

ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

СУХОЕ ТРАВЛЕНИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК

А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.Ф. Костюк, В.С. Павельев
Институт систем обработки изображений РАН
Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Использование мощных CO_2 лазеров в промышленности определяет актуальность создания силовых пропускающих дифракционных оптических элементов (ДОЭ) для дальнего ИК-диапазона. Последние достижения в области газофазного синтеза позволяют получать поликристаллические алмазные пленки (АП) с оптическими и теплофизическими свойствами, близкими к свойствам монокристаллов. В предлагаемой статье показана возможность формирования дифракционного микрорельефа на алмазных пленках методами сухого травления. Описана технологическая схема получения микрорельефа с помощью ионно-химического травления алмазной подложки. Приведенные результаты измерений сформированного микрорельефа подтверждают перспективность предлагаемого подхода.

Введение

В работе [1] описана технология формирования микрорельефа ДОЭ с помощью селективной абляции поверхности алмазоподобной подложки излучением эксимерного УФ-лазера. В работах [1, 2] приведены результаты исследований изготовленных алмазных ДОЭ, предназначенных для фокусировки излучения CO_2 -лазера, методом натурального эксперимента. Однако, описанная в [1] технология не позволяет формировать микрорельеф с разрешением (т.е. размером элементарной области структурирования), меньшим, чем 30-40 мкм, что резко сужает область применения синтезируемых ДОЭ. Кроме того, удаление графитизированного слоя с алмазной подложки после завершения процесса лазерной абляции представляет собой отдельную сложную технологическую операцию. В настоящей статье рассматривается возможность формирования микрорельефа на алмазных подложках с помощью технологий ионно-химического и плазмохимического травления [3].

Анализ возможностей сухого травления

Задача исследования возможности формирования заданного микрорельефа на поверхности алмазной пленки с помощью ионно-химического и плазмохимического травления решалась в два этапа.

На первом этапе было необходимо:

- принципиально решить вопрос о возможности ионно-химического и плазмохимического травления алмазных пленок,
- подобрать необходимые газы,
- исследовать и выбрать оптимальные технологические режимы ионно-химического травления (ИХТ).

В результате анализа литературных источников [4-8] было установлено, что создание микро-

рельефа на поверхности АП возможно при использовании следующих видов травления:

а) ионное травление в среде аргона с использованием ВЧ-диодной системы с отдельным источником ионов. При этом травление анизотропное и не-селективное;

б) ионно-химическое травление с использованием ВЧ - диодных систем с катодной или/и анодной связями. В качестве рабочих газов могут быть использованы следующие смеси: ($\text{Ar} + \text{O}_2$), O_2 , ($\text{N}_2 + \text{O}_2$), ($\text{He} + \text{O}_2$). При этом травление поверхности подложки анизотропно и селективно;

в) плазмохимическое травление в тех же средах что и в пункте б), с использованием объемных цилиндрических реакторов без перфорэкрана. Травление подложки в этом случае изотропное, высокоселективное.

Как следует из проведенного анализа, наиболее перспективным для формирования дифракционного микрорельефа на алмазных пленках представляется ионно-химическое травление (пункт б), являющееся анизотропным и селективным.

Режимы ионно-химического травления алмазных пленок

В ИСОИ РАН и СГАУ в настоящее время для создания микрорельефа на подложках из кварца, кремния, сапфира и т.д. используется установка УТП ПДЭ-125-009 («ИНТРА») ионно-химического травления пластин в ВЧ-разряде с магнитным полем.

При выборе конкретных режимов ИХТ АП на установке «ИНТРА» авторы руководствовались предыдущим опытом работы, принимая во внимание следующие соображения:

1. Все вариации режимов установки при травлении алмазных пленок должны лежать в области безопасной ее работы.
2. Для увеличения срока службы имеющихся от-качных средств необходимо отказаться от ис-

пользования чистого кислорода, поскольку откачка реактора установки осуществляется диффузионным насосом, пары масла которого находятся при высокой температуре.

3. Время непрерывного травления АП ограничивается временем перегрева мощного ВЧ-генератора, что может повлечь выход его из строя.

Перечисленным условиям удовлетворяют газовые смеси ($Ar + O_2$) и ($N_2 + O_2$). Поскольку массы однократно ионизованных ионов аргона (40) и азота (28) значительно различаются, при прочих равных условиях коэффициент физического распыления, а, следовательно, и скорость травления будут выше при использовании смеси ($Ar + O_2$). Кроме того, при использовании смеси ($N_2 + O_2$) для ИХТ, возможно образование небезопасных соединений вида CN. Таким образом, смесь ($Ar + O_2$) была выбрана в качестве рабочего газа.

Суммарный расход аргона и кислорода в экспериментах не превышал 2,5 л/час.

Содержание кислорода в смеси ($Ar + O_2$) варьировалось от нескольких процентов до 45÷50%. При содержании кислорода в смеси ($Ar + O_2$) менее 10÷15% скорость травления не превышала 140 Å/мин. В этом случае, для отработки режимов травления АП в среде газовых смесей в качестве маски использовался химически стойкий лак ХВК-2А. Повышение содержания O_2 в смеси ($Ar + O_2$) до 50% и наложение продольного магнитного поля относительно горизонтальной оси реактора позволяет повысить скорость ИХТ АП до 750 Å/мин.

