

УДК 621.3

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ В КАЧЕСТВЕ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Х.С. МАРТИРОСЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 24 декабря 2003 г.)

Исследована возможность применения диэлектрических зеркал в кремниевых солнечных элементах в качестве антиотражающих покрытий, проведены расчеты спектров отражения этих структур. Результаты расчетов для случая диэлектрического зеркала показывают, что по сравнению со стандартными антиотражающими покрытиями удастся не только сохранить малое отражение в видимой и ИК-областях спектра, но и расширить спектр в коротковолновую область (до 400 нм), что делает применение этой конструкции перспективным.

1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется альтернативным источникам энергии и повышению КПД использования этих источников. Особенно широкое применение сегодня нашли кремниевые солнечные элементы. Существуют разные методы повышения КПД солнечных элементов. Одной из возможностей является уменьшение отражения солнечного излучения от солнечного элемента, которое можно реализовать путем использования различных антиотражающих покрытий.

Известно (см. рис.1 [1,2,3]), что структуры с известными антиотражающими покрытиями обладают малым коэффициентом отражения только в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра, чему соответствует 47% солнечной постоянной. Следовательно, возникает необходимость поиска таких конструкций, которые характеризуются малым отражением и в коротковолновой области, что приведет к увеличению доли поглощаемой солнечным элементом энергии.

В настоящей работе исследована возможность применения диэлектрических зеркал в качестве антиотражающего покрытия, рассчитан спектр отражения этой структуры и сравнен со спектром отражения известных антиотражающих покрытий, которые в настоящее время применяются в кремниевых солнечных элементах.

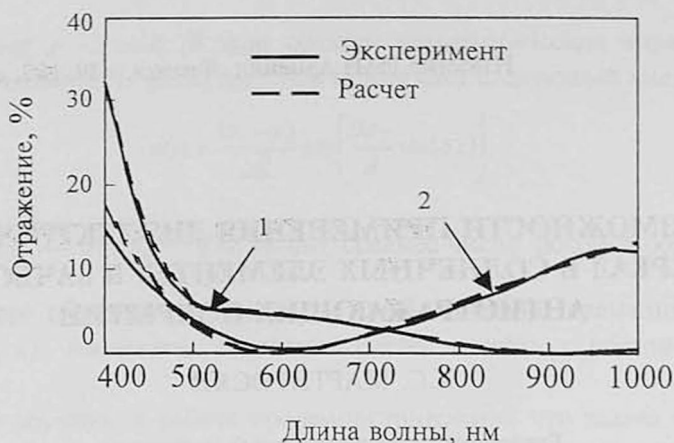


Рис.1. Экспериментальные и расчетные кривые спектров отражения антиотражающих покрытий MgF_2/ZnS (1) и $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (2).

2. Постановка задачи и метод расчета

Нами рассмотрена возможность применения в кремниевых солнечных элементах в качестве антиотражающего покрытия так называемых диэлектрических зеркал. Диэлектрические зеркала – это конструкции из нескольких пленок, имеющих одинаковую оптическую толщину ($n \cdot d$, где n – коэффициент преломления пленки и d – толщина пленки), но различные коэффициенты преломления, при этом между двумя пленками с большим коэффициентом преломления размещают пленку с малым коэффициентом преломления. Нами проведены теоретические расчеты с помощью метода приближения оптических матриц, который вкратце представлен ниже.

В работах В.М.Арутюняна и др. [1,2] использован этот метод [4], с помощью которого были рассчитаны спектры отражения антиотражающих покрытий MgF_2/ZnS и $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, пористого кремния и др. Метод позволяет рассчитать на ЭВМ такие спектры за очень короткое машинное время с использованием стандартного пакета программы “Mathematica 4.1”. Результаты вычисления сравнены с данными, полученными на эксперименте [3,5].

