

# Проблемы получения буферных слоев $\text{CeO}_2$ в архитектуре ВТСП лент 2 поколения

## Введение.

В настоящее время наблюдается новый всплеск интереса к сверхпроводящим пленкам иттрий-бариевого купрата. Это обусловлено наметившимся путем создания реально действующих проводов на основе пленок этого материала, где в качестве подложки используются текстурированные металлические ленты. Но, несмотря на обширные исследования, эту задачу нельзя назвать окончательно решенной. Ключевым аспектом для успешного создания ВТСП проводов второго поколения является разработка системы буферных слоев, которая должна удовлетворять целому ряду требований, в том числе по химической и термодинамической устойчивости и совместимости с соседствующими слоями.

Данная работа посвящена созданию системы буферных слоев для токонесущих лент ВТСП-кабелей второго поколения, когда за основу принят слой диоксида церия — одна из фаз, являющихся очень хорошим подслоем при осаждении пленок YBCO на монокристаллических подложках. В работе выявлены трудности, возникающие при переходе к осаждению  $\text{CeO}_2$  на текстурированных лентах на основе никелевых сплавов, обозначены пути их решения, методом MOCVD получены многослойные образцы, обладающие сверхпроводящими свойствами.

## Обзор литературы.

Одна из актуальных задач современного материаловедения — создание сверхпроводящих проводов с высокими значениями критической плотности тока [1]. В настоящее время ведутся работы по созданию сверхпроводящих кабелей второго поколения, состоящих из токонесущих жил и системы охлаждения (Рис. 1). Токонесущая жила изготавливается из металлической ленты с нанесенной на нее пленкой сверхпроводящего материала. Такие кабели характеризуются приблизительно на два порядка большей плотностью критического тока, чем провода первого поколения, полученные по технологии “порошок в трубе” [2], для их производства требуется в разы меньше серебра, чем для ВТСП-проводов первого поколения [2], что должно существенно уменьшить стоимость их производства.



*Рис. 1: Трехфазный сверхпроводящий кабель второго поколения, каждая фаза которого сплетена определенным образом из токонесущих жил, переплетенных вокруг медной сердцевины.*

Как правило, токонесущие жилы включают в себя, кроме ленты и сверхпроводящего слоя, еще один или несколько буферных слоев (между лентой и сверхпроводником) для предотвращения взаимодействия между ними, способного ухудшить транспортные свойства ВТСП, в условиях формирования сверхпроводника при высоких температурах [2]. Поверх слоя ВТСП наносится один или несколько защитных проводящих слоев [2] (Рис. 2).

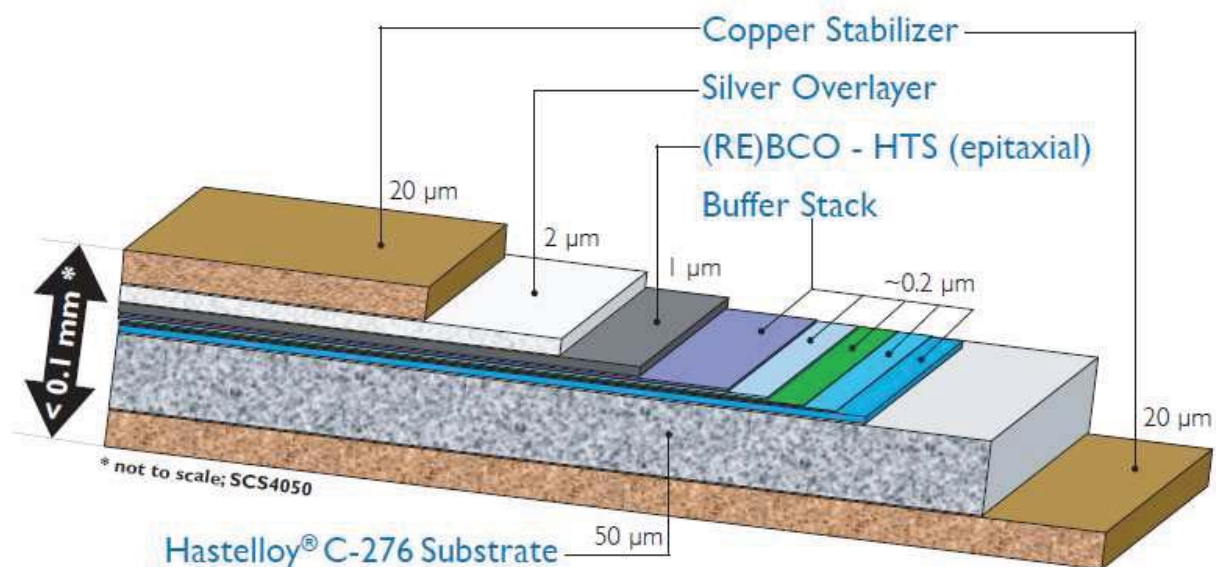


Рис. 2: Схема строения токонесущей жилы

Интересно, что подобные токонесущие жилы могут применяться не только при создании кабелей, но и для конструирования сверхпроводящих магнитов, электродвигателей, генераторов, токоограничителей и прочих устройств.

Наиболее широко применяемый в настоящее время ВТСП  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) имеет сверхпроводимость только в кристаллографической плоскости (ab) – вдоль плоскостей ( $\text{CuO}_2$ ) [3] (Рис. 3). На практике имеют значения проводящие свойства лишь вдоль токонесущей жилы, то есть параллельно поверхности металлической ленты. Таким образом, критический ток через образцы с одинаковыми площадями сечения при прочих равных условиях напрямую зависит от содержания в них зерен с (001)-ориентацией.

