

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики полупроводников и оптоэлектроники

**ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ, ОСОБЕННОСТИ
ТЕХНОЛОГИИ**

(лабораторная работа по курсу «Физико-химические основы технологии»)

Нижний Новгород, 2007

*Учебно-методические материалы подготовлены в рамках
инновационной образовательной программы ННГУ:
Образовательно-научный центр
«Новые многофункциональные материалы и нанотехнологии»
Национального проекта «Образование»*

УДК 621.315.592:61

Просветляющие покрытия в оптоэлектронике. Проектирование, материалы, особенности технологии: Лабораторная работа по курсу «Физико-химические основы технологии» / Сост. А.В. Ершов, А.И. Машин. – Н. Новгород: ННГУ, 2007. – 28 с.

Настоящее описание предназначено для студентов старших курсов физического факультета ННГУ, обучающихся по специальности 210601 – «Нанотехнология в электронике».

Рис. 7. Табл. 1.

Составители: канд. физ.-мат. наук, доцент А.В. Ершов
докт. физ.-мат. наук, профессор А.И. Машин

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. НИФТИ ННГУ А.Н. Михайлов

Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Просветление поверхностей элементов оптических систем используется по двум причинам. Во-первых, – для уменьшения потерь интенсивности падающего излучения на отражение, т. е. увеличения пропускной способности оптического элемента. Это особенно актуально сейчас при разработке различных фотоприемных устройств, в частности солнечных элементов. Во-вторых, если на плоскость изображения попадает свет, претерпевший многократные отражения от поверхностей элементов (так называемые “блики”), то это приводит к уменьшению контраста и четкости изображения. Создание антибликовых покрытий за счет их просветления особенно актуально при разработке устройств отображения информации: электровакуумных мониторов, кинескопов, а также входных оптических систем фото- и видеоаппаратуры [1].

На рис. 1 приведены зависимости вычисленного по формуле Френеля [2] коэффициента отражения R на границе раздела сред воздух–вещество и коэффициента пропускания T плоскопараллельной пластинки из того же вещества от показателя преломления вещества n . Этот рисунок красноречиво показывает, насколько велики могут быть потери на отражение оптических систем из различных материалов, которые в реальных случаях могут быть гораздо выше для более чем одной пластины из разных веществ.

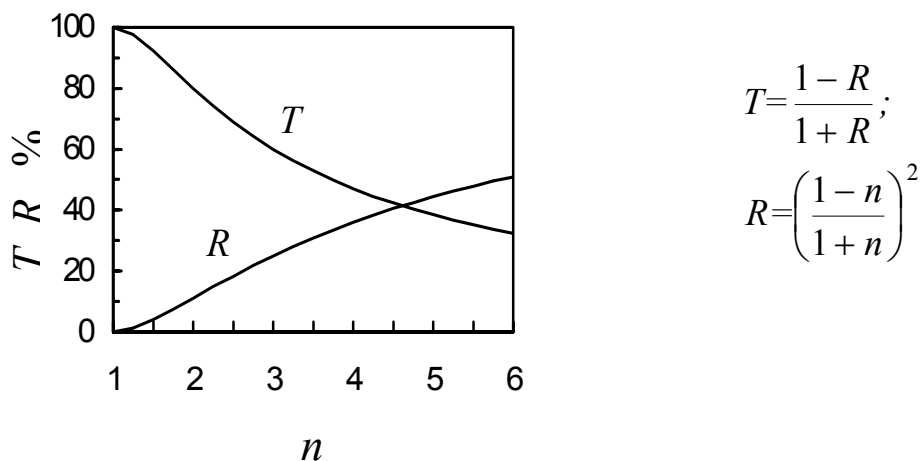


Рис. 1. Зависимости пропускания T плоскопараллельной пластины, вычисленного сложением интенсивностей, и отражения R одной поверхности от показателя преломления пластины n

I. Элементы теории проектирования просветляющих покрытий

Будем считать, что рассматриваемые просветляющие покрытия и подложки не поглощают свет в соответствующей области спектра. Для расчета примем также систему обозначений для многослойной оптической системы с показателями преломления и коэффициентами отражения Френеля, как изображено на рис. 2.

Показатели преломления окружающей среды и подложки обозначены через n_0 и n_s , соответственно, а слои нумеруются по порядку от наружного слоя к подложке. Величины r и n - вещественные числа, т. к. поглощением мы пренебрегли. Не учитываем пока и дисперсию оптических постоянных.

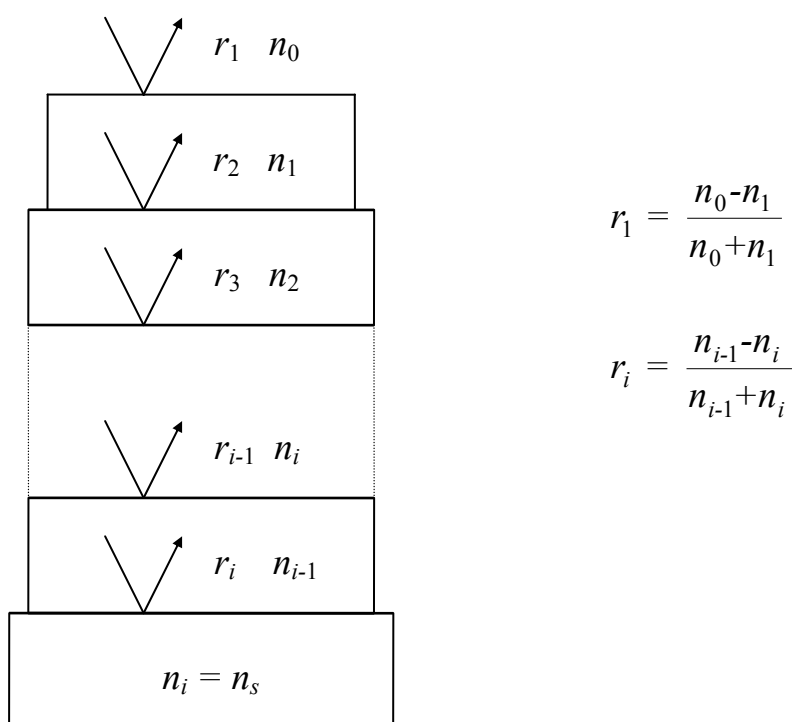


Рис. 2. Обозначения, принятые для коэффициентов Френеля r и показателей преломления

1. Однослойные покрытия

Однослойные просветляющие покрытия являются простейшими как для расчета, так и при их изготовлении, и вместе с тем наиболее часто используются на практике [3]. Если свет падает нормально на прозрачную среду, покрытую одним прозрачным слоем, то амплитуда отраженного света характеризуется коэффициентом отражения:

$$r = \frac{r_1 + r_2 \exp(-2i\varphi_1)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2i\varphi_1)}, \quad (1)$$

где $i = \sqrt{-1}$ и $\varphi_1 = 2\pi n_1 d_1 / \lambda$, d_1 – геометрическая толщина слоя.

