

УДК 537.534.9: 535.843.312

ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК НА СЛОЯХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКОЛ

© 2007 г. М. Ю. Знаменский, Ф. А. Саттаров, канд. физ.-мат. наук

НПО "Государственный институт прикладной оптики", г. Казань

Предложены конструкции исходных структур голограммных дифракционных решеток на слоях халькогенидных стекол, позволяющие получить методом ионного травления качественные квазитреугольные профили штрихов указанных решеток в широком диапазоне пространственных частот.

Коды OCIS: 050.1950.

Поступила в редакцию 18.12.2006.

Важной технологической проблемой является получение голограммных дифракционных решеток (ГДР) с заданной рабочей спектральной областью. Здесь необходимо отметить два основных подхода к решению данной проблемы: выбор оптимальной симметричной формы профиля и глубины модуляции штрихов (отношение глубины профиля штрихов d к периоду штрихов Λ) ГДР; достижение необходимой асимметричной формы профиля штрихов. Исследования [1, 2] показали, что в пределах пространственных частот $600\text{--}3600\text{ мм}^{-1}$ используемая технология получения ГДР на слоях халькогенидных стекол (ХС) позволяет достичь глубины модуляции штрихов $0,35\text{--}0,45$, при этом формы профиля штрихов близки к синусоидальным или к модулю синуса. Для рабочей спектральной области $0,8\Lambda \leq \lambda \leq 1,7\Lambda$ эффективность подобных ГДР сравнима с эффективностью аналогичной нарезной решетки с оптимальной формой профиля штриха треугольной формы и достигает значений 70% в неполяризованном свете и 90% – в поляризованном. В области $0,2\Lambda \leq \lambda \leq 0,8\Lambda$ эффективность ГДР несколько ниже, пиковые эффективности составляют 30–50%, и, наконец, в области $\lambda \leq 0,2\Lambda$ (что для обычных частот ГДР соответствует УФ и ВУФ областям спектра) пиковые эффективности ГДР с симметричной формой профиля штрихов не превышают 30–40%.

Для увеличения эффективности ГДР в коротковолновой части спектра были использованы различные методы модификации симметричной формы профиля штрихов ГДР как в процессе записи интерференционной картины, так и после получения ГДР:

– фурье-синтез интерференционной картины [3],

– запись ГДР в сходящихся (контрнаправленных) пучках [4],

– ионное профилирование [5].

Эксперименты показали, что первый метод практически ограничивается возможностями интерференционного характера и пригоден лишь для небольших (менее 100 мм^{-1}) пространственных частот ГДР. Метод записи ГДР в сходящихся (контрнаправленных) пучках на слоях ХС малоприменим из-за большого показателя преломления ($n > 2,5$) и поглощения света этими стеклами на длинах волн используемых лазеров.

Более универсальным методом получения ГДР с "блеском" является ионное профилирование. Метод основан на ионном травлении нижележащего слоя, при котором исходная ГДР служит маской и обладает низкой скоростью ионного травления по сравнению с нижележащим слоем; ионный пучок направлен под большим углом к нормали подложки и нормально по отношению к штрихам решетки. Угол "блеска" получаемых ГДР в основном определяется углом падения ионов и отношением скоростей травления слоев.

Теоретически и экспериментально исследовались разные модели ионного травления структуры ГДР на слоях селенида мышьяка. Моделирование велось в рамках теории Картера о движении волнового фронта [6] с учетом экспериментально полученных зависимостей скорости травления от угла падения пучка ионов [7, 8]. Исследовались и сравнивались следующие модели ионного травления, отличающиеся конструкцией исходной структуры ГДР с симметричной формой профиля штрихов:

– прямое ионное травление материала исходной ГДР,

- использование дополнительного слоя (с низкой скоростью травления) при травлении вышележащего слоя (с большой скоростью травления),
- использование многослойных структур.

