

05.4;11;12

Автоионномикроскопическое исследование воздействия лазерных импульсов на поверхность монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$

© Г.Г. Кузяхметов, А.Ф. Бобков, А.Л. Суворов,
Ю.Н. Чеблуков, А.Н. Балабаев, А.С. Федотов

ГНЦ — Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Поступило в Редакцию 28 августа 1997 г.

Методом автоионной микроскопии исследовано взаимодействие электромагнитного излучения с поверхностью монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$. Показано, что при таком воздействии на поверхности образца образуется тонкая расплавленная пленка с последующим возникновением на ней неустойчивостей волнового характера. В объеме материала образуются комплексы точечных дефектов, преимущественно вакансионного характера, близкого к обедненным зонам.

Синтез и разработка сложных многокомпонентных соединений, в частности высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов, а также связанные с этими материалами уникальные свойства требуют более детального изучения влияния на них радиационных и других внешних воздействий. Это может оказаться важным методом для объяснения критических параметров сверхпроводимости, фотоиндуцированного и радиационного управления их свойствами и параметрами. Известен ряд работ, в которых лазерное облучение приводило к изменению электрической проводимости и появлению сверхпроводящего перехода [1], позволяло в некотором диапазоне плотности энергии контролируемо изменять сверхпроводящие характеристики ВТСП-пленок [2], способствовало заметному повышению критических токов [3,4].

Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с поверхностью ВТСП-материалов методом автоионной микроскопии может дать уникальную информацию о структурных изменениях кристаллической решетки на уровне отдельных атомов, кинетике испарения полем

поверхностных атомных слоев под воздействием одиночных лазерных импульсов, спектре поверхностных и объемных дефектов. Именно такие исследования были предприняты в настоящей работе. Ранее изучению радиационных дефектов в монокристаллах Y–Ba–Cu–O методом автоионной микроскопии была посвящена работа авторов [5].

Для решения поставленной задачи была собрана специальная установка, включающая автоионный микроскоп, импульсный неодимовый лазер ($\lambda = 1060 \text{ nm}$, $\tau = 20 \text{ ns}$), юстировочный лазер и кассету со съемными фильтрами для варьирования интенсивности облучения исследуемых образцов. Величина интенсивности подбиралась экспериментально и составила $I \sim 3 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$. Образцы для автоионномикроскопических исследований изготавливались из монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$, которые расщеплялись на мелкие осколки и самые острые фрагменты приклеивались электропроводящим клеем на вольфрамовые иглы-подложки [6]. Электропроводящим клеем служила суспензия графитовой пудры в ацетоне.

Облучение проводилось в двух режимах. В первом случае после достижения напряжения наилучшего изображения и регистрации на фотопленку характерной структуры поверхности образца, напряжение на нем уменьшалось так, что на экране микроскопа наблюдалось лишь слабое свечение. Затем вершина образца подвергалась лазерному воздействию. В результате яркость и площадь изображения резко увеличивалась, отражая вновь сформированный рельеф поверхности. При этом напряжение на образце оставалось постоянным (рис. 1). Данный эффект можно объяснить заострением вершины кончика образца с одновременным вытягиванием ее в поле (эффект термополевой перестройки–заострения) [7,8].

Во втором случае облучение проводилось без снижения потенциала образца, при напряжении наилучшего изображения. При этом происходило либо разрушение образца, либо испарение полем значительного числа поверхностных атомных слоев, активизированного воздействием лазерного излучения. Картина напоминала разрушение образца пондеромоторными силами электрического поля (рис. 2).

При анализе результатов подобных экспериментов следует учитывать следующие факторы: вакуумную изоляцию, криогенное охлаждение, высокое электрическое поле и малые размеры образца. Согласно последним экспериментальным данным [9], вновь образованные упорядоченные структуры можно условно разделить на две группы. К первой

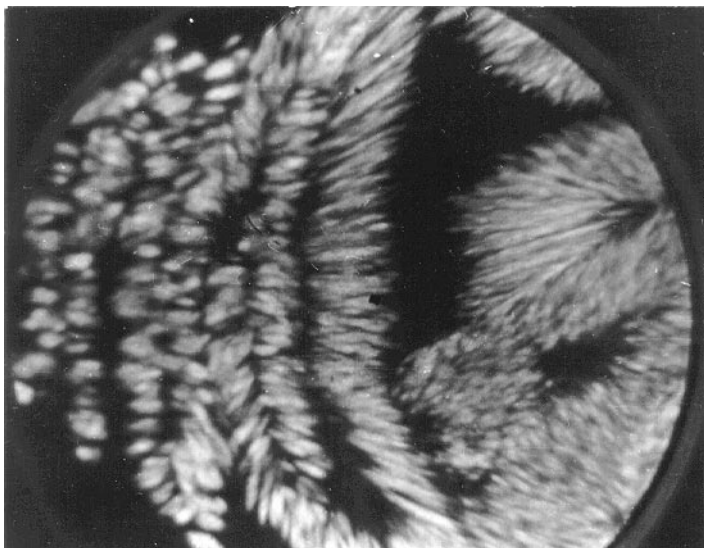


Рис. 1. Автоионное изображение поверхности монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$, подвергнутого импульсному лазерному воздействию. Потенциал образца $U_0 = 9.0 \text{ kV}$.

