

УДК 669.539

Особенности ионной имплантации с использованием вакуумно-дугового ионного источника

А. М. Борисов, Н. В. Бородулина, Б. Л. Крит, С. А. Тихонов
МАТИ – Российский Государственный технологический университет
им. К. Э. Циолковского, Москва, Россия

Особенность технологических имплантеров с вакуумно-дуговым ионным источником — это сложный зарядовый состав ионного пучка. Рассмотрены модель полиэнергетической высокодозной ионной имплантации, позволяющая прогнозировать профиль распределения внедренных атомов, и ее сравнение с экспериментальными данными.

Особенностью технологических имплантеров с вакуумно-дуговым ионным источником является то, что из-за сложного зарядового состава ионного пучка энергетический спектр ионов является линейчатым. Минимальная энергия однозарядных ионов определяется ускоряющим напряжением, энергии многозарядных ионов являются кратными энергии однозарядных, что существенно усложняет прогнозирование профиля имплантации, особенно при больших флюенсах облучения. В настоящей работе исследованы образцы конструкционных материалов, имплантированных ионами тугоплавких металлов с флюенсами облучения $\geq 10^{17}$ см⁻², в следующих комбинациях мишень — ион: Ст.45 — Mo⁺ⁿ, Ta⁺ⁿ; сталь 40X13 — Mo⁺ⁿ, Ta⁺ⁿ, Nb⁺ⁿ; сталь У8 — Ta⁺ⁿ; графит — Ta⁺ⁿ, Cu⁺ⁿ.

Облучение ионами проводили на беспепарационной установке ионной имплантации ИМП-60/2 с импульсным вакуумно-дуговым ионным источником, применяемым для модификации свойств поверхности материалов [1]. Данные ионные источники имеют сложный состав ионного пучка как по зарядности ионов, так и по энергиям [2–4].

Условия облучения конструкционных сталей и образцов графита, выбранных в качестве образцов-свидетелей, представлены в табл. 1. Для расчета флюенса облучения $F = jt/Q_m$ (j — средняя плотность ионного тока, t — время имплантации, Q_m — средний заряд ионов пучка) использовали данные работы [3] о зарядовом составе ионных пучков, генерируемых вакуумно-дуговыми ионными источниками типа MEVVA.

Измерение концентрационных профилей имплантируемых элементов проводили методом спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов ⁴He⁺ энергией 1,5–2 МэВ.

Полученные данные рассмотрены в рамках аналитической модели полиэнергетической высокодозной ионной имплантации, в которой учитывали только распыление мишени ионной бомбардировкой [5, 6]. При достаточно высоких флюенсах концентрационный профиль примеси приближается к равновесному, для которого

$$N(x)p = \frac{N}{2S} \operatorname{erf} \left(\frac{FS}{2\sqrt{2}N\Delta R_p} \right), \text{ где } F \text{ — флюенс им-}$$

плантации; $\frac{FS}{N} = \Delta X$ — толщина распыленного слоя, концентрация атомов мишени.

При полиэнергетической имплантации, когда в состав пучка входят ионы с зарядностью “+Q” (Q = 1, 2, 3, ... n) выражение толщины распыленного слоя примет вид:

$$\Delta X = \frac{1}{N} \sum_{Q=1}^n F_Q S_Q,$$

где $F_Q = F n_Q$ — флюенс имплантации ионов с зарядом +Q;

S_Q — коэффициент распыления материала ионами с зарядом +Q.

Значения S_Q рассчитывали по методике, описанной в [5], с помощью программы SRIM-98. Проектный пробег R_{pQ} и страглинг ΔR_{pQ} также определялись с помощью этой программы. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Параметры ионной имплантации

Таблица 1

Катод	Мишень	Концентрация ионов в пучке, Q = 1+, 2+, 3+, 4+, 5+, %	Q _m	U _a , кВ	F, ион·см ⁻²
Mo	Ст.45 40X13	2, 21, 49, 25, 3	3,1	35	5·10 ¹⁸
Nb	40X13	1, 24, 51, 22, 2	3,0	35	3·10 ¹⁷
Ta	Ст.45 40X13 У8, С	2, 33, 38, 24, 3	2,9	30	5,46·10 ¹⁹
Cu	С	16, 63, 20, 1	2,06	35	6·10 ¹⁶