ВЧ-мощность, подводимая к реактору установки во время экспериментального выбора режима травления, находилась в пределах 550÷600 Вт. Вариации ВЧ-мощности внутри указанной области определялись изменением полного импеданса плазмы среды ($Ar + O_2$).

Таким образом, была выработана оптимальная (для данных условий) среда травления - ($Ar + O_2$) с содержанием O_2 около 50%, определены основные технологические режимы ИХТ АП и достигнута достаточно высокая скорость травления (около 750 Å/мин).

Выбор материала маскирующего слоя

Проведенный анализ возможностей сухой литографии и выработка режимов ИХТ позволили перейти к следующему этапу решения указанной задачи – выбору материала маски, стойкого к плазме ($Ar + O_2$). Время «жизни» такой маски должно быть не менее 100 мин (для достижения глубины травления АП в 7÷8 мкм). На этом этапе на подложки из ситалла марки СТ50-05, стекла (К-8) и поликора вакуумными методами были нанесены следующие материалы: хром (Cr), ниобий (Nb), оксид ниобия (Nb_2O_5) и резистивный сплав РС 5402 (содержащий 54% никеля и 2% - хрома, остальное - кремний). Хотя методы нанесения этих материалов различны: взрывное испарение, резистивный нагрев сублима-

цией и ВЧ-магнетронное распыление, соответственно, параметры напыления были подобраны таким образом, что пленки всех перечисленных материалов имели одинаковую толщину (в диапазоне 1500÷1700 Å).

Эксперименты по травлению изготовленных образцов маскирующих материалов методом ИХТ на установке «ИНТРА» в режимах травления АП в среде ($Ar + O_2$) показали, что наибольшей стойкостью к плазме ($Ar + O_2$) обладают металлические пленки ниобия и его оксида Nb_2O_5 . Кроме того, было установлено, что специально создавать пленку Nb_2O_5 (например, методом анодирования) нет необходимости, поскольку оксид на поверхности маски из Nb создается автоматически при ИХТ АП в среде ($Ar + O_2$) за счет достаточно высокого содержания кислорода. Еще одним доводом в пользу использования в качестве материала маски на АП пленок ниобия послужило то обстоятельство, что этот металл хорошо травится методом ИХТ в среде CF_4 , а сам процесс и режимы травления отработаны.

Этапы формирования микрорельефа

Технологическая схема изготовления дифракционного микрорельефа на АП выглядела следующим образом:

1. После предварительной очистки на поверхность АП методами вакуумного напыления наносится пленка ниобия.
2. На полученную пленку методом центрифугирования наносят фоторезистивную пленку (например, ФП-051К).
3. Известными методами фотолитографии на поверхности металлической пленки Nb создают по заданному фотошаблону фоторезистивную маску.
4. Образец помещают в реактор установки «ИНТРА», и в среде CF_4 производят травление пленки Nb через изготовленную фоторезистивную маску. То есть на поверхности АП образуется маска из Nb (с остатками фоторезистивной маски).
5. Не вынимая образец из реактора, вместо CF_4 в рабочую камеру подают смесь ($Ar + O_2$) с 50% содержанием O_2 и производят травление АП на заданную глубину.
6. По-прежнему, не вынимая образец из реактора (не развакууируя камеру), вместо смеси ($Ar + O_2$) снова подают CF_4 и в течение 5÷6 мин производят травление остатков пленок Nb_2O_5 и Nb.
7. Контроль параметров микрорельефа поверхности АП осуществляется обычными методами – на профилографе-профилометре, микроинтерферометре МИИ-4, сканирующем зондовом микроскопе [3].

Анализ полученных результатов

На основе предложенного решения задачи создания заданного микрорельефа методом ионно-химичес-

кого травления была изготовлена тестовая структура дифракционной решетки (меандр) с периодом $T=200$ мкм и расчетной глубиной травления $h=7,5$ мкм на подложке АП толщиной около 400 мкм (рис. 1). Значение глубины травления (7,5 мкм) выбиралось равным максимальной высоте алмазного микрорельефа (показатель преломления $n=2,4$) для длины волны $\lambda=10,6$ мкм:

$$h_{\max} = \frac{\lambda}{(n-1)}.$$

Приведенные на рис. 1 первые результаты исследования тестовой структуры демонстрируют перспективность ионно-химического травления как технологии формирования микрорельефа на поверхности алмазной пленки. Отметим отсутствие «бортиков» на границах участков рельефа, обладающих разной глубиной, которые возникают в случае формирования микрорельефа на АП лазерной абляцией [1-3]. Отметим также хорошее соответствие сформированной структуры требуемой глубине травления.

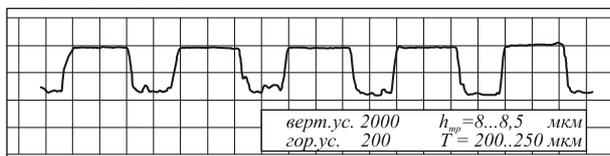


Рис. 1. Результат профилометрического измерения тестовой структуры

Авторы полагают, что после некоторой оптимизации описанная технология может быть использована для формирования микрорельефа силовых фокусаторов ИК-диапазона.

