

УДК 535.514.9

В. Н. Бельтюгов, С. Г. Проценко

(Новосибирск)

## ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОЛЯРИЗАТОР СВЕТА

Предложен тонкопленочный диэлектрический поляризатор света для анализа и контроля состояния поляризации. Действие поляризатора основано на установленном ранее явлении поляризационной анизотропии оптических характеристик диэлектрического слоя с гофрированными границами. В отличие от существующих тонкопленочных диэлектрических поляризаторов предложенный оптический элемент предназначен для работы при нормальном угле падения света.

Для контроля и анализа поляризации света в поляризационно-чувствительных оптических схемах применяются линейные поляризаторы. В качестве последних используют призмы из двулучепреломляющего материала с многослойным интерференционным покрытием, стопу пластин, поляризаторы на основе наведенного линейного дихроизма в органических пленках. Такие элементы обладают высоким пропусканием для выделяемой поляризации и значительным ослаблением ортогональной составляющей.

С появлением устройств оптоэлектроники возникли специфические требования к конструкции и технологии изготовления поляризатора, например, возможность изготовления в тонкопленочном исполнении, совместимость с технологией микроэлектроники, возможность изготовления в едином технологическом цикле с другими элементами. В то же время требования на оптические характеристики могут быть часто существенно ослаблены. Например, вполне допустимым является отношение коэффициентов пропускания для двух поляризаций  $10^{-1}$ — $10^{-2}$ . В качестве примера укажем на обсуждаемый в настоящее время вариант оптоэлектронного устройства параллельной обработки информации, в котором предполагается создание матрицы электрически управляемых модуляторов света, например, на пленках ниобата бария стронция, смещенных пространственно с матрицей пороговых фотоприемников [1]. Логический уровень электрического сигнала на каждом модуляторе считывается световым лучом и отображается в виде одного из состояний поляризации. Далее, селективный по состоянию поляризации пороговый фотоприемник преобразует интенсивность светового луча в электрический сигнал. Селективность по поляризации достигается размещением на пути луча поляризатора (например, типа Глана — Тейлора, многослойного интерференционного поляризатора или поляроида). Однако если речь идет об интегральной технологии изготовления таких устройств, например, в виде матриц большого числа модуляторов и фотоприемников, пространственно смещенных по световому каналу, поляризующие элементы объемной оптики не могут использоваться. В этом случае необходимы поляризаторы, допускающие тонкослойное исполнение. Тонкопленочный вариант делает возможным дифференциальное считывание светового сигнала в каждом канале двумя идентичными фотоприемниками, чувствительными к взаимно ортогональным состояниям поляризации света. Становится возможным последовательное расположение нескольких модуляторов и поляризаторов на единой оптической подложке для выполнения более сложных функций типа логического умножения или сложения. Кроме того, появляется возможность получить в едином

технологическом цикле законченное оптоэлектронное устройство, не требующее внешних объемных оптических элементов.

Из данных, известных по литературе, можно выделить некоторые конструкции поляризаторов, допускающие тонкослойное исполнение. Так, плоская решетка в виде полос хорошо проводящего в оптической области металла осуществляет избирательное по поляризации пропускание света, когда период расположения полос оказывается меньше длины волны света [2]. Для получения приемлемого контраста по поляризации период расположения полос должен быть существенно меньше длины волны  $\lambda$  света, например  $\sim 0,1\lambda$ .

Другая конструкция поляризатора основана на решетках типа жалюзи [2]. По сравнению с первым вариантом период расположения лент металла может быть несколько больше ( $\sim \lambda$ ), тем не менее практическое выполнение таких металлических структур для оптической области спектра представляет определенные сложности, так как требует специальных режимов технологической обработки и литографии высокого разрешения. Настоящая заметка посвящена созданию сравнительно простой конструкции тонкослойного диэлектрического поляризатора, предназначенного для работы при нормальном угле падения света.

