

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, А. А. ШМИДБЕРСКАЯ

## ФОРМИРОВАНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ МИКРОРЕЛЬЕФОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ОСТРОСФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Рассмотрен процесс формирования профиля канавки для обеспечения регулярного микрорельефа на поверхности твердых тел остросфокусированным пучком тяжелых ионов. Определены основные параметры технологического процесса, влияющие на геометрические характеристики профиля формируемой канавки.

*Ключевые слова:* формирование регулярных микрорельефов, остросфокусированный пучок тяжелых ионов, профиль канавки, коэффициент ионного распыления.

Повышение качества приборов и машин непосредственно связано с важнейшей научной проблемой — оптимизацией свойств поверхности и приповерхностного слоя деталей. Именно эти факторы в большинстве случаев определяют такие важнейшие эксплуатационные характеристики приборов, как износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление схватыванию, электро- и теплопроводность, контактная жесткость и др. Одна из задач этой проблемы — оптимизация геометрических параметров поверхностного слоя материала деталей.

Основными аспектами этой задачи являются:

- выявление взаимосвязи микрогеометрии поверхностей с их служебными свойствами;
- определение микрогеометрических параметров поверхностей, наиболее полно и точно отражающих их взаимосвязь со служебными свойствами деталей;
- создание методов обработки, позволяющих точно и в широких пределах воспроизводить микро- и нанорельеф поверхностей с учетом параметров, заданных конструктором (как согласно ГОСТ 2789-73, так и вне его рамок).

Регулярный микрорельеф, характеризующийся, в отличие от шероховатой поверхности, одинаковой формой, размерами и взаимным расположением микронеровностей, является, в связи с тенденцией к миниатюризации в приборостроении, неотъемлемой конструктивной особенностью деталей приборов. В качестве примера можно привести тонкие элементы расщепленных систем, магнитные и оптические диски, дифракционные решетки, конструкционные элементы деталей микроэлектроники, детали микромеханики.

Возможности известных способов регуляризации микрогеометрии (вибрационное накачивание, гравировка, литография, лазерная обработка и т.д.), однако, ограничены, поэтому в настоящее время актуальной является разработка новых технологических способов регуляризации, дополняющих и расширяющих область применения уже известных.

В основу одного из таких новых способов — технологии ионного форматирования — положен процесс распыления материала поверхности твердого тела при бомбардировке его ускоренными ионами. Количественно этот процесс характеризуется коэффициентом ионного распыления  $Y$ , который определяется как среднее число атомов, удаляемых с поверхности твердого тела одним падающим ионом (атом/ион). Коэффициент ионного распыления зависит от энергии ускоренных ионов, заряда и массы ионов, угла падения ионов на поверхность и дозы облучения; энергии связи атомов мишени, их массы и заряда ядра; наличия примесей на поверхности и приповерхностном слое; температуры обрабатываемой поверхности и ряда других параметров облучения.

Формирование регулярных микро- и нанорельефов остросфокусированным пучком тяжелых ионов обладает, по сравнению с существующими методами, рядом достоинств:

- диапазон дискретных значений следа пучка от 10 нм и выше;
- отсутствие ограничений по виду обрабатываемых материалов и их твердости;
- хорошая воспроизводимость и контролируемость параметров обработки;
- возможность поддержания на низком уровне тепловых эффектов в зоне воздействия пучка.

При этом наибольший интерес представляет режим работы в области нелинейного распыления, который характеризуется значительными коэффициентами ионного распыления и высокой линейной скоростью движения пучка по поверхности обрабатываемого материала, а следовательно, малым временем экспозиции. Следует отметить, что нелинейное распыление материалов при воздействии пучков тяжелых ионов начинается при достижении определенного предела по энерговыделению [1]. Существенное влияние на процесс распыления оказывает также структура материала: при уменьшении размеров зерен нанокристаллических материалов до 10—15 нм в приповерхностном слое происходит резкое увеличение коэффициента распыления.

Обработка поверхности пучком ионов осуществляется в вакууме. Форма микрорельефа в поперечном сечении определяется распределением плотности тока пучка ионов в зоне обработки. Сформированный пучок ионов сканируется по поверхности заготовки в импульсном или постоянном режиме, при этом, в зависимости от типа создаваемого микрорельефа, осуществляется перемещение самой заготовки. Возможность использования пучков тяжелых ионов с разной массой, а также модуляции тока и распределения плотности тока пучка ионов в зоне обработки позволяет формировать регулярные микрорельефы нового типа, которые нельзя получить другими способами.

Практически допустимым, относительно сложности создания инжектора ионов, ионно-оптической системы и других узлов установки ионного форматирования, а также обеспечения приемлемых значений коэффициентов ионного распыления, является использование тяжелых ионов с энергией 50—80 кэВ [2]. Указанный диапазон значений энергии пучков тяжелых ионов выбран на основе проведенных различными авторами экспериментальных исследований [1].

