

Изготовление токонесущих лент на основе ВТСП-2

Д.А. Чернодубов

Москва, НИЦ «Курчатовский институт», пл. Курчатова, 1

С начала XXI века в электротехнике начался процесс внедрения сверхпроводящих проводов на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Чрезвычайно привлекательными выглядят преимущества ВТСП материалов из-за гораздо более доступной криогеники для большинства устройств, применяемых в электротехнике, а также из-за высоких критических полей (по сравнению с традиционными низкотемпературными сверхпроводниками, НТСП) на уровне температур жидкого гелия. В отличие от привычных НТСП-проводов, имеющих круглое сечение, ВТСП-провода второго поколения представляют собой тонкие ленты с многослойной структурой кристаллографически хорошо ориентированных оксидных буферных и сверхпроводящих слоев, которые наносятся различными методами (физическими и химическими) на металлические ленты-носители (из текстурированных никель-вольфрамовых сплавов, либо нетекстурированных хастеллоя или нержавеющей стали). Важную роль играет первый текстурированный буферный слой материала, который напыляется на нетекстурированную подложку. В качестве таких материалов используются YSZ, MgO, и наносятся они методом распыления мишени с использованием ассистирующего ионного пучка, направленного под определенным углом к подложке (методы IBAD/ABAD). Текстурирование возникает в результате выборочного травления ионами «неудачно» расположенных кристаллитов. В качестве ВТСП-слоев используется соединения редкоземельных элементов вида (RE)Ba₂Cu₃O₇. Как правило, толщина слой ВТСП составляет 1-3 мкм. В технологии, реализованной компанией Брукер ЭйчТиЭс, используется буферный слой YSZ, наносимый методом ABAD на подложку из нержавеющей стали; сверхпроводящий слой YBa₂Cu₃O_{7-x} наносится методом импульсного лазерного распыления (PLD).

YBa₂Cu₃O_{7-x} представляет собой материал с орторомбической кристаллической ячейкой, состоящей из трёх псевдокубических элементарных ячеек типа перовскита, содержащих в центре атомы Y или Ba, образующих последовательность вдоль оси z. Угловые положения заняты атомами меди. В зависимости от расположения атомов кислорода решётка YBa₂Cu₃O_{7-x} может иметь различную форму. Максимальная температура перехода в сверхпроводящее состояние T_c≈92 К достигается при небольшом дефиците кислорода (x≈0.15). При x≈0.6 сверхпроводимость исчезает и происходит трансформация решётки YBa₂Cu₃O_{7-x} из орторомбической в тетрагональную.

Из вышеизложенного видно, что как структура ВТСП плёнки, так и ее текстура имеют важное значение для её сверхпроводящих свойств. Рентгеновские исследования сверхпроводящего и буферных слоёв позволяют не только проконтролировать качество изготовления ВТСП-провода, но и изучить фундаментальные физические явления в подобных объектах, увязав магнитные, транспортные и электрофизические свойства слоёв с их структурой. Преимуществом использования рентгеновского излучения для анализа являются его высокая чувствительность к особенностям кристаллической решётки образца, неразрушающий характер и простота использования.

В рамках Президентской программы «Сверхпроводниковая индустрия», реализуемой Госкорпорацией «Росатом», запланирована организация опытного производства ВТСП в России, для чего в НИЦ «Курчатовский институт» будет установлена лабораторно-экспериментальная комплексная пилотная линия по выпуску ВТСП, разработанная с привлечением немецкой компании Брукер ЭйчТиЭс. Для эффективного использования технологического оборудования пилотной линии параллельно разрабатывается комплекс методов исследований, который давал бы объективную характеристику структурного состояния всех имеющихся слоев (как буферных, так и сверхпроводящего). В НИЦ

«Курчатовский институт» существует большое количество исследовательских приборов для анализа структуры получаемых объектов. В частности, рентгеновские исследования проводятся на дифрактометрах Rigaku SmartLab, Bruker D8 Discover и специализированных станциях Курчатовского источника синхротронного излучения.

В ходе исследования текстуры различных слоёв была разработана методика и оборудование для полуавтоматической оценки степени кристаллографической текстуры ключевого буферного слоя окиси циркония, стабилизированной иттрием (yttrium stabilized zirconia, YSZ), наносимого на полированную стальную ленту-подложку в установке ионного ассистирования. Особенность технологии ABAD состоит в том, что на поликристаллическую подложку под воздействием ассистирующего ионного пучка аргона с энергией в несколько сотен электрон-вольт постепенно осаждается из металлической мишени оксидный биаксиально-текстурированный слой YSZ. Характерный угол разориентации кристаллитов по всем направлениям – менее 10 градусов. Число различных образцов на этапе разработки новой технологии может достигать десятков штук в день, поэтому создание полуавтоматической методики количественной оценки текстуры образцов представляет самостоятельную прикладную задачу.

Была исследована текстура изготовленных на оборудовании лабораторно-экспериментальной Пилотной линии образцов ВТСП второго поколения, взятых из начала и из конца участка сверхпроводящей ленты (полная длина ленты 75 м), а также при различных технологических режимах напыления. Можно утверждать, что параметры структуры слоя YSZ сохраняются в процессе его нанесения по всей длине ленты.