

## Краткие сообщения

05;06;07;12

Напыление гладких пленок ВТСП твердотельным АИГ: Nd<sup>3+</sup>-лазером© А.В. Варлашкин,<sup>1</sup> С.И. Красносвободцев,<sup>1</sup> М.Л. Чухаркин,<sup>1</sup> О.В. Снигирев,<sup>2</sup> А.В. Цикунов,<sup>1</sup> Н.П. Шабанова<sup>1</sup><sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
119991 Москва, Россия<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Россия  
e-mail: varlash@sci.lebedev.ru

(Поступило в Редакцию 14 июня 2006 г.)

Представляем метод осаждения гладких эпитаксиальных пленок высокотемпературной сверхпроводимости при помощи импульсного инфракрасного АИГ: Nd<sup>3+</sup>-лазера с использованием скоростной фильтрации. Метод основан на удалении капель и твердых частиц из потока осаждаемого вещества при помощи быстрой заслонки, в качестве которой используется вращающийся диск. Получены гладкие однородные пленки YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> с критической температурой  $T_c > 90$  К. Концентрация капель на поверхности не превышала  $3 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-2}$ , их количество удалось снизить более чем в  $10^6$  раз.

PACS: 74.78.Bz

Современные экспериментальные исследования высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) выдвигают все более жесткие требования к качеству исследуемых пленок. Показателями качества ВТСП пленки являются хорошая эпитаксия, однородность, гладкая поверхность и высокие критические параметры. Для достижения таких характеристик были развиты и успешно применяются в настоящее время ряд методов: магнетронное распыление, молекулярно-лучевая эпитаксия, лазерное испарение и др. По-видимому, наиболее распространенным из них является импульсное лазерное испарение. Однако у этого метода имеется существенный недостаток — при распылении мишени наряду с газообразным веществом образуется большое число капель и твердых частиц размером  $0.1-10 \mu\text{m}$  [1]. Эти частицы увлекаются потоком расширяющегося газа к подложке и осаждаются на нее вместе с пленкой, нарушая ее структуру, делая образец неоднородным, а его поверхность — неровной. Использование ультрафиолетовых (УФ) лазеров еще позволяет получать эпитаксиальные пленки с некоторым количеством вкраплений. Получить эпитаксиальную пленку с помощью инфракрасного (ИК) лазера без удаления капель и макрочастиц невозможно, поскольку их количество настолько велико, что образующаяся пленка практически полностью состоит из них.

Для удаления макрочастиц из потока испаренного вещества применяются различные модификации импульсного лазерного испарения: двухлучевое испарение [2,3], неосевое осаждение [4] и метод скоростной фильтрации. Метод скоростной фильтрации был ранее разработан и показал свою эффективность в установке с эксимерным УФ-лазером [5].

В настоящей работе мы применили этот метод для напыления пленок с помощью ИК АИГ: Nd<sup>3+</sup>-лазера. Было исследовано влияние режимов фильтрации на качество

поверхности пленок, их однородность и критическую температуру.

Скоростная фильтрация основана на разделении газовой компоненты и макрочастиц, движущихся значительно медленнее, с помощью быстрой механической заслонки. В качестве заслонки использовался вращающийся диск из алюминиевого сплава с отверстием диаметром 2.5 см для прохода лазерной плазмы на расстоянии 6 см от центра диска (схема установки показана на рис. 1). Диск вращался асинхронным электродвигателем

