Письма в ЖЭТФ, том 92, вып. 11, с. 823 – 826 © 2010 г. 10 декабря

Оптические свойства одномерных субволновых плазмонных наноструктур

А. В. Андреев, Ю. В. Грищенко+, М. И. Добындэ, Т. В. Долгова, М. Л. Занавескин+, А. А. Коновко[1], *Д. А. Мамичев+, А. Н. Марченков+, Е. Г. Новоселова*, И. А. Черных+, И. С. Смирнов*, А. А. Федянин, М. Р. Щербаков*

МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, 119991 Москва, Россия

+*Российский научный центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия*

**Московский институт электроники и математики (ТУ), 109028 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 8 ноября 2010 г.

Изготовлены нанорешетки, образованные параллельными золотыми нанонитями на кварцевой подложке. Экспериментально исследованы их спектры отражения и пропускания. Зарегистрировано эффективное возбуждение плазмон-поляритонных волн. Проведено численное моделирование спектров пропускания (отражения). Показано хорошее совпадение экспериментальных спектров с модельными спектрами. Предложен комплекс, сочетающий в себе экспериментальные методики создания данных структур и теоретические методы расчета параметров оптических спектров. Указанный комплекс является перспективным инструментом для моделирования и реализации элементов оптоэлектроники (фильтров, поляризаторов, переключателей).

Развитие новых оптоэлектронных систем неразрывно связано с проблемой создания миниатюрных датчиков и устройств управления оптическим излучением. В этой связи большой интерес представляют субволновые нанорешетки, то есть решетки, искусственно приготовленные на поверхности подложки, хотя бы один из пространственных размеров которых много меньше длины волны дифрагируемого излучения. Металлические нанорешетки с указанными параметрами обладают целым рядом свойств, которые делают их перспективными кандидатами для создания миниатюрных быстродействующих биосенсоров нового поколения [1] и компактных элементов управления оптическим излучением. В литературе описаны аномальное пропускание [2], аномальная непрозрачность [3], искусственная оптическая и магнитооптическая [4] активность, а также возможность плазмонной фокусировки [5 – 9].

Разработка компактных датчиков и оптоэлектроники тесно связана с необходимостью получения воспроизводимых резонансных характеристик в интересующей части спектра. При этом важно учитывать ряд факторов, влияющих на физические и структурные свойства получаемых нанокомпозитов: подбор составляющих материалов с необходимыми свойствами и выбор оптимальной структуры решетки, связанной с численными значениями ее структурных параметров, таких как период, скважность и высота нанонитей.

Решение указанных проблем невозможно без развития теоретических моделей, объясняющих зависимость положения резонансов от указанных структурных и материальных параметров. Таким образом, для целенаправленного изготовления наноструктур с контролируемыми и воспроизводимыми свойствами необходимо создать и отработать комплекс теоретических методик расчета оптических спектров и экспериментальных методик получения соответствующих наноструктур. В настоящей работе развита теоретическая модель, позволяющая в кинематическом приближении определять положение резонансов, а также развиты математические методы, позволяющие проводить точные численные расчеты частотно-угловых спектров. Изготовлены экспериментальные образцы наноструктур и измерены их спектры. Сравнение результатов физических измерений и теоретических расчетов показало их хорошее совпадение. Дальнейшее развитие предложенного комплекса позволит на основе математического моделирования проектировать наноструктуры с заданными резонансными характеристиками и затем изготавливать их, пользуясь развитыми экспериментальными методиками.

