

УДК 535.323

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКРАНИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ СО СПОСОБНОСТЬЮ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ГАШЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Т.М. ПЕЧЕНЬ, А.М. ПРУДНИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 2 октября 2015*

Основная задача математического моделирования заключалась в определении расчётными методами способов минимизации функции описывающей отражательную способность экранирующих покрытий. Приведены результаты изучения характеристик покрытий, обладающих способностью интерференционного гашения отраженных лучей, в диапазоне длин волн от 250 до 600 нм. Проведенное моделирование в программе EMTL позволили установить: толщина данного покрытия в ультрафиолетовой (УФ) области прямо зависит от функции, описывающей спектральную отражательную способность экрана. Представлен сравнительный анализ данных экранирующих покрытий на основе оксида алюминия, фторида магния и диоксида титана.

*Ключевые слова:* экранирующее покрытие, коэффициент отражения, интерференционное гашение, ультрафиолетовое излучение.

### Введение

Современные средства оптической разведки объектов включают применение устройств обнаружения целей в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн (200...400 нм). Главным образом это обусловлено тем, что большинство объектов в этой области имеют более высокие яркостные контрасты по отношению к естественным фонам, чем в видимом диапазоне. Важной особенностью УФ-области спектра является наличие меньшего уровня помех естественного, и искусственного происхождения, чем в видимой и инфракрасной областях. Одним из эффективных способов маскирования в указанном диапазоне является применение экранов с интерференционным гашением отраженного излучения. Это свойство позволяет обеспечить скрытие объекта от средств оптического слежения [1].

Минимизация коэффициента отражения от границы между двумя средами представляет крайне важную практическую задачу, особенно для средств и систем специального назначения [2]. Так следует отметить, что, например, в авиационной технике это обусловлено необходимостью маскировки для незаметного осуществления полетов в воздушном пространстве, в солнечной энергетике таким способом можно повысить эффективность, а также для устранения бликов от различных дисплеев для повышения видимости [3].

### Методика эксперимента

Показатель преломления является важным параметром при решении проблемы снижения отражения от поверхностей. Показатели преломления наиболее широко применяемых материалов для создания покрытий лежат в диапазоне 1,35...2,20 [4]. В задачах синтеза конструкций экранирующих покрытий со способностью эффективного интерференционного гашения отраженного света возникает сложность с выбором оптимальной толщины покрытия, как правило, которая составляет единицы нанометров.

Одной из разновидностей оптических покрытий являются свето- и спектроделительные покрытия. В таких покрытиях зоны прозрачности, подавления и контрастность (отношение максимального и минимального пропускания) имеют строго зафиксированные значения, определенные техническим заданием. На практике трудно обеспечить максимальную крутизну  $dR/d\lambda$ .

В [5] приводится эмпирическое выражение, которое устанавливает взаимосвязь между средним коэффициентом отражения и предельной оптической толщиной покрытия. Математическое выражение (1) справедливо для видимой и ближней инфракрасной областей.

$$R_{\text{ср.}} = 0,01 \cdot \left[ \frac{\lambda_{\text{макс.}}}{\lambda_{\text{мин.}}} \cdot (n_{\text{внеш.}} - 1) \right]^{3,4} \cdot \left( \frac{\lambda_{\text{макс.}}}{d_{\text{пред.}}} \right)^{0,63} \cdot \left[ (1,2 - \Delta n)^2 + 0,42 \right], \quad (1)$$

где  $R_{\text{ср.}}$  – средний коэффициент отражения многослойного покрытия;  $n_{\text{внеш.}}$  – показатель преломления внешнего слоя оптического покрытия;  $n_{\text{н}}$  – показатель преломления нижнего слоя оптического покрытия;  $n_{\text{с}}$  – показатель преломления среднего слоя оптического покрытия;  $\frac{\lambda_{\text{макс.}}}{\lambda_{\text{мин.}}}$  – отношение максимальной к минимальной длин волн заданного диапазона;  $d_{\text{пред.}}$  – предельная оптическая толщина покрытия;  $\Delta n$  – разность между показателями преломления нижнего и среднего слоев оптического покрытия.

