

УДК 669.15-194.3

**Д. С. Савостин<sup>\*</sup>, А. С. Соловьёв**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

*\*denis.savostin2012@yandex.ru*

## МАГНИТНО-МЯГКИЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА С ДОБАВКАМИ РЗМ

Рассмотрены пленки на основе железа с добавками редкоземельных элементов, в частности, структура и магнитные свойства. Был сделан вывод о возможности применения данных материалов в современной электронике.

*Ключевые слова:* магнитно-мягкие материалы, железо, РЗМ, редкоземельные металлы, пленки на основе железа

**D. S. Savostin, A. S. Solovyov**

## MAGNETIC-SOFT FILMS BASED ON IRON WITH ADDITIVES OF REM

Films based on iron with additives of rare-earth elements, in particular, structure and magnetic properties, were considered. It was concluded that these materials can be used in modern electronics.

*Key words:* soft magnetic materials, iron, REM, rare-earth metals, iron-based films

**П**ленки из магнитно-мягких сплавов используются для производства миниатюрных датчиков магнитного поля. Высокочувствительные датчики слабых магнитных полей применяются в качестве магнитных сердечников записывающих головок во многих современных электронных приборах (в частности, в устройствах для высокочастотной магнитной записи высокой плотности и в записывающих устройствах). Материалы, используемые для создания таких сердечников, должны обладать уникальной комбинацией магнитных, электрических, механических и технологических свойств, а именно высокой индукцией насыщения (вплоть до 2 Т) в сочетании с низкой коэрцитивной силой ( $< 0,1$  Э) и высокой магнитной проницаемостью (более 1000) на частоте до 100 МГц, а также высоким удельным

электрическим сопротивлением ( $\sim 200 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ). Немаловажными факторами также являются высокая износостойкость и термостойкость (до  $600 \text{ C}^\circ$ ) и технологичность в условиях технологии производства пленки [1].

Использование железа или богатых железом сплавов позволяет получить максимально возможную намагниченность, поскольку железо имеет максимальный магнитный момент на атом ( $2,22 \text{ мкТл}$ ) [1].

Одними из наиболее перспективных и интересных для изучения материалов на данный момент являются магнитно-мягкие пленки, основой которых является железо с добавками редкоземельных металлов (РЗМ). В частности, в работе [2] имеются данные о пленках состава  $\text{Fe-M-O}$  (где  $\text{M}$  = редкоземельный металл). Пленки  $\text{Fe-M-O}$  толщиной  $2\text{--}3 \text{ мкм}$  наносились на косвенно охлаждаемые водой стеклянные подложки методом высокочастотного реактивного распыления в смешанной атмосфере чистого аргона и кислорода. Так, у пленок состава  $\text{Fe}_{46\text{--}88}\text{Hf}_{2\text{--}22}\text{O}_{7\text{--}41}$  было получено четыре вида структуры: фаза на основе ОЦК-железа, смесь из ОЦК и аморфной фазы, аморфная фаза и фазы на основе оксидов. При этом магнитно-мягкие свойства наблюдаются только в случае наличия смешанной ОЦК и аморфной фазы. Этим условиям удовлетворяют пленки состава  $\text{Fe}_{55}\text{Hf}_{11}\text{O}_{34}$  и  $\text{Fe}_{49}\text{Hf}_{16}\text{O}_{35}$ , структура которых представлена в виде кристаллов ОЦК-железа диаметром не более  $10 \text{ нм}$ , окруженных аморфной фазой. Необходимо отметить, что намагниченность и коэрцитивная сила в пленках системы  $\text{Fe-Hf-O}$  уменьшается с увеличением содержания  $\text{Hf}$  и  $\text{O}$ , достигая минимума при  $10\text{--}15 \text{ ат. \% Hf}$ .

Также имеются данные о пленках состава  $\text{Fe}_{64}\text{Nb}_{12}\text{O}_{24}$ ,  $\text{Fe}_{68}\text{Y}_{22}\text{O}_{10}$  и  $\text{Fe}_{67}\text{Dy}_7\text{O}_2$ , структура которых состоит смеси ОЦК-железа и аморфной фазы. При этом намагниченность пленок превышает  $0,9 \text{ Тл}$ , коэрцитивная сила находится ниже значения  $400 \text{ А/м}$ , а электрическое сопротивление — выше  $4 \text{ м}\Omega/\text{м}$ .

Можно видеть, что пленки из магнитно-мягких материалов на основе железа, содержащие в своем составе РЗМ, обладают магнитными свойствами, которые удовлетворяют требованиям современной электроники. Подобный результат говорит о возможности применения данных материалов в электронных приборах и дает почву для дальнейших исследований в этой области.

### **Литература**

1. Sheftel' E. N., Bannykh O. A. Nanocrystalline films of soft magnetic iron-based alloys // Russian Metallurgy (Metally). 2006. Т. 2006, № 5. С. 394–399.
2. High resistive nanocrystalline Fe–MO (M = Hf, Zr, rare-earth metals) soft magnetic films for high-frequency applications / Y. Hayakawa [et al.] // Journal of applied physics. 1997. Т. 81, № 8. С. 3747–3752.
3. Phase Diagrams of Binary and Multicomponent Iron-Base Systems / O. A. Bannykh [et al.] // Metallurgiya. Moscow, 1986.