1. Математическое моделирование. Рассмотрим наноструктуру, образованную параллельными золотыми нанонитями прямоугольного сечения на кварцевой подложке (нанорешетку). В настоящей ра-

[1]e-mail: konovko@physics.msu.ru

боте для расчета оптических спектров таких нанорешеток использован метод собственных мод периодической решетки [10, 11]. На рис.1 представлены зависимости энергетических коэффициентов отражения

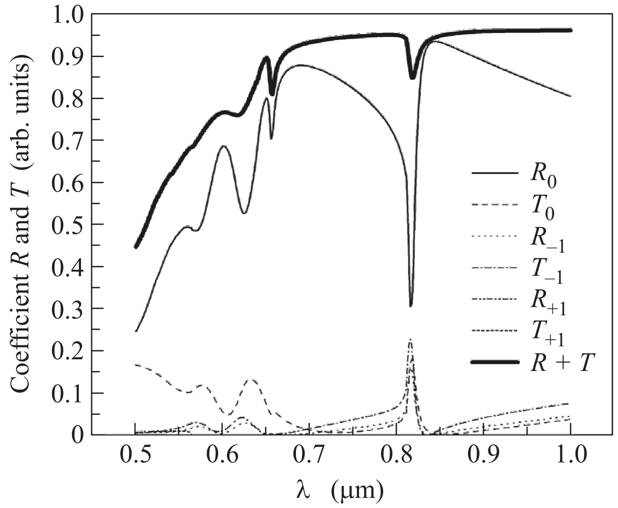

Рис.1. Энергетические коэффициенты отражения и прохождения золотой решетки на кварцевой подложке с параметрами $d = 750$ нм, $c = 100$ нм, $h = 50$ нм при угле падения $\theta_0 = 45°$

и прохождения как функций длины волны падающего излучения для решетки с параметрами $d = 750$ нм (период), $c = 100$ нм (расстояние между нитями), $h = 50$ нм (высота) при угле падения $\theta = 45°$, диэлектрическая проницаемость подложки предполагалась равной $\varepsilon = 2.13$. Как видно из рисунка, зависимость коэффициента зеркального отражения R_0 от длины волны является немонотонной и характеризуется рядом провалов. Наиболее глубокий провал наблюдается при длине волны $\lambda = 816$ нм. Ширина провала на половине высоты составляет $\Delta\lambda \approx 0.0199$ нм, и, следовательно $\Delta\lambda/\lambda \approx 1.44 \cdot 10^{-5}$. Крутизна длинноволнового крыла указанного резонанса составляет $46.68\,\text{мкм}^{-1}$, что позволяет осуществлять эффективную частотную модуляцию интенсивности отраженного излучения, поскольку изменение длины волны на $\delta\lambda = 0.012$ нм ($\delta\lambda \approx 1.4 \cdot 10^{-5}$) приводит к изменению интенсивности отраженного пучка в три раза. Вместе с тем, как видно из результатов расчетов, такое же изменение длины волны излучения приводит практически к полному подавлению прошедшей волны и рефлексов прохождения и отражения ± 1 порядков.

Таким образом, для излучения с длиной волны 816 нм рассмотренная нанорешетка представляет собой высокоселективный фильтр, позволяющий эффективно управлять интенсивностью отраженного и прошедшего излучения.

Зависимость суммы коэффициентов прохождения и отражения от длины волны также является немонотонной. Как видно из рис.1, ее падение в коротковолновой области обусловлено, в основном, нерезонансным поглощением излучения золотом. Однако два глубоких узких провала, синхронные с провалами в коэффициенте отражения, имеют явно резонансный вид. Как мы увидим ниже, они связаны с возбуждением поверхностных плазмонов.

Для того чтобы дать интерпретацию резонансного поведения коэффициентов отражения и прохождения, представленных выше, обратимся к картине зависимости коэффициентов отражения и прохождения от длины волны и угла падения излучения. Указанная зависимость представлена на рис.2. Сплошными белыми линиями на этом рисунке показаны условия ре-