Предлагаемое решение задачи основано на установленном явлении поляризационной селективности пропускания диэлектрического слоя с гофрированными границами. Ранее это было использовано при создании поляризационно-анизотропных лазерных зеркал [3]. Схема одного из вариантов поляризатора приведена на рис. 1, а. На поверхности подложки 1 из оптически прозрачного материала расположен слой диэлектрика 2. Одна или обе поверхности слоя выполнены в виде гофра 3, например, с прямоугольной формой полос. На рис. 1, б введены обозначения параметров. Здесь  $n_0$  — показатель преломления диэлектрического слоя,  $n_1, n_2$  — показатели преломления окружающих слой сред,  $d$  — период расположения гофр,  $\sigma$  — высота гофра,  $h$  — геометрическая толщина слоя диэлектрика. Далее будем предполагать, что обе поверхности слоя выполнены с одинаковым гофром. Принцип действия такого поляризатора состоит в следующем. Падающая электромагнитная волна  $J$  испытывает дифракцию на каждой из гофрированных поверхностей слоя. Обозначения  $J_s, J_p$  на рис. 1, а соответствуют направлению поляризации вдоль полос гофра и поперек. В результате дифракции помимо волн нулевого порядка возникают волны  $\pm 1$  порядков дифракции. При повторной дифракции волны дифракционных порядков дают вклад в волну нулевого порядка в прошедшем и отраженном от слоя пучках, в частности, при некотором выборе параметров слоя диэлектрика пропускание света может быть полностью заблокировано. Для рассматриваемого применения существенно, что этот эффект зависит от поляризации падающего света. Это может быть объяснено тем, что фазовый набег дифракционной волны в слое на полный проход различен для двух поляризаций, а следовательно, различен и коэффициент пропускания света гофрированным слоем. Для эффективной рабо-

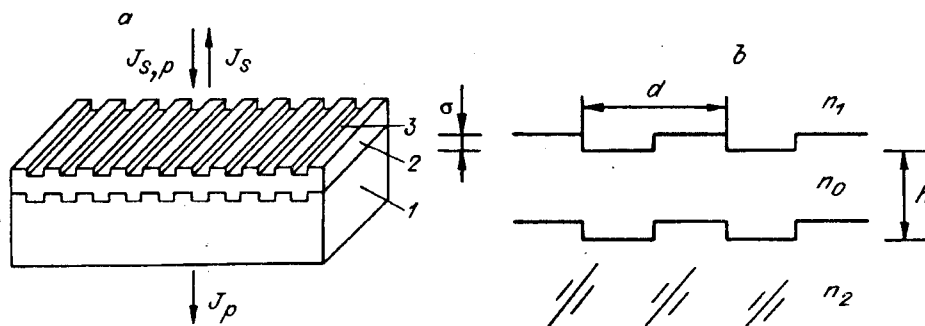


Рис. 1

ты поляризатора период  $d$  расположения гофр выбирается таким образом, чтобы отсутствовала дифракция в прошедшей и отраженной от слоя волнах. Для этого период  $d$  гофр и показатели преломления сред выбираются таким образом, чтобы удовлетворялось условие

$$\frac{\lambda}{n_0} < d < \frac{\lambda}{n_1}, \frac{\lambda}{n_2}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны падающего света.

Приведенные качественные соображения были подтверждены результатами численных расчетов пропускания диэлектрического слоя с гофрированными поверхностями в зависимости от поляризации падающего света. С этой целью решалась задача о дифракции плоской световой волны, падающей по нормали на гофрированный слой. Поля в слое и вне его искались в виде суперпозиции гармоник дифракционного поля. Для нахождения коэффициентов связи амплитуд гармоник по обе стороны от каждой гофрированной поверхности использовалось точное решение задачи о дифракции плоской волны на решетке в виде полос диэлектрика на границе раздела двух сред [4]. С учетом граничных условий на каждой поверхности слоя получалась система линейных уравнений относительно неизвестных амплитуд гармоник поля. Из общего числа гармоник в силу условия (1) только гармоники нулевого порядка являются распространяющимися в полупространствах, окружающих слой. При численном решении системы уравнений удерживалось конечное число гармоник, амплитуда поля которых затухает при увеличении расстояния до слоя. Количество учитываемых гармоник выбиралось таким образом, чтобы с высокой точностью выполнялся закон сохранения энергии. Отдельные результаты расчетов даны на рис. 2. Здесь приведены зависимости коэффициента пропускания по энергии от толщины  $h$  слоя диэлектрика. Сплошные кривые соответствуют  $S$ -поляризации, когда направление поляризации падающей волны совпадает с направлением полос гофра, штриховые —  $P$ -поляризации с ортогональным направлением положения поляризации. Длина волны падающего света  $\lambda = 633$  нм. Рис. 2,  $a$  соответствует следующим численным значениям параметров: показатель преломления слоя  $n_0 = 2,0$ , показатели преломления сред  $n_1 = 1, n_2 = 1,46$ , период гофра  $d = 0,38$  мкм, высота гофра  $\sigma = 0,02$  мкм, расстояние между полосами гофра равно ширине полос. Существенная особенность приведенных кривых — наличие области значений толщины  $h$  слоя, для которых коэффициенты пропускания двух поляризаций существенно различны. Так, при  $h = 0,14$  мкм коэффициент пропускания для  $P$ -поляризации составляет  $T_p = 0,96$ , одновременно для  $S$ -поляризации

