

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО НАПЫЛЕНИЯ БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ КАЧАЮЩЕЙСЯ МИШЕНИ

А.С.КУЗАНЯН, Г.Р.БАДАЛЯН, В.Е.КАРАПЕТЯН, А.М.ГУЛЯН

Институт физических исследований НАН Армении

(Поступила в редакцию 24 мая 1999 г.)

Предложен метод лазерного напыления однородных по толщине большеразмерных тонких пленок. Особенностью метода является программируемое качание мишени вокруг оси, параллельной плоскости подложки, в то время как лазерный луч, фокальное пятно и подложка не передвигаются друг относительно друга. Толщина полученных этим методом пленок  $\text{CuO}$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  изменялась в пределах  $\pm 3,3\%$  на подложках диаметром 100 мм.

Тонкие пленки различных веществ являются составной частью множества устройств, используемых в науке и технике. Среди различных методов получения эпитаксиальных тонких пленок метод лазерного напыления отличается тем, что одновременно обеспечивает высокую скорость напыления, хорошее соответствие между составами мишени и пленки, возможность изменения в широкой области давления газа в камере напыления. Большеразмерные тонкие пленки и многослойные структуры применяются во многих областях микроэлектроники и оптической индустрии. Однако, их получение методом лазерного напыления является сложной задачей, так как различна скорость массопереноса напыляемого вещества на разноудаленные от оси плазменного факела участки подложки. Данное обстоятельство препятствует получению однородных по толщине пленок на подложках диаметром более 20-30 мм обычным методом лазерного напыления. Основные способы лазерного напыления большеразмерных пленок представлены в [1]. В большинстве из них осуществляется взаимное перемещение лазерного луча, мишени и подложки. Среди других решений задачи получения большеразмерных пленок отметим относительно простой метод, использующий для обеспечения однородности толщины пленки экран-маску, расположенную в непосредственной близости от подложки [2]. Предложенный авторами [3] метод основан на известном факте, что ось плазменного факела, возникающего при попадании сфокусированного лазерного луча на мишень, перпендикулярна плоскости мишени в широком интервале углов падения лазерного луча и предполагает использование наклонной вращающейся мишени. Однако эта геометрия включает ряд существенных недостатков, вследствие которых трудно ожидать хорошей однородности толщины пленок, полученных этим методом.

В данной работе предложен метод, в котором ось плазменного факела контролируемо направляется на различные участки подложки, что позволяет добиться хорошей однородности толщины большегабаритных пленок.

### Методика эксперимента

На рис.1 схематически показаны сущность предложенного метода и некоторые его особенности. Луч лазера падает на мишень, которая вращается вокруг оси, перпендикулярной ее плоскости и проходящей через центр мишени  $O$ . Фокальное пятно  $F$  находится на прямой  $AOA'$ , вокруг которой может качаться мишень. Прямая  $AOA'$  параллельна плоскости подложки, которая вращается вокруг оси  $O'E$ . Точка  $O'$  является центром подложки. Когда плоскость мишени параллельна плоскости подложки, перпендикуляр к мишени в точке  $F$ , т.е. ось плазменного факела, пересекает плоскость подложки в точке  $D$ , расположенной на радиусе подложки  $O'B$ . При отклонении мишени от положения параллельности подложке поворотом вокруг оси  $AOA'$ , точка  $D$  перемещается вдоль радиуса  $O'B$  и, в зависимости от угла наклона  $\alpha$ , может занять на радиусе любую позицию.

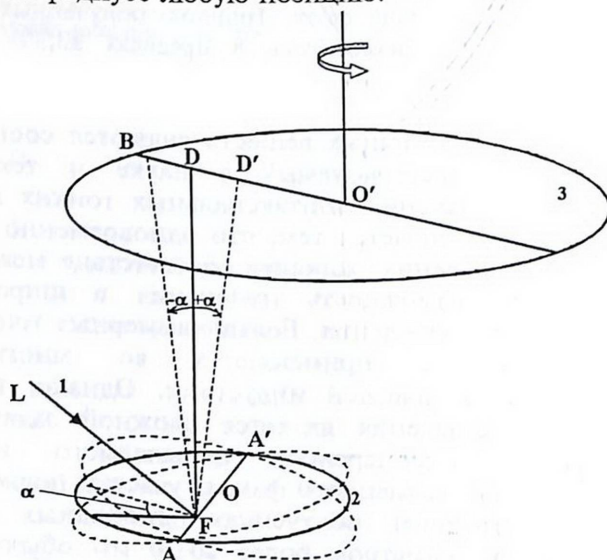


Рис.1. Геометрия метода: 1 — луч лазера, 2 — мишень, 3 — подложка.

