

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АСМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
ПЛЕНОК $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$**

И. Ф. Свекло

Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения НАН Беларуси,
230023 Гродно, пл. Тизенгауза, 7

В настоящее время технология микроэлектронных приборов на основе кремния практически достигла своего предела по быстродействию. Повышение быстродействия приборов возможно при использовании новых материалов, таких как, например, высокотемпературные сверхпроводники [1]. В настоящее время микроэлектроника на основе высокотемпературных сверхпроводников главным образом основана на использовании SNS переходов, образующихся по границе бокового контакта сверхпроводящих и нормальных материалов [2]. При всей простоте получения такого типа переходов они обладают существенным недостатком – большим разбросом параметров (например, критического тока), связанных с неоднородностью границы перехода после литографического процесса. Одним из возможных путей решения этой проблемы является получение планарных джозефсоновских переходов для высокотемпературных сверхпроводящих материалов. Поскольку в данном случае величина критического тока определяется площадью перехода, то разброс параметров различных переходов должен быть значительно меньше, чем в случае контакта по границе. Вместе с тем толщина барьера должна быть очень однородна по всей площади образца. Поэтому возникает требование к высокому качеству исходных пленок (монокристалличность, отсутствие дефектов). Данная работа посвящена анализу использования АСМ в процессе производства микроэлектронных приборов (планарных джозефсоновских переходов).

Измерения проводились при помощи АСМ Nanoscope-II (DI) на воздухе, при комнатной температуре, контактный режим сканирования, Si_3N_4 зонды с жесткостью $k=0.06-0.58$ N/m, радиус кривизны острия зонда 20-60 нм (паспортное значение). Скорость сканирования составляла 0.1-4 Гц. Острие зонда в форме четырехгранной пирамиды, ориентированной относительно держателя. Зонд наклонен к плоскости сканирования на 10^0 , угол между противоположными гранями вершины пирамиды 70^0 .

Предварительно параметры АСМ проверялись на тестовой структуре – литографическая решетка квадратных окон глубиной 150 нм, латеральный размер 5мкм. Направление сканирования – вдоль диагонали окон. На площади сканирования 50×50 мкм² помещается 18 окошек, для них получают следующие значения: высота 157.5 ± 6.3 нм, площадь 25.6 ± 1.2 мкм². При уменьшении площади сканирования до 10×10 мкм² в область видимости попадает только одно окошко для которого мы получаем следующие параметры: площадь 25.50 мкм², угол наклона краев 37^0-55^0 (в зависимости от того левый или правый берег). Теоретические значения углов наклона 90^0 ступеньки при сканировании пирамидой с вершиной в 70^0 должны составлять 45^0 и 65^0 . Небольшое расхождение между полученными значениями углов наклона и их теоретическим значением можно объяснять отклонением острия зонда от формы правильной пирамиды.

Исходным объектом исследования были $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ пленки, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии [3] на подложках LaSrAlO_4 и SrTiO_3 . В

зависимости от условий роста (температура, химический состав) получались как бездефектные пленки (плотность дефектов менее $0.001 / \mu\text{м}^2$, Рис. 1), так и пленки с небольшими мелкими (Рис. 2а) и крупными дефектами (Рис. 2б). В случае крупных дефектов их наличие можно было определить *in-situ* на стадии роста при помощи RHEED по появлению точечных рефлексов, обусловленных трехмерной структурой пленки. При помощи рентгеновских исследований не удалось зафиксировать дополнительных линий, обусловленных присутствием дефектов. Это можно объяснить тем, что суммарный объем материала даже в крупных дефектах (например, для Рис. 2б) составляет около 0.2% объема пленки. Другой вариант – материал в дефектах не имеет четкой кристаллической структуры и находится в аморфном состоянии. Об этом косвенно свидетельствует тот факт, что на АСМ изображениях дефекты, как правило, не имеют правильной кристаллической огранки.