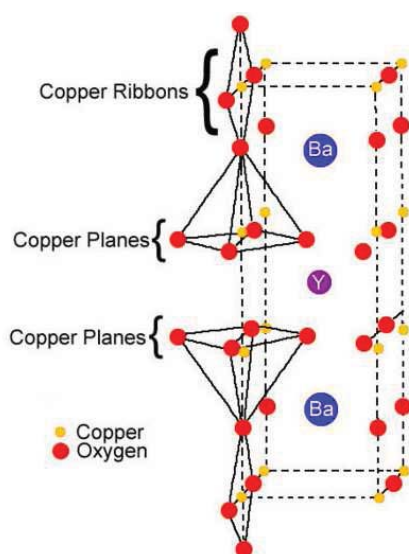


Рис. 3: Элементарная ячейка  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Наличие высокоугловых границ внутри этой плоскости так же снижает критические плотности тока, особенно при наличии внешнего магнитного поля [4]. В этой связи понятен

интерес к созданию пленок ВТСП, обладающих острой двуосной текстурой. Такая текстура сверхпроводящего слоя формируется за счет использования явления гетероэпитаксии — повторения осаждаемым веществом, отличным по составу от подложки, структуры подложки [4].

Изначально текстура может формироваться либо в самой металлической ленте и затем передаваться дальше за счет эпитаксии, либо в первом промежуточном (буферном) слое, наносимом на неориентированную металлическую ленту за счет особой технологии нанесения.

Существуют три основные технологии получения двуосно текстурированной подложки для нанесения ВТСП [2]:

1. Осаждение первого слоя с помощью ионного пучка (Ion Beam Assisted Deposition - IBAD): эта технология позволяет использовать нетекстурированную ленту, но для ее реализации необходимы высокий вакуум и источник ионов с энергией порядка сотни кЭв. Еще одним существенным недостатком является низкая скорость нанесения пленки, так как напыляемое вещество постоянно стравливается ионным пучком.

2. Осаждение первого слоя на наклонную подложку с помощью лазерного распыления мишени (Inclined Substrate Deposition - ISD). Этот метод также подразумевает необходимость высокого вакуума, сложного дорогостоящего оборудования и значительных энергозатрат.

3. Формирование текстуры в материале ленты за счет прокатки с высокой степенью деформации и последующих отжигов (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrates – RABiTS) [5]. Как правило, для производства текстурированной ленты под осаждение ВТСП используются сплавы на основе никеля. Эта технология не требует столь дорогого оборудования и характеризуется существенно меньшими энергозатратами.

Для нанесения самого ВТСП, а также каждого из буферных слоев, также существует несколько методов.

1. Термическое испарение металлических прекурсоров или молекулярно-лучевая эпитаксия (Molecular-Beam Epitaxy - MBE). Метод требует очень высокого вакуума, порядка  $10^{-5}$  -  $10^{-4}$  мбар, тонкого контроля подвода кислорода и скорости реакции [4]. На практике все это сопряжено со значительными техническими трудностями.

2. Импульсное напыление с лазерным (Pulsed Laser Deposition - PLD) или электронно-лучевым распылением. Требуется подвод к поверхности средней мощности порядка десятка ватт на  $\text{см}^2$  [4].

3. Возможно также магнетронное или радиочастотное распыление материала слоев. Но эта технология характеризуется весьма низкой скоростью роста пленок, порядка 20-300 нм в час [4].

4. Применяется и химическое осаждение из паровой фазы (CVD). Это технически намного более простой метод, но, тем не менее, в наше время уже практически не уступающий вышеуказанным физическим методам по свойствам получаемого ВТСП.

Большинство из этих технологий, как показано выше, требует высокого вакуума, следовательно, имеется необходимость в сложном и дорогостоящем вакуумном оборудовании, а также временных и энергетических затратах на откачку системы, а также затрат энергии на распыление исходных веществ. Применение CVD позволяет обойтись сравнительно низким вакуумом и, соответственно, простым и доступным оборудованием, а также малыми затратами энергии на испарение прекурсоров.

С учетом вышесказанного, наиболее эффективным представляется сочетание технологий CVD и RABiTS, при котором изначально двуосная текстура материала задается лентой из сплавов (в идеале – диамагнитных) на основе никеля в процессе прокатки и текстурирующих отжигов. Данная текстура с соблюдением определенных эпитаксиальных соотношений передается напыляемым при помощи химического осаждения из паровой фазы (CVD) пленкам.

В условиях, необходимых для нанесения YBCO, поверхность ленты неизбежно окисляется, а возникающий при неконтролируемом окислении оксид никеля имеет рыхлую структуру и не способен передать текстуру последующему слою сверхпроводника. Также имеется информация о возможном замещении меди на никель в структуре ВТСП в результате диффузии металла ленты в слой сверхпроводника [6]. Все это неизбежно ухудшит транспортные свойства сверхпроводящего слоя токонесущей жилы.

Таким образом, необходимо создать промежуточные, или буферные, слои, которые можно нанести в тех условиях, когда лента не окисляется, но которые будут стабильны и в условиях нанесения ВТСП. Естественно, эти слои должны передавать текстуру, то есть сами расти эпитаксиально и быть пригодными для последующего эпитаксиального роста пленок ВТСП. Была поставлена задача по разработке архитектуры буферных слоев и ее реализации методом МОСVD. В качестве прекурсоров для низкотемпературного CVD широко применяются β-дикетонаты соответствующих металлов [7].

Как правило, перед осаждением ВТСП пленки требуется нанесение нескольких буферных слоев, т.к. один буферный слой не способен удовлетворить всем предъявляемым требованиям.

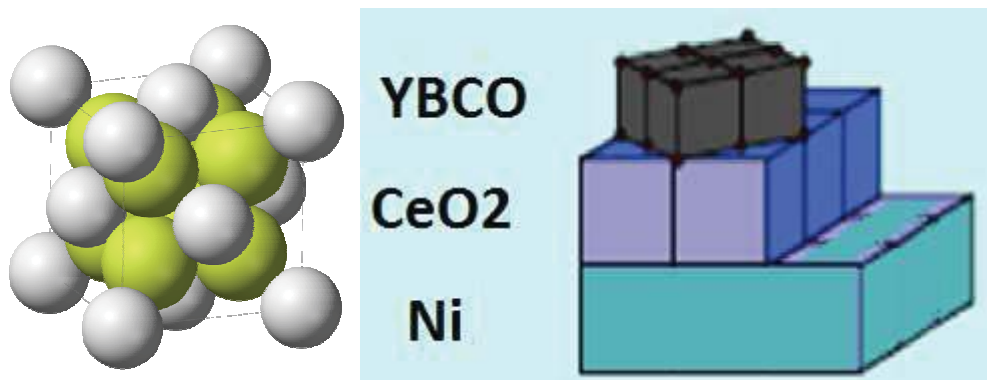
Главное требование к нижнему (затравочному) буферному слою – эпитаксиальный рост на ленте, являющейся материалом сильно отличающейся природы. Верхний (завершающий) слой должен иметь хорошее эпитаксиальное соответствие с ВТСП и не взаимодействовать с ним химически. Если параметры ячейки материалов этих буферных слоев сильно отличаются или возможно химическое взаимодействие между ними, то требуются промежуточные (барьерные) слои.