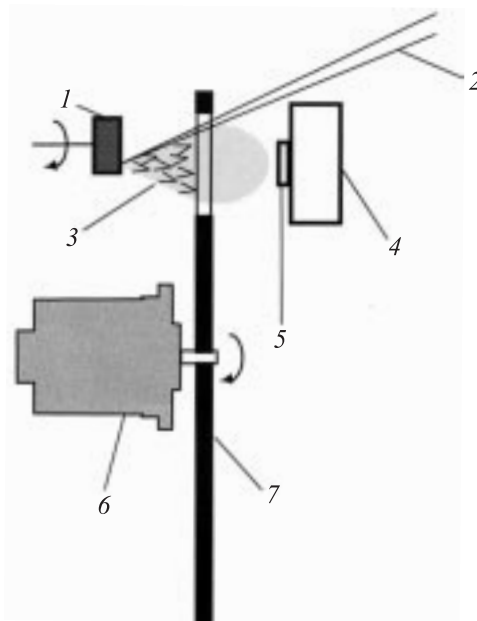
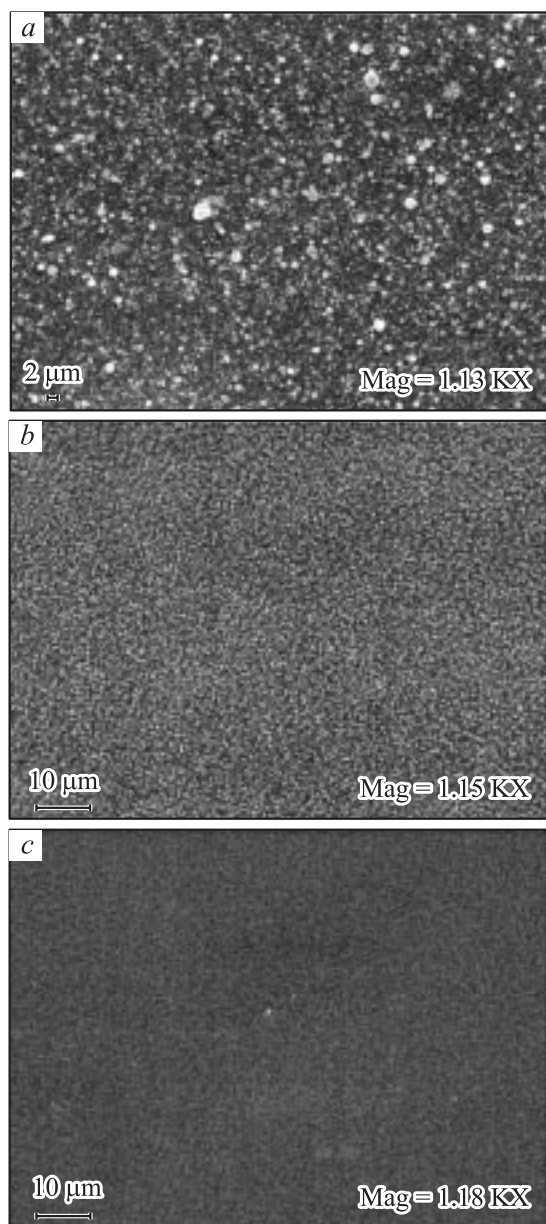


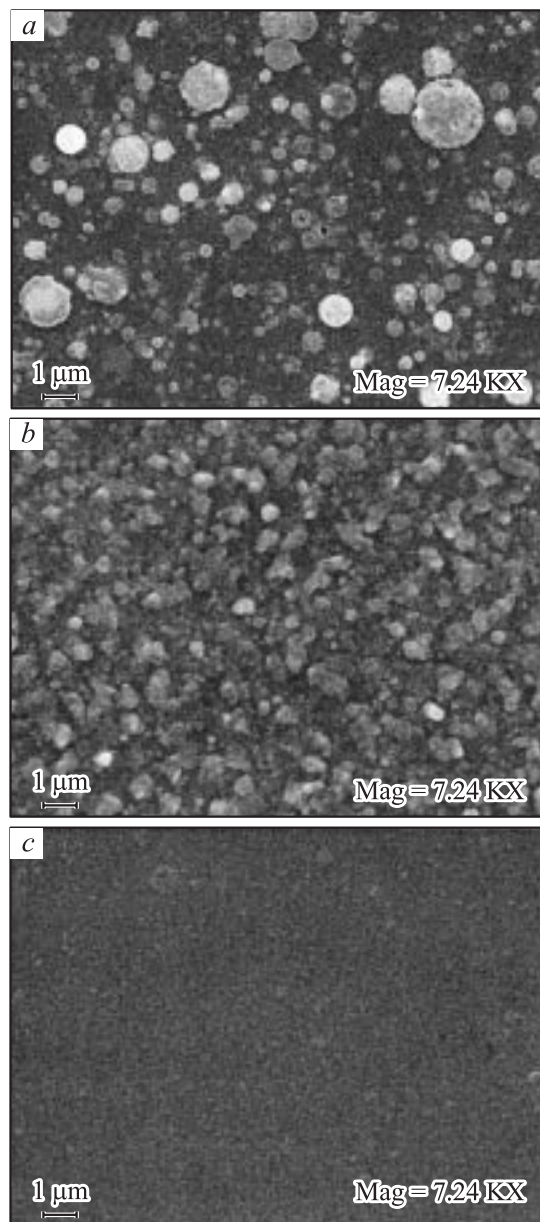
Рис. 1. Схема скоростной фильтрации лазерной плазмы: 1 — мишень, 2 — луч лазера, 3 — плазма, 4 — нагреватель, 5 — подложка, 6 — мотор, 7 — диск-заслонка.

