

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОДНОМЕРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

© 2011 г. С. А. Кузнецов\*; В. И. Белотелов\*, канд. физ.-мат. наук; А. Н. Калиш\*; А. Венгурлекар\*\*; А. К. Звездин\*\*\*, доктор физ.-мат. наук

\* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

\*\* Институт фундаментальных исследований им. Тата, Мумбай, Индия

\*\*\* Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: kalish@physics.msu.ru

Изучено влияние параметров одномерных дифракционных решеток на спектры пропускания и отражения. Показано, что при наличии наклона стенок у металлодиэлектрической дифракционной решетки спектры пропускания и отражения могут значительно изменяться по сравнению со случаем вертикальных стенок. Наклон стенок может приводить как к увеличению, так и к уменьшению коэффициента пропускания в зависимости от структуры решетки. Это позволяет получать необходимые оптические свойства путем изменения угла наклона стенок. Показана возможность определения угла наклона стенок путем расчета оптических спектров и сравнения результата с экспериментом.

*Ключевые слова:* плазмон-поляритон, металлическая решетка, скаттерометрия.

Коды OCIS: 050.6624, 240.6680, 050.1950, 310.6860

*Поступила в редакцию 13.04.2010*

Интерес к металлодиэлектрическим периодическим структурам связан с возможностью их применения в современных оптических элементах [1]. Последние достижения в области литографии позволяют создавать такие структуры с периодом от единиц до десятков нанометров. Характерный размер элементов решетки для оптического диапазона не превышает нескольких сотен нанометров, т. е. они являются наноструктурированными материалами. Металлодиэлектрические наноструктуры находят широкое применение в фотонике. Они могут быть использованы, например, в сверхчувствительных газовых или жидкостных датчиках, в солнечных батареях как эффективные накопители солнечной энергии.

Оптические свойства металлодиэлектрических перфорированных пленок весьма разнообразны. Изучение их свойств впервые было проведено в работах Р. Вуда и У. Фано [2–3]. Спектры пропускания и отражения в различных дифракционных порядках имеют сложную форму с некоторыми особенностями, известными как аномалии Вуда: аномалии Рэлея–

Вуда и аномалии, связанные с возбуждением плазмон-поляритонной волны [3–9]. Кроме того, некоторые особенности объясняются возникновением щелевых мод, которые могут внести существенный вклад при определенных условиях и параметрах решетки.

Большинство исследований в этой области посвящено прямоугольным решеткам с щелями, имеющими вертикальные стенки. Менее исследованы металлодиэлектрические структуры более сложного профиля. Условия возникновения аномалий, связанных с возбуждением плазмонов и щелевых мод, очень чувствительны к профилю решетки. Непрямоугольный профиль решетки приводит к новым особенностям ее оптического отклика. Металлодиэлектрические решетки со щелями или отверстиями, имеющими наклонные стенки, являются примером периодических наноструктур со сложным профилем.

С одной стороны, отклонение стенок от прямоугольного профиля, как правило, неизбежно в процессе изготовления и, следовательно, наличие наклонных стенок должно быть при-

нято во внимание при моделировании оптических свойств структуры. С другой стороны, задание угла наклона при изготовлении металлодиэлектрических структур может быть эффективным способом управления их оптическими характеристиками. В данной работе рассмотрено влияние сложного профиля для случая решетки со щелями.