**Таблица 1: Список наиболее широко применяемых буферных слоев.**

<b>Роль слоя</b>	<b>Материал</b>
Затравочный	SrTiO <sub>3</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , La <sub>2</sub> Zr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , MgO, TiN, LaNiO <sub>3</sub> , CeO <sub>2</sub>
Барьерный	YSZ, LaMnO <sub>3</sub> , LaCoO <sub>3</sub>
Завершающий	CeO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , LaMnO <sub>3</sub>

Создание слоя, сочетающего в себе качества исходного и завершающего буферного слоев, значительно упростило бы и удешевило технологию получения токонесущих жил. Подобные исследования проводились [8]. Применялся диоксид церия, способный играть роль как затравочного, так и завершающего буферного слоя (Табл. 1). Его кубическая элементарная ячейка ( $a=5.41 \text{ \AA}$ ) при росте с поворотом на  $45^\circ$  (Рис. 4) имеет почти идеальное эпитаксиальное соотношение (рассогласование параметров порядка 1,6%) с основанием ячейки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ( $a=3,89 \text{ \AA}$ ,  $b=3,82 \text{ \AA}$ ). В работе [8] осаждение велось методом распыления с последующим высокотемпературным отжигом для улучшения текстуры и микроструктуры.

Мы решили исследовать возможности метода низкотемпературного MOCVD для осуществления аналогичного процесса: осаждение в условиях низкого парциального давления кислорода при относительно невысоких температурах с последующим улучшения структуры и свойств образцов, за счет рекристаллизации в процессе высокотемпературного отжига.



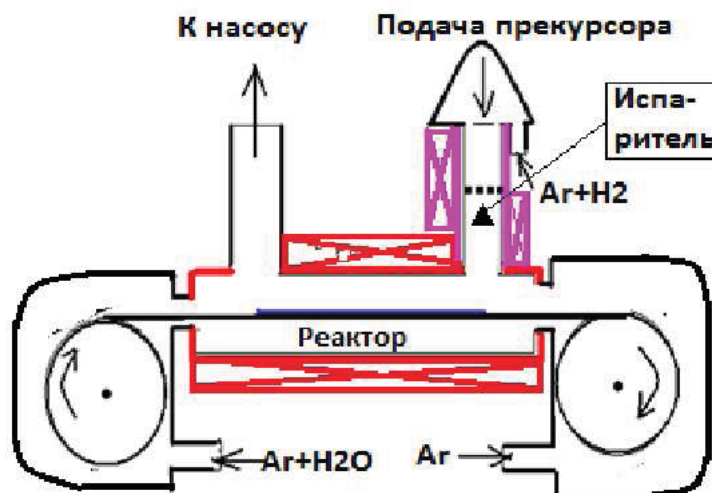
*Рис. 4: Изображение элементарной ячейки диоксида церия и его эпитаксиального соотношения с ВТСП.*

Необходимо заметить, что полностью исключить взаимодействие верхнего буферного слоя со сверхпроводником обычно не удастся. В свете этого, еще одним достоинством диоксида церия можно считать то, что его взаимодействие с фазой наносимого ВТСП с образованием  $\text{BaCeO}_3$ ,  $\text{YCuO}_2$  и  $\text{CuO}$  не приводит к значительному ухудшению транспортных свойств ВТСП [2].



## Экспериментальная часть.

Нами проводилось напыление диоксида церия методом низкотемпературного CVD с помощью установки, изображенной на Рис. 5. В качестве подложек использовались ленты Ni(W), диамагнитные ленты Ni(Cr,W): как чистые, так и с предварительно осажденными слоями MgO/Ni и SrF<sub>2</sub>/MgO/Ni/.



*Рис. 5: Схема установки для нанесения диоксида церия.*

В качестве прекурсора для получения пленок CeO<sub>2</sub> использовался дипивалоилметанат церия, сублимировавшийся при температуре 260°C и давлении 10-15 мбар в восстановительной атмосфере. В реакционную зону подавались пары воды, необходимые для разложения комплекса и формирования оксидной фазы по механизму пиролизиса. Основные условия эксперимента (температура, давление, распределение газовых потоков), тестировались на лентах Ni(W). Более подробно процесс выбора оптимальной температуры описан в следующей главе.

В качестве оптимальных были выбраны следующие значения: температура 550°C, давление 15 мбар.

Часть пленок CeO<sub>2</sub> была легирована лантаном, что достигалось добавлением 10 мольных процентов дипивалоилметаната лантана к прекурору Ce(thd)<sub>4</sub>.

В тех же условиях велось напыление на ленту Ni(Cr,W). Такая замена подложки не приводит к кардинальному изменению происходящих процессов, что позволяет оставить условия неизменными.

Нанесение CeO<sub>2</sub> поверх биаксиально-текстурированного оксида магния на никелевых лентах и поверх гетероструктуры SrF<sub>2</sub>/MgO/Ni велось в тех же условиях. Слои фторида



стронция варьировались по толщине. Также варьировалась и толщина оксида церия за счет изменения времени осаждения.

Часть образцов подвергалась отжигам в течение 15–60 минут в различной атмосфере при температурах 850–1000°C.

Фазовый состав и текстура полученных образцов характеризовались методами  $2\theta/\omega$ ,  $\varphi$ - и  $\omega$ -сканирования на рентгеновском дифрактометре Rigaku Smart Lab.

Для изучения микроструктуры поверхности применялась оптическая микроскопия. Толщина пленок исследовалась методом обратного Резерфордского рассеяния (RBS). Для определения состава легированных пленок был задействован метод рентгенолокального микроанализа (EDX).