Форма канавки в поперечном сечении, получаемая в результате ионного распыления, — одна из основных характеристик создаваемого микрорельефа. Поэтому исключительно важным является исследование процесса формирования канавки и определение основных параметров, влияющих на ее геометрию.

Для исследования процесса формирования канавки разработана математическая модель на основе рекомендаций, приведенных в работах [1—3]. Рассмотрим исходные аналитические зависимости, определяющие процессы ионного распыления и формирования рельефа канавки на поверхности мишени из титана. Распыление осуществляется остросфокусирован-

ным пучком ионов висмута с нормальным распределением плотности тока в плоскости обработки при диаметре пучка 0,5 и 0,1 мм.

Скорость распыления материала поверхности мишени определяется зависимостью [1]

$$W = 1,04 \cdot 10^{-5} j_i Y M_2 / \rho, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока пучка ионов;  $M_2$  — массовое число атомов мишени;  $\rho$  — плотность материала мишени.

Для оценочных расчетов коэффициентов распыления в линейной области использовалась формула Смита [1] на основе теории Зигмунда:

$$Y = \frac{20}{E_{\text{суб}}} Z_1^2 Z_2^2 \frac{M_1}{M_2} \frac{E}{(E - 50 Z_1 Z_2)^2}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{суб}}$  — энергия сублимации;  $M_1$  — массовое число иона;  $Z_1, Z_2$  — атомные номера иона и атома мишени соответственно;  $E$  — энергия иона; при расчетах области распыления в данную формулу вводятся поправочные коэффициенты, полученные на основе экспериментальных исследований.

В общем случае коэффициент ионного распыления  $Y$  зависит от угла  $\theta$  между направлением падения ионного пучка и нормалью к поверхности. Согласно работе [1] эту зависимость можно представить в следующем виде:

$$Y = Y_0 \sec^n \theta, \quad (3)$$

где  $Y_0$  — коэффициент распыления при нормальном падении пучка, определяемый по формуле (2);  $n=1,5 \dots 2$ .

Плотность тока  $j$  в плоскости обработки имеет распределение, близкое к нормальному [2, 3] (рис. 1), и характеризуется зависимостью

$$j = \frac{j_0}{\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где  $\sigma, j_0$  — экспериментально определяемые параметры;  $r$  — радиус кольца мишени.

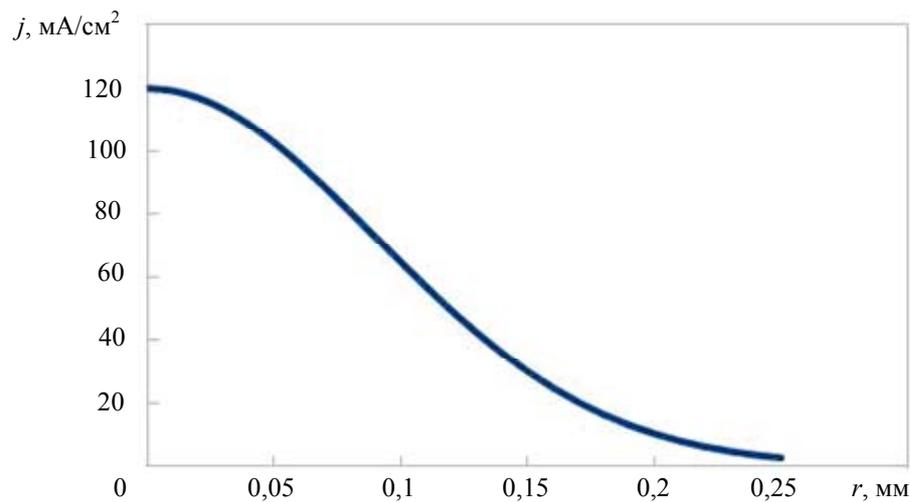


Рис. 1

Для расчета формы канавки поверхность мишени условно разделена на кольца толщиной  $\Delta r$  (рис. 2). Если плотность тока ионного пучка  $j(r)$  в плоскости обработки задается зависимостью (4), то можно считать, что на поверхность каждого кольца площадью  $\Delta s$  по нормали за время  $\Delta t$  падает  $\Delta N_{\text{ион}}$  ионов.

Согласно определению коэффициента ионного распыления  $Y$  на каждый падающий ион приходится  $Y$  распыленных атомов. Следовательно, за время  $\Delta t$  с поверхности каждого кольца распыляется  $\Delta N$  атомов мишени.

