

ЭФФЕКТЫ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ МОЩНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ

Г.В. Потемкин¹⁾, А.Е.Лигачев²⁾, М.В.Жидков³⁾

¹⁾Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия, ep.gvp@yandex.ru

²⁾Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова 38, Москва 119991, Россия, carbin@yandex.ru

³⁾Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской
химии РАН, пр. Академика Семенова 1, Черноголовка 142432, Россия, zhidkov@icp.ac.ru

Ускорители типа ТЕМП-4 позволяют сформировать для модификации поверхностных свойств конструкционных материалов многокомпонентный мощный ионный пучок наносекундной длительности с максимальной энергией ионов до 1 МэВ, плотностью потока частиц на поверхности до $\sim 10^{14}$ ион/см² и плотностью мощности на поверхности образцов до 10^7 Вт/см². В настоящей работе рассмотрены особенности каскадов столкновений ионов с атомами мишени, а также сопутствующие эффекты, характерные для процесса обработки МИП в сравнении с режимом стационарной ионной имплантации.

Ключевые слова: наносекундный высоковольтный импульс; мощный ионный пучок; поверхностная обработка.

HIGH-POWER DENSITY EFFECTS IN INTENSE ION BEAMS

Heliy Potemkin¹⁾, Alexander Ligachev²⁾, Mikhail Zhidkov³⁾

¹⁾National Research Tomsk Polytechnic University,

30 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia, ep.gvp@yandex.ru

²⁾Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,

38 Vavilov Str., 119991 Moscow, Russia, carbin@yandex.ru

³⁾Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,

1 Academician Semenov Ave., 142432 Chernogolovka, Russia, zhidkov@icp.ac.ru

Accelerators of the TEMP-4 type enable the generation of a multicomponent high-power ion beam with nanosecond pulse duration for modifying the surface properties of structural materials. The beam parameters include: maximum ion energy of up to 1 MeV, particle flux density at the surface of $\sim 10^{13}$ ions/cm², power density at the sample surface of up to 10^7 W/cm². This paper examines the characteristics of ion-atom collision cascades in the target material, as well as accompanying effects specific to high-power ion beam (HPIB) processing, in comparison with continuous ion implantation.

Keywords: nanosecond high-voltage pulse; high-power ion beam; surface treatment.

Введение

Ускорители типа ТЕМП-4 позволяют сформировать для модификации поверхностных свойств конструкционных материалов многокомпонентный мощный ионный пучок наносекундной длительности с максимальной энергией ионов до 1 МэВ, плотностью потока частиц на поверхности до $\sim 10^{14}$ ион/см² и плотностью мощности на поверхности образцов до 10^7 Вт/см². В настоящей работе рассмотрены особенности каскадов столкновений ионов с ато-

мами мишени, а также сопутствующие эффекты, характерные для процесса обработки МИП в сравнении с режимом стационарной ионной имплантации.

Результаты и их обсуждение

Ускоренный ион при своем движении в облучаемом материале испытывает каскад столкновений с атомами решетки, в которых теряется энергия и изменяется его импульс. В пробежном слое образуется некоторая область, содержащая возбужденные

атомы и дефекты Френкеля, размеры и состояние совокупности атомов которой могут быть описаны с помощью понятий и представлений Зигмунда и Зейтца-Келера [1]. При достаточно близких друг к другу актах взаимодействия в каскаде движущихся атомов с невозбужденными атомами решетки образуются возбужденные локальные области, которые можно рассматривать как тепловые пики.

Объем единичного каскада, согласно [1], можно оценить как $V_c(\varepsilon_i) \sim [R(\varepsilon_i)]^3$, где $R(\varepsilon_i)$ - пробег иона с энергией ε_i в материале, известен из таблиц Комарова, Циглера и др. В режиме имплантации в металлы (малые потоки $\sim 10^{14}$ ион/м²с) пространственно-временное перекрытие каскадов столкновений, вызываемых падающим пучком ионов, отсутствует и решетка облучаемого материала с «замороженными» дефектами сохраняется в течении всего периода облучения. Нагреву вещества пробежного слоя до температур, соответствующих объемным фазовым переходам, препятствует в этом случае высокая температуропроводность большинства металлов и сплавов $a \sim 10^{-7}$ (м²с⁻¹), реализуемая через электронный и фононный механизмы переноса. Толщина нагретого слоя соответствует