Лучшие пленки  $\text{CeO}_2$ , полученные в данной работе, использовались для осаждения на них  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Полученные образцы характеризовались рентгеновскими методами, а также температурной зависимостью удельного сопротивления.

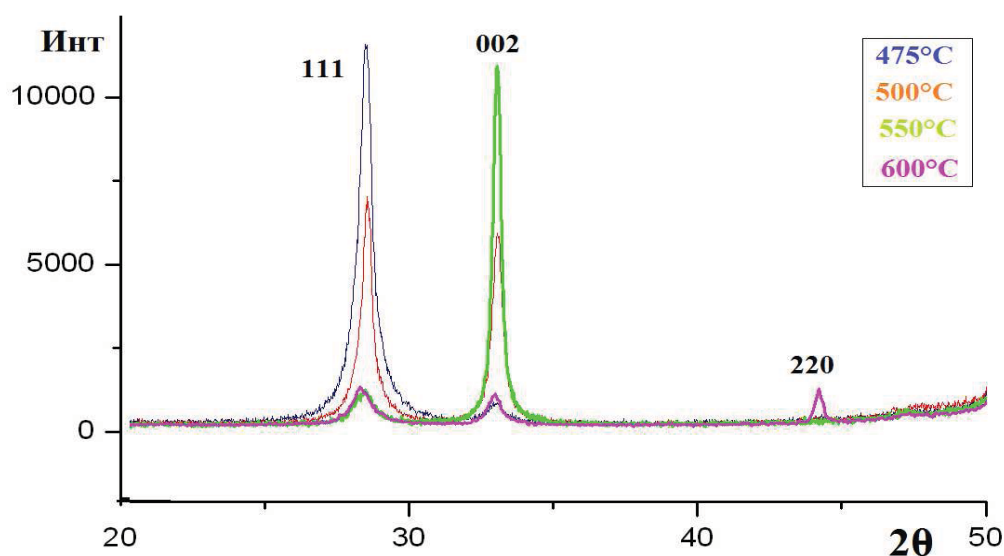
## Обсуждение результатов.

По результатам тестовых экспериментов выбраны приведенные в экспериментальной части условия. Оптимальное расположение и длина зоны осаждения достигалось за счет определенных значений газовых потоков и давления в системе.

Восстановительная атмосфера ( $\text{Ar}+\text{H}_2$ ) была необходима для предотвращения окисления поверхности ленты, способного воспрепятствовать эпитаксиальному росту пленки диоксида церия.

На первом этапе осуществлялся подбор оптимальной температуры реактора. Была проведена серия экспериментов по осаждению пленок  $\text{CeO}_2$  при  $475^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ,  $550^\circ\text{C}$  и  $600^\circ\text{C}$ . Наилучший результат (наибольшее соотношение между интенсивностями (002) и (111)-рефлексов) был достигнут при  $550^\circ\text{C}$  (Рис. 6). Как было показано выше, именно (001) ориентация  $\text{CeO}_2$  обеспечивает получение с-ориентированных пленок YBCO.

Чрезмерный подъем температуры нанесения ухудшает свойства пленки, так как приводит к разложению органической части прекурсора и загрязнению пленки углеродом, препятствующим формированию текстуры.



*Рис. 6: Дифрактограммы образцов, полученных при разных температурах на лентах Ni(W).*

Для дальнейшего улучшения текстуры  $\text{CeO}_2$  применялся часовой рекристаллизационный отжиг при  $900\text{--}1000^\circ\text{C}$ . Положительное влияние увеличения температуры нанесения и применения отжига (Рис. 7) мы объясняем тем, что эти факторы способствуют преодолению кинетических барьеров на пути образования более термодинамически стабильной эпитаксиальной (001)-ориентированной пленки по сравнению с (111)-ориентированной.

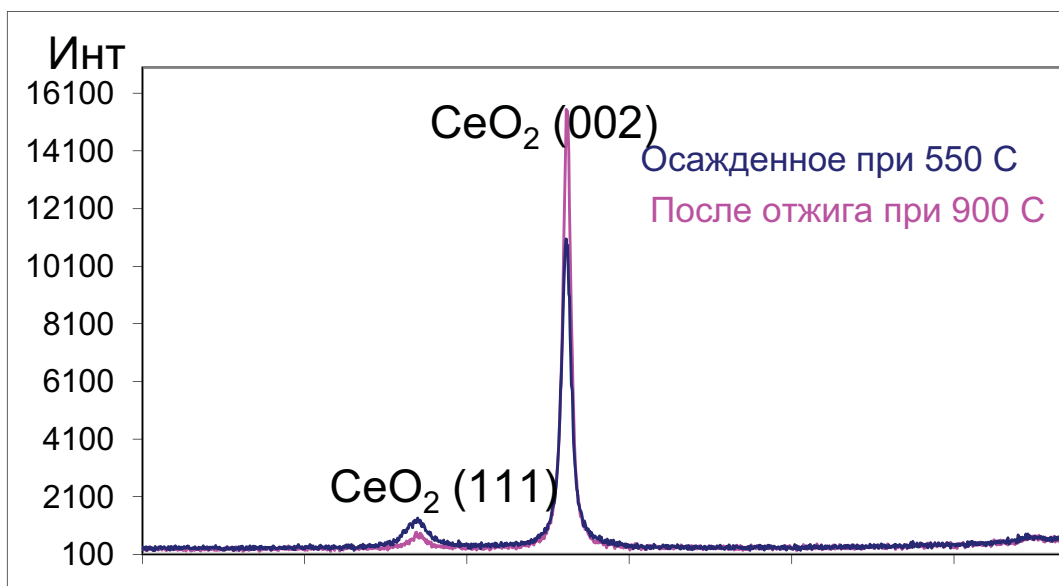


Рис. 7: Диффрактограммы образцов до и после отжига. Подложка — Ni(W).

Легирование лантаном (10 мольных % прекурсора) позволило получить образцы с единственной (002)-ориентацией без необходимости высокотемпературного отжига. Гетеровалентное легирование улучшает поверхностную диффузию, что облегчает формирование более стабильного термодинамически состояния. Полученные результаты прекрасно согласуются с нашим предположением о большей термодинамической стабильности (002)-ориентации по сравнению с (111) и о наличии кинетических затруднений для роста первой. На Рис. 8 сравниваются диффрактограммы легированного и нелегированного образцов до отжига.