Моделируемые покрытия являются планарными периодическими структурами: они периодичны по двум направлениям и имеют ограниченную протяженность по оставшемуся направлению. Реальные экспериментальные образцы, конечно, имеют ограниченный размер и по первым двум направлениям, но поскольку этот размер существенно больше их протяженности по непериодическому направлению, влиянием конечности образца с хорошей степенью точности можно пренебречь.

С учетом отмеченных замечаний для математического моделирования выбран метод конечных разностей FDTD (Finite-Difference Time-Domain), в основе которого лежит способ численного решения уравнений Максвелла [6]. Выражения (2) и (3) представляют собой математическую запись метода полного и рассеянного поля.

$$\vec{E}_{\text{полн.}} = \vec{E}_{\text{пад.}} + \vec{E}_{\text{рас.}}, \quad (2)$$

$$\vec{H}_{\text{полн.}} = \vec{H}_{\text{пад.}} + \vec{H}_{\text{рас.}}, \quad (3)$$

где  $\vec{E}_{\text{полн.}}$  – вектор напряженности электрического поля результирующей волны;  $\vec{H}_{\text{полн.}}$  – вектор напряженности магнитного поля результирующей волны;  $\vec{E}_{\text{пад.}}$  – вектор напряженности электрического поля падающей волны;  $\vec{H}_{\text{пад.}}$  – вектор напряженности магнитного поля падающей волны;  $\vec{E}_{\text{рас.}}$  – вектор напряженности электрического поля рассеянной волны;  $\vec{H}_{\text{рас.}}$  – вектор напряженности магнитного поля рассеянной волны.

При моделировании данным методом считается, что падающая волна известна в каждой точке пространства и времени. Расчеты проводили в программе EMTL (Electromagnetic Template Library), которая позволяет быстро и эффективно осуществлять расчеты методом конечных разностей FDTD. В [7] представлено подробное описание данной программы, написанной на C++.

## Результаты и их обсуждение

Одним из способов уменьшения отражения является просветление оптики, заключающееся в создании на поверхности тела оптически тонкой пленки. Принцип ее действия основан на взаимном гашении интерферирующих друг с другом лучей, которые отражаются от наружной и внутренней сторон пленки. На рис. 1 представлены изображения исследуемых структур моделируемых покрытий и графики зависимостей коэффициента преломления от толщины. У однослойных просветляющих покрытий (рис. 1, а и в) имеется

серьезный недостаток: они могут быть использованы только для узкого диапазона длин волн и углов падения. Этот диапазон можно расширить, применяя многослойные покрытия (рис. 1, б, з, д и е). Принцип действия таких покрытий тот же, что и у однослойных, – взаимное интерференционное гашение двух или нескольких волн, отраженных от разных границ раздела между слоями.

