

Перспективы получения нанометровой шероховатости поверхности ионно-лучевым методом

© Е.В. Одинокова, Ю.В. Панфилов, П.И. Юрченко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Анализируются перспективы получения нанометровой шероховатости поверхности с помощью ионно-лучевой обработки, необходимой для изготовления элементов оптических систем с шероховатостью поверхности порядка $Ra\ 1...4$ нм, например, зеркал лазерных гироскопов, линз и зеркал телескопов и т. п. Приводятся результаты теоретических исследований изменения коэффициента распыления материалов при ионно-лучевой обработке в зависимости от профиля микронеровностей поверхности и угла падения ионов. Описана методика проведения экспериментальных исследований с учетом полученных теоретических зависимостей, а также с различными энергетическими характеристиками пучка ионов и при различной длительности обработки. Представлены результаты исследования рельефа поверхности ситалловой подложки с помощью атомно-силового микроскопа Solver Next до ионно-лучевой обработки и после воздействия на нее потока ионов с энергиями 1 и 3 кэВ, направляемого под различными углами. Показан пример представления результатов измерения микрорельефа поверхности, полученных с помощью зондовых микроскопов, в относительных единицах после компьютерной обработки сканов.

Ключевые слова: атомно-гладкая поверхность, ионно-лучевая обработка, коэффициент распыления, угол падения ионов.

В последнее время появилось много статей о якобы полученных уровнях шероховатости поверхностей, исчисляемых долями нанометра, причем авторов не смущает тот факт, что размеры отдельных атомов составляют доли нанометра. В результате детального анализа этих статей выясняется, что мало кто задумывается о самом понятии «атомарно-гладкой» поверхности, а измеренные с помощью сканирующих зондовых микроскопов параметры шероховатости отражают не более чем результаты математической обработки полученных изображений, которые зачастую составляют даже доли ангстрема!

Из литературы известно [1], что одним из самых прецизионных методов обработки поверхностей является ионно-лучевое травление, которое используется для уменьшения шероховатости поверхности различных деталей, например, элементов оптических систем: зеркал, линз, призм и т. п. Известен термин «ионное полирование», определяющий физическое распыление вершин микронеровностей поверхности высокоэнергетичными ионами инертных или/и химически активных газов.

В большинстве опубликованных работ, посвященных ионному полированию, исследуется зависимость параметров шероховатости обработанной ионным пучком поверхности от угла падения ионов. Однако в этих работах, как правило, не учитывается форма микронеровностей, зависящая от вида и режимов механической или химико-механической обработки поверхности подложки.

Целью данной работы является теоретическое определение влияния формы микронеровностей исходной поверхности и угла падения ионов на коэффициент физического распыления материала и экспериментальное подтверждение полученных расчетных результатов.

Важность такого исследования определяется, на наш взгляд, двумя факторами: во-первых, практической потребностью в уменьшении шероховатости поверхности деталей до Ra порядка $1 \dots 4$ нм, например, для зеркал лазерного гироскопа, линз и зеркал телескопа, установок фотолитографии; во-вторых, теоретическим обоснованием потенциальных возможностей ионно-лучевого травления в уменьшении шероховатости поверхности твердого тела.

Как известно [2], коэффициент физического распыления, наряду с плотностью ионного тока, определяет скорость удаления материала с обрабатываемой ионами поверхности. На величину коэффициента распыления существенное влияние оказывают энергия ионов и угол их падения на поверхность. Энергия ионов определяет глубину их проникновения в твердое тело и влияет на количественные характеристики каскада парных соударений [2] между высокоэнергетическими ионами и атомами кристаллической решетки твердого тела.

Коэффициент ионного распыления Y_p определяется как среднее число удаленных с поверхности атомов под действием одной бомбардирующей частицы:

$$Y_p = N_a / N_{и},$$

где N_a — число выбитых (распыленных) атомов материала; $N_{и}$ — число ионов, бомбардирующих материал.

Коэффициент распыления зависит также от вида распыляемого материала, его химического и фазового состава, плотности, ориентации граней кристаллической решетки по отношению к направлению движения падающих ионов, от других факторов [2]. Согласно гипотезе о парных соударениях [3], при ионной бомбардировке поверхности твердого тела ионами с энергией в диапазоне от 0,2 до 5 кэВ коэффициент распыления зависит от угла падения ионов φ , отложенного от нормали к бомбардируемой поверхности (рис. 1). В диапазоне углов φ от 0 до 60° зависимость коэффициента распыления Y_p от φ имеет следующий вид:

$$Y_p(\varphi) = Y_p(0) / \cos \varphi,$$

где $Y_p(0)$ — коэффициент распыления при нормальном падении ионов.

