Это связано с тем, что объемная плазменная частота ω_p , лежащая в ультрафиолетовом диапазоне частот для этих материалов, близка к оптическим частотам. Терагерцовые (ТГц) частоты намного меньше, чем ω_p , поэтому диэлектрическая проницаемость металлов при данных частотах примерно на 5-6 порядков выше, чем в оптической области, что делает их похожими на идеальный проводник. Результаты измерений диэлектрических свойств тонких металлических слоев, нанесенных на кремниевые подложки с использованием терагерцовой спектроскопии высокого временного разрешения (в режиме пропускания) (time domain spectroscopy) согласуются с моделью Друде [5]. Однако в ТГц диапазоне имеются значительные расхождения диэлектрической проницаемости, измеренной в экспериментах по распространению поверхностных плазмонов, с теоретическими [6]. Длины пробега (L) поверхностных плазмонов вдоль плоских металлических поверхностей, рассчитанные по модели Друде, на два порядка больше экспериментальных [7]. Точная причина этого несоответствия неясна, но есть две взаимодополняющие возможные причины: (1) диэлектрические константы реальных металлов, напыленных на подложки, намного меньше, чем предсказывает теория Друде для объемных металлов [6]; (2) «радиационные» потери поверхностных плазмонов из-за рассеяния на неоднородностях поверхности вносят существенный вклад в ослабление ПП в ТГц области. Радиационные потери терагерцовых поверхностных плазмонов могут уменьшить значение длины пробега в несколько раз, что было показано экспериментально [8] и теоретически [9], но механизм радиационных потерь не может полностью объяснить существенное несоответствие теории Друде и полученных экспериментальных значений диэлектрической проницаемости. В наших экспериментах по изучению поверхностных плазмонов на длине волны излучения $\lambda = 130$ мкм [10] диэлектрическая проницаемость слоя золота толщиной 1 мкм (напыленного на стеклянную подложку) составила $\epsilon_m = -877 + i \cdot 610$ (в отличие от значения для объемного металла $\epsilon_m = -103360 + i \cdot 301810$ как предсказывает теория Друде).

5. Результаты и обсуждения

Результаты моделирования для материала с диэлектрической проницаемостью, рассчитанной по теории Друде, показаны на рис.2. Видно, что с изменением частоты изменяются

резонансные моды поверхностных плазмонов. В отсутствие С-резонатора возбуждаются моды C1 и Cx. При внесении асимметрии в структуру, в виде С-резонатора, возбуждаются моды более высоких порядков. Была проанализирована зависимость частоты резонансов от внутреннего радиуса r гофрированного металлического диска, которая показала, что при увеличении внутреннего радиуса дипольные резонансы C1 и Cx претерпевают синее смещение, в то время, как остальные мультипольные резонансы не смещаются. Так же была проанализирована зависимость частоты резонансов от зазора $g=R_c - R$ между С-резонатором и гофрированным диском, которая показала, что при увеличении зазора g между гофрированным диском и С-резонатором мультипольные резонансы претерпевают «красное» смещение, в то время, как основные дипольные резонансы C1 и Cx не смещаются. Также мультипольные резонансы претерпевают «красное» смещение при увеличении угла θ , в то время, как основные дипольные резонансы C1 и Cx не смещаются. Таким образом, можно сделать вывод, что угол С-резонатора оказывает сильное влияние на резонансы, это связано с тем, что угол θ вносит большой вклад в асимметрию структуры вдоль оси.