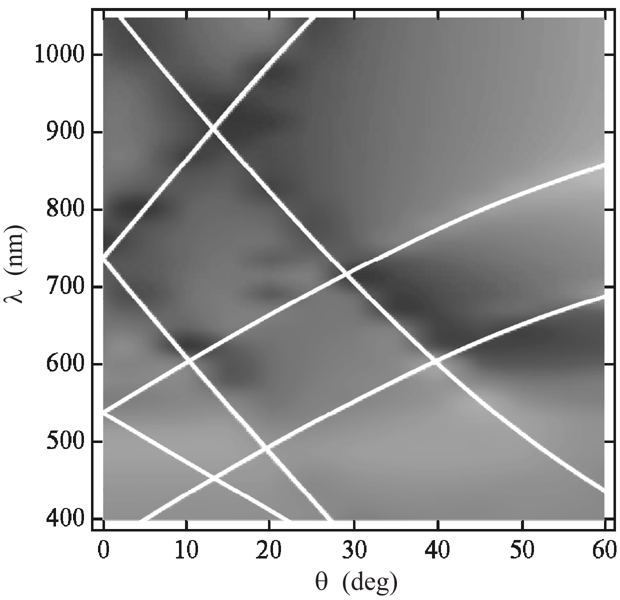

Рис.2. След дисперсионных поверхностей, определяющих дифракцию на решетке первичной волны (взаимодействие с вектором обратной решетки $H = 2\pi/d$) и отраженной волны при взаимодействии с первой (H) и второй ($2H$) гармониками решетки. Период решетки $d = 740$ нм, расстояние между полосками золота $c = 100$ нм, глубина профиля $h = 50$ нм

зонансного возбуждения поверхностных волн, так называемых поверхностных плазмон-поляритонов, являющихся коллективными колебаниями электромагнитного излучения и плазмы свободных электронов в металле [12]. Эти условия в кинематическом приближении имеют вид $H_{\pm n} \pm \kappa \sin\theta_0^{(\pm n)} = \kappa$ (для границы раздела воздух-решетка) и $H_{\pm n} \pm \kappa \sin\theta_0^{(\pm n)} = \kappa\sqrt{\epsilon}$

(для границы решетка-подложка), где $\kappa = \omega/c$ – величина волнового вектора в вакууме, $H = 2\pi n/d$ и ϵ — диэлектрическая проницаемость подложки. Как видно, кинематическое приближение применимо в достаточно широкой области значений параметров, приведенных на рисунке. Отличия наблюдаются в тех областях, где возникают эффекты динамического рассеяния, например, рассеяния поляритона на второй гармонике профиля решетки. Таким образом, резкие пики и провалы на рис.1 обусловлены возбуждением поверхностных волн.

Полученные результаты демонстрируют высокую спектральную селективность субволновой решетки и указывают на перспективность применения нанорешеток в качестве частотно-угловых оптических фильтров и элементов сенсорных датчиков. Рассмотрим экспериментальную реализацию теоретически рассчитанной структуры.

2. Методика изготовления нанорешетки. Как известно, субволновые дифракционные решетки, позволяющие продемонстрировать плазмонный резонанс, состоят из периодически модулированной поверхности металла в диэлектрическом окружении. Золото является оптимальным материалом для создания таких структур, исходя из анализа следующих факторов: адгезия материалов друг к другу, величина диэлектрической проницаемости, инертность, концентрация свободных носителей заряда и др. В качестве диэлектрической подложки нами использовался кварц, к преимуществам которого относится высокий коэффициент пропускания и отсутствие дисперсии диэлектрической проницаемости в видимом диапазоне.

Изготовление экспериментальных образцов происходило в два этапа: а) магнетронное напыление тонкой пленки золота на кварцевую подложку, б) создание периодических наноструктур в пленке золота посредством литографии фокусированными ионными пучками на двухлучевой системе Helios компании FEI. По данным *in situ* рентгеновской рефлектометрии, толщина напыленной пленки золота составила 30 нм.