Данная зависимость основана на механизме физического распыления. Коэффициент распыления при нормальном падении ионов прямо пропорционален энергии, рассеиваемой в поверхностном слое материала, в пределах которого упругие столкновения будут приводить к распылению. При угле падения φ длина пробега ионов, а следовательно, и число столкновений в этом слое будут в $1/\cos \varphi$ раз больше.

Форма микронеровностей шероховатой поверхности после механической обработки моделируется различными геометрическими фигурами: пирамидами, полусферами, конусами и др. Пирамида является одной из наиболее распространенных моделей микронеровности поверхности детали после шлифования (рис. 2), поэтому расчет зависимости коэффициента распыления материала Y_p от угла падения φ ведется для микронеровности в виде пирамиды с углом при вершине α .

Расчет коэффициента распыления Y_p в зависимости от угла падения ионного пучка φ в диапазоне от 0 до 85° (угол φ более 60° использован в справочных целях) и угла при вершине пирамиды α в диапазоне от 180 до 95° показал неожиданный для нас результат: коэффициент распыления материала, а следовательно, скорость ионного травления, мало зависят от угла α , если угол падения ионного пучка φ равен 20° (рис. 3).

Чтобы объяснить полученные результаты расчета, были построены пять геометрических моделей с углом

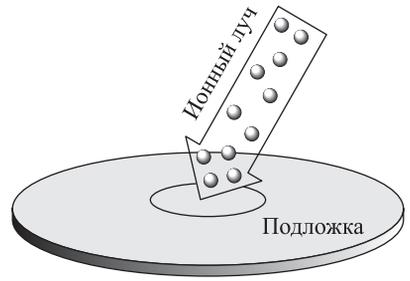


Рис. 1. Модель ионного бомбардирования поверхности подложки

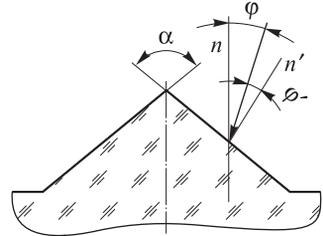


Рис. 2. Модель микронеровности поверхности в виде пирамиды

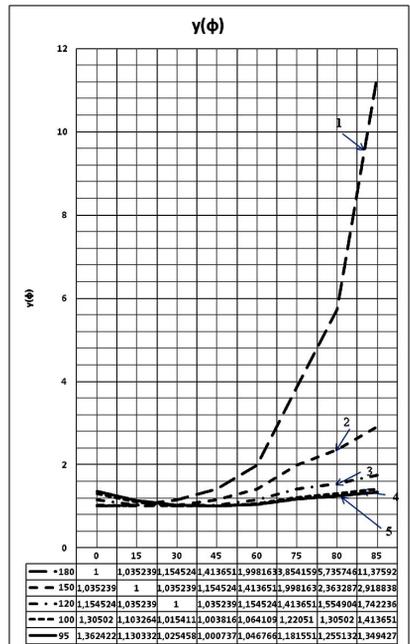
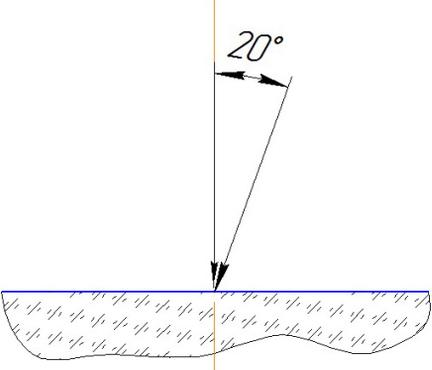
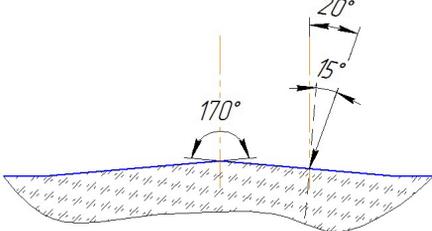
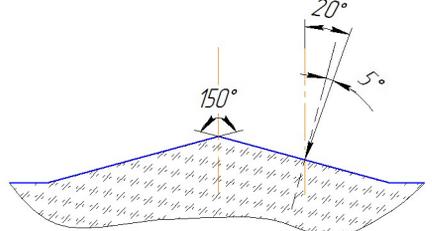