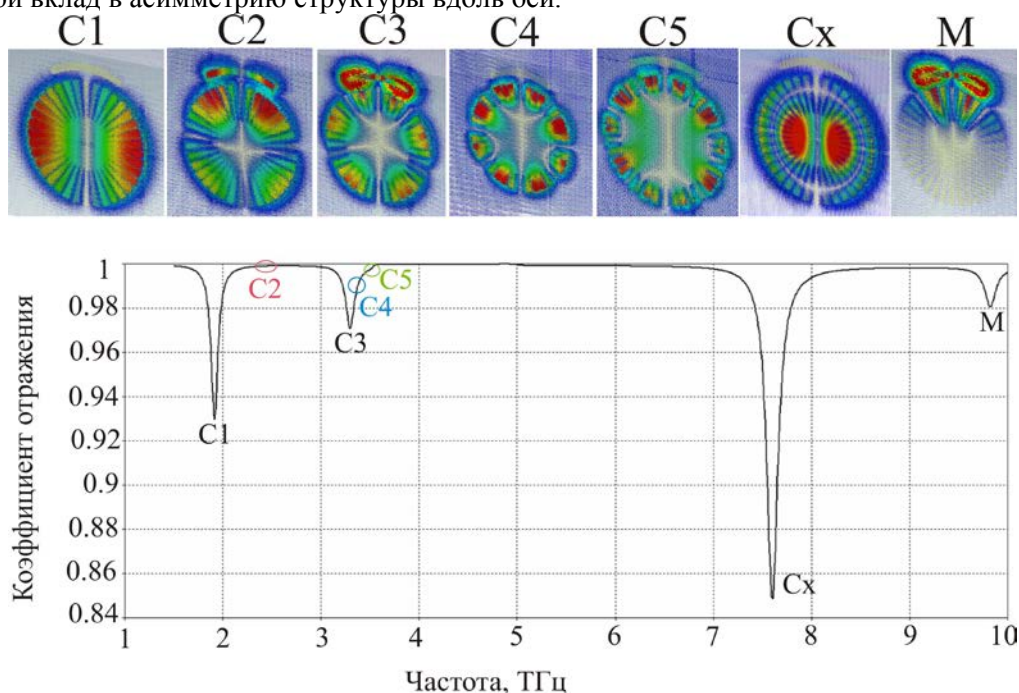


Рисунок 2. Сверху распределение плотности электрического поля для материала с диэлектрической проницаемостью, полученной по модели Друде ($\epsilon_m = -103360 + i \cdot 301810$): 1.93 ТГц (C1-дипольный), 2.46 ТГц (C2-квадрупольный), 3.3 ТГц (C3-гексапольный), 3.48 ТГц (C4-октупольный), 3.82 ТГц (C5-декапольный), 9.88 ТГц (M); снизу зависимость коэффициента отражения металлического гофрированного диска с С-резонатором.

Для материала с диэлектрической проницаемостью, полученной экспериментально (рис. 3), наблюдается только дипольный резонанс Cx и M-резонанс с значительно меньшей (по сравнению с моделью Друде) плотностью энергии электрического поля. В модели Друде они составили для C1 - $W_{max} = 2768 \text{ Дж/м}^3$, Cx - $W_{max} = 2311 \text{ Дж/м}^3$, M - $W_{max} = 10180 \text{ Дж/м}^3$; для экспериментального значения диэлектрической проницаемости для Cx-резонанса - $W_{max} = 84.31 \text{ Дж/м}^3$, M - $W_{max} = 162.9 \text{ Дж/м}^3$. Качественно это различие можно объяснить тем, что при лучшей проводимости и меньших омических потерях металла, из которого состоит структура, колебания плотности электронов будут успевать за изменением внешнего возбуждающего поля, что приведет к появлению резонансов высших порядков. В случае же более инертной системы и больших омических потерях проявятся могут только резонансы низших (дипольных) порядков.

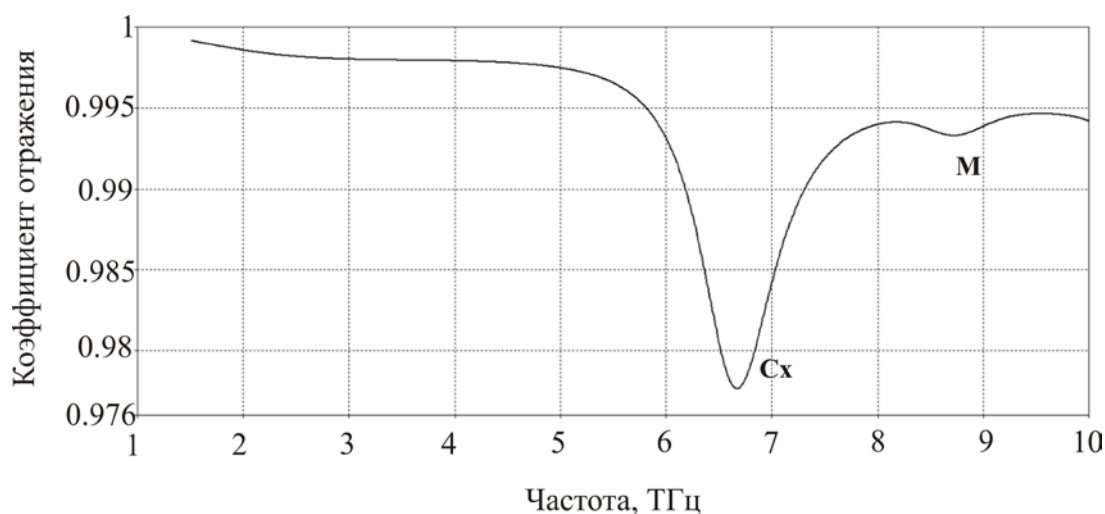


Рисунок 3. Коэффициент прохождения для материала с диэлектрической проницаемостью, полученной экспериментально ($\epsilon_m = -877 + i \cdot 610$): дипольный плазмонный резонанс Сх ($f = 6.67$ ТГц), М-резонанс ($f = 8.7$ ТГц).