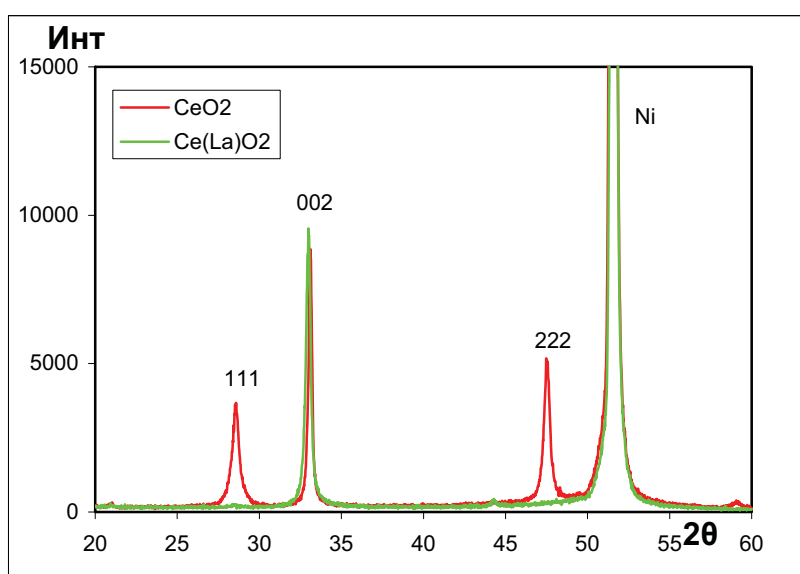


Рис. 8: Сравнение легированных и нелегированных пленок  $CeO_2$ .

По данным рентгенолокального микроанализа, в данной пленке содержание лантана составило 18 мол.%. В смеси прекурсоров его было всего лишь 10%. Таким образом, можно говорить, что коэффициент переноса в условиях данной установки для лантана выше, чем для церия.

Дальнейшие опыты проводились с использованием ленты из диамагнитного никелевого сплава. Она отличалась наличием в своем составе хрома. Эти подложки являются более перспективными в смысле практического использования ВТСП-проводов, т.к. они позволяют избежать потерь на перемагничивание подложки при пропускании переменного тока.

Оказалось, что воспроизвести двухстадийный процесс (низкотемпературное осаждение + высокотемпературный отжиг) получения текстурированных пленок  $\text{CeO}_2$  на таких подложках невозможно. Присутствующий в лентах хром инициирует процесс окисления ленты и взаимодействия продуктов окисления с  $\text{CeO}_2$  даже при низких парциальных давлениях кислорода, задаваемых атмосферой  $\text{Ar}+10\% \text{H}_2$ . Как видно из Рис. 9, в процессе высокотемпературного отжига произошло взаимодействие между лентой и пленкой, приведшее к образованию оксида никеля и посторонних, неоднозначно идентифицируемых фаз. Диоксид церия при этом растет в смешанной ориентации. Идентификация фаз в тонкой пленке затруднена как из-за наличия текстуры, приводящей к отсутствию большинства рефлексов, так и из-за снижения интенсивностей рефлексов по сравнению с объемным образцом.

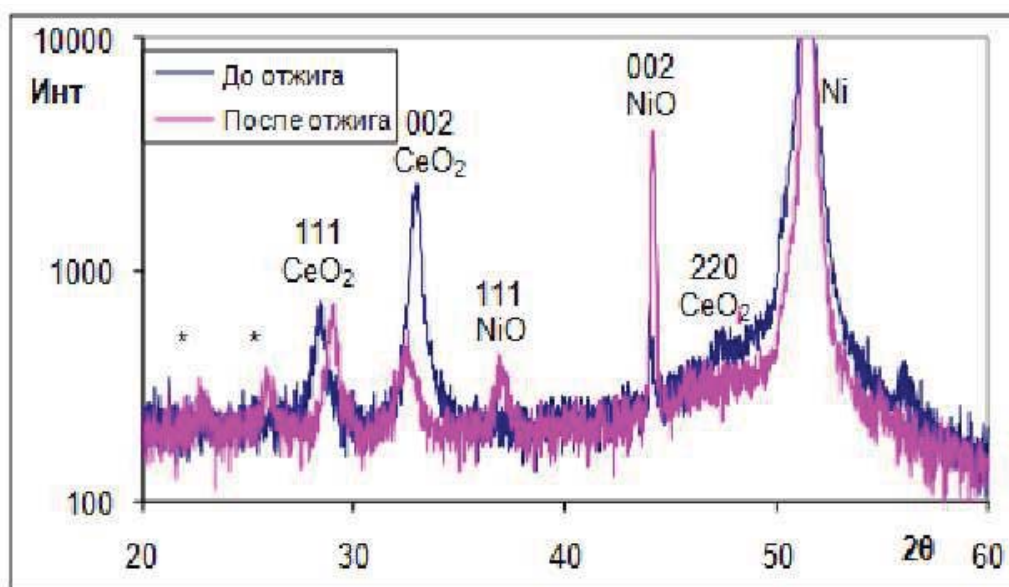
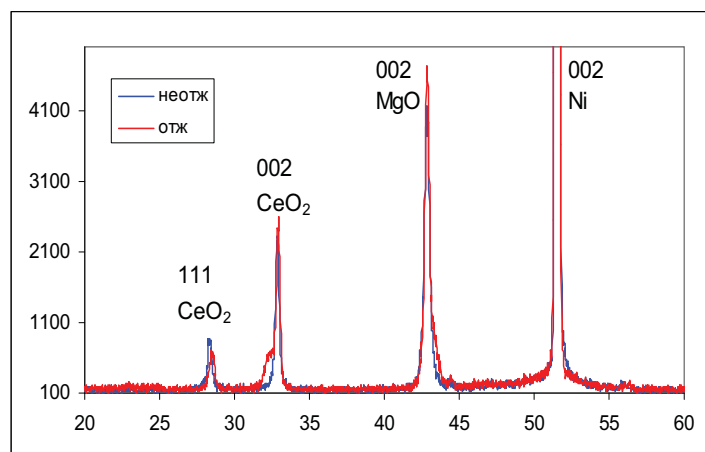


Рис. 9:  $\text{CeO}_2$  на ленте  $\text{Ni}(\text{Cr}, \text{W})$  до и после отжига. \*- неидентифицированные пики.

