

Список литературы

1. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. М., 1974.
2. Grover C. R. M. // Journ. Phys. C.: Solid St. Phys. 1985. V. 18. P. 4079.
3. Горелик С. С., Евтодий Б. Н., Ильяшук Ю. М. и др. Электрическая активность границ зерен в профилированном поликристаллическом кремнии / Ин-т проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов АН СССР. Черногловка. Препр. 1989.
4. Taylor W. E., Odell N. H., Fan H. J. // Phys. Rev. 1952. V. 88. P. 867.
5. Шалимова К. В. Физика полупроводников. М., 1976.

Поступила в редакцию 12.04.90.

УДК 621.039

В. П. ГОЛЬЦЕВ, В. В. ХОДАСЕВИЧ,
В. В. УГЛОВ, А. К. КУЛЕШОВ

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ЖЕЛЕЗА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ АЗОТА И БОРА

Метод ионной имплантации как наиболее перспективный способ модификации свойств рабочих поверхностей деталей машин и механизмов получает широкое распространение в промышленности. С его помощью при высоких концентрациях внедренных ионов можно формировать в поверхностном слое структуры, элементный и фазовый состав которых, состояние кристаллической решетки будут определять высокие физико-химические свойства облученного материала. Использование последовательной или одновременной имплантации ионов различных типов позволяет создавать структуры со сложным фазовым составом, по своим характеристикам приближающиеся, а во многих случаях и превосходящие свойства высоколегированных сталей. Однако для успешного применения этого метода в промышленности необходимо знать особенности протекания структурно-фазовых превращений в материале при его облучении несколькими сортами ионов.

В настоящей работе с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследованы фазовые превращения в тонких пленках железа, последовательно облученных ионами азота и бора.

Тонкие пленки железа осаждались на свежие сколы NaCl при 280 °C с помощью метода электронно-лучевого напыления на установке ВУ-1А в вакууме 10^{-5} Торр. Эффективная толщина пленок, определенная из спектров резерфордского обратного рассеяния ионов гелия с энергией 1,4 МэВ, составила 70 нм. Энергия внедряемых ионов азота и бора выбиралась таким образом, чтобы положение максимумов выделенной энергии для азота и бора в железе совпадали. Она составила для молекулярных ионов азота 100, бора — 40 кэВ. Дозы однократного облучения варьировались в пределах от 10^{16} до $6 \cdot 10^{16}$ ион/см².

В дальнейшем предварительно облученные до доз 10^{16} и $3 \cdot 10^{16}$ N⁺/см² образцы облучались затем ионами бора в интервале доз $1 \div 6 \cdot 10^{16}$ B⁺/см².

В результате проведенных экспериментов методом ПЭМ установлено, что исходные пленки железа имеют мелкокристаллическую структуру с размером кристаллитов от 15 до 30 нм, которая не изменяется при однократном облучении ионами азота до дозы 10^{16} ион/см². При имплантации ионов азота до дозы $3 \cdot 10^{16}$ ион/см² на электронограмме, полученной от облученной пленки, помимо колец α -Fe, появляются три дополнительных кольца слабой интенсивности (рис. 1, а). Расчет межплоскостных расстояний показывает, что эти дифракционные рефлексы соответствуют нитриду железа переменного состава с химической фор-