Таблица 2

Результаты компьютерного моделирования распыления

Материал мишени	Сорт ионов	Зарядность ионов	Энергия ионов, кэВ	Коэффициент распыления S_Q	Проективный пробег ионов R_{PQ} , Å	Стратглинг ΔR_{PQ} , Å
Ст.45(Fe)	Ta	Q^+	30	5,5	81	27
		Q^{2+}	60	7,6	122	41
		Q^{3+}	90	8	162	55
		Q^{4+}	120	7,9	196	66
		Q^{5+}	150	7,6	229	82
	Mo	Q^+	35	4,8	103	45
		Q^{2+}	70	5,7	170	72
		Q^{3+}	105	4,8	234	96
		Q^{4+}	140	5,1	291	121
		Q^{5+}	175	5,1	359	147
40X13	Ta	Q^+	30	6	81	27
		Q^{2+}	60	6,4	124	42
		Q^{3+}	90	7,5	162	55
		Q^{4+}	120	8	197	66
		Q^{5+}	150	7,5	232	82
	Mo	Q^+	35	5	103	45
		Q^{2+}	70	5,2	172	74
		Q^{3+}	105	5,3	238	96
		Q^{4+}	140	4,7	302	123
		Q^{5+}	175	5,2	360	147
	Nb	Q^+	35	4,5	103	46
		Q^{2+}	70	5,4	170	72
		Q^{3+}	105	4,7	233	95
		Q^{4+}	140	5,3	297	125
		Q^{5+}	175	4,8	372	149
C	Ta	Q^+	30	1,4	175	26
		Q^{2+}	60	1,6	270	41
		Q^{3+}	90	1,8	354	56
		Q^{4+}	120	1,7	430	67
		Q^{5+}	150	1,7	503	78
Y8(Fe)	Ta	Q^+	30	5,5	81	27
		Q^{2+}	60	7,6	122	41
		Q^{3+}	90	8	162	55
		Q^{4+}	120	7,9	196	66
		Q^{5+}	150	7,6	229	82

Общий коэффициент распыления S при полиэнергетической имплантации определяется по формуле

$$S = \sum_{Q=1}^n S_Q n_Q,$$

где n_Q — относительная концентрация ионов с зарядом $+Q$ в пучке.

Выражение толщины распыленного слоя при полиэнергетической ионной имплантации примет вид

$$\Delta X = \frac{F}{N} \sum_{Q=1}^n S_Q n_Q.$$

Профиль распределения ионов с зарядом $+Q$ с учетом проективного пробега R_{PQ} и отклонение проективного пробега ΔR_{PQ} , рассчитанных с помощью формул [5], примут следующий вид:

$$N_Q(X) = \frac{N n_Q}{2S} \times$$

$$\left[\operatorname{erf} \left(\frac{X + \frac{F}{N} \sum_{Q=1}^n S_Q n_Q - R_{PQ}}{\sqrt{2\Delta R_{PQ}}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{X - R_{PQ}}{\sqrt{2\Delta R_{PQ}}} \right) \right]$$

Общий профиль распределения атомов имплантированных примесей будет

$$N(X) = \sum_{Q=1}^n N_Q(X).$$

Интегральная доза имплантации:

$$D_F = \int N(x) dx.$$

На рис. 1—3 представлены результаты сопоставления экспериментальных спектров POP с модельными.