Изложим ниже суть метода [1,2,4]. Рассматриваем взаимодействие плоской волны с тонкими пленками и записываем уравнения Максвелла внутри каждой пленки. Рассматривая случай нормального падения линейно-поляризованной волны, переписав граничные условия в матричной форме и после соответствующих математических преобразований рассматривая каждую пленку по отдельности, получим выражение электрического поля для системы, состоящей из одной пленки. Следуя этим рассуждениям, можно получить уравнение электрического поля для N пленок:

$$\begin{pmatrix} E_+ \\ E_- \end{pmatrix}_{final} = (\hat{S}_a) \hat{B}_N \hat{B}_{N-1} \hat{B}_{N-2} \cdots \hat{B}_1 \hat{S}_a \begin{pmatrix} E_+ \\ E_- \end{pmatrix}_{initial} \quad (1)$$

с матрицами

$$\hat{B}_j = \hat{S}_j \hat{\Phi}_j (\hat{S}) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_j & i \frac{\sin \varphi_j}{n_j} \\ i n_j \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{pmatrix}, \quad \varphi_j = n_j \frac{\omega}{c} d_j, \quad (2)$$

где j – номер пленки, n_j – коэффициент преломления, $\hat{S}_j$ – поверхностная матрица и $\hat{\Phi}_j$ – диагональная фазовая матрица j -ой пленки, соответственно.

Следовательно, коэффициенты отражения R и пропускания T определяются следующими выражениями:

$$R = \left| \frac{(E_-)_i}{(E_+)_i} \right|^2 = |r|^2, \quad T = \left| \frac{(E_+)_f}{(E_+)_i} \right|^2 = |t|^2. \quad (3)$$

3. Обсуждение результатов

Расчеты были проведены для нескольких значений, из которых ниже выбраны два. В первом случае параметры пленок были следующими: коэффициенты преломления $n_1=1.38$; $n_2=2.3$; $n_3=1.38$; $n_4=2.3$; толщины слоев $d_1=10$ нм; $d_2=40$ нм; $d_3=98$ нм; $d_4=10$ нм. Во втором случае $n_1=1.41$; $n_2=2.24$; $n_3=1.41$; $n_4=2.24$; $d_1=10$ нм; $d_2=44$ нм; $d_3=98$ нм; $d_4=10$ нм. Для этих значений расчетные кривые спектра отражения показаны на рис.2 и 3. Как показывают результаты расчетов, по сравнению с покрытиями MgF_2/ZnS и $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, удастся не только сохранить малое отражение в видимой и ИК-областях, но и уменьшить его в коротковолновой области (до 400 нм). Вместо быстрого монотонного роста



Рис.2. Спектр отражения диэлектрического зеркала при следующих параметрах слоев: $n_1=1.38$; $n_2=2.3$; $n_3=1.38$; $n_4=2.3$; $d_1=10$ нм; $d_2=40$ нм; $d_3=98$ нм; $d_4=10$ нм. Штриховая линия показывает прямой ход кривой при отсутствии минимума.

коэффициента отражения, при длинах волн ниже 500 нм имеет место минимум отражения в ультрафиолетовой области спектра (при $\lambda=400$ нм), что по существу расширяет спектр поглощения солнечного излучения кремниевых солнечных элементов с антиотражающими покрытиями типа диэлектрических зеркал.

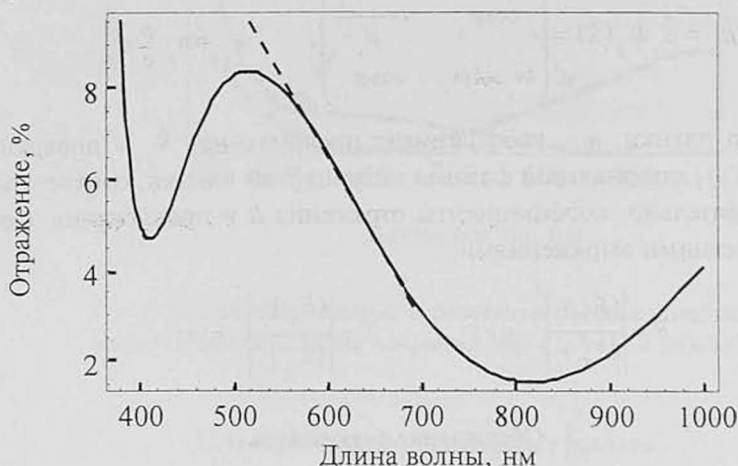


Рис.3. Спектр отражения диэлектрического зеркала при следующих параметрах слоев: $n_1=1.41$; $n_2=2.24$; $n_3=1.41$; $n_4=2.24$; $d_1=10$ нм; $d_2=44$ нм; $d_3=98$ нм; $d_4=10$ нм. Штриховая линия показывает прямой ход кривой при отсутствии минимума.