Результаты исследований по двум первым моделям изложены в работе [7]. Как при прямом ионном травлении, так и при использовании дополнительного слоя применяют коллимированный ионный пучок, падающий под углом α_n к нормали поверхности ГДР ($\alpha_n = \pi/2 - \alpha_{\text{бл}}$, где $\alpha_{\text{бл}}$ – необходимый угол “блеска” ГДР), и большие глубины исходного профиля ГДР с тем, чтобы в начале травления образовалась “теневая” область профиля, без травления, что соответствует выполнению условия $\alpha_n > \pi/2 - \arctg(\pi d/\Lambda)$, где d/Λ – глубина модуляции исходной ГДР. Дифракционная эффективность полученных ГДР с “блеском” сильно зависит от формы профиля исходных ГДР. Так, для первой модели предпочтительнее использование ГДР с формой профиля штрихов, близкой к модулю синуса, тогда как для модели травления с дополнительным слоем используются синусоидальные формы штрихов. Экспериментально получены качественные ГДР с эффективностью 55–70% и углами “блеска” 5°–15°.

Большие возможности с точки зрения получения треугольного профиля ГДР представляет использование многослойных структур с применением маскирующего покрытия. На рис. 1 представлены многослойная конструкция исходной ГДР с синусоидальным профилем штрихов и развитие формы профиля штрихов по методике работы [7] в зависи-

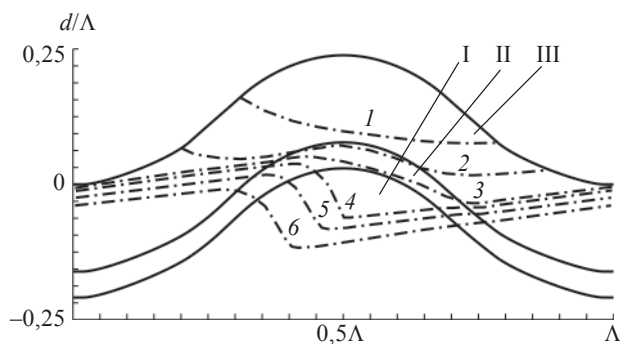


Рис. 1. Развитие формы профиля штрихов ГДР с двухслойным покрытием в зависимости от относительной длительности ионного травления. I – исходная ГДР с синусоидальным профилем штрихов (глубина модуляции 0,25), II – масочное покрытие с низкой скоростью травления ($V_I/V_{II} = 10$), III – покрытие с высокой скоростью травления ($V_{III} = V_I$), $d_{II}/d_{III} = 0,045\Lambda/0,17\Lambda$. Угол падения ионов 80°. 1 – относительная длительность ионного травления равна 100, 2 – 200, 3 – 400, 4 – 600, 5 – 800, 6 – 1000.

мости от длительности ионного травления. Здесь I – исходная ГДР на халькогенидном материале, II – масочное тонкослойное вакуумное покрытие с низкой скоростью травления (отношение скоростей травления $V_I/V_{II} = 10$), III – верхнее покрытие с высокой скоростью ионного травления ($V_{III} = V_I$). В расчетах предполагалось, что формы поверхностей II и III покрытия повторяют форму поверхности исходной ГДР, а формы зависимостей скоростей травления слоев [7] от угла аналогичны. Эволюцию профиля штрихов структуры, показанной на рис. 1, при ионном травлении можно условно разделить на три стадии:

- прямого ионного травления материала покрытия III решетки (относительное время ионного травления $H < 200$, за единицу принято время, необходимое для удаления толщины слоя, равной $\Lambda/1600$);

- барьерного травления ($200 < H \leq 400$), когда уже сформирован профиль ГДР с “блеском” с длиной рабочей грани штриха $a \leq 0,65\Lambda$, а дальнейшее формирование рабочей грани задерживается из-за конечной толщины материала покрытия II с малой скоростью травления;

- масочного травления ($H > 400$), когда происходит постепенное удаление масочного покрытия и интенсивное формирование квазиправильного профиля. Длина рабочей грани решетки достигает при этом значений 0,8 Λ –0,9 Λ . Угол “блеска” сформированной дифракционной решетки соответствует углу травления.

Моделирование показало, что для широкого диапазона изменения параметров (глубины и формы профиля, толщин и скоростей травления слоев II и III) исходной ГДР с многослойной структурой получаемая способом ионного травления форма профиля является более предпочтительной, чем форма профиля ГДР, получаемая прямым ионным травлением или с использованием дополнительного слоя.