Полученные образцы представляют собой металлические нанорешетки, состоящие из чередующихся линий золота и вытравленных линий. Основными характеристиками нанорешеток являются: период, который в нашем случае составляет 750 нм, и коэффициент заполнения решетки, то есть отношение первоначального объема золотой пленки к объему вытравленного материала, находящийся в диапазоне 35–80%. Площадь каждой решетки составляет 100 мкм^2.

Характеризация серии образцов проводилась методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. Период нанорешеток составил 750 ± 10 нм, ширина линий решетки 350–600 нм±10 нм. Глубина протравленных областей составила 40 нм; эта величина больше толщины пленки, что обеспечивает полное удаление золота с подложки (учитывался эффект переосаждения и присутствия возможных неоднородностей в пленке золота).

3. Экспериментальные результаты. Экспериментальное исследование оптических свойств изготовленных образцов нанорешеток проводилось с помощью микроспектроскопии пропускания (рис.3) с использованием источника белого света в спектральном диапазоне 400–1000 нм. Излучение лампы накаливания с потребляемой мощностью 100 Вт, поляризованное при помощи широкополосной призмы Глана-Тейлора, проходило систему линз и диафрагм, формируя в плоскости образца изображение полевой диафрагмы радиусом 50 мкм. Для ограничения углового состава излучения освещающей системы численная апертура фокусирующей системы была ограничена до 0,05, что позволило с высокой четкостью разрешить плазмонные резонансы исследуемого образца в спектральном диапазоне. Далее, излучение собиралось объективом и фокусировалось на торец многомодового оптоволокна, доставляющего излучение на входную щель спектрометра на основе кремниевой ПЗС-линейки.

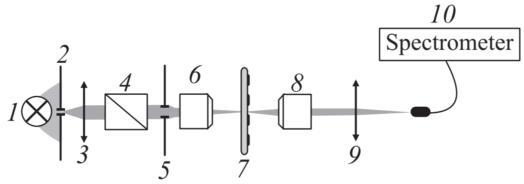

Рис.3. Схема установки по микроспектроскопии пропускания: *1* – лампа накаливания (100 Вт), *2* – полевая диафрагма, *3* – конденсорная линза, *4* – призма Глана, *5* – апертурная диафрагма, *6* – объектив, *7* – образец, *8* – собирающий объектив, *9* – собирающая линза, *10* – волоконный спектрометр

Характерный вид нанорешеток представлен на рис.4.

На рис.5 представлена экспериментальная зависимость спектрального коэффициента пропускания от угла падения. Рисунок представляет собой пересекающиеся максимумы и минимумы коэффициента пропускания, которые связаны с плазмонным поглощением и плазмонно-ассистированным пропусканием. Минимумы и максимумы коэффициента пропускания соответствуют аномалиям Вуда, которые появ-

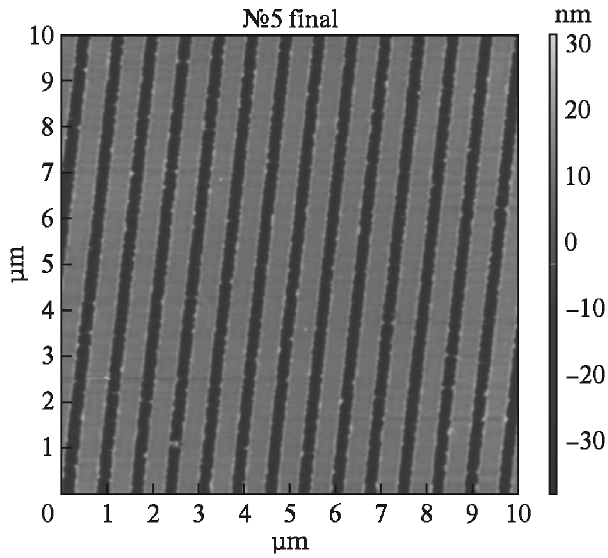

Рис.4. АСМ-изображение нанорешетки. Период 750 нм. Коэффициент заполнения решетки 65%

