

ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКАЯ СЕРИЯ

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Вводный том  
III

Под редакцией  
академика  
В. Е. ФОРТОВА



МОСКВА  
«НАУКА»

МАИК «НАУКА / ИНТЕРПЕРИОДИКА»

2000

GILLETTE 1010

# СОДЕРЖАНИЕ

## Раздел VI

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ С КОНДЕНСИРОВАННЫМ ВЕЩЕСТВОМ, ГАЗОМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

#### ВВЕДЕНИЕ

#### VI.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С КОНДЕНСИРОВАННЫМ ВЕЩЕСТВОМ

VI.1.1. Основные понятия и эффекты взаимодействия плазмы с конденсированным веществом .....	7	VI.1.4. Свойства границы твердых тел. Контактные явления .....	57
1. Введение (7). 2. Основные свойства ТТ и их поверхностей при взаимодействии с ними НТП (7). 3. Параметры потоков частиц и излучений, попадающих из плазмы на поверхность конденсированного вещества (8). 4. Классификация эмиссионных явлений на границе раздела вакуум–ТТ (9). 5. Основные процессы, определяющие массообмен плазма–поверхность (10). 6. Процессы, определяющие энергобаланс взаимодействующего с плазмой ТТ (11). 7. Эмиссия с поверхности фотонов (11). 8. Эрозия и трансформация поверхности в результате плазменного воздействия (12). 9. Неустойчивые поверхностно-плазменные взаимодействия. Влияние магнитного поля (12).		1. Введение. Понятие поверхности (57). 2. Структура и потенциальный рельеф границы ТТ (57). 3. Работа выхода и электронное сродство (61). 4. Контактные явления. Контактная разность потенциалов (64). 5. Термодинамика поверхности (66).	
VI.1.2. Строение твердых тел .....	13	VI.1.5. Электронные эмиссии с поверхности твердого тела .....	66
1. Межатомные связи (13). 2. Структура кристаллов (18). 3. Электронное строение ТТ (21). 4. Колебания в ТТ и квазичастицы (29). 5. Дефекты кристаллической структуры. Аморфные тела (36).		1. Классификация видов эмиссии (66). 2. Термоэлектронная эмиссия (67). 3. Фотоэлектронная эмиссия (71). 4. Полевая эмиссия электронов (74). 5. Взрывная эмиссия электронов (78). 6. Эмиссия “горячих” электронов (78). 7. Экзоэмиссия (81).	
VI.1.3. Свойства твердых тел .....	42	VI.1.6. Эмиссии электронов при взаимодействии частиц с поверхностью .....	84
1. Механические и теплофизические свойства ТТ (42). 2. Электрические, маг-		1. Вторичная электронная эмиссия (84). 2. Потенциальная ион-электронная эмиссия (90). 3. Кинетическая ион-электронная эмиссия (91).	
		VI.1.7. Взаимодействие с поверхностью тепловых атомов и ионов .....	92
		1. Аккомодация (92). 2. Адсорбция (феноменология процессов) (93). 3. Физические явления при адсорбции (модельное описание) (95). 4. Поверхностная иониза-	

VI.1.8. Внедрение, отражение и стимулированная десорбция частиц .....	100	1. Введение (100). 2. Потенциалы парного взаимодействия частиц с атомами среды (100). 3. Торможение атомных частиц (101). 4. Пробеги атомных частиц в веществе (101). 5. Отражение частиц (103). 6. Десорбция под действием различных компонентов плазмы (108).	1. Введение (117). 2. Основные зависимости коэффициента распыления (117). 3. Характеристики распыленных частиц (119). 4. Экспериментальные методы изучения распыления (120). 5. Теоретические модели распыления (121). 6. Нетрадиционные механизмы распыления (125).
VI.1.9. Захват газовых ионов и их выделение .....	109	1. Введение (109). 2. Экспериментальные наблюдения (109). 3. Физические процессы при ионном внедрении газа (112). 4. Модели для описания ионного внедрения газа (114). 5. Численные программы (116).	VI.1.11. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии .....
VI.1.10. Распыление .....	117		126