6. Заключение

С помощью численного моделирования были найдены мультипольные поверхностные плазмонные резонансы (ППР) на гофрированных металлических дисках. Существует связь этих резонансов (порядка резонанса и плотности электромагнитного поля) с величиной диэлектрической проницаемости металла, что необходимо учитывать при анализе таких структур. Интенсивность мультипольных резонансов на таких структурах гораздо меньше, по сравнению с попутно возбуждаемым дипольным С-резонансом. Следующим шагом в наших исследованиях будет возбуждение локализованных ППР закрученными пучками на гофрированных дисках без С-резонатора, на которых интенсивность резонансов высоких порядков может быть выше.

7. Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 14-50-00080, а также с использованием оборудования Новосибирского ЦКП ЦСТИ).

8. Литература

- [1] Князев, Б.А. Поверхностные электромагнитные волны: от видимого диапазона до микроволн / Б.А.Князев, А.В.Кузьмин // Вестник НГУ. – 2007. – Т. 2, № 1.
- [2] Pendry, J.B. Mimicking surface plasmons with structured surfaces / J.B. Pendry // Science. – 2004. – Vol. 305. – P. 847.
- [3] Kyosuke, S. Excitation of multipole plasmons by optical vortex beams / S. Kyosuke, N. Kyosuke. – Scientific reports, 2015.
- [4] Chen, L. Excitation of dark multipolar plasmonic resonances at terahertz frequencies / L. Chen, Y.M. Wei, X.F. Zang, Y.M. Zhu, S.L. Zhuang. – Scientific reports, 2016.
- [5] Yasuda, H. Measurement of terahertz refractive index of metal with terahertz time-domain spectroscopy / H. Yasuda, I. Hosako // Jpn. J. Appl. Phys. - 2008. – Vol. 47. – P. 1632–1634.
- [6] Pandey, S. Non-Drude like behavior of metals in the terahertz spectral range / S. Pandey, B. Gupta, A. Chanana, A. Nahata // Advances in Physics. – 2016. – Vol. X.
- [7] Gerasimov, V.V. Surface plasmon polaritons launched using a terahertz free electron laser: propagating along a gold-ZnS-air interface and decoupling to free waves at the surface tail / V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, I.A. Kotelnikov, A.K. Nikitin, V.S. Cherkassky, G.N. Kulipanov, G. N. Zhizhin // J. Opt. Soc. Am. B. – 2013. – Vol. 30. – P. 2182-2190.

- [8] Gerasimov, V.V. Growth of terahertz surface plasmon propagation length due to thin-layer dielectric coating / V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, A.G. Lemzyakov, A.K. Nikitin, G.N. Zhizhin // *Journal of Optical Society of America B*. – 2016. – Vol. 33. – P. 2196-2203.
- [9] Kotelnikov, I. Dispersion relation of a surface wave at a rough metal-air interface / I. Kotelnikov, G. Stupakov // *Physical Review A*. – 2016. – Vol. 94. – P. 053847.
- [10] Gerasimov V.V. A way to determine the permittivity of metallized surfaces at terahertz frequencies / V.V. Gerasimov, B.A. Knyazev, A.K. Nikitin, G.N. Zhizhin // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol. 98. – P. 171912.

Terahertz localized surface plasmons on subwave metal structures

V.V. Bulgakova^{1,2}, V.V. Gerasimov^{1,3}, B.G. Goldenberg¹, A.G. Lemzyakov¹

¹Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Lavrentieva prospect, 11, Novosibirsk, Russia, 630090

²Novosibirsk State Technical University, Karl Marx Street, 20, Novosibirsk, Russia, 630073

³Novosibirsk State University, 2 Pirogova Street, Novosibirsk, Russia, 630090

Abstract. Excitation of multipole localized surface plasmon resonances (SPR) can greatly expand the potential of application of plasmonic biosensors. In the paper we studied the SPR on corrugated metal disks in conjunction with a C-shaped resonator in the infrared and terahertz ranges using numerical simulations. The parameters of the structures for which multipole resonances are excited were found. The order and intensity of the resonances depends on the dielectric permittivity of the metal.

Keywords: Terahertz, Sub-wavelength structures, Plasmonic sensors.