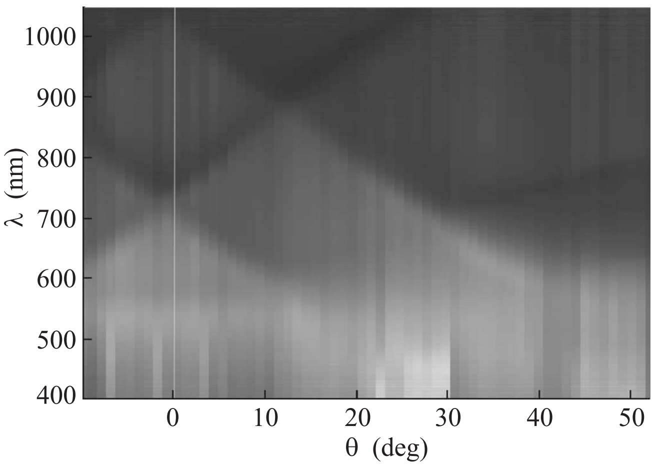

Рис.5. Экспериментальная зависимость спектрального коэффициента пропускания от угла падения излучения θ. Темные области соответствуют меньшему пропусканию (минимальное значение 0.08), светлые – большему (максимальное значение 0.99)

ляются, когда происходит эффективное возбуждение поверхностных волн.

4. Заключение. Были получены субволновые наноструктуры, представляющие собой золотые нанорешетки на подложке плавленого кварца. Наблюдаемые резонансные особенности в спектральных угловых зависимостях пропускания нанорешеток обусловлены эффективным возбуждением поверхностных плазмонов на границах металл – воздух и металл – диэлектрик. Предложена теоретическая модель, описывающая поведение оптических характеристик. Результаты эксперимента находятся в хорошем соответствии с теоретическими зависимостями. Предложенный в работе комплексный подход, состоящий из методов расчета наноструктур и их фабрикации, позволяет осуществлять дизайн параметров субволновых плазмонных нанорешеток. Разработка такого подхода является необходимым шагом на пути создания целого ряда устройств на эффекте возбуждения плазмон-поляритонов, таких как быстродействующие высокочувствительные биосенсоры нового поколения, а также элементы оптоэлектроники (фильтры, поляризаторы, переключатели).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки, Госконтракты # 02.740.11.0223, # 02.523.12.3026, и Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 08-02-00448.

1. Bipin K. Singh and Andrew C. Hillier, Anal. Chem. **78**, 2009 (2006).
2. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi et al., Nature **391**, 667 (1998).
3. Julia Braun, Bruno Gompf, Georg Kobiela, and Martin Dressel, Phys. Rev. Lett. **103**, 203901 (2009).
4. G. Ctistis, E. Papaioannou, P. Patoka et al., Nano Lett. **9**, 1 (2009).
5. Shantha Vedantam, Hyojune Lee, Japeck Tang et al., Nano Lett. **9**, 3447 (2009).
6. Fu Min Huang and Nikolay I. Zheludev, Nano Lett. **9**, 1249 (2009).
7. Gilad M. Lerman, Avner Yanai, and Uriel Levy, Nano Lett. **9**, 2139 (2009).
8. Lieven Verslegers, Peter B. Catrysse, Zongfu Yu et al., Nano Lett. **9**, 235 (2009).
9. Weibin Chen, Don C. Abeysinghe, Robert L. Nelson, Qiwen Zhan, Nano Lett. **9**, 4320 (2009).
10. J. Le Perchec, P. Quémerais, A. Barbara, and T. López-Ríos, Phys.Rev. Lett. **100**, 066408 (2008).
11. L. C. Botten, M. S. Craig, and R. C. McPhedran, Optica Acta. **28**, 1087 (1981).
12. Поверхностные поляритоны, под ред. В. М. Аграновича, Д. Л. Миллса. М.: Наука, 1985.