

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА С СУБМИКРОННЫМИ РАЗМЕРАМИ РЕЛЬЕФА В КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЕ

А.В.Волков, Н.Л.Казанский, О.Е.Рыбаков

Институт систем обработки изображений РАН

Введение

При использовании для изготовления дифракционных оптических элементов технологии фотолитографии одним из ответственных этапов является травление. Традиционным способом травления является жидкостное травление. Этот способ хорошо отработан и используется давно, но он имеет ряд ограничений, которые невозможно обойти [1]. Например, подтравливание под край маски (клин травления) ограничивает минимальный размер элемента структуры по площади и его высоту. При жидкостном травлении трудно обеспечить контролируемость и управляемость технологических процессов. Жидкостное травление предъявляет жесткие требования к адгезии и стойкости фоторезиста или другого маскирующего материала, используемого в процессе травления. Плазменное или "сухое" травление позволяет во многих случаях обойти эти ограничения, а также дает новые технологические возможности, недоступные при жидкостной проработке рельефа. Например, перенос рельефа со сложной (наклонной и др.) формой поверхности, полученной в фоторезисте, в твердый субстрат; или травление таких стойких материалов как сапфир (Al_2O_3 - мо-

нокристаллический). Для работы нами была использована опытно-промышленная установка травления пластин в ВЧ разряде с магнитным полем, применяемая для электронной литографии, которая позволяет получать размеры элементов с разрешением 0,1 мкм. Она предназначена для промышленного травления пленок алюминия, а также для травления поликремния, нитрида кремния и оксидов металлов в лабораторных условиях. Данное оборудование обеспечивает регулирование давления в рабочей камере в диапазоне 0,065 + 1,3 Па, регулировку падающей ВЧ мощности при работе на разрядную камеру в диапазоне от 100 до 700 Вт и поддержание ее с погрешностью $\pm 10\%$. Важно, что установка обеспечивает напуск газа по четырем каналам в широких пределах и поддерживает расход газовой смеси с высокой точностью, снабжена системой подачи части ВЧ мощности на рабочий столик и магнитной системой стабилизации плазмы.

Приведенные выше параметры технологического оборудования позволяют вести травление пластин кремния диаметром до 150 мм с равномерностью травления слоев $\pm 5\%$, что является существенным для нашей работы.

На рис. 1 показана схема рабочего объема установки. При подаче на рабочий столик части ВЧ мощности от генератора возникает смешанный режим туннель-пролетного ВЧ реактора с реактором диодного типа.

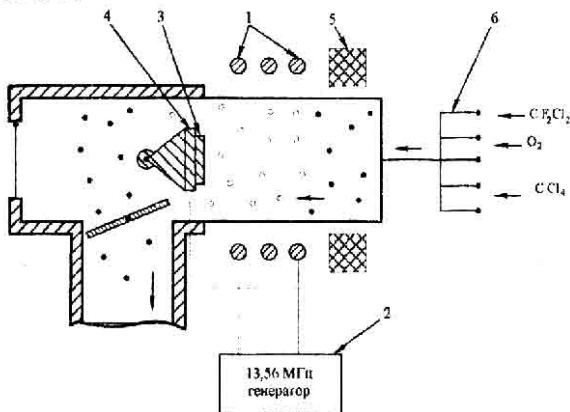


Рис. 1

Схема рабочего объема плазмохимической установки:
1- ВЧ индуктор; 2- генератор ВЧ мощности (1 кВт, 13,56 МГц); 3- обрабатываемый образец; 4- водоохлаждаемый поворотный рабочий столик (подложкодержатель); 5- электромагнитная катушка; 6- система подачи и смешивания газов в рабочий объем.

Изготовление субмикронного дифракционного рельефа в кремнии

С целью получения высокоэффективной, делящей на пучки неодинаковой интенсивности и отклоняющей на большие углы падающее излучение, отражающей дифракционной решетки для длины волны $\lambda = 590$ нм, был проведен расчет численными методами [2,3] который дал следующие параметры рельефа элемента: период решетки $d \approx 0,6$ мкм, высота ступени $h \approx 0,1$ мкм.

