

Мамытбеков Ж.К.

**ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО-КРЕМНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ**

Zh.K. Mamytbekov

**CHANGING THE STRUCTURE-PHASE STATE OF THE IRON-SILICON EXPOSED CONCENTRATION FLOWS OF ENERGY**

УДК:620.192.3(04)

*Обработка системы Fe-Si концентрационным плазменным потоком позволяет формировать глубокие приповерхностные слои, содержащие кремний и  $\alpha$ -FeSi. В результате воздействия компрессионного плазменного потока покрытие и часть подложки плавятся, происходит диффузионное и конвективное перемешивание железа и кремния с последующей кристаллизацией (высокоскоростной закалкой).*

*Processing system Fe-Si concentration plasma flow allows you to create deep subsurface layers containing silicon and  $\alpha$ -FeSi [2]. As a result of compression plasma flow portion of the substrate and coating melt is diffusion and convective mixing of iron and silicon, followed by crystallization (high quenching).*

Взаимодействие концентрированных потоков энергии (КПЭ) с веществом является в настоящее время предметом активных теоретических и экспериментальных исследований [1-2]. Интерес к данной проблеме во многом связан с возможностью формирования уникальных структурно-фазовых состояний в приповерхностных слоях твердых тел и получением новых функциональных материалов с требуемыми физическими свойствами и техническими параметрами. При обработке КПЭ характер изменений структуры, фазового, элементного состава материала и его свойств определяются, в первую очередь такими характеристиками как плотность энергии КПЭ и длительность воздействия. С данной точки зрения привлекательным видом обработки является воздействие компрессионных плазменных потоков (КПП), сочетающее квазистационарность и значительную плотность энергии, передаваемой мишени [3]. Одним из эффективных и технологически простых методов

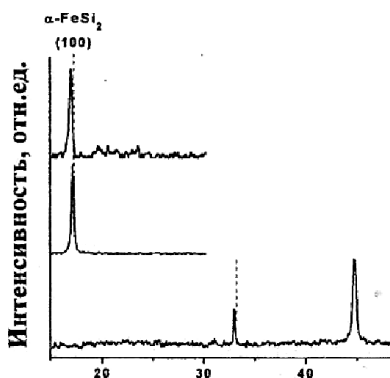
обработки является легирование материалов путем жидкофазного перемешивания системы покрытие-подложка при воздействии КПП [4].

В настоящей работе исследовались особенности структурно-фазовых превращений в системе «железное покрытие-кремниевая подложка» в результате воздействия КПП.

В качестве объекта исследования использовалась пластина кремния размером 10x10 мм (кристаллографическая ориентация (100)). Покрытие железа толщиной 2,6 мкм наносилось методом вакуумно-дугового осаждения при следующих параметрах: потенциал подложки - 120 В, ток горения дуги катода - 100 А, время нанесения - 10 мин.

Обработка КПП производилась в магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии в атмосфере водорода ( $H_2$ ) при давлении 400 Па [5]. Напряжение генерации плазмы составляло 3,2-3,5 кВ, давление плазменного потока - 1,5 МПа, температура - 3 эВ, плотность поглощенной энергии - 15-20 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса ~ 100 мкс.

Изучение фазового состава исходного и обработанных образцов проводилось методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН4-13 при фокусировке по Брэггу-Брентано в излучении  $CuK\alpha$ . Обработка результатов измерений проводилась при помощи программ DifWin2006 и PCPDFWIN 2.02. Согласно результатам фазового анализа (рис. 1) воздействие компрессионного плазменного потока приводит к образованию ди-силицида железа,  $\alpha$ -FeSi<sub>2</sub>, имеющего тетрагональную кристаллическую структуру.



**Рис. 1.** Участки рентгенограмм исходного образца (а) и образцов, обработанных плазменными потоками с плотностью энергии 15 (б) и 20 Дж/см<sup>2</sup> (в)

В реакции формирования силицида участвуют все атомы железа. В соответствии с равновесной диаграммой состояния [7], тетрагональная модификация  $\alpha\text{-FeSi}_2$  образуется при дефиците атомов железа и является стабильной в интервале температур 937-1220°C. Устойчивость данной фазы при комнатной температуре обусловлена высокой скоростью охлаждения по окончании действия плазменного импульса за счет теплопроводности подложки.



Рис.2 Микрофотографии поперечных сечений образцов, обработанных потоками с плотностью энергии 15 (а) и 20 Дж/см<sup>2</sup> (б)

При воздействии КПП на систему покрытие-подложка происходит расплавление покрытия и части подложки, их жидкофазное перемешивание и последующая быстрая кристаллизация ( $\sim 10^7$  К/с) [6]. За время, в течение которого покрытие и часть подложки находятся в жидкой фазе, происходит

Микроструктура поверхности и поперечного сечения, а также распределение элементов исследовались при помощи растрового электронного микроскопа LE01455VP с энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализатором Rontec. Полученные данные представлены на рис. 2, 3. В результате обработки КПП у поверхности формируется легированный железом слой, толщина которого составила 8 и 30 мкм при плотностях энергии потока 15 и 20 Дж/см<sup>2</sup> соответственно.

