

РАССЕЯНИЕ АТОМОВ НА ШЕРОХОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТУПЕНЧАТОГО ПРОФИЛЯ

А.С. Долгов, А.А. Гетьман

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" (Харьков)
Украина*

Поступила в редакцию 19.07.2010

Теоретически рассматривается рассеяние медленных бомбардирующих атомов на твердой поверхности, имеющей геометрические дефекты условно-клиновидного профиля. Предполагается, что поверхность дефекта ("бороздки") представлена совокупностью атомных ступенек. В предположении о зеркальном отражении мононаправленного первичного потока на поверхностях ступенек найдены выражения для вероятностей выхода атома их бороздки для произвольного распределения параметров ступенек произвольного вида. Развиваемые приемы анализа распространяются на случаи изотропного распределения на входе в бороздку и условия диффузного рассеяния. Обсуждаются специальные варианты воздействия. Указываются области параметров, соответствующие высоким и низким вероятностям отражения, и зависимость этих величин от ориентации воздействия и макрогеометрии бороздок. Обсуждаются возможности технологического и диагностического применения результатов работы.

Ключевые слова: поток частиц, бороздка, откос, функция распределения, вероятность соударения, рассеяние, щель, вмятина.

Теоретично розглянуто розсіяння повільних бомбардуючих атомів на твердій поверхні, що має геометричні дефекти умовно-клинуватого профілю. Припускається, що поверхня дефекту ("рівчачку") представлена сукупністю атомних сходинок. У припущенні про дзеркальне відбиття моно спрямованого первинного потоку на поверхнях сходинок знайдені вирази для ймовірностей виходу атома із рівчачку для довільного розподілу параметрів сходинок довільного виду. Розвиваємі заходи аналізу розповсюджуються на випадки ізотропного розподілу на вході в рівчачок і умови дифузного розсіяння. Обговорюються спеціальні варіанти впливу. Вказуються області параметрів, що відповідають високим на низьким імовірності відбиття, і залежність цих величин від орієнтації впливу та макрогеометрії рівчачків. Обговорюються можливості технологічного та діагностичного застосування результатів роботи.

Ключові слова: потік частинок, борозенка, укіс, функція розподілу, імовірність співударання, розсіювання, щілина, вм'ятина.

Dispersion of slow bombarding atoms on the rigid surface having geometrical defects of conditionally wedge-shaped profile is theoretically considered. It is supposed, that the surface of defect ("groove") is presented by set of atomic steps. Expressions are found in the assumption of mirror reflexion of the monodirected primary stream on surfaces of steps for probabilities of an exit of atom of their groove for any steps parametres distribution of any kind. Developed receptions of the analysis extend on cases of isotropic distribution on an input in a groove and conditions of diffusive dispersion. Special variants of influence are discussed. Regions of parametres corresponding to high and low probabilities of reflexion, and dependence of these quantities on orientation of influence and macrogeometry of grooves are specified. Possibilities of technological and diagnostic application of work results are discussed.

Keywords: atomic particles flow, groove, slope, distribution function, particle reflection, gap, dent.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к эффекту рассеяния атомов при их столкновениях с поверхностью обусловлен как логикой комплексного исследования взаимодействия потоков частиц с поверхностью, так и прикладными потребностями анализа пучковых технологий, в условиях контакта поверхности с газовыми, плазменными сре-

дами и т.д. [1 – 3]. Применительно к реальным условиям, названный эффект, как правило, не обособлен, а является лишь некоторой составляющей процессов более общего вида, связанных также с распылением поверхности, осаждением на поверхность, нагревом среды, испарением, кинетикой газовой среды у поверхности и др. [1 – 4]. Ука-