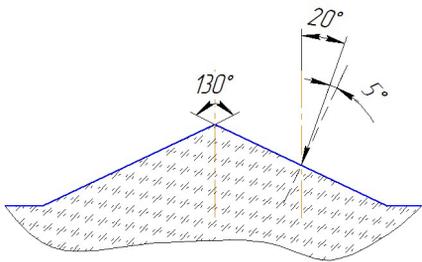
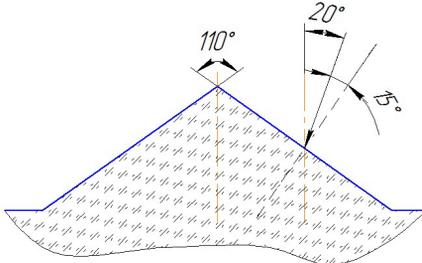
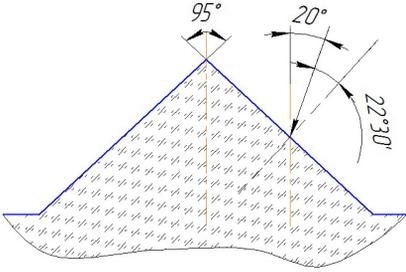
Рис. 3. Зависимость коэффициента распыления Y_p от угла падения ионного пучка φ от 0 до 85° и угла при вершине пирамиды α : 1 — 180°; 2 — 150°; 3 — 120°; 4 — 100°; 5 — 95°

падения иона 20° , отложенным от вертикали (табл. 1). Из геометрических моделей видно, что при изменении угла α от 180 до 95° угол падения иона φ на наклонную боковую грань пирамиды изменяется в небольшом интервале — от 20 до 5° , что дает незначительное для влияния на скорость ионного распыления изменение коэффициента распыления Y_p от $1,082$ до $1,004$ атом/ион.

Таблица 1

Геометрические модели ионного распыления микронеровности в виде пирамиды

Исходные данные и результат расчета	Геометрическая модель
$\alpha = 180^\circ;$ $\varphi = 20^\circ;$ $Y_p(20^\circ) = 1/\cos(20^\circ) = 1,06412$	
$\alpha = 170^\circ;$ $\varphi = 15^\circ;$ $Y_p(15^\circ) = 1/\cos(15^\circ) = 1,0353$	
$\alpha = 150^\circ;$ $\varphi = 5^\circ;$ $Y_p(5^\circ) = 1/\cos(5^\circ) = 1,003820$	

<p>$\alpha = 130^\circ;$ $\varphi = -5^\circ;$ $Y_p(-5^\circ) = 1/\cos(-5^\circ) = 1,0353$</p>	
<p>$\alpha = 110^\circ;$ $\varphi = 15^\circ;$ $Y_p(15^\circ) = 1/\cos(15^\circ) = 1,0353$</p>	
<p>$\alpha = 95^\circ;$ $\varphi = 20^\circ 30';$ $Y_p(20^\circ 30') = 1/\cos(20^\circ 30') = 1,08239$</p>	

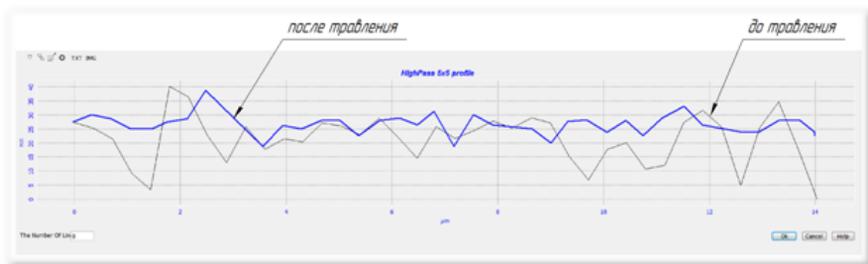
Следующим этапом работы было исследование рельефа поверхности ситалловой подложки с помощью атомно-силового микроскопа Solver Next до ионно-лучевой обработки и после воздействия на нее потока ионов с энергией порядка 1 кэВ, направляемого под углами 20° и 90° к поверхности подложки. Профиллограммы (рис. 4) рельефа исходной поверхности ситалловой подложки позволят оценить обоснованность представления микронеровностей в виде пирамид.

В результате проведенных экспериментов можно отметить, что при травлении подложки под углом в 20° микрорельеф становится более однородным по глубине, в то время как при травлении под углом в 90° наблюдается появление отдельных микроуглублений.

