

Брэгговские решетки с малыми потерями на паразитное рассеяние для поверхностных плазмон-поляритонов

Е.А. Кадомина^{1,2}, Е.А. Безус^{1,2}, Л.Л. Досколович^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе на основе численного моделирования методом фурье-мод исследовались эффективность и потери на рассеяние и поглощение диэлектрических брэгговских решеток для поверхностных плазмонных поляритонов (ППП). Показано, что основной причиной снижения эффективности брэгговских рефлекторов является паразитное рассеяние PPP на ступеньках решетки. В качестве эффективного способа уменьшения рассеяния предлагается увеличение периода решетки при постоянном аспектном отношении, что позволяет увеличить коэффициент отражения более чем на 30%. Показано также, что использование двухслойной геометрии ступенек решетки позволяет увеличить отражательную способность ещё на 3,5%.

1. Введение

Одним из перспективных направлений нанофотоники является плазмоника, которая, в частности, изучает свойства поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) — поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границы раздела между металлом и диэлектриком. Для управления распространением PPP актуальна разработка диэлектрических призм [1], линз [2], волноводов [3] и брэгговских решёток (зеркал) [4]. Основными недостатками указанных плазмонных структур являются потери на поглощение в металле и потери на паразитное рассеяние, возникающие на границах элементов. В предыдущей работе авторов [5] была предложена схема подавления рассеяния PPP на диэлектрических структурах, основанная на использовании двухслойных ступенек. Такая конфигурация обеспечивает частичное согласование поперечного профиля плазмонных мод вне элемента и в элементе. Было показано, что за счет этого двухслойная структура позволяет существенно (на порядок) уменьшить потери на рассеяние. В настоящей работе рассматриваются и сравниваются брэгговские решётки с подавлением рассеяния и без него при нормальном падении. За основу исследования был выбран пример с параметрами, подобными примеру из статьи [6], в которой рассматривается брэгговская решётка для PPP без подавления рассеяния.

2. Описание и методы

На рисунке 1а представлена геометрия брэгговской решётки для PPP. На слой металла с диэлектрической проницаемостью ε_m и толщиной h_m помещена решётка (периодический набор ступенек) с диэлектрической проницаемостью ступеньки ε_{gr} , высотой h_{gr} , с шириной

ступеньки l_1 и периодом d ($l_2 = d - l_1$ – расстояние между ступеньками решётки). Область между ступеньками решётки и над решёткой имеет диэлектрическую проницаемость ϵ_d .

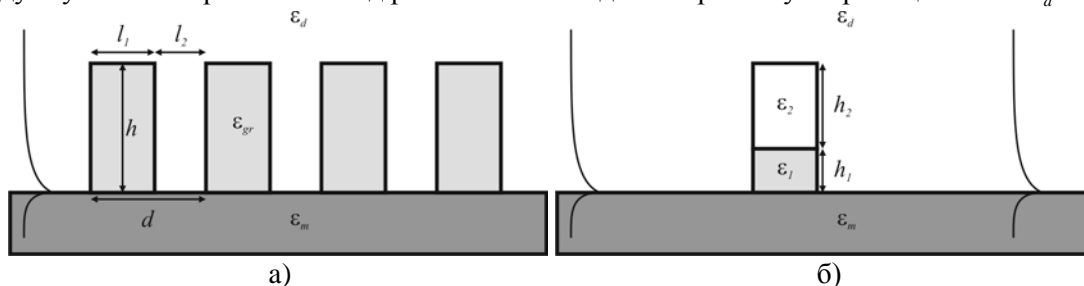


Рисунок 1. Геометрия структуры: а) брэгговская решётка, б) двуслойная конфигурация ступеньки брэгговской решётки.

Параметры брэгговской решётки l_1 и l_2 в случае нормального падения ППП связаны между собой следующим соотношением:

$$\text{Re}(k_1)l_1 + \text{Re}(k_2)l_2 = \pi(2n + 1), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \tag{1}$$