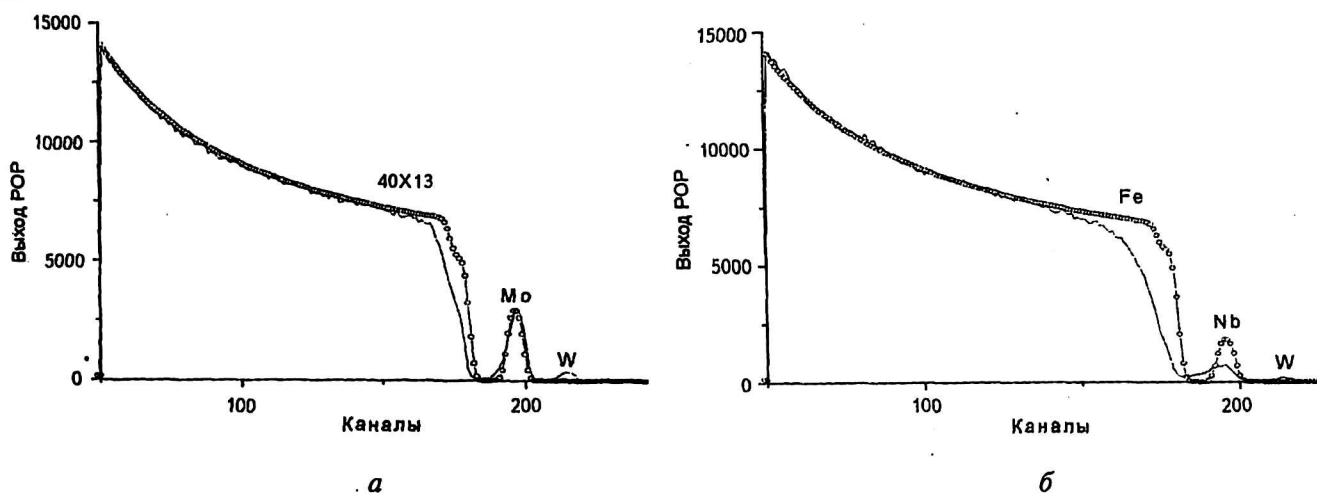


Рис. 1. Сравнение расчетного и экспериментального спектров POF, имплантированного в сталь 40X13:

а — Mo; б — Nb.

—○— расчет; — эксперимент

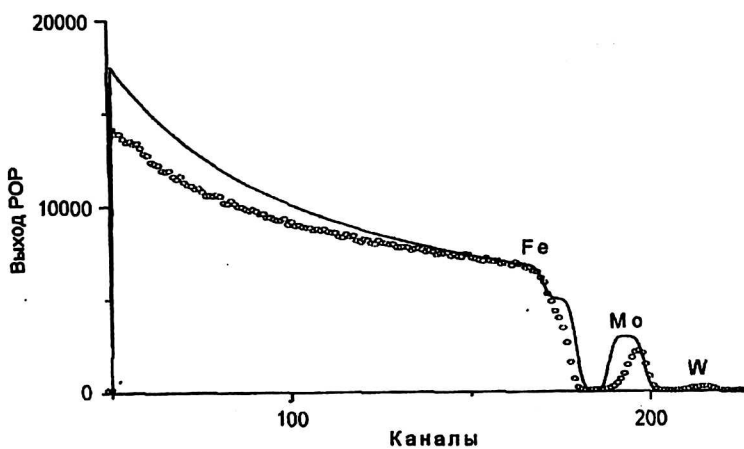


Рис. 2. Сравнение расчетного и экспериментального спектров POF для Mo, имплантированного в Ст.45:

—○— эксперимент; — расчет

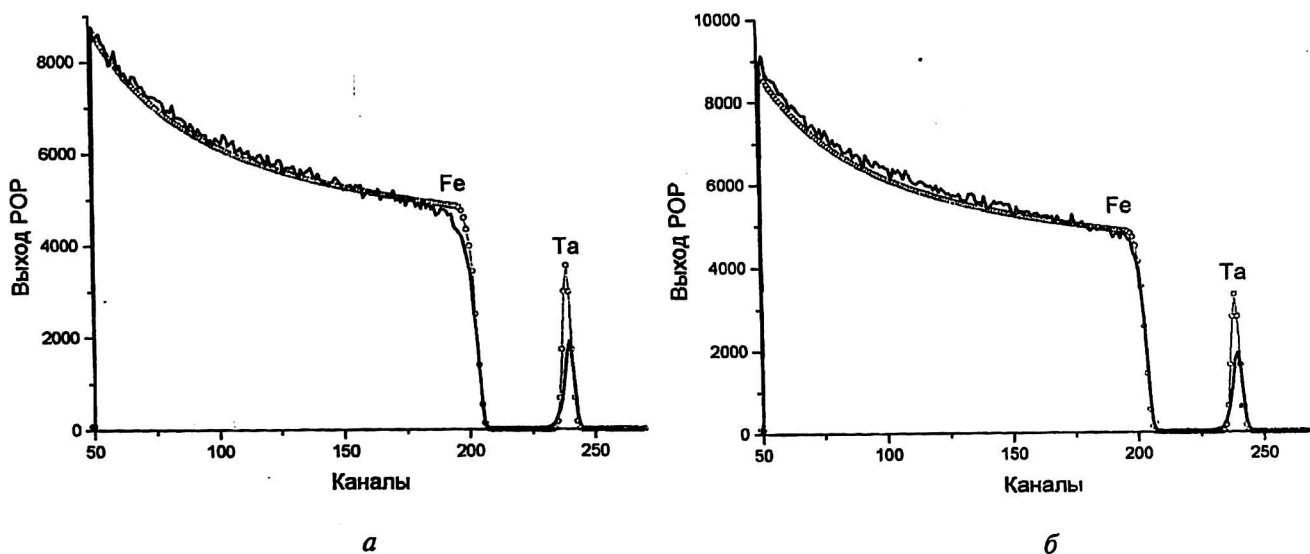


Рис. 3. Сравнение расчетного и экспериментального спектров POF для Ta, имплантированного в:

а — сталь 40X13; б — Ст.45. —○— расчет; — эксперимент

Из анализа данных POP следует, что наибольшее влияние на концентрационный профиль оказывают 2-, 3- и 4-зарядные ионы (рис. 4). Результаты аппроксимации суммарного профиля сведены в табл. 3. Их использовали для сравнения расчетов полиэнергетической высокодозовой ионной имплантации с экспериментом посредством моделирования POP с помощью программы NBS.

Таким образом, из приведенных данных видно, что получено удовлетворительное согласие экспериментально полученных данных с расчетами в отношении концентрационного профиля Mo, имплантированного в сталь 40X13 (см. рис. 1, а), и для меди, имплантированной в графит (см. рис. 4). Некоторые расхождения формы пиков для Nb, имплантированного в сталь 40X13 (см. рис. 2, б), скорее всего связаны с выбранной аппроксимацией его расчетного профиля.

Таблица 3

Результаты аппроксимации расчетных профилей концентраций

Мишень	Катоды	Концентрация, %	Количество атомных слоев ($\cdot 10^{15}$ ат/см ²)
40X13	Mo	19	205
	Nb	12	208
	Ta	14	128
Ст.45	Mo	19	204
	Ta	13	112
У8	Ta	13	112
С	Ta	38	600

Так как на концентрационный профиль имплантированного элемента оказывают существенное влияние зарядность ионов, определяю-

щая пробег ионов в материале и распыление поверхности, а также их парциальный состав в пучке, от которого зависит общий профиль, то результаты расхождения моделирования полиэнергетической ионной имплантации с экспериментом (см. рис. 2, 3) могут быть связаны со следующими факторами:

различие использованных данных работы [5] по зарядовому составу n_Q ионных пучков, генерируемых вакуумно-дуговыми ионными источниками типа MEVVA (см. табл. 1) с соответствующим составом для ионного источника имплантера ИМП 60/2;

концентрация внедренного элемента зависит от коэффициента распыления, который является функцией зарядности ионов $Y = f(Q)$. Величина проективного пробега, в свою очередь, зависит от энергии ионов, представляющей собой произведение зарядности и ускоряющего напряжения $E = QU_a$. Таким образом, из-за указанного несоответствия данных по зарядности неизвестно, чье влияние на расхождение расчетного и экспериментального спектров POP было больше — коэффициента распыления или проективного пробега;

в данной модели использовались значения проективных пробегов, страгглингов и коэффициентов распыления, рассчитанные с помощью программы SRIM-98. Данная программа моделирует распыление в режиме линейных каскадов. В нашем случае имплантируются тяжелые ионы и, следовательно, возможен режим тепловых пиков, который в программе SRIM-98 не учитывается;