Данная геометрия имеет также то преимущество по сравнению с методами, использующими взаимные перемещения лазерного луча, мишени и подложки, что при качании мишени положение фокального пятна относительно подложки не меняется. Это снимает ряд вопросов, которые возникают при нарушении данного условия. Единственным отличием предложенного метода от обычной геометрии лазерного напыления является изменение площади фокального пятна в зависимости от  $\alpha$  и, следовательно, плотности энергии падающего на мишень излучения. При необходимости компенсации данного изменения не составляет труда. Зависимости площади фокального пятна от  $\alpha$  для различных значений диаметра лазерного луча в плоскости мишени или, в данной геометрии, для ширины канавки, возникающей в мишени в процессе напыления, приведены на рис.2.

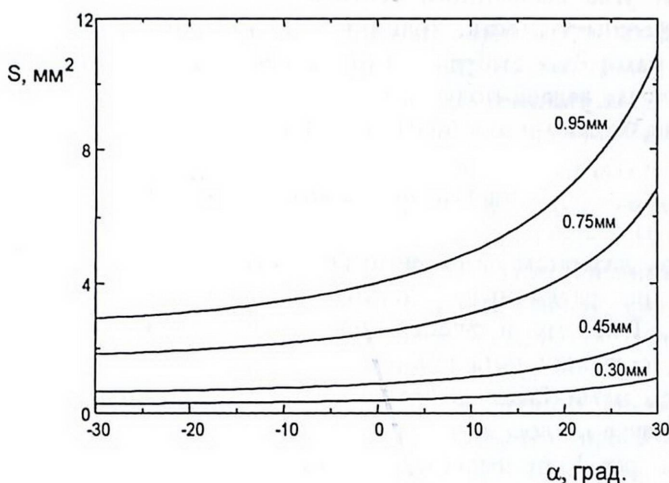


Рис.2. Зависимость площади фокального пятна  $S$  от угла  $\alpha$  для различных диаметров лазерного луча в плоскости мишени.

С целью проверки метода была сконструирована и изготовлена специальная камера с регулируемым расстоянием между мишенью и подложкой, возможностью программируемого изменения угла наклона мишени к подложке, неподвижным нагревателем и вращающимся держателем подложки с возможностью закрепления на нем подложек диаметром до 100 мм.

В качестве источника лазерного излучения был использован YAG:Nd<sup>3+</sup> лазер с модулированной добротностью (пассивный затвор LiF), длиной волны 1.06 мкм, энергией и длительностью импульса 0.1 Дж и 20 нс соответственно. Частота следования импульсов составляла 20 Гц. Первые эксперименты проводились с использованием мишеней CuO. Пленки напылялись на стеклянные подложки диаметром 100 мм в вакууме 0.2 мм рт. ст. Скорость вращения подложки составляла 2 об/мин, мишени – 37 об/мин. В соответствии с рис.1, расстояние мишень-подложка  $FD = 60$  мм,  $O'D = 30$  мм и  $DB = 20$  мм. В данной геометрии точка  $D$  переместится на край подложки (в точку  $B$ ), если мишень наклонить в сторону лазерного луча на угол  $\alpha = -18^\circ$ , и в центр подложки – точку  $O'$ , если  $\alpha = +26^\circ$ . Очевидно, что при изменении  $\alpha$  от  $-18^\circ$  до  $+26^\circ$ , точка пересечения оси плазменного факела с плоскостью подложки перемещается по радиусу подложки и может занять на ней любую позицию.

Полученные пленки тестировались на микрофотометре ИФО-451. Измерялась оптическая плотность пленок и определялось изменение их относительной толщины вдоль диаметра подложки.

Отметим одну особенность лазерного напыления на вращающуюся подложку, обусловленную различной скоростью массопереноса испаренного вещества под различными углами относительно оси факела. Обычно, когда температура синтеза пленки достаточно высока, применяют тепловые экраны, расположенные вблизи подложки. Если напыление ведется через щель в тепловом экране в форме сектора с вершиной, через которую проходит ось вращения подложки, то как толщина пленки, так и ее однородность

зависят от угла выбранного сектора. Чем меньше данный угол, тем больше неоднородность толщины пленки по радиусу подложки. Поэтому нами был выбран сектор с небольшим углом в  $20^\circ$ . Если в данном случае задача получения однородной пленки будет решена, то решение возможно и для больших углов.