Чтобы избежать окислительного взаимодействия между поверхностью ленты и слоем диоксида церия, был осажден промежуточный слой (002)-ориентированного оксида магния.

Напыление  $\text{CeO}_2$  поверх слоя оксида магния, образующего сплошной, стабильный и блокирующий кислородную диффузию слой, избавило от нежелательных химических реакций: наблюдался рост только диоксид церия, но в смешанной ориентации. Ни легирование, ни отжиг не позволили добиться его единственной (001)-ориентации (Рис. 10). По-видимому, наличие (111)-ориентации объясняется плохим эпитаксиальным соотношением слоев (параметры элементарных ячеек  $\text{CeO}_2$  и  $\text{MgO}$  – 5,41 и 4,21 Å соответственно) и, возможно, сильным различием между типами структур (флюорит и NaCl, соответственно).



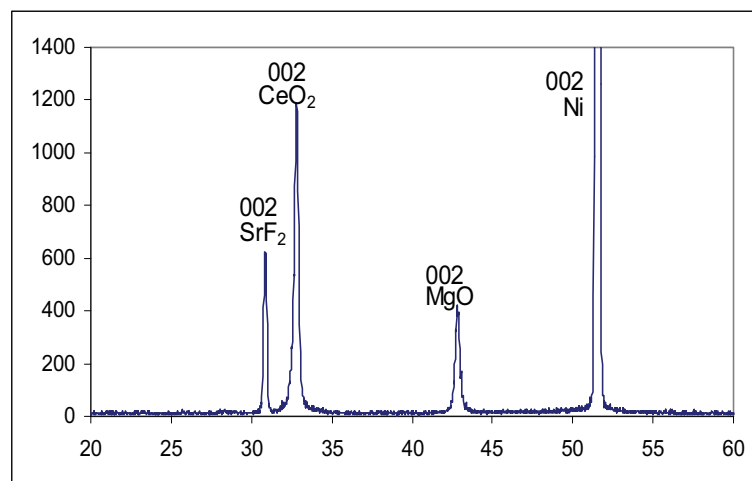
**Рис. 10:** Дифрактограмма гетероструктуры  $\text{CeO}_2/\text{MgO}/\text{Ni}(\text{Cr},\text{W})$ .

Для лучшего текстурирования получаемого слоя диоксида церия гетероструктура была усложнена: между слоями  $\text{MgO}$  и  $\text{CeO}_2$  был введен промежуточный слой фторида стронция. Фторид стронция хорошо наследует текстуру  $\text{MgO}$  в силу лучшего, по сравнению с  $\text{CeO}_2$ , эпитаксиального соотношения между ними (Табл. 2). Его применение позволило получить чистую ориентацию диоксида церия, как следует из дифрактограммы (Рис. 11).

**Табл. 2:** Параметры буферных слоев.

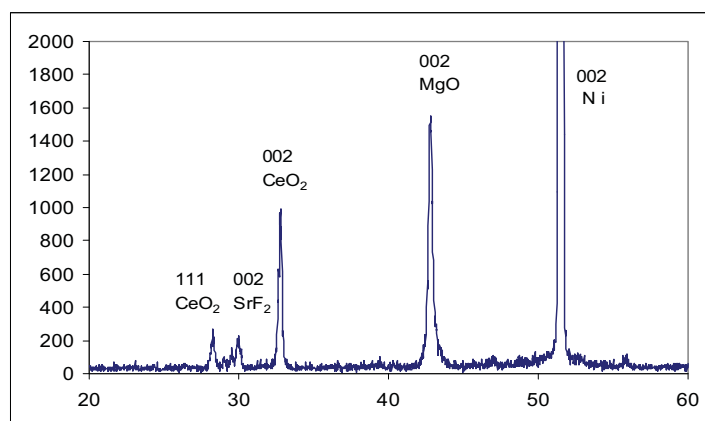
Слой	Параметр элементарной ячейки, Å
$\text{CeO}_2$	5.41
$\text{SrF}_2$	5.76
$\text{MgO}$	4.02 ( $4.02 \cdot \sqrt{2} = 5.69$ )

Подобные результаты выглядят несколько неожиданно, так как эпитаксиальное соотношение между диоксидом церия и фторидом стронция хуже, чем между диоксидом церия и оксидом магния. Этот эффект может быть объяснен тем, что  $\text{SrF}_2$ , в отличие от  $\text{MgO}$ , обладает родственной с  $\text{CeO}_2$  структурой флюорита, что значительно облегчает эпитаксиальный рост оксида церия.



**Рис. 11:** Дифрактограмма гетероструктуры  $\text{CeO}_2/\text{SrF}_2/\text{MgO}/\text{Ni}(\text{Cr},\text{W})$  до отжига.

Тем не менее, полученные образцы оказались непригодными для дальнейшего применения в качестве подложки для напыления ВТСП, так как текстура верхнего слоя нарушалась (Рис. 12) в отжигах, проводимых с целью ее дальнейшего улучшения и имитирующих условия нанесения ВТСП ( $850^\circ$ , 15 минут).



**Рис. 12:** Дифрактограмма гетероструктуры  $\text{CeO}_2/\text{SrF}_2/\text{MgO}/\text{Ni}(\text{Cr},\text{W})$  после отжига в аргонно-водородной смеси.

