

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков
Институт систем обработки изображений РАН

Введение

Плазменное или "сухое" травление позволяет изготовить профиль в любом материале с точностью и качеством поверхности, недостижимыми для обычного жидкостного травления. Это обусловлено возможностями анизотропного режима травления материала, высокой управляемостью и стабильностью технологических процессов при "сухом" травлении. Представляется целесообразным использование плазмохимического травления для формирования микрорельефа дифракционных оптических элементов (ДОЭ), так как точность изготовления дифракционного микрорельефа определяет качество работы оптических элементов [1]. В данной работе анализируются возможности использования установки плазменного травления УТП ПДЭ-125-009 для создания дифракционных оптических элементов среднего ИК диапазона на кремниевых подложках марки КДБ-4,5 диаметром 76 мм [2].

Описание используемых технологий и методик

Для технологических лазеров, излучающих в диапазоне 10,6 мкм, представляет интерес разработка ДОЭ для высоких уровней мощности пучка: 1 кВт и более. Применение таких элементов позволило бы упростить оптическую схему установок и при высоком качестве изготовления ДОЭ сократить потери излучения и повысить ресурс работы технологического оборудования. Например, при поверхностной закалке, преобразование сфокусированного на детали излучения вместо точки (при применении обычной оптики) в отрезок (в случае применения ДОЭ) позволило бы сократить время обработки [3].

Рельеф дифракционного оптического элемента может быть рассчитан как бинарный или как многоуровневый. В первом случае технология изготовления намного проще, но и эффективность такого элемента ниже. Во втором случае технология изготовления усложняется (требуются многократные процессы травления с точным совмещением шаблонов), но и рабочие параметры таких элементов намного выше. Целью данного исследования было изготовление многоуровневого фокусатора лазерного излучения [3,4] с параметрами: рабочая длина волны $\lambda=10,6$ мкм; фокусное расстояние $f = 400$ мм, область фокусировки - отрезок в фокальной плоскости длиной $L = 15$ мм, угол отражения излучения от фокусатора $\alpha = 45^\circ$. Такой ДОЭ, отражая под углом α падающий на него пучок лазерного излучения, фокусирует его в отрезок прямой на фокальной плоскости с равномерным распределением энергии вдоль отрезка. В работе [1] проведен сравнительный анализ формирования дифракционного микрорельефа в стекле на основе «жидкого» и «сухого» травления. Однако для создания силовых ДОЭ более перспективным является формирование микрорельефа в кремнии. Необходимая глубина травления и формулы для определения высоты отражающего микрорельефа приведены, например, в [1].

Для создания 8-уровневого ДОЭ использовались последовательно три фотошаблона, записанные в слоях напыленного на стеклянную пластину хрома (рис.1). Первичные маски фотошаблонов формировались с помощью оптического генератора изображений на фотопленке. На основе фотошаблонов изготавливались рабочие хромовые шаблоны на стекле методами фотолитографии и плазменного травления. Слои хрома толщиной порядка 0,15 мкм получали термовакуумным напылением. Плазменная проработка слоев хрома использовалась для сохранения точности совмещаемых фотошаблонов и исключения точечных дефектов и дефектов неровности края, которые возникают при жидкостном травлении. Травление хрома осуществлялось через защитную маску из проявленного и задубленного фоторезиста толщиной около 1 мкм в смеси газов CCl_4/O_2 в соотношении 5/1 соответственно.



Рис. 1. Фотография первого (бинарного) шаблона фокусатора в отрезок

Травление кремниевых пластин проводилось в смеси газов CCl_2F_2/O_2 также в соотношении 5/1. Рабочий объем установки представляет собой цилиндрический кварцевый реактор, в котором плазма возбуждается ВЧ индуктором при частоте 13,56 МГц с мощностью до 1 кВт. Образец располагается перпендикулярно потоку плазмы, рабочее давление

~1Pa. На рабочий стол установки можно подавать отрицательное постоянное напряжение или часть ВЧ мощности.