Заключение

Проанализированы возможности применения сухого травления поликристаллических алмазных пленок для изготовления силовых ДОЭ, предназначенных для управления излучением технологических CO_2 -лазеров. Описана технологическая схема форми-

рования микрорельефа с помощью ионно-химического травления подложки. Приведенные результаты измерений полученного микрорельефа подтверждают перспективность рассмотренного подхода.

Литература

1. Кононенко В.В., Конов В.И., Пименов С.М., Прохоров А.М., Павельев В.С., Соيفер В.А. Алмазная дифракционная оптика для CO_2 лазеров // Квантовая электроника, 1999, том 26, № 1. С. 9-10.
2. V.V. Kononenko, V.I. Konov, S.M. Pimenov, A.M. Prokhorov, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer CVD diamond transmissive diffractive optics for CO_2 lasers // New Diamond and Frontier Carbon Technology, 2000. Vol. 10. P. 97-107.
3. Волков А.В., Казанский Н.Л., Соифер В.А., Успенев Г.В. Технология создания ДОЭ // в книге «Методы компьютерной оптики» под ред. В.А. Соифера, М.: Физматлит, 2000. С. 239-310.
4. Плазменная технология в производстве СБИС // Под ред. Д.Брауна. М.: Мир, 1987. 470 с.
5. Брагинский Б.С., Ковалев А.С., Муратов Е.А. Характеристики плазмы ВЧ-разряда в поперечном магнитном поле // Труды ФТИАН, Проблемы микроэлектронной технологии. Наука. М., 1994. Т. 8. С. 29-37.
6. Киреев В.Ю., Данилин Б.С., Кузнецов В.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур // Электроника. М.: Радио и связь, 1983. Вып. 36. 125 с.
7. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов // М.: Сов. радио, 1986. 316 с.
8. Данилин Б.С. Перспективы развития вакуум-плазменных процессов травления микроструктур // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, вып. 3(115), 1985. С. 93-100.

Dry etching of polycrystalline diamond films

A.V. Volkov^{1,2}, N.L. Kazanskiy^{1,2}, G.F. Kostyuk², V.S. Pavelyev^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute of RAS

²Samara State Aerospace University

Abstract

The industrial application of high-power CO₂ lasers determines the importance of creating power transmitting diffractive optical elements (DOEs) for the far-IR range. Recent advances in the field of gas-phase synthesis allow to produce polycrystalline diamond films with optical and thermophysical properties close to those of single crystals. This article demonstrates the possibility of forming a diffraction microrelief on diamond films by dry etching. It describes the technological scheme for producing a microrelief by ion-chemical etching of a diamond substrate. The measurement results of the produced microrelief confirm the promising nature of the proposed approach.

Keywords: diamond film, diffractive optical element, DOE, far-IR range, gas-phase synthesis, thermophysical properties, single crystal, dry etching, ion-chemical etching.

Citation: Volkov AV, Kazanskiy NL, Kostyuk GF, Pavelyev VS. Dry etching of polycrystalline diamond films. *Computer Optics* 2001; 22: 50-52.

References

- [1] Kononenko VV, Konov VI, Pimenov SM, Prokhorov AM, Pavelyev VS, Soifer VA. Diamond diffractive optical elements for high-power CO₂ lasers [In Russian]. *Sov J Quantum Electron* 1999; 26(1): 9-10.
- [2] Kononenko VV, Konov VI, Pimenov SM, Prokhorov AM, Pavelyev VS, Soifer VA. CVD diamond transmissive diffractive optics for CO₂ lasers. *New Diamond and Frontier Carbon Technology*, 2000. Vol. 10. P. 97-107.
- [3] Volkov AV, Kazanskiy NL, Soifer VA, Usplenyev GV. Technology of DOE fabrication. In Book: Soifer VA, ed. *Methods of computer optics* [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2000: 239-310.
- [4] Brown DM, Einspruch NG, eds. *Plasma processing technology for VLSI*. Academic Press; 1984.
- [5] Braginsky BS, Kovalev AS, Muratov EA. Characteristics of a HF-discharge plasma in a transverse magnetic field [In Russian]. In Book: *Proceedings of the Physics and Technology Institute. Problems of microelectronic technology*. Vol 8. Moscow: "Nauka" Publisher; 1994: 29-37.
- [6] Kireev VY, Danilin BS, Kuznetsov VI. Plasma chemical and ion chemical etching of microstructures [In Russian]. Vol 36. Moscow: "Radio i Svyaz" Publisher; 1983.
- [7] Ivanovsky GF, Petrov VI. Ion-plasma treatment of materials [In Russian]. Moscow: "Sovetskoe Radio" Publisher; 1986.
- [8] Danilin BS. Development prospects of vacuum-plasma etching of microstructures [In Russian]. *Elektronnaya tekhnika*. Ser 3. *Microelectronics* 1985; 3(115): 93-100.