

**Анализ возможности электронно-лучевого синтеза пространственно-частотных фильтров на реверсивных окиснованадиевых структурах (РОВС)/ И.В.Соколова, И.А.Хахаев, Ф.А.Чудновский, Е.Б.Шадрин// Научное приборостроение.- 1992.- Т.2.- N2.- С. 9-14.**

Проведен анализ возможности синтеза пространственно-частотных фильтров (ПЧФ) на реверсивных окиснованадиевых регистрирующих средах при их экспонировании электронным пучком. Приведены результаты решения тепловой задачи, описывающей разогрев регистрирующей среды при воздействии электронным пучком. Показано, что возможен синтез ПЧФ в реальном времени при использовании прожектора электронного микроскопа. Проведены оценки энергии электронного пучка, плотности тока, максимальной пространственной частоты и голографической дифракционной эффективности синтезированного фильтра. Библ. - 18 назв. Ил. - 7.

---

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

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СИНТЕЗА ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ НА РЕВЕРСИВНЫХ ОКИСНО-ВАНАДИЕВЫХ СТРУКТУРАХ (РОВС)

Для задач оптической обработки существует проблема синтеза пространственно-частотных фильтров (ПЧФ) [1]. Синтез может осуществляться как аналоговым (голографическим), так и цифровым способом.

Голографическая запись ПЧФ на окисно-ванадиевых структурах хорошо исследована как теоретически [2, 3], так и экспериментально [4, 5]. Поскольку принцип действия РОВС основан на фазовом переходе *полупроводник-металл* (ФПМП) в диоксиде ванадия, который может быть вызван не только светом, но и другим внешним воздействием, в частности, электронным лучом [6], представляет интерес исследование возможности цифрового синтеза ПЧФ на РОВС при помощи электронного луча.

В данной статье определяются требования к энергиям и плотностям тока электронного пучка, оцениваются пространственные частоты и время записи ПЧФ, а также дифракционная эффективность получаемых фильтров.

Как известно [4], разрешающая способность при оптической записи ПЧФ на РОВС может достигать  $1000 \text{ мм}^{-1}$ . Для того, чтобы обеспечить не меньшую разрешающую способность при записи ПЧФ с помощью электронного пучка, необходимо использовать луч с энергией порядка 25 кэВ. Однако луч такой энергии вызывает деградацию окисной пленки, связанную с потерей кислорода и исчезновением ФПМП в облученных участках пленки [6]. Как показали эксперименты [7, 8], использование защитных покрытий из диэлектриков не дает положительного эффекта, поскольку диэлектрическое покрытие не обеспечивает эффективного стока заряда электронного пучка.

С другой стороны, использование защитного металлического покрытия на рабочей поверхности РОВС (т. е. на поверхности, с которой производится оптическое считывание ПЧФ) приводит к ухудшению эффективности модуляции считывающего излучения [9].

Таким образом, при синтезе ПЧФ с помощью электронного пучка предлагается использовать геометрию, в которой считывающее излучение и электронный луч падают на структуру с разных сторон. Металлическое защитное покрытие в этом случае наносится с нерабочей стороны РОВС, а считывание синтезируемого фильтра производится со стороны прозрачной подложки (структура "обратного" типа) (рис. 1). Следует отметить, что такие структуры применяются в термохромных индикаторах на основе  $\text{VO}_2$  [10]. Основное тепловыделение происходит в подложке.

Как показывает оценка глубины проникновения электронного луча, определяемой согласно эмпирической формуле [11],

$$l_s = 10^{-5} E^{1.4} / \rho,$$

где  $l_2$  — глубина проникновения, мкм;  $E$  — энергия луча, эВ;  $\rho$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>, для эффективного торможения электронного луча с энергией около 25 кэВ в слое типичного металла (Ag, Ni, Al) необходима толщина слоя от 1.5 до 5.5 мкм.

Анализ соответствующей тепловой задачи [12] показывает, что при такой толщине слоя металла тепловой профиль, связанный с торможением электронного луча в защитном слое, расплывается за счет теплопроводности, и в плоскости рабочего слоя РОВС невозможно обеспечить эффективную модуляцию оптических свойств.