ДИД-ЗТА со скоростью около  $400 \text{ s}^{-1}$ . При помощи прибора, детально описанного в [6], синхронно с диском запускался лазер в момент, когда отверстие диска находилось между мишенью и подложкой. Быстрая газовая струя свободно проходила через отверстие, а медленные частицы достигали диска, когда он успевал повернуться и перекрыть путь к подложке.

Осаждение пленок осуществлялось на подложки  $\text{SrTiO}_3$  ориентации (001) при температуре около  $800^\circ\text{C}$  в атмосфере кислорода при давлении  $0.3\text{--}0.6 \text{ mBar}$ . Расстояние от подложки до мишени варьировалось от 3.5 до 6 см. Диск располагался на расстоянии  $1\text{--}1.5 \text{ cm}$  от подложки. Частота повторения лазерных импульсов составляла  $14\text{--}15 \text{ Hz}$ , энергия импульса —  $0.2\text{--}0.3 \text{ J}$ , длительность импульса —  $10\text{--}12 \text{ ns}$ , время осажде-



**Рис. 2.** Электронные микрофотографии пленок, полученных без (a) и с использованием (b, c) скоростной фильтрации.

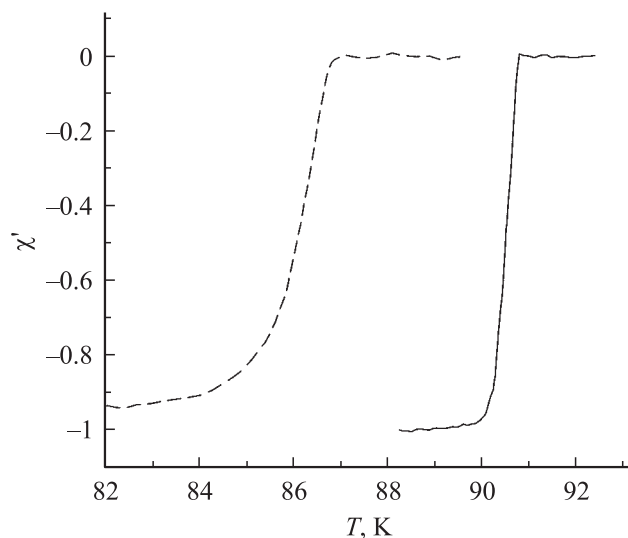


**Рис. 3.** Электронные микрофотографии (с большим увеличением) пленок, полученных без (a) и с использованием (b, c) скоростной фильтрации.

ния —  $10\text{--}20 \text{ min}$ . Средняя скорость осаждения составляла  $10\text{--}12 \text{ \AA/s}$ .

Для распыления использовались мишени, спеченные обычным способом. Состав мишеней варьировался от стехиометрического  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  до  $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.3}\text{O}_x$ . Лучшие пленки были получены при использовании именно стехиометрических мишеней, в отличие от других исследований, где для достижения высоких критических параметров требовалось корректировать состав мишени [5].