занная особенность нередко серьезно осложняет возможности трактовки результатов наблюдений. В теории данное обстоятельство определяет две противоположные, но, в конечном счете, дополняющие друг друга тенденции: одна – это стремление к полному охвату всех обстоятельств той или иной конкретной ситуации, другая – абстрагирования от ряда обстоятельств с концентрацией внимания на одной предпочтительной стороне дела, в нашем случае – на рассеянии. Недостаток внимания к некоторым, возможно, немаловажным сторонам процесса оправдывается пристальным вниманием к некоторым другим признакам, отвечающим свойствам реальных процессов и структур. К числу таких относятся геометрические дефекты бомбардируемой поверхности, что в названии статьи и далее обозначается термином “шероховатость”. Имеются работы, где обсуждается названная особенность поверхности и способы ее изучения [1, 5 – 8], но эта тема далеко не исчерпана. В предыдущей работе [9] рассмотрено рассеяние на субмикроскопических геометрических неоднородностях клиновидного профиля. Одной из особенностей использованной модели является отсутствие дополнительных элементов на поверхности клина (гладкость откосов клина), что и явилось одной из предпосылок к использованию зеркальной схемы отражения. Хотя такие представления заведомо не универсальны, тем не менее, в определенных условиях они отвечают реальной картине взаимодействия. Это имеет место, если длина волны падающей частицы сравнима с межатомным удалением (малые массы, низкие энергии). Это обстоятельство получило как теоретическое обоснование, так и экспериментальное подтверждение [10, 11]. Кроме того самоусреднение особенностей поверхности откоса, которое будет наблюдаться как сглаживание ожидается в условиях частичной или полной аморфизации поверхностного слоя, при случайной ориентации поверхности образца относительно кристаллографических направлений.

МОДЕЛЬ

Сам факт возникновения кристаллизации предопределяет тенденцию к сохранению

максимально возможного количества элементов совершенной кристаллической структуры и, при наличии всякого сорта дефектов и повреждений, в том числе и для таких, какие воспринимаются как геометрические искажения. Это значит, что весьма мелкие искажения фактически являются ступенчатыми, где ступеньки создаются несовпадением протяженностей примыкающих атомных слоев (например [12]). Ожидается, что эта особенность будет выражена наиболее отчетливо для ненарушенной кристаллической структуры вблизи поверхности и при ориентации поверхности образца, представляемой миллеровским индексом (100).

Не вызывает сомнения, что геометрические параметры ступенек имеют разброс в значительном диапазоне. Однако ясно, что имеет место совершенно определенное соответствие между средними характеристиками ступеньки и геометрией бороздки как макрообъекта (сходное обстоятельство обсуждается в статье [7]). Рис. 1 представляет характеристики ступеньки.

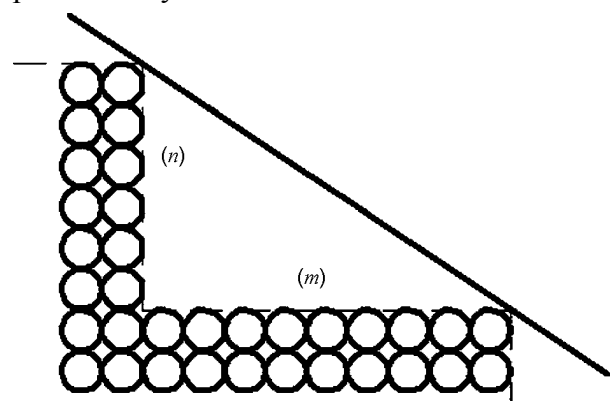


Рис. 2. Характеристики ступеньки.

Если n – количество атомных слоев, создающих ступеньку (целочисленная высота ступеньки), а m – различие протяженностей соседних пластов структуры (длина террасы ступеньки), то

$$\frac{n}{m} = q, \quad (1)$$

где q – тангенс угла наклона откоса бороздки.

Ввиду того, что само наличие бороздки предполагает устранение идентичности протяженностей соседствующих атомных слоев, большая высота ступеньки представляется маловероятной. Должны преобладать весьма

дробные ступеньки, отвечающие малым значениям n , причем $n = 1$ представляется особо предпочтительным. С другой стороны, условие обеспечивает $n = 1$ возможности реализации только пологих откосов с углом наклона не более 45° , т.е. заведомо не соответствует геометрии бороздок типа узкой щели.

Атом, прилетевший извне, взаимодействует с поверхностями какой-то одной из ступенек. Поэтому параметры этого элемента имеют решающее значение в отношении последствий прилета атома в бороздку. Конечно, при произвольном наборе характеристик иных ступенек взаимодействие отразившегося атома с какой-то иной ступенькой не исключается, в силу чего и ее геометрические характеристики как-то повлияют на итог взаимодействия. Однако, ввиду того, что число ступенек бороздки, как правило, очень велико, и они сильно варьируются, следует аппроксимировать все ступеньки, кроме первоначально инициированной, осредненной поверхностью бороздки. Названная особенность модели дополнительно иллюстрируется рис. 2 (двумерная схема).

