



Рис. 5. Режимы столкновительного распыления.

атомов между собой происходят редко. Режим линейных каскадов (тепловых пиков) реализуется для ионов с большими массами и молекулярных ионов. Плотность распределения выбитых атомов столь высока, что большинство атомов внутри некоего объема находится в движении.

Каскадные теории для Р. твердых тел с неупорядоченным расположением атомов в режиме линейных каскадов, основанные на урнии Больцмана, приводят к соотношениям

$$K \sim (d\mathcal{E}_0/dx)_{\text{лн}}; N(\varphi) \sim \cos \varphi; N(\mathcal{E}) \sim \mathcal{E}^{-2}.$$

Р. за счёт упругих столкновений наиб. существенно в металлах и полупроводниках.

Электронный механизм распыления реализуется, если кинетич. энергия иона (электрона, фотона) расходуется на изменение внутр. энергии атомов мишени. Наблюдается для диэлектриков (щёлочно-галогидные соединения, органич. соединения, отвердевшие газы, лёд, большие биомолекулы), а также для ряда полупроводниковых соединений и мелкодисперсных металлов. Коэф. К могут достигать значений  $\sim 10^3 - 10^4$  ат/ион. Энергетич. зависимость  $K(\mathcal{E}_0)$  имеет максимум в области максимума неупругих уд. потерь энергии (электронное торможение). В зависимости от сочетания ион (электрон) — мишень наблюдается либо прямая пропорциональная, либо более сильная — вплоть до квадратичной — зависимость К от  $(d\mathcal{E}/dx)_{\text{эл}}$ . Величина К не зависит от Т вплоть до определ. пороговой темп-ры, после чего наблюдается рост К при приближении к темп-ре, при к-рой происходит либо сублимация мишени, либо разрыв молекулярных связей. Энергетич. распределение распылённых частиц значительно более узкие, максимум наблюдается при энергиях, значительно более низких, чем в случае столкновительного Р.

При Р. под действием низкоэнергетич. электронов и фотонов пороговая энергия  $\mathcal{E}_п$  того же порядка, что и ширина запрещённой зоны  $\mathcal{E}_g$  мишени и энергия экситонных переходов. Р. может быть эффективным лишь для к.-л. одного элемента соединения, напр. галогена в щёлочно-галогидном соединении. При облучении фотонами число распылённых частиц N растёт с ростом интенсивности облучения. Угл. распределение распылённого вещества может различаться для разных компонентов. Так, для щёлочно-галогидных соединений наблюдается преимущественное Р. галогенов вдоль низкоиндексных осей кристалла, тогда как распределение атомов щелочного металла  $N \sim \cos \varphi$ . Большая доля распылённых частиц обладает тепловыми энергиями, но есть и сверхтепловая компонента.

Единой теории преобразования энергии возбуждённого или ионизов. атома твёрдого тела в кинетич. энергию движения атомов, приводящего к Р., пока нет. Существует лишь ряд моделей (модель теплового пика, модель кулоновского взрыва, экситонная модель и др.), объясняющих те или иные закономерности сочетания бомбардирующих частиц и типа распыляемых материалов.

**Химическое распыление.** При хим. Р. между бомбардирующими частицами и атомами мишени на поверхности

в результате хим. реакций образуются молекулы с низкой энергией связи, к-рые могут десорбироваться при темп-ре мишени. Хим. Р. наблюдается в нек-ром температурном интервале. В этом интервале зависимость  $K(T)$  обычно проходит через максимум; чётко выраженной пороговой энергии нет. Коэф. К зависит от конкретного сочетания химически активных ион — мишень. Энергетич. распределение молекул в большой степени определяется темп-рой поверхности мишени.

Р. используется для получения атомно-чистых поверхностей, тонких плёнок, анализа поверхностей, при ионно-лучевой и ионно-плазменной обработке поверхностей. Р. лежит в основе ионно-плазменных способов травления материалов для целей микроэлектроники, играет важную роль в космич. материаловедении, в акустике, в технике ядерных реакторов (Р. под действием нейтронов) и термоядерных устройств, при консервации радиоакт. отходов и др.

*Лит.:* Распыление твердых тел ионной бомбардировкой, под ред. Р. Бернса, пер. с англ., в. 1—2, М., 1984—86; Плазменная технология в производстве СБИС, под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна, пер. с англ., М., 1987; Sputtering by particle bombardment III, ed. by R. Behrisch, K. W. Wittmack, Springer-Verl., 1991; Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел. Сб. ст., пер. с англ., М., 1989; Фальконе Д., Теория распыления, «УФН», 1992, т. 162, № 1, с. 71. Е. С. Машикова, В. А. Молчанов.

**РАССЕЯНИЕ ВОЛН** — возмущения волновых полей, вызываемые неоднородностями среды и помещёнными в эту среду рассеивающими объектами. Допустимо различать три осн. вида рассеяния.

1. Р. в. на одиночных объектах в однородной среде. Это могут быть одиночные частицы (электроны, атомы, молекулы) в вакууме. Др. тип таких объектов — макроскопич. тела, отличающиеся от окружающей среды показателем преломления и импедансом, плазменные слои, газовые пузырьки в жидкости и т. д. (см. *Рассеяние света*, *Рассеяние звука*). Фактически в этих случаях Р. в. отличается от *дифракции волн* только терминологически.

2. В случае множеств. объектов или регулярных непрерывно распределённых возмущений среды особое значение имеют коллективные эффекты, обусловленные суперпозицией полей рассеяния и взаимным перераспределением (многократным рассеянием). Так формируются диаграммы рассеяния от периодич. решёток, многослойных структур (см. *Дифракционная решётка*, *Брегговское отражение*). В нелинейных средах такие (как правило, периодические) структуры образуются как отклик среды на интенсивные поля накачки или на разл. суперпозиции поля в многоволновых комбинациях. Эти случаи относятся к явлениям вынужденного Р. в. (см., напр., *Мандельштама — Бриллюэна рассеяние*).

3. Р. в. на стохастических (случайно распределённых) возмущениях сред или границ раздела. Иногда под Р. в. понимается именно такой тип рассеяния. Если облако дискретных хаотически расположенных рассеивателей достаточно разрежено, при расчёте рассеянных полей можно пользоваться приближением однократного рассеяния, т. е. первым приближением метода возмущений (см. *Борновское приближение*, *Возмущений теория*). Это приближение справедливо в условиях, когда ослабление падающей волны из-за перехода части её энергии в рассеянное поле незначительно. В этом случае диаграмма направленности рассеяния плоской волны от всего облака рассеивателей совпадает с *индикатрисой* рассеяния отд. частицы. При наличии движения рассеивателей частотный спектр рассеяния первоначально монохроматической волны изменяется: ср. скорость движения рассеивателей определяет сдвиг максимума спектра, а дисперсия её флуктуаций — уширение спектра рассеянного излучения в соответствии с *Доплера эффектом*. При рассеянии эл.-магн. волны происходит также изменение поляризации.

При большой концентрации рассеивателей в среде происходит многократное Р. в. на частицах. В этом случае падающая волна сильно затухает из-за рассеяния даже