539.104(049.3)

РАСПЫЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

Sputtering by Particle Bombardment. I: Physicai Sputtering of Single-element Solids/Ed. R. Behrish.—Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1981.—281 p.—(Topics in Applied Physics. V. 47).

Вышедшая в серии «Вопросы прикладной физики» книга является первым томом трехтомной монографии, посвященной явлениям распыления частиц вещества при облучении его поверхности энергичными частицами (чаще всего ионами, но также нейтральными атомами, электронами или фотонами). Распыление происходит как при направленном облучении, когда поток частиц падает на поверхность вещества, так и в случае, когда поверхность вещества граничит с высокотемпературной плазмой. В рецензируемой книге, кроме распыления, практически не рассматриваются другие эффекты, сопровождающие облучение вещества, например отражение или захват налетающих частиц, испускание электронов или фотонов и т. п.

Исследования явления распыления начались еще в прошлом веке в связи с проблемой разрушения катодов. Его необходимо было изучать, чтобы с ним бороться. Приблизительно такое же значение имеет явление распыления в физике плазменных ловушек. Удары частиц плазмы о стенки ловушки разрушают их и к тому же изменяют состав плазмы. В последние годы, однако, явление распыления вещества при его облучении приобрело и позитивное звучание. Оно применяется для очистки и травления поверхностей, в физике и технологии тонких пленок и при создании ионных источников.

Эффект распыления при облучении имеет ясную физическую природу, его свойства хорошо описываются качественно в различных моделях, однако точное количественное понимание наталкивается на значительные трудности. Главной характеристикой процесса распыления является выход распыления Y, который определяется как число выбитых атомов вещества на одну налетающую частицу. Изучается зависимость Y от энергии и массы налетающей частицы; от угла ее падения на поверхность вещества-мишени; от массы атомов мишени; от структуры мишени (т. е. от того, является ли вещество монокристаллическим, поликристаллическим или аморфным, и от вида кристаллической структуры для кристаллов); от ориентации мишени (если мишень монокристалл, существенно, на какую грань падают налетающие частицы); от энергии связи атомов на поверхности мишени и ряда других факторов.

Распыление является результатом множественного каскада соударений, вызываемого налетающей частицей в приповерхностном слое, этот процесс аналогичен радиационному разрушению твердых тел и также проходит в существенно термодинамически

неравновесных условиях. В частности, выход распыления Y практически не зависит от температуры.

Эффект распыления обладает порогом по энергии налетающей частицы (обычно около 20—40 эВ). При увеличении энергии быстро нарастает и достигает широкого максимума при энергиях порядка 5—50 кэВ. Выше 100 кэВ распыления почти не происходит, так как налетающие частицы проникают в мишень слишком глубоко. При энергиях более 10 кэВ существенна нелинейность процесса, выход Y может зависеть от числа налетающих частиц.

Выход распыления Y увеличивается с ростом массы налетающих частиц. При облучении монокристалла по направлениям, близким к кристаллографическим осям плотноупакованной структуры, выход оказывается в 2—5 раз меньше, чем при облучении по прочим направлениям.

Изучаются также распределения вылетающих частиц по энергиям, углам и квантовым состояниям. Обычно 95% вылетающих частиц - нейтральные атомы в основном состоянии, и лишь 5% — возбужденные атомы и ионы. Бо́льшая часть вылетающих частиц имеет энергию между половиной и полной энергией связи атомов на поверхности мишени. Таковы наиболее общие свойства явления, рассматриваемого в рецензируемой монографии. Ее первый том посвящен самому простому и исследованному варианту распыления — когда вещество-мишень является одноатомным. Реально содержание первого тома еще более ограничено — в основном рассматривается бомбардировка металлов ионами инертных газов. В этом случае нет усложняющих явление химических процессов.

Книга состоит из пяти глав обзорного характера. Первая глава (R. Behrish) служит кратким введением. Вторая и третья главы посвящены теоретическим вопросам, четвертая и пятая — экспериментальным.

В гл. 2 (P. Sigmund) дается краткий исторический очерк моделей, применявшихся для описания распыления. Рассматривается распыление аморфных мишеней, основой рассмотрения является теория линейных множественных соударений. Согласно этой теории налетающая частица вызывает каскад упругих соударений. Число атомов, вовлеченных в каскад, зависит от энергии налетающей частицы. Задача состоит в том, чтобы определить, какая часть из них рассеивается в направлении, обратном направлению облучения. В нулевом приближении теории не фигурирует даже поверхность вещества. Из уравнения Больцмана получены аналитические формулы для выхода распыления, а также для распределений вылетающих частиц по энергии и по углам. Эти формулы хорошо согласуются с экспериментом при облучении вещества тяжелыми ионами с большой энергией. Обсуждаются поправки к этим формулам на случай существования поверхности мишени, для случая налетающей частицы большой энергии и малой массы и т. д.

Гл. 3 (M. T. Robinson) посвящена распылению монокристаллов. Исследуется влияние кристаллической структуры и ориентации кристалла на его распыление при бомбардировке ионами, а также влияние структуры приповерхностного слоя и характера связи атомов в нем. Рассмотрение основано на идеях каналирования — прозрачности кристалла для проникновения в него частиц по определенным направлениям. Выход за рамки качественных соображений осуществляется с помощью моделирования процессов на ЭВМ. При этом, как правило, в численных моделях совсем не учитываются электронные свойства вещества.

В гл. 4 (H. H. Andersen, H. L. Bay) дан обширный обзор экспериментального материала по измерениям выхода распыления в зависимости от различных параметров, в основном для аморфных и поликристаллических мишеней. Весьма подробно описаны методы измерения и условия проведения соответствующих экспериментов.

Гл. 5 (H. E. Rosendaal) посвящена монокристаллическим мишеням. Выход распыления Y для монокристаллов может быть как сильно повышен, так и сильно понижен по сравнению с поликристаллами в зависимости от направления облучения. Обычно, однако, при нормальном падении налетающих частиц на естественные грани кристалла выход распыления мал. Исследования на монокристаллических мишенях проводятся интенсивно практически только в последние 20 лет.

Во втором томе монографии предполагается рассмотрение распыления сплавов и химических соединений, распыления электронами и нейтронами, распыление с учетом химических процессов. В третьем томе монографии предполагается поместить материалы о распределениях распыленных частиц, которые характеризуют как сам процесс распыления, так и состояние распыляемого вещества.

Явление распыления вещества при облучении интенсивно исследуется в настоящее время. Рассматриваемым в первом томе вопросам посвящено около 900 работ. Явление распыления активно применяется в физике и технике, для измерительных и конструктивных целей, причем могут быть использованы как происходящие в мишени изменения, так и поток вылетающих частиц.

Е. А. Андрюшин