ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 621.37/.39

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

О.В. БАГДАСАРЯН, Т.М. КНЯЗЯН, Г.Г. ЭЙРАМДЖЯН

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ, ПРОЗРАЧНОЙ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

Методом единого выражения (МЕВ) проведено корректное электродинамическое моделирование отражательных и пропускательных характеристик многослойных металл-диэлектрических структур. Для слоистой структуры, состоящей из чередующихся слоев серебра и диэлектрика GaN, подбором их толщин и числа двухслоек предложена оптимальная конфигурация, обладающая высокой пропускательной способностью в видимой области спектра и непропусканием вне ее. Рассчитаны спектры пропускания, отражения и поглощения такой структуры с учетом частотной дисперсии серебра. Для областей наибольшего и наименьшего пропускания приведены распределения амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности (вектора Пойнтинга) вдоль структуры.

Ключевые слова: многослойная структура, металл-диэлектрические слои, численное моделирование, электродинамическая модель, метод единого выражения, оптическая фильтрация.

Введение. Как известно, многослойные диэлектрические структуры имеют сильную отражательную способность в узкой полосе оптического спектра, благодаря чему они получили широкое применение в качестве отражательных фильтров и частотно-селективных зеркал в оптике [1, 2]. Для получения частотно-селективных пропускательных фильтров используются металлдиэлектрические слоистые структуры [3-9]. Такие фильтрующие структуры могут применяться для защиты различных оптических устройств от воздействия интенсивного электромагнитного излучения вне видимого диапазона волн, а также в качестве прозрачных электропроводящих покрытий в дисплеях и др. [6]. Для конструирования таких фильтров необходимо проведение численного моделирования перед дорогостоящим процессом их изготовления. Обычно для моделирования используются следующие традиционные расчетные методы: метод характеристической матрицы [3-6], метод инвариантного погружения [7, 8], метод быстрого преобразования Фурье [9] и др. Перечисленные методы сложны в реализации и не являются эффективными для нахождения оптимальных конфигураций структур с требуемыми спектральными характеристиками. В данной работе в качестве альтернативного метода численного моделирования металл-диэлектрических многослойных структур используется разработанный авторами статьи метод единого выражения (МЕВ) [10 - 14]. Основой МЕВ является представление решения уравнения Гельмгольца в каждом слое рассматриваемой структуры в виде единого выражения, а не в виде встречных волн, как в классическом подходе. Благодаря этому не требуется предварительное задание формы волны в каждом слое структуры, что делает МЕВ удобным инструментом в исследованиях оптических структур, состоящих из слоев с любыми комплексными значениями диэлектрических и

магнитных проницаемостей [15]. МЕВ является корректным, простым в реализации и быстрым средством для расчета многослойных структур, слои которых соизмеримы с длиной волны.

В работе приведено краткое описание МЕВ и с его помощью численно исследованы пропускательные и отражательные свойства многослойных металл-диэлектрических структур.

МЕВ и анализ оптических характеристик металл-диэлектрических структур. Из уравнений Максвелла в случае монохроматических волн выводится уравнение Гельмгольца, которое для линейно-поляризованной компоненты плоской электромагнитной волны имеет следующий вид:

$$\frac{\mathrm{d}^{2}\dot{\mathrm{E}}_{x}(z)}{\mathrm{d}z^{2}} + k_{0}^{2}\widetilde{\epsilon}(z)\dot{\mathrm{E}}_{x}(z) = 0, \qquad (1)$$

где $k_0 = \omega/c$ - волновое число свободного пространства; $\tilde{\epsilon}(z) = \epsilon'(z) + i\epsilon''(z)$ -комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

Уравнение (1) применимо не только для однородных сред, но и для неоднородных - при выполнении условия $\vec{E} \perp grad\epsilon(z)$ [11, 16].