Для просветляющего покрытия $r \rightarrow 0$. Знаменатель в (1) не может быть равен бесконечности. Приравнивая нулю действительную и мнимую части числителя, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} r_1 + r_2 \cdot \cos 2\varphi_1 = 0 & (2a) \\ r_2 \cdot \sin 2\varphi_1 = 0 & (2б) \end{cases}$$

Эта система имеет два решения. Если $2\varphi_1$ составляет целое число π , то $n_0 = n_s$. Это тривиальный случай. Более важен случай, когда $2\varphi_1$ составляет нечетное число π и $n_1^2 = n_0 n_s$. Таким образом, если $n_s \neq n_0$, необходимым и достаточным для однослойного покрытия будет:

$$n_1^2 = n_0 n_s \quad (3a)$$

$$\varphi_1 = (2m-1) \frac{\pi}{2}; \quad m = 1, 2, 3... \quad (3б)$$

Обычно на практике выбирают $m = 1$, и тогда оптическая толщина слоя $n_1 d_1 = \lambda/4$.

Зависимость интенсивности отраженного света от φ_1 характеризуется коэффициентом $R = |r|^2$

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\varphi_1}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\varphi_1} \quad (4)$$

Если $n_1 d_1 = \lambda/4$ (т.е. $\varphi_1 = \pi/2$), выражение (4) имеет вид:

$$R_{\lambda/4} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_s}{n_1^2 + n_0 n_s} \right)^2 \quad (5)$$

$R_{\lambda/4} = 0$ при $n_1^2 = n_0 n_s$. Если (3a) не выполняется, то выражение (5) дает значение функции (4) в ее экстремуме. Значение R в экстремуме зависит от того, насколько нарушается условие (3a). Графически влияние степени нарушения условия (3a) на величину R можно проиллюстрировать рисунком 3.

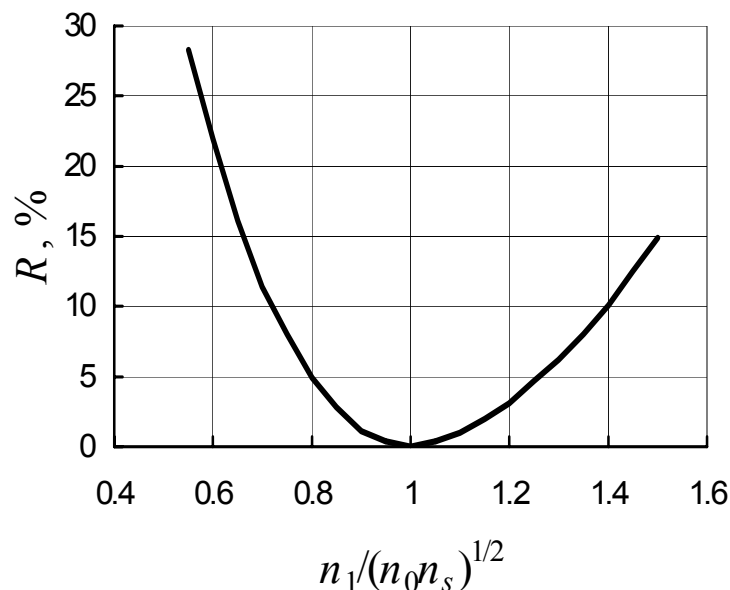


Рис. 3. Отражение от одной прозрачной подложки, покрытой одним слоем оптической толщины $\lambda/4$

2. Двухслойные покрытия

Чтобы получить амплитудный коэффициент отражения двухслойного покрытия, обратимся опять к решению уравнения (1), а покрытие будет выглядеть, как на рис. 2, где $i = 3$, $n_i = n_s$. В этом случае получим следующие два выражения:

$$r = \frac{r_1 e^{i\varphi_1} + r' e^{-i\varphi_1}}{e^{i\varphi_1} + r_1 r' e^{-i\varphi_1}} \quad (6a)$$

$$r' = \frac{r_2 e^{i\varphi_2} + r_3 e^{-i\varphi_2}}{e^{i\varphi_2} + r_2 r_3 e^{-i\varphi_2}}, \quad (6b)$$

где r - амплитудный коэффициент отражения двухслойного покрытия на подложке;

r' - амплитудный коэффициент отражения подложки с одним лишь внутренним слоем при падении света из Среды с показателем n_1 .

После подстановки (6б) в (6а) вещественная и мнимая части числителя приравниваются нулю. В результате получаем два уравнения:

$$(r_1 + r_3)\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + r_2(1 + r_1 r_3)\cos(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \quad (7a)$$

$$(r_1 - r_3)\sin(\varphi_1 + \varphi_2) - r_2(1 - r_1 r_3)\sin(\varphi_1 - \varphi_2) = 0 \quad (7b)$$

Эти два уравнения имеют гораздо более широкую область решений, чем система уравнений (2).

Ниже рассмотрим частный случай, когда отношение φ_1 к φ_2 равно целому числу, а затем снимем это ограничение.

Коэффициент отражения $R = |r|^2$ из (6) имеет вид:

$$R = \frac{1}{A} \left[r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_1^2 r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\varphi_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\varphi_2 + 2r_1 r_3 \cos 2(\varphi_1 + \varphi_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos 2(\varphi_1 - \varphi_2) \right] \quad (8),$$

где

$$A = 1 + r_1^2 r_2^2 + r_1^2 r_3^2 + r_2^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos 2\varphi_1 + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos 2\varphi_2 + 2r_1 r_3 \cos 2(\varphi_1 + \varphi_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos 2(\varphi_1 - \varphi_2)$$

a) Два слоя с одинаковыми оптическими толщинами ($n_1 d_1 = n_2 d_2$)

Если $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$, уравнения (7) дают следующие три решения:

$$1) n_0 = n_s \quad (9a)$$

$$\varphi = m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (9b)$$

Это решение описывает тривиальный случай двойного слоя между одинаковыми средами; толщина каждого слоя кратна $\lambda/2$.

$$2) n_1^2 n_s = n_2^2 n_0 \quad (10a)$$

$$\varphi = (2m-1)\pi/2, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (10b)$$

Это решение описывает важный тип двухслойного покрытия, дающего нулевое отражение, когда оптическая толщина каждого слоя составляет нечетное число $\lambda/4$.

Известно [3], что “эффективные” показатели преломления и толщины интерференционных покрытий зависят от угла падения света. Кроме того, изменение этих “эффективных” величин не одинаково для слоев, имеющих различие в показателях преломления. Однако для любого данного угла падения можно [3] подобрать согласованные толщины пленок. Для этого можно пользоваться соотношением:

$$\varphi(\theta) = \frac{\varphi(0)}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta) / n^2}},$$

где $\varphi(0)$ - требуемая толщина при нормальном падении;

$\varphi(\theta)$ - толщина, дающая такую же эффективную толщину для угла падения θ ;

n - показатель преломления пленки (для $n_0 = 1$).

Если условие (10a) не выполняется для рассматриваемого случая и $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda/4$, то:

$$R_{\lambda/4} = \left(\frac{n_1^2 n_s - n_2^2 n_0}{n_1^2 n_s + n_2^2 n_0} \right)^2 \quad (11)$$

- дает минимальное (не равное нулю) значение отражения. Это соотношение может быть представлено аналогично рис. 3, кроме того, нетрудно получить полное совпадение кривых как в этом случае, так и для однослойного, если по оси абсцисс графика рис. 3 $n_1/\sqrt{n_0 n_s}$ заменить на $n_1\sqrt{n_s}/n_2\sqrt{n_0}$.

Зависимость отражения от толщины является также практически важной с точки зрения контроля толщины пленок при их нанесении. По данным рис. 4 можно судить о степени влияния рассогласования толщин пленок на коэффициент отражения двухслойного покрытия с конкретными показателями преломления. Из графика следует, что отражение очень чувствительно к изменению толщины слабо преломляющих пленок и сравнительно нечувствительно к вариациям сильно преломляющих слоев. Следовательно, для данной конструкции покрытия очень важно нанести однородную по толщине (равной $\lambda/4$) пленку с низким значением n .