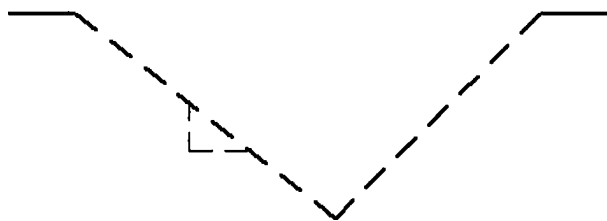


Рис. 2. Аппроксимация ступенек.

Стоит также обратить внимание на то, что если в пределах бороздки ступенчатого рельефа прилетевший извне атом испытывает несколько столкновений с поверхностями, то при каждом из столкновений теряется порция энергии, средняя величина которой задается соотношением масс атома-снаряда и атома-мишени. Таким образом, кратность соударений определяет отнесение атомов к соответствующей энергетической фракции, где характерные энергии неуклонно уменьшаются с ростом номера фракции (числа столкновений). Данное обстоятельство является дополнительным мотивом к выделению первичной ступеньки. Кроме того, очевидно, что весьма большое число столкновений оказывается невозможным, т.к. утрата энергии по-

сле нескольких столкновений предопределяет захват атома. Таким образом, ограничиваемся обсуждением только однократных соударений, принимая, что возможность следующего столкновения выводит атом из главной (исходной) энергетической фракции и, может быть, делает неизбежным прилипание атома к соответствующему элементу бороздки. Вопрос об определении или выборе индикатрисы рассеяния на поверхности непрост для всех попыток анализа ситуации. В силу сделанных выше оговорок здесь используются разные варианты отражения от поверхностей ступеньки, причем особое внимание уделяется схеме с зеркальным отражением.

НАПРАВЛЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Направленность первичного потока – характерный признак различных экспериментов и технологий. При этом W_0 – вероятность возвращения атома, влетевшего в бороздку, в примыкающее пространство определяется долей таких столкновений, когда первичное и единственное столкновение происходит на том участке террасы, какое при зеркальном отражении отвечает вылету. Обращаем внимание, что столкновение с поверхностью обрыва во всех случаях предопределяет последующее попадание либо в примыкающий участок плато, либо в противоположный откос бороздки. Геометрические соответствия представлены рис. 3.

Имеем

$$W = \frac{\delta \sin \varphi}{\ln + \ln m}, \quad (2)$$

что после элементарных преобразований дает

$$W_0 = \frac{mp_0 - n}{mp_0 + n}, \quad (3)$$

где величина $p = \operatorname{tg} \varphi$ задает направление первичного воздействия.

Согласно (3) значение W приближается к единице, когда $m \gg n$, и падает до нуля, если $p_0 \rightarrow n/p$, что с учетом (1) определяет макроскопическое ограничение ($W_0 = 0$, если $p_0 < q$) (симметричная бороздка).

Рис. 3 и последующие соотношения предполагают неотрицательность p . Если же

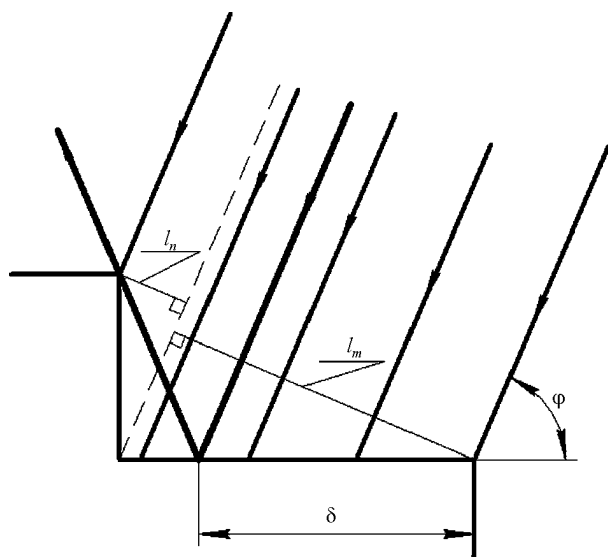


Рис. 3. Геометрические соответствия.

