

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕКСТУРИРУЮЩИЙ СЛОЙ ДЛЯ ВТСП-ЛЕНТ С ВЫСОКОЙ ТОКОНЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

А. В. Варлашкин, Б. И. Массалимов, В. П. Мартовицкий

*Методом осаждения на наклонную подложку нами были получены слои MgO, пригодные для задания текстуры в составе высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) лент с высокой плотностью критического тока. Метод позволяет получать поликристаллические подслои с ярко выраженной текстурой независимо от кристаллической структуры подложки. Одновременно MgO обладает хорошей адгезией к подложкам из широкого спектра материалов. Это делает метод универсальным способом получения текстурирующих буферных слоев, для использования в составе ВТСП-лент с высокой токонесущей способностью.*

**Ключевые слова:** ВТСП-ленты, буферный слой, MgO, осаждение на наклонную подложку.

Одним из перспективных применений высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) является сверхпроводящий кабель. Сверхпроводящий кабель требуется и для силовых линий передачи электроэнергии, и для получения сильных магнитных полей. Такой кабель может быть получен свиванием из тонких гибких сверхпроводящих лент, получивших название ленточных проводников второго поколения (2G). В качестве основы для получения таких проводников используют металлическую ленту, обычно из никелевых сплавов. Из-за того, что ВТСП осаждается в кислородной среде при высокой температуре, осаждать ВТСП непосредственно на металл ленты невозможно. Поэтому для защиты металлической основы от окисления на металл сначала наносят буферные оксидные слои.

Рост ВТСП с высоким критическим током возможен на поверхности ряда кристаллических материалов ( $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{SrRuO}_3$ , MgO,  $\text{CeO}_2$  и др.), эти же материалы нахо-

дят свое применение в лентах. Известно также, что структура ВТСП при осаждении на ленту обычно получается поликристаллической. При этом большая разориентация кристаллитов ВТСП приводит к подавлению критического тока на границах зерен по сравнению с критическим током в центре зерен, аналогично ВТСП керамике. Поэтому для создания лент с высокой токонесящей способностью требуется нанести пленку ВТСП на основу таким образом, чтобы расхождение между базисными плоскостями (001) кристаллитов было небольшим. Для этого используют эпитаксиальное осаждение, при котором слой ВТСП структурно повторяет кристаллическую структуру подложки. С этой целью на металлическую ленту осаждается буферный слой, формирующий необходимую поликристаллическую текстуру. Осаждение слоев ВТСП на буферный слой приводит к наследованию хорошо выраженной текстуры буферного слоя сверхпроводником. Это позволяет достичь высокой токонесящей способности сверхпроводящей пленки. Поэтому лента обычно содержит несколько буферных слоев, формирующих необходимую основу, и лишь затем основной слой ВТСП ( $REBa_2Cu_3O_x$ , где RE – редкоземельный металл, обычно Y или Gd). Сверху ВТСП покрывается слоями металла и изоляции.

Следует отметить, что важным недостатком современных многослойных лент является высокая сложность структуры. В ней часто содержится более 10 слоев, из которых более половины – буферные. Эта структура нуждается в упрощении и удешевлении, что приведет к упрощению производства лент, а следовательно – и к повышению надежности, и к их удешевлению.

Существует три основных метода получения буферных слоев с преимущественной ориентацией зерен (текстурой). Первым из разработанных методов является метод осаждения, стимулированного ионным пучком (IBAD) [1]. Вторым методом – осаждение на наклонную подложку (ISD) [2, 3] и третий (RABiTS) – получение подложек с биаксиальной текстурой с помощью прокатки ленты из сплава никеля и вольфрама [4].

Данная работа посвящена разработке универсальной технологии, пригодной для получения буферных слоев с малым расхождением осей кристаллитов на различных подложках, применяемых в микроэлектронике.

В нашей работе мы использовали метод осаждения на наклонную подложку (ISD – Inclined Substrate Deposition). Он обладает значительными преимуществами по сравнению с другими методами. К ним относятся относительная простота оборудования, сравнительно высокая скорость напыления до 10 нм/с, и низкая температура подложки при осаждении. Таким методом в работе [4] были получены значения критического

тока  $1.6 \text{ MA/cm}^2$  для сверхпроводников с буферным слоем MgO, а в работе [5] была получена ВТСП-лента с буферным слоем MgO, осажденным этим методом, с величиной критического тока  $3 \text{ MA/cm}^2$ .

В качестве материала для осаждения подслоя нами также был выбран MgO, важным преимуществом которого является возможность осаждения на широкий спектр подложек, как металлических, так и оксидных [6]. Другим его преимуществом является доступность и дешевизна материала, что важно для массового производства сверхпроводящих лент.