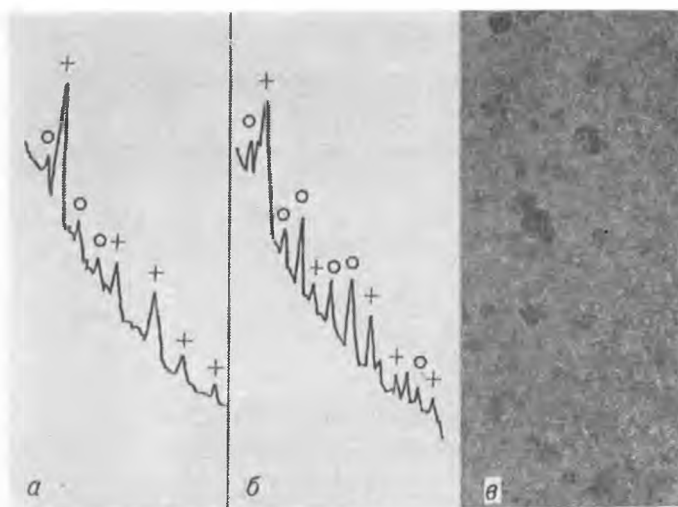


Рис. 1. Денситограмма от пленки железа, облученной ионами азота дозой $3 \cdot 10^{16}$ (а); $6 \cdot 10^{16}$ ион/см², (б):

+ — α — Fe; o — ϵ — Fe_{2+x}N ; в — структура поверхности пленки железа, облученной ионами азота дозой $6 \cdot 10^{16}$ ион/см², увеличение 96 000

мулой $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$. Эта фаза, как показано в работе [1], имеет гексагональную структуру, в которой c/a зависит от концентрации азота в соединении. Значения этого отношения, полученные на образцах, облученных до дозы $3 \cdot 10^{16} \text{ N}_2^+/ \text{см}^2$, указывают на возможность наличия высокой (около 20 ат.%) концентрации азота [1]. Следовательно, можно предположить, что образовавшийся нитрид близок по стехиометрическому составу к Fe_3N .

При облучении пленок Fe до дозы $6 \cdot 10^{16} \text{ N}_2^+ / \text{см}^2$ интенсивность и количество колец на электронограмме, соответствующих химическому соединению $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$, увеличивается (см. рис. 1, б), и определенное значение отношения c/a позволяет предположить, что концентрация азота достигает 30 ат.%, т. е. фаза $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$ более близка по содержанию азота к Fe_3N . Помимо изменения фазового состава, при имплантации азота претерпевает изменение и структура пленок железа. Так, при дозе облучения $6 \cdot 10^{16} \text{ N}_2^+ / \text{см}^2$ становятся различимы выделения фазы $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$, размер которых колеблется в интервале от 20 до 50 нм (см. рис. 1, в).

Полученные результаты хорошо коррелируют с данными, приведенными в работах [1, 2]. Так, установлено [2], что в результате облучения тонких пленок железа ионами азота с энергией 40 кэВ до доз 10^{17} и $6 \cdot 10^{17} \text{ N}^+ / \text{см}^2$ наблюдается формирование нитрида железа переменного состава с общей химической формулой $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$, обладающего гексагональной структурой. При имплантации азота с энергией до 60 кэВ в пленки Fe толщиной до 200 нм образуется, помимо $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$ фазы, еще $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ — нитрид железа с гранецентрированной кубической решеткой, а также α' — мартенсит нитрида железа и фаза $\alpha''\text{-Fe}_{16}\text{N}_2$ [1]. При этом увеличение дозы внедрения ведет к повышению концентрации атомов азота в $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$. Средний диаметр образовавшихся кристалликов $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$ при максимальной дозе внедренных ионов азота составляет 80 нм.

В результате облучения тонких пленок железа ионами бора наблюдается образование при дозах 10^{16} и $3 \cdot 10^{16} \text{ B}^+ / \text{см}^2$ фазы Fe_2B (рис. 2, а). Это химическое соединение имеет объемно-центрированную решетку Бравэ, характерную для Al_2Si [3]. Дальнейшее увеличение дозы облучения бором до дозы $6 \cdot 10^{16} \text{ B}^+ / \text{см}^2$ приводит к формированию тонкого, порядка 5 нм, углеродного слоя на поверхности пленки (рис. 2, б, в).

