

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мироновича Андрея Юрьевича «Разработка основ технологии получения тонких анизотропных пленок  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  с высокой степенью кристаллографической текстуры», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники


Благодаря своему уникальному набору характеристик  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  является важным материалом для постоянных магнитов и СВЧ-приборов, работающих в диапазоне частот от 1 до 100 ГГц. Несмотря на относительно длительный период изучения и практического использования гексаферрита бария, его исследования остаются актуальными. Повышенный интерес к этому материалу можно объяснить возможностью варьирования его свойств в широких пределах. Таким образом, модификация основных характеристик  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  может быть достигнута несколькими способами, такими как изоморфные замены, варьирование условий синтеза и состояния материала: наночастицы, тонкие пленки и композиты. На основе этих исследований могут быть созданы новые типы различных устройств, особенно в случае анизотропных тонких пленок, которые можно использовать в планарных СВЧ-устройствах (циркуляторах, изоляторах, фазовращателях), в том числе настраиваемых электрически.  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  также активно используется в магнитных запоминающих устройствах, и его тонкие пленки подходят и для этой области. Синтез высококачественных текстурированных пленок  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  с сильной магнитной анизотропией является весьма сложной задачей. Это связано, отчасти, с общими для тонкопленочной технологии трудностями, такими как несоответствие параметров решетки или коэффициентов теплового расширения пленки и подложки. Другие проблемы уникальны для пленок  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . Так, сложная структура гексаферрита не может сформироваться при низких температурах подложки, а после осаждения пленки  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  часто оказываются аморфными (для полной кристаллизации, как правило, требуется не менее 800 °C). Очевидным решением является достаточное повышение температуры подложки, что называется отжигом *in situ*. Однако оборудование для *in situ* отжига при таких высоких температурах сложное и дорогое. В то же время альтернативный отжиг *ex situ* имеет другую проблему, связанную с ухудшением текстуры, что является следствием кристаллизации случайно ориентированных зерен в объеме пленки. Действительно, при отжиге *in situ* каждый новый слой пленки наследует ориентацию предыдущего, начиная с подложки. При отжиге *ex situ* кристаллизация начинается примерно одновременно во всем объеме пленки, поэтому часть зерен не имеет предпочтений для ориентированного роста. Как выяснил автор в ходе обзора литературы и проведения собственных экспериментов, в случае очень тонких пленок, до 100 нм, гексаферрит в основном кристаллизуется с текстурой (001). Принимая во внимание все этот факт, автором были разработаны

основы технологии получения текстурированных пленок  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  при температуре подложки 300 °С любой толщины. Были использованы такие приемы, как последовательные нанесение 100 нм пленки и ее ex situ отжиг, переодические остановки напыления и выдержка пленки для частичной кристаллизации. Полученные образцы обладали высокой степенью кристаллографической текстуры и магнитной анизотропией, в связи с чем представляют определенный практический интерес.

Работа выполнена на высоком уровне, ее цель достигнута, а задачи выполнены, а Миронович А.Ю. заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

доктор технических наук,  
профессор, профессор кафедры  
«Приборы и информационно-  
измерительные системы»  
ФГБОУ ВО «МИРЭА –

Российский технологический университет»

 Сандуляк Анна Александровна

Подпись заверяю:



**М.М. Буханова**

Контактные данные: Сандуляк Анна Александровна

Ученая степень: доктор технических наук по специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Ученое звание: профессор

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Должность: профессор кафедры «Приборы и информационно-измерительные системы»

Адрес: 107996, г. Москва ул. Стромынка д.20

Телефон: +7 499 681-33-56; e-mail: sandulyak\_a@mirea.ru