$p < 0$, то геометрия рассеяния на ступеньке несколько иная.

Попадание падающих атомов на поверхность обрыва ступеньки здесь исключено, бомбардируется только часть террасы. При этом участок первичного воздействия уменьшается с уменьшением $|p|$, а когда $|p| < \frac{n}{m}$ исчезает вовсе.

Следует обратить внимание, что тангенс угла отражения в условиях реализуемости столкновения больше q , т.е. отраженные атомы не попадают на противоположный откос. Таким образом, величину W_0 следует отождествлять с единицей во всех случаях, когда при обеспечении требования $p < 0$ соударение с обсуждаемым левым откосом в принципе возможно.

Определение результирующей (наблюдаемой) вероятности отражения от геометрического дефекта поверхности требует также учета макроскопических условий бомбардировки поверхности. При этом на левый откос $p > 0$ попадает только часть потока атомов, приходящих в бороздку. Остальные попадут на правый откос, закономерности взаимодействия с которым, разумеется, те же самые, что формально обеспечиваются заменой p на $-p$.

Вероятность отражения падающих атомов от дефекта (возврат из бороздки) W_0 определяется значениями W_0 для всех имеющихся здесь ступенек и распределением геометри-

ческих параметров ступенек. Если $f(y)$ – функция распределения величин $\frac{n}{m}$ для поверхностей откосов, то

$$W = \int_0^p \left\{ \left(1 + \frac{q}{p} \right) \frac{p-y}{p+y} + \left(1 - \frac{q}{p} \right) \right\} f(y) dy, \quad (4)$$

где два слагаемых в фигурных скобках (4) представляют отражение от двух откосов. Диапазон интегрирования $(0, p)$ определяется в первом случае возможностью возврата из пределов ступеньки, а во втором – реализуемостью попадания на террасу ступеньки. При этом $p < q$.

Смысл определяющего соотношения (4) наиболее прозрачен если распределение аппроксимируется дельта-функцией

$$f(y) = \delta(y - q), \quad (5)$$

то есть в том случае, когда всем ступенькам приписывается среднее для бороздки соотношение размеров обрыва и террасы, что не исключает широкого варьирования абсолютных размеров элементов ступенек. Формула (4) при этом сводится к выражению:

$$W = \frac{p-q}{p}, \quad (6)$$

свидетельствующему, в частности, о гарантированном отражении от дефекта поверхности при нормальном падении на нее ($p \rightarrow \infty$) и о невозможности возврата в результате однократного отражения при скользящем вдоль откоса проникновении в бороздку.

В общем случае выбор предпочитаемых форм распределения $f(y)$ затруднителен. Необходимое единственное требование к этим зависимостям

$$\int_0^\infty y f(y) dy = q. \quad (7)$$

Для однородного в диапазоне $(0, 2q)$ распределения

$$f(y) = \frac{1}{2q}. \quad (8)$$

При этом из общей формулы (3) следует

$$W = \frac{p+q}{2q} \ln \frac{p+2q}{p} - \frac{q}{p}, \quad p > 2q; \quad (9)$$

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{p+q}{q} \ln 2 - 1 \right), \quad p < 2q. \quad (10)$$

НЕНАПРАВЛЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Построения, выполненные для случая мононаправленного воздействия ($p = \text{fix}$), помимо их самостоятельного значения, определяет отправные позиции для анализа ситуаций при воздействиях общего характера. Антиподом направленного потока является изотропное распределение. В этом случае функция распределения по углам входа в бороздку записывается так (плоская картина)

$$f(\varphi) = \frac{1}{\pi}, \quad (11)$$

что, в свою очередь, определяет функцию распределения “по тангенсам” вида

$$f(p) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{1+p^2}. \quad (12)$$

Используя выражение (6), записываем

$$W = \frac{2}{\pi} \int_q^\infty \frac{1}{1+p^2} \frac{p-q}{p} dp, \quad (13)$$

что приводит к результату

$$W(q) = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\arctg q + q \ln \frac{\sqrt{1+q^2}}{q} \right). \quad (14)$$

Соотношение (14) определяет эффективность отражения от бороздки соответствующего макропрофиля с осредненными параметрами ступенек и указывает на общую тенденцию к уменьшению W с увеличением высоты ступенек (крутизны откосов бороздки). Предельные уровни: $W(0) = 1$, $W(\infty) = 0$.