Для формирования рельефа фокусатора в отрезок необходимо было провести три последовательных этапа травления подложки. Общая расчетная глубина травления после трех процессов составила 6,6 мкм. Для травления кремния нужно было выбрать маску, стойкую к воздействию плазмы, травящей кремний. Стойкость маски должна была позволить достичь необходимой глубины травления на каждом из трех этапов. Для исключения подтравливания края маски и, как следствие, искажения расчетного профиля фокусатора, необходимо было подобрать такие параметры процесса, при которых анизотропия травления кремния была бы максимальной. Равномерность скорости травления подложки по поверхности должна была быть в пределах $\pm 3\%$. Указанные технологические проблемы были решены путем оптимизации режимов обработки кремниевых пластин через защитные маски из напыленного хрома (Cr) в плазме из смеси газов CCL_2F_2 и O_2 . Напыленные слои хрома толщиной около 0,1 мкм применялись в качестве защитной маски при травлении в плазме, так как стойкость проявленного и задубленного резиста оказалась недостаточной для достижения расчетной глубины ступени в двух первых этапах травления. К тому же адгезия резиста, нанесенного непосредственно на кремний, была невысока, что не позволяло качественно проводить процессы проявления резиста и травления кремния (Si). Слои хрома наносились на кремниевую пластину с вольфрамового нагревателя в течение ~ 8 секунд в вакууме не хуже 0,00005 мм.р.с. При таком быстром режиме нанесения слоя хрома исключается его загрязнение и окисление, что позволяет в дальнейшем проводить его качественное травление в концентрированной хлористой кислоте HCl . Необходимо отметить что хром напылялся на кремниевую пластину, предварительно разогретую до 200°C , что обеспечивало требуемую адгезию слоя металла и кремния, и улучшало стойкость хромовых слоев к воздействию плазмы. Однако прогрев пластин Si до более высоких температур при напылении нежелателен, так как из-за начинающихся химических реакций между кремнием и хромом (образование эвтектик и силицидов) оптическое качество поверхности нарушается. Скорость и характер травления кремния при воздействии плазмы в среде вышеупомянутых газов зависит от значения подводимой ВЧ мощности и способа ее подачи, расхода газа, поддерживаемого давления в рабочем объеме, процентного состава газовой смеси, интенсивности охлаждения обрабатываемого образца. В газовой среде, используемой для травления кремния, хром тоже имеет небольшую скорость травления, и при увеличении подводимой ВЧ мощности и повышении расхода газовой смеси скорости травления кремния V_{Si} и хрома V_{Cr} повышались, причем соотношение $V_{\text{Cr}}/V_{\text{Si}}$ увеличивалось, что было нежела-

тельным эффектом. С другой стороны, уменьшение подводимой мощности и расхода газа увеличивало время обработки, что тоже не желательно, так как обеспечить стабильность технологических процессов в течение большого промежутка времени сложнее. Удалось подобрать такой режим возбуждения плазмы, при котором соотношение скорости травления хрома к скорости травления кремния $V_{\text{Cr}}/V_{\text{Si}} \approx 1/40$. Скорость травления кремния V_{Si} при этом оставалась удовлетворительной и составляла порядка 0,04 мкм в мин. Данный режим обеспечил также равномерность и анизотропию травления. Требуемая глубина травления на каждом из этапов была разной [1]. Для контроля процесса травления проводились исследования зависимости скорости травления кремниевой подложки от общей продолжительности обработки по нескольким образцам. Глубина травления образцов контролировалась с помощью микроскопа МИИ-4. Выяснилось, что при данных условиях скорость травления стабильна, и глубина травления линейно зависит от времени воздействия плазмы. Так как и воспроизводимости условий проведения процессов (стабильности плазмы, расход газов и т.д.) удалось достичь, то было решено контролировать окончание обработки пластин кремния по времени. Такой способ позволяет контролировать глубину травления с точностью около 0,1 мкм, что при длине волны $\lambda = 10,6$ мкм вполне достаточно. Необходимо отметить, что 0,1 мкм - это точность изготовления конечного рельефа ДОЭ после 3 процессов травления, и, чтобы ее достичь, в каждом из процессов точность изготовления рельефа по высоте нужно выдерживать в пределах $\pm 0,03$ мкм. Поэтому каждый процесс плазменного травления проводился со ступенчатым изменением скорости травления: после достижения примерно 80% от заданной глубины травления для каждого из трех процессов скорость травления уменьшалась примерно в три раза (путем уменьшения подачи ВЧ мощности), и проводилось травление еще 15% от заданной глубины. Затем пластина извлекалась из реактора, и измерялась общая высота полученного рельефа (микрорентгенометр МИИ - 4), по этим измерениям вычислялись новая скорость травления и время, необходимое до точной проработки данного процесса. После этого пластина помещалась в реактор и осуществлялось окончательное травление для этого этапа. Использование такого метода обусловлено тем, что процессы плазменного травления кремниевой пластины проводились с технологически необходимыми перерывами в 1-1,5 суток. За это время могло произойти существенное изменение технологических параметров установки (например, температуры охлаждающей рабочей среды), что привело бы к существенным колебаниям скорости травления кремния. В дальнейшем планируются работы по модернизации установки с целью точного контроля температуры пластин во время травления. Следует отметить, что точность изготовления рельефа элементов, рассчитанных на работу с излучением,

