

УДК 621.373 (043.3)

Г.А. Моисеева

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКИ, В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Проведен анализ многослойной структуры, содержащей один или несколько полупроводниковых слоёв. Получены основные математические соотношения, позволяющие предъявить требования к основным параметрам многослойных структур, обеспечивающим управление их отражательными характеристиками.

### многослойная структура, полупроводниковый слой

В настоящее время серьёзное внимание уделяется разработке материалов с малыми или же изменяющимися отражательными характеристиками для использования их в различных областях военной техники. Так, в работах [1, 2] рассмотрены особенности отражающих свойств комбинированных дифракционно – отражающих покрытий в оптическом диапазоне длин волн. В миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн рассмотрены особенности отражающих свойств подстилающей поверхности и наблюдаемых объектов [3 – 5], а также влияние сред с высокой диэлектрической проницаемостью на формирование характеристик излучающих антенн и отражающих свойств покрытий [6].

Целью настоящей работы является выявление возможностей по управлению комплексным коэффициентом отражения электромагнитного излучения в многослойных структурах, содержащих один или несколько полупроводниковых слоёв, в миллиметровом диапазоне длин волн.

В общем случае радиооптические свойства полупроводника можно охарактеризовать [7] комплексным показателем преломления, который записывается как

$$\hat{n} = n - j\alpha, \quad (1)$$

где  $n$  – действительная часть показателя преломления;  $\alpha$  – мнимая часть показателя преломления или коэффициент экстинкции, характеризующий затухание электромагнитного излучения в полупроводнике.

Между коэффициентом экстинкции  $\alpha$  и показателем поглощения полупроводника по интенсивности  $\gamma$  существует связь

$$\gamma = \frac{4\pi}{\lambda} \alpha. \quad (2)$$

Для миллиметрового диапазона длин волн зависимости действительной части показателя преломления  $n$  (в дальнейшем – просто показателя преломления) и коэффициента экстинкции  $\alpha$  от проводимости и длины волны электромагнитного излучения могут быть представлены в следующем виде:

$$n = \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{60G\lambda}{\varepsilon} \right)^2} + 1 \right]}; \quad (3)$$

$$\alpha = \sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{60G\lambda}{\varepsilon} \right)^2} - 1 \right]}; \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – статическая относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $G$  – проводимость полупроводника;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения.

Для оценки отражательных характеристик полупроводника в миллиметровом диапазоне длин волн достаточно определить коэффициент отражения излучения миллиметрового диапазона от границы воздух – полупроводник (рис. 1):

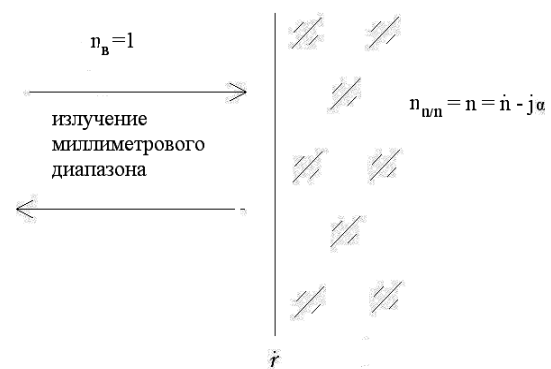


Рис. 1. Схема взаимодействия полупроводника с электромагнитным излучением

Коэффициент отражения является комплексной величиной и определяется выражением

$$\hat{r} = \frac{\hat{n}_в - \hat{n}_пн}{\hat{n}_в + \hat{n}_пн} = \frac{1 - n + j\alpha}{1 + n - j\alpha} = r \cdot e^{j\varphi},$$

где  $\hat{n}_в$  – показатель преломления воздуха, практически равный 1;  $\hat{n}_пн$  – показатель преломления полупроводника;  $r$  – модуль коэффициента отражения;  $\varphi$  – фаза коэффициента отражения;

$$r = \sqrt{\frac{(1-n)^2 + \alpha^2}{(1+n)^2 + \alpha^2}} = r(G);$$

$$\varphi = \arctg \frac{2\alpha}{1 - (n^2 + \alpha^2)} = \varphi(G).$$

Используя эти исходные данные, проанализируем отражательные характеристики тонких полупроводниковых плёнок в зависимости от проводимости полупроводника.