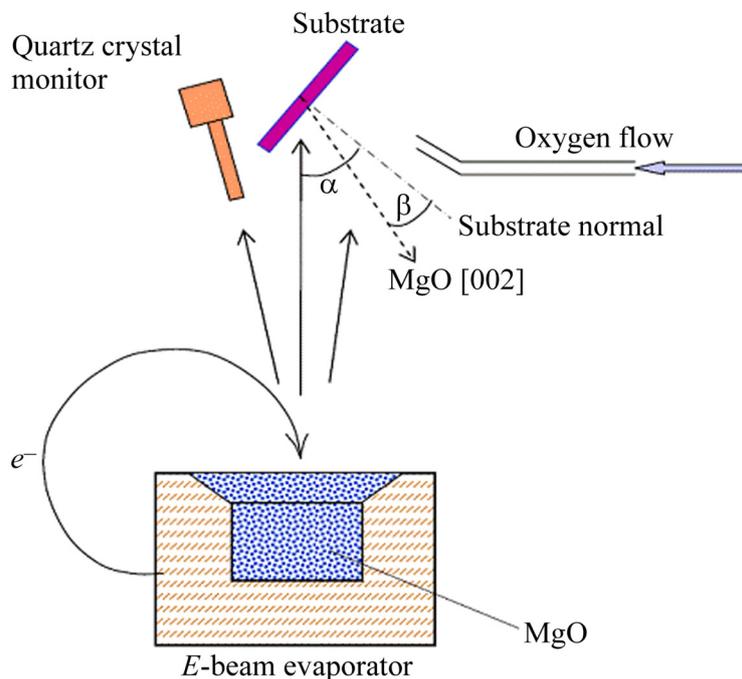


Рис. 1: Схема процесса осаждения MgO [2].

Нами была разработана технология получения текстурированного слоя MgO методом осаждения на наклонную подложку. В качестве подложки были использованы пластины сапфира, покрытые хастеллоем С276 с помощью магнетронного распыления. Испарение MgO производилось электронным лучом, в вакуумной установке напыления фирмы Тогг. Напыление производилось на подложку, установленную под углом  $\alpha = 55^\circ$  к направлению на тигель (рис. 1). Для формирования кристаллической структуры MgO в область подложки подавался кислород для создания области повышенного давления. Данный метод применим к широкому спектру материалов подложек, таких как монокристаллический кремний, ленты из NiW, нержавеющей стали и хастеллоя,

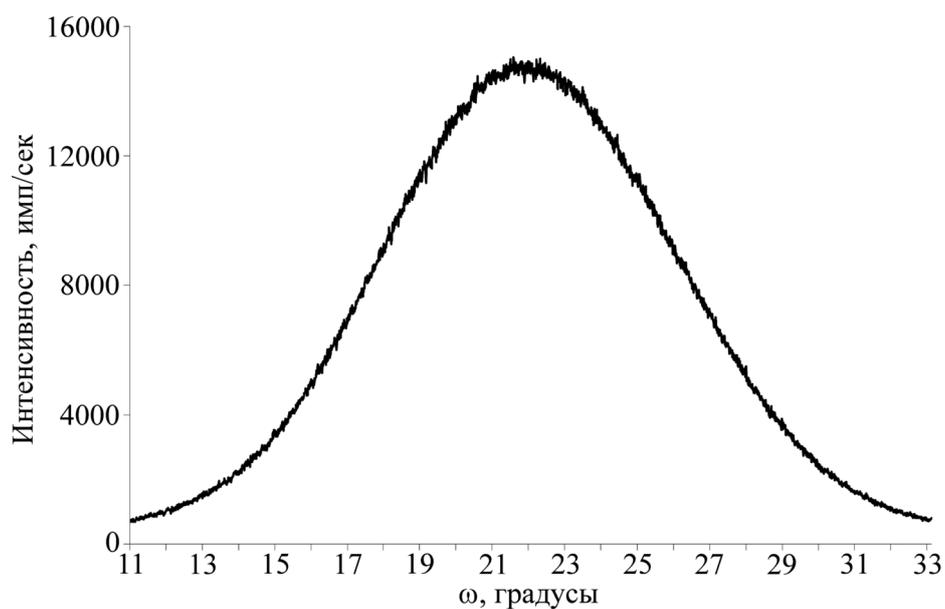


Рис. 2: Кривая качания образца M012 на рефлексе (002).

путем прямого осаждения на поверхность подложки или на подслой металла (напр., Ni) для гарантированной адгезии.

