

УДК 681.327.68

Критерии оптимизации голографической эффективности регистрирующей среды на основе пленок диоксида ванадия/ И.В.Соколова, И.А.Хахаев, Ф.А.Чудновский, Е.Б.Шадрин// Научное приборостроение. — 1991. — Т. 1. — N 3. — С. 73-79.

Проводится теоретическое и экспериментальное исследование факторов, определяющих дифракционную эффективность отражательных интерференционных структур, содержащих слой диоксида ванадия, и указываются пути ее повышения. Библ. — 10 назв. Ил. — 6.

И.В.Соколова, И.А.Хахаев, Ф.А.Чудновский, Е.Б.Шадрин
(Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, С.-Петербург)

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ВАНАДИЯ

С целью определения максимально возможных значений дифракционной эффективности η структур на основе окиснованадиевых пленок (ОВП) и выявления характерных тенденций в зависимостях η от параметров структур и условий считывания голограмм были проведены численные расчеты дифракционной эффективности для трех типов интерференционных структур, содержащих слой диоксида ванадия [1]. Типы структур приведены на рис. 1.

Расчеты проводились для простейшей голограммы, а именно, периодической системы чередующихся полос, в которых пленка VO_2 находится в полупроводниковом и металлическом состояниях, соответственно. Таким образом, в структуре формируется одномерная дифракционная решетка. Такая решетка, согласно [2], описывается комплексной функцией отражения $\hat{r}(x)$, которая может быть представлена в виде

$$\hat{r}(x) = \begin{cases} r_1 \exp(i\varphi_1) & n D \leq x < (n + 1) D / 2 ; \\ r_2 \exp(i\varphi_2) & (n + 1) D / 2 \leq x < (n + 1) D , \end{cases}$$

где r_1 и r_2 — амплитудные коэффициенты отражения структуры, соответствующие участкам с различными состояниями пленки VO_2 ; φ_1 и φ_2 — соответствующие значения фазы отраженного света; D — период решетки, $n = 0, 1, 2, \dots$ (рис. 2).

Чтобы определить дифракционную эффективность такой решетки, необходимо согласно [3], вычислить квадрат модуля нормированной комплексной амплитуды возмущения в соответствующей первому порядку дифракции точке Фурье-плоскости.

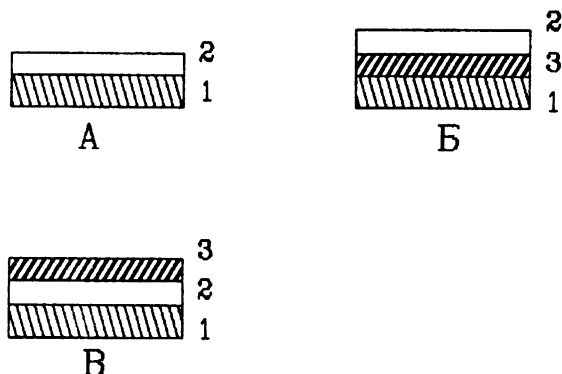


Рис. 1. Типы структур, для которых рассчитывалась дифракционная эффективность: А - пленка VO_2 на алюминии; Б - слой диэлектрика под пленкой VO_2 ; В - слой диэлектрика на пленке VO_2 . 1 - полубесконечный алюминий; 2 - пленка VO_2 ; 3 - пленка диэлектрика

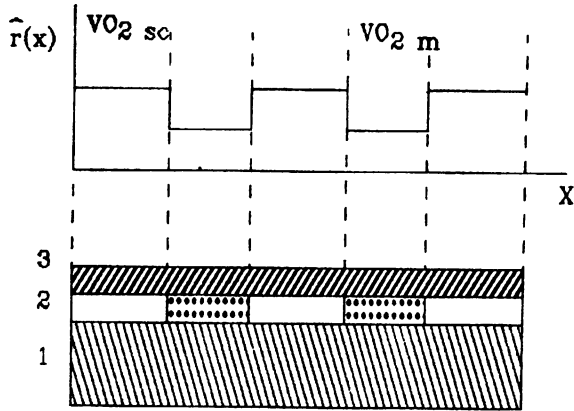


Рис. 2. Схематическое изображение дифракционной решетки, сформированной в пленочной структуре, и вид комплексной функции отражения такой решетки: 1 - подложка (алюминий); 2 - слой VO_2 с участками в полупроводниковом (sc) и металлическом (m) состояниях; 3 - слой диэлектрика

