

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОТРАЖАЮЩИХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИХ МИКРОРЕЛЬЕФ И СВЕТОРАССЕЯНИЕ

© 2004 г. И. А. Файзрахманов*, канд. физ.-мат. наук; Ю. П. Стрельников**, канд. физ.-мат. наук; И. Б. Хайбуллин*, доктор физ.-мат. наук

* Казанский физико-технический институт КНЦ РАН, г. Казань

** Государственный институт прикладной оптики, г. Казань

E-mail: fiak@kfti.knc.ru

Исследовано влияние бомбардировки ионами криптона с энергией 20 кэВ на микрорельеф и светорассеяние отражающих слоев алюминия. Установлено, что при скользких углах падения ионов (примерно 85°) происходит сглаживание микрорельефа и уменьшение светорассеяния не менее чем в пять раз. Установлено, что ионная полировка происходит в определенном интервале доз облучения. Ионная полировка нарезных дифракционных решеток (1200 шт/мм) ведет к уменьшению их светорассеяния в 3 раза.

Коды OCIS: 240.0240, 310.1620.

Поступила в редакцию 16.09.2003.

Введение

Одним из важных параметров, определяющих качество оптических элементов, в частности отражающих дифракционных решеток, является их светорассеяние. Светорассеяние определяется характерными размерами микрорельефа границы раздела вакуум/среда и оптических неоднородностей самой среды. В случае дифракционных решеток-матриц определяющим является микрорельеф поверхности, так как именно микрорельеф переносится на копию. В связи с этим имеется проблема уменьшения шероховатостей поверхности отражающих покрытий, в качестве которых в основном используются слои алюминия.

Одним из эффективных методов управления микрорельефом поверхности является ионное распыление. Исследования в этом направлении ведутся давно [1–3]. Основной вывод, который можно сделать из анализа имеющихся данных, заключается в том, что изменение топографии поверхности определяется как кристаллической структурой и микрорельефом исходной поверхности, так и режимами ионного распыления (энергией ионов, углом падения, временем распыления). Общего критерия выбора режимов ионного распыления, при которых происходило бы сглаживание микрорельефа, не существует.

Для поликристаллических материалов, к которым относятся и отражающие слои алюминия, проблема еще более сложная, так как коэффициент распыления зависит от ориентации кристаллитов. Кроме того, межкусталлитные границы характеризуются повышенной концентрацией дефектов структуры. Все эти факторы ведут к неоднородному распылению поверхности мишени, вследствие чего шероховатость поверхности увеличивается. В связи со

сказанным возникает вопрос: является ли этот вывод общим или же существуют режимы распыления, при которых происходит сглаживание микрорельефа, т. е. ионная полировка. Цель данной работы состояла в том, чтобы ответить на этот вопрос.

Методика и техника эксперимента

Отражающие слои алюминия толщиной 300 нм осаждались на полированную поверхность стекла марки К8 методом термического испарения в вакууме. Ионная бомбардировка осуществлялась на ускорителе ИЛУ-3. Для исключения эффектов, связанных с образованием оптических неоднородностей в отражающем слое алюминия, бомбардировка поверхности пленок проводилась ионами инертного газа криптона с энергией 20 кэВ. Поскольку средний проекционный пробег ионов криптона при этой энергии мал ($R_p = 16$ нм), а коэффициент распыления, наоборот, большой ($S > 1$), это исключает возможность образования пузырьков имплантированных атомов криптона (эффект блистеринга). Поэтому можно считать, что изменение светорассеяния отражающего слоя алюминия при таких режимах облучения связано только с изменением микрорельефа поверхности в процессе распыления. В работе исследовалась зависимость микрорельефа и светорассеяния пленок алюминия от дозы бомбардирующих ионов, а также от угла падения ионов на поверхность. Микрорельеф поверхности исследовался методом угольно-платиновых реплик на электронном микроскопе ЭМ-100. Измерение светорассеяния проводилось двумя методами. Угловая зависимость интенсивности рассеянного света ($\lambda = 366$ нм) измерялась вблизи направления зеркального отражения на установке АД1.500.002