Для распределения параметров ступенек произвольного вида нужно обратиться к общему соотношению (4), используя его как функцию, осредняемую по распределению (12). Имеем

$$W = \frac{2}{\pi} \int_q^\infty \frac{dp}{1+p^2} \int_0^p \left\{ \left(1 + \frac{q}{p}\right) \frac{p-y}{p+y} + \left(1 - \frac{q}{p}\right) \right\} f(y) dy. \quad (15)$$

В предположениях представленных формой распределения (8), формула (15) переписывается так:

$$W = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_q^{2q} \left(\frac{p+q}{q} \ln 2 - 1 \right) \frac{dp}{1+p^2} + 2 \int_{2q}^\infty \left(\frac{p+q}{2q} \ln \frac{p^2+2q}{p} - \frac{q}{p} \right) \frac{dp}{1+p^2} \right\}. \quad (16)$$

Если $q \ll 1$ (мелкая бороздка, «вмятина»), то первое слагаемое (16) охватывает диапазон углов $2(\arctg 2q - \arctg q)$, что приблизительно составляет $2q \ll \pi$.

Таким образом, вклад обсуждаемой составляющей заведомо мал. Определяющая роль принадлежит второму слагаемому, что при некотором огрублении, отвечающем малости q сравнительно с p , дает

$$W = 1 - \frac{4}{\pi} q. \quad (17)$$

Видим, что имеет место линейное снижение W с увеличением углов наклона откосов бороздки, усиленное сравнительно с тем, что дает при $q \ll 1$ (14).

Противоположный случай $q \gg 1$ (глубокая бороздка, “щель”) диапазон интегрирования в первом слагаемом достаточно широк, а второе слагаемое мало вследствие роли фактора $(1+p^2)^{-1}$, $p > 2q$. Таким образом решающая роль принадлежит первому слагаемому (16). Получается

$$W \approx \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\ln 2}{q} \ln \frac{1+4q^2}{1+q^2} + (1-\ln 2) \arctg \frac{q}{1+2q^2} \right\}. \quad (18)$$

Приближенное представление (18) таково

$$W \approx \frac{A}{q}, \quad A = \frac{4 \ln^2 2 + \ln 2 - 1}{2\pi}, \quad (19)$$

что свидетельствует о высокой вероятности захвата частиц узкими щелями. Это обстоятельство присутствует и в схеме, предполагающей совпадение соотношений параметров ступенек $n/p = q$ (14).

ДИФФУЗНОЕ РАССЕЯНИЕ

В силу значительной вариативности и, может быть, неясности в отношении характера отражения атомов от поверхности, заслуживают внимания различные формы этой зависимости. Антиподом зеркального отражения является изотропное. Названные варианты

очерчивают диапазон варьирования индикаторы рассеяния и, соответственно, сценариев процесса взаимодействия с геометрическим дефектом названного вида. Соотношение вкладов альтернативных форм рассеяния предполагают самостоятельный анализ (см. пример [13]).

Преобладающая часть изложенных выше соображений сохраняется и в случае равномерного распределения углов отражения от поверхности, но имеются и существенные различия. Особый интерес представляет ситуация относительно малых углов падения бомбардирующих атомов, которому нет аналога при зеркальном отражении (в условиях $p < q$ величина W не отличается от нуля). Впрочем, по смыслу указанного условия тангенс угла ориентации падения p отнюдь не обязательно мал. Для глубоких узких щелей $q \gg 1$ условию $p < q$ отвечает обширный диапазон – от скользящего воздействия до углов падения близких к нормали.

Вероятность вылета атома в примыкающее пространство после акта его соударения с какой-то точкой в пределах бороздки задается отношением угла, под которым видно из этой точки внешнее пространство, к π . При этом для описанной ранее модели бороздки, как совокупности ступенек, где $n/p = q$ отражение от поверхности террасы ступеньки ограничено с одной стороны рельефом самой ступеньки, а с другой – макрогеометрией противоположного откоса. Вылет же после столкновения с обрывом происходит только в одну сторону от нормали к макроповерхности. В соответствии со сказанным величина W определяется выражением

$$W = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{l_m}{l_m + l_n} (\bar{\gamma}_- + \bar{\gamma}_+) + \frac{l_n}{l_m + l_n} \bar{\gamma}_+ \right\}, \quad (20)$$

где первое слагаемое представляет отражение от террасы ступеньки, а второе – от обрыва.