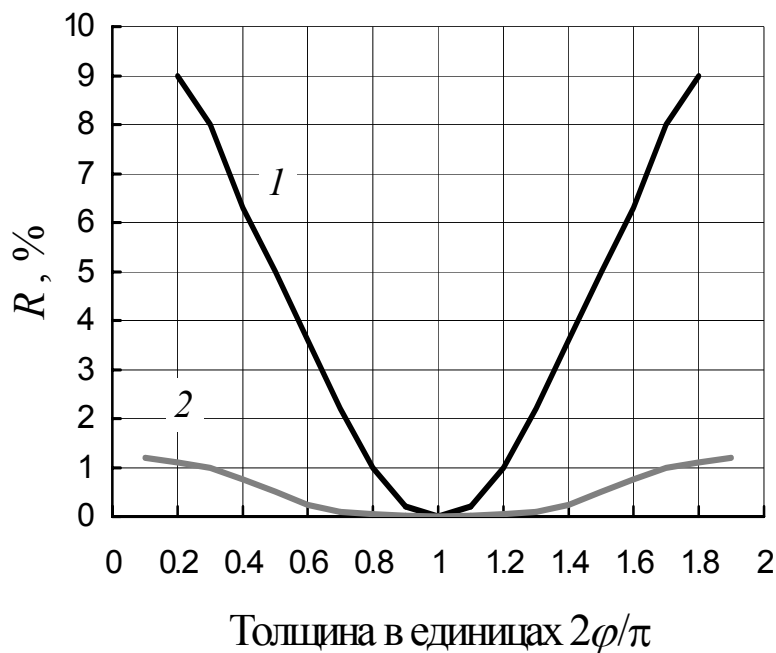


Рис. 4. Влияние рассогласования толщин на отражение R двухслойного покрытия на стекле ($n_1 = 1.38$, $n_2 = 1.70$, $n_s = 1.51$);
 1 – $\varphi_2 = \pi/2$; φ_1 изменяется; 2 – $\varphi_1 = \pi/2$; φ_2 изменяется

3) Для покрытия из двух пленок равной толщины можно получить более широкую спектральную область пониженного отражения, если показатели преломления удовлетворяют условию:

$$n_1 n_2 = n_0 n_s . \quad (12a)$$

Толщины слоев рассчитываются по формуле

$$\cos 2\varphi = \frac{(n_2 - n_1)(n_0^2 + n_1^2)}{(n_2 + n_1)(n_0^2 - n_1^2)}, \quad (12б)$$

которая может быть преобразована к виду:

$$\operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{n_1^2 n_2 - n_0^2 n_1}{n_1^3 - n_0^2 n_2}. \quad (12в)$$

Если $n_1 < n_2$ и $n_0 < n_1$, то $\cos 2\varphi$ согласно (12б) становится отрицательным, и в этом случае существуют два решения между 45 и 135° . Для обоих решений коэффициент отражения равен нулю, если одновременно выполняется условие (12а).

б) Оптическая толщина нижнего слоя в два раза выше, чем толщина верхнего слоя

Если $\varphi_2 = 2\varphi_1$, то уравнения (7а) и (7б) имеют еще три решения.

$$\begin{aligned} 1) \quad n_0 &= n_s \\ \varphi_1 &= m\pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (13)$$

Это тривиальное решение аналогично случаю, рассмотренному выше (см. формулы (9)).

$$2) \quad n_1^2 = n_0 n_s \quad (14а)$$

$$\varphi_1 = (2m-1)\pi/2, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (14б)$$

Опыт расчетов и изготовления таких покрытий показывает, что их применение менее эффективно по сравнению с однослойными покрытиями и интереса не представляет.

$$3) \quad n_2^3 - \frac{1}{2} \frac{n_2 n_3}{n_0 n_1} (n_0^2 + n_1^2) (n_1 + n_2) + n_1 n_s^2 = 0 \quad (15а)$$

$$\cos^2 \varphi_1 = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{(n_0 + n_1)(n_1 n_s - n_2^2)}{(n_0 - n_1)(n_1 + n_2)(n_2 + n_s)} \right] \quad (15б)$$

Простейшим и самым распространенным примером такого покрытия является покрытие, наружный и внутренние слои которого имеют оптические толщины $\lambda_0/4$ и $\lambda_0/2$, соответственно [3], на длине волны λ_0 . На этой длине волны отражение имеет максимум, определяемый выражением (5), и является отражением только одного внешнего слоя на подложке, не зависит от n_2 , так как $n_2 d_2 = \lambda_0/2$. Коэффициент отражения такого покрытия имеет два минимума, положение которых определяется из (15б). В этих минимумах, расположенных по обе стороны от λ_0 ,

отражение обращается в нуль, если показатели преломления удовлетворяют уравнению (15а).

На рис. 5 приведены спектральные зависимости коэффициентов отражения покрытий $\lambda/4 - \lambda/2$ на стекле. Для всех покрытий $n_1 = 1.38$, $n_s = 1.51$, n_2 меняется от 1.6 до 2.4. Видим, что при возрастании n_2 до 1.85 отражение в минимумах падает до нуля, когда выполняется условие (15а), а затем увеличивается до 1.15 % при $n = 2.4$. Расстояние между минимумами уменьшается с ростом n_2 , и при больших n_2 минимумы сливаются в один. Максимум при 500 нм соответствует отражению однослойного покрытия из пленки толщиной $\lambda/4$ с $n_1 = 1.38$ на подложке $n_s = 1.52$. Таким образом, в интервале длин волн 370 - 760 нм коэффициент отражения двухслойного покрытия $\lambda/4 - \lambda/2$ при $n_2 = 1.85$ меньше, чем коэффициент отражения однослойного покрытия.

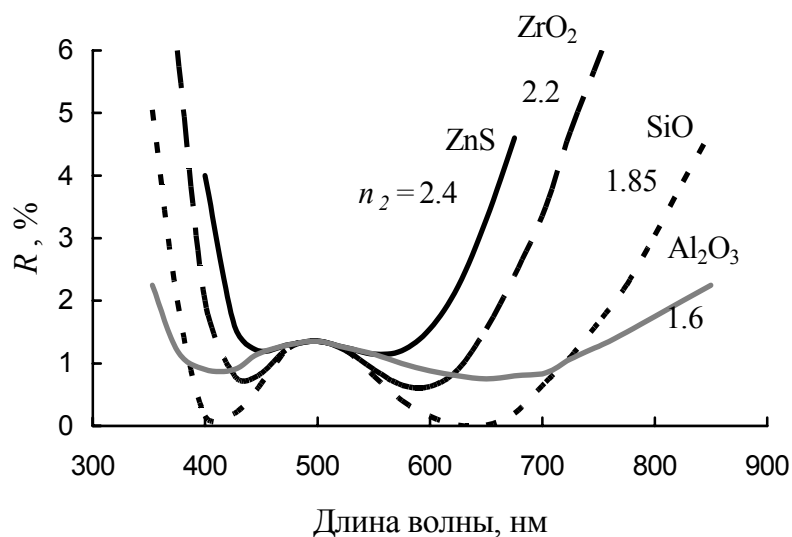


Рис. 5. Спектральная зависимость отражения R двухслойных покрытий $\lambda/4 - \lambda/2$ на стекле ($n_1 = 1.38$, $n_s = 1.51$) для n_2 равного от 1.6 до 2.4.