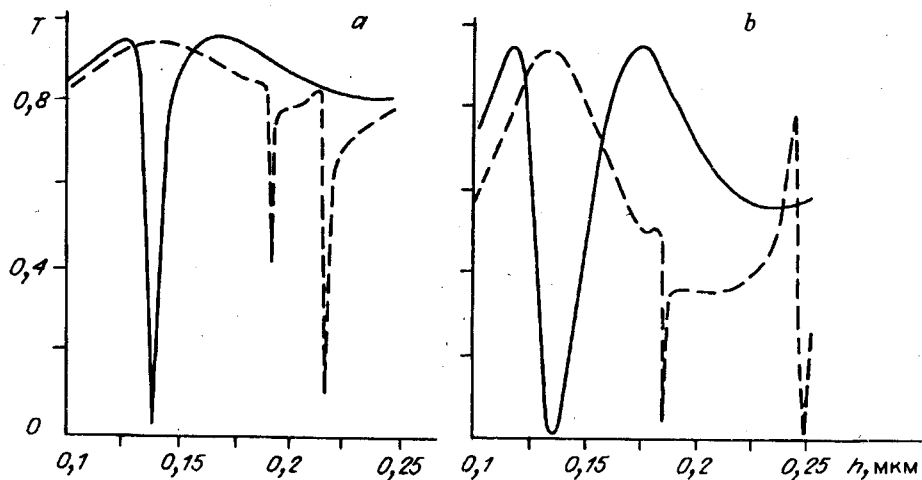


Рис. 2

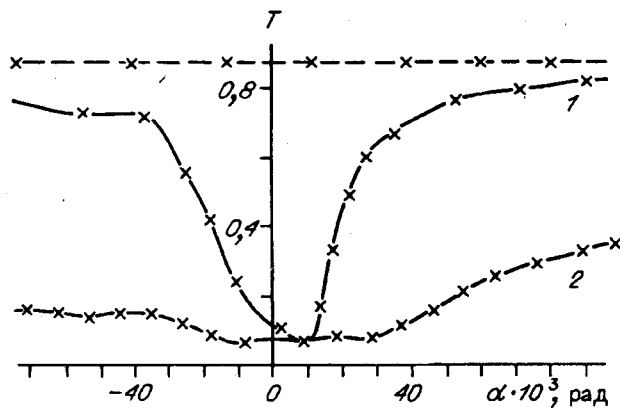


Рис. 3

$T_s = 0,02$ . При других значениях  $h$  также может быть получена значительная анизотропия коэффициента пропускания. Например, при  $h = 0,21$  мкм  $T_s = 0,84$  и  $T_p = 0,1$ . На рис. 2,  $b$  приведены результаты аналогичного расчета при других численных значениях параметров: показатель преломления диэлектрика  $n_0 = 3,0$ , период гофр  $d = 0,27$  мкм. В этом случае также получается значительная анизотропия на пропускание:  $T_s = 0,01$  и  $T_p = 0,92$  при  $h = 0,14$  мкм.