(ГИПО). Погрешность измерения не превышала 50%. Для каждого образца измерения проводились дважды: до и после ионной бомбардировки. Кроме того, в некоторых случаях интегральное светорассеяние измерялось на приборе ЛУИР разработки ГИПО. Интегральный коэффициент светорассеяния исходных образцов, измеренный на длине волны $\lambda = 628$ нм, не превышал 0,1%.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены результаты измерений угловых зависимостей (вблизи направления зеркального отражения) относительной интенсивности рассеянного света образцов, бомбардированных различными дозами ионов криптона при нормальном угле падения ($\theta = 0^\circ$). Хорошо видно, что с ростом дозы (D) ионов криптона интенсивность рассеянного света существенно возрастает. Увеличение светорассеяния связано с увеличением шероховатости поверхности, что хорошо видно из рис. 2а и 2б, на которых приведены фотографии угольно-платиновых реплик с поверхности исходного образца и образца, бомбардированного ионами криптона дозой 5×10^{16} см $^{-2}$. Видно, что наиболее характерным изменением рельефа поверхности является увеличение высоты выступов и выявление границ зерен. Кроме того, из рисунка видно, что в слое алюминия присутствуют кристаллиты, которые имеют существенно меньший коэффициент распыления, чем остальные. Как обсуждалось выше, это может быть связано с ориентационной зависимостью коэффициента распыления. Поэтому изменение светорассе-

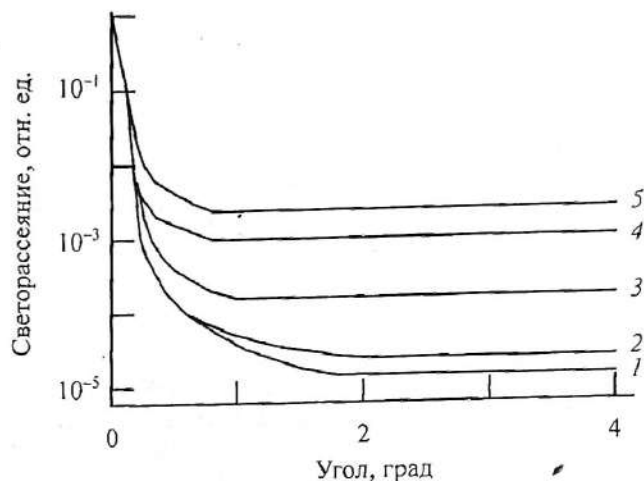


Рис. 1. Угловые зависимости интенсивности рассеянного света вблизи направления зеркального отражения пленок алюминия, бомбардированных ионами криптона ($\theta = 0^\circ$): 1 – исходный образец; 2 – $D = 5 \times 10^{15}$; 3 – $D = 10^{16}$; 4 – $D = 5 \times 10^{16}$; 5 – $D = 10^{17}$ см $^{-2}$.

яния при ионной бомбардировке и формирующийся микрорельеф могут зависеть от размеров кристаллитов, степени и характера текстурированности пленок, что мы наблюдали экспериментально.

Таким образом, при бомбардировке ионами криптона под нормальным углом падения отражающих пленок алюминия происходит существенное увеличение светорассеяния, что связано с ростом высоты микронеровностей поверхности. Развитие шероховатой поверхности связано с неоднородностью коэффициента распыления по поверхности пленки и обусловлено ее поликристаллической структурой.

Дальнейшие исследования показали, что угол падения ионов на распыляемую поверхность ока-