Для изготовления такого элемента было решено использовать кремний (полированные пластины $d = 100$ мм, марки КДБ-4,5), т.к. он обладает высокой скоростью травления в плазме. "Сухое" или плазменное травление применялось из-за возможности получить профиль рельефа лучшего качества путем анизотропного травления и из-за возможности четкого контроля высоты ступени при травлении. Травление в жидких реагентах было неприменимо также из-за плохой адгезии резиста и неполной его проработки. Исходный рисунок решетки получали с помощью электронного литографа в слоях фоторезиста толщиной около 0,1 мкм. Резист наносился непосредственно на полированные пластины кремния, в которых через маску из проявленного резиста и получали "сухим" травлением необходимый рельеф. Для переноса рельефа через маску с заданной высотой ступени необходимо подобрать такой режим чтобы:

а) скорость разрушения резистивной маски позволяла бы получить в твердом материале необходимую высоту ступени (в данном примере скорость

травления резиста V_p не должны превышать скорость травления кремния V_k : $V_p \leq h/T_o = V_k$, где T_o - время процесса);

б) обеспечивалось полирующее травление кремния без загрязнения поверхности образца продуктами разложения.

Для травления кремния был использован газовый травитель состоящий из смеси CCl_2F_2 и O_2 в соотношении 5:1 соответственно. Кислород добавляется для того, чтобы увеличить количество химически активных атомов фтора и хлора, а также подавить выделение органических загрязнений на травимой поверхности. При травлении кремния, покрытого маской фоторезиста, количество кислорода, добавляемого к основному газу, увеличивалось до 25% с целью подавить дополнительные органические загрязнения, вносимые при разложении фоторезиста.

Добавление 25% смеси не вызывало увеличения отношения скоростей травления кремния к резисту по сравнению с обработкой в чистом разряде CCl_2F_2 , лишь увеличивало эти скорости пропорционально. Чтобы исключить перегрев и деградацию маски из электронного фоторезиста и для получения стабильного повторяемого воздействия плазмы, все процессы обработки образцов велись при мощности разряда около 350 Вт. Вносить изменения в процесс подачи этой ВЧ мощности в рабочий объем (см. ниже). Давление газовой смеси во всех процессах было примерно одинаковым и составляло ~ 1 Па. Поскольку предварительные эксперименты со слоями фоторезиста, нанесенными на кремний, показали, что кремний и эти слои разрушаются со сравнимыми скоростями - было решено проводить процесс травления до тех пор, пока на поверхности пластины кремния присутствует фоторезист. Исходный рельеф, полученный в резисте с помощью электронного литографа, показан на рис. 2. Данное изображение (а также все последующие) получено с помощью сканирующего зондового микроскопа P4-SPM-MDT.

На рис.3 показан тот же образец с исходным фоторезистом при более высоком увеличении.

Видно, что присутствует много нарушений заданной структуры в виде пиков, провалов и т.д., также видно, что профиль структуры синусоидальный (не П - образный). Эти дефекты связаны с несовершенством технологии получения и проявления сверхтонких слоев фоторезиста с субмикронным рисунком. В данном исследовании параметры профиля в резисте от нас не зависели, т.к. исходные образцы поставлялись по заказу. Поэтому было важно подобрать режим переноса рельефа "сухим" травлением в кремнии таким образом, чтобы обеспечить расчетную высоту ступени (по оси z) и по возможности улучшить "П - образность" профиля рельефа. Вышепоставленные задачи можно решить подобрав относительные скорости травления резиста и кремния и обеспечив анизотропию травления по оси z. Такая работа была проведена с контрольными одинаковы-

ми образцами размером изображения $25 \times 5 \text{ мм}^2$ в резисте на кремнии. Параметры рельефа этих образцов были примерно одинаковы (рис.2).