## VI.2. ПЛАЗМА С КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗОЙ

VI.2.1. Приповерхностная лазерная плазма ....	138	1. Введение (138). 2. Нагрев мишени лазерным излучением (139). 3. Образование ПЛП в ДР в парогазовых смесях (143). 4. Образование плазмы в гидродинамическом режиме при наличии эрозийного факела (146). 5. Заключение (149).	5. Применения фоторезонансной плазмы (157).
VI.2.2. Фоторезонансная плазма .....	149	1. Введение (149). 2. Методы получения и исследования ФРП (150). 3. Элементарные процессы в фоторезонансной плазме (152). 4. Кинетика образования и разрушения фоторезонансной плазмы (155).	VI.2.3. Пылевая плазма .....
			160

## VI.3. ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ ПЛАЗМА-ГАЗ

Введение .....	182	распространение сильных ионизирующих ударных волн в каналах (197).	
VI.3.1. Ионизирующие ударные волны .....	183	1. Возникновение и структура ударных волн в газах (183). 2. Установление максвелловского распределения (184). 3. Возбуждение вращательных степеней свободы (186). 4. Кинетика колебательной релаксации (187). 5. Кинетика и механизмы диссоциации молекул за УВ (188). 6. Механизмы ионизации газов за ударными волнами (191).	VI.3.3. Плазменная оболочка, возникающая при движении космических аппаратов в атмосфере .....
VI.3.2. Роль переноса излучения в формировании и распространении сильных ионизирующих ударных волн .....	194	1. Роль переноса излучения в формировании сильных ударных волн (194). 2. Распределение параметров в прекурсорной зоне сильной ударной волны (196). 3. Влияние переноса излучения на	199
			206

$$S = 4\pi r D[u(w - y) - N\xi y \exp(-E_b/kT)].$$

Здесь  $u$  — концентрация диффундирующего газа,  $y$  — концентрация в дефектах,  $w$  — концентрация самих дефектов,  $\varphi$  — профиль торможения ионов,  $S$  — сток в дефекты,  $r$  — эффективный радиус дефекта,  $N$  — атомная плотность ТТ,  $\xi$  — число возможных мест в междоузлиях вокруг дефекта.

В случае диффузии в многослойной структуре рассматривается диффузия в каждом слое, а концентрации на границах раздела связываются через растворимости. Внешний источник обычно берется из независимых расчетов. Внутренний сток в дефекты состоит из двух членов: диффузионного притока в дефекты и термически или радиационно активируемого выхода из них. Этот же член в уравнении диффузии описывает и скорость накопления частиц в дефектах-ловушках. Обычно рассматривается несколько типов дефектов с различными энергиями связи и концентрациями, но выше сток записан для одного типа дефектов. В граничных условиях записывается баланс потока диффузии и потока десорбции. Предполагается, что между концентрациями на поверхности ТТ и под ней быстро устанавливается локальное равновесие, т.ч. при правильном выборе коэффициента пропорциональности между этими концентрациями скорость десорбции пропорциональна квадрату объемной концентрации вблизи поверхности. Коэффициент пропорциональности, называемый эффективным коэффициентом рекомбинации, либо вычисляется аналитически, либо измеряется экспериментально. Кроме десорбции второго порядка, в граничные условия может вводиться тепловая и радиационно-стимулированная десорбция, а также десорбция первого порядка.

Компьютерные программы позволили описать большое количество разнообразных экспериментов по ионному внедрению газа (рис. VI.1.308, VI.1.309). Неизбежная проблема — большое количество параметров, которые часто

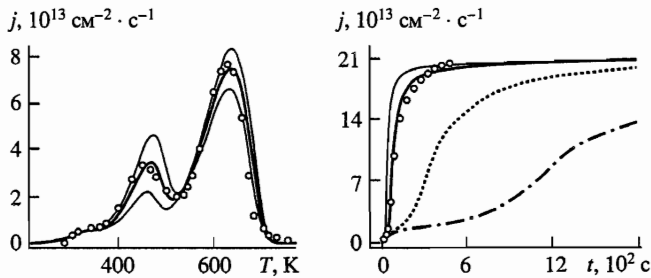


Рис. VI.1.308. Термодесорбционный спектр D, внедренного при ионной бомбардировке в W при 473 K; точки — эксперимент; линии — расчет при различных скоростях производства дефектов во время ионного внедрения

Рис. VI.1.309. Резонансная деутерия во время ионного облучения; точки — эксперимент, линии — расчет при различных значениях максимальной концентрации дефектов, производимых при облучении

неизвестны до опыта и выступают в качестве подгоночных. Поэтому для более-менее надежного выбора параметров проводится одновременно описание нескольких экспериментов. В этом случае произвол в выборе параметров сильно ограничен. Эти параметры, определенные из эксперимента, можно затем использовать для предсказания поведения ионно-внедренного газа в других условиях.