В связи с этим представляет интерес вариант РОВС с тонким (около 0.1 мкм) металлическим слоем, играющим роль зеркала, усиливающего модулирующие свойства РОВС [13] и с торможением электронного пучка в толстой подложке.

При синтезе ПЧФ с помощью электронного пучка возможны два варианта воздействия. Первый вариант состоит в нанесении простейших линейных фильтров через маску лучом достаточно большого сечения (параллельный способ записи). Второй вариант состоит в последовательном нанесении отдельных элементов фильтра при воздействии сильно сфокусированным пучком с малой плотностью тока. Первый вариант может быть реализован с использованием электронного прожектора стандартного кинескопа (ускоряющее напряжение 12 кВ, ток луча ~ 1 мА), в то время как второй вариант требует использования прожектора электронного микроскопа (ускоряющее напряжение ~ 25 кВ, ток луча ~ 100 нА). При расчетах было принято, что РОВС находится в режиме памяти, т. е. при температуре, соответствующей максимальному перепаду оптических свойств внутри петли оптического гистерезиса. Для перевода отдельных участков окисной пленки ванадия в новое состояние необходим кратковременный нагрев этих участков на величину  $\Delta T$ , которая определяется температурным ходом прямой ветви петли гистерезиса. После прекращения воздействия оптические свойства будут изменяться в соответствии с ходом обратной ветви петли гистерезиса, и их стационарные значения установятся при температуре стабилизации (рис. 2). При нагреве участка пленки на величину  $\delta T < \Delta T$  произойдет проход по прямой ветви, а при прекращении

воздействия — возврат к температуре стабилизации в соответствии с одной из частных петель гистерезиса. В случае повторного слабого нагрева произойдет изменение свойств, соответствующее новой частной петле (рис. 3).

Для параллельного варианта записи фильтра проведен анализ разрешающей способности и дифракционной эффективности в случае маски, представляющей собой двумерную сетку с квадратными окнами размером 40 мкм и промежут-

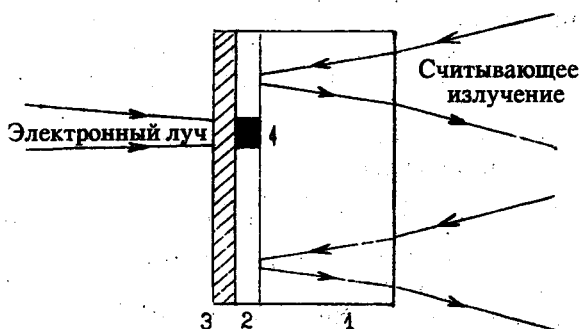


Рис. 1. Геометрия записи пространственно-частотного фильтра на РОВС с использованием электронного луча: 1 — прозрачная "полубесконечная" подложка; 2 — слой  $\text{VO}_2$  (~ 100 нм); 3 — защитный металлический слой (~ 100 нм); 4 — экспонируемая область

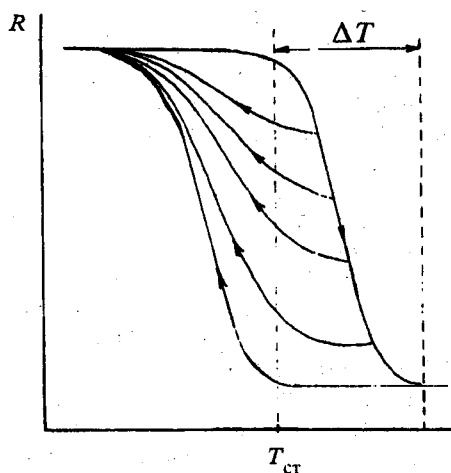


Рис. 2. Петля гистерезиса отражательной способности РОВС и система частных петель для различных интервалов  $\Delta T$

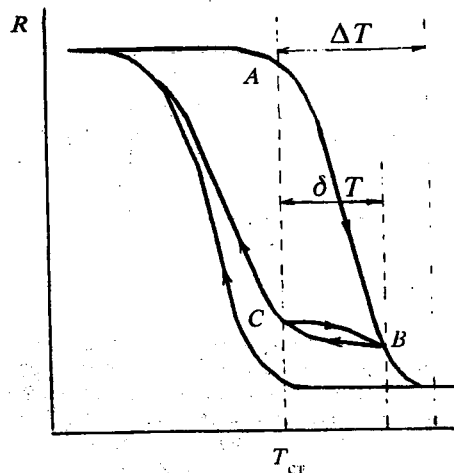


Рис. 3. Изменение отражательной способности при нагреве структуры на  $\Delta T$  и повторном нагреве на ту же величину:  $AB$ —проход по прямой ветви от температуры стабилизации ( $T_{ст}$ ) до  $T_{ст} + \Delta T$ ;  $BC$ —возврат по частной петле до температуры стабилизации;  $CA$ —новый нагрев на величину  $\Delta T$