Схема взаимодействия тонкого полупроводникового слоя с электромагнитным излучением показана на рис. 2.



Рис. 2. Схема взаимодействия тонкого полупроводникового слоя с электромагнитным излучением

Коэффициент отражения такого слоя толщиной  $l$  можно записать следующим образом:

$$\dot{r}_{13} = \frac{\dot{r}_{12} + \dot{r}_{23} e^{-j\beta} e^{-\gamma}}{1 + \dot{r}_{12} \dot{r}_{23} e^{-j\beta} e^{-\gamma}}, \quad (5)$$

где  $\dot{r}_{12} = \frac{\dot{n}_1 - \dot{n}_2}{\dot{n}_1 + \dot{n}_2}$  – коэффициент отражения границы среды перед полупроводником и самим полупроводником;  $\dot{n}_1$  – показатель преломления среды перед полупроводниковым слоем;  $\dot{n}_2 = n_2 - j\alpha_2$  – комплексный показатель преломления полупроводника;  $\dot{r}_{23} = \frac{\dot{n}_2 - \dot{n}_3}{\dot{n}_2 + \dot{n}_3}$  – коэффициент отражения границы между полупроводником и средой после полупроводника;  $\dot{n}_3$  – показатель преломления среды после полупроводника;  $\beta$  – фазовый набег для электромагнитной волны, отражающейся от задней границы, обусловленный толщиной полупроводника  $l$ :

$$\beta = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 l,$$

$\gamma$  – показатель затухания для волны, отражающейся от задней границы полупроводника, обусловленный его толщиной  $l$  и коэффициентом кстинкции

$$\gamma = \frac{4\pi}{\lambda} \alpha_2 l.$$

Модули и фазы коэффициентов отражения от границ полупроводника определяются выражениями:

$$\left| \dot{r}_{12} \right| = \dot{r}_{12} = \sqrt{\frac{(n_1 - n_2)^2 + \alpha_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + \alpha_2^2}}; \quad (6)$$

$$\varphi_{12} = \arctg \frac{2\alpha_2 n_1}{n_1^2 - (n_2^2 + \alpha_2^2)}; \quad (7)$$

$$\left| \dot{r}_{23} \right| = \dot{r}_{23} = \sqrt{\frac{(n_2 - n_3)^2 + \alpha_2^2}{(n_2 + n_3)^2 + \alpha_2^2}}; \quad (8)$$

$$\varphi_{23} = \arctg \frac{-2\alpha_2 n_3}{n_2^2 + \alpha_2^2 - n_3^2}. \quad (9)$$

Модуль коэффициента отражения всего полупроводникового слоя в соответствии с (5) определяется следующим образом:

$$\left| \dot{r}_{13} \right| = \dot{r}_{13} = \sqrt{\frac{\dot{r}_{12}^2 + \dot{r}_{23}^2 e^{-2\gamma} + 2\dot{r}_{12}\dot{r}_{23} e^{-\gamma} \cos(\varphi_{12} - \varphi_{23} + \beta)}{1 + \dot{r}_{12}^2 \dot{r}_{23}^2 e^{-2\gamma} + 2\dot{r}_{12}\dot{r}_{23} e^{-\gamma} \cos(\varphi_{12} + \varphi_{23} - \beta)}}. \quad (10)$$

В целом, анализируя зависимости отражательных характеристик полупроводника и полупроводникового слоя от проводимости, можно сделать следующие выводы:

1. В отражающих покрытиях миллиметрового диапазона длин волн необходимо использовать полупроводники, характеристики которых связаны с длиной волны отражаемого электромагнитного излучения соотношением  $\frac{60G\lambda}{\varepsilon} \approx 1$ .

Например, если в качестве полупроводника используется CdS с  $\varepsilon = 11,6$ , то для длины волны излучения  $\lambda = 8$  мм начальная проводимость полупроводника должна быть порядка 20...25 (Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>).

2. Относительное изменение модуля коэффициента отражения полупроводника или полупроводникового слоя  $\Delta r/r$  при изменении его проводимости не превысит 0,3.

