

УДК 537.622

СТРУКТУРА МАГНИТОМЯГКИХ ПЛЁНОК Fe-Zr-N.

Даниил Антонович Емелин

*Студент 4 курса,**кафедра «Материаловедение»**Московский государственный технический университет**Научный руководитель: О.М. Жигалина,**доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Материаловедение»*

Развитие современной микроэлектроники и систем магнитной записи требует создания материалов с высокой индукцией насыщения (до 2.1 Тл) и низкой коэрцитивной силой (до 40 А/м). Плёнки системы Fe-Zr-N являются перспективными кандидатами для сердечников записывающих головок благодаря сочетанию уникальных магнитных свойств, высокой термической стабильности и износостойкости. Свойства таких наноструктур описываются моделью случайной магнитной анизотропии, согласно которой критически важным является сохранение размера зерна меньше длины обменного взаимодействия.

Целью данной работы является анализ влияния режимов термического отжига на фазово-структурное состояние и процессы разделения фаз в нанокристаллических плёнках Fe-Zr-N.

Исследования проводили методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), просвечивающей растровой электронной микроскопии в режиме высокоуглового темного поля (STEM-HAADF), электронной дифракции и энергодисперсионного микроанализа (ЭДС) с использованием микроскопа FEI Osiris. Поперечные срезы (ламели) для ПЭМ изготавливались методом фокусированного ионного пучка (FIB).

В работе изучены плёнки Fe-Zr-N, полученные методом реактивного магнетронного напыления. Режимы термической обработки и основные структурные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние температуры отжига на размер зерна и фазовый состав.

Состояние	Основные фазы	Размер зерна α -Fe, нм	Особенности структуры
Исходное	α -Fe(N, Zr), ZrN, ZrO	3...5	Столбчатая структура, аморфные подслои
Отжиг 300...400°C	α -Fe, Fe ₂ N, Fe ₃ N	10...20	Исчезновение аморфных подслоёв
Отжиг 500°C	α -Fe, Fe ₃ N, Fe ₄ N, ZrO ₂	15...17	Нанофазное разделение (Fe-N и Zr-O)
Отжиг 600°C	α -Fe, ZrO ₂ (куб.)	До 100	Рост областей неоднородности до 200 нм

Установлено, что в исходном состоянии плёнки имеют столбчатую морфологию с размером нанокристаллов α -железа 3...5 нм. Характерной особенностью является увеличенный период решетки железа (межплоскостное расстояние d_{001} составляет 0.205...0.206 нм при теоретическом 0.202 нм), что обусловлено внедрением атомов азота и циркония.

Показано, что отжиг в диапазоне 300...500 °С приводит к постепенному росту зёрен и изменению стехиометрии нитридов железа в сторону увеличения содержания Fe ($\text{Fe}_2\text{N} \rightarrow \text{Fe}_3\text{N} \rightarrow \text{Fe}_4\text{N}$). При температуре 500 °С зафиксировано чёткое пространственное разделение элементов: железо и азот концентрируются в нанокристаллических колонках, в то время как цирконий и кислород вытесняются в межзёренное пространство, образуя мелкодисперсную фазу ZrO_2 . Цирконий выступает в роли эффективного ингибитора роста зёрен, обеспечивая стабильность наноструктуры (до 17 нм) до температур 500...550 °С.

Установлено, что при 600 °С происходит деградация наноструктуры: размер кристаллов железа достигает 100 нм, усиливается разделение по химическому составу в отдельных областях плёнки, что приводит к ухудшению магнитомягких свойств.

Литература

1. Жигалина О.М., Хмеленин Д.Н., Шефтель Е.Н. и др. Электронная микроскопия фазово-структурных превращений в магнитомягких нанокристаллических плёнках Fe-Zr-N // Кристаллография. – 2013, Т.58. – №2. – С. 327-336.
2. Sheftel E.N., Tedzhetov V.A., Zhigalina O.M. et al. FeZrN Films: Magnetic and Mechanical Properties Relative to the Phase-Structural State // Materials. – 2022, V.15. – №137.
3. Харин Е.В. Влияние структуры и фазового состава на статические магнитные свойства нанокристаллических плёнок системы Fe-Zr-N: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 137 с.