В заключение отметим, что к настоящему времени накоплено большое количество эмпирической информации о внедрении ионов в ТТ. В простейших модельных ситуациях экспериментальные закономерности весьма понятны

и их часто удается хорошо описать математически. Однако физическая картина явления часто оказывается существенно сложнее, чем те представления, которые имеются в настоящее время. Имеется много фактов, которые не находят объяснения, и много факторов, которые трудно предвидеть. Поэтому практические предсказания поведения ионно-внедренного газа для конкретных технических применений требуют осторожности.

1. McCracken G.M. The Behaviour of Surfaces under Ion Bombardment. Reports on Progress in Physics. 1975. V.38. P.241–327.
2. Ozawa K., Fukushima K., Ebisawa K. Data Compilation for Radiation Effects on Hydrogen Recycle in Fusion Reactor Materials. Preprint JAERI-M 84-089, 138 p.
3. Yamaguchi S., Ozawa K., Nakai Y., Sugizaki Y. Data on Trapping and Reemission of Energetic Hydrogen Isotopes and Helium in Materials. Preprint JAERI-M 84-093, 59 p.
4. Радиационная стойкость материалов. Проблемы гелия и водорода в реакторных материалах. Реферат. сб. / Под ред. А.В.Шальнова и Б.А.Калина. — М.: МЦНТИ, 1986. 114 с.
5. Писарев А.А., Черников В.Н. Взаимодействие водорода с радиационными дефектами в металлах / В кн. Взаимодействие водорода с металлами. — М.: Наука, 1987. С.233–264.
6. Wilson K.L. Hydrogen and Helium Trapping. Nuclear Fusion, 1984. Special Issue, p.28–42.

© А.А. Писарев

### VI.1.10. Распыление

**1. Введение.** Катодное распыление, сейчас чаще называемое просто *распылением*, — это разрушение материалов ускоренными ионами или атомами, которое происходит в виде атомов или реже атомных кластеров или молекул. Основной характеристикой распыления является коэффициент распыления  $Y$ , определяемый как отношение числа распыленных атомов мишени к числу бомбардирующих ионов (атомов). Коэффициент распыления зависит от вида ионов (его атомного номера  $Z_i$  и массы  $M_i$ ), энергии  $\mathcal{E}$  и угла падения  $\theta$  ионов, а также от материала и температуры мишени.

Угловое распределение  $Y(\theta, \varphi)$  и энергетическое распределение распыленных атомов являются также важными характеристиками распыления.

**2. Основные зависимости коэффициента распыления.** Для нормально падающих ионов ( $\theta = 0$ ) общий характер зависимости коэффициента распыления  $Y$  от энергии ионов  $\mathcal{E}$ , атомных номеров  $Z_i, Z_a$  и масс  $M_i, M_a$  ионов и атомов мишени, а также от энергии связи  $U$  поверхностных атомов хорошо передается простой эмпирической формулой (рис. VI.1.310):

$$Y = \frac{20}{U} Z_i^2 Z_a^2 \frac{M_i}{M_a} \frac{\mathcal{E}}{(\mathcal{E} + 50Z_i Z_a)^2}, \quad (10.1)$$

где  $\mathcal{E}$  и  $U$  выражены в эВ, а  $Y$  — в ат./ион. Максимальных значений коэффициент распыления достигает при энергиях  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_m = 50Z_i Z_a$  эВ. Для легких ионов (H, D, He)  $\mathcal{E}_m$  составляет 0,5–10 кэВ, а  $Y(\mathcal{E}_m) \approx 10^{-3} - 10^{-2}$  ат./ион. Для тяжелых ионов максимум  $\mathcal{E}_m$  сдвинут в сторону больших энергий, а  $Y(\mathcal{E}_m)$  достигает значений  $\geq 10$  ат./ион. При больших энергиях ( $\mathcal{E} \gg 50Z_i Z_a$  эВ) формула дает зависимость  $Y \sim 1/\mathcal{E}$ , однако экспериментальные зависимости  $Y(\mathcal{E})$  лучше согласуются с более точной теорией, по которой  $Y \sim \ln(\mathcal{E})/\mathcal{E}$ . При малых энергиях  $\mathcal{E} < 50Z_i Z_a$  эВ  $Y$ , согласно (10.1), линейно растет с ростом энергии  $\mathcal{E}$ . Это подтверждается экспериментально для тяжелых ионов при энергиях  $100 \text{ эВ} \leq \mathcal{E} \leq 500 \text{ эВ}$ , а для легких ионов в