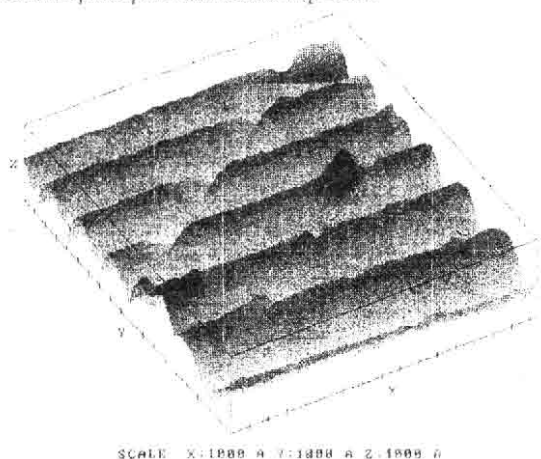


Рис. 2 Исходный микрорельеф в электронном резисте (в одном делении – 0,1 мкм)

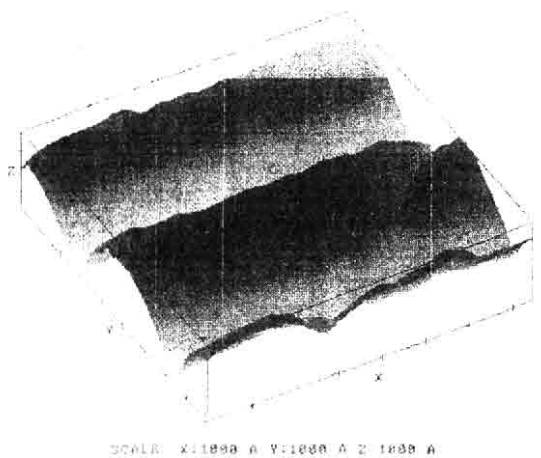


Рис. 3 Увеличенный фрагмент исходного микрорельефа (в одном делении – 0,1 мкм)

На рис.4 и рис.5 показаны фрагменты решетки, получившиеся в кремнии с исходных образцов, которые обрабатывались при разных режимах плазменного травления (назовем их режим 4х и 5х соответственно).

При работе в режиме 4х скорость травления резиста на порядок выше, чем скорость травления кремния, хотя исходная форма, заданная рисунком резиста, переносится в кремний. На рис. 6 показан фрагмент такого рельефа с большим увеличением. На рисунке 4 хорошо заметен конусообразный дефект, обусловленный загрязнением исходного образца пылинкой.

Режим 5х показал, что скорости травления резиста и кремния в данном случае примерно одинаковые. На рис.7 показан с высоким увеличением рельеф, полученный в таком процессе.

Типичное время режима 4х – около 10 минут, а процесса 5х - 40 минут. Основным отличием 4х от 5х было в том, что при 5х не было подачи части мощности ВЧ – генератора (см. рис.1) на рабочий

столлик, а в процессе типа 4х она осуществлялась. Различие в воздействии плазмы на образцы можно объяснить увеличением скорости травления резиста относительно кремния при повышении степени физической бомбардировки образцов ионами газов, а также увеличением концентрации химически активных атомов и радикалов непосредственно в области поверхности образца при подаче ВЧ мощности на рабочий столлик.

В результате для изготовления необходимого рельефа был выбран режим 5х, еще и потому, что высота получаемого рельефа h по оси z в данном процессе контролировалась с точностью 10 нм.

Окончательно рельеф был получен размером $25 \times 5 \text{ мм}^2$ в кремниевой пластине. Для изготовления копии решетки с такой кремниевой матрицы в дальнейшем использовался фотополимер с последующим напылением слоя отражающего металла (Al). Таким путем была получена дифракционная решетка площадью $10 \times 10 \text{ см}^2$. Оптический эксперимент с изготовленной дифракционной решеткой показал ее хорошую работоспособность и соответствие расчетным параметрам.