3. Трехслойные покрытия

Широкая область спектра с более низким и постоянным отражением может быть получена при использовании трехслойных покрытий. Математический анализ свойств таких покрытий очень сложен. Поэтому здесь ограничимся рассмотрением некоторых из наиболее важных и простых типов, для которых толщина каждого слоя кратна $\lambda/4$. Три относительно простые трехслойные системы могут служить эффективными просветляющими покрытиями.

а) Толщина каждого слоя равна $\lambda_0/4$

Здесь λ_0 - контролируемая длина волны.

$$1) n_1 n_3 = n_2^2 = n_0 n_s \quad (16)$$

При выполнении этого условия имеется три нулевых максимума отражения: один - на λ_0 и по одному - с каждой стороны от λ_0 . Боковые экстремумы даются выражением:

$$\operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{n_0(n_0 - n_s)n_1^2}{2\sqrt{n_0 n_s}(n_0^2 - n_1^2)n_1 + (n_0^3 n_s - n_1^4)} \quad (17)$$

Если в (16) $n_0 = 1$, то $n_2^2 = n_0 n_s$ и либо n_1 , либо n_3 должны быть меньше или равны $\sqrt{n_s}$. Следовательно, данная система не применима для просветления низкопреломляющих материалов (стекло, кварц), но является очень эффективной для просветления материалов с высоким n_s (Si, Ge, ZnS, As₂S₃ и т. п.). Покрытия, изготовленные по такому “ступенчатому” типу, обеспечивают очень широкую область малого отражения (рис. 6).

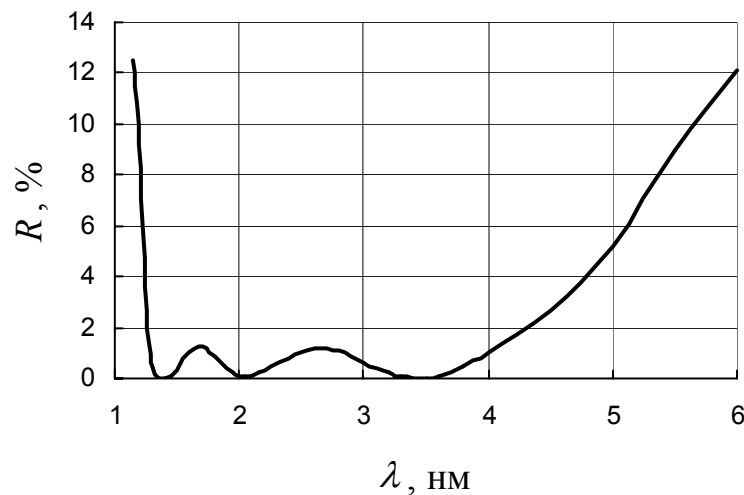


Рис. 6. Спектральная зависимость R для покрытия $\lambda_0/4 - \lambda_0/4 - \lambda_0/4$ на германии ($n_1 = 1.35$, $n_2 = 2.0$, $n_3 = 2.96$, $n_s = 4.0$)

$$2) n_1 n_3 = n_2 \sqrt{n_0 n_s} \quad (18)$$

Это соотношение является просто обобщением случая 1), так как здесь n_2 не обязательно должен быть равным $\sqrt{n_0 n_s}$. Такой более широкий выбор n_2 позволяет использовать в качестве просветляющей систему $\lambda_0/4 - \lambda_0/4 - \lambda_0/4$ для стекла. Однако в этом случае отражение равно нулю лишь на λ_0 .

б) Толщина внешнего слоя - $\lambda/4$, среднего - $\lambda/2$, внутреннего - $\lambda/4$

Отражение такого покрытия будет равно нулю, если показатели преломления удовлетворяют условию:

$$n_1^2 n_s = n_3^2 n_0 \quad (19)$$

в) Толщина внешнего слоя - $\lambda/4$, среднего - $\lambda/2$, внутреннего - $3\lambda/4$

В этом случае для получения нулевого отражения показатели преломления должны удовлетворять тому же условию (19). Однако спектральная зависимость данной системы имеет более широкий диапазон просветления. С другой стороны, за обеими границами области низкого отражения рост R значительно выше, чем в предыдущем случае.

II. Пленочные материалы для просветляющих покрытий

В зависимости от конструкции просветляющего покрытия и волнового диапазона просветления выбираются покрытия различных материалов. Поскольку эти покрытия создаются методами напыления, то важно, чтобы качество оптических пленочных материалов удовлетворяло ряду важных критериев:

- 1) прозрачность;
- 2) оптимальный показатель преломления;
- 3) оптическая однородность;
- 4) относительная плотность;
- 5) высокие адгезия и твердость, низкие механические напряжения;
- 6) подходящие к эксплуатации химические свойства (растворимость, реактивность);
- 7) стабильность поведения в условиях среды эксплуатации.

Рассмотрим кратко некоторые требования к пленочным материалам, подробная информация о которых может быть найдена в [4].

Прозрачность. Световые потери в пленках должны быть минимальны, что особенно важно при создании многослойных просветляющих покрытий из разных материалов.

Обычно считается, что полные потери в многослойных системах – это сумма потерь на рассеяние и истинное поглощение. Какой из этих факторов является доминирующим, во многом зависит от конкретной ситуации. Потери, связанные с рассеянием, уменьшаются технологически при получении пленок максимально оптически однородных, не содержащих на поверхности и в объеме пор, трещин, пузырьков и других подобных дефектов.

Потери, обусловленные истинным, присущим данному материалу, поглощением, могут быть уменьшены только правильным подбором сорта материала к длине волны. Учитывая дисперсию показателя поглощения k выбираемого материала, под $\lambda_{\text{раб}}$ используется область дисперсии достаточно далекая от края поглощения материала.

Чтобы световые потери в многослойных просветляющих покрытиях оставались незначительными, потери в пленках толщиной 100 нм должны быть меньше 0.01 %. Это соответствует $k \approx 0.44 \cdot 10^{-4}$ или $\alpha \approx 10 \text{ см}^{-1}$.

Показатель преломления диэлектрических и полупроводниковых пленок зависит от нескольких факторов:

- *от природы материала* или, точнее, от типа химической связи в материале [4]. Обычно показатель преломления возрастает с увеличением атомного веса элемента; например, для углерода $n = 2.38$, для Si $n = 3.4$, для Ge $n = 4.0$ (на $\lambda = 4$ мкм). У соединений с преимущественно ионными связями показатель преломления ниже, чем у соединений с доминирующей ковалентной связью. Так, для PbF₂ $n = 1.76$, для PbO $n = 2.6$, для PbTe $n = 3.9$;
- *от кристаллической структуры*. Для пленок TiO₂ характерна сильная зависимость n от температуры подложки (T_s), определяющей структуру пленок. Так, в интервале от 20 до 400 °С пленки могут быть либо аморфные, либо со структурой анатаза или рутила, либо представлять смесь аморфной и кристаллической фаз. При таком ΔT_s $n = 1.9 \div 2.6$ при $\lambda = 550$ нм;
- *от изменения размера зерен, плотности, концентрации поглощенных паров воды и состава пленок* [4].

Относительная плотность ρ есть отношение плотности пленки (ρ_f) к плотности массивного образца (ρ_m). Относительная плотность и показатель преломления связаны соотношением:

$$\rho = \frac{\rho_f}{\rho_m} = \frac{n_f^2 - 1}{n_f^2 + 2} \cdot \frac{n_m^2 + 2}{n_m^2 - 1},$$

где n_f и n_m - показатели преломления для пленки и массивного образца, соответственно.