Смысл величин l_m, l_n представлен рис. 3; $\bar{\gamma}_-, \bar{\gamma}_+$ – средние значения предельных углов отклонения направления вылета атомов в одну и другую сторону от нормали. Осреднение величины выполняется в пределах длины террасы, а значения – по поверхности бомбардируемого откоса.

Вводя соответствующие геометрические соотношения и выполняя несложные преобразования, приводим формулу (20) к виду

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^1 \left[\frac{p}{p+q} \arctg \left(\frac{x}{q} \right) dx - \arctg \left(\frac{qx}{\frac{q+p}{p} - x} \right) \right]. \quad (21)$$

Принимая во внимание, что $\frac{(q+p)}{p} > 2$, а

x изменяется в пределах от нуля до единицы, можно приписать иксу в знаменателе (21) значение S , отвечающее середине диапазона интегрирования, сводя тем самым выражение (21) к виду, допускающему точное вычисление. Это огрубление в области $p \rightarrow q$ может вносить какие-то малозначительные количественные погрешности в итоговый результат, а в условиях $p \ll q$ заведомо несущественно. Получается

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{p}{p+q} \left[\arctg \left(\frac{1}{q} \right) - \frac{q}{2} \ln \frac{q^2 + 1}{q^2} - \arctg \frac{pq}{q + (p/2)} + \frac{q + (p/2)}{2pq} \ln \left(1 + \frac{p^2 q^2}{(q + (p/2))^2} \right) \right] \right\}. \quad (22)$$

Если $1 < p \ll q \gg 1$, то соотношение (22)

приближается к значению $\left(\frac{1}{2} - \frac{p}{2\pi} \right)$.

В условиях, когда $p \rightarrow q$ формула (22) при $q \ll 1$ дает значение, близкое к s , а в области $q \gg 1$ определяет приближение к нулю.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные наблюдаемые характеристики – вероятности отражения, найденные в рамках условий данной работы, существенно иные, нежели то, что дают построения работы [9], и также соответствующие оценки или прогнозы иных исследований [1, 5, 6]. Сам факт

количественных, нередко и качественных расхождений результатов указанных работ не удивителен, так как микроскопические геометрические характеристики существенно различаются, что предопределяет и различие макроскопических свойств поверхностей. В силу сказанного экспериментальное наблюдение особенностей взаимодействия (определение коэффициентов отражения) несет информацию об особенностях микрорельефа поверхности.

Так, например, нормальное и близкое к нормальному падение на дефект в форме узкой щели в рамках “гладкой” модели предопределяет значительное число столкновений с поверхностями бороздки, что физически эквивалентно весьма большой потере энергии и, тем самым, осаждению в пределах бороздки. Если же профиль бороздки ступенчатый, то механизм зеркального отражения в тех же условиях бомбардировки задает практически полное отражение.

В случае изотропного характера отражения различие между двумя обсуждаемыми вариантами условий хотя и уменьшается, но не исчезает. Дополнительным подспорьем в процедуре диагностики может служить то, что главные особенности закона рассеяния допускают самостоятельное изучение, скажем, по картине отражения нормального потока от практически чистой поверхности.

Формула (4) указывает на зависимость между наблюдаемыми значениями W и характером ступенчатости $f(y)$. Дифференцирование по p дает

$$(23)$$

что позволяет определить функцию распределения параметров ступени по изменению коэффициента отражения при варьировании ориентации воздействия (напомним, что в соотношении (4) $p > q$).