группе относятся строго периодические решетки, возникающие на поверхности твердых тел при неоднородном прогреве в зоне облучения. К второй группе можно отнести структуры рельефа в случае равномерного прогрева [10]. Учитывая очень малые размеры исследуемой поверхности (и самого образца), можно утверждать, что прогрев материала был однородным. Наличие электрического поля высокой напряженности над расплавленной поверхностью эмиттера приводит к возникновению на ней неустойчивостей волнового характера [11], причем на поверхности проявляются преимущественно коротковолновые возмущения. Их длина волны была определена непосредственно по автоионным изображениям и составила приблизительно 10–15 нм. Учитывая результаты работы [7], можно предположить ступенчатый характер возникновения неустойчивостей: первоначальное образование на поверхности жидкости отдельных микробугорков сферической или конической формы и затем их резкое вытягивание в виде пиков с уменьшающимся радиусом

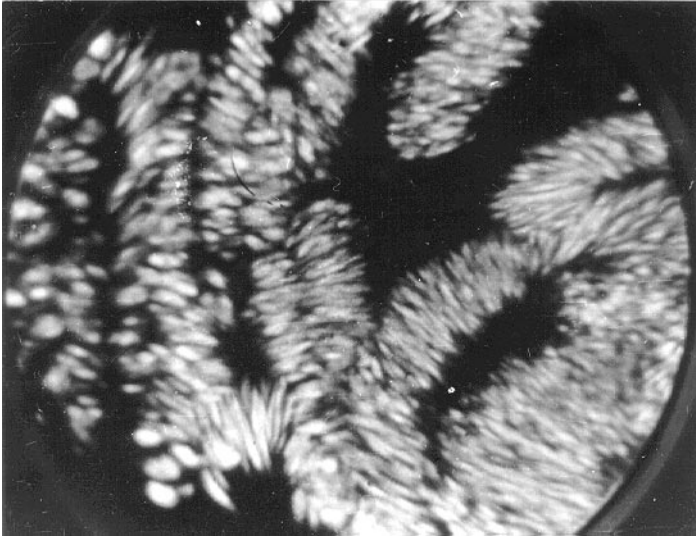


Рис. 2. То же самое, что и на рис. 1, после очередного импульса лазера (см. текст). $U_0 = 12.0 \text{ kV}$.

за счет локализации электрического поля на образованных неровностях и последующее мгновенное замораживание.

Согласно [12], малое возмущение жидкости со стороны приложенного электрического поля вызывает вертикальное смещение атомов поверхности. При этом на поверхность жидкости действует дополнительное отрицательное давление, направленное к ней по нормали. В отсутствие электрического поля на расплавленную вершину образца действуют только силы поверхностного натяжения. В поле же первоначальное возмущение нарушает баланс давлений и увеличивает отрицательное давление, которое в свою очередь приводит к усилению возмущения и т.д. [7].

Исследования в автоионном микроскопе монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$, облученных импульсами лазера, показали низкую чувствительность вновь сформированной поверхности к величине приложенного поля. Визуально было замечено, что небольшое увеличение потенциала на образце сопровождалось лишь усилением

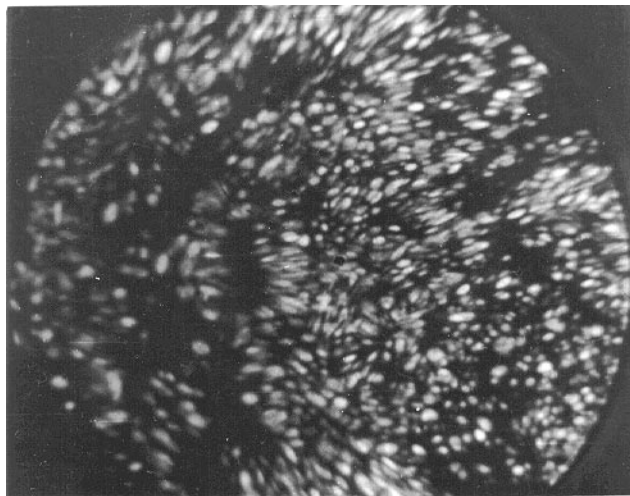


Рис. 3. Автоионное изображение поверхности монокристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ после полевого испарения нескольких десятков атомных слоев. $U_0 = 15.0 \text{ kV}$.