Амплитуда возмущения в Фурье-плоскости $U(\omega)$, по определению [3], вычисляется из выражения

$$U(\omega) = \int \hat{r}(x) \exp(-i\omega x) dx =$$

$$= \sum_n \left[r_1 \int_{nD/2}^{(n+1)D/2} \exp(-i\omega x) dx + r_2 \int_{(n+1)D/2}^{(n+2)D/2} \exp(-i\omega x) dx \right].$$

После очевидных преобразований (с учетом того, что для первого порядка дифракции $\omega = 2\pi/D$), получаем

$$I_1 = |U(\omega = 2\pi/D)|^2 \sim (R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(\Delta\varphi)).$$

Нормировка на интенсивность падающего света приводит к выражению

$$\eta = (1/16)(R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(\Delta\varphi)). \quad (1)$$

Нормировочный коэффициент $1/16$ используется в [3, 4] при вычислениях дифракционной эффективности чисто амплитудной решетки ($\Delta\varphi = 0$). Как показывает анализ, такое введение вполне оправдано в большинстве случаев считывания описываемых решеток.

В (1) R_1 и R_2 — величины отражательных способностей участков структуры, соответствующих различным состояниям пленки VO_2 , $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

Для окиснованадиевых структур значения R_1 и R_2 легко могут быть измерены, например, по схеме, описанной в [5].

В то же время измерение $\Delta\varphi$ представляет некоторые трудности, поскольку все приемники света реагируют на его интенсивность. Однако существуют способы, позволяющие перевести фазовую модуляцию света в изменение его интенсивности. Одним из таких способов является описанный в [6] метод интерферометрического клина.

Клин из прозрачного диэлектрика (например, SiO_2) наносится на поверхность окисной пленки. При освещении монохроматическим светом от протяженного источника на поверхности клина можно наблюдать полосы равной толщины. Полосы возникают при тех толщинах материала клина, которые удовлетворяют условию [7]

$$\delta = (2hn + \varphi' \lambda / 2\pi) \cos\theta_r + \lambda / 2, \quad (2)$$

где δ — разность хода; h — геометрическая толщина клина; n — показатель преломления материала клина; θ_r — угол преломления в клине; λ — длина волны падающего света; φ' — сдвиг фазы световой волны на границе клина с окисной пленкой.

При локальном разогреве отдельного участка окисной пленки вследствие изменения оптических констант при фазовом переходе [7] на границе окисной пленки и диэлектрического клина возникает дополнительный фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, значение которого определяется по формулам [2]:

$$\Delta\varphi = \varphi'_s - \varphi'_m;$$

$$\text{tg } \varphi'_s = (2k_{fs}n \cos\theta) / (n_{fs}^2 + k_{fs}^2 - n^2 \cos^2\theta);$$

$$\text{tg } \varphi'_m = (2k_{fm}n \cos\theta) / (n_{fm}^2 + k_{fm}^2 - n^2 \cos^2\theta).$$

Здесь n_f и k_f — оптические константы окисной пленки; θ — угол падения света на границу диэлектрика и окисной пленки; индексы s и m относятся к полупроводниковому и металлическому состояниям, соответственно.

Для "темной" полосы условие (2) имеет вид

$$\delta = (2hn + \varphi' \lambda / 2\pi) \cos\theta_r + \lambda / 2 = k \lambda / 2,$$

где k — целое число.

Следовательно, на нагретом участке по сравнению с ненагретым толщина клина, соответствующая данной полосе, изменяется на величину Δh :

$$\Delta h = \Delta\varphi \lambda / (4\pi n).$$

Соответствующий сдвиг полос в плоскости клина составит

$$\Delta = \Delta h / \gamma = \Delta\varphi \lambda / (4\pi n \gamma),$$

где γ — угол клина.

Таким образом, по наблюдаемому сдвигу полос в плоскости клина может быть определено значение $\Delta\varphi$ и оценена дифракционная эффективность.

С другой стороны, зная значение $\Delta R = R_1 - R_2$ и измерив $\Delta\varphi$ на клине с известными n и γ , можно оценить изменения показателя преломления и коэффициента экстинкции окисной пленки при фазовом переходе.

