

Лазерное напыление большеразмерных тонких пленок

А.С.Кузаян, В.А.Петросян, С.Х.Пилосян, В.М.Нестеров

Предложен новый метод получения большеразмерных, одинаковых по толщине тонких пленок на вращающейся подложке. Его отличительными особенностями являются расположение диафрагмы, пропускающей часть испаренного материала, между мишенью и подложкой, а также движение вращающейся подложки относительно мишени с определенной скоростью. Метод позволяет получать одинаковые по толщине тонкие пленки на подложках, размеры которых ограничены только размерами напылительной камеры. Экспериментальная проверка метода проводилась путем напыления тонких пленок SiO на кремниевые подложки, расположенные по радиусу диска диаметром 300 мм. Отклонение толщины пленки от среднего значения не превышало $\pm 3\%$ по всему радиусу диска, что подтверждает несомненную перспективность применения предложенного метода в микроэлектронике, оптической промышленности и в других современных технологиях.

Ключевые слова: импульсное лазерное напыление, большеразмерные пленки, одинаковая толщина.

1. Введение

Метод импульсного лазерного напыления (ИЛН) используется для получения тонких пленок металлов, оксидов, полимеров, биосовместимых и других материалов. Он одновременно обеспечивает высокую скорость напыления, хорошее соответствие между составами мишени и пленки, возможность изменения давления в камере напыления в широких пределах и позволяет получать эпитаксиальные монокристаллические, поликристаллические и аморфные ультратонкие пленки, гетероструктуры и нанокристаллические покрытия [1–3]. Особенно хорошо метод ИЛН зарекомендовал себя при получении пленок многокомпонентных соединений, которые трудно синтезировать другими методами. В частности, этим методом были синтезированы первые пленки высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Метод ИЛН прост в применении, поэтому широко используется в исследовательских лабораториях. Однако он может применяться и в прикладных задачах, в частности для получения большеразмерных пленок.

Получение одинаковых по толщине пленок на подложках большого диаметра необходимо для многих практических применений в микроэлектронике, оптической промышленности и в других современных технологиях. Широкому использованию метода ИЛН для получения большеразмерных пленок препятствует то обстоятельство, что угловое распределение скорости массопереноса в плазменном факеле, созданном лазерным излучением, не одинаково. Поэтому обычным методом лазерного на-

пыления невозможно получить одинаковые по толщине пленки на подложках диаметром более 30 мм. В данной работе мы приводим некоторые из имеющихся подходов к решению этой проблемы и предлагаем новый метод получения одинаковых по толщине тонких пленок на подложках, размеры которых ограничены только размерами напылительной камеры.

В основе всех способов ИЛН большеразмерных пленок лежит тот факт, что угловое распределение скорости массопереноса в плазменном факеле задается функцией $F(\theta) = A \cos^m \theta$ [1], где θ – угол отклонения от перпендикуляра к плоскости мишени. При этом ось плазменного факела, т. е. направление максимальной скорости массопереноса, перпендикулярна поверхности мишени в широком диапазоне изменения угла падения лазерного пучка на мишень. Зная угловое распределение скорости массопереноса испаренного из мишени вещества, можно манипулировать взаимным расположением и перемещением мишени и подложки так, чтобы в конечном итоге до каждого участка подложки в единицу времени доходило одинаковое количество испаренного вещества и пленка получалась одинаковой толщины на всей поверхности подложки.

2. Способы напыления большеразмерных пленок

Рассмотрим кратко основные известные способы напыления большеразмерных пленок. Согласно одному из них лазерный пучок падает на вращающуюся мишень, перед которой параллельно ей расположена вращающаяся подложка [1]. Ось подложки смещена относительно оси плазменного факела на некоторое расстояние d (рис.1,а). Это расстояние определяется шириной промежутка между мишенью и подложкой, диаметром подложки и угловым распределением частиц испаряемого вещества в плазменном факеле. Таким образом, на край подложки, где нужно покрыть пленкой большую пло-

А.С.Кузаян, В.А.Петросян. Институт физических исследований НАН Армении, Армения, 0203 Аштарак; e-mail: akuzan@ipr.sci.am
С.Х.Пилосян, В.М.Нестеров. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: nesterovvm@mail.ru

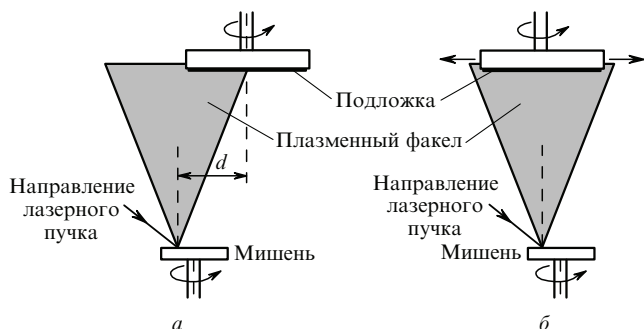


Рис.1. Схемы основных способов напыления большеразмерных пленок: «внеосевого» напыления (а) и напыления на вращающуюся и одновременно горизонтально перемещающуюся подложку (б).