Уменьшение ρ может быть связано со структурными дефектами, обусловленными внедрением в пленку молекул газа, реиспарением внедренных молекул, наличием микропор. Увеличение T_s обычно приводит к возрастанию ρ .

Рассмотренным требованиям к пленочным материалам многослойных интерференционных просветляющих покрытий удовлетворяют диэлектрические и полупроводниковые материалы. Среди диэлектриков чаще всего применимы оксиды, фториды, некоторые хлориды, сульфиды и селениды. Среди полупроводников – кремний, германий и теллур.

В таблице ниже приведены значения оптических постоянных наиболее распространенных диэлектрических и полупроводниковых пленочных материалов, полученных различными методами. Таблица составлена по данным отечественных и зарубежных работ [5]. Следует отметить, что оптические постоянные существенно зависят как от способа получения пленок, так и от технологических режимов. Следовательно, их следует рассматривать как

ориентировочные. Подобные данные по представленным и некоторым другим материалам с технологическими тонкостями их получения можно найти в [4, 6] и других справочных изданиях.

Таблица

Параметры и методы получения пленочных материалов оптических покрытий

Пленочный материал	Способ получения	Область прозрачности, мкм	Показатель преломления n в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 , мкм		Показатель поглощения k на длине волны λ , мкм	
			n	$\lambda_1 - \lambda_2$	k	λ
1	2	3	4	5	6	7
Na_3AlF_6	ТИ, ЭЛИ	0.20 - 14	1.37 - 1.32	0.20 - 2	—	—
MgF_2	ТИ, ЭЛИ	0.11 - 10	1.40 - 1.32	0.25 - 2	$6.0 \cdot 10^{-6}$ $9.0 \cdot 10^{-5}$	1.06 0.52
ThF_4	ТИ	0.20 - 15	0.57 - 1.5	0.25 - 2	$2.0 \cdot 10^{-6}$ $5.0 \cdot 10^{-6}$	1.06 0.52
CeF_3	ТИ	0.30 - 5	1.69 - 1.59	0.25 - 2	—	—
LaF_3	ТИ, ЭЛИ	0.22 - 2	1.65 - 1.57	0.25 - 2	$1.0 \cdot 10^{-3}$	0.25
NaF_3	ТИ, ЭЛИ	0.22 - 2	1.68 - 1.58	0.25 - 2	—	—
PbF_2	ТИ	0.24 - 20	1.75 - 1.7	0.55 - 1	—	—
SiO_2	ЭЛИ, КР, ВР, МР, ОР	0.20 - 8	1.46 - 1.44	0.40 - 1.6	$2.0 \cdot 10^{-6}$ $1.5 \cdot 10^{-5}$	1.06 0.52
Al_2O_3	ЭЛИ, КР, МР, ВР	0.20 - 11	1.65 - 1.57	0.50 - 1.6	$8.0 \cdot 10^{-6}$ $2.3 \cdot 10^{-5}$	1.06 0.52
U_2O_3	ЭЛИ, ТИ	—	1.95 - 1.77	0.25 - 2	$4.0 \cdot 10^{-3}$	0.25
HfO_2	ЭЛИ, КР	0.25 - 9	2.31 - 1.97	0.25 - 2	$1.6 \cdot 10^{-3}$	0.25
ZrO_2	ЭЛИ, КР	0.25 - 9	2.32 - 1.98	0.25 - 2	$1.0 \cdot 10^{-2}$	0.25
CeO_2	ТИ, ЭЛИ	0.46 - 2	2.52 - 1.92	0.40 - 2	—	—
Ta_2O_5	ЭЛИ, КР, МР, ВР, ОР	0.30 - 2	2.50 - 2.06	0.25 - 2	$8.0 \cdot 10^{-3}$	0.3
TiO_2	ТРИ, ЭЛИ, КР, МР, ОР	0.40 - 3	2.55 - 2.1	0.40 - 1.5	$2.5 \cdot 10^{-4}$ $7.5 \cdot 10^{-1}$	1.06 0.52
ZnS	ТИ, ЭЛИ	0.38 - 25	2.35 - 2.2	0.40 - 5	$3.0 \cdot 10^{-6}$ $2.7 \cdot 10^{-4}$	1.06 0.52
ZnSe	ТИ	0.60 - 15	2.60 - 2.3	0.50 - 2	—	—
Si	ТИ, ЭЛИ	1.10 - 9	3.4	3	—	—
Ge	ТИ, ЭЛИ	1.70 - 23	4.4	2	—	—
PbTe	ТИ, ЭЛИ	3.50 - 20	5.6	1 - 8	—	—
CdTe	ТИ, ЭЛИ	0.96 - 28	2.7	1 - 8	—	—
MoO_2	МР	0.50 - >1	2.01 - 2.04	0.5 - 0.9	$1.5 \cdot 10^{-3}$ $2.0 \cdot 10^{-4}$	0.5 0.7
WO_3	МР, ОР	0.40 - >1	2.2	0.5 - 0.9	$5.0 \cdot 10^{-4}$	0.6

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7
Sc_2O_3	ЭЛИ	0.20 - 10	1.96 - 1.99	0.4 - 1	—	—
Y_2O_3	ЭЛИ	0.20 - 10	1.75	0.4 - 1	—	—

Eu_2O_3	ЭЛИ	0.26 - >1	1.82	0.4 - 1	—	—
La_2O_3	ЭЛИ	0.20 - 10	2.03	0.4 - 1	—	—
Gd_2O_3	ЭЛИ	0.22 - >1	1.98	0.4 - 1	—	—
Tb_2O_3	ЭЛИ	—	1.96	0.4 - 1	—	—
Dy_2O_3	ЭЛИ	0.21 - 10	1.97	0.4 - 1	—	—
Ln_2O_3	ЭЛИ	0.22 - 10	1.93	0.4 - 1	—	—
Er_2O_3	ЭЛИ	0.26 - >1	1.96	0.4 - 1	—	—
Sm_2O_3	ЭЛИ	0.23 - >1	2.09	0.4 - 1	—	—
Ho_2O_3	ЭЛИ	0.22 - >1	1.96	0.4 - 1	—	—
Yb_2O_3	ЭЛИ	—	1.95	0.4 - 1	—	—
Pr_6O_{11}	ЭЛИ	—	1.94	0.4 - 1	—	—

Обозначения. ТИ - термическое испарение; ТРИ - термическое реактивное испарение; ЭЛИ - электронно-лучевое испарение; КР - катодное распыление; ВР - высокочастотное распыление; МР - магнетронное распыление; ОР - осаждение из растворов.

III. Особенности технологии изготовления интерференционных просветляющих покрытий

Для изготовления интерференционных просветляющих покрытий наибольшее применение получили методы нанесения пленок в вакууме [5]. В настоящее время наряду с традиционными методами испарения в вакууме используются современные методы ионно-плазменного распыления. Последние удобны более широкими возможностями получения композиционных материалов и смесей (например - диэлектриков с разными показателями преломления), распыление которых позволяет получать слои с заданными оптическими свойствами в промежуточном диапазоне (между относительно низкопреломляющим и высокопреломляющим диэлектриком).

Возможность получения пленок сложного состава имеет место и в методах испарения, но она более дорогая и связана с проблемой совместного испарения материалов, имеющих разные температуры испарения. Тем не менее, резистивные и электроннолучевые методы испарения наиболее хорошо отработаны для изготовления интерференционных покрытий. Практическое изучение данных методов изготовления просветляющих покрытий и является нашей задачей.