где k_1, k_2 – константы распространения мод в ступеньке и вне её соответственно, которые в случае границы раздела полубесконечных сред определяются следующим образом:

$$k_{1,2} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_{gr,d}}{\epsilon_m + \epsilon_{gr,d}}}, \tag{2}$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 – длина волны в свободном пространстве. Формула (2) хорошо описывает константы распространения k_i при условии, что высота слоя диэлектрика $h \ll \delta$, где δ – глубина проникновения ППП в диэлектрик. Таким образом, для определения константы распространения вне ступеньки может быть использована формула (2). Константу распространения k_1 мод при конечной высоте ступеньки можно определить из дисперсионного соотношения моды планарного волновода при ТМ-поляризации [7,8]:

$$\tanh(\gamma_{gr} h_{gr}) = -\frac{\gamma_{gr} \epsilon_{gr} (\epsilon_d \gamma_m + \epsilon_m \gamma_d)}{\epsilon_d \epsilon_m \gamma_{gr}^2 + \epsilon_{gr}^2 \gamma_d \gamma_m}, \tag{3}$$

где $\gamma_j^2 = k_1^2 - k_0^2 \epsilon_j$, $j = m, d, gr$. Одно из решений (1) можно представить в следующем виде:

$$l_i = \frac{\lambda_0 (2n + 1)}{4 \text{Re}(k_i/k_0)}, \quad i = 1, 2, \quad n = 0, 1, 2, \dots \tag{4}$$

Брэгговской решёткой нулевого порядка будем считать структуру с параметрами l_i , полученными из (4) при $n = 0$, а первого – при $n = 1$. Важно отметить, что эффективность решётки нулевого порядка при разумном с технологической точки зрения аспектном отношении ($h/l_1 \leq 3$) невелика – порядка 40–50% процентов энергии приходится на потери на рассеяние. Использование брэгговской решётки первого порядка позволяет при сохранении аспектного отношения увеличить высоту ступеньки, что, как будет показано ниже, существенно уменьшает потери на рассеяние.

Другим способом уменьшения потерь на паразитное рассеяние может стать двуслойная геометрия ступеньки, позволяющая частично согласовать поперечные профили плазмонных мод в ступеньке и между ступеньками (рисунок 1б). Заменяем ступеньку с диэлектрической проницаемостью ϵ_{gr} и высотой h_{gr} на ступеньку, состоящую из двух материалов с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 ($\epsilon_1 < \epsilon_2$), и высотами h_1 и h_2 , соответственно. Предполагая, что толщина верхнего слоя h_2 достаточно велика, плазмонную моду можно определить из (3), заменив в ней ϵ_{gr} на ϵ_1 , а ϵ_d на ϵ_2 . Аналогичным образом нужно поступить

с высотами и величинами γ_j . Тогда при фиксированных материальных параметрах высоту h_1 можно определить аналитически из (3) и условия $\text{Re}(\gamma_2) = \text{Re}(\kappa_d)$, где $\kappa_d = \sqrt{k_2^2 - k_0^2 \epsilon_d}$.

Моделирование дифракции ППП на брэгговской решётке проводилось с помощью собственного программного обеспечения, разработанного в среде MATLAB и реализующего метод RCWA [9], адаптированный для решения задач интегральной оптики [10].

Рассмотрим пример брэгговской решётки, аналогичный примеру из статьи [6], но при длине волны в свободном пространстве $\lambda_0 = 1100$ нм. На слое золота ($\epsilon_m = -52.39 + 4.02i$, $h_m = 300$ нм) находится решётка из диоксида кремния ($\epsilon_{gr} = 1.49^2$). Параметры $l_1 = 183,5$ нм, $l_2 = 272,4$ нм и $h_{gr} = 550$ нм соответствуют случаю однослойной геометрии брэгговской решётки нулевого порядка, а $l_1 = 542$ нм, $l_2 = 817,1$ нм и $h_{gr} = 1626$ нм – первого, при аспектном отношении, равном 3. Для брэгговской решётки нулевого порядка приведен также пример с большим аспектным соотношением, равным 8. При этом $h_{gr} = 1446$ нм и $l_1 = 180,7$ нм. Данный пример показывает, что для уменьшения потерь необходимо увеличить высоту ступеньки, однако в этом случае могут возникнуть технологические трудности при изготовлении структуры. Для сравнения приведем также результаты для случая нормального падения плоской волны на слоистую структуру, толщины слоев которой задаются выражением (4), а показатели преломления совпадают с эффективными показателями преломления (нормированными константами распространения) плазмонных мод в ступеньке и вне ее.