Эксперимент по измерению фазового сдвига $\Delta\varphi$ был реализован следующим образом.

Клин из SiO_2 наносился на образец пленки вакуумным напылением. Образец с нанесенным клином помещался в приставку зеркального отражения ПЗО-1. Схема конструкции приставки показана на рис. 3.

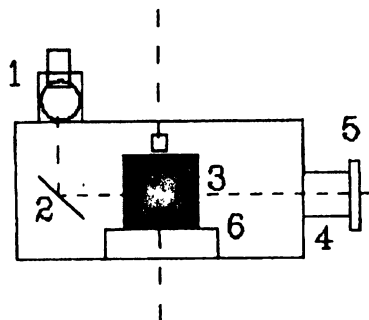


Рис. 3. Схема наблюдения интерференционных полос равной толщины в интерферометре на клине: 1 - источник света (лампа накаливания с матовым светофильтром); 2 - зеркало; 3 - образец окисной пленки с нанесенным на него диэлектрическим клином; 4 - выходное отверстие приставки ПЗО-1; 5 - интерференционный светофильтр 630 нм; 6 - держатель образца с трехкоординатной юстировкой

Приставка сконструирована так, что при вращении источника света с некоторой угловой скоростью образец вращается с угловой скоростью вдвое меньшей, поэтому отраженный от образца свет все время попадает в выходное отверстие приставки, на котором установлен интерференционный светофильтр, вырезающий одну длину волны.

При наблюдении в плоскости клина полос равной толщины можно, изменяя с помощью приставки угол падения света на образец, менять расстояние между полосами (см. формулу (2)). Если же произвести локальный нагрев образца, можно наблюдать сдвиг интерференционных полос в нагретой области (рис. 4). Величина сдвига оценивается визуально по отношению к расстоянию между полосами.

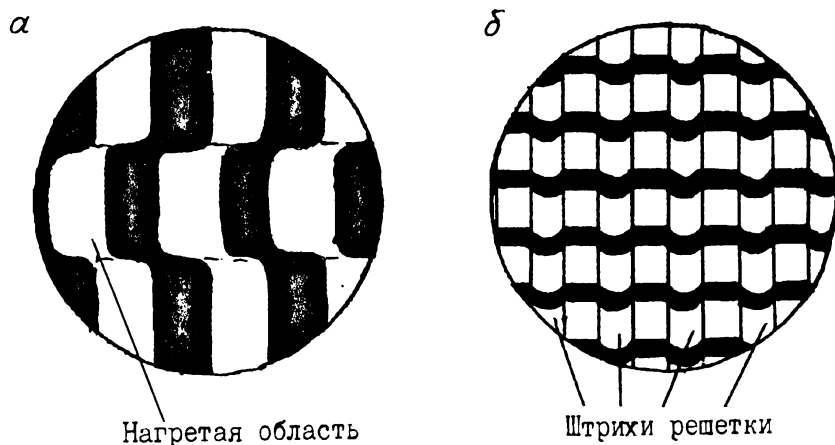


Рис. 4. Вид интерференционных полос и фазового сдвига на диэлектрическом клине (а) и в интерференционном микроскопе (б)

Далее, при нанесении на ОВП регулярной структуры из чередующихся участков в низко- и высокотемпературной фазе (т. е. при записи на структуру дифракционной решетки) для измерения величины фазового сдвига $\Delta\rho$ можно использовать интерференционные микроскопы типа МИИ-4 или МИИ-11.

При подстановке в формулу (1) значения $\Delta\rho$, измеренные в микроскопе МИИ-4, и значения R_1 и R_2 , измеренные для ряда образцов окиснованадиевых структур, полученных окислением металлического ванадия на воздухе (ФТИРОС), были рассчитаны значения η и получены значения около 1.5 - 1.6 % на длине волны 1 мкм, что хорошо совпадает с результатами независимых измерений η [5].

Кроме того, было проведено сравнение значений η , получаемых по формуле (1), с результатами прямого расчета интенсивностей Фурье-компонент комплексной функции отражения, которые дают интенсивности главных дифракционных максимумов. Получено полное совпадение результатов. При расчетах использовались данные по оптическим свойствам металлов и диэлектриков из [8, 9].

Таким образом, установлена однозначная корреляция между значениями отражательных способностей, глубиной модуляции фазы отраженного света и дифракционной эффективностью решеток, записанных на окиснованадиевых структурах.