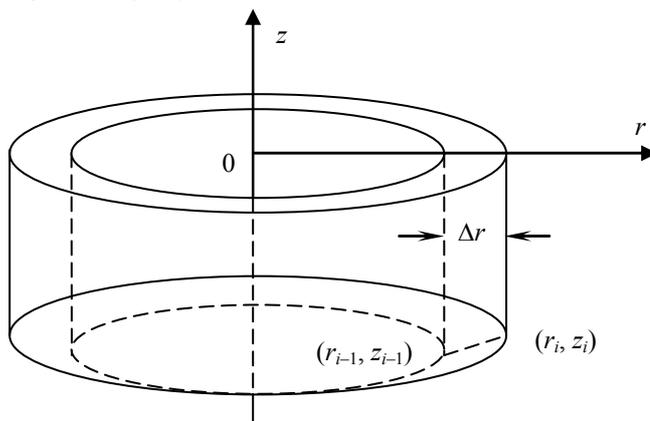


Рис. 2

На рис. 3, а, б представлены результаты расчета по разработанной математической модели для мишени из титана, облучаемой ионами висмута. Штриховой линией показана форма канавки, получаемая при независимости коэффициента  $Y$  от угла  $\theta$  при фиксированном времени экспозиции. Она практически полностью повторяет форму распределения плотности тока  $j$ . Если учитывать, что в процессе ионного распыления угол падения ионов на поверхность подложки изменяется, то формируемый рельеф канавки приобретает вид, показанный на рис. 3 сплошной линией.

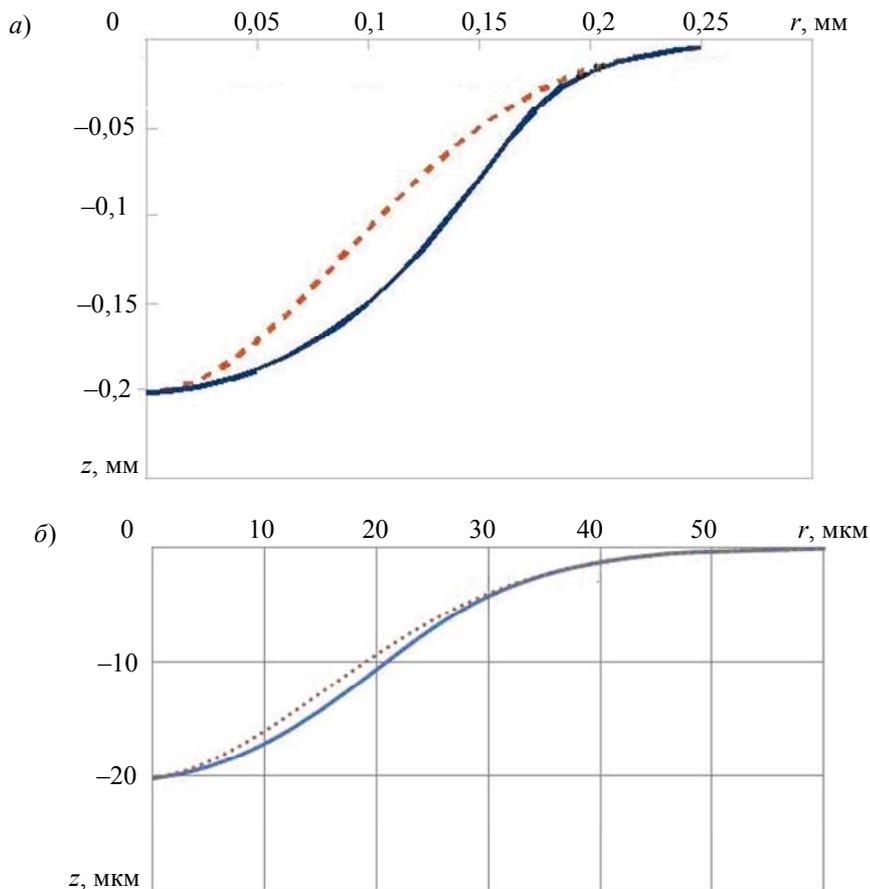


Рис. 3

Таким образом, как показывают результаты расчета, распределение плотности тока в пучке ионов является основным параметром, определяющим форму канавки на поверхности

металлической подложки при воздействии сфокусированного пучка тяжелых ионов. При увеличении времени экспозиции необходимо учитывать изменение угла падения ионов на поверхность канавки, что приводит к увеличению коэффициента ионного распыления и существенно влияет на форму канавки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Плешивцев Н. В., Бажин А. И.* Физика воздействия ионных пучков на материалы. М.: Вузовская книга, 1998. 392 с.
2. *Шмидберский П. А.* и др. НИР по разработке ионно-лучевой установки для травления поверхности металлической подложки (УИФ) / Сибирский физ.-техн. ин-т: Отчет. Томск, 1991.
3. *Шмидберский П. А., Саметова А. А.* Получение пучков тяжелых ионов нанометрического размера // Теплофизика, гидрогазодинамика, теплотехника: Сб. статей. Тюмень: Изд-во ТГУ, 2005. Вып. 4.

#### *Сведения об авторах*

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Анна Алексеевна Шмидберская** — магистр; Тюменский государственный университет, кафедра микро- и нанотехнологий; E-mail: polovinca777@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
22.01.13 г.