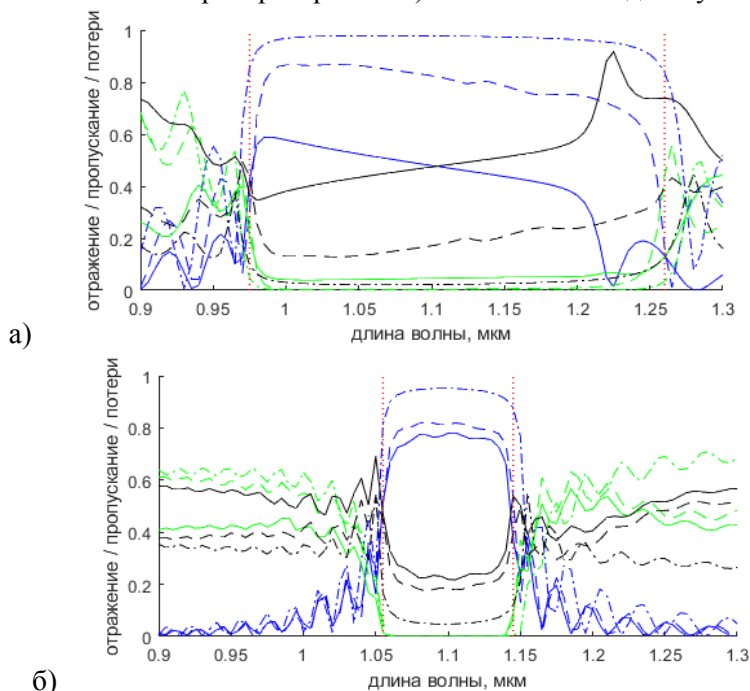


Рисунок 2. Отражение (синие линии), пропускание (зелёные линии) и потери (черные линии) для брэгговских решёток нулевого (а) и первого (б) порядков: сплошная линия – решётки с однослойной конфигурацией ступеньки с аспектным отношением 3, штрихпунктирная линия – плоская волна в слоистой структуре, пунктирная линия – решётка с однослойной ступенькой при аспектном отношении 8 (а) и решётка с двуслойной конфигурацией ступеньки (б); красными вертикальными линиями показаны границы запрещённой зоны слоистой структуры для случая падения плоской волны.

Для примера с двуслойной ступенькой брэгговской решётки первого порядка были выбраны следующие параметры: $\epsilon_1 = 1,3^2$, $\epsilon_2 = 1,49^2$, $l_1 = 550,7$ нм, $h_1 = 40$ нм, $h_2 = 1586$ нм (

$h_{gr} = h_1 + h_2 = 1626$ нм, что соответствует примеру брэгговской решётки первого порядка с однослойной ступенькой).

На рисунке 2 показаны зависимости коэффициентов отражения и пропускания, а также потери на рассеяние от длины волны света для описанных выше примеров брэгговских решёток нулевого и первого порядков при числе периодов $N = 15$.

Из рисунков 2а,б можно сделать вывод, что для брэгговской решётки нулевого порядка с аспектным отношением 3 эффективность действительно невелика ($R = 48\%$, $L = 47,4\%$) по сравнению с решёткой с аспектным отношением 8 ($R = 82,5\%$, $L = 17,1\%$). Переход к брэгговской решётке первого порядка позволяет увеличить отражение на 30% и сократить потери на 25,5% ($R = 78\%$, $L = 21,9\%$) относительно решетки нулевого порядка с одинаковым аспектным отношением, равным 3. Введение двуслойной ступеньки позволяет увеличить отражение ещё на 3,5% и уменьшить потери на 3,5% относительно однослойной конфигурации ступеньки. Оценка спектров (рисунок 2а,б) показывает, что ширина запрещённой зоны (области с наибольшим отражением) уменьшается примерно в три раза по длине волны при переходе от нулевого порядка решётки к первому.

На рисунке 3 приведены зависимости коэффициентов отражения, пропускания и потери в зависимости от размера структуры (числа периодов брэгговской решётки). Из рисунка 3 можно заключить, что достаточное количество периодов решётки (на графике отмечены маркерами) $N = 8$ одинаково для решеток нулевого и первого порядков, но размеры решётки первого порядка по высоте и периоду в три раза превышают размеры решётки нулевого порядка.