перераспределение их компонент за счет диффузионного и конвективного переноса. Увеличение энергии потока приводит к более глубокому проплавлению кремниевой подложки, а также к интенсификации процессов диффузии и массопереноса.

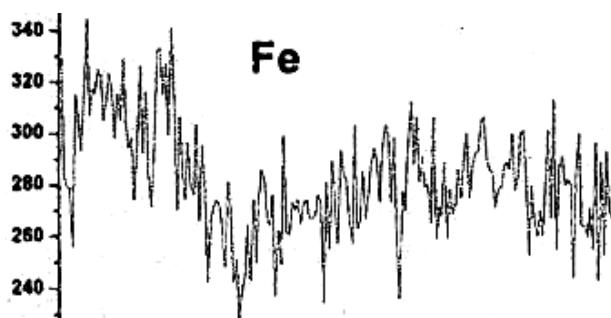
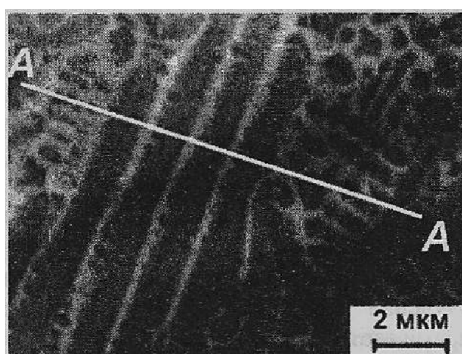


Рис. 3. Микрофотография дендритной структуры на поверхности (а) и распределение характеристического рентгеновского излучения железа вдоль линии AA (б)

В приповерхностном слое было выявлено формирование дендритной структуры. Характерный размер ветвей не превышает 7 мкм, толщина  $\sim 2$  мкм. Стволы дендритов ориентированы преимущественно перпендикулярно поверхности обработанных образцов. Совместное применение рентгеноспектрального микроанализа и растровой электронной микроскопии позволило обнаружить, что железо концентрируется главным образом в промежутках между дендритами (рис. 3). Образование дендритной структуры обусловлено концентрационным переохлаждением при быстрой кристаллизации расплавленного кремния и железа [8]. Ввиду того, что толщина расплавленного слоя в несколько раз превышает толщину исходного покрытия, состав расплава соответствует области гомогенности, в которой температура кристаллизации уменьшается с увеличением содержания железа. Поскольку растворимость металлов в

твердом кремнии крайне мала, кристаллизация кремния сопровождается переносом за границу жидкой и твердой фаз. В этой области происходит реакция образования силицида  $\alpha\text{-FeSi}_2$ .

Таким образом, обработка системы железное покрытие-кремниевая подложка компрессионным плазменным потоком позволяет формировать глубокие приповерхностные слои, содержащие кремний и силицид железа  $\alpha\text{-FeSi}_2$ . При этом образуется дендритная структура, в которой содержание железа внутри дендритов значительно меньше, чем между ними. Установлено, что воздействие компрессионного плазменного потока вызывает расплавление покрытия и части подложки, диффузионное и конвективное перемешивание железа и кремния и быструю последующую кристаллизацию, сопровождаемую вытеснением железа за межфазную границу и концентрационным переохлаждением.

**Литература:**

1. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов / Грибков В. А., Григорьев Ф. И., Калинин Б. А., Якушин В. Л. - М.: Круглый год, 2001, - 528 с.
2. V.V. Uglov, N.N. Cherenda, V.M. Anishchik, A.K. Stalmashonak, A.G. Kononov, Yu. A. Petuhov, V.M. Astashynski, A.M. Kuzmitski // ЖТМР, 2007, vol. 11, №3. P. 383-392.
3. В. М. Асташинский, В. В. Ефремов, Е. А. Костюкевич, А. М. Кузьмицкий, Л. Я. Минько // Физика плазмы - 1991, № 17, С. 1111-1115.
4. Углов В. В., Черенда Н. Н., Петухов Ю. А., Асташинский В. М., Кузьмицкий А. М., Квасов Н. Т., Шедко Ю. Г. // Труды 5-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстро-
- закаленные материалы и покрытия» 12-13 декабря 2006 г. Москва. - с. 332-338
5. V. M. Astashynski, S. I. Ananin, V. V. Askerko, E. A. Kostyukevich, A. M. Kuz'mitski, V. V. Uglov, V. M. Anishchik, V. V. Astashynski, N. T. Kvasov, A. L. Danilyuk // Surface and Coatings Technology, 2004, v. 180-181, pp. 392-395.
6. В. В. Углов, В. М. Анищик, Н. Н. Черенда, Е. К. Стальмошенок, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий. // ФХОМ. - 2005, №2. С. 36-41.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т.: Т. 2 / Под ред. Лякишева Н. П. М.: Машиностроение, 2000. - 1024 с.
8. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. М.: Мир, 1967 - 160 с.

**Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Денисов Г.С.**