### Экспериментальные результаты

При лазерном напылении скорость массопереноса испаренного вещества на различные участки подложки зависит от множества факторов. Поэтому в экспериментах мы старались изменять один параметр, сохраняя остальные неизменными. В качестве переменных параметров нами были выбраны угол наклона мишени  $\alpha$  и диаметр лазерного луча в плоскости мишени  $d$ .

На рис.3 приведены данные по изменению относительной толщины пленок вдоль радиуса подложки для четырех различных процессов напыления. Как видно из рис.3а, для более интенсивного напыления к центру подложки необходимы условия  $\alpha > 0$  и малые значения  $d$ . При больших  $d$  и  $\alpha \geq 18^\circ$  ось плазменного факела не наклоняется к центру подложки. В частности, кривая 1 на рис.3а похожа на кривые зависимости относительной толщины от радиуса подложки для пленок, полученных при  $\alpha = 0$ .

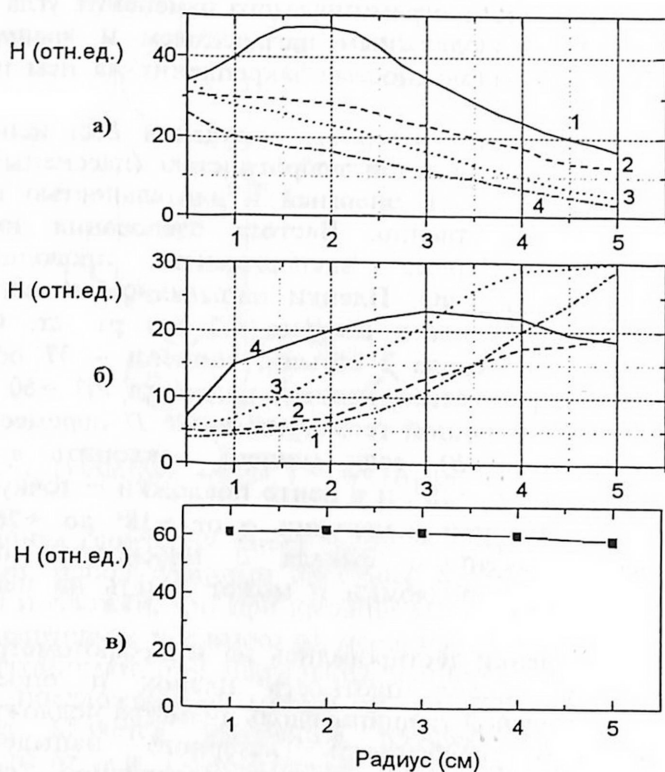


Рис. 3. Зависимость относительной толщины пленки от радиуса подложки: а)  $\alpha = +18^\circ$ , 1 -  $d = 0.8$  мм, 2 -  $d = 0.65$  мм, 3 -  $d = 0.45$  мм, 4 -  $d = 0.3$  мм; б) 1 -  $\alpha = -30^\circ$ ,  $d = 1.05$  мм, 2 -  $\alpha = -24^\circ$ ,  $d = 1.05$  мм; 3 -  $\alpha = -30^\circ$ ,  $d = 0.8$  мм, 4 -  $\alpha = -24^\circ$ ,  $d = 0.65$  мм; в)  $\alpha = -24^\circ$ ,  $d = 1.05$  мм,  $\alpha = +18^\circ$ ,  $d = 0.45$  мм.

На рис.3б представлены данные экспериментов по получению более интенсивного напыления на край подложки. В случае отрицательных  $\alpha$  картина обратная. Лучшие результаты достигаются при больших значениях  $d$ . Как нам кажется, в данном случае ( $\alpha < 0$ ,  $d \geq 0.75 \text{ мм}$ ) происходит сужение плазменного факела, и фактор наклона оси факела к краю подложки превалирует над фактором большей удаленности края подложки от фокального пятна. Из данных, представленных на рис.3а,б, следует, что методом качания мишени можно добиться более интенсивного напыления как на край, так и в центр подложки. Следовательно, суммируя напыления под разными углами, можно добиться однородности толщины пленки. Результат такого напыления представлен на рис.3в. В данном случае разброс толщины не превышал  $\pm 3.3\%$  по всему диаметру пленки. Следует отметить, что указанный результат получен суммированием напылений под двумя определенными углами. В других случаях может возникнуть необходимость несколько более сложных комбинаций углов наклона мишени в процессе напыления однородной пленки.