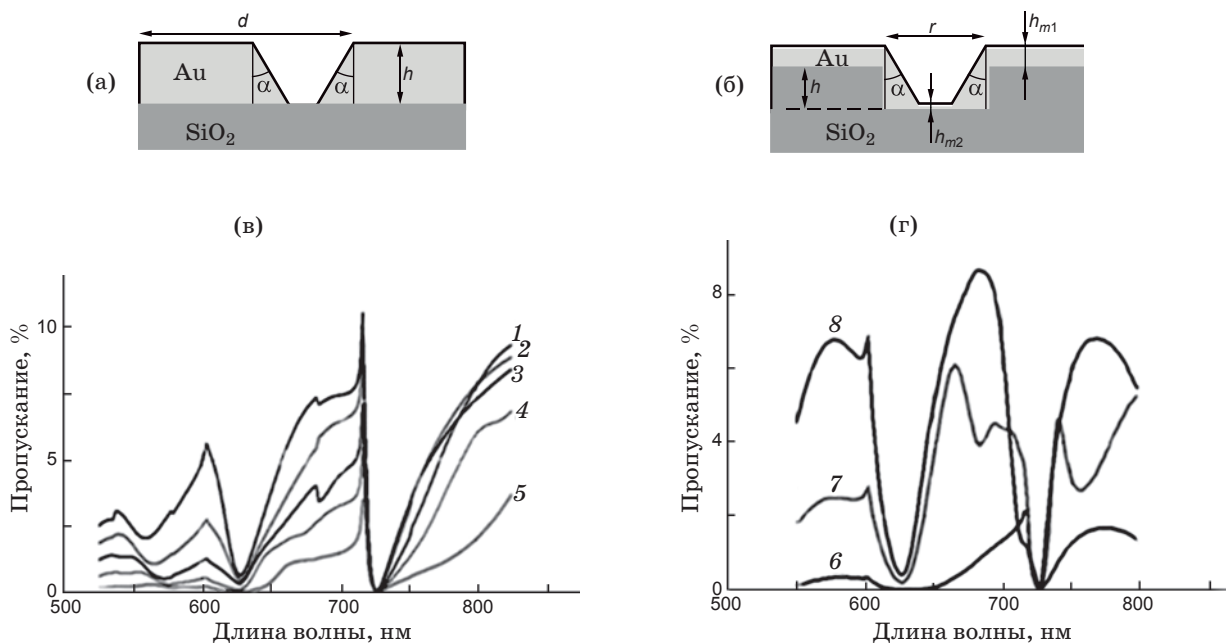
Существует несколько способов изготовления металлодиэлектрических структур с периодической системой щелей. Получить подобную структуру можно с помощью ионных пучков. Изменением направления ионного пучка создают структуру щелей как с вертикальными, так и с наклонными стенками. Назовем такую структуру решеткой типа I (рис. 1а). Другой метод состоит в травлении щелей на поверхности диэлектрической подложки с последующим напылением металла (решетка типа II) (рис. 1б) [10].

Рассмотрим наклон стенок металлодиэлектрических структур для двух вышеупомянутых структур. В данной работе был использован метод связанных фурье-мод (RCWA) [11]. С целью улучшения сходимости применены специальные правила факторизации для представ-

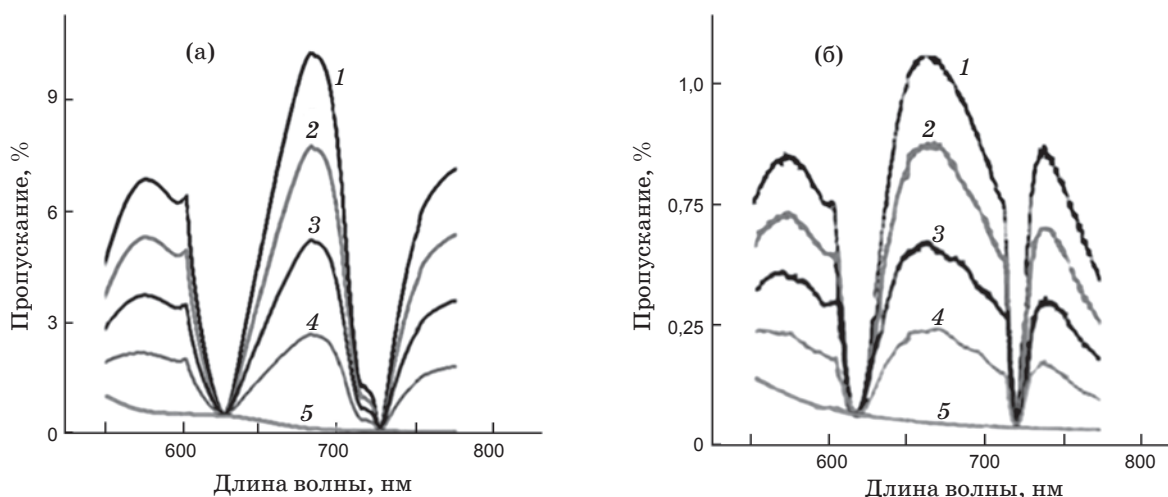
ления уравнений Максвелла [12]. Метод связанных фурье-мод хорошо подходит для решеток с вертикальными стенками. Если структура имеет более сложный профиль, например, щели имеют не вертикальные стенки, его необходимо аппроксимировать набором слоев с вертикальными стенками. Метод применим, когда число этих слоев обеспечивает устойчивость решения. Оказывается, что для решетки типа I необходимая устойчивость достигается уже при 5 слоях разбиения, а для решетки типа II только при 40 слоях.