Поверхность пленок изучалась при помощи сканирующего электронного и оптического микроскопов. Электронные микрофотографии, сделанные с одинаковым небольшим увеличением, приведены на рис. 2. Образцы



**Рис. 4.** Температурные зависимости динамической магнитной восприимчивости пленок, полученных без (штриховая) и с (сплошная) использованием скоростной фильтрации.

различаются эффективностью фильтрации. На рис. 2, *a* образец осаждался без фильтрации. Видно, что поверхность образца полностью покрыта каплями и частицами размером до 3–5  $\mu\text{m}$ . Для образца на рис. 2, *b* диск располагался на расстоянии 2 см от мишени, так что отсекались частицы со скоростью  $v_m < 2.2 \cdot 10^4$  см/с. Поверхность образца выглядит почти гладкой, заметны лишь неоднородности размером  $\sim 1 \mu\text{m}$ . При напылении образца (рис. 2, *c*) диск располагался на расстоянии 4.5 см от мишени и отсекал макрочастицы со скоростью  $v_m < 5 \cdot 10^4$  см/с. Поверхность образца выглядит ровной.

Электронные микрофотографии этих образцов сделанные с большим увеличением, представлены на рис. 3. Видно, что пленка на рис. 3, *a* наряду с большими ( $> 1 \mu\text{m}$ ) содержит массу мелких включений размером менее 0.5  $\mu\text{m}$ , а образец на рис. 3, *b* покрыт большим количеством мелких ( $< 1 \mu\text{m}$ ) капель и не содержит частиц крупнее 1  $\mu\text{m}$ . Поверхность пленки на рис. 3, *c* гладкая. Исследования этой пленки при малом увеличении показали, что концентрация макрочастиц различного происхождения (возможно, привнесенных из атмосферы) не превышает  $3 \cdot 10^2$  см<sup>-2</sup>.

Скоростная фильтрация позитивно влияла не только на качество поверхности пленок, но и на их однородность и величину критической температуры. На рис. 4 показаны температурные зависимости динамической магнитной восприимчивости  $\chi'(T)$  вблизи сверхпроводящего перехода образцов, полученных с применением скоростной фильтрации (сплошная линия) и без нее (штриховая линия). Остальные параметры осаждения были одинаковы. Видно, что применение скоростной фильтрации приводит к увеличению критической температуры, а переход становится более резким.

Таким образом, в настоящей работе с помощью скоростной фильтрации продуктов испарения, образу-

ющихся в результате воздействия на мишень коротких импульсов ИК-лазера, были получены гладкие, однородные эпитаксиальные пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Исследованы режимы скоростной фильтрации. Проведенные в ходе экспериментов оценки показали, что скорость частиц размером более 1  $\mu\text{m}$  не превышает  $2 \cdot 10^4$ , а скорость частиц меньшего размера —  $5 \cdot 10^4$  см/с. В пленках, полученных при оптимальных режимах фильтрации, концентрация капель и макрочастиц составляла менее  $3 \cdot 10^2$  см<sup>-2</sup>.

Работа проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-02-17660) и Минобрнауки.

## Список литературы

- [1] Предтеченский М.Р., Майоров А.П. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1993. Т. 6. С. 1018.
- [2] Gaponov S., Gavrilov J., Jelinek M. et al. // Supercond. Sci. Technol. 1992. Vol. 5. P. 645.
- [3] Pechen E.V., Krasnosvobodtsev S.I., Kessler G. et al. // Phys. St. Solidi A. 1992. Vol. 131. P. 179.
- [4] Calestani G., Migliori A., Spreitzer U. et al. // Phys. C. 1999. Vol. 312. P. 225.
- [5] Pechen E.V., Varlashkin A.V., Krasnosvobodtsev S.I. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66. P. 2292.
- [6] Варлашкин А.В. Автореф. дисс. М.: МГУ, 2002.