

05;10

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНОВ Ti В МОНОКРИСТАЛЛАХ Cu ПРИ ВЫСОКИХ ДОЗАХ ОБЛУЧЕНИЯ И ИМПУЛЬСНОМ ОТЖИГЕ

© С.М.Дуванов, А.Д.Погребняк, В.И.Лаверентьев,
В.В.Стайко, В.П.Ротштейн, Д.И.Проскуровский

Несмотря на значительный прогресс в использовании ионной имплантации для модификации поверхности и улучшения служебных характеристик металлов и сплавов, остается достаточно много вопросов, связанных с интенсивной и высокодозной имплантацией монокристаллов многозарядными ионами [1-3]. Под высокодозной и интенсивной имплантацией понимается такая имплантация, при которой плотность ионного тока на мишени составляет величину от нескольких единиц до десятков миллиампер [1,3], а внедренная примесь составляет концентрацию от нескольких десятков до ста атомных процентов [1]. На сегодняшний день опубликовано очень ограниченное число работ по имплантации монокристаллов металлов, что связано, во-первых, с трудностями приготовления хорошего качества поверхности монокристаллов металлов, а во-вторых, с малым количеством научных коллективов, обладающих высокопроизводительными и интенсивными источниками ионов. Необходимость таких исследований обусловлена тем, что слабо (или почти не) изучены процессы формирования профилей дефектов и внедренной примеси, когда при достаточно коротких импульсах внедряются высокие (до 10^{16} см⁻²/мин) дозы ионов и процессы распыления имеют преобладающее значение [4,5].

Целью настоящей работы было исследование профилей внедренных ионов при высоких ($5 \cdot 10^{16} - 8 \cdot 10^{17}$ см⁻²) дозах имплантации, определение коэффициента диффузии в результате импульсного отжига с помощью сильноточных электронных пучков (СЭП) в монокристаллах Cu.

Исследовались образцы монокристаллов Cu, вырезанные параллельно плоскостям (100) и (111), с электрохимически полированными поверхностями размером $14 \times 14 \times 3$ мм. Имплантация ионами Tiⁿ⁺ проводилась на источнике "Радуга" [2,6] с ускоряющим напряжением 40 кВ, частота следования импульсов 50 Гц, длительность импульса 200 мкс.

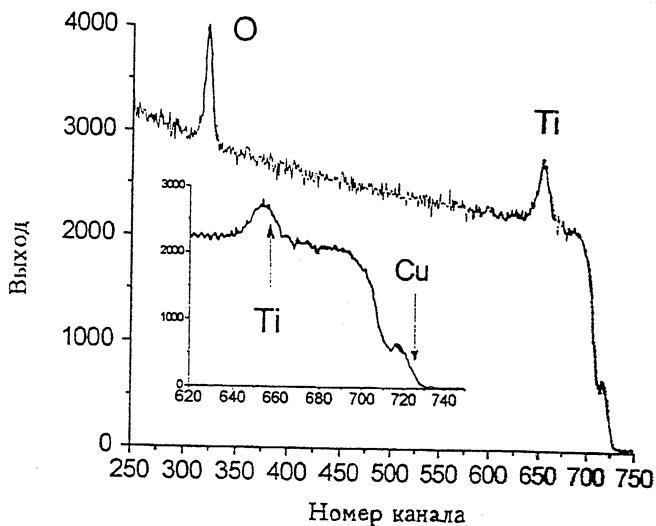


Рис. 1. Энергетический спектр обратнорассеянных ионов гелия с начальной энергией 3.052 МэВ, измеренный для образца Cu (111), имплантированного Ti дозой $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. На вставке показана высокоэнергетическая часть спектра. Стрелками указаны кинематические границы спектров для различных элементов.

Осуществлялся контроль температуры мишени, дозы облучения, частоты следования импульсов и напряжения в процессе имплантации. Облучение СЭП проводилось на ускорителе [7] при следующих параметрах: средняя энергия ионов $E = 10\text{--}20 \text{ кэВ}$, длительность импульса $\tau = 0.75 \text{ мкс}$, плотность потока энергии 3.3 и 4.2 Дж/см². Анализ концентрационных профилей тяжелых элементов проведен на ускорителе [8] с использованием метода резерфордского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}^+$ с начальной энергией 2 МэВ. Для получения профиля атомов кислорода в приповерхностных слоях образцов использован упругий резонанс реакции ${}^{16}\text{O}({}^4\text{He}, {}^4\text{He}){}^{16}\text{O}$ в районе 3.045 МэВ. Спектры регистрировались при угле $\varphi = 60^\circ$ (угол между пучком и мишенью) и угле рассеяния $\theta = 170^\circ$. Концентрационные глубинные профили элементов были получены при обработке спектров с использованием программы [9].