Заметим, что области поглощения 400–1000 нм соответствует уже 60.7% солнечной постоянной. Отметим также, что в интервале длин волн 390–1000 нм отражение R от поверхности монокристаллического кремния без антиотражающего покрытия составляет 35% и выше. Легко убедиться из рис.2 и 3, что величина R в нашем случае значительно меньше.

4. Заключение

Таким образом, на ЭВМ с помощью программы “Mathematica 4.1” методом приближения оптических матриц нами рассчитаны спектры отражения для многослойных антиотражающих покрытий. Результаты, полученные для случая диэлектрического зеркала, показывают, что по сравнению со стандартными антиотражающими покрытиями, которые в настоящее время применяются в кремниевых солнечных элементах, удастся не только сохранить малое отражение в видимой и ИК-областях спектра, но и расширить его в коротковолновую область (до 400 нм), что делает применение этой конструкции перспективным.

Автор выражает благодарность акад. В.М.Арутюняну за постановку задачи и обсуждение результатов. Работа выполнена в рамках гранта А-322 МНТЦ.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.M.Aroutiounian, K.R.Maroutyan, A.L.Zatikyan, K.J.Touryan. Thin Solid Films, 403-404, 517 (2002).
2. V.M.Aroutiounian, K.R.Maroutyan, A.L.Zatikyan, C.Levy-Clement, K.J.Touryan. Proc. SPIE on Solar and Switching Materials, 4458, 61 (2001).
3. D.Bouhafs, A.Moussi, A.Chikouche, J.M.Ruiz. Solar Energy Materials and Solar Cells, 52, 79 (1998).
4. D.A.Romanov, N.Victoria, A.V.Kalameitsev. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 426, 587 (1996).
5. Z.N.Adamyan, A.P.Hakopyan, V.M.Aroutiounian, R.S.Barseghian, K.J.Touryan. Solar Energy Materials and Solar Cells, 64, 347 (2000).

ԱՐԵՎԱԿԱՆԱՅԻՆ ՄԱՐՏԿՈՑՆԵՐՈՒՄ ՈՐՊԵՍ ՀԱԿԱՄՆԴՐԱԴԱՐՁԻՉ ՇԵՐՏԵՐ
ԴԻԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՅԵԼԻՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Խ.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

Դիտարկված է արեգակնային մարտկոցներում որպես հակամոնոքրադրծիչ շերտեր դի-
էլեկտրական հայելիների կիրառության հնարավորությունը: Այդ կառուցվածքի համար կատար-
ված են անդրադարձման սպեկտրի հաշվարկներ, որոնք ցույց են տալիս, որ ի համեմատ արեգակ-
նային մարտկոցներում ներկայումս կիրառվող հակամոնոքրադրծիչ շերտերի, հնարավոր է ոչ
միայն պահպանել փոքր անդրադարձմամբ տիրույթը սպեկտրի տեսանելի և ինֆրակարմիր տի-
րույթներում, այլ նաև լայնացնել այն դեպի կարճալիքային տիրույթ:

POSSIBILITY OF APPLICATION OF DIELECTRIC MIRRORS IN SOLAR CELLS AS ANTIREFLECTION COATINGS

KH.S. MARTIROSYAN

We considered the possibility of application of dielectric mirrors in silicon solar cells as
antireflection coatings and carried out calculations of the reflection spectrum of these structures.
The results of calculations show that in comparison with standard coatings, it is possible not only
to preserve the small reflection in the visible and infrared regions of the spectrum, but also enlarge
it to the short-wave region (up to 400 nm).