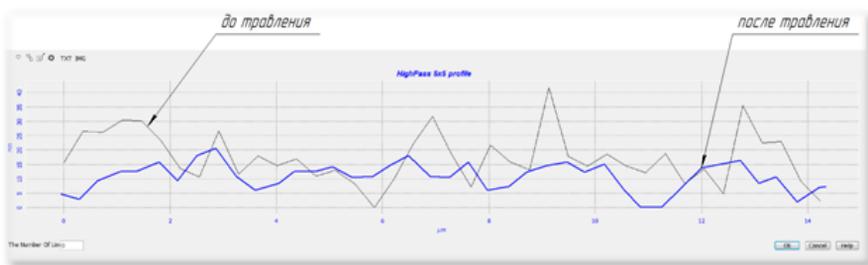
Как было отмечено выше, на коэффициент распыления существенно влияет энергия падающих ионов. Нетрудно предположить, что энергия ионов оказывает влияние и на шероховатость обрабатываемой поверхности. Из литературы известно, что максимальная энергетическая эффективность ионного распыления лежит в диапазоне энергий ионов 300...500 эВ. При этом наибольшая доля энергии иона расходуется на

процесс распыления материалов [2]. Проведенные нами исследования влияния энергии ионов на шероховатость обрабатываемой поверхности дали неоднозначные результаты (рис. 5 и 6).

Из приведенных на рис. 5 и 6 гистограмм следует, что при токе разряда 100 мА и ускоряющем напряжении 2 кэВ, в зависимости от химического состава ионного пучка и времени обработки, интегральное рас-



а

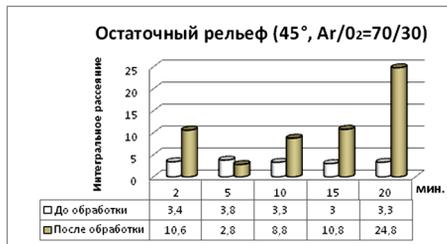


б

Рис. 4. Профилотраграмма поверхности танталовой подложки до и после травления под углом в 20° (а) и в 90° (б)

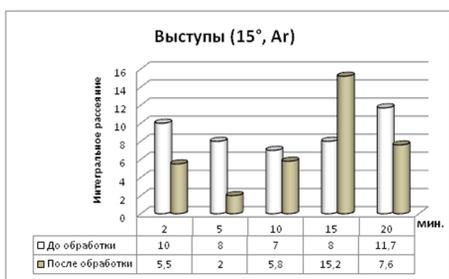


а

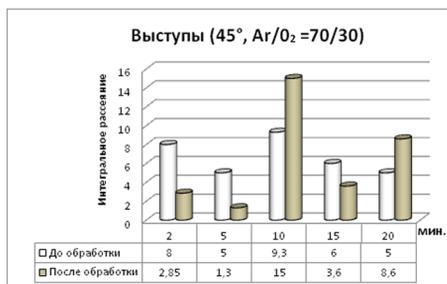


б

Рис. 5. Результаты исследования шероховатости поверхности (среднестатистическая оценка) танталовой подложки до обработки и после воздействия на нее ионов аргона, падающих под углом 15° (а) и пучка смеси ионов аргона и кислорода в соотношении 70/30, падающих под углом 45°, при длительности обработки от 2 до 20 мин



а



б

Рис. 6. Результаты исследования шероховатости поверхности (количество максимальных пиков) ситалловой подложки до обработки и после воздействия на нее ионов аргона, падающих под углом 15° (а), и пучка смеси ионов аргона и кислорода в соотношении 70/30, падающих под углом 45° (б), при длительности обработки от 2 до 20 мин

сеяние поверхности (в данном случае это характеристика шероховатости) как уменьшается, так и увеличивается. Причем, это относится и к количеству максимальных пиков («выступы»), и к среднестатистической оценке шероховатости поверхности («остаточный рельеф»), что свидетельствует о необходимости проведения отдельных исследований влияния энергии ионного пучка и времени его воздействия на параметры шероховатости обрабатываемой поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. Т. III-8: Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении.* Панфилов Ю.В., ред. Москва, Машиностроение, 2000, 744 с.
- [2] Бериш Р. *Распыление твердых тел ионной бомбардировкой.* Москва, Мир, 1984, 336 с.
- [3] Бродай И., Мерей Дж. *Физические основы микротехнологии.* Москва, Мир, 1985, 496 с.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Одинокова Е.В., Панфилов Ю.В., Юрченко П.И. Перспективы получения нанометровой шероховатости поверхности ионно-лучевым методом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/801.html>

Одинокова Екатерина Вадимовна — студентка 4-го курса кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Панфилов Юрий Васильевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: вакуумное технологическое оборудование, нанотехнологии. e-mail: panfilov@bmstu.ru

Юрченко Павел Игоревич — аспирант кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.