Для повышения устойчивости к внутренним напряжениям слоев фторида стронция и диоксида церия проводились эксперименты по уменьшению их толщины. Уменьшение

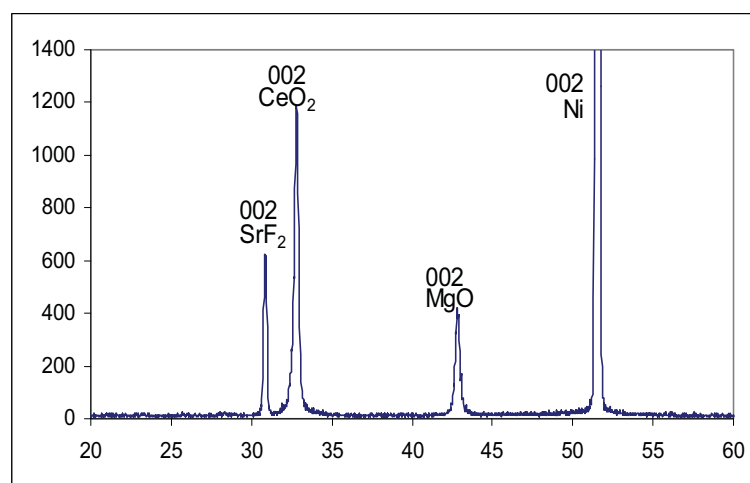
толщины пленок фторида стронция способствовало повышению стабильности образцов. Дополнительным плюсом использования более тонких фторидных пленок является снижение вероятности диффузии фтора (ухудшающего свойства сверхпроводника) через слой  $\text{CeO}_2$  в ВТСП. По данным обратного Резерфордского рассеяния, допустимая толщина  $\text{SrF}_2$  составляет менее 40 нм.

Нами было высказано предположение о негативном влиянии восстановительной атмосферы в процессе высокотемпературного отжига на стабильность данной гетероструктуры. Действительно,  $\text{CeO}_2$  в атмосфере водорода имеет аномально высокий КТР [9] при интересующих нас температурах. Как следствие, после проведения отжига наблюдалось отслаивание пленки.

**Табл. 3: КТР  $\text{CeO}_2$  в зависимости от условий.**

Условия	КТР
298-900К, водород	1,56
950-1273К, водород	<b>4,02</b>
298-1273К, воздух	1,24

Для предотвращения деградации образцов смесь аргона с водородом была заменена на чистый аргон. Данный подход позволил предохранить пленку от механического отслаивания и сохранить требуемую текстуру (рис. 13).

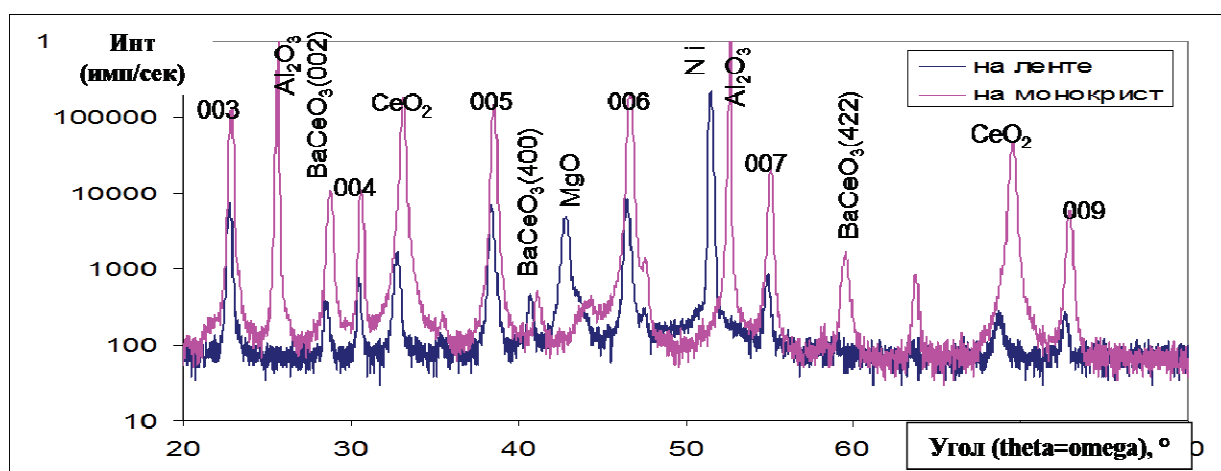


**Рис 13: Дифрактограмма гетероструктуры  $\text{CeO}_2/\text{SrF}_2/\text{MgO}/\text{Ni}(\text{Cr},\text{W})$  после отжига в чистом аргоне.**



Поскольку слой фторида растворяется в диоксиде церия при высокотемпературном отжиге, слой  $\text{CeO}_2$  не может быть очень тонким – наличие фторида на поверхности, запыляемой  $\text{YBCO}$ , существенно ухудшает сверхпроводящие свойства. Напротив, слишком толстые пленки  $\text{CeO}_2$  оказывались недостаточно стабильными и текстурированными. Таким образом, существует некоторая оптимальная толщина слоя диоксида церия. По данным обратного Резерфордского рассеяния, она составляет 100-150 нм.

Полученные трехслойные системы буферных слоев применялись для нанесения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . При невысоких скоростях напыления методом MOCVD удавалось достичь единственной с-ориентации ВТСП, при более высоких - имелась примесь а-ориентации.



**Рис 14:** Сравнение дифрактограмм гетероструктур  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{CeO}_2/\text{SrF}_2/\text{MgO}/\text{Ni}(\text{Cr},\text{W})$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

На рис. 14 видно, что фазовый состав и ориентационные соотношения для образца  $\text{YBCO}$  на ленте с буферными слоями идентичен пленке ВТСП на диоксиде церия, выращенный на монокристалле сапфира. Наблюдается некоторое увеличение ширины пиков, связанное с увеличением угла разориентации вне плоскости подложки по сравнению с образцом на монокристалле.

Мы исследовали увеличение разориентации кристаллитов от слоя к слою методами рентгеновской дифракции ( $\phi$ - и  $\omega$ -сканирования) (Рис. 15).