В основе МЕВ [10-14] лежит представление решения уравнения Гельмгольца (1) в виде единого выражения

$$\dot{\mathrm{E}}_{\mathrm{x}}(z) = \mathrm{U}(z) \cdot \exp(-\mathrm{i}\mathrm{S}(z)), \qquad (2)$$

где U(z) и S(z) - реальные величины, описывающие результирующие амплитуду и фазу напряженности электрического поля. Временная зависимость $exp(i\omega t)$ подразумевается, но опускается во время анализа. Решение в виде (2) позволяет свести уравнение Гельмгольца (1) к системе трех дифференциальных уравнений первого порядка, которые решаются численно методом Рунге-Кутта заданием начальных условий на неосвещенной стороне структуры. Этим обеспечивается единственность решения граничной задачи для многослойной структуры при однократном процессе интегрирования дифференциальных уравнений по направлению к ее освещенной стороне. В результате решения граничной задачи определяются коэффициенты отражения, прохождения и потерь в структуре, а также получаются распределения амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности (вектора Пойнтинга) вдоль структуры. Последние являются важной информацией для понимания специфики спектральных характеристик многослойных оптических структур.

В настоящей работе с помощью МЕВ исследованы оптические характеристики многослойных металл-диэлектрических структур при нормальном падении плоской электромагнитной волны. В качестве металла с наименьшими потерями взято серебро с комплексной диэлектрической проницаемостью $\tilde{\epsilon}_{Ag} = -8,275 - i0,749$ при $\lambda_0 = 500$ нм (значение $\tilde{\epsilon}_{Ag}$ взято из [17]). Отдельно исследованы оптические свойства одиночного слоя серебра, окруженного с двух сторон свободным пространством. Как показывает анализ, с ростом толщины слоя серебра наблюдается монотонное возрастание коэффициента отражения R до максимального установившегося значения R = 0,945 и соответственно убывание коэффициента прохождения T до очень малых значений (рис.1).

Установившееся значение коэффициента отражения R соответствует отражательной способности толстых металлических слоев или металлического полупространства. В этом случае коэффициент поглощения A = 1 - R, так как T = 0. Коэффициент поглощения A достигает своего максимального значения $A \approx 0,08$ при толщине слоя, равном 18,9 *нм*, когда значения R и T равны друг другу. С дальнейшим ростом толщины слоя серебра потери монотонно уменьшаются, достигая установившегося значения A = 0,055.

Из проведенного анализа следует, что для построения многослойной металл-диэлектрической структуры с высокой пропускательной способностью в видимом диапазоне волн целесообразно выбрать полупрозрачный слой серебра толщиной в пределах 20 *нм*. Ожидается, что для толщин слоя серебра, когда его R и T почти равны друг другу, многослойная металл-диэлектрическая структура обеспечит соответствующую частотную селективность при максимальной прозрачности.



Рис. 1. Коэффициенты отражения R, прохождения T и поглощения A (все по интенсивности) в слое серебра в зависимости от его толщины L_m при длине волны $\lambda_0 = 500$ *нм*

Далее в работе рассмотрено падение плоской электромагнитной волны на многослойные структуры, состоящие из чередующихся металл-диэлектрических двухслоек. Двухслойка состоит из слоя серебра с диэлектрической проницаемостью $\tilde{\epsilon}_{Ag} = -8,275 - i0,749$ [17] и слоя диэлектрика GaN с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{GaN} = 7,129$ при $\lambda_0 = 500$ *нм* [18]. С целью выявления металл-диэлектрических структур с высокой пропускательной способностью в видимой области спектра проведено исследование числа двухслоек, толщин металлических, диэлектрических слоев и просветляющих покрытий на их пропускательные свойства. Заслуживающими внимания оказались металл-диэлектрические структуры типа S1 без просветляющих покрытий (вкладка на рис. 2а) и типа S2 с просветляющими покрытиями по краям (вкладка на рис. 2б). Подобные конфигурации ранее были рассмотрены в работах [4, 6-9]. Оптимальной оказалась структура S2, состоящая из пяти металлических слоев толщиной 20 *нм*, разделенных четырьмя диэлектрическими слоями, с просветляющими покрытиями толщиной 28 *нм* (рис. 26). Положительное влияние просветляющих