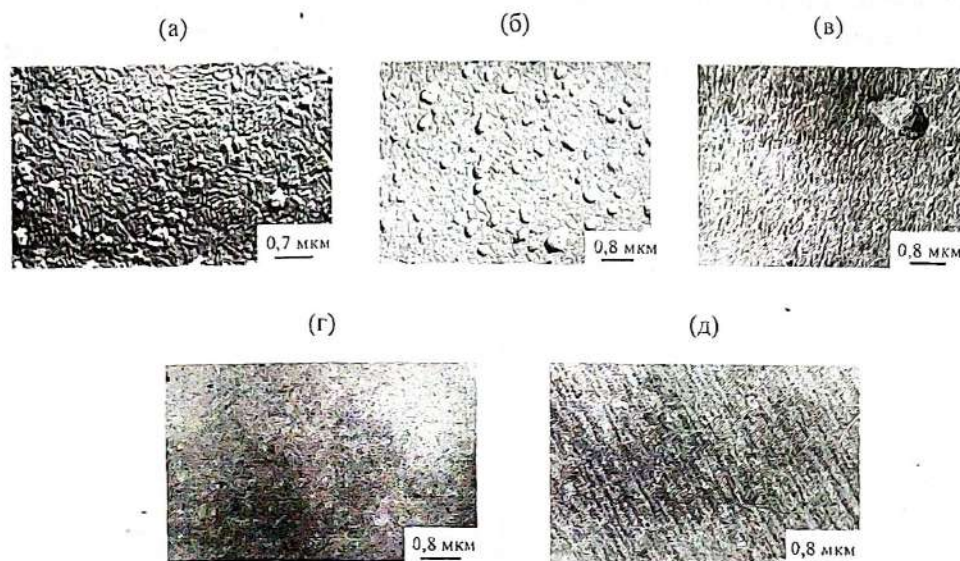


Рис. 2. Фотографии реплик с поверхности пленок алюминия, бомбардированных ионами криптона ($E = 20$ кэВ): а – исходная поверхность; б – $\theta = 0^\circ$, $D = 5 \times 10^{16}$ см $^{-2}$; в – $\theta = 85^\circ$, $D = 6 \times 10^{15}$ см $^{-2}$; г – $\theta = 85^\circ$, $D = 5 \times 10^{16}$ см $^{-2}$; д – $\theta = 85^\circ$, $D = 3,6 \times 10^{17}$ см $^{-2}$.

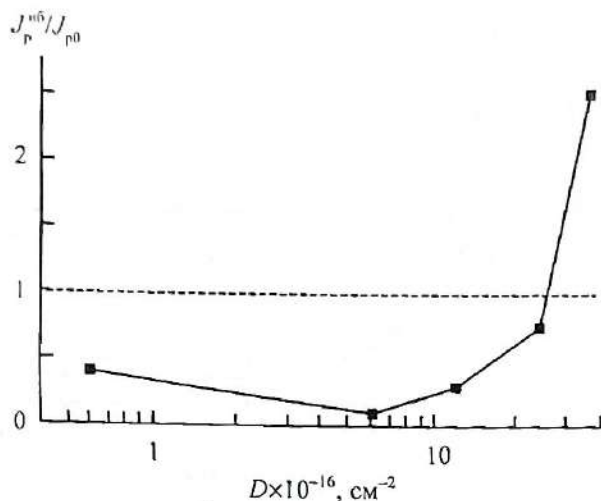


Рис. 3. Зависимость от дозы D отношения J_r^{n6}/J_{r0} интенсивностей рассеянного света пленок алюминия до (J_{r0}) и после (J_r^{n6}) бомбардировки ионами криптона с $E = 20$ кэВ и $\theta = 85^\circ$.

зывает существенное влияние на ее эволюцию. Степень возникающей шероховатости из-за неоднородного распыления уменьшается, что сказывается также и на величине светорассеяния. Так, если при бомбардировке при нормальном угле падения ($\theta = 0^\circ$) светорассеяние увеличивается более чем на два порядка, то при $\theta = 60^\circ$ — только в 2 раза при одной и той же толщине распыленного слоя. Более того, при угле падения ионов $\theta = 85^\circ$ наблюдается уменьшение уровня рассеянного света по сравнению с исходным значением, т. е. происходит ионная полировка поверхности алюминия. На рис. 3 приведена зависимость отношения интенсивности рассеянного света образца после бомбардировки J_r^{n6} к интенсивности J_{r0} исходного образца от дозы бомбардировки ионами криптона ($\theta = 85^\circ$). Видно, что эта зависимость имеет немонотонный характер: сначала происходит уменьшение величины рассеянного света ($J_r^{n6}/J_{r0} < 1$), а затем светорассеяние растет и при дозах бомбардировки более $2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ оно превышает светорассеяние исходного образца. При оптимальной дозе ионной бомбардировки, которая составляет $D \approx 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, светорассеяние умень-

шается не менее чем в пять раз (с учетом ошибки измерения).