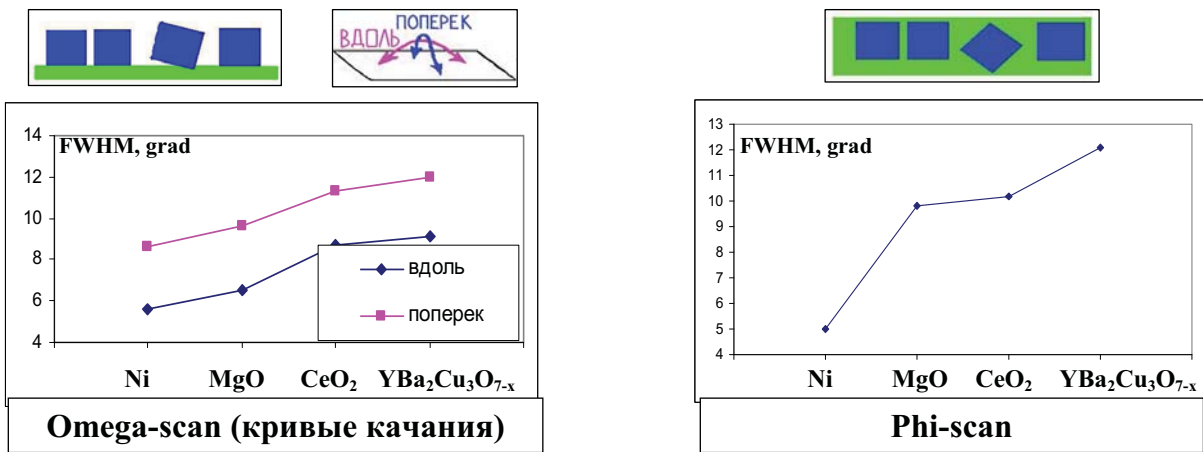


Рис 15: Увеличение FWHM для кривых  $\omega$ - и  $\phi$ -сканирования от слоя к слою. Слой фторида стронция не заметен из-за малой толщины.

После осаждения слоя ВТСП исследовалась зависимость удельного сопротивления от температуры (Рис. 16). Температура перехода в сверхпроводящее состояние превосходила 77 К, что делает возможным дальнейшее применение полученных по нашей схеме сверхпроводящих лент в системах с азотным охлаждением.

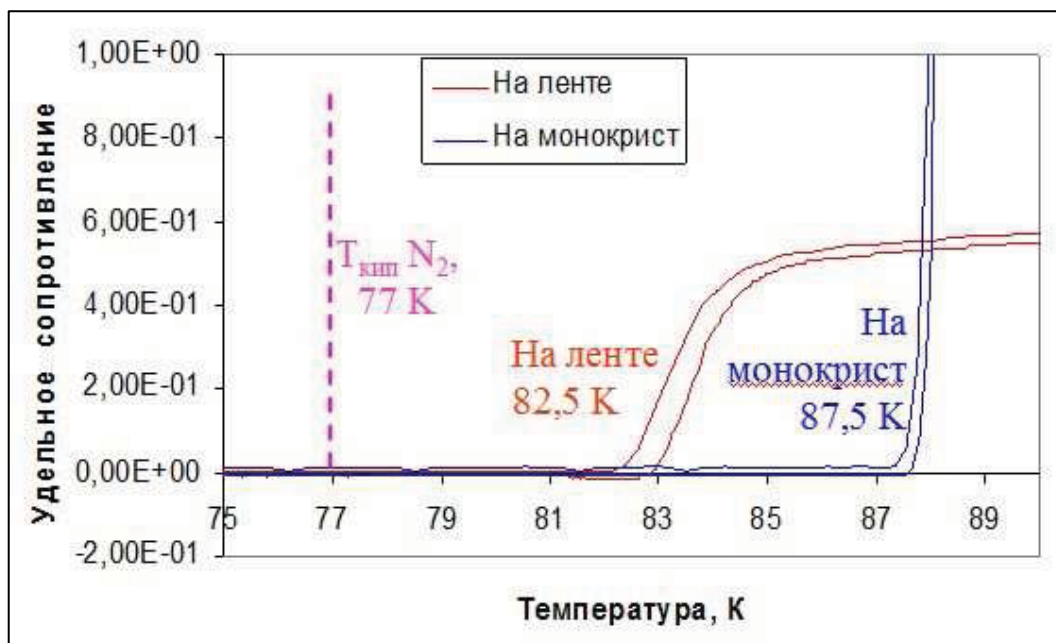


Рис 16: Зависимости удельного сопротивления от температуры для образца, полученного по нашей технологии и образца сравнения, выполненного на монокристаллической подложке.

## Выводы

Выявлены факторы, влияющие на качество текстуры слоя  $\text{CeO}_2$ , в число которых входят температуры осаждения и рекристаллизационного отжига, гетеровалентное легирование, атмосфера отжига и свойства исходной текстурированной ленты.

В рамках данной работы была разработана архитектура буферных слоев, включающая комбинацию оксидных и фторидных пленок.

Продемонстрирована возможность осаждения сверхпроводящих пленок на буферный слой  $\text{CeO}_2/\text{SrF}_2/\text{MgO}/\text{Ni}(\text{Cr},\text{W})$ .

### Использованная литература:

- 1) Ю.Д. Третьяков. Химия и технология ВТСП – основные направления развития. Журнал ВХО, 4 (1989), 436–445.
- 2) Second-generation HTS conductors. Edited by Amit Goyal.
- 3) D. P. Norton. SCIENCE AND TECHNOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING FILMS. Annu. Rev. Mater. Sci. 1998. 28:299–343.
- 4) R Wordenweber, Growth of high- $T_c$  thin films. Supercond. Sci. Technol. 12 (1999) R86–R102.
- 5) Pinaki P. Bhattacharjee Ranjit Kumar Ray, Anish Upadhyaya: J Mater Sci (2007) 42:1984–2001.
- 6) R Hühne, D Selbmann, J Eickemeyer, J Hänisch, and B Holzapfel Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) p 174.
- 7) Markku Leskela, Heini Molsai and Lauri Niinisto, Chemical vapour deposition of high- $T_c$  superconducting thin films. Supercond. Sci. Technol. 6 (1993) 627-456.
- 8) Jie Xiong, Yin Chen, Yang Qiu, Bowan Tao, Wenfeng Qin, Xumei Cui, Jinlong Tang, Yanrong Li. A novel process for  $CeO_2$  buffer layer on biaxially textured metal substrates in YBCO coated conductors. Supercond. Sci. Technol., 19 (2006), 1068–1072
- 9) J. Mater. Chem., 2003, 13, 3017 – 3020