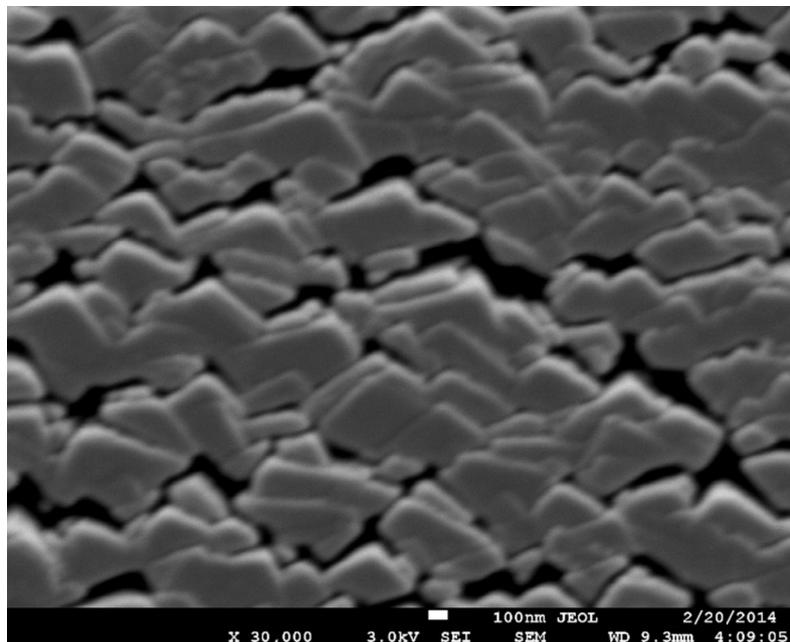


Рис. 3: Изображение в сканирующем электронном микроскопе образца с напыленным слоем MgO.

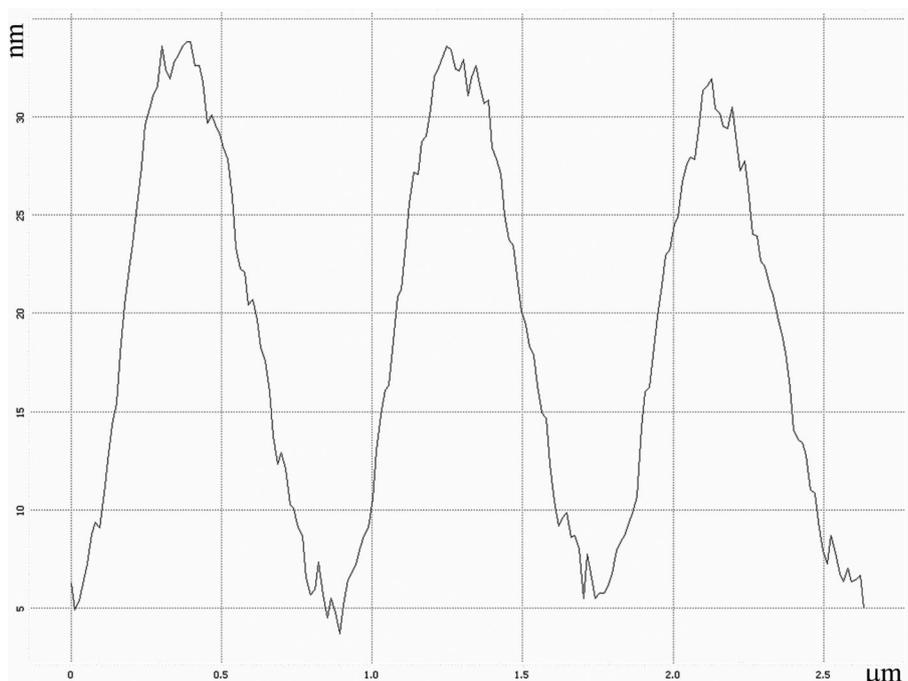


Рис. 4: Профиль поверхности, снятый при помощи АФМ.

Полученные образцы пленок MgO исследовались методом рентгенофазового анализа и съемки кривых качания. Анализ показал, что образцы имеют кристаллическую структуру MgO с двумя пиками, соответствующими постоянной решетки  $a = 4.1299 \text{ \AA}$  для более интенсивного пика, и табличному значению массивного MgO  $a_{\text{табл}} = 4.2123 \text{ \AA}$  для менее интенсивного пика.

Угол расхождения осей кристаллитов, определённый по кривой качания для рефлекса (002) MgO, показанной на рис. 2, не превышает  $10^\circ$  (FWHM).

Образцы были также исследованы на сканирующем электронном и атомно-силовом микроскопе. Структура поверхности хорошо видна на рис. 3, полученном с помощью электронного микроскопа. На рис. 3 видно, что размер кристаллитов составляет 200–300 нм. Также видно, что грани роста кристаллов расположены упорядоченно без видимого рассогласования. Исследование образцов на атомно-силовом микроскопе показало (рис. 4), что поверхность пленки имеет волнообразную структуру с периодом около 1 мкм и глубиной 30 нм.

Качество текстуры пленки высокое, угол расхождения осей кристаллитов не превышает  $10^\circ$  (FWHM). Поверхность пленки неровная и связана с особенностями роста кристаллов MgO.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **27**, 044022 (2014).
- [2] W. Prusseit, R. Nemetschek, C. Hoffmann, et al., *Physica C* **426–431**, 866 (2005).
- [3] M. Lao, J. Bernardi, M. Bauer, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 124002 (2015).
- [4] R. Hühne, D. Selbmann, J. Eickemeyer, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **19**, 169 (2006).
- [5] B. H. Stafford, M. Sieger, R. Ottolinger, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **30**, 055002 (2017).
- [6] S. M. A. K. Al Khateeb, Ph. D. *Thesis* (Univ. Birmingham, 2009)  
<http://etheses.bham.ac.uk/360/>

Поступила в редакцию 13 октября 2017 г.