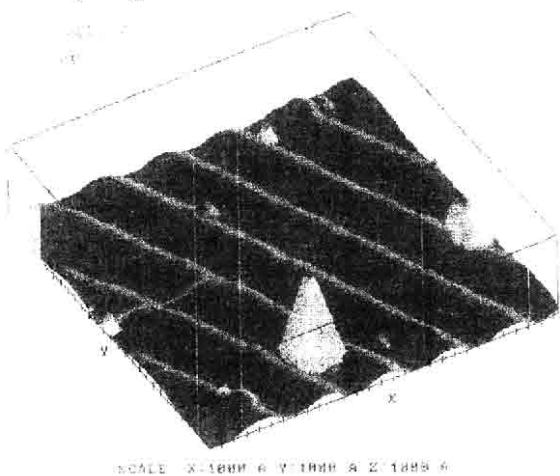


Рис. 4 Микрорельеф в кремнии, полученный при подаче части ВЧ-мощности на подложкодержатель

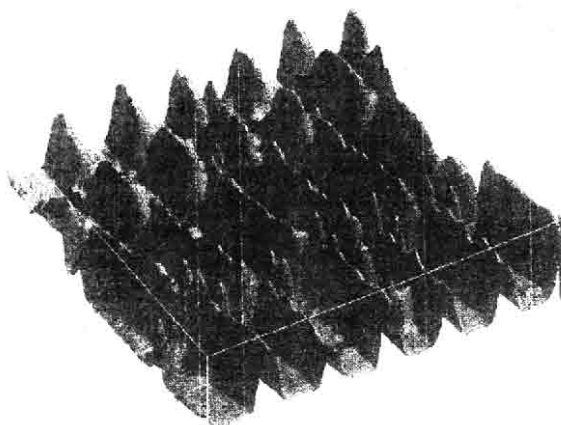
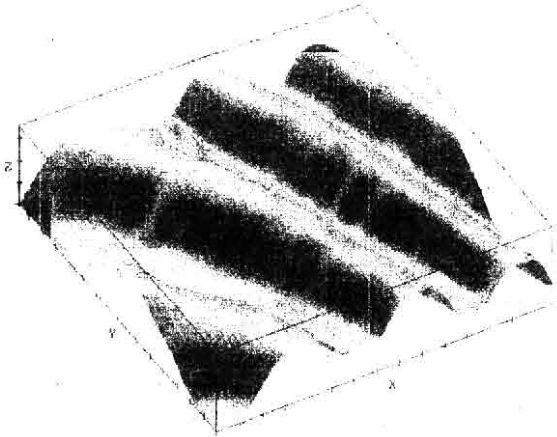


Рис. 5 Микрорельеф в кремнии, полученный без подачи ВЧ-мощности на подложкодержатель



SCALE X:1000 Y:1000 Z:1000

Рис. 6 Фрагмент микро рельефа (рис. 4) с большим разрешением

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-15-96026) и Министерства науки и технологий России, обеспечившего исследования ИСОИ РАН сканирующим зондовым микроскопом производства ТОО «Нанотехнологии МДТ».

Литература

1. Моро У. Микролитография В 2-х ч. Ч.2: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990г. ,632 с

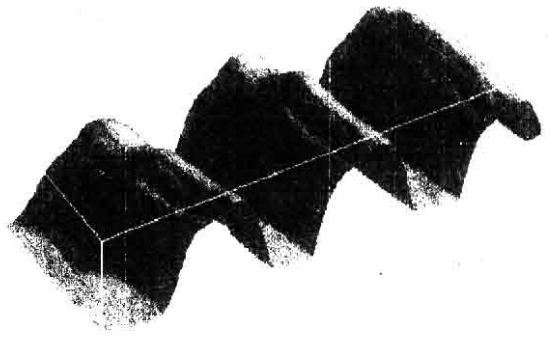


Рис. 7 Фрагмент микро рельефа (рис. 5) с большим разрешением

2. Соيفер В.А., Казанский Н.Л., Харитонов С.И. Синтез бинарного фокусатора в произвольную кривую в электромагнитном приближении //Компьютерная оптика, вып. 16, Самара, СГАУ, 1996, с. 22-27
3. Досколович Л.Л., Петрова О.И., Соифер В.А., Харитонов С.И. Градиентный метод расчета многопорядковых дифракционных решеток в приближении Рэлея //Компьютерная оптика, вып. 16, Самара, СГАУ, 1996, с. 31-35А.А. Берлин, Т.Я. Кефели, Г.В. Королев "Полиэфиракрилаты" М. 1967.