$$l_i = \sqrt{at} \quad (1)$$

где t (с) - длительность облучения, а температуропроводность

$$a = \lambda / \rho c, \quad (2)$$

где λ (Вт/м·град) - теплопроводность, ρ (кг/м³) - плотность и c (Дж/кг·град) - теплоемкость вещества соответствуют табличным данным. Эксперименты по распылению металлов молекулярными ионами показали, что в этом случае имеет место пространственно-временное перекрытие каскадов столкновений, которое влияет на энергетическое состояние пробежного слоя. Перекрытие объемов синхронных каскадов столкновений, вызываемых атомами молекулярного иона приводит к росту выхода распыленных частиц и измене-

нию их углового распределения. В таблице 1 приведены данные параметров процесса обработки для режима имплантации и модификации поверхности мощными ионными пучками.

Табл. 1. Параметры обработки для ионной имплантации (ИИ) и мощных ионных пучков (МИП)

	$\varepsilon_i, 10^4$ эВ	R 10 ⁻⁶ м	γ , ион/м ² с	τ , с	q , Вт/м ²	e , эВ/ат	D ион/м ²
ИИ	1-10	10 ⁻²	10 ¹⁴	стаци.	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ²¹
МИП	10-10 ²	1	10 ²⁰	<10 ⁻⁸	10 ⁶	1-10	10 ¹⁸⁻²⁰

Здесь γ - плотность потока частиц, τ - длительность импульса излучения ускорителя, q - скорость ввода энергии через поверхность мишени (плотность мощности на поверхности), D - доза, e - удельная энергия на атом для пробежного слоя, переданная пучком (без учета теплопереноса).

Для ионов с энергией до 1 МэВ время торможения в металлах до их полной остановки и, соответственно, характерное время жизни каскада столкновений не превышает $t_p \sim 10^{-12}-10^{-11}$ с. Плотность каскадов возрастает с увеличением плотности ионов на поверхности мишени и уменьшением длительности импульса. Степень перекрытия каскадов столкновений при использовании МИП [2] можно оценить через параметры мощного пучка (рис. 1).

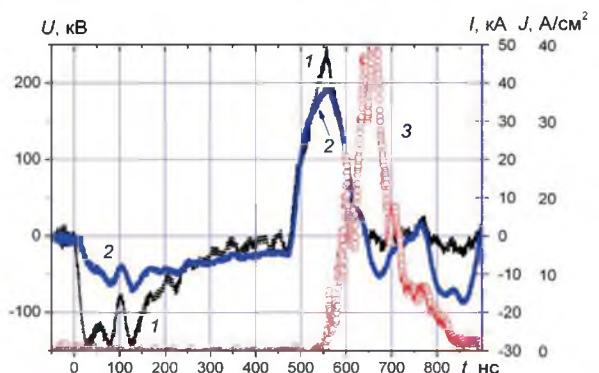


Рис. 1. Осциллограммы 2-х импульсного метода получения МИП на установке ТЕМПИ-4 для: 1) ускоряющего напряжения, 2) полного тока, 3) плотности ионного тока плоского диода с самоизоляцией

При равномерном следовании $10^{12}-10^{14}$ ионов в импульсе излучения длительностью $\tau \sim 10^{-7}$ с период определится как

$$T_i = \tau / N_i, \quad (3)$$

где N_i (ион/см²) – число частиц, налетающих на единичную площадку $s = 1$ см² атомно-гладкой поверхности мишени.

Коэффициент перекрытия каскадов во времени в этом случае:

$$K_t = t_p / T_i \quad (4)$$

определяется отношением времени жизни каскада t_p к периоду следования ионов на поверхность T_i . Для МИП установки ТЕМП-4 [2] период $T_i = (10^{-19} - 10^{-21})$ с и коэффициент перекрытия $K_t = 10^{-12}$ с/(10⁻¹⁹ - 10⁻²¹) с = 10⁸ - 10¹⁰. Для стационарного пучка в режиме имплантации для того же количества ионов за время 1с $K_t = 10^{-12}$ с / (10⁻¹² - 10⁻¹⁴) с = 1-10².