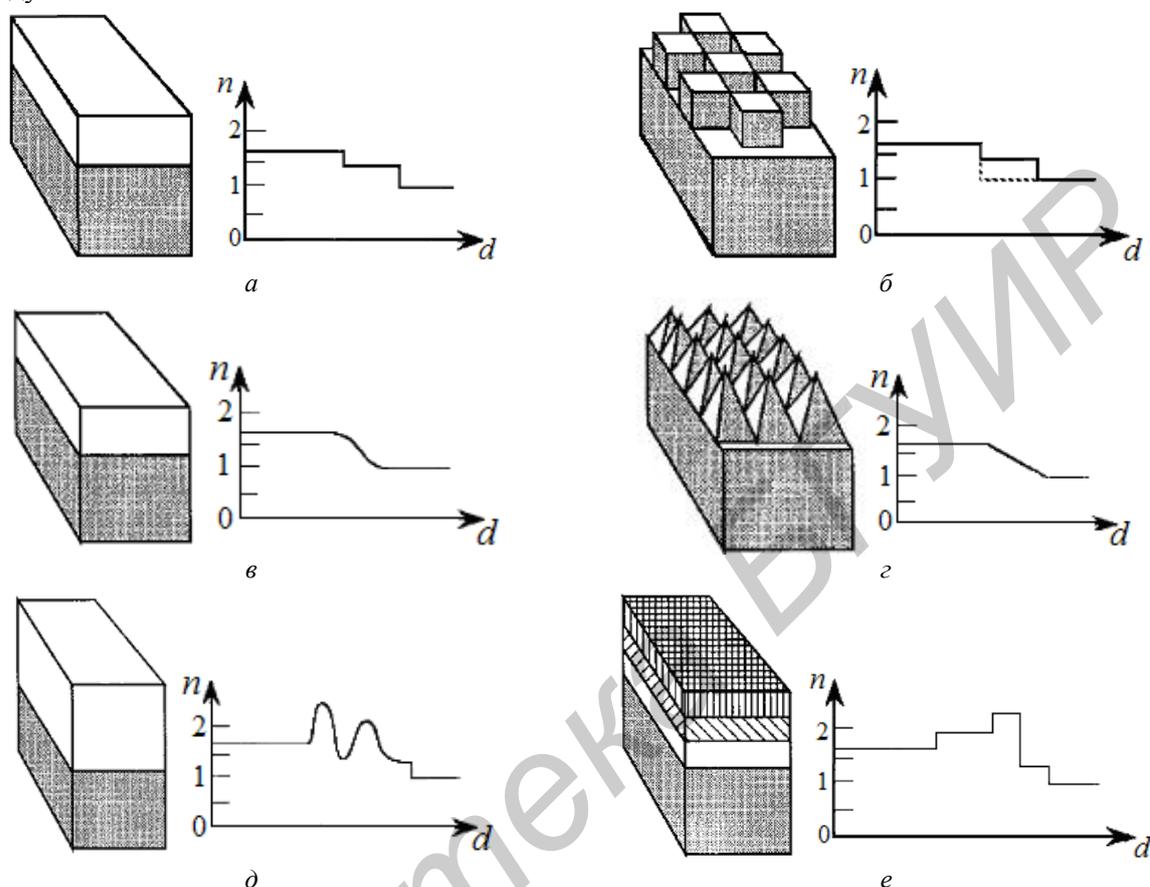


Рис. 1. Изображения исследуемых структур антиотражающих покрытий и графики зависимостей коэффициентов преломления от толщины: а – однородная однослойная; б – однородная дискретная; в – неоднородная простая; з – неоднородная пирамидальная; д – неоднородная сложная; е – однородная многослойная

Конкретные значения толщин слоев и их показателей преломления могут подбираться в зависимости от желаемого эффекта: близкий к нулю коэффициент отражения в широкой спектральной области или в широком диапазоне углов для заданной длины волны. Недостатком многослойных покрытий является проблематичность нахождения материалов с нужной диэлектрической проницаемостью. Альтернативой многослойных просветляющих покрытий могут служить слои с непрерывно меняющимся коэффициентом преломления. Применение таких покрытий позволяет достичь низких значений коэффициента отражения в широком спектральном диапазоне. Однако и у этого метода есть свои недостатки, среди которых несоответствие температурных коэффициентов расширения получаемых слоев и адгезия.

В результате моделирования определили математические выражения для расчета значений толщин слоев, необходимых для равенства нулю коэффициента отражения, при заданных показателях преломления слоев  $n_m$  и  $n_s$ . На рис. 2 представлена графическая интерпретация данной методики. Здесь рассматривается случай для двухслойного экранирующего покрытия.

В ходе математического моделирования была установлена причина, по которой для УФ-области (1) не справедливо, заключается в различном действии каждого из 3-х поддиапазонов этого спектра (коротковолновом, средневолновом и длинноволновом), а также

здесь нет строгой зависимости предельной оптической толщины слоя и максимальной длины волны поддиапазона.

Коэффициент преломления зависит от длины волны, поэтому отражение может отсутствовать только для определенной длины волны. Таким образом, следует выбирать коэффициент преломления и толщину так, чтобы минимизировать отражение на длине волны с наибольшей интенсивностью излучения.