3. Для повышения эффективности отражающих покрытий, содержащих полупроводниковый слой, необходимо проанализировать резонансные системы, содержащие в своём составе в качестве одного из элементов один или несколько полупроводниковых слоёв.

Эффективность отражающих покрытий можно значительно повысить, если создавать их на основе резонансные системы, элементом которых является управляемый, например, с помощью приложенного напряжения, полупроводниковый слой.

В качестве исходной модели многослойного управляемого покрытия взята четырёхслойная модель (рис. 3).

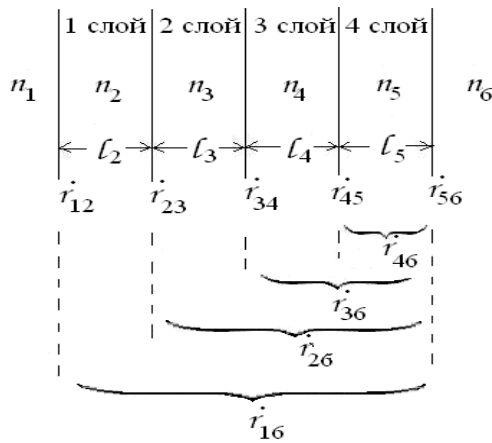


Рис. 3. Исходная четырёхслойная модель многослойного управляемого покрытия

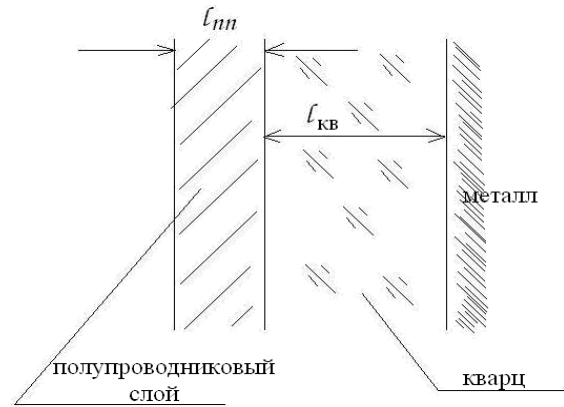


Рис. 4. Схема исследованного интерференционного покрытия

Управляемым полупроводниковым слоем выбран третий слой с показателем преломления  $n_4$  и коэффициентом экстинкции  $\alpha_4$ .

Остальные слои могут быть диэлектриками различных типов с разными показателями преломления  $n_1, n_2, n_3, n_5$ . Последняя среда с показателем преломления  $n_6$  может быть либо диэлектриком, либо металлом. В последнем случае показатель преломления брались равным коэффициенту экстинкции:

$$n_6 = \alpha_6 = 1000.$$

Эти значения являются типичными для металлов в миллиметровом диапазоне.

Для диэлектриков показатели экстинкции брались равными нулю:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_5 = 0$ , а в качестве первой среды брались воздух  $n_1 = 1$ .

Подобная модель даёт возможность исследовать достаточно широкий набор интерференционных покрытий с управляемым полупроводниковым слоем. Так, например, для исследования полупроводникового слоя на диэлектрической подложке достаточно принять

$$n_2 = n_3 = n_6 = n_1 = 1; \quad l_2 = l_3 = 0.$$

При помощи данной модели можно исследовать зависимость модуля и фазы коэффициента отражения от проводимости  $G$ , от толщины любого слоя  $l_2, l_3, l_4, l_5$  и от длины волны  $\lambda$ . При помощи разработанной модели исследовано интерференционное управляемое покрытие, имеющее следующую структуру: полупроводниковый слой – кварц – металл. Схематически покрытие показано на рис. 4.

Полупроводниковый слой имеет толщину  $l_{пп} = 0,2$  мм, кварцевая подложка  $l_{кв} = 1,0$  мм. Полупроводниковый слой выполнен на основе полупроводника CdS с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 11,6$ . Показатель преломления кварца взят равным  $n_{кв} = 1,95$ .