Для получения покрытия указанными методами вакуумная установка должна иметь, по крайней мере, две важные особенности. Первая – высокая однородность пленки по толщине, вторая – наличие системы контроля оптической толщины пленки [7].

В данной лабораторной работе получение интерференционного просветляющего покрытия осуществляется с помощью установки вакуумного напыления ВУ-1А. Вакуумная установка ВУ-1А оснащена комплексом фотометрического контроля толщины, в качестве которой используется монитор оптических покрытий производства Белорусско-японского СП «Солар ТИИ», г. Минск [8].

Принцип измерения толщины основан на фотоэлектрическом методе регистрации лучистого потока, пропущенного через напыляемый образец или отраженного от него. При этом об оптической толщине напыляемого материала можно судить по изменению коэффициента пропускания или отражения образца. Экстремальным значениям коэффициента пропускания T (или отражения R) соответствует оптическая толщина nd (где d - геометрическая толщина) пленки, кратная значениям:

$$nd = \frac{\lambda}{4} \cdot m; \quad m = 1, 2, 3, \dots,$$

где λ - длина волны излучения; m - число слоев.

Оптическая схема монитора оптических покрытий СП «Солар ТИИ» приведена на рис. 7. Монитор выполнен на основе двух спектрографов S-150, соответственно, на ультрафиолетовый – видимый диапазон (250-1050 нм) и ближний инфракрасный диапазон (900-1600 нм). Система предусматривает возможность измерения по схемам отражения и пропускания. В качестве фотоприемников используются ПЗС-матрицы фирмы Hamamatsu.

Параметры устройства регистрации спектров отражения и пропускания в УФ–видимом диапазоне длин волн следующие:

- количество одновременно регистрируемых каналов – 4;
- спектральный диапазон 250-1050 нм;
- спектральный прибор – спектрограф с дифракционной решеткой с компенсацией астигматизма;
- детектор – матричный ПЗС модели S7010-1006UV фирмы Hamamatsu;
- рассеянный свет < 0.5 %;
- абсолютная погрешность калибровки по длинам волн < 1 нм;
- фотометрическая точность +/-1.5 %;
- дрейф нуля +/- 0.002 А за 1 час работы.

Параметры устройства регистрации спектров отражения и пропускания в ИК-диапазоне длин волн следующие:

- количество одновременно регистрируемых каналов – 1;
- спектральный диапазон 900 – 1600 нм;
- спектральный прибор – спектрограф с дифракционной решеткой с компенсацией астигматизма;
- детектор – InGaAs линейный детектор модели G9201-256S фирмы Hamamatsu;
- рассеянный свет < 0.5 %;
- абсолютная погрешность калибровки по длинам волн < 3 нм;
- фотометрическая точность +/-1.5 %;
- дрейф нуля +/- 0.002 А за 1 час работы.

Для обеих спектрографических частей монитора оптических покрытий в качестве источника излучения используется импульсная ксеноновая лампа с последующей синхронизацией при измерении на переменном сигнале (детектирование). В обоих случаях диапазон измерения коэффициентов отражения и пропускания составляет 1-100 %. Среднее значение обратной линейной дисперсии для видимого спектрографа – 30 нм/мм, для инфракрасного – 55 нм/мм. Время установления рабочего режима с момента включения – не более 15 мин.

Процесс изготовления интерференционных просветляющих покрытий подразумевает выполнение набора последовательных операций, которые определяются маршрутной картой и технологическими условиями приготовления конкретного прибора, определенного покрытия.

Порядок работы на установке ВУ-1А описан в Приложении 1.

В Приложении 2, для примера, представлены технологические условия приготовления однослойного просветляющего покрытия на основе монооксида кремния (SiO).

ЗАДАНИЕ

1. Изучить принцип действия, устройство и порядок работы с системой вакуумной откачки установки ВУ-1А.
2. Изучить устройство и порядок работы с испарителями установки ВУ-1А.
3. Изучить устройство и порядок работы с системой фотометрического контроля СФКТ-751В.
4. Изучить устройство и порядок работы с системой фотометрического контроля монитора оптических покрытий на базе спектрографов S-150.
5. Рассчитать одно-, двух-, трехслойное просветляющее покрытие для заданных преподавателем материала подложки и диапазона длин волн.
6. Составить и обосновать технологические условия и порядок изготовления заданного просветляющего покрытия.
7. Изготовить необходимое покрытие.
8. Изучить устройство и порядок измерения спектральных характеристик покрытия на спектрофотометрах МДР-204 (ЛОМО Фотоника) для оптического диапазона 400-1200 нм и Cary 5000 для оптического диапазона 1100-3300 нм.
9. Измерить спектральные характеристики полученного покрытия.
10. Сравнить полученные результаты с расчетными. Объяснить их. Дать выводы и рекомендации по совершенствованию процесса изготовления заданного покрытия.

ВОПРОСЫ

1. Роль просветляющих покрытий в элементах оптики и оптоэлектроники.
2. Физические принципы интерференционного просветления оптических поверхностей.
3. Принципы расчета интерференционных просветляющих покрытий. Синтез и анализ.
4. Одно-, двух-, трехслойные интерференционные просветляющие покрытия. Вывод формул для R и T.
5. Необходимые технологические условия для изготовления просветляющих покрытий.
6. Фотометрический контроль оптической толщины пленок в технологии интерференционных покрытий.
7. Материалы интерференционных покрытий. Требования и технология.
8. Оптические постоянные пленочных материалов. Дисперсии $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$.
9. Способы определения оптических постоянных пленок.
10. Параметры, характеризующие просветляющие покрытия, и их измерение.
11. Эксплуатационные требования к просветляющим покрытиям как элементам оптоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. - М.: Радио и связь, 1989. - 359 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1973. - 720 с.
3. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. - Л.: Машиностроение, 1973 - 224 с.
4. Риттер Э. Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений / В кн.: Физика тонких пленок // Под ред. Г.Хасса, М.Франкомбра, Р.Гофмана. - т. 8. - М.: Мир, 1978 -С. 7 - 60.
5. Яковлев П.П., Мешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий / Серия: Библиотека приборостроителя. - М.: Машиностроение, 1987 - 185 с.
6. Технология тонких пленок. Справочник / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. - т. 1. - М.: Сов. радио, 1977 - 662 с.
7. Глудкин О.П., Густов А.Е. Устройства и методы фотометрического контроля в технологии производства ИС. - М.: Радио и связь, 1981 - 112 с.
8. Сайт СП «СОЛАР ТИИ»: www.solartii.com

ПОРЯДОК РАБОТЫ НА ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКЕ ВУ-1А

1. Включение и прогрев установки

- 1.1. Включить рубильник (общ. 1).
 - 1.2. Подать сжатый воздух (открыть кран).
 - 1.3. Включить холодную воду.
 - 1.4. Включить тумблер “сеть” на блоке 8.
 - 1.5. Включить кнопку агрегата форвакуумных насосов (ФН) на блоке 2.
 - 1.6. Включить тумблер “сеть” вакуумметра ВТ-1-4 на блоке 1.
 - 1.7. Открыть кран, соединяющий диф. насос с фор. насосом (ДН-ФН) на блоке 2 (нижний правый белый тумблер).
 - 1.8. Включить диф. насос ДН на блоке 2 (верхний левый белый тумблер).
- Прогрев - 1 час.