имеющим длину волны λ меньше 10 мкм (например для оптического диапазона), может быть значительно выше, так как расчетная глубина рельефа значительно меньше, и скорость процесса плазменного травления можно снизить до значения, позволяющего контролировать глубину травления с большей точностью. При этом возникает необходимость контроля геометрии рельефа с помощью сканирующего электронного (или зондового туннельного) микроскопа, так как оптические микроскопы становятся неприменимы. Возможность такого контроля становится определяющей для качественного изготовления дифракционных элементов оптического и более коротковолнового диапазонов.

В процессе изготовления 8-уровневого ДОЭ по описанной в [1] технологии необходимо провести 3 аналогичных последовательных технологических этапа, отличающихся лишь глубиной травления ступени в подложке. На рисунке 2 приведена схема последовательных технологических операций, необходимых для проведения каждого процесса плазменного травления:

1. Нанесение на кремниевую подложку слоя хрома термическим испарением в вакууме.

2. Нанесение позитивного фоторезиста на кремниевую пластину с напыленным слоем хрома. Фоторезист наносился стандартным методом на центрифуге.

Совмещение шаблона и засветка через него фоторезиста на установке ЭМ 5006А контактным способом.

Проявление и дублирование фоторезистивной маски.

3. Травление слоя хрома через маску из фоторезиста в концентрированной хлористой кислоте HCl. Так как слой хрома были тонкие (~0,1 мкм), жидкостное травление не вносило недопустимых геометрических погрешностей.

4. Удаление фоторезистивной маски и "сухое" травление кремниевой пластины через защитную маску из хрома.

Удаление хромовой маски и очистка образца для следующего процесса.

Используя вышеописанные методы формирования ДОЭ в кремнии, был изготовлен фокусатор в отрезок. На рис.3 изображена профилограмма рельефа готового фокусатора. После изготовления в кремнии рельеф был покрыт зеркальным слоем алюминия, нанесенного термовакуумным напылением. При работе с излучением высокой мощности поверхность ДОЭ может нагреться до температуры на-

чала реакции между кремниевой пластиной и слоем отражающего металла – это приведет к разрушению геометрии рельефа. Для исключения такого процесса целесообразно применение промежуточного разделительного слоя из тугоплавкого металла или сплава такого металла между кремнием и слоем отражающего металла. Подобные разделительные слои используются в микроэлектронике для изготовления термостабильных контактов

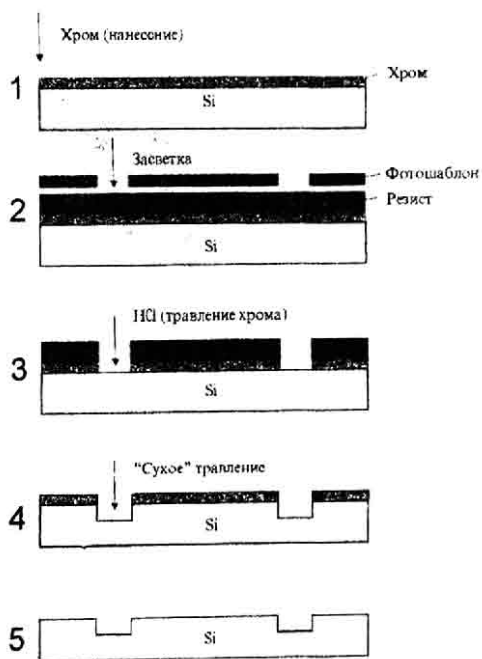


Рис. 2. Формирование рельефа в кремнии методами фотолитографии и "сухого" травления

Натурные испытания изготовленного фокусатора показали его хорошую работоспособность и достаточно высокую эффективность. Результат воздействия сфокусированного с помощью ДОЭ луча на мишень (полированная поверхность дерева) можно наблюдать на рис.4. На рабочую поверхность подавался расширенный с помощью коллиматора параллельный пучок лазерного излучения мощностью 10 Вт с длиной волны 10,6 мкм, падающий на поверхность фокусатора под углом 45°. Получаемый фокальный отрезок по геометрическим размерам уже приведенного на фотографии, так как расплывание фокального изображения обусловлено процессом горения мишени.