Для решетки типа I численное моделирование показывает, что форма спектра практически не меняется, тогда как значение коэффициента пропускания становится меньше с увеличением угла наклона стенок (рис. 1в). Уменьшение коэффициента пропускания можно объяснить ростом поглощения за счет накопления металла в области щели при увеличении угла наклона стенок.

Интересно, что в случае решетки типа II рост наклона стенок ведет к увеличению коэффициента пропускания, даже несмотря на накопления металла на дне. Кроме того, наклон сильно влияет на форму спектра. Это связано



**Рис. 1.** Одномерные металлодиэлектрические решетки типа I (а) и типа II (б). Спектр коэффициента пропускания для решетки типа I (в) для углов наклона стенок:  $\alpha = 0^\circ$  (1),  $\alpha = 2^\circ$  (2),  $\alpha = 4^\circ$  (3),  $\alpha = 6^\circ$  (4),  $\alpha = 8^\circ$  (5) и типа II (г) для углов  $\alpha = 0^\circ$  (6),  $\alpha = 4^\circ$  (7),  $\alpha = 7,5^\circ$  (8). В разбиении структуры использовано 10 слоев. Для решеток обоих типов период  $d = 660$  нм, ширина щели  $r = 165$  нм, толщина решетки  $h = 600$  нм, толщина верхнего слоя металла  $h_{m1} = 200$  нм, толщина слоя металла на дне щели  $h_{m2} = 10$  нм. Свет имеет  $p$ -поляризацию и падает под углом  $5^\circ$ .



**Рис. 2.** Коэффициенты пропускания по результатам численного моделирования (а) и определенных экспериментально (б) для решетки типа II при различных углах поляризации падающего излучения:  $\psi = 0^\circ$  (1),  $\psi = 30^\circ$  (2),  $\psi = 45^\circ$  (3),  $\psi = 60^\circ$  (4),  $\psi = 90^\circ$  (5). Значения углов  $\psi = 0^\circ$  и  $\psi = 90^\circ$  соответствуют *p*-поляризации и *s*-поляризации.

со значительным изменением структуры решетки типа II, вызванным увеличением угла наклона  $\alpha$ . Например, если  $\alpha = 0$ , то металл есть только на вершинах дорожек и на дне решетки. При  $\alpha > 0$  металл появляется и на стенках, что приводит к новым особенностям в спектрах.

Авторами работы проведены эксперименты по измерению коэффициента пропускания и отражения [8, 9] для решетки типа II. Изображение профиля изучаемых решеток было получено на атомно-силовом микроскопе, при этом хорошо видно, что стенки решеток наклонены. Тем не менее, точное значение наклона не может быть определено из-за недостаточного разрешения атомно-силового микроскопа. Отметим, что угол наклона является единственным неизвестным параметром решетки, так как остальные параметры (глубина щелей, симметрия, толщина верхнего слоя металла и т. д.) определяются методом изготовления.