меньшем интервале энергий. При меньших энергиях зависимость  $Y(\mathcal{E})$  нелинейная и может быть аппроксимирована другой эмпирической формулой:

$$Y = \frac{11,3 \cdot 10^{-8}}{M_a \lambda^{5/3}} \left( \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{tr}} \right)^{1/4} \left( 1 - \frac{\mathcal{E}_{tr}}{\mathcal{E}} \right)^{7/2}, \lambda = \frac{4M_i M_a}{(M_i + M_a)^2} \quad (10.2)$$

Энергия  $\mathcal{E}_{tr}$  называется пороговой энергией распыления. Переход от зависимости, описываемой формулой (10.2), к зависимости (10.1) происходит при  $\mathcal{E} \approx 20 \mathcal{E}_{tr}$ . Иногда считают, что абсолютного порога распыления нет, тем не менее  $\mathcal{E}_{tr}$  имеет смысл как параметр, входящий в формулу (10.2),

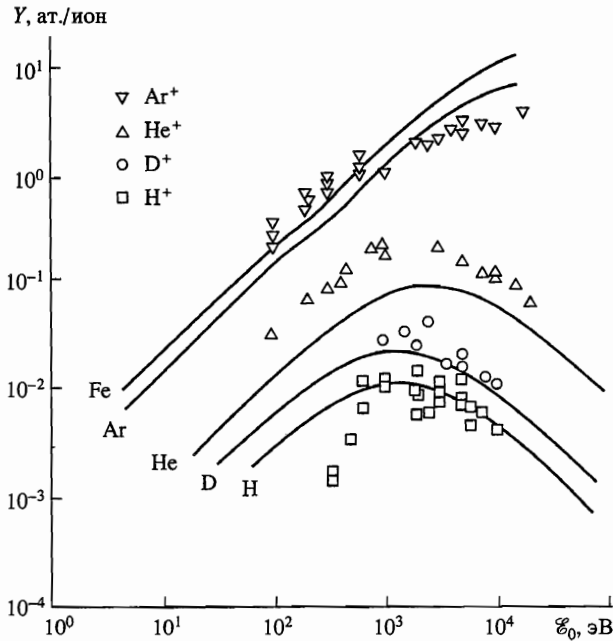


Рис. VI.1.310. Зависимость коэффициента распыления нержавеющей стали от энергии ионов для разных ионов; кривые — расчет по формуле (10.1), точки — эксперимент

которая хорошо аппроксимирует экспериментальные данные вплоть до значений  $Y \approx 10^{-5}$  ат./ион. Поскольку таким малым распылением можно пренебречь, то практически можно пользоваться понятием порога распыления  $\mathcal{E}_{tr}$ . Порог распыления зависит от энергии распыления и от отношения масс  $M_i/M_a$ . Эмпирическое соотношение

$$\mathcal{E}_{tr} = \begin{cases} \frac{U}{\lambda(1-\lambda)} & \text{при } M_i \leq 0,3M_a, \\ 8U (M_i/M_a)^{2,5} & \text{при } M_i \geq 0,3M_a \end{cases} \quad (10.3)$$

удовлетворительно передает зависимости  $\mathcal{E}_{tr}(U)$  и  $\mathcal{E}_{tr}(M_i/M_a)$  и позволяет оценить значение порога распыления с точностью до фактора 2.

Зависимость коэффициента распыления от материала мишени проявляется, во-первых, в зависимости от массы и атомного номера атомов мишени, а во-вторых, в зависимости от энергии связи  $U$ , которая обычно полагается равной энергии сублимации, отнесенной к одному атому. Поскольку энергия сублимации имеет периодический характер зависимости от  $Z_a$ , то зависимость  $Y(Z_a)$  также имеет периодический характер. Причем минимуму  $U(Z_a)$  соответствует максимум  $Y(Z_a)$  (рис. VI.1.311). Минимальные

значения коэффициента распыления имеют мишени из атомов с незаполненными электронными оболочками: С, Ti, V; потом Zr, Mo и Nb, затем Ta и W. Максимальные коэффициенты распыления у благородных металлов Cu, Ag и Au.