покрытий было описано в работах [7-9]. Данная структура позволяет получить максимальное прохождение волны и более плавную зависимость коэффициента прохождения от толщины диэлектрических слоев по сравнению со структурой S1 (рис. 2а). Периодическое поведение коэффициента прохождения с периодом $L_d/\lambda_d = 0,5$ соответствует известной латентности полуволнового диэлектрического слоя [1]. Максимум прохождения структуры S2 имеет место при толщине диэлектрического слоя L_d/λ_d , равной 0,34, что соответствует его физической толщине $L_d = 64 \ \text{нм}$ (первый максимум на рис. 26). Ожидается, что структура S2 с толщиной диэлектрического слоя $L_d = 64 \ \text{нм}$ обеспечит максимальную прозрачность структуры в видимой области спектра.



Рис.2. Коэффициент прохождения волны через металл-диэлектрические структуры S1 (а) и S2 (б) в зависимости от относительной толщины диэлектрических слоев L_d / λ_d (где $\lambda_d = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{GaN}}$) при длине волны $\lambda_0 = 500$ нм

Учитывая дисперсионные свойства серебра [17] (см. Приложение, рис. 4), рассчитаны спектры пропускания $T(\lambda_0)$, поглощения $A(\lambda_0)$ и отражения $R(\lambda_0)$ для структуры S2 в диапазоне длин волн 0,34 … 1,24 *мкм* (рис. 3а). Видно, что структура прозрачна в видимой области спектра и непрозрачна вне ее. Неоднородность спектра пропускания в области прозрачности обусловлена наличием потерь в слоях серебра. Максимум поглощения в структуре имеет место на длине волны 780 *нм*, при которой коэффициенты отражения и прохождения равны друг другу. Резкое уменьшение поглощения с ростом длины волны обусловлено уменьшением коэффициента прохождения структуры, т.е. слабым проникновением волны в нее.

Следует отметить, что изменение толщины диэлектрических слоев на ±1 *нм* приводит к сдвигу спектров пропускания, потерь и отражения на 5 *нм*, соответственно, в длинноволновую и коротковолновую области.

Поведение амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности в структуре позволяет объяснить особенности спектральных характеристик рассматриваемой металлдиэлектрической структуры. На рис. Зб, в, г приведены распределения амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности, а также профили диэлектрической проницаемости вдоль структуры S2 и в окружающих ее полупространствах для максимального и минимального прохождения волны.





Рис. 3. Спектр пропускания T(λ_0), потерь A(λ_0) и отражения R(λ_0) металл – диэлектрической структуры S2 (а). Толщины диэлектрических слоев L_d = 64 *нм*, толщины слоев серебра – 20 *нм*, толщины просветляющих покрытий – 28 *нм*. Профиль диэлектрической проницаемости ϵ' , распределение амплитуды напряженности электрического поля $\hat{E} = U$ и плотности потока мощности Р внутри и вне структуры для следующих длин волн падающего излучения: $\lambda_0 = 0,34$ *мкм* (6), $\lambda_0 = 0,5$ *мкм* (в), $\lambda_0 = 0,9$ *мкм* (г)

В области минимального пропускания при $\lambda_0 = 0,34$ *мкм* и $\lambda_0 = 0,9$ *мкм* (рис. 36, г) наблюдается резкое убывание амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности на освещенной стороне структуры, что характерно для многослойных оптических структур в режиме сильного отражения [14]. В области максимального пропускания при $\lambda_0 = 0,5$ *мкм* (рис. 38) распределение амплитуды напряженности электрического поля имеет симметричный характер в структуре с узлами в слоях металла, что характерно для многослойных металлдиэлектрических структур в режиме пропускания [9].