щадь, попадает часть плазменного факела с большей скоростью массопереноса испаренного вещества, что и выравнивает толщину напыляемой пленки.

Модификацией данного способа является способ, схема которого показана на рис.1,б. Здесь подложка одновременно вращается и перемещается в горизонтальной плоскости. Компьютер регулирует скорость горизонтального перемещения подложки так, что ось плазменного факела оказывается направленной на край подложки дольше, чем в центр.

Недостатком первого способа (рис.1,а) является пространственное ограничение абляционного плазменного факела. Подложки, диаметр которых больше некоторых предельных размеров, не перекрываются полностью областью плазменного факела, где скорость массопереноса испаренного вещества значительна. Если для компенсации этого ограничения установить подложку на большем расстоянии от мишени, то чем дальше будет находиться подложка, тем меньше будет скорость напыления. Кроме того, сохранение стехиометрии пленок сложных соединений возможно лишь при изменении расстояния от мишени до подложки в определенном интервале.

Недостатком второго способа (рис.1,б) является необходимость предварительного исследования углового распределения скорости массопереноса в плазменном факеле в конкретных геометрии и условиях напыления. В свою очередь, угловое распределение скорости массопереноса может изменяться в течение процесса напыления, т. к. оно зависит от нескольких параметров, которые также могут изменяться при длительном напылении [1, 4].

Существует множество модификаций описанных выше способов. Мы предложили два относительно простых и дешевых способа ИЛН пленок диаметром до 150 мм – «маска» и «качающаяся мишень» [5–8]. Геометрия способа «маска» [6, 7] показана на рис.2. Лазерный пучок, падая на вращающуюся мишень, формирует плазменный факел, как и в обычном методе ИЛН. До того как достигнуть подложки, вращающейся вокруг вертикальной оси, испаренное вещество должно пройти через щель особой конфигурации в маске, расположенной в непосредственной близости от подложки.

В работах [5–7] рассмотрены различные конфигурации щелей в маске, обеспечивающие получение одинаковых по толщине пленок. По данным углового распределения массопереноса вещества в плазменном факеле рассчитаны точные размеры щелей в масках.

Особенностью способа «качающаяся мишень» является программируемое качание мишени вокруг оси, параллельной плоскости подложки, в то время как лазер-

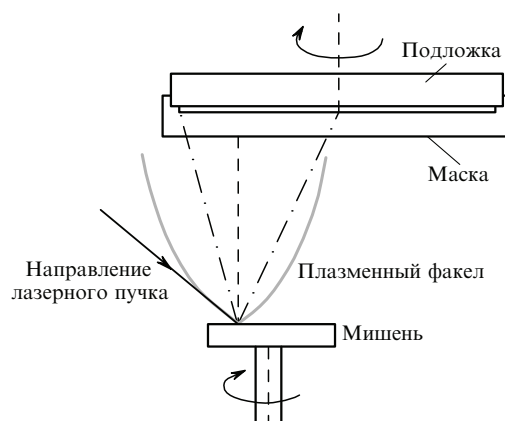


Рис.2. Геометрия способа «маска».

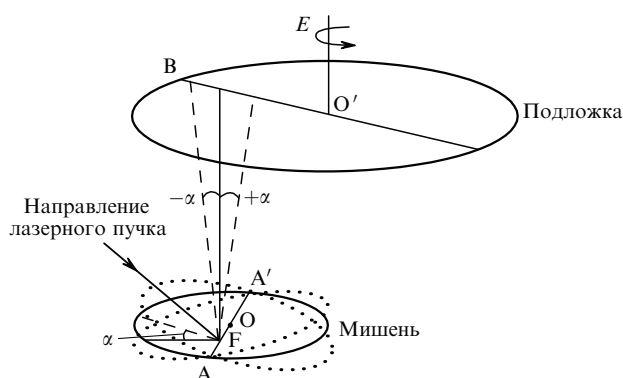


Рис.3. Геометрия способа «качающаяся мишень».

ный пучок, фокальное пятно и подложка не смещаются относительно друг друга [8]. Как показано на рис.3, лазерный пучок падает на мишень, которая качается вокруг оси AA' , проходящей через центр мишени (точка O). Это позволяет сканировать ось плазменного факела по подложке вдоль ее радиуса. Подложка вращается вокруг оси E . Направление распространения лазерного пучка перпендикулярно оси AA' . Контроль времени, в течение которого мишень остается в данном наклонном положении, позволяет регулировать количество материала, напыленного на каждый конкретный участок вдоль радиуса подложки $O'B$.