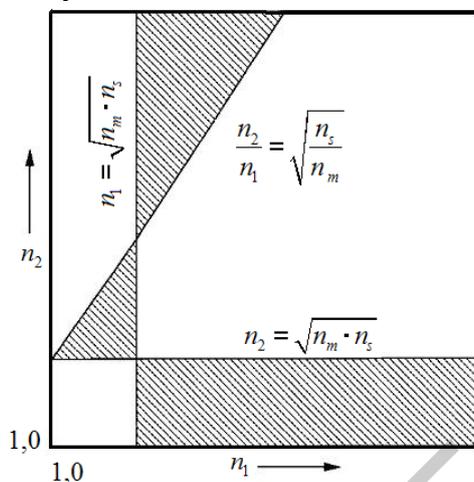


Рис. 2. Графическая интерпретация способа расчета коэффициентов преломления  $n_1$  и  $n_2$  для двухслойного антиотражающего покрытия

На практике наиболее широко применяются такие материалы для изготовления данных покрытий как оксид алюминия, фторид магния и диоксид титана. В УФ диапазоне длин волн эти материалы имеют минимальный коэффициент отражения [8]. На рис. 8 приведены графики зависимостей коэффициента отражения ( $R$ ) от длины волны ( $\lambda$ ) исследуемых покрытий, рассматриваемых материалов, нанесенных на кварцевое стекло.

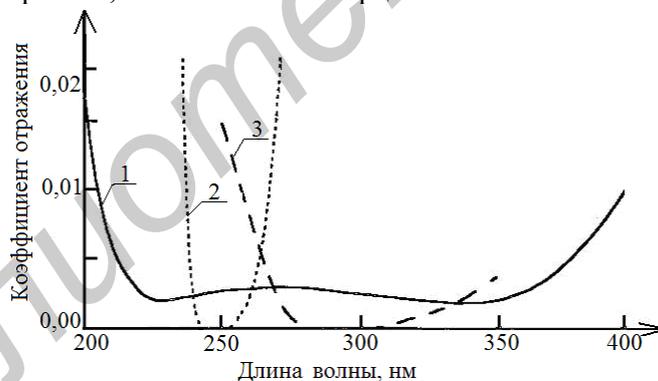


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от длины волны:

- 1 — с покрытием оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ );
- 2 — с покрытием фторидом магния ( $\text{MgF}_2$ );
- 3 — с покрытием диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ )

Как видно из рис. 3, изучаемые экраны на основе оксида алюминия сохраняют свои фильтрующие свойства в широком диапазоне УФ-спектра от 220 до 360 нм, покрытие с фторидом магния является самым узкополосным (245...252 нм), а экраны с диоксидом титана отлично обеспечивают наибольший эффект от интерференционного гашения отраженного излучения для поверхностей в диапазоне 275...310 нм.

При реализации на практике многослойных интерференционных покрытий их спектры пропускания (отражения), в силу множества причин, всегда отличаются от расчетных. Поэтому вопросы синтеза дополнительных структур, которые позволяют скорректировать ошибки, возникающие при изготовлении оптических покрытий, путем добавления одного или нескольких слоев поверх готового покрытия, представляют несомненный практический интерес для конструкторов, занимающихся проектированием интерференционных фильтров.

А исследование влияния этих ошибок на оптические характеристики покрытий позволяет судить о сравнительной устойчивости нескольких структур, реализующих сходные спектральные характеристики. Однако эти вопросы слабо отражены в литературе.

Важной особенностью сохранения положительных свойств интерференционных экранов в УФ-диапазоне является влияние спектральных характеристик естественных поверхностей. Таким образом, для учета выше отмеченного на рис. 4 представлены графики зависимостей спектральных характеристик от длины волны (кривая 1 получена в результате измерений радиометром УФ-В (280...320 нм), а кривая 2 – УФ-А (320...400 нм)) [9].

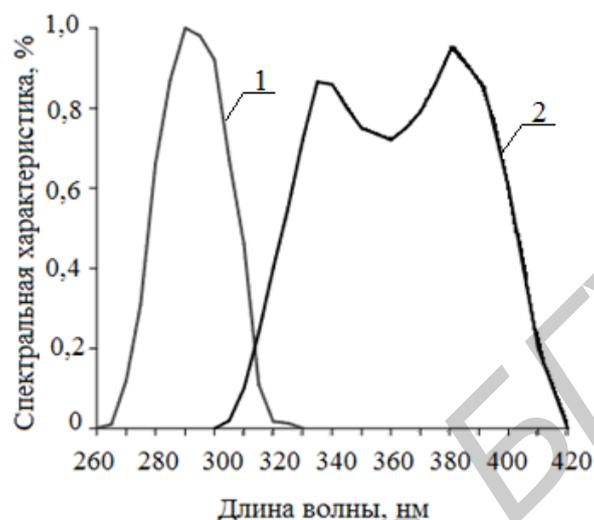


Рис. 4. Зависимости спектральных характеристик естественных поверхностей от длины волны