На рис. 2 показано сравнение коэффициентов пропускания, полученных экспериментально и в результате расчета. Сравнение результатов расчетов для разных углов наклона стенок с экспериментальными спектрами показало, что наилучшее соответствие между ними достигается при угле наклона  $7,5^\circ$  (рис. 2).

Поиск оптимального соответствия между результатами расчета и эксперимента путем изменения одного из параметров структуры

является частной задачей скаттерометрии – оценки геометрических параметров структуры путем рассмотрения ее оптического отклика. Оптическая скаттерометрия является перспективным методом определения профиля структуры, ее основные достоинства: простота, скорость, высокая повторяемость, отсутствие непосредственного воздействия на структуру.

Таким образом, в работе показано, что наклон металлических стенок щелей решетки может серьезно повлиять на коэффициенты пропускания и отражения. Наличие наклонного профиля может привести как к увеличению, так и к уменьшению пропускания в зависимости от структуры решетки. Даже небольшой угол наклона приводит к изменениям в оптическом отклике при определенных условиях, которые следует учитывать при интерпретации экспериментальных данных. Рассчитанные оптические спектры, полученные при учете наличия наклонных стенок, дают хорошее согласие с экспериментом. Это позволяет говорить о возможности определения угла наклона стенок металлодиэлектрической решетки по ее оптическому спектру. Кроме того, показано, что необходимые оптические свойства решетки могут быть получены путем выбора угла наклона стенок щелей решетки.

Работа поддержана РФФИ, грантом Президента РФ МК-3123.2011.2 и фондом “Династия”.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Stefan A.M.* Plasmonics: Fundamentals and Applications. Berlin: Springer, 2007. 223 p.
  2. *Wood R.W.* Anomalous Diffraction Gratings // *Phys. Rev.* 1935. V. 48. № 12. P. 928–936.
  3. *Fano U.* The Theory of Anomalous Diffraction Gratings and of Quasi-Stationary Waves on Metallic Surfaces (Sommerfeld's Waves) // *J. Opt. Soc. Am.* 1941. V. 31. № 3. P. 213–222.
  4. *Porto J.A., García-Vidal F.J., Pendry J.B.* Transmission Resonances on Metallic Gratings with Very Narrow Slits // *Phys. Rev.Lett.* 1999. V. 83. № 14. P. 2845–2848.
  5. *Ebbesen T.W., Lezec H.J., Ghaemi H.F., Thio T., Wolff P.A.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays // *Nature.* 1998. V. 391. P. 667–669.
  6. *Kuttge M., Abajo F.J.G., Polman A.* How grooves reflect and confine surface plasmon polaritons // *Opt. Express.* 2009. V. 17. № 12. P. 10385–10392.
  7. *Yang X.Y., Liu H.T., Lalanne P.* Cross Conversion between Surface Plasmon Polaritons and Quasicylindrical Waves // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 102. № 15. P. 153903(1–4).
  8. *Vengurlekar A.S.* Optical properties of metallo-dielectric deep trench gratings: role of surface plasmons and Wood–Rayleigh anomaly // *Opt. Lett.* 2008. V. 33. № 15. P. 1669–1671.
  9. *Vengurlekar A.S.* Polarization dependence of optical properties of metallodielectric gratings with subwavelength grooves in classical and conical mounts // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 104. № 2. P. 023109(1–8).
  10. *Robert S., Ravaud A.M., Reynaud S., Fourment S., Carcenac F., Arguel P.* Experimental characterization of subwavelength diffraction gratings by an inverse-scattering neural method // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2002. V. 19. № 12. P. 2394–2402.
  11. *Moharam M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1995. V. 12. № 5. P. 1068–1076.
  12. *Li L.* Fourier modal method for crossed anisotropic gratings with arbitrary permittivity and permeability tensors // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2003. V. 5. № 4. P. 345–355.
-