На рис. 1 представлен один из серии энергетических спектров обратнорассеянных ионов ${}^4\text{He}^+$, измеренный для образца Cu (111), имплантированного Ti дозой $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Начальная энергия ионов гелия составляла 3.052 МэВ. Спектр измерен при угле $\varphi = 60^\circ$ и угле рассеяния $\theta = 170^\circ$. В высокоэнергетической части спектра наблюдается характерное “выедание”, обусловленное наличием внедренных

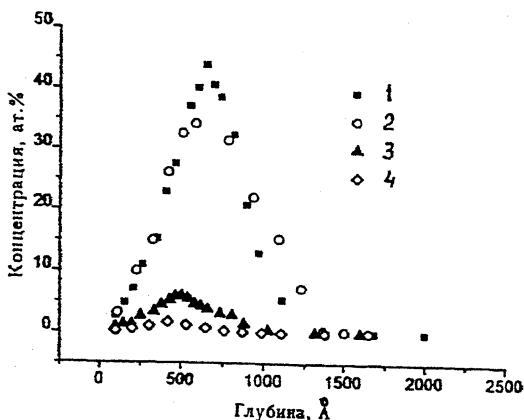


Рис. 2. Концентрационные глубинные профили титана в монокристалле меди для различных доз имплантации в направлении оси [111]: 1 — доза $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, 2 — $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, 3 — $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 4 — $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

атомов Ti в подложке Cu. В спектре наблюдается два пика. Первый пик (в районе 660 канала) относится к выходу ионов гелия, рассеянных на атомах имплантированного титана, в котором (в районе 320 канала) — к резонансному выходу ионов гелия, рассеянных на кислороде, находящемся в слое внедренных атомов Ti.

На рис. 2, а приведены профили атомов титана по глубине в монокристалле Cu (111) для различных доз облучения. При увеличении дозы облучения наблюдается рост концентрации внедренной примеси как в монокристалле Cu (111), так и в Cu (100). Профили концентрации кислорода имеют максимум при разных дозах облучения. Например, для плоскости (100) Cu максимальная концентрация наблюдается при дозе $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, а в случае Cu (111) — при более высоких дозах облучения ($8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$). Возможно, это связано с различным содержанием кислорода в окисной пленке. Наблюдается смещение максимума концентрации титана в глубь материала с увеличением дозы облучения для монокристаллов Cu (111). Это противоречит некоторым теоретическим [4] и экспериментальным результатам [6]. Так, например, в работе [6] было показано смещение максимума концентрации к поверхности при увеличении дозы внедрения гафния в $\alpha\text{-Fe}$.

При очень высоких дозах имплантации наблюдается усиление эффекта распыления. В некоторых других работах, например [10], при имплантации тяжелых ионов Y, Ba в Cu для уменьшения эффекта распыления на подложку наносили пленку из углерода. Авторы получили увеличение концен-

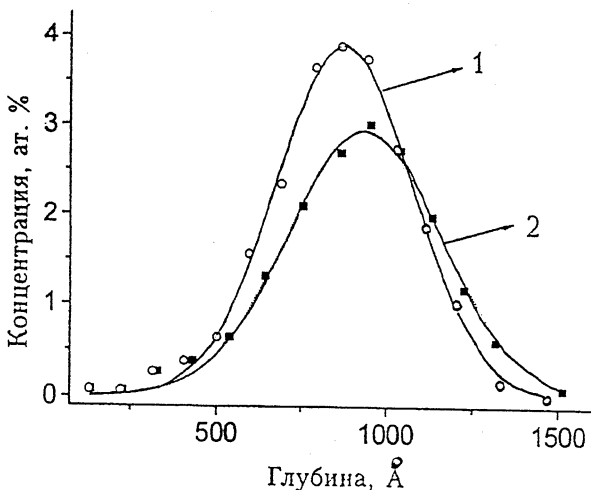


Рис. 3. Концентрационные глубинные профили внедрения Ti в монокристалле Cu (111): 1 — исходное состояние (имплантация Ti дозой $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$), 2 — последующий отжиг СЭП с плотностью потока энергии 3.3 Дж/см^2 . Штриховой линией показаны подгоночные кривые.

традии Ba почти в два раза по сравнению со случаем отсутствия защитной пленки при одинаковых дозах внедрения.

Дополнительный анализ, проведенный с помощью просвечивающей электронной микроскопии, показал наличие аморфной углеродной пленки толщиной около 25 нм поверхности монокристалла Cu (111), имплантированного ионами титана дозой $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, которая образуется из остаточной атмосферы ускорителя [7]. Поэтому можно предположить, что тонкая окисная и аморфная углеродная пленки, находящиеся на поверхности монокристалла, выполняют защитные функции от эффекта распыления подложки.