Подобная структура легко вписывается в выбранную математическую модель со структурой, показанной на рис. 3, при условии, что:

$$\begin{aligned} n_1 = n_2 = n_3 = 1; \quad n_5 = n_{кв}; \quad n_6 = 1000; \\ l_2 = l_3 = 0; \quad l_4 = 0,2 \text{ мм}; \quad l_5 = 1 \text{ мм}; \\ \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_5 = 0; \quad \alpha_6 = 1000. \end{aligned}$$

Показатель преломления полупроводникового слоя  $n_4$  и коэффициент экстинкции  $\alpha_4$  определялись по формулам (3) и (4).

На рис. 5, график 1, показана рассчитанная зависимость квадрата модуля коэффициента отражения  $R_0 = |\Gamma_{16}|^2$  покрытия с заданной структурой от проводимости  $G$  для длины волны  $\lambda = 8$  мм.

Из графика следует, что использование полупроводникового управляемого слоя в интерференционном покрытии значительно повышает эффективность отражения такой структуры в миллиметровом диапазоне длин волн. При изменении проводимости  $G$  слоя от 0 до 25 ( $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ) коэффициент отражения по интенсивности изменяется от 1 до 0,325, соответственно модуль коэффициента отражения по полю изменяется от 1 до 0,57, т.е.  $\Delta\Gamma = 0,43$ .

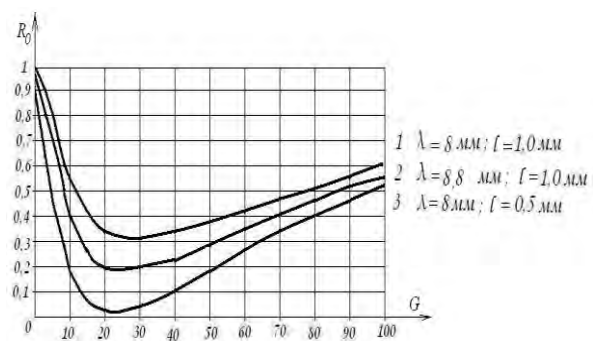


Рис. 5. Зависимость квадрата модуля коэффициента отражения покрытия с заданной структурой от проводимости полупроводника

Для определения оптимальной длины волны  $\lambda$ , при которой рассматриваемое интерференционное покрытие становится резонансным, исследована зависимость квадрата модуля коэффициента отражения от длины волны при различных проводимостях полупроводникового слоя:  $G = 3, 10, 30$  ( $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ) Харак-

теристики интерференционного покрытия оставались прежними, т.е.  $l_{np} = 0,2$  мм,  $l_{кв} = 2$  мм,  $\epsilon = 11,6$ ,  $n_{кв} = 1,95$ . Рассчитанные зависимости  $R_0 = |r_{16}|^2$  от длины волны  $\lambda$  при  $G = 3, 10, 30$  ( $\text{Ом}^{-1}\text{М}^{-1}$ ) представлены на рис. 6.

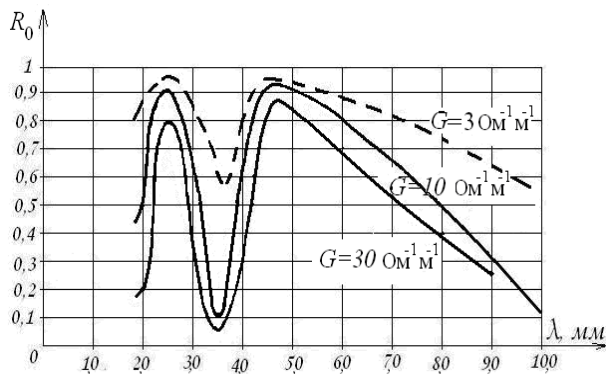


Рис. 6. Зависимость квадрата модуля коэффициента отражения от длины волны при различных проводимостях полупроводникового слоя

Из приведенных графиков следует, что исследуемая интерференционная система становится резонансной при  $\lambda = 3,6$  мм, а также при  $\lambda < 2$  мм и  $\lambda > 10$  мм. Для миллиметрового диапазона длин волн ( $\lambda = 8$  мм) исследуемая интерференционная система недостаточно эффективна, вернее, эффективность системы по управлению используется недостаточно.