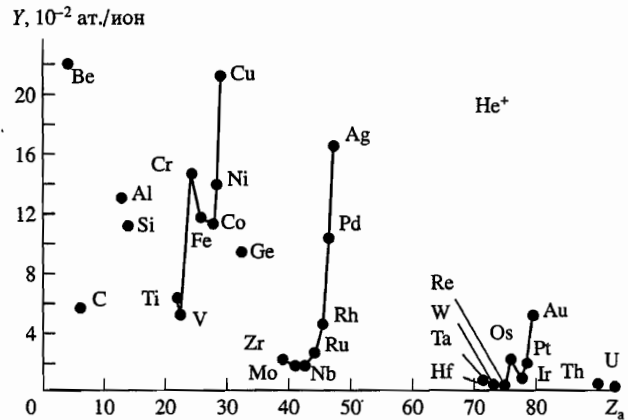


Рис. VI.1.311. Зависимость коэффициента распыления от атомного номера распыляемого элемента при облучении ионами гелия с энергией 400 эВ

При больших дозах облучения наблюдается также периодическая зависимость  $Y$  от  $Z_i$ . Максимальное распыление вызывают ионы благородных газов. Периодическая зависимость  $Y$  от  $Z_i$  объясняется изменением химического состава поверхностного слоя мишени при внедрении бомбардирующих ионов и уменьшением энергии связи поверхностных атомов.

В случае распыления сплавов или соединений, состоящих из разных атомов, можно в первом приближении использовать средние значения  $\langle Z_a \rangle$  и  $\langle M_a \rangle$  в формулах для  $Y$ , а энергию связи полагать равной энергии атомизации. Но, вообще говоря, значения  $U$  могут быть разными для разных компонент сложных соединений. Кроме того, сложные мишени, как например стали, могут состоять из разных фаз. Экспериментально обнаруживается преимущественное распыление легких компонент. Обеднение приповерхностного слоя одной из компонент приводит к диффузии этой компоненты из глубины мишени.

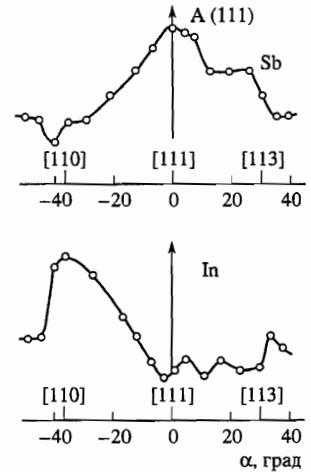


Рис. VI.1.312. Угловое распределение в плоскости (110) атомов Sb и атомов In, распыленных с грани (111) монокристалла InSb

Для кристаллических мишеней физика гораздо богаче. При распылении соединений  $A^3B^5$  (например, InSb, GaAs) обнаружено различие в угловом распределении распыленных компонент A и B (рис. VI.1.312). Кроме того, в процессе распыления происходит перестройка (реконструкция) поверхности, которая опять же различна для граней компонент A и B. Относительные коэффициенты распыления компонент A и B для разных граней монокристалла (например, InSb) и для поликристалла различны.

# Explore Litigation Insights

Docket Alarm provides insights to develop a more informed litigation strategy and the peace of mind of knowing you're on top of things.

## Real-Time Litigation Alerts



Keep your litigation team up-to-date with **real-time alerts** and advanced team management tools built for the enterprise, all while greatly reducing PACER spend.

Our comprehensive service means we can handle Federal, State, and Administrative courts across the country.

## Advanced Docket Research



With over 230 million records, Docket Alarm's cloud-native docket research platform finds what other services can't. Coverage includes Federal, State, plus PTAB, TTAB, ITC and NLRB decisions, all in one place.

Identify arguments that have been successful in the past with full text, pinpoint searching. Link to case law cited within any court document via Fastcase.

## Analytics At Your Fingertips



Learn what happened the last time a particular judge, opposing counsel or company faced cases similar to yours.

Advanced out-of-the-box PTAB and TTAB analytics are always at your fingertips.

## API

Docket Alarm offers a powerful API (application programming interface) to developers that want to integrate case filings into their apps.

## LAW FIRMS

Build custom dashboards for your attorneys and clients with live data direct from the court.

Automate many repetitive legal tasks like conflict checks, document management, and marketing.

## FINANCIAL INSTITUTIONS

Litigation and bankruptcy checks for companies and debtors.

## E-DISCOVERY AND LEGAL VENDORS

Sync your system to PACER to automate legal marketing.