Рис. 3. Профилограмма рельефа фокусатора в отрезок

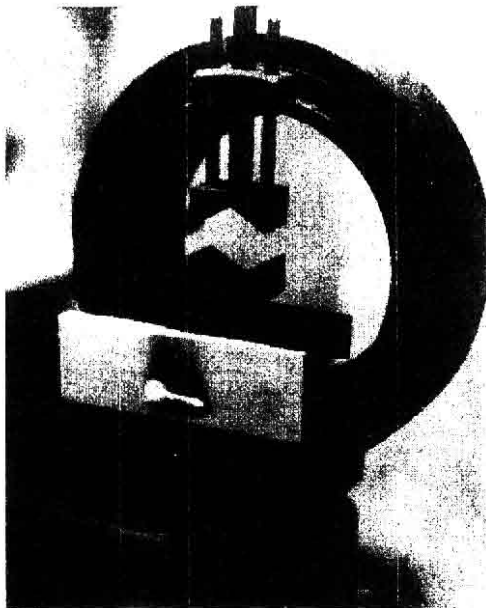


Рис. 4. Воздействие сфокусированного излучения CO₂ лазера на мишень из дерева

Заключение

Показано, что методами сухого травления и литографии можно получить бинарные и много-

уровневые ДОО для диапазона длин волн от 10,6 мкм и меньше. Возможно изготовление как дифракционных оптических элементов, работающих на отражение, так и матриц для копирования пропускающих ДОО.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-15-96026)

Литература

1. Golub M.A., Rybakov O.E., Usplenjev G.V., Volkov A.V., Volotovskiy S.G. The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation // *Optics & Laser Technology*, 1995, Vol. 25, № 4, p.215-218.
2. Stern M.B., Jay T.R. Dry etching for coherent refractive microlens arrays // *Optical Engineering*, 1994, Vol. 33, № 11, p. 3547-3551.
3. Golub M.A., Sisakian I.N., Soifer V.A. Infra-red radiation focusators // *Optics and Lasers in Engineering*, 1991, Vol.15, № 5, p.297-309.
4. Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L., Soifer V.A. Comparative analysis of different focusators focusing into a segment // *Optics & Laser Technology*, 1995, Vol. 25, № 4, p.207-213.

Investigation of the technology of plasma-chemical etching for producing multilevel diffractive optical elements

*A.V. Volkov, N.L.Kazanskiy, O.E.Rybakov
Image Processing Systems Institute of RAS*

Abstract

Plasma-chemical or “dry” etching allows to make a profile in any material with the precision and surface quality unattainable for conventional liquid etching. This is achieved due to the features of the anisotropic etching mode, high controllability and stability of technological processes during dry etching. It seems expedient to use plasma-chemical etching to form the microrelief of diffractive optical elements (DOE), as the accuracy of producing the diffractive microrelief determines the quality of the optical elements [1]. In this work, we analyze the applicability of the plasma etching unit UTP PDE-125-009 for the production of diffractive optical elements of the mid-IR range on silicon substrates of the KDB-4.5 brand with a diameter of 76 mm [2].

Citation: Volkov AV, Kazanskiy NL, Rybakov OE. Investigation of the technology of plasma-chemical etching for producing multilevel diffractive optical elements. *Computer Optics* 1998; 18: 127-130.

References

- [1] Golub MA, Rybakov OE, Usplenjev GV, Volkov AV, Volotovskiy SG. The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation. *Opt Laser Technol* 1995; 27(4): 215-218.
- [2] Stem MB, Jay TR. Dry etching for coherent refractive microlens arrays. *Opt Eng* 1994; 33(11): 3547-3551.
- [3] Golub MA, Sisakian IN, Soifer VA. Infra-red radiation focusators. *Opt Lasers Eng* 1991; 15(5): 297-309.
- [4] Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Soifer VA. Comparative analysis of different focusators focusing into a segment. *Opt Laser Technol* 1995; 27(4): 207-213.