Необходимо применять интегральный подход для оценки в реальных условиях использования исследуемых покрытий для того, чтобы положительные свойства не были утрачены. Существуют различные способы, с помощью которых можно синтезировать любой произвольный спектр в УФ-диапазоне, с динамической имитацией рассеяния от естественной поверхности по распределению интенсивности, вплоть до имитации рассеивания света от листвы, колышущейся под ветром.

### Заключение

В результате математического моделирования в программе EMTL было установлено, что толщина интерференционного покрытия и функция, описывающая спектральную отражательную способность для УФ-области, находятся в прямой зависимости. Таким образом, можно на этапе расчетов определить необходимую толщину покрытия для заданного оптимального коэффициента отражения. В данной работе изучено несколько различных структур экранирующих покрытий: однослойные и многослойные. Результаты математического моделирования показали, что лучшими свойствами характеризуются многослойные неоднородные со сложной конфигурацией покрытия.

Для практической реализации экранирующих покрытий с эффективным интерференционным гашением отраженного излучения УФ-спектра, как правило, выбирают материалы с учетом оптимальной отражательной функции. Коэффициент отражения покрытий с нанесенным оксидом алюминия практически во всей УФ-области стремится к минимальному значению. Изучаемые экраны с фторидом магния или диоксидом титана характеризуются более узкой полосой с фильтрующим свойством в УФ-диапазоне длин волн. Выбор того или иного материала для изготовления подобных покрытий зависит от назначения системы.

В данной работе не учитывался поправочный коэффициент влияния, которое оказывают на экранирующие свойства покрытий спектральные характеристики естественных поверхностей: почвы, листвы и т.д. Этот вопрос требует детального изучения и является дальнейшим направлением исследований авторов.

# THE SIMULATION OF THE SHIELDING COATINGS WITH THE ABILITY OF THE REFLECTED RADIATION INTERFERENCE QUENCHING IN ULTRAVIOLET WAVELENGTH RANGE

T.M. PECHEN, A.M. PRUDNIK

## Abstract

The goal of simulation consisted in studying of ways of minimization of the function describing spectral reflectivity of the shielding coatings. The results of the simulation of the coatings having interference suppression property of the reflected rays in a wavelength range from 250 to 600 nm. The simulation realized in the program EMTL, allowed to determine: the thickness of shielding coating in the ultraviolet (UV) region is directly dependent on the function describing the spectral reflectance of the film. The comparative analysis of the shielding coatings based on aluminum oxide, magnesium fluoride and titanium dioxide is represented.

*Keywords:* shielding coating, reflection coefficient, interference quenching, ultraviolet radiation.

## Список литературы

1. Сулейманов С.Х., Дыскин В.Г., Джанклыч М.У. и др. // Письма в «Журнал технической физики». 2013. Т. 39, № 6. С. 74–78.
2. Волков В.Г // Специальная техника. 2004. № 2. С. 2–9.
3. Головков В.А., Емельянов В.Н., Солк С.В. и др. // Матер. МНТК «Четвертые Уткинские чтения». Санкт-Петербург, Россия. 2009. Т. 1. С. 93–96.
4. Бутиков Е.И. Оптика. Санкт-Петербург, 2003.
5. Willey R.R. // 34<sup>th</sup> Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters. Philadelphia, March 17–22, 1991. P. 205–209.
6. Taflove A., Hagness S.H. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method. Norwood, 2005.
7. Документация EMTL. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fdtd.kintechlab.com/ru/documentation>. – Дата доступа: 27.08.2015.
8. Farjadpour A., Roundy D., Rodriguez A. et. al. // Optics Letters. 2006. Vol. 31. P. 2972–2980.
9. Chadysiene R., Girgzdys A. // J. of Environmental Engineering and Landscape Management. 2008. № 16 (2). P. 83–88.