Модель проверена экспериментально на ГДР с частотами 600–2400 мм⁻¹ с использованием ионных источников ИЛУ-3 (энергии ионов 20 кэВ) и ИЛО-200 (0,9–1,5 кэВ). В качестве слоя II были выбраны материалы, стойкие к ионному травлению и обладающие хорошей адгезией к ХС (хром, монооксид кремния); в качестве слоя III наиболее подходящими материалами являются As–Se, As–S, Ge–Se. Получены ионно-травленные ГДР размерами 100 × 100 мм с эффективностью 75–85% и углом “блеска” 4°–25°. Рассеянный свет при ионном травлении увеличивается не более чем в 1,3 раза. Для случая травления ГДР высокоэнергетическими ионами (установка ИЛУ-3, энергии ионов 20 кэВ) с необходимой коллимацией пучка ионов наблюдается хорошее совпадение расчетных профилей с эксперименталь-

ными. В частности, углы “блеска” ионно-травленых ГДР с большой точностью определяются выражением $\alpha_{\text{бл}} = \pi/2T - \alpha_{\text{тр}}$; при больших длительностях травления (относительные времена ионного травления $H = 500\text{--}1000$, см. рис. 1) форма образованного профиля ГДР остается неизменной.

При травлении низкоэнергетичными ионами (установка ИЛО-200, энергия ионов ~ 1 кэВ, конструкция ГДР на рис. 1) тоже достигалась асимметризация профиля, однако профили (особенно при использовании глубоких исходных симметричных профилей ГДР) оказывались с большими углами “блеска”, чем расчетные. Это происходит из-за большей расходимости пучка низкоэнергетических ионов и растравливания части теневой области слоя III. В этом случае для ионного травления оказывается более выгодным использование конструкции исходной ГДР без верхнего слоя III.

На рис. 2 показано, что при больших относительных временах ионного травления возможно получение квазиреугольного профиля ГДР. Особенностью результатов ионного травления в этом случае является то, что при прочих равных условиях для образования треугольного профиля необходимы большие глубины травления слоя I, чем в первом случае. Для уменьшения глубины протравленного ионным пучком слоя I необходимо уменьшение глубины модуляции исходной ГДР. При этом уменьшается эффект образования тени в начальной стадии травления и треугольный профиль ГДР образуется при меньших глубинах ионного травления. Эмпирически получено следующее выражение для оптимальной глубины исходной ГДР с квазисинусоидальным профилем:

$$d_{\text{исх}} = (0,4\text{--}0,5)\Lambda \text{tg}\alpha_{\text{бл}},$$

где $d_{\text{исх}}$ – глубина профиля исходной ГДР.

Эксперимент показал, что такая структура (рис. 2) позволяет способом ионного травления получить высококачественные ГДР с эффективными углами “блеска” $4^\circ\text{--}25^\circ$ и размерами 90×90 мм при использовании источников ионов типа ИЛО-200 (рабочая среда – аргон, энергия ионов $0,9\text{--}1,5$ кэВ). Углы травления определяются выражением

$$\alpha_{\text{тр}} = \pi/2 - \alpha_{\text{бл}} + \Delta,$$

где Δ – поправочный угол, значение которого при правильном выборе $d_{\text{исх}}$ зависит в основном от степени коллимации пучка ионов и подбирается эмпирически. Так, для используемого источника ионов ИЛО-200 значения Δ равны $2,5^\circ$ и 5° для углов “блеска” 9° и 18° соответственно.