Последние достижения в области получения большеразмерных пленок методом ИЛН описаны в [9]. Основным способом, как и раньше [1], остается растривание с большой мишени.

Обобщая описанные выше методы, можно констатировать, что ни один из них не позволяет получать большеразмерные пленки, размеры которых ограничены только размерами напылительной камеры. Для решения этой задачи мы предлагаем новый способ ИЛН.

3. Способ напыления тонких пленок произвольного размера

На рис.4 схематически представлена геометрия способа напыления большеразмерных, одинаковых по толщине тонких пленок, размеры которых ограничены только размерами камеры напыления [10].

Лазерный пучок падает на вращающуюся мишень, находящуюся в вакуумной камере. Диффрагма с выре-

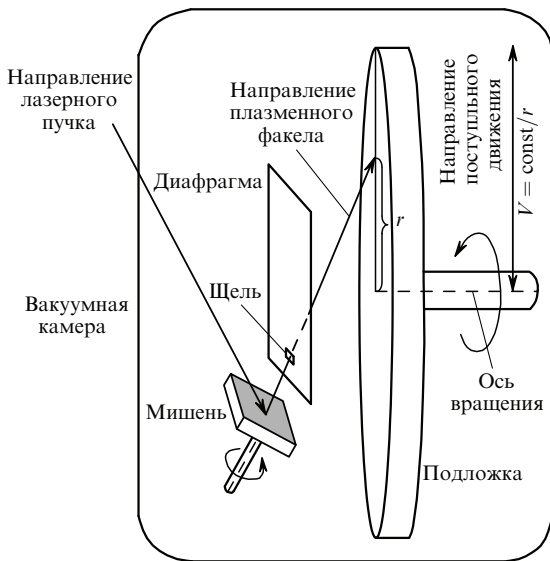


Рис.4. Схема нового метода напыления тонких пленок произвольных размеров.

занной щелью, располагается на пути испаренного вещества между мишенью и подложкой и выделяет область плазменного факела, в которой скорость массопереноса испаренного вещества максимальна и одинакова. Именно эта часть плазменного факела попадает на равномерно вращающуюся подложку. Из рис.4 видно, что подложка поступательно перемещается относительно мишени. Очевидно, что в данной геометрии перемещение подложки может быть заменено совместным перемещением мишени и диафрагмы.

Для получения одинаковой по толщине пленки на всей поверхности подложки необходимо определить, по какому закону должна перемещаться подложка. На рис.5 показаны зависимости толщины пленки h от расстояния r от центра подложки до ее участка, на который в данный момент времени попадает испаренное вещество, рассчитанные для разных законов изменения скорости перемещения подложки V . Видно, что пленки получаются одинаковыми по толщине при $V = \text{const}/r$. Это означает, что поток испаренного вещества мишени попадает на участки подложки с меньшими r в течение более короткого времени, чем на участки с большими r (где необхо-

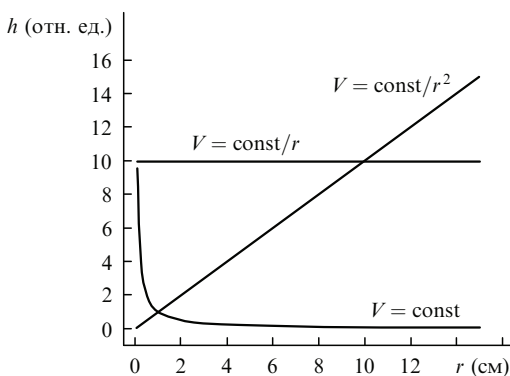


Рис.5. Расчетные зависимости толщины пленок h от расстояния r от центра подложки до ее участка, на который в данный момент времени попадает испаренное вещество, для различных законов изменения скорости перемещения подложки.

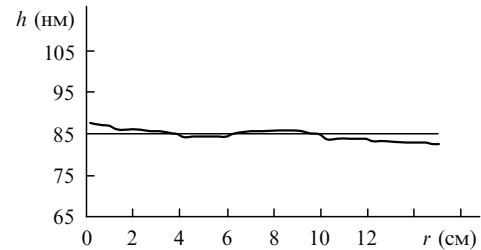


Рис.6. Профиль поверхности пленки CuO, напыленной при перемещении подложки со скоростью $V = \text{const}/r$.

димо покрыть пленкой большие площади).