2. Вскрытие рабочей вакуумной камеры (РК)

- 2.1. Открыть горячую воду:
 - открыть магистраль горячей воды на установку;
 - включить тумблер “камера” в положение “прогрев” (блок 2).
- 2.2. Ждать прогрева корпуса РК (до теплого состояния).
- 2.3. Закрыть затвор (если он открыт). Вакуумметр ВМБ1-2 включить на канал I.
- 2.4. Напустить воздух в РК нажатием белой кнопки “Вкл.” на блоке 2.

3. Загрузка образцов (подложек) для напыления

- 3.1. Перед напылением подложки необходимо обработать химически (лаборатория № 11, комн. 431).
- 3.2. Непосредственно перед напылением конечная стадия обработки сводится к тщательной протирке подложек петролевым эфиром. Для этого используют батистовые салфетки.
- 3.3. Очищенные подложки устанавливаются на держатели подложек и закрепляются на них с помощью зажимов - “лапок” или масок. Операция осуществляется с использованием шелковых перчаток, предупреждающих появление жирных пятен на подложках.
- 3.4. Пылинки на подложках удаляются с помощью беличьей кисточки и спринцовки.

3.5. Подложкодержатели устанавливаются на подколпачной арматуре в камере следующим образом:

- подколпачная арматура вынимается наполовину из камеры;
- держатели устанавливаются на окна и закрепляются стальной проволокой в верхней части окна;
- арматура возвращается в седло шестерни вращения;
- **ОБЯЗАТЕЛЬНА** проверка на отсутствие помех при вращении арматуры, для чего включается тумблер “вращение арматуры” на блоке 3 и плавно увеличивается скорость вращения (не более 20×2 об/мин).

3.6. Следующая операция - загрузка испаряемого материала в тигель (испаритель):

- открыть заслонку тумблером “заслонка испарителей” (справа внизу от РК).

При этом может понадобиться вращение тигля (в случае электронно-лучевого испарения (ЭЛИ)), которое осуществляется следующим образом:

- на блоке 7 стойки УЭЛИ-1 включить галетный переключатель “сеть”;
- на блоке 4 стойки УЭЛИ-1 включить тумблер “сеть”;
- с помощью кнопочных переключателей и регулятора скорости вращения выбрать необходимый режим и скорость вращения тигля.

После выполнения операции ОБЯЗАТЕЛЬНО выключить тумблер “сеть” и галетный переключатель на блоке 7 стойки УЭЛИ-1.

3.7. Закрыть заслонку.

3.8. Проверить наличие контрольного образца (свидетеля) в кассете свидетелей.

3.9. Перед закрытием камеры делают следующие, окончательные (**ОЧЕНЬ ВАЖНЫЕ!**), процедуры:

- удаляются с помощью спринцовки с подложек и свидетеля остатки пыли (при этом свидетель не должен вылететь из кассеты);
- проверяется срабатывание заслонки и закрыта ли она;
- окончательно проверяется наличие:
 - испаряемого вещества;
 - подложек;
 - свидетеля;
 - прозрачность смотрового окна на дверце камеры;

- отсутствие посторонних деталей и предметов в камере и на дверце камеры.

3.10. С помощью батистовой (бязевой) салфетки и спирта (ацетона) протереть резиновую прокладку дверцы камеры.

3.11. Закрывать камеру поворотом ручки.

4. Откачка из РК

4.1. Закрывать клапан ДН-ФН на блоке 2.

4.2. Открыть клапан, соединяющий РК с фор. насосом (РК-ФН), на блоке 2 (верхний правый белый тумблер).

4.3. Включить ВТ-1-4 на I канал.

Идет откачка.

Заполнить ловушку азотом, включив тумблер II на блоке 7.

Ждать до срабатывания первой блокировки (крайняя левая).

4.4. Закрывать клапан РК-ФН на блоке 2.

4.5. Открыть клапан ДН-ФН на блоке 2.

4.6. Через минуту открыть затвор между ДН и РК (верхний левый черный тумблер - кратковременным нажатием влево).

4.7. Включить вакуумметр ВМБ-1-2 на канал II.

Ждать, пока все красные индикаторы погаснут, и зажгутся все зеленые светодиоды.

4.8. При вакууме в РК 0.001 - 0.004 Па включается на прогрев подложка. Для этого включить холодную воду через РК (черный тумблер на блоке 2 “камера” - в положение “охлаждение”).

4.9. Включить тумблер “вращение арматуры” на блоке 3 и ручкой потенциометра вывести стрелку вольтметра на значение $\approx 5 \times 2$ об/мин.

4.10. Включить “нагрев подложек” ручкой на блоке 3 (температура поддерживается автоматически по красной стрелке).

Ждать 1 час (тогда показания T_s - точные).

4.11. Через 30 мин. после начала прогрева подложек включается на прогрев комплекс фотометрического контроля.

Ждать прогрева подложек и системы фотометрического контроля.

4.12. Включить тумблер “охлаждение испарителей” на блоке 3.

4.13. Выставить скорость вращения арматуры на уровень $(8 \div 15) \times 2$ об/мин.

5. Напыление с резистивным испарителем

- 5.1. Нажать соответствующую кнопку испарителя (I или II) на блоке 3.
- 5.2. Включить источник тока тумблером под шкалой “испаритель” блока 3.
- 5.3. С помощью ручек “грубо” и “точно” установить необходимый ток через испаритель.
- 5.4. Открыть заслонку, включить секундомер.

Процесс напыления контролируется на мониторе оптических покрытий.

- 5.5. По окончании процесса напыления закрыть заслонку, остановить секундомер.
- 5.6. С помощью ручек “грубо” и “точно” выставить на 0 ток через испаритель.
- 5.7. Выключить тумблер и кнопку “испаритель I (II)”.

6. Напыление испарением с помощью электронной пушки (электронным лучом, ЭЛИ)

- 6.1. Включить галетный переключатель “сеть” на блоке 7 стойки УЭЛИ-1.
- 6.2. Нажать кнопку “вентилятор” на блоке 7, проверить визуально индикаторы блокировок стойки УЭЛИ-1.
- 6.3. Включить тумблер “накал” на блоке 3 (УЭЛИ-1).
- 6.4. Переключатель “эмиссия - очистка катода” должен находиться в положении “очистка катода”.
- 6.5. Провести очистку катода:
Регулировкой “грубо” (ручка “точно” - не используется!) подать ток накала чуть больше рабочего тока (20 - 30 А).
- 6.6. Спустя 30 секунд убрать ток через катод на 0 (регулировкой “грубо”).
- 6.7. На блоке 7 включить кнопку “высокое напряжение” (6 кВ).
- 6.8. Переключатель “эмиссия - очистка катода” переводится в режим “эмиссия”.
- 6.9. С помощью регулировки выставляется ток эмиссии $10 \div 20$ мА.
- 6.10. С помощью ручек положения луча по осям X и Y пятно устанавливается в центральной части испаряемого вещества, что визуально контролируется через окно РК.
- 6.11. Ширина пятна регулируется ручкой “развертка луча” по оси Y.
- 6.12. Произвести выход на режим:

с помощью ручки “грубо”, при одновременном визуальном контроле, выставить необходимый ток эмиссии. При необходимости размер пятна регулируется ручкой “развертка луча” по оси Y.