Для структуры типа А (см. рис. 1) была рассчитана зависимость дифракционной эффективности η от толщины пленки и длины волны считывания. Топограмма полученной поверхности приведена на рис. 5.

Для структур типа Б и В рассчитывались зависимости дифракционной эффективности от толщины диэлектрического слоя для различных длин волн и толщин пленки VO_2 . Характерный вид этих зависимостей приведен на рис. 6.

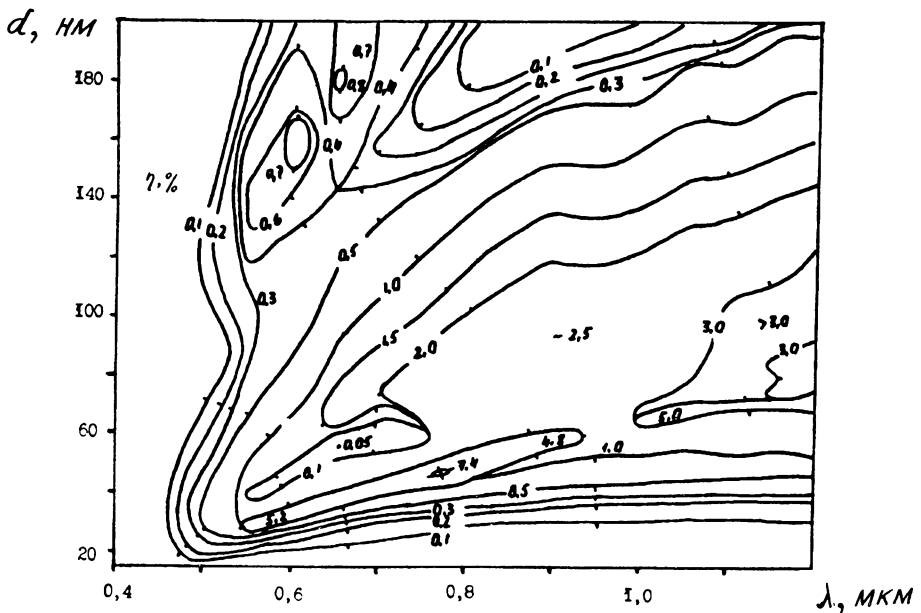


Рис. 5. Поверхность дифракционной эффективности для структуры типа А. Показаны срезы зависимости $\eta(d, \lambda)$, соответствующие уровням $\eta = \text{const}$