На рис. 2в, 2г и 2д приведены фотографии угольно-платиновых репик с поверхности образцов, бомбардированных дозой $6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, оптимальной дозой $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и дозой $3,6 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, при которой наблюдается увеличение светорассеяния примерно в 2,5 раза относительно исходного значения. Видно, что происходит сглаживание исходного микрорельефа. Однако при этом наблюдаются формирование и рост бороздчатого микрорельефа поверхности, что является причиной увеличения светорассеяния при бомбардировке дозами более $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, немонотонная дозовая зависимость светорассеяния пленок алюминия при углах падения ионов $\theta = 85^\circ$ связана с наличием двух конкурирующих процессов: уменьшением исходной шероховатости поверхности и формированием и ростом бороздчатого микрорельефа.

Для проверки этих результатов были проведены эксперименты по ионной полировке алюминиевых покрытий, которые предварительно бомбардировались ионами криптона ($D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) под нормальным углом падения с целью создания значительно более шероховатой поверхности по сравнению с напыленными пленками алюминия (рис. 4а). Предварительная ионная бомбардировка приводила к существенному повышению светорассеяния (до $6 \pm 10\%$). Затем они подвергались ионной бомбардировке в режиме ионной полировки ($\theta = 85^\circ$). При этом наблюдается немонотонная зависимость светорассеяния от дозы, качественно похожая на приведенную на рис. 3. При оптимальной дозе ионной бомбардировки (для этих образцов $D \approx 1,2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$) светорассеяние уменьшалось приблизительно в 5 раз.

На рис. 4а, 4б и 4в приведены фотографии угольно-платиновых репик с поверхности предварительно протравленного образца и образцов, которые затем подвергались ионной бомбардировке ($\theta = 85^\circ$) дозами 3×10^{16} и $1,2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Видно, что происходит сглаживание исходного мик-

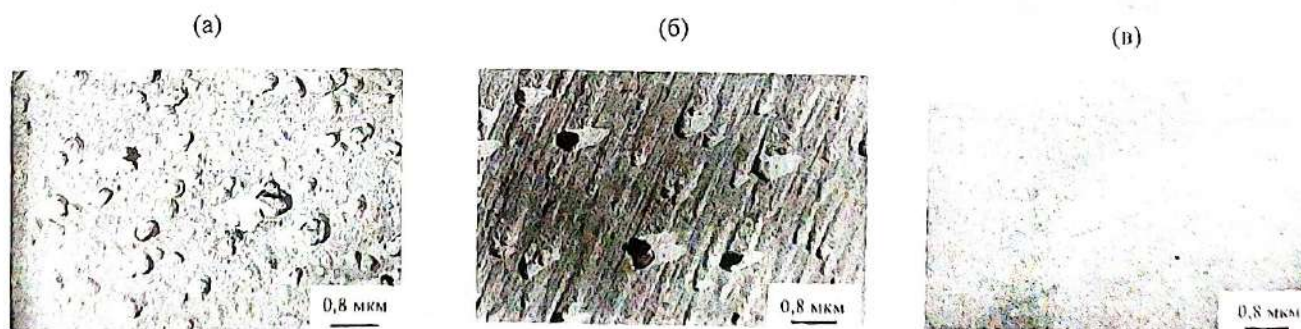


Рис. 4. Фотографии репик с поверхности предварительно растравленных (Kt^+ , $E = 20$ кэВ, $\theta = 0^\circ$, $D = 6 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) пленок алюминия при разных дозах бомбардировки ионами криптона в режиме ионной полировки ($\theta = 85^\circ$): а — исходная поверхность, $D = 0$; б — $D = 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$; в — $D = 1,2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

рельефа. Однако, как и в случае напыленных пленок алюминия, наблюдается формирование бороздчатого микрорельефа. В этом отношении интересен рис. 4б, который, по нашему мнению, свидетельствует о том, что одной из причин этого являются микронеровности (выступы) исходной поверхности.

