

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; α – мнимая часть показателя преломления или коэффициент экстинкции, характеризующий затухание электромагнитного излучения в полупроводнике.

Между коэффициентом экстинкции α и показателем поглощения полупроводника по интенсивности γ 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 α 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 ε – статическая относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; G – проводимость полупроводника; λ – 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):

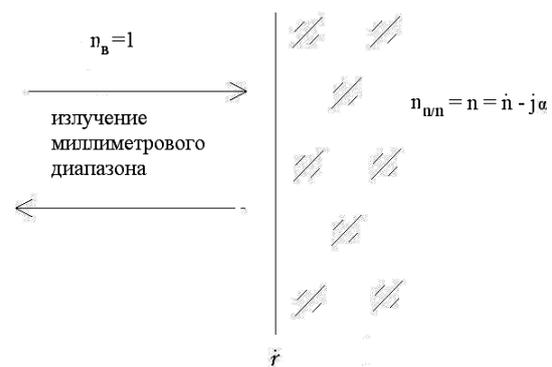


Рис. 1. Схема взаимодействия полупроводника с электромагнитным излучением

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; φ – 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 грани-

цы 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 полупровод-

ника; $\dot{r}_{23} = \frac{\dot{n}_2 - \dot{n}_3}{\dot{n}_2 + \dot{n}_3}$ – коэффициент отражения гра-

ницы между полупроводником и средой после полупроводника; \dot{n}_3 – показатель преломления среды после полупроводника; β – фазовый набег для электромагнитной волны, отражающейся от задней границы, обусловленный толщиной полупроводника l :

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

γ – 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⁻¹м⁻¹).

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).

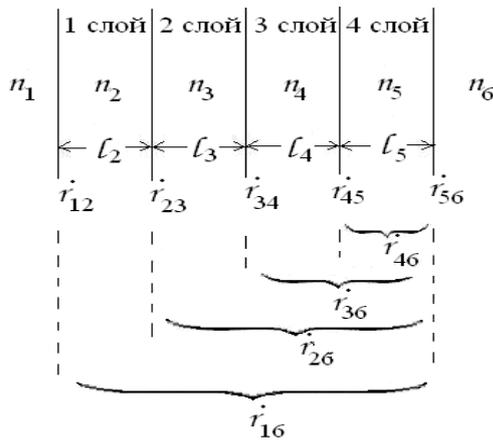


Рис. 3. Исходная четырёхслойная модель многослойного управляемого покрытия

Управляемым полупроводниковым слоем выбран третий слой с показателем преломления n_4 и коэффициентом экстинкции α_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 λ . 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:

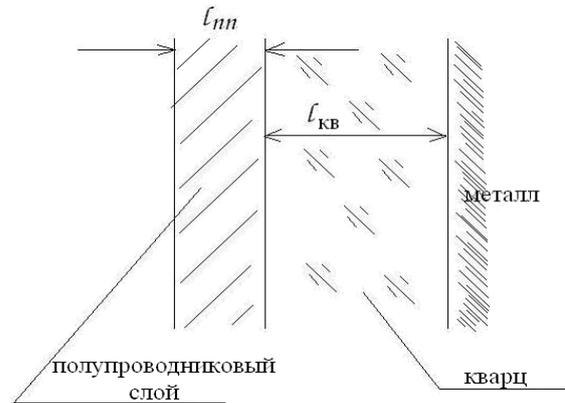


Рис. 4. Схема исследованного интерференционного покрытия

$$n_1 = n_2 = n_3 = 1; \quad n_5 = n_{кв}; \quad n_6 = 1000;$$

$$l_2 = l_3 = 0; \quad l_4 = 0,2 \text{ мм}; \quad l_5 = 1 \text{ мм};$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_5 = 0; \quad \alpha_6 = 1000.$$

Показатель преломления полупроводникового слоя n_4 и коэффициент экстинкции α_4 определялись по формулам (3) и (4).

На рис. 5, график 1, показана рассчитанная зависимость квадрата модуля коэффициента отражения $R_0 = |r_{16}|^2$ 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. $\Delta r = 0,43$.

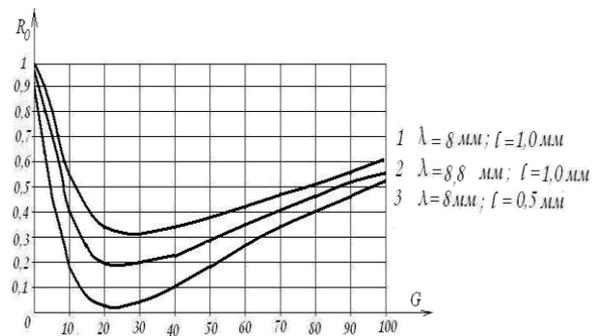


Рис. 5. Зависимость квадрата модуля коэффициента отражения покрытия с заданной структурой от проводимости полупроводника

Для определения оптимальной длины волны λ , 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-

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

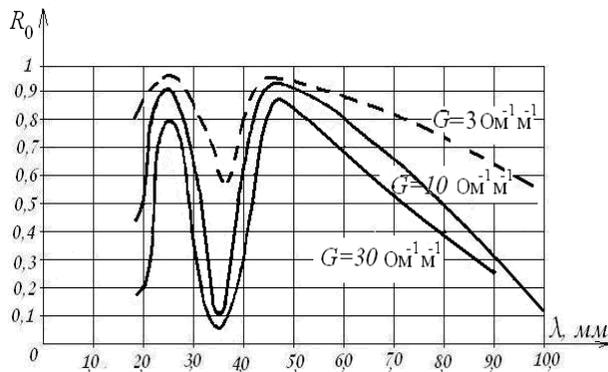


Рис. 6. Зависимость квадрата модуля коэффициента отражения от длины волны при различных проводимостях полупроводникового слоя

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

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

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

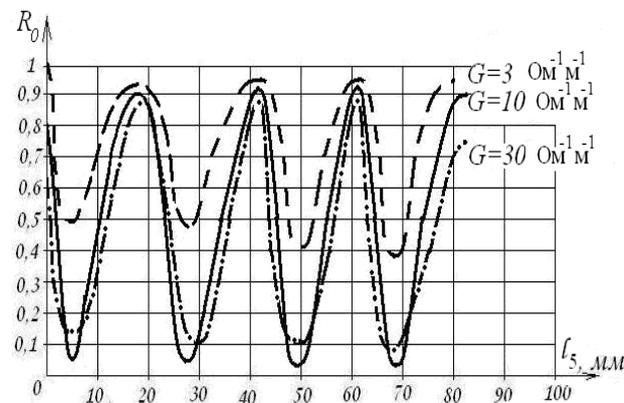


Рис. 7. Зависимость квадрата модуля коэффициента отражения управляемого интерференционного покрытия заданной структуры от толщины $l_{\text{кв}}$ при фиксированных проводимостях полупроводникового слоя

Из полученных графиков следует, что интерференционная система для длины волны $\lambda = 8 \text{ мм}$ становится резонансной при толщинах $l_5 = l_{\text{кв}} = 0,5 \text{ мм}, 2,6 \text{ мм}, 4,7 \text{ мм}$ 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.