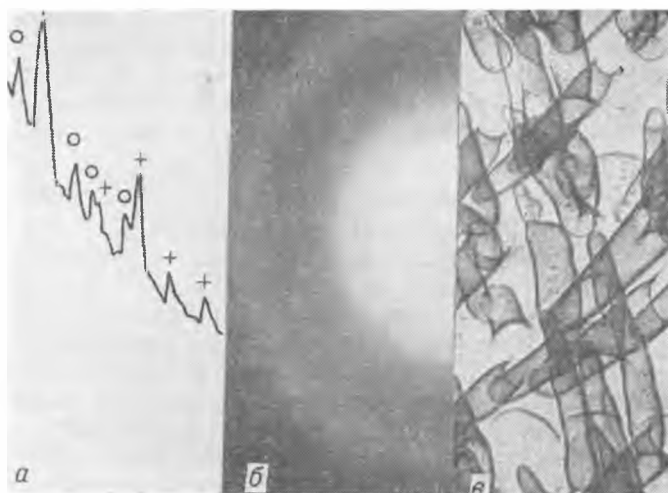


Рис. 2. Денситограмма от пленки железа, облученной ионами бора дозой 10^{16} ион/см² (а):

+ — Fe; o — Fe₂B; б — электронограмма; в — структура пленки железа, имплантированной дозой бора $6 \cdot 10^{16}$ ион/см², увеличение 6 000

Этот вывод сделан на основании результатов, полученных с помощью вторично-ионной масс-спектропии и ПЭМ.

Структурно-фазовые изменения в тонких пленках железа, облученных ионами бора с энергией 60 кэВ, исследовались в работе [3]. Приведенные в этой работе экспериментальные результаты показывают, что в интервале доз $10^{16} \div 4 \cdot 10^{16}$ В⁺/см² происходит формирование фазы Fe₂B. Наряду с обнаруженными фазовыми изменениями замечено, что при дозах, больших $4 \cdot 10^{16}$ В⁺/см², происходит переход пленки Fe из кристаллического в аморфное состояние. Аналогичные результаты при изучении фазообразования получены на массивных поликристаллических образцах [4]. Образование фазы Fe₂B, согласно данным работы [4], так же, как и в [3], происходит в интервале доз $10^{16} \div 4 \cdot 10^{16}$ В⁺/см²,

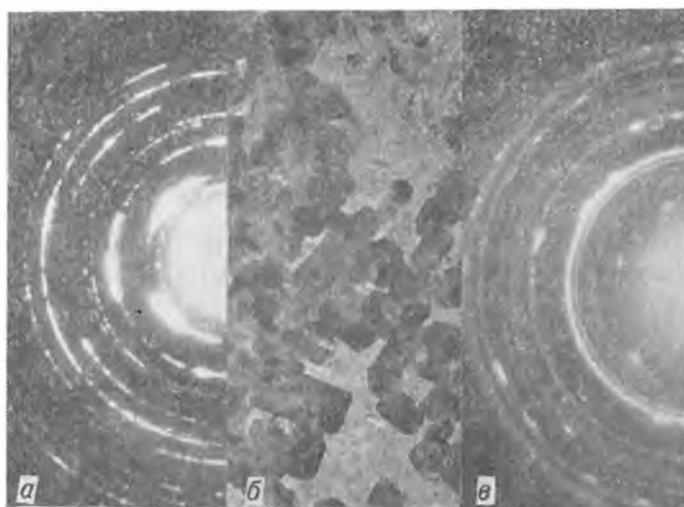


Рис. 3. Электронограмма (а) и структура (б) от пленки железа, последовательно облученной ионами азота и бора дозой $10^{16} \text{N}_2^+/ \text{см}^2 + 3 \cdot 10^{16}$ В⁺/см², увеличение 10 000. Электронограмма (в) от пленки железа, последовательно облученной ионами азота и бора дозой $3 \cdot 10^{16} \text{N}_2^+ / \text{см}^2 + 6 \cdot 10^{16}$ В⁺/см²

хотя приведенные в [4] значения межплоскостных расстояний, согласно [5], близки к значениям, характерным для фазы Fe_3O_4 .