Кроме того, были проведены эксперименты по ионной полировке нарезных дифракционных решеток (1200 шт/мм), для которых также характерна немонокотная зависимость светорассеяния от дозы. При этом их светорассеяние уменьшалось примерно в 3 раза.

Таким образом, для всех трех типов исследованных нами покрытий алюминия существует интервал доз бомбардировки под скользящим углом падения ионов криптона, в котором происходит определенное сглаживание микрорельефа поверхности и соответствующее уменьшение светорассеяния, т. е. происходит ионная полировка поверхности с существенно неоднородным коэффициентом распыления.

Каков критерий выбора режима ионной полировки?

Для того чтобы ответить на этот вопрос, заметим, что эволюция микрорельефа поверхности определяется конкретным видом угловой зависимости коэффициента распыления, который в свою очередь зависит от соотношения масс атомов мишени и бомбардирующих ионов, а также их энергии. Для углов, лежащих в интервале $0^\circ < \theta < 60^\circ$, угловая зависимость приблизительно описывается выражением:

$$S(\theta) = S(0^\circ)(\cos\theta)^{-f}, \quad (1)$$

где f является функцией отношения масс атома мишени (M_2) и падающего иона (M_1). Для $M_2/M_1 < 3$ параметр $f = 5/3$. Для больших отношений масс параметр f уменьшается и при $M_2/M_1 > 7$ становится равным $f = 1$. Кроме того, показатель f зависит от энергии бомбардирующих ионов и становится меньше 1 с уменьшением энергии бомбардирующих ионов ($E \approx 1$ кэВ). Для ионов средних энергий коэффициент распыления быстро возрастает, достигает максимума при θ_m и уменьшается при $\theta > \theta_m$. Перемещение элемента поверхности при ионном распылении определяется скоростью распыления V :

$$V = S(\theta)J_0\cos\theta/N = J_0S(0^\circ)(\cos\theta)^{-f+1}/N, \quad (2)$$

где J_0 — плотность ионного тока, N — атомная плотность мишени. Из этого выражения видно, что если

коэффициент распыления $S(0^\circ)$ постоянен по всей поверхности и показатель степени $(1-f) < 0$, то любой элемент поверхности (неровность), для которого локальный угол $\theta > 0^\circ$, будет распыляться с большей скоростью, чем гладкая поверхность, и со временем исчезнет. Однако если $S(0^\circ)$ не постоянен по поверхности, то ионное распыление будет генерировать новые неровности на изначально плоских участках поверхности. Поэтому необходимо обеспечить более высокую селективность распыления неровностей относительно плоских участков поверхности по сравнению с той селективностью, которая следует из (2). Такую селективность можно достигнуть, если бомбардировку поверхности проводить под углами $\theta > \theta_m$. Это и является основным критерием выбора режима ионной полировки, которому удовлетворяют и наши условия экспериментов. Оценки показывают, что для случая распыления алюминия ионами криптона с $E = 20$ кэВ $\theta_m \approx 80^\circ$ [4]. Высокая селективность распыления неровностей достигается за счет того, что любое уменьшение локального угла падения ионов приводит к увеличению коэффициента распыления, плотности первичного потока ионов и вторичного потока отраженных ионов, плотность которого в рассматриваемом режиме сравнима с плотностью первичного пучка.

Таким образом, в результате проведенных исследований нами был обнаружен достаточно эффективный режим ионной бомбардировки, при котором происходит ионная полировка поверхностей даже с неоднородным по поверхности коэффициентом распыления, а также предложен критерий выбора режима ионной полировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла / Пер. с англ. / Под ред. Арцимовича Л. А. М.: Мир, 1967. 506 с.
2. Плешивцев Н. В. Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968. 344 с.
3. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Распыление сплавов и соединений, распыление под действием электронов и нейтронов, рельеф поверхности. Т. 2. Пер. с англ. / Под ред. Бериша Р. М.: Мир, 1986. 488 с.
4. Witcomb M. J. The angular dependence of the sputter yield maxima // Rad. Eff. 1976. V. 27. P. 223–227.