Далее при помощи оптической проекционной литографии на поверхности пленки формировались прямоугольные выступы – нижний электрод (Рис. 3), верхняя часть которых представляла собой сверхпроводящий материал, а нижняя – материал подложки, поскольку отдельные электроды не должны быть соединены электрически. Технология травления выбиралась таким образом, чтобы угол наклона ступеньки составлял не более нескольких градусов. Дело в том что соединяющие различные электроды проводники также должны обладать сверхпроводящими свойствами и поэтому необходимо обеспечить монокристаллический рост пленки и на наклоненной части ступеньки, что при больших углах наклона невозможно. Поскольку скорость травления материала подложки и пленки разная, на сечении (Рис. 3) отчетливо видна граница между пленкой и протравленной подложкой. Также легко можно определить соответствующие углы наклона.

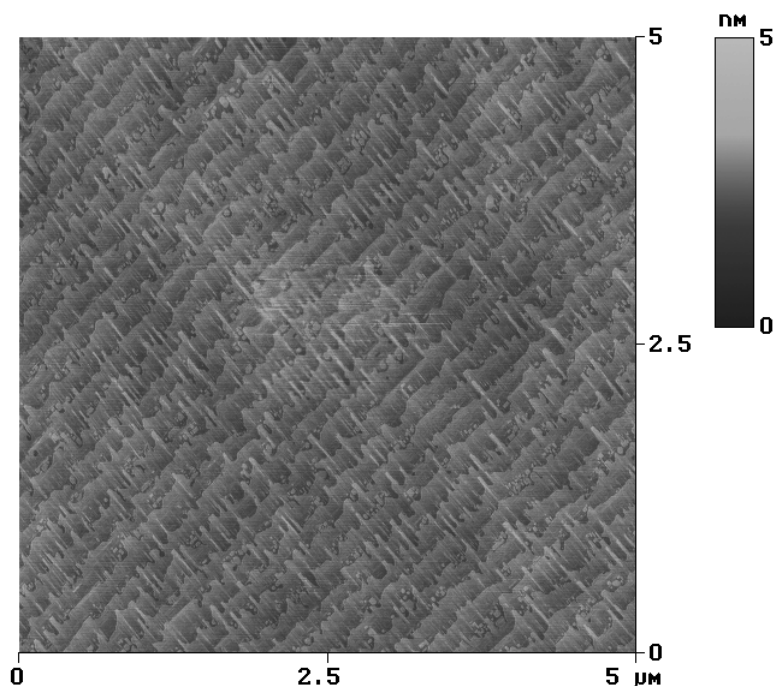


Рис. 1. Пленка $\text{La}_{1.82}\text{Sr}_{0.17}\text{CuO}_4$ (подложка LaSrAlO_4) без дефектов: (плотность дефектов $< 0.001 / \mu\text{м}^2$). Расчетная толщина пленки 20.0 нм. Толщина пленки, полученная по данным рентгеновских измерений 18.86 ± 0.1 нм. На поверхности отчетливо видны ступеньки высотой 0.65 нм (половина высоты ячейки $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$).