Заключение. С помощью МЕВ решена электродинамическая задача взаимодействия плоской электромагнитной волны с металл-диэлектрической многослойной структурой. Выявлена оптимальная структура с высокой пропускательной способностью в видимом диапазоне волн и низкой пропускательной способностью вне его. Металл-диэлектрическая структура состоит из пяти слоев серебра толщиной 20 *нм*, разделенных четырьмя диэлектрическими слоями GaN толщиной 64 *нм*, с просветляющими покрытиями из GaN толщиной 28 *нм*. Получены спектральные зависимости структуры с учетом дисперсионных свойств серебра. Рассчитанная металл-диэлектрическая структура может служить защитным фильтром от нежелательного излучения вне области видимого спектра.

Следует отметить большую чувствительность спектральной характеристики структуры от толщины диэлектрических слоев. Уменьшение или увеличение толщин диэлектрических слоев на единицы нанометров приводит к сдвигу спектра в коротковолновую или длинноволновую область, соответственно. Увеличение толщины слоев серебра приводит к падению прозрачности структуры, а уменьшение их толщины - к расширению спектра. Увеличение числа металл-диэлектрических двухслоек в структуре или применение других металлов с большим поглощением приводит к снижению пропускательной способности структуры.



ПРИЛОЖЕНИЕ

Дисперсионные характеристики серебра (Ag) из [17].

Рис. 4. Зависимости реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости серебра от длины электромагнитной волны в области длин волн 0,34 …1,24 *мкм*

Данная работа была осуществлена при поддержке Швейцарского национального научного фонда (грант JRP IB7320-111057/1), Армянского национального научного и образовательного фонда (грант EN-elec-923) и частично Армянского госбюджетного проекта No. 0433.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- 2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах М.: Изд. Академии наук СССР, 1957. 502 с.
- Scalora M. et al. Transparent, Metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures // J. Appl. Phys. -1998. - Vol. 83, № 5. - P. 2377-2383.
- 4. **Sibilia C.** et al. Electromagnetic properties of periodic and quasi-periodic one-dimensional, metallo-dielectric photonic band gap structures // J. Opt. A: Pure Appl. Opt.- 1999. Vol. 1. P. 490–494.
- Contopanagos H., Yablonovitch E., Alexopoulos N.G. Electromagnetic properties of periodic multilayers of ultrathin metallic films from DC to ultraviolent frequencies // J. Opt.- Soc. Am. A. – Sept. 1999. - Vol. 16. - P. 2294-2306.
- 6. **Baglio S.** et al. Development of novel optoelectromechanical systems based on "transparent metals" PBG structures// IEEE Sensors Journal. December 2001. Vol. 1, № 4. P. 288-295.
- Choi Y-K. et al. Improved transmittance in one-dimensional metallic photonic crystals // Physica B. 2003.- Vol. 338. - P. 132-135.
- Choi Y-K. et al. Antireflection film in one-dimensional metallo-dielectric photonic crystals // Optics Communications. - 2004. – Vol. 230. - P. 239-241.
- Scalora M. et al. Negative refraction and sub-wavelength focusing in the visible range using transparent metallodielectric stacks // Optics Express. - 2007. - Vol. 15, № 2. - P. 508-523.
- Baghdasaryan H.V. Method of Backward Calculation // In Photonics Devices for Telecommunications: how to model and measure / Ed.G. Guekos. – Springer. - 1999. – P. 56-65.
- 11. Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M. Problem of plane EM wave self-action in multilayer structure: an exact solution // Opt. and Quant. Electron. 1999. Vol. 31, № 9/10. P. 1059-1072.
- Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M. Method of Single Expression Advanced Powerful Tool for Computer Modelling of Wavelength Scale Nonuniform Frequency-Selective 1D Photonic Structures // In Proc. ICTON 2002, IEEE Catalog No. 02EX551, Warsaw, Poland. - April 2002. - Vol. 2, Th. C.5. - P. 157-162.
- Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M. Method of single expression an exact solution for wavelength scale 1D photonic structures' computer modeling // In Proc. SPIE, Bellingham, WA, Applications of Photonic Technology 6, Ed. R.A. Lessard, G.A. Lampropoulos. 2003. Vol. 5260. P. 141-148.
- 14. **Симонян Р.И., Багдасарян О.В., Князян Т.М.** Анализ оптических характеристик распределенных брегговских отражателей с учетом потерь в слоях // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2005. -Т. LVIII, № 3. С. 555-562.
- Baghdasaryan H. V. and Knyazyan T.M. Extension of the Method of Single Expression for Analysis of Materials with Complex Permittivity and Permeability// In Proc. ICTON 2006, IEEE Catalog No. 06EX1326, Nottingham, UK. - June 2006. – Vol. 2, Mo.B2.4. – P. 13-18.
- 16. Каценеленбаум Б.З. Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966. 240 с.
- 17. Handbook of Optical Constants of Solids/ Ed. Palik E.D. New York: Academic Press, 1998. 804 p.
- Leung M. M.Y. et al. Refractive index of InGaN/GaN quantum well// Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 84, № 11. - P. 6312-6317.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.02.2007.