Результаты расчетов были проверены экспериментально путем напыления тонких пленок CuO на кремневые подложки длиной 30 мм, расположенные по радиусу диска диаметром 300 мм. Скорость вращения мишени составляла 37 об./мин, а подложки – 2 об./мин. Напыление проводилось с помощью излучения третьей гармоники лазера на YAG: Nd³⁺ ($\lambda = 355$ нм) со следующими характеристиками: энергия в импульсе 15 мДж, длительность импульса 10 нс, частота следования 20 Гц. Углы между плоскостью мишени, осью лазерного пучка и плоскостью диафрагмы были выбраны такими, чтобы диафрагма выделяла из плазменного факела пучок, перпендикулярный мишени. При любых изменениях параметров напыления в течение длительного процесса в выбранной геометрии скорость массопереноса вещества мишени к подложке будет максимальной, а время напыления пленки заданной толщины – минимальным.

Определенный профилометром AMBIOS XP-1 профиль поверхности пленки CuO, напыленной при перемещении подложки со скоростью $V = \text{const}/r$, показан на рис.6. Пленка имела среднюю толщину 85 нм. Отклонение ее толщины от среднего значения не превышало $\pm 3\%$ по всей поверхности подложки.

Благодаря поступательному движению подложки, особому взаимному расположению мишени, подложки и лазерного пучка, а также использованию диафрагмы, предложенный метод не имеет ограничений, накладываемых на размеры пленок, и позволяет напылять их на подложки произвольного диаметра.

4. Способ напыления пленок очень больших размеров

Для уменьшения времени получения пленок на подложках очень больших размеров можно модифицировать описанный выше способ следующим образом: использовать несколько мишеней вместо одной и сканировать лазерным пучком по ним, применяя для напыления поочередно каждую мишень. Если увеличить частоту следования лазерных импульсов в соответствии с числом мишеней, то с каждой мишени напыление будет проводиться с той же частотой, что и в случае одной мишени. Каждая мишень должна иметь собственную диафрагму, перемещающуюся одновременно с мишенью со скоростью $V = \text{const}/r$.

Предположим, что для напыления пленки на подложку радиусом R мы хотим использовать n мишеней. Очевидно, что надо расположить мишени относительно друг друга и подложки так, чтобы, одновременно начав напыление с каждой мишени и перемещая ее со скоростью $V = \text{const}/r$, покрыть пленкой всю подложку и закончить

напыление со всех мишеней одновременно. Можно показать, что для напыления на подложку радиусом R одинаковой по толщине пленки n мишеней должны быть расположены первоначально таким образом, чтобы расстояние от центра подложки до точки пересечения с плоскостью подложки перпендикуляра, опущенного из l -й мишени, было равно $R\sqrt{l-1}/\sqrt{n}$.

Использование n мишеней приведет к уменьшению времени напыления пленки заданной толщины в n раз.

5. Заключение

Предложен новый способ ИЛН большегабаритных, одинаковых по толщине пленок. Его главной особенностью является возможность получения тонких пленок на теоретически бесконечных подложках. Это достигается путем поступательного перемещения подложки относительно мишени в определенном скоростном режиме и выделения из плазменного факела участка с максимальной и одинаковой скоростью массопереноса напыляемого материала. Хотя последнее обстоятельство несколько снижает эффективность напыления, оно позволяет сделать этот процесс более контролируемым и менее зависящим от возможного в течение длительного процесса изменения параметров напыления. Время напыления можно уменьшить за счет использования нескольких мишеней.

Предложенный способ интересен своей новизной и простотой. Есть надежда, что наряду с другими последними разработками в области лазерного напыления тонких пленок он будет все более широко использоваться в различных новых направлениях развития высоких технологий.

Авторы выражают глубокую благодарность А.З.Грасюку за полезные обсуждения и внимание к работе.

1. Chrisey D., Hubler G., in *Pulsed Laser Deposition of Thin Films* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994, p. 294).
2. Гапонов С.В., Лускин Б.М., Салашенко Н.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **33**, 533 (1981).
3. Кононенко Т.В., Конов В.И., Лубнин Е.Н., Даусингер Ф. *Квантовая электроника*, **33**, 189 (2003).
4. Kuzanyan A., Badalyan G., Nikoghosyan V., Harutyunyan S. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11**, 3859 (2001).
5. Kuzanyan A., Badalyan G., Karapetyan V., Gyulamiryan A., Gulian A. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11**, 3852 (2001).
6. Кузаян А., Карапетян В., Гюламирян А., Бадалян Г. Патент Армении № 692. Приоритет от 22.09.1998.
7. Кузаян А., Карапетян В., Гюламирян А., Бадалян Г. Патент Армении № 963. Приоритет от 20.01.2000.
8. Кузаян А., Карапетян В., Гулян А., Бадалян Г. Патент Армении № 962. Приоритет от 20.01.2000.
9. Eason R., in *Pulsed Laser Deposition of Thin Film* (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007, p. 191).
10. Петросян В., Кузаян А. Патент Армении № 2048. Приоритет от 17.12.2007.