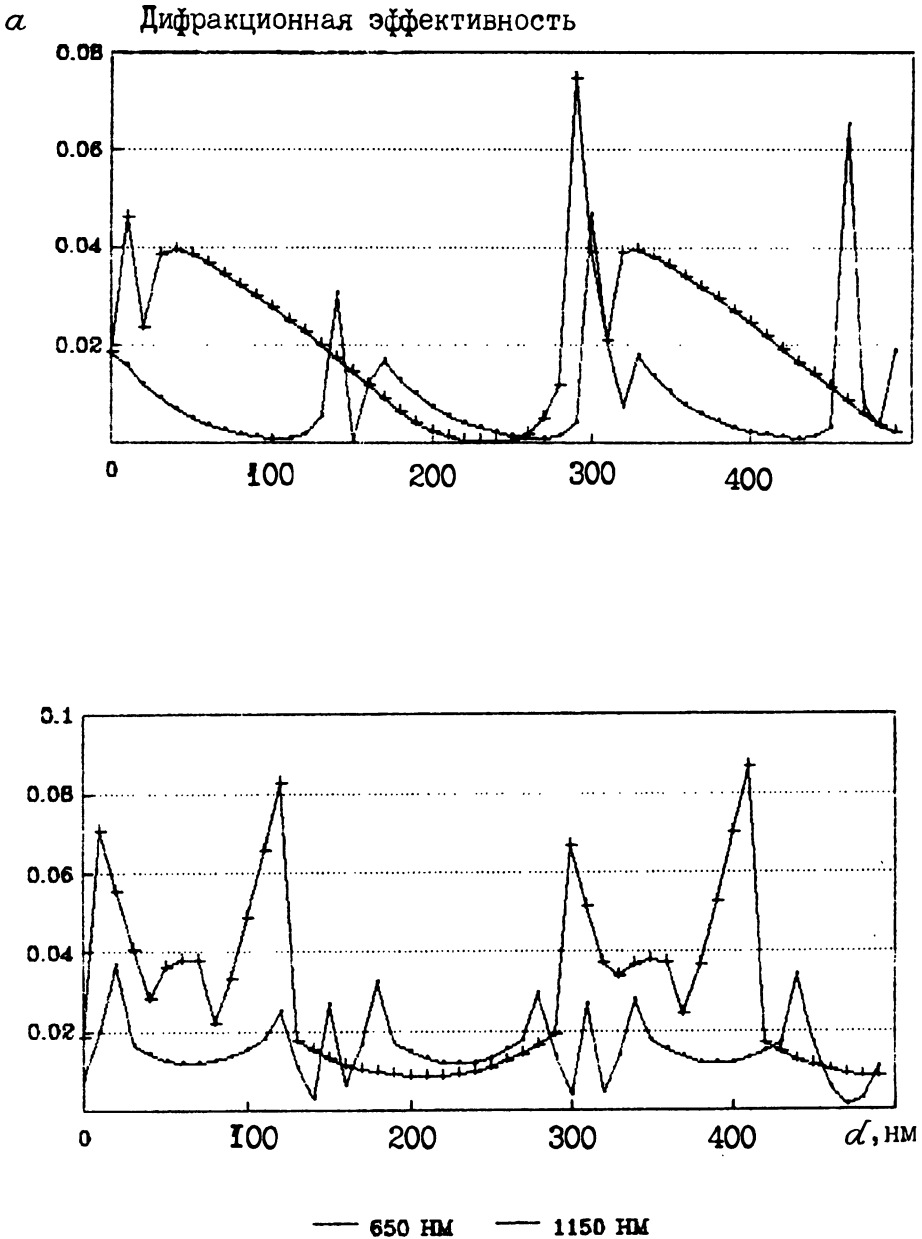


Рис. 6. Зависимости дифракционной эффективности для структур типа Б (а) и типа В (б) от толщины слоя диэлектрика на длинах волн 650 и 1150 нм. Толщина слоя VO_2 60 нм, материал диэлектрика ZrO_2

Отметим, что указанные зависимости имеют резкие экстремумы, что связано с резкими изменениями значения и знака параметра $\Delta\varphi$ (см. формулу (1)) при изменении толщин слоев в интерференционной структуре, что характерно для систем, содержащих поглощающие слои [10]. Значения η в максимумах могут достигать 8 - 10%.

При переходе в инфракрасную область спектра имеет место тенденция общего повышения η до значений 3 - 5% в широких диапазонах изменения параметров структур. Это означает, что такие значения η могут быть достаточно надежно получены в реальных системах.

Таким образом, пути повышения дифракционной эффективности регистрирующих сред на основе диоксида ванадия состоят в следующем:

1) синтез на металлическом подслое стехиометричных пленок VO_2 с необходимым соотношением между шириной и наклоном петли оптического гистерезиса;

2) введение в структуру дополнительных диэлектрических слоев со строго заданными оптическими характеристиками;

3) считывание голограмм в области длин волн, больших 1 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. Л., Наука, 1979.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. -М.: Наука, 1970.
3. Roach W.R.// Appl. Phys. Letters.-1971.-V. 9.-N 11.-P. 453 - 455.
4. Balberg I., Trokman S.// J. of Applied Physics.-1975.- V. 46.- N 5.- P. 2111 - 2119.
5. Олейник А.С., Хахаев И.А.// Письма в ЖТФ.-1990.- Т. 16.- В. 22.- С. 5 - 10.
6. Шадрин Е.Б., Янута А.Н.//Тез. докл. II-й Всесоюзн.конф. "Физика окисных пленок". Петрозаводск. 1987.Т. 2. С. 71.
7. Verleur H.W., Barker A.S., Berglund C.N.// Phys. Rev.-1968.-V. 172.- N 3. -P. 788 - 795.
8. Мотулевич Г.П.//УФН.-1969.-Т. 97.-В 2.- С. 211 - 256.
9. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. -Л.: Машиностроение, 1973.
- 10 Розенберг Г.В. Оптика тонкослойных покрытий. -М.: Физматгиз, 1958.

Рукопись поступила 11.07.91