### Обсуждение

Отметим некоторые факторы, которые необходимо учитывать для обеспечения повторяемости результатов при использовании метода качающейся мишени. Так, на толщину пленки и ее однородность по радиусу влияет загрязнение оптических элементов, через которые проходит лазерный луч, особенно интенсивное при значениях  $\alpha < 0$ . Другим важным фактором является изменяющаяся глубина канавки в мишени при длительных процессах напыления. С увеличением глубины канавки уменьшается интенсивность напыления, а также изменяется радиальное распределение толщины пленки. Следовательно, при одинаковой продолжительности процесса напыления толщина пленки и ее радиальная однородность будут зависеть и от радиуса окружности канавки на мишени.

При попытках корректировки однородности толщины пленок проведением последовательных напылений, используя различные значения  $\alpha$ , нам пришлось столкнуться с очередной сложностью. Оказалось, что, начиная с некоторой толщины, пленки, напыляемые с мишени  $\text{CuO}$ , просветлялись, что препятствовало корректировке однородности их толщины с помощью фотометрирования.

Основным результатом данной работы нужно считать то, что показана возможность получения однородных по толщине пленок на подложках диаметром 100 мм новым методом качающейся мишени. Большинство сложностей, описанных выше, обусловлены характеристиками примененного лазера. Нам кажется, что использование эксимерного луча значительно упростит задачу получения однородных пленок данным методом. Тем не менее, даже применяя лазер  $\text{YAG:Nd}^{3+}$ , нам удалось получить в процессе одного цикла напыления 15 пленок сверхпроводника  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  с хорошими критическими параметрами на подложках YSZ размерами  $12 \times 8 \times 1 \text{ мм}^3$ , расположенных по трем радиусам подложкодержателя. Радиальное изменение толщины пленок, измеренное интерференционным микроскопом МИИ-4, и в данном случае не превышало 3.3%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pulsed Laser Deposition of Thin Films. Edited by D.B.Chrisey and G.K.Hubler, John Wiley and Sons, Inc, NY, 1994.
2. А.Кузаныян, В.Карапетыян, А.Гюламирян, Г.Бадалян. Положительное решение патентного ведомства Республики Армения по заявке №98062 от 20 ноября 1998г.
3. G.Y.Sung, J.D.Suh. Laser deposition apparatus for depositing a large area oxide thin film on a substrate. US patent №580682, 1997.

### ՃՈՃՎՈՂ ԹԻՐԱՆԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ՄԵԾԱՇԱՓ ԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ԼԱՁԵՐԱՅԻՆ ՓՈՇԵՆՍՏԵՑՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՈՐՈՇ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա.Ս.ԿՈՒԶԱՆՅԱՆ, Գ.Ռ.ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Վ.Ե.ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա.Մ.ԳՈՒԼՅԱՆ

Առաջարկված է համասեռ հաստոթյան մեծաչափ բարակ քաղանքների լազերային փռչեցնելու մեթոդ: Մեթոդի առանձնահատկությունը կայանում է նրանում, որ քիլավոր ծրագրավորված ճռվում է տակդիրի հարթությանը զուգահեռ առանցքի շուրջը, այն դեպքում, երբ լազերային փունջը, կիզակետը և տակդիրը իրար նկատմամբ չեն տեղափոխվում: Այդ մեթոդով ստացված  $\text{CuO}$  և  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$  քաղանքների հաստությունը 100 մմ տրամագծով տակդիրների վրա փռվելով է  $\pm 3.3\%$  սահմաններում:

### SOME PECULIARITIES OF LASER DEPOSITION OF LARGE AREA FILMS WITH THE TILTING TARGET METHOD

A.S.KUZANYAN, G.R.BADALYAN, V.E.KARAPETYAN, A.M.GULIAN

A method of laser deposition of large area uniform thin films is proposed. The peculiarity of this method is the programmed tilting of the target around the axis parallel to the substrate plane, while the laser beam, the focal spot, and the substrate do not change their positions with respect to each other. The thickness uniformity of  $\text{CuO}$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$  films obtained with this method was changed within the limits of 3.3% on 100 mm-diameter substrates.