Импульсный отжиг с помощью СЭП образцов Cu (рис. 3), имплантированных Ti^{+n} дозой 10^{17} см^{-2} , который приводит к незначительному уменьшению пиковой концентрации титана (что наблюдалось и в работе [11]), смещению максимума и “размытию” профиля в глубь материала, значительно увеличивает концентрацию кислорода в поверхностном слое с 5.6 до 8.6 ат.%. Возможно, это связано с увеличением толщины оксидной пленки из TiO и TiO_2 наряду с имевшейся окисной пленкой меди.

Для лучшей интерпретации результатов была рассчитана динамика плавления тонкого слоя Cu при облучении СЭП с учетом реальных осциллограмм тока путем решения одномерного уравнения теплопроводности [12]. Была

определена глубина расплавленного слоя, скорость его нагрева ($5 \cdot 10^9$ К/с) и охлаждения (10^9 К/с) вблизи поверхности образца Cu. Решая уравнение Фика для одномерной диффузии из бесконечного тонкого слоя в момент времени t (длительность импульса) и t_2 (время нахождения расплава в твердом теле), соответственно были получены профили концентрации, которые можно описать двумя экспонентами. Графическое решение этих уравнений дало следующие значения: $D_1 \simeq 3.0 \cdot 10^{-6}$ см²/с и $D_2 \simeq 10^{-5}$ см²/с (D_1 соответствует коэффициенту диффузии в жидком состоянии), что хорошо совпадает с другими известными данными [12-14].

Таким образом, высокодозная имплантация ионов Ti в монокристаллы Cu (100) и Cu (111) не приводит к отличиям в поведении глубинных профилей ионов Ti; отличия имеются только в поведении профилей кислорода. Наблюдается смещение максимума в концентрации ионов Ti с увеличением дозы облучения, возможно за счет образования окисной пленки. После импульсного отжига сильноточным электронным пучком в режиме частичного плавления с плотностью потока энергии 3.3 Дж/см² наблюдается уменьшение концентрации Ti в максимуме и смещение ("размытие") профиля на большую глубину.

Работа частично финансировалась по программе 7.5.4/73-93 "Радуга" ГКНТ Украины.

Список литературы

- [1] *Pogrebnyak A.D., Tolopa A.M.* // Nucl. Instrum. and Meth. 1990. B50. P. 25-43.
- [2] *Арзубов Н.М., Исаев Г.З., Рябчиков А.И.* // ПТЭ. 1987. С. 68-70.
- [3] *Pogrebnyak A.D., Bakharev O.G., Martynenko V.A., Rudenko V.A., Brusa R., Zecca A., Oechsner R., Ryssel H., Tichomirov I.A., Ryabchikov A.I.* // Nucl. Instrum. and Meth. 1994. B94. P. 81-90.
- [4] *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon, NY, 1985.
- [5] *Бажарев О.Г., Погребняк А.Д., Руденко В.А., Мартыненко В.А., Бруза Р., Зекка А., Рябчиков А.И.* // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 10. В. 1. С. 79-83.
- [6] *Didenko A.N., Ligachev A.E., Sharkeev Yu.P., Puchkareva G.V., Kozlov E.V., Ryabchikov A.I., Nasyrov R., Shakhmeister G.I.* // Nucl. Instrum. and Meth. 1991. B59/60. P. 769-773.
- [7] *Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 4. С. 413-416.
- [8] *Chernenko L.P., Kobzev A.P., Korneev D.A., Shirokov D.M.* // Surf. and Interf. Analysis. 1992. V. 18. P. 585-588; *Duvanov S.M., Kobzev A.P., Tolopa A.M., Shirokov D.M.* // Nucl. Instrum. and Meth. 1994. B85. P. 264-267.
- [9] *Bogac V., Shirokov D.M.*, // Nucl. Instrum. and Meth. 1994. B84. P. 497-506.
- [10] *Clapham L., Whitton J.L., Ruck D.* // Nucl. Instrum. and Meth. 1993. B80. P. 501-504.

- [11] *Follstaedt D.M., Knapp V.A.* // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1983. V. 13. P. 745-750.
- [12] *Pogrebnyak A.D., Proskurovskii D.I.* // Phys. Sta. Sol. 1994. A145. P. 9-49.
- [13] *Иванов Ю.И., Крючков Ю.Ю., Марков А.Б., Назаров Н.Д., Погребняк А.Д., Проскуровский Д.И., Ротштейн В.П.* // Поверхность. 1994. В. 10/11. С. 95-102.
- [14] *Zecca A., Paridaense V., Duarte Naia M., Pogrebnyak A.D., Markov A.B., Proskurovskii D.I., Ozur G.E., Rotstein V.P.* // Phys. Lett. 1993. V. 175. P. 443-440.

Сумский институт модификации
поверхности
Сумы, Украина
ОИЯИ,
Лаборатория нейтронной физики
Дубна, Россия
Институт сильноточной
электроники РАН
Томск, Россия

Поступило в Редакцию
22 марта 1995 г.
В окончательной редакции
8 ноября 1995 г.