Для подбора оптимальной резонансной толщины кварцевой подложки  $l_{кв}$  исследована зависимость квадрата модуля коэффициента отражения управляемого интерференционного покрытия заданной структуры от толщины  $l_{кв}$  при фиксированных проводимостях полупроводникового слоя  $G = 3, 10, 30$  ( $\text{Ом}^{-1}\text{М}^{-1}$ ).

Рассчитанные зависимости  $R_0 = |r_{16}|^2$  от  $l_5 = l_{кв}$  при  $l_{np} = l_4 = 0,2$  мм,  $n_{кв} = n_5 = 1,95$ ,  $\epsilon = 11,6$  показаны на рис. 7.

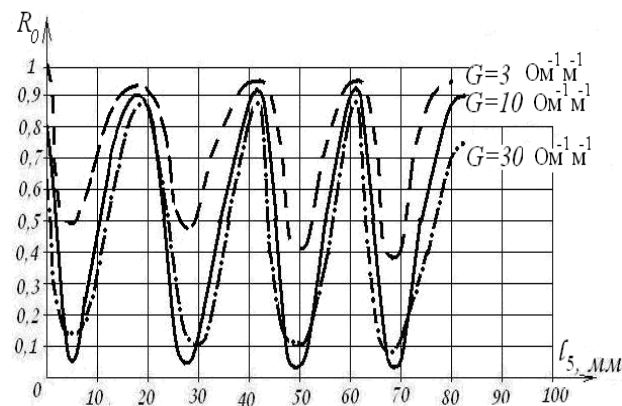


Рис. 7. Зависимость квадрата модуля коэффициента отражения управляемого интерференционного покрытия заданной структуры от толщины  $l_{кв}$  при фиксированных проводимостях полупроводникового слоя

Из полученных графиков следует, что интерференционная система для длины волны  $\lambda = 8$  мм становится резонансной при толщинах  $l_5 = l_{кв} = 0,5$  мм, 2,6 мм, 4,7 мм и т.д. При этих толщинах крутизна модуля коэффициента отражения в зависимости от проводимости становится максимальной.

### Выводы

Таким образом, проведенный анализ подтверждает сделанный ранее вывод о возможности повышения эффективности отражения электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн при помещении управляемого полупроводникового слоя в резонансную интерференционную систему. Причём, существенного изменения комплексного коэффициента отражения в миллиметровом диапазоне длин волн можно достичь несколькими путями, а именно: изменением проводимости полупроводникового слоя (например, при изменении приложенного напряжения либо при воздействии оптического или радиационного излучения); изменением толщины воздушного зазора или же других слоёв структуры.

### Список литературы

1. Экспериментальные исследования особенностей отражения лазерного излучения от комбинированных дифракционно-отражающих покрытий / Г.Н. Доля, А.Н. Катунин, Г.А. Моисеева и др. // Збірник наукових праць ХВУ – X: ХВУ, 2003. – Вип. 3 (46). – С. 79-81.
2. Доля Г.Н., Моисеева Г.А. Влияние условий локации на лазерное гетеродинное обнаружение объектов с дифракционно-отражающими покрытиями // Збірник наукових праць ХВУ. – X: ХВУ, 2002. – Вип. 3. – С. 121-123.
3. Андреев Г.А. Отражение и рассеяние миллиметровых волн земными покровами // Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – № 9. – С. 3-34.
4. Андреев Г.А. Статистические характеристики сигналов, отражённых от радиолокационных целей в мм диапазоне волн // Научный Вестник МГТУГА. – 1999. – № 21. – С. 155-157.
5. Характеристики рассеяния радиолокационных целей / Е.Л. Казаков, В.Б. Бзот, А.Е. Казаков, В.Л. Павлов, Ю.М. Шишкин; Под ред. Е.Л. Казакова. – X., 2006. – 185 с.
6. Карпенко В.И., Голуб Ю.В., Франков А.В. Применение среды с высокой диэлектрической проницаемостью для увеличения сектора сканирования диаграммы направленности антенны в миллиметровом диапазоне длин волн // Тез. докл. I Межд. конф. «Теория и техника антенн». – X: ХГТУРЭ, 1995. – С. 36.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики: пер. с англ. – М.: Наука, 1973. – 855 с.

Поступила в редколлегию 10.05.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.