ком между ними 10 мкм. В этом случае на РОВС формируется двухмерное регулярное распределение оптических свойств, на котором может наблюдаться дифракция считывающего излучения, а дифракционная эффективность может быть измерена стандартными методами [14].

Для последовательного варианта проведен аналогичный анализ в случае фокусировки электронного пучка в пятно диаметром от 1 до 10 мкм.

При расчетах использованы тепловые и оптические параметры для подложки из слюды толщиной 100 мкм и бесконечной по сравнению с областью записи площадью. Величина  $\Delta T$  принималась равной 10 К.

Процедура расчета состояла из двух этапов. На первом этапе для типичных плотностей тока, создаваемых электронным прожектором каждого типа, рассчитывалось время, необходимое для подъема температуры подложки в облученном участке на величину  $\Delta T$ , что связано с необходимостью обеспечения максимальной модуляции оптических свойств окисной пленки.

На втором этапе по рассчитанному времени нагрева с использованием решений нестационарного уравнения теплопроводности [12] вычислялась температура подложки на различных расстояниях от края нагреваемого участка, т. е. температурный профиль теплового распределения, образованный за время действия электронного пучка. При этом предполагалось, что передача тепла от подложки к пленке двуокиси ванадия происходит за время много меньшее, чем время нагрева облученного участка подложки на величину  $\Delta T$  (ввиду малой массы области пленки над облученным участком подложки), и распределение температур в пленке  $VO_2$  совпадает с распределением температур в подложке.

Отметим, что эти два варианта записи существенно отличаются по методике расчета теплового профиля, поскольку в параллельном варианте записи линейные размеры нагреваемого участка (40 мкм) существенно превышают

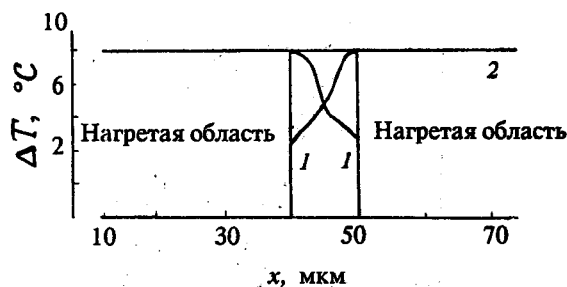


Рис. 4. Температурные распределения, получаемые при нанесении ПЧФ через маску: 1 — температурный профиль от одной нагретой области (длительность импульса  $\tau = 220$  мкс, диаметр пучка 1 мм); 2 — результирующий профиль от двух соседних областей

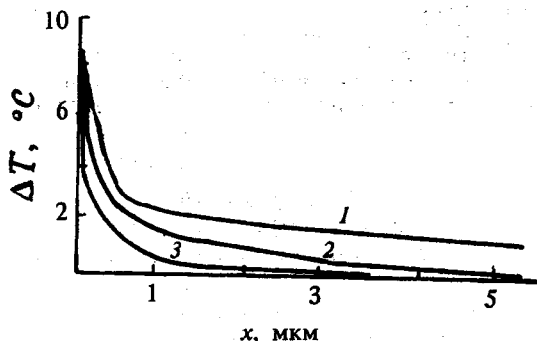


Рис. 5. Температурные распределения, получаемые при синтезе ПЧФ при последовательной записи: 1 —  $\tau = 4$  мкс,  $R_0 = 5$  мкм; 2 —  $\tau = 0.4$  мкс,  $R_0 = 1.5$  мкм; 3 —  $\tau = 40$  нс,  $R_0 = 0.5$  мкм