Հ.Վ. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Թ.Մ. ԿՆՅԱՉՅԱՆ, Գ.Գ. ԷՅՐԱՄՋՅԱՆ

ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԵՍԱՆԵԼԻ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ ԹԱՓԱՆՑԻԿ ՄԵՏԱՂ-ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿ ԲԱԶՄԱՇԵՐՏ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ

Միասնական արտահայտության մեթոդով (ՄԱՄ) կատարվել է բազմաշերտ մետաղդիէլեկտրիկ կառուցվածքների անդրադարձնող և թողարկող հատկությունների ձշգրիտ էլեկտրադինամիկական մոդելավորում։ Արծաթի և GaN դիէլեկտրիկի իրար հաջորդող շերտերից բաղկացած շերտավոր կառուցվածքի համար, նրանց հաստությունների և երկշերտերի քանակի ընտրության հիման վրա առաջարկվել է լավարկված կառուցվածք, որն ունի մեծ թողարկող հատկություն սպեկտրի տեսանելի տիրույթում և չթողանցում այդ տիրույթից դուրս։ Հաշվարկվել են այդ կառուցվածքի թողարկման, անդրադարձման և կլանման սպեկտրերը՝ հաշվի առնելով արծաթի հաձախային դիսպերսիան։ Թողարկման առավելագույն և նվազագույն տիրույթների համար բերվել են էլեկտրական դաշտի ամպլիտուդի լարվածության և հզորության հոսքի խտության (Պոյնտինգի վեկտոր) բաշխվածությունները կառուցվածքի երկայնքով։

Առանցքային բառեր. բազմաշերտ կառուցվածք, մետաղ-դիէլեկտրիկ շերտեր, թվային մոդելավորում, էլեկտրադինամիկական մոդել, միասնական արտահայտության մեթոդ, օպտիկական զտում։

H.V. BAGHDASARYAN, T.M. KNYAZYAN, G.G. EYRAMJYAN ELECTRODYNAMICAL MODEL OF METAL-DIELECTRIC MULTILAYER STRUCTURE TRANSPARENT IN THE VISIBLE RANGE

Correct electrodynamical modelling of reflective and transmittive characteristics of mulitilayer metal-dielectric structures is carried out by the method of single expression (MSE). For a layered structure consisting of silver and GaN dielectric alternating layers by choosing their thicknesses and number of bilayers an optimal configuration which possesses high transmittance in the visible range and low transmittance out of this range is suggested. Transmittance, reflectance and absorptance spectra of such structure are calculated by taking into account silver's frequency dispersion. For the regions of maximal and minimal transmittance the distributions of electric field amplitude and power flow density (Poynting vector) along the structure are presented.

Keywords: multilayer structure, metal-dielectric layers, numerical modelling, electrodynamic model, method of single expression, optical filtration.