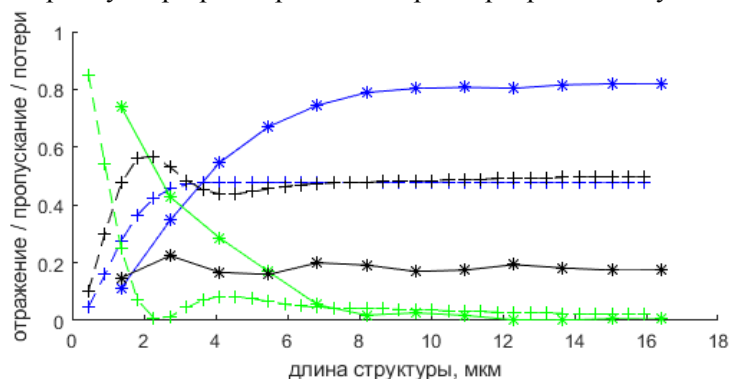


Рисунок 3. Сравнение зависимостей отражения (синие графики), пропускания (зеленые графики) и потерь (черные графики) от длины структуры. Сплошная линия соответствует решетке второго порядка с двуслойной конфигурацией ступеньки, пунктирная линия соответствует решётке первого порядка с однослойной конфигурацией ступеньки. Маркерами отмечены значения кратные числу периодов.

В заключение, выделим основные результаты работы. В работе показано, что использование брэгговской решётки первого порядка, имеющей размеры, в три раза превышающие размеры брэгговской решётки нулевого порядка, позволяет уменьшить потери на паразитное рассеяние на 30%. Введение двуслойной геометрии ступеньки брэгговской решётки позволяет уменьшить потери еще на 3,5%. Данные результаты могут найти применение при создании элементов «двумерной оптики» для управления распространением ППП.

3. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) и грантов РФФИ 17-47-630323 и 16-29-11683.

4. Литература

- [1] Griesing, S. Refractive and reflective behavior of polymer prisms used for surface plasmon guidance / S. Griesing, A. Englisch, and U. Hartmann // Opt. Lett. – 2008. – Vol. 33(6). – P. 575-577.

- [2] Hohenau, A. Dielectric optical elements for surface plasmons / A. Hohenau, J. R. Krenn, A. L. Stepanov, A. Drezet, H. Ditlbacher, B. Steinberger, A. Leitner, F. R. Aussenegg // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30(8). – P. 893-895.
- [3] Holmgaard, T. Bend- and splitting loss of dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides / T. Holmgaard, Z. Chen, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, A. Dereux, A. V. Krasavin, A. V. Zayats // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16(18). – P. 13585-13592.
- [4] González, M.U. Analysis of the angular acceptance of surface plasmon Bragg mirrors/ M.U. González, A.L. Stepanov, J.C. Weeber, A. Hohenau, A. Dereux, R. Quidant, J.R. Krenn // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32(18). – P. 2704-2706.
- [5] Bezus, E.A. Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 98. – N 221108.
- [6] Randhawa, S. Design and properties of dielectric surface plasmon Bragg mirrors / S. Randhawa, M.U. González, J. Renger, S. Enoch, R. Quidant // *Opt. Express.* – 2010. – Vol. 18. – P. 14496-14510.
- [7] Avrutsky, I. Sub-wavelength plasmonic modes in a conductor-gap-dielectric system with a nanoscale gap / I. Avrutsky, R. Soref, W. Buchwald // *Opt. Express.* – 2010. – Vol. 18 (1). – P. 348-363.
- [8] Sannikov, D.G. The surface mode of a dielectric waveguide with metal substrate / D.G. Sannikov, D.I. Sementsov // *Tech. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 29(5). – P. 353-356.
- [9] Moharam, M.G. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M.G. Moharam, D.A. Pommet, E.B. Grann, T.K. Gaylord // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 1995. – Vol. 12. – P. 1077-1086.
- [10] Silberstein, E. Use of grating theories in integrated optics / E. Silberstein, P. Lalanne, J.P. Hugonin, Q. Cao // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2001. – Vol. 18. – P. 2865-2875.

Low-scattering Bragg gratings for surface plasmon polaritons

Е.А. Kadomina^{1,2}, Е.А. Bezus^{1,2}, L.L. Doskolovich^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute – branch of the Federal Scientific Research Centre “Cristallography and Photonics” of Russian Academy of Sciences, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. In this work, diffraction efficiency and scattering and absorption losses in dielectric Bragg gratings for surface plasmon polaritons (SPP) are numerically studied using the Fourier modal method. We demonstrate that the main reason of low efficiency of such Bragg reflectors is the parasitic scattering of SPP at the grating ridges. As an efficient technique for decreasing the scattering losses, an increase in the grating period at fixed aspect ratio is proposed, which leads to a 30% increase in the reflector efficiency. We also show that the utilization of two-layer grating ridges makes it possible to increase the reflectivity by another 3.5%

Keywords: surface plasmon polariton, Bragg grating, scattering suppression.