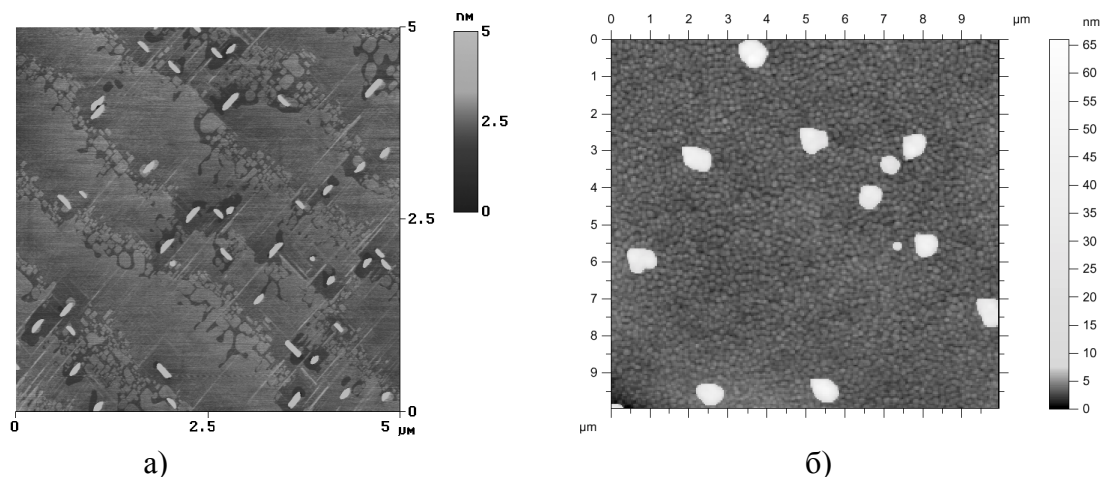


Рис. 2. а) Пленка $\text{La}_{1.79}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ (подложка LaSrAlO_4) с дефектами: (плотность дефектов $1.6 / \mu\text{м}^2$, высота 8.7 ± 3.6 нм, диаметр 110 ± 20 нм). Расчетная толщина пленки 66.5 нм. Толщина пленки, полученная по данным рентгеновских измерений 58.855 ± 0.405 нм; б) Пленка $\text{La}_{1.79}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ (подложка LaSrAlO_4) с дефектами: (плотность дефектов $0.11 / \mu\text{м}^2$, высота 40 ± 12 нм, диаметр 618 ± 140 нм). Расчетная толщина пленки 80.0 нм. Толщина пленки, полученная по данным рентгеновских измерений 75.0 ± 0.68 нм.

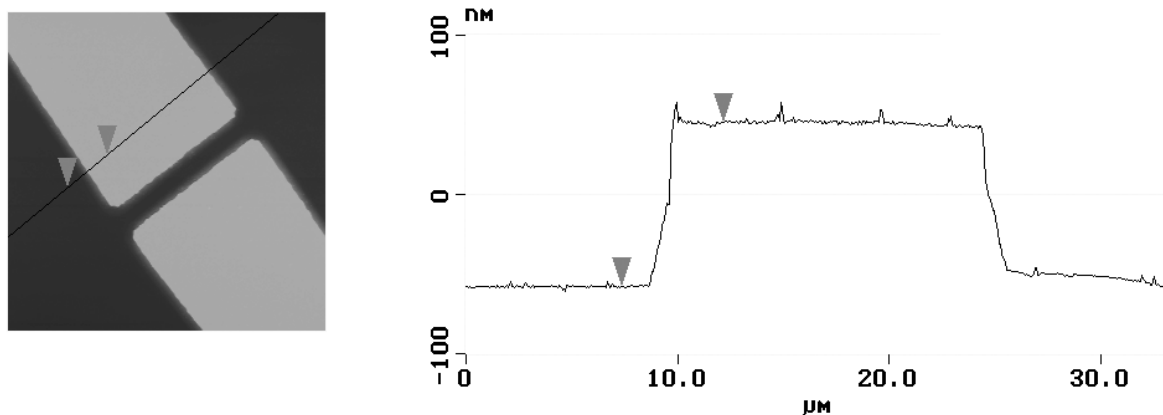


Рис. 3. Полутоновое изображение (вид сверху) и сечение пленки $\text{La}_{1.79}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ (подложка LaSrAlO_4 , расчетная толщина пленки 80.0 нм) после первого литографического процесса. Высота структуры 101 нм. Отчетливо видна граница между протравленной подложкой и пленкой. В итоге толщина пленки составляет 46-48 нм, а поверхность подложки протравлена на 53-55 нм. Угол наклона протравленной подложки 3^0 - 4^0 . Угол наклона протравленной пленки 12^0 - 15^0 .

На втором этапе напыления сначала наносилась пленка барьера (La_2CuO_4) толщиной около 20 нм, а затем 40 нм $\text{La}_{1.75}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$. После заключительного литографического процесса структуры имели вид как показано на Рис. 4. Используя сечения полученной структуры также легко получить толщины соответствующих слоев и углы наклона их краев.