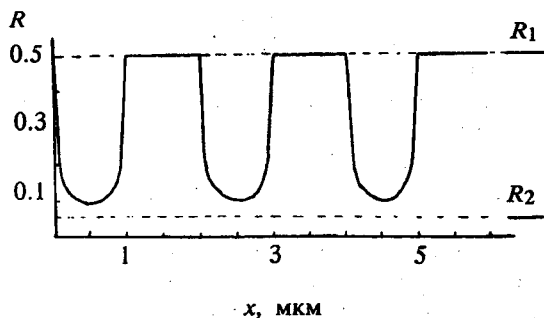


Рис. 6. Зависимость отражательной способности от координаты в одномерном ПЧФ

глубину проникновения луча в подложку ( $l_2 = 3+6$  мкм), а в случае последовательной записи нагретая область подложки представляет собой цилиндр высотой  $l_2$  и диаметром от 1 до 10 мкм. Результаты расчетов полученных тепловых и оптических профилей приведены на рис. 4—6.

На рис. 4 представлены результаты расчетов теплового распределения при записи фильтра через описанную выше маску. Показаны температурные профили на границе окисной пленки с подложкой, связанные с растеканием тепла за время действия луча от нагретых областей в промежутки между ними. Показано также результирующее тепловое распределение, получающееся при суммировании воздействий от соседних облученных участков. В режиме параллельной записи при использовании данной маски за время действия луча происходит полное выравнивание теплового распределения и, следовательно, никакой модуляции считывающего излучения не происходит. Таким образом, данный способ синтеза пространственно-частотного фильтра представляется перспективным.

На рис. 5 представлены аналогичные результаты для последовательного способа синтеза. При определении времени засветки каждого элемента фильтра учтено воздействие соседних точек, из которых образуются штрихи дифракционной решетки.

На рис. 6 представлена зависимость отражательной способности РОВС от координаты для ПЧФ, представляющего собой одномерную решетку. Толщина слоя  $\text{VO}_2$  в данной структуре составляет 56 нм. Минимальный период такого фильтра определяется из соотношения

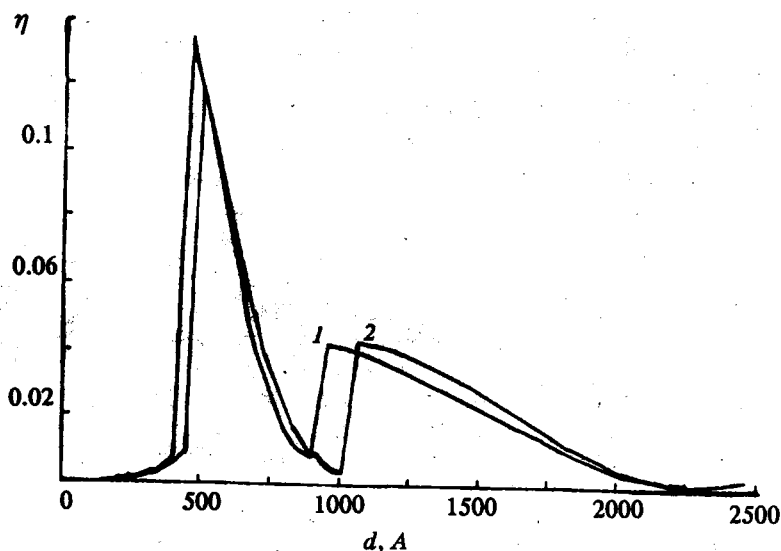


Рис. 7. Зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  от толщины слоя  $VO_2$  в структуре обратного типа для двух подложек: 1—слюда ( $n = 1.50$ ); 2— $ZrO_2$  ( $n = 2.00$ )

$$d_{\min} = k \cdot R_0,$$

где  $k$  — коэффициент, определяемый допустимыми потерями глубины модуляции оптических свойств РОВС;  $R_0$  — радиус электронного пучка на поверхности подложки. При малых периодах уменьшение глубины модуляции связано с распространением тепла из нагретой лучом области и соответствующим изменением оптических свойств РОВС (см. рис. 5).

Следует отметить, что нелинейный характер передаточной функции РОВС при малых уровнях воздействия ( $\delta T \ll \Delta T$ ) положительно сказывается на результирующем оптическом профиле записываемого фильтра, повышая отношение сигнал/шум и глубину полезной модуляции.