Для экспериментальной проверки предложенной конструкции были изготовлены образцы диэлектрического поляризатора. С этой целью на поверхности оптической подложки из плавленого кварца создавался гофр в виде периодически расположенных выступов в форме полос малого периода. Поверх гофра вакуумным методом наносился слой диэлектрика из сернистого цинка или двуокиси циркония. Контроль толщины слоя осуществлялся на рабочей длине волны по пропусканию света с поляризацией, направленной вдоль полос гофра. Для получения гофра на поверхности оптической подложки предварительно создавалась защитная маска из фоторезиста, которая получалась экспонированием слоя фоторезиста в поле двух скрещенных световых пучков от гелий-кадмиевого лазера. Далее в установке плазмохимического травления осуществлялся перенос изображения маски в поверхностный рельеф кварцевой подложки. У изготовленных образцов измерялся на рабочей длине волны  $\lambda = 633$  нм коэффициент пропускания для двух положений плоскости поляризации света, падающего по нормали и вблизи него. На рис. 3 приведены результаты таких измерений для образца с периодом гофр  $d = 0,32$  мкм и с покрытием из двуокиси циркония ( $n_0 = 1,98$ ). Здесь сплошные кривые соответствуют  $S$ -поляризации, штриховые —  $P$ -поляризации. Кривая 1 относится к случаю, когда отклонение падающего пучка от нормали происходит в плоскости, ортогональной к направлению полос гофра, кривая 2 соответствует отклонению пучка в плоскости, совпадающей с направлением полос гофра. Для света, падающего по нормали, коэффициенты пропускания для двух поляризаций равны  $T_p = 0,9$  и  $T_s = 0,05$ . Можно отметить, что поляризационная анизотропия в прошедшем свете

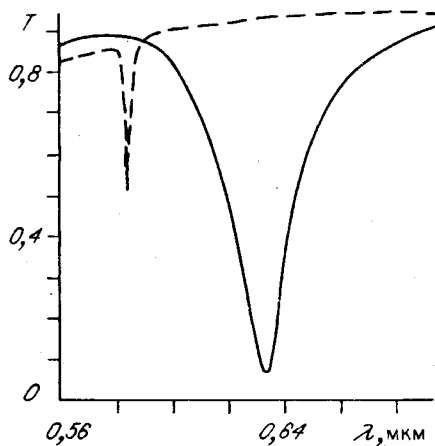


Рис. 4

сохраняется при отклонении направления падающего света от нормали не более  $\pm 0,01$  рад. Это накладывает ограничение на угловую расходимость светового пучка, которая для этого образца не должна превышать  $2 \cdot 10^{-2}$  рад. Кроме того, исследовалась зависимость коэффициента пропускания поляризатора от длины волны. Результаты для образца с периодом гофр  $d = 0,32$  мкм приведены на рис. 4. Можно отметить, что ширина области длин волн, в которой сохраняется высокое значение поляризационной анизотропии, не превышает 50 нм.

Таким образом, на основе диэлектрического слоя с гофрированными границами возможно создание тонкослойного поляризующего элемента. По сравнению с поляризующими структурами из металла технология создания гофрированных структур на поверхности диэлектрика может быть более простой. В то же время поляризационная эффективность у исследованных образцов вполне достаточна для ряда применений в устройствах оптоэлектроники. Целью дальнейших исследований может явиться поиск путей улучшения поляризационных и спектральных характеристик тонкослойного поляризующего элемента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Egorov V. M., Kostsov E. G. Integral optical digital computers // Appl. Opt.—1990.—29, N 8.—P. 1178.
2. Шестопапов В. П., Кириленко А. А., Масалов С. А., Сиренко Ю. Н. Резонансное рассеяние волн. Т. 1: Дифракционные решетки. Ин-т радиофизики и электроники АН УССР.—Киев: Наук. думка, 1986.
3. Заявка 4785839/10. Поляризационно-селективное лазерное зеркало /В. Н. Бельтюгов, С. Г. Проценко, Ю. В. Троицкий.—Заявл. 24.01.90.
4. Botten I. C., Craig M. S., McPhedran R. C. et al. The dielectric lamellar diffraction grating // Opt. Acta.—1981.—28, N 3.—P. 413.

*Поступила в редакцию 31 марта 1993 г.*