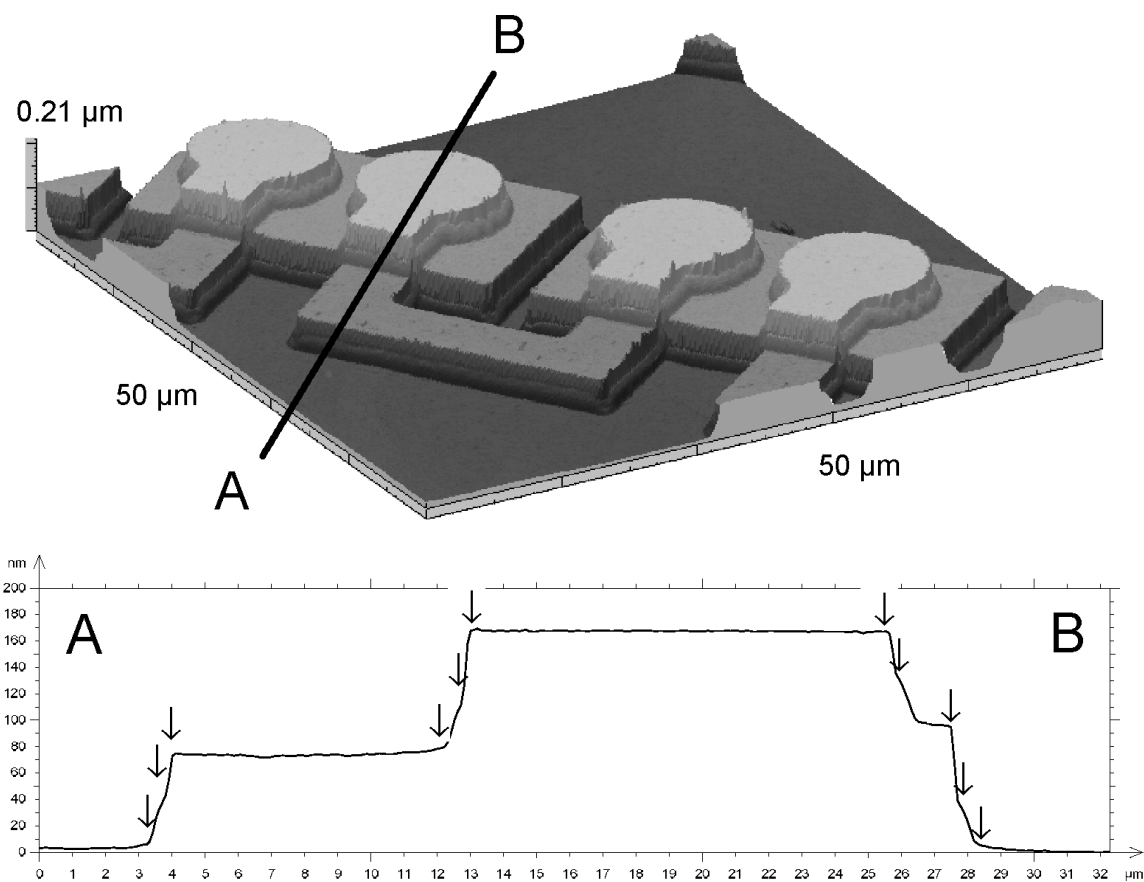


Рис. 4. Трехмерное изображение участка цепочки джозефсоновских переходов и сечение поверхности. На сечении стрелками показаны границы между различными материалами.

Таким образом, показанные результаты свидетельствуют о необходимости использования АСМ на всех этапах технологического процесса производства микроэлектронных структур. Вместе с тем следует отметить определенные ограничения, связанные с использованием АСМ. Так, из-за наличия гистерезиса в пьезоэлектрических элементах (даже при наличии компенсации как в Nanoscope-II) АСМ точность определения латеральных размеров при окне сканирования более 50 мкм составляет несколько процентов, и в этом случае оптическая литография/микроскопия может обеспечить большую точность. Из-за формы зонда исследования краев структур имеет смысл только для небольших углов наклона, поскольку здесь начинают значительно проявляться эффекты, связанные с формой иглы.

Литература

1. D.G.Schlom, J.H.Haeni, J.Lettieri, C.D. Theis, W.Tian, J.C.Jiang, X.Q. Pan Oxide nano-engineering using MBE, *Materials Science and Engineering B*, **87**, 282–291, (2001)
2. U.Schoop, M.Schoenecke, S.Thienhaus, S.Schymon, L.Alff, R.Gross Role of ion beam etching in fabrication of ramp type junctions, *Physica C*, **351**, 200-214 (2001).
3. I.Bozovic, G.Logvenov, I.Belca, B.Narimbetov, I Sveklo Epitaxial strain and superconductivity in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ thin films, *Phys. Rev. Lett.* (2002), accepted for publication