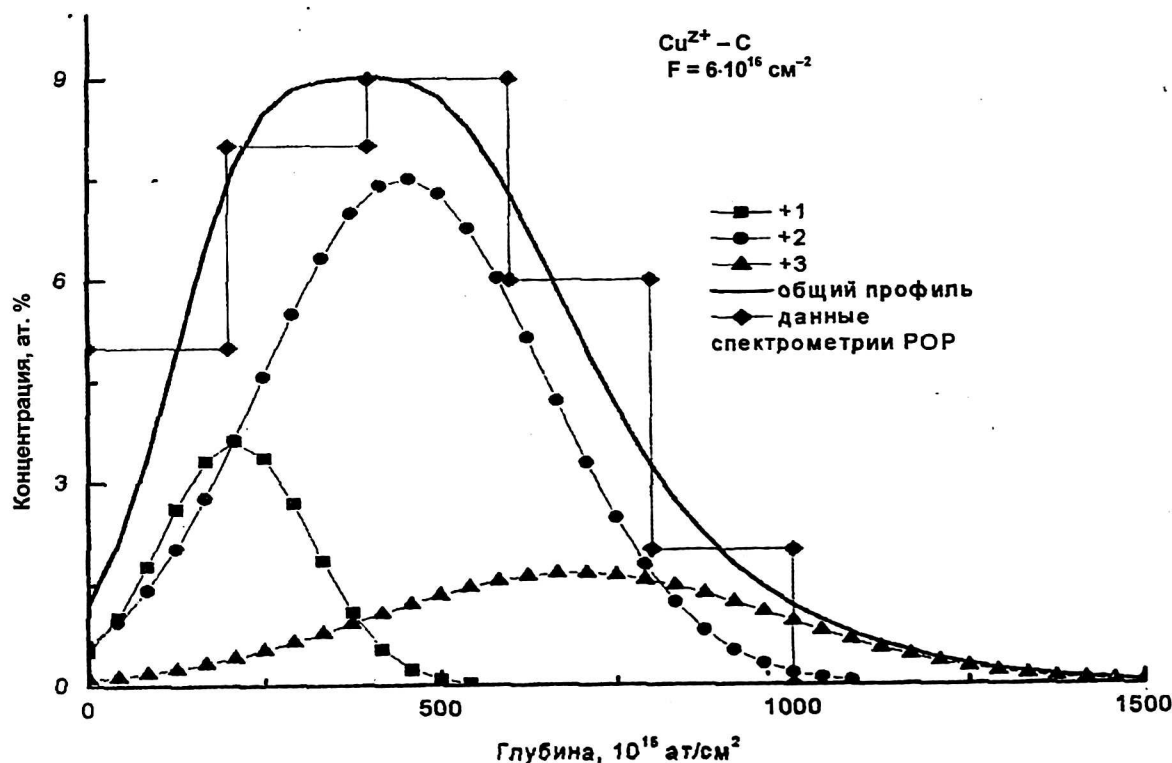


Рис. 4. Измеренный POP и расчетные концентрационные профили меди, имплантированной в графит

значение флюенса, использованное при данном моделировании, также зависит от зарядового состава пучка. Следовательно, можно предположить, что значение флюенса облучения стали 40X13 и Ст.45 ионами Та было в два раза меньшим (см. рис. 3, а, б).

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Москвы по разделу "Инфраструктура и адресная поддержка науки".

Л и т е р а т у р а

1. Борисов А. М., Крит Б. Л., Тихонов С. А., и др.// Особенности импульсной полиэнергетической ионной имплантации//Изв. РАН, Сер. физическая, 2000. Т. 64. № 4. С. 737—740.
2. Браун Я. М. Физика и технология источников ионов. — М.: Мир, 1998. С. 62.
3. Brawn I. G.//Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. P. 3061.
4. Новичков С. Б., Строганов А. Г.//Линейные ускорители электронов сантиметрового диапазона длин волн. — М.: МИФИ, 1991. С. 55.
5. Комаров Ф. Ф. Ионная имплантация в металлы. — М.: Металлургия, 1990. С. 216.
6. Быковский Ю. А., Неволин В. Н., Фоминский В. Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 240 с.

Specialty of ion implantation use vacuum-arc ion source

A. M. Borisov, N. V. Borodulina, B. L. Krit, S. A. Tikhonov
MATI — Russian State Technological University, Moscow, Russia

The main feature of technological implanters with a vacuum-arc ion source is the multi-charging composition of the ion beam. The model of polyenergy high dose ionic implantation were consider in the article in predict a lateral view of allocation of introduced atoms and her comparison with experimental datas surveyed.