На рис. 3а показано изображение типичного профиля ионно-травленной ГДР с частотой 1200 мм^{-1} , полученное с помощью сканирующего силового

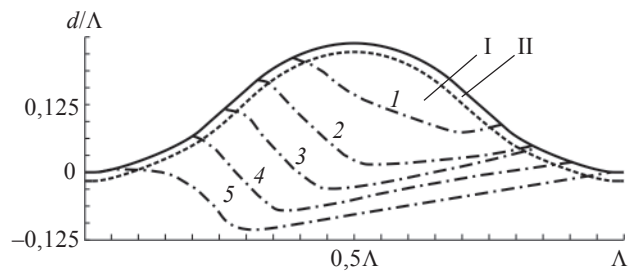


Рис. 2. Развитие формы профиля штрихов ГДР с однослойным масочным покрытием в зависимости от относительной длительности ионного травления (глубина модуляции исходной ГДР 0,25). $V_I/V_{II} = 4$; $d_{II} = 0,016\Lambda$. Угол падения ионов 80° . 1 – относительная длительность ионного травления равна 100, 2 – 200, 3 – 300, 4 – 400, 5 – 500.

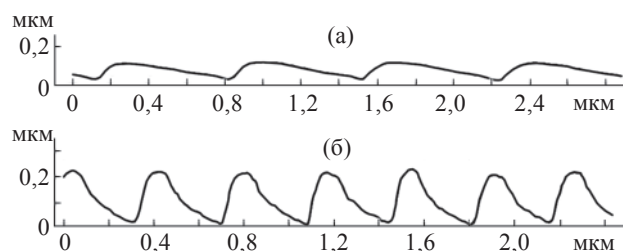


Рис. 3. Изображение профиля штрихов ионно-травленных ГДР, полученное на атомно-силовом микроскопе. а – частота штрихов ГДР 1200 мм^{-1} , б – частота штрихов ГДР 2400 мм^{-1} .

микроскопа. Длина рабочей грани ионно-травленных ГДР по данному способу достигает значений $0,8\Lambda\text{--}0,9\Lambda$, а дифракционная эффективность на длине волны “блеска” 85% .

В принципе, использование маскирующего покрытия при специальных режимах ионного травления позволяет получить ГДР с эффективными углами “блеска” более 25° и большими глубинами профиля штрихов, однако при этом получаемые формы профиля штрихов оказываются далекими от треугольных. В качестве примера на рис. 3б приведено изображение профиля ионно-травленной ГДР с частотой 2400 мм^{-1} и с большой глубиной модуляции. Заметим, что получение высокочастотных ГДР на халькогендных стеклах с относительной глубиной модуляции больше 0,45 методом “мокрого” травления является сложной технологической задачей [2].

Воспроизводимость результатов при правильном выборе глубины исходной ГДР и толщины маскирующего покрытия достаточно велика, особенно при наличии технологического контроля (по прямым

измерениям формы профиля ГДР или по соотношениям интенсивностей дифракционных порядков). Технологический процесс изготовления ГДР с “блеском” с помощью ионного травления многослойных структур успешно используется в НПО ГИПО в производстве плоских и вогнутых ГДР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукин А.В., Макаров А.С., Саттаров Ф.А., Селезнев В.А., Скочилов А.Ф., Стрельников Ю.П. Крупногабаритные голограммные решетки на слоях ХСП высокого оптического качества // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 12. С. 73–74.
2. Вандюков Е.А., Знаменский М.Ю., Саттаров Ф.А. Технологические условия оптимизации характеристик голограммных дифракционных решеток на слоях селенида мышьяка // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 5. С. 58–62.
3. Bryngdahl O. Formation of blazed gratings // JOSA. 1970. V. 60. № 1. P. 140.
4. Nagata H., Kishi M. Production of blazed holographic gratings by a simple optical system // Jap. J. Appl. Phys. 1975. V. 14. № 1. P. 181–186.
5. Namioka T., Harada T. Diffraction gratings in Japan // Opt. Acta. 1976. V. 23. № 29. P. 701–708.
6. Картер Дж. Теория эрозии и роста поверхности // Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел. Пер. с англ. / Под ред. Машковой Е.С. М.: Мир. 1989. 349 с.
7. Файзрахманов И.А., Саттаров Ф.А., Лукин А.В., Хайбуллин И.Б. Влияние режима ионного распыления на микрорельеф ГДР // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 1. С. 26–29.
8. Lukin A.V., Makarov A.S., Sattarov F.A., Strelnikov J.P., Fayzrakhmanov I.A., Khaybullin I.B. Hologram blazed diffraction gratings for wide spectral range // Proc. SPIE. 1997. V. 3317. P. 191–195.