- 6.13. После установки и стабилизации режимов открыть заслонку и включить секундомер.
- 6.14. В завершении процесса напыления - закрыть заслонку, выключить секундомер.
- 6.15. Регулировкой “грубо” убрать ток эмиссии на 0.
- 6.16. Выключить высокое напряжение (6 кВ).
- 6.17. Переключатель “эмиссия - очистка катода” перевести в положение “очистка катода”.
- 6.18. Выключить тумблер “накал”.
- 6.19. Выключить галетный переключатель “сеть”.
- 6.20. Выключить оптический контроль.
- 6.21. Спустя 3 - 4 мин. выключить кнопку “вентилятор” и тумблер “охлаждение испарителей”

ПРИМЕЧАНИЕ. При напылении многослойных покрытий за 1 процесс вращение тигля осуществляется с помощью блока 4.

7. Порядок выключения установки ВУ-1А

- 7.1. Выключить нагрев подложки.
- 7.2. Выключить вращение арматуры.
- 7.3. Выключить оптический контроль в обратной последовательности.
- 7.4. Через 10 - 15 мин. выключить охлаждение испарителей.
Ждать остывания до температуры выемки (обычно 60 - 80 °С).
- 7.5. Закрыть затвор между РК и ДН.
- 7.6. Выключить ДН.
- 7.7. Выключить вакуумметр ВМБ-1-2.
Ждать 1 час.
- 7.8. Выключить охлаждение камеры.
- 7.9. Выключить тумблер ДН-ФН.
- 7.10. Выключить вакуумметр ВТ-1-4.
- 7.11. Выключить “сеть” на блоке 8.
- 7.12. Закрыть воду.
- 7.13. Закрыть воздух.

7.14. Выключить рубильник.

7.15. Завернуть общую воду.

7.16. Занести данные в эксплуатационный журнал установки.

КАНАЛЫ ВАКУУММЕТРА ВТ-1-4

- I - камера
- II - диф. насос
- III - вход фор. насоса
- IV - не подключен

На каждом канале стоит термодатчик давления.

КАНАЛЫ ВАКУУММЕТРА ВМБ-1-2

- I - диф. насос
- II - камера

На каждом канале стоит магнитный датчик давления.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
напыления однослойного просветляющего покрытия,
состоящего из $\lambda/4$ -оптической толщины слоя монооксида кремния
для арсенида галлия, фосфида индия или кристаллического кремния**

1. Технические требования

- 1.1. Все необходимые системы установки ВУ-1А должны быть в рабочем состоянии. Измерительные приборы оттестированы метрологической службой ННГУ. Для всех систем и агрегатов установки должны быть проведены необходимые работы по ежедневному профилактическому обслуживанию.
- 1.2. Вакуумная камера и технологическая оснастка должны быть подготовлены к напылению согласно инструкции к установке № 1984.00.00. 00.000, альбомы № 2 и № 6, и инструкции по безопасной работе на вакуумных установках № 2 кафедры.
- 1.3. Подложки перед напылением должны быть обработаны по инструкции обработки конкретного материала подложки.
- 1.4. Испарители монооксида кремния должны быть обработаны химически и отожжены в течение 2 мин при токе 270 ± 10 А по показанию амперметра блока резистивного испарителя.
- 1.5. Перед началом работы пинцет и скальпель должны быть протерты бязевой салфеткой, смоченной этиловым спиртом.
- 1.6. Операции 3.2 - 3.4, 3.22 должны производиться в перчатках.
- 1.7. При проведении процесса изготовления покрытия необходимо следить за непрерывным циркулированием жидкого азота через криогенную ловушку диффузионного насоса и криопанель рабочей камеры.

2. Необходимое вспомогательное оборудование и оснастка

- 2.1. Установка вакуумного напыления ВУ-1А.
- 2.2. Испаритель резистивный танталовый, сеточный.
- 2.3. Сосуды Дюара АСД-25 - 2 шт.
- 2.4. Секундомер.
- 2.5. Пинцет медицинский.
- 2.6. Скальпель медицинский.
- 2.7. Перчатки капроновые.
- 2.8. Спектрофотометр СФ 8, МДП-4.

- 2.9. Бязь 224.
- 2.10. Спирт этиловый ректифицированный технический.
- 2.11. Азот жидкий технический.
- 2.12. Моноокись кремния (ХЧ, ГОСТ 19601-74).
- 2.13. Кассета для образцов.
- 2.14. Стеклянная чашка Петри.
- 2.15. Микроскоп типа МБС-10.

3. Технологический процесс

- 3.1. Напустить воздух в рабочую камеру установки, открыть ее.
- 3.2. Загрузить в испаритель моноокись кремния на $2/3$ его глубины.
- 3.3. Установить контрольный образец в кассету контрольных образцов.
- 3.4. Установить подложки на карусель подложек.
- 3.5. Сделать необходимые установки контролируемых параметров на мониторе оптических покрытий. Включить на прогрев комплекс.
- 3.6. Откачать рабочую камеру до вакуума не хуже $4 \cdot 10^{-3}$ Па.
- 3.7. Нагреть подложки до температуры 200 ± 10 °С и выдержать их при данной температуре в течение 40 мин.
- 3.8. Охладить подложки до $T_s = 140 \pm 10$ °С и выдержать их при данной температуре в течение 60 - 80 мин.
- 3.9. Включить циркуляцию азота через криопанель рабочей камеры установки.
- 3.10. Откачать рабочую камеру до вакуума $4 \cdot 10^{-4}$ Па.
- 3.11. Привести карусель подложек во вращение со скоростью 24 - 30 об/мин.
- 3.12. Включить испаритель монооксида кремния.
- 3.13. Постепенно увеличить ток через испаритель до 270 ± 5 А и через 2 мин открыть заслонку.
- 3.14. Напылить пленку SiO оптической толщины $\lambda/4$. Фотометрический контроль толщины пленки осуществляется согласно техническому описанию монитора оптических покрытий.
- 3.15. Закрыть заслонку.
- 3.16. Отключить испаритель монооксида кремния.
- 3.17. Отключить привод вращения карусели подложек.
- 3.18. Охладить подложки до температуры 70 ± 10 °С.
- 3.19. Развакуумировать рабочую камеру.

- 3.20. Снять подложки с карусели подложек.
- 3.21. Проконтролировать качество напыления согласно разделу 4.
- 3.22. Годные подложки поместить в чашку Петри или кассету для образцов.

4. Контроль качества покрытия

- 4.1. Рассмотреть напыленное покрытие под микроскопом МБС-10 при максимальном увеличении. На пленке должны отсутствовать пятна и царапины.
- 4.2. Снять спектральные характеристики коэффициентов отражения покрытия, используя монитор оптических покрытий или спектрофотометр МДР-204 («ЛЮМО-Фотоника»).

5. Особые указания

- 5.1. Профилактическую очистку камеры производить после 25 - 30 процессов напыления.
- 5.2. Испаряемый материал хранить в герметичной заводской таре или в стеклянных бюксах с притертой крышкой.
- 5.3. Кратность использования испарителя для SiO - 10-15 раз.
- 5.4. Допускается использование оборудования и оснастки, отвечающих требованиям технологических инструкций.

ПРОСВЕТЛЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ, ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ
(Лабораторная работа)

Составители:

Ершов Алексей Валентинович

Машин Александр Иванович

Компьютерный набор, рисунки и верстка И.А. Карabanовой

Подписано к печати _____ Формат 60×84 1/16

Печать офсетная. Бумага оберточная. Усл. печ. л. 1.8

Тираж 150 экз. Заказ _____.

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, 603950
ГСП-20, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23

Типография ННГУ, 603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37