Последовательное облучение вначале ионами азота, а затем бора приводит к формированию структуры, фазовый состав которой не является простой суперпозицией фаз, получаемых в результате однократной имплантации. Для соотношения доз $3 \cdot 10^{16} \text{ N}_2^+/ \text{см}^2$ и $10^{16} \text{ B}^+ / \text{см}^2$ мы наблюдаем на электронограммах кольца, соответствующие $\alpha\text{-Fe}$, и слабые рефлексы FeB . Для соотношения доз $10^{16} \text{ N}_2^+ / \text{см}^2$ и $3 \cdot 10^{16} \text{ B}^+ / \text{см}^2$ происходит значительное усиление интенсивности рефлексов, принадлежащих фазе FeB , что указывает на возрастание концентрации фазы. Соответствующая дифракционная картина и микроструктура показаны на рис. 3, а, б. Это соединение представлено на микрофотографии в виде мелких светлых выделений размером 110—140 нм. Состав более крупных темных выделений точно не определен, имеется только несколько межплоскостных расстояний, позволяющих предположить, что эти выделения принадлежат B_2O_3 [5]. Кристаллическую фазу FeB (при имплантации ионов бора с дозой $5 \cdot 10^{17} \text{ B}^+ / \text{см}^2$ в аустенитную хромоникелевую сталь, температура облучаемой поверхности 500°C) удалось идентифицировать авторам работы [6]. Дозы облучения $3 \cdot 10^{16} \text{ N}_2^+ / \text{см}^2$ и $3 \cdot 10^{16} \text{ B}^+ / \text{см}^2$ приводят к формированию только $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$, а максимальная доза облучения бором $6 \cdot 10^{16}$ ион/ см^2 стимулирует образование сложной структуры, состоящей из фаз $\alpha\text{-Fe}$, $\epsilon\text{-Fe}_{2+x}\text{N}$ и FeB (см. рис. 3, в).

Список литературы

1. Rauschenbach B., Kolitsch A. // Phys. Stat. Solid., 1983. V. 80. № 2. P. 211.
2. Fayeelle S., Treneux D., Esrouf C. // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 1985. V. B7-B8. Part 1. P. 171.
3. Kolitsch A., Rauschenbach B., Richter E. // Rad. Eff. Lett. 1983. V. 76. № 6. P. 193.
4. Mei L., Zhang Y., Guo X., Kuo Y. // Journ. Magn. and Magn. Mater. 1986. V. 59. № 3—4. P. 346.
5. Powder Diffraction File // International Centre for Diffraction Data. Pennsylvania. USA. 1977.
6. Никитин А. А., Травина Н. Т., Гусева М. И., Рыжков И. А. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 7. С. 101.

Поступила в редакцию 08.02.90.

УДК 621.317.795; 621.383.98

Л. И. БУРОВ, В. В. БУЦКИЙ, В. В. ГРУЗИНСКИЙ,
Н. В. НАУМОВ, А. К. ТЕРЕЩЕНКО

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОПРИЕМНЫХ СИСТЕМ СО СТУПЕНЧАТОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ УСИЛЕНИЯ

При исследовании световых потоков с динамическим диапазоном изменения интенсивности более трех-четырёх порядков в пределах одного импульса все более широкое применение находит метод ступенчатого регулирования усиления (СТРУ) фотоприемного устройства [1]. К сожалению, большие потенциальные возможности метода СТРУ на практике используются далеко не полностью, что связано главным образом с отсутствием простой и надежной математической модели метода. В настоящей работе рассмотрена подобная модель для схемы с ФЭУ в качестве фотоприемного устройства. Такая схема является в настоящее время наиболее распространенной, обеспечивая в силу малой инерционности ФЭУ квазистационарный режим (КСР) работы всей системы регистрации даже для достаточно коротких импульсов длительностью $10^{-7} \div 10^{-8}$ с.