Если поток налетающих ионов за время τ (с) создает в пробежном слое $N_i = N_c$ каскадов столкновений, то в единичном объеме пробежного слоя:

$$V_L = R \times s \quad (5)$$

за это же время образуется совокупность каскадов общим объемом:

$$V_R = V_c \times N_c, \quad (6)$$

где V_c - объем единичного каскада столкновений. Эффект пространственно-временного перекрытия для моноэнергетического потока атомарных ионов можно также оценить с помощью критерия:

$$K = V_R / V_L \quad (7),$$

показывающего, во сколько раз суммарный объем каскадов столкновений, образовавшихся в единицу времени при заданной плотности потока ионов, превосходит единичный объем пробежного слоя.

Коэффициент перекрытия в этом случае:

$$K_P = V_c \times N_c / R \times s = R^2 \frac{N_c}{s} \quad (8)$$

определяется размерами каскада столкновений R^2 в облучаемой среде и плотностью потока ионов $N_c = N_i$.

Для МИП ТЕМП-4 при энергии атомарных ионов углерода $\varepsilon_i = 300$ КэВ в железе $V_L = R \times s = 4 \cdot 10^{-5}$ см³ создается $N_i = (10^{19} -$

10²¹) см⁻² с⁻¹ каскадов с объемом среднего каскада $V_R = 6 \cdot 10^{-14}$ см³ и общим объемом $V_R = 6 \cdot (10^5 - 10^7)$ см³ с⁻¹. Коэффициент перекрытия в этом случае $K_P \approx 3 \cdot (10^9 - 10^{11})$. Для режима имплантации при той же энергии и плотности потока ионов $V_R = 6 \cdot 10^{-14}$ см³ (10¹² - 10¹⁴) с⁻¹ = 6 · (10⁻² - 1) см² с⁻¹, т.е. временного перекрытия нет, решетка сохраняется, и удельная энергия атома мишени за время облучения практически не изменяется. Высокий коэффициент перекрытия каскадов свидетельствует о существенном разрушении решетки пробежного слоя, высокой скорости его нагрева и резком изменении удельной энергии его атомов.

В адиабатическом режиме полная энергия, внесенная мощным пучком в пробежном слое за время действия импульса излучения, определяется плотностью мощности на поверхности q , а энергетическое состояние слоя - удельной энергией его атомов e (эВ/атом), которая в свою очередь зависит от плотности потока ионов γ (ион/см²·с) т.е. скорости ввода ионов в атомно-гладкую поверхность материала.

Увеличение удельной энергии в адиабатическом варианте за импульс можно оценить, как

$$e \sim \frac{\varepsilon_i \times N_i}{N_a \times V_L}, \quad (9)$$

где N_a – концентрация атомов материала [1] (атом/см³). Структурно-фазовый переход в пробежном слое металла под действием МИП носит взрывной характер.

Заключение

Динамически аморфная среда, образующаяся при воздействии мощного пучка ионов на материал, в этом случае теряет свои классические (приводимые в таблицах) объемные свойства, такие как: теплопроводность (λ), теплопроводность (c) и плотность (ρ). Фононный механизм переноса тепла в поверхностном слое становится преобладающим, однако, эффективность его низка из-за рассеяния фононов на различного рода неоднородностях динамически аморфной среды. Таким образом, воз-

никает эффект запирания теплопереноса внутрь мишени, как следствие, унос части материала с поверхности металла. Это явление не зависит от шероховатости поверхности и определяется свойствами МИП.

Библиографические ссылки

1. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: пер. с англ./ под ред. Бериша Р. Москва: Мир; 1984. 484с.
2. Isakov I.F., Kolodii V.N., Opekinov M.S., Matvienko V.M., Pechenkin S.A., Remnev G.E., Usov Yu.P. Sources of high power ion beams for technological applications. *Vacuum* 1991; 42: 159-162.