Соотношение (4) представляет форму анизотропии коэффициента отражения. Применительно к специальному случаю, представленному равенством (4), это выглядит как возрастание степени черноты поверхности по мере увеличения угла отклонения угла бомбардировки от нормали. И для углов, отве-

чающих условию $p < q$, бороздка выглядит абсолютно черной. Учет разброса соотношений параметров ступенек (8 – 10) сохраняет названную тенденцию: в условиях $p \rightarrow \infty$ значение $W \rightarrow 1$ убывает вместе с уменьшением p . Однако, если p снижается до значения q , то в соответствии с формулой (10) обращения в нуль не происходит; получается невысокое, но конечное значение W . Объяснение этого обстоятельства в том, что в условиях разброса параметров ступенек при скользком входе в бороздку отдельные ступеньки сохраняют возможность также практически скользкого отражения. Область дальнейшего уменьшения p ($p < q$) не охватывается равенствами (9, 10), однако в силу свойств модели процесса выход частиц из бороздки при $p < q$ не представляется возможным. Таким образом, при уменьшении p следует ожидать довольно резкого падения коэффициента W до нуля, когда $p \approx q$. Это обстоятельство может рассматриваться как еще одна составляющая инструментария диагностики поверхности при атомном воздействии.

Разброс направлений первичного воздействия содержит в себе общие тенденции варианта с мононаправленной бомбардировкой (например, роль параметра q в формулах (6) и (14), но в силу свойств распределения (12) увеличивает роль относительно малых углов p , что в свою очередь, усиливает убывание W с ростом q . Если вновь воспользоваться оптическими категориями, то можно сказать, что при разбросе направлений первичного воздействия все узкие глубокие бороздки выглядят как практически “черные”. Эта особенность согласуется с предсказаниями “гладкой” теории [9].

Обращение к варианту с изотропным отражением дает возможность рассмотреть случай бомбардировки под относительно малыми углами к поверхности ($p < q$), что не охватывается схемой с зеркальным отражением. Убывание W с увеличением имеет место и здесь, то есть вариации формы индикатрисы рассеяния не приводят к изменению наиболее крупных качественных закономерностей. Одной из примечательных особенностей объекта с изотропным рассеянием является то, что при предельно низких углах рассеяния

$p \rightarrow 0$ коэффициент W сохраняет конечное значение (в рамках модели около S). Это указывает на значительное количественное различие отражения при скользящих углах для действительно кристаллически правильной неискаженной поверхности и поверхности, имеющей сколь угодно малые шероховатости. Захват атомов такими мелкими бороздками способствует их постепенному наращиванию (полировке поверхности).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение рассеяния на поверхности с геометрическими дефектами выявляет целый комплекс отличий картины взаимодействия с бороздчатой поверхностью от схемы рассеяния на усредненной идеализированной поверхности. Несмотря на то, что выполненный анализ не может считаться полным, тем не менее, он устанавливает существенные качественные закономерности, связанные с геометрией дефекта, угловым спектром первичного потока, особенностями отражения.

Полученные результаты могут быть использованы для целей корпускулярной диагностики поверхностей и пучковых технологий. Записанные соотношения содержат варианты условий рассеяния, представляющих самостоятельный интерес и, с другой стороны, допускают модификации и обобщения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранцев Р.Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. – М.: Ф. -М., 1975.
2. Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел/Под ред. Е.С. Машковой. – М.: Мир, 1989.

3. Баранцев Р.Г. Люди в письмах. – М.: И., 2007.
4. Фальконе Д.//УФН. – 1992. Т. 102, № 1. – С. 71.
5. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
6. Кагадей В.А. Автореферат на соискание степени доктора физ.-мат. наук. – Томск, 2004.
7. Берзин А.А., Морозов А.И. Ширина ступеней на шероховатой поверхности//ФТТ. – 2000. – Т. 42, Вып. 2. – С. 354-355.
8. Баранов А.М., Перешин С.А., Михайлов И.Ф. Новый универсальный метод контроля параметров слоев и шероховатости поверхности в процессах вакуумного осаждения и травления//ЖТФ. – 1997. – Т. 67, № 8. – С. 62-64.
9. Долгов А.С., Гетьман А.А. Рассеяние атомов на шероховатой поверхности//Физическая инженерия поверхности. – 2008. – Т. 6, № 1-2. – С. 98-104.
10. Shimizu F.//Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 86. – P. 987.
11. Балыкин В.И.//УФН. – 2009. – Т. 179, № 3. – С. 297.
12. Кукушкин С.А., Осипов А.В.//УФН. – 1998. – Т. 168, № 10. – С.1083.
13. Петров Т.Ю., Романов В.Т. и др. Диффузный вклад в зеркальных спектрах и зеркальный в диффузных при рассеянии рентгеновского излучения//ФТТ. – 2009. – Т. 51, Вып. 9. – С. 1812-1817.