яркости изображения на экране, не внося при этом существенных изменений в общий контраст изображения. Для испарения поверхностного аморфизированного слоя требовалось значительное увеличение напряжения на образце, примерно на 15–20% от исходного значения. Методом полевого испарения был проведен автоионномикроскопический анализ структуры высокотемпературных сверхпроводников в объеме, на глубине нескольких десятков атомных слоев. Типичный микроскопический контраст представлен на рис. 3. В объеме происходят значительные структурные изменения, приводящие к полному отсутствию кристаллической структуры, к образованию в приповерхностном слое вакансионных кластеров небольших размеров, преимущественно обедненных зон. Основными факторами воздействия импульсного лазерного излучения в данном случае являются тепловое и ударное нагружение исследуемой поверхности материала. За счет этого в объеме образцов происходит генерация большого числа единичных вакансий, которые в свою очередь могут способствовать образованию вакансионных кластеров и пор. Кроме того, следует иметь в виду

наличие у поверхности образца сильного электрического поля на момент действия лазерного излучения, присутствие которого может вызвать смещение атомов из нормальных положений в кристаллической решетке [13]. Это может оказать существенное влияние на характер производимых нарушений кристаллической решетки в объеме материала. Серия полученных изображений в автоионном микроскопе, с учетом результатов работы [14], позволила оценить линейные размеры дефектных областей. В правой части изображения (рис. 3) наблюдается несколько близко расположенных дефектных областей, которые с некоторыми допущениями можно идентифицировать как поры с линейными размерами 5–10 нм. В то же время вполне логично предположить, что эти поры являются артефактными, а именно следствием полевого растравливания обедненных зон. Сделать же однозначное заключение полученные данные не позволяют. Можно также предположить, что образование дефектных областей под воздействием лазерных импульсов обусловлено большой подвижностью атомов кислорода в базисной плоскости CuO_4 , а также слабой связью в кристаллической решетке атомов бария [15,16]. Наблюдаемые дефектные области при этом соответствуют каскадам атом-атомных смещений.

Таким образом, при облучении монокристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ лазерными импульсами с интенсивностью излучения $I \sim 3 \cdot 10 \text{ W/cm}^2$ на поверхности образуется тонкая расплавленная пленка с последующим возникновением на ней неустойчивостей волнового характера. Сама поверхность при этом разрушается, теряет свою сверхпроводящую структуру и становится менее чувствительной к величине испаряющего поля. В объеме материала образуются комплексы точечных дефектов, преимущественно вакансий, близкие по своим параметрам к обедненным зонам.

Список литературы

- [1] Кириллук А.И., Крейнис Н.М., Кудинов В.И. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52. С. 696.
- [2] Вьюков М.Л., Комарницкий А.А., Фролов А.И. // СФХТ. 1989. Т. 2. № 12. С. 108.
- [3] Горольчук И.Г., Ульяшин А.Г. и др. // СФХТ. 1990. Т. 3. № 11. С. 2616.
- [4] А.Л. Михайличенко, Г.Н. Михайлова и др. // Квант. электрон. 1996. Т. 26. № 8. С. 715.

- [5] Г.Г. Кузяхметов, А.Л. Суворов // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 14. С. 31.
- [6] Melmed A.J. // J. de Phys. 1988. V. 49–С6. P. 67.
- [7] Габович М.Д. // УФН. 1983. Т. 140. № 1. С. 137.
- [8] Шредник В.Н. Рост кристаллов. М.: Наука, 1980. Т. 13. С. 68.
- [9] Ахманов С.А., Емельянов В.И. и др. // УФН. 1985. Т. 147. № 4. С. 675.
- [10] Емельянов В.И., Земсков Е.М., Семиногов В.И. // Кватн. электрон. 1984. Т. 11. № 11. С. 2283.
- [11] Зайцев С.В., Суворов А.Л. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 9. С. 156.
- [12] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред М.: Гостехиздат, 1957. 620 с.
- [13] Мюллер Э.В., Цонь Т.Т. Автоионная микроскопия. М.: Металлургия, 1972. 360 с.
- [14] Суворов А.Л., Соколов А.Г. // Кристаллография. 1975. Т. 20. С. 379.
- [15] Безотосный И.Ю., Елесин В.Ф. и др. // СФХТ. 1994. Т. 5. С. 835.
- [16] Гатальская В.И., Гатальский Г.В. и др. // Изв. АН. 1995. Т. 59. № 10. С. 164.