Для оценки максимальной дифракционной эффективности полученного ПЧФ удобно воспользоваться соотношением, выведенным в работе [15]:

$$\eta = (R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 \cdot R_2} \cos(\Delta\varphi)) / 16,$$

где  $\eta$  — дифракционная эффективность;  $R_1$  и  $R_2$  — величины отражательной способности РОВС до и после ФПМП в слое  $VO_2$ ;  $\Delta\varphi$  — разность фаз для света, отраженного от участков с различными оптическими свойствами.

На рис. 7 показаны зависимости дифракционной эффективности одномерного ПЧФ на длине волны 1150 нм от толщины слоя  $VO_2$  для двух материалов подложек. При расчетах использовались данные по оптическим свойствам материалов, приведенные в работах [16-18].

Таким образом, можно сделать следующие выводы. При использовании стандартного электронного микроскопа на РОВС может быть синтезирован пространственно-частотный фильтр с периодом около 5 мкм ( $R_0 = 0.5$  мкм,

$k = 10$ ) и дифракционной эффективностью более 4 %. Поскольку время записи одной точки составляет в этом случае 40 нс, фильтр площадью  $1 \text{ мм}^2$  может быть синтезирован за время около 10 мс, т. е. синтез ПЧФ может осуществляться в реальном времени. При уменьшении параметра  $k$  до 2 может быть реализован ПЧФ с частотой до 1000 лин/мм, однако в этом случае время синтеза возрастает до 100 мс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Kaura M. A., Rhodes W. T.* // *Applied Optics.* - 1990. - V. 29, N 17. - P. 2587-2593.
2. *Капаев В. В., Тимеров Р. Х.* // *Автометрия.* - 1978. - N 2. - С. 17-22.
3. *Капаев В. В.* // *Автометрия.* - 1980. - N 5. - С. 110-112.
4. *Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А.* Фазовый переход металл—полупроводник и его применение. - Л.: Наука, 1979.
5. *Капаев И. Ф., Малиновский В. К., Рябова Л. А., Сербинов И. А.* // *Микроэлектроника.* - 1975. - Т. 4. - Вып. 4. - С. 336-339.
6. *Шадрин Е. Б., Янута А. Н.* // 2-я всесоюзная конференция "Физика окисных пленок": Петрозаводск. 1987. Тез. докл. - Т. 2. - С. 71.
7. *Мясников Д. А., Никулин Е. И., Чудновский Ф. А., Шадрин Е. Б.* // *ЖТФ.* - 1988. - Т. 58. - Вып. 12. - С. 2411-2413.
8. *Бочоришвили Н. Ф., Введенский В. Д., Гербштейн Ю. М. и др.* // *ЖТФ.* - 1989. - Т. 59. - Вып. 10. - С. 83-87.
9. *Розенберг Г. В.* Оптика тонкослойных покрытий. - М.: Физматгиз, 1958.
10. *Григорьев М. И., Олейник А. С., Смоляков В. Ф.* // *Электронная промышленность.* - 1982. - Вып. 5-6. - С. 108-111.
11. *Бронштейн И. М., Фрайман Б. С.* Вторично-электронная эмиссия. - М.: Мир, 1972.
12. *Пехович А. И., Жидких В. М.* Расчеты теплового режима твердых тел. - Л.: Энергия, 1968.
13. *Захарченя Б. П., Мешковский И. К., Теруков Е. И., Чудновский Ф. А.* // *Письма в ЖТФ.* - 1975. - Т. 1. - Вып. 1. - С. 8-11.
14. *Олейник А. С., Хахаев И. А.* // *Письма в ЖТФ.* - 1990. - Т. 16. - Вып. 22. - С. 5-10.
15. *Соколова И. В., Хахаев И. А., Чудновский Ф. А., Шадрин Е. Б.* // *Научное приборостроение.* - 1991. - Т. 1, N 3. - С. 73-79.
16. *Verleur H. W., Barker A. S., Berglund C. N.* // *Phys. Rev.* - 1968. - V. 172, N 3. - P. 788-792.
17. *Мотулевич Г. П.* // *УФН.* - 1969. - Т. 97. - Вып. 2. - С. 211-256.
18. *Крылова Т. Н.* Интерференционные покрытия. - Л.: Машиностроение, 1973.

Рукопись поступила 05. 03. 92