

2. Зеленский, В.А. Способ, математическая модель и алгоритм управления технологическим процессом сепарации нефти /В.А.Зеленский, А.И.Щодро //Вестник Самарского государственного технического университета. – 2016. – Серия «Технические науки», № 3(51). – С. 21–28.

УДК 621.793.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРИТЕЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.В. Стариков, В.А. Колпаков, С. В. Кричевский, В. В. Подлипов
Самарский университет, г. Самара

Испарители резистивного типа широко применяются в технологических процессах микро- и нанoeлектроники, нанofотоники для формирования тонкопленочных элементов из многокомпонентных материалов [1,2].

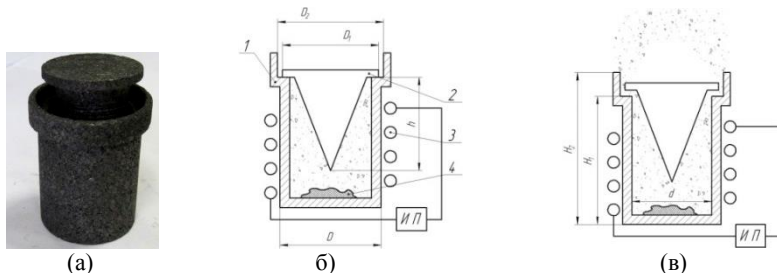
Качество данных пленочных элементов, получаемых резистивным испарением, в значительной мере зависит от конструкции испарителей и свойств испаряемого вещества (гранулы, порошок, проволока), требуемой скорости испарения и рядом других факторов [3, 4]. Анализ конструкций испарителей применяемых в производстве позволяет их разделить на четыре основные группы: поверхностные, тигельные открытого типа, тигельные квазизамкнутого типа и тигельные замкнутого типа дискретного действия [5]. Данное деление обусловлено влиянием их конструктивных элементов на параметры потока испаряемых атомов, а именно, диаграмма направленности и интенсивность потока молекул в ее максимуме. Однако указанные испарители имеют следующие недостатки: непроизводительные потери испаряемого вещества и загрязнение ими вакуумной камеры (пар из испарителя выходит и в то время, когда осаждение пленки не производится) [6]; низкая производительность пленочных элементов, получаемых при одной загрузке испаряемого вещества в испаритель [7]; небольшие скорости осаждения [7]; необходимость автономного использования нескольких испарителей одновременно, так как происходит изменение исходного соотношения компонентов при испарении веществ с разной температурой испарения [8].

Данные недостатки отсутствуют в замкнутых испарителях дискретного действия [9], имеющих затвор. В них молекулы испаряемого вещества выходят только при открытом затворе, т.е. испаряемый материал расходуется только в процессе непосредственного осаждения пленки на подложку. Конструктивный элемент в виде затвора осуществляет точную дозировку количества пара, исходящего из камеры испарителя и с помощью серии импульсов с заданной длительностью и скважностью и позволяет получать пленку необходимой толщины [10].

Однако возникает задача автоматизации движения затвора, которая в условиях вакуума требует применения сложных конструктивных решений и специальных автоматизированных средств управления данным процессом. Все это значительно усложняет эксплуатацию указанных испарителей.

В работе [11] приведено конструктивное решение, упрощающее как конструкцию затвора, так и процесс управления. А именно, предложена конструкция резистивного динамического испарителя с квазизамкнутым объемом, разгерметизация и герметизация которого осуществлялась соответственно давлением пара и силами тяготения. Однако и такой испаритель обладает существенным недостатком. Его сущность состоит в наличии полужамкнутой области, в которой при испарении многокомпонентных материалов идет накопление атомов легколетучих компонентов, при этом обедняется ими направленный поток атомов, из которых формируется тонкая пленка. Поэтому в результате нарушается стехиометрия состава многокомпонентной пленочных элементов, т.е. снижается их качество. Таким образом, актуальна задача разработки конструкции испарителя свободного от перечисленных выше недостатков.

В настоящей работе был изготовлен и исследован резистивный динамический испаритель многокомпонентных материалов, выполненный из пиролитического графита (см. рис. 1). Пиролитический графит обладает минимальным давлением насыщенного пара при рабочей температуре, высокой химической инертностью и хорошей обрабатываемостью [12].



а – внешний вид без нагревателя; **б, в** – схема испарителя в состоянии, когда заслонка закрыта (**б**) и в состоянии, когда заслонка открыта (**в**). 1 – полый корпус; 2 – заслонка; 3 – проволочный нагреватель; 4 – испаряемый материал; ИП – источник питания

Рисунок 1 - Резистивный динамический испаритель многокомпонентных материалов

Конструкция испарителя содержит: полый корпус 1 (рис. 1б, 1в), имеющий форму стакана диаметром $D = 22$ мм и высотой $H_2 = 26$ мм в который загружается испаряемый материал 4; на внешней поверхности корпуса намотан проволочный вольфрамовый нагреватель 3; заслонка 2 осуществляет герметизацию полости корпуса, соосно входя в полость корпуса 1. Кроме того, в верхней части стакана выполнен уступ диаметром

$D_2 = 24$ мм, а на заслонке имеется кольцеобразный выступ диаметром $D_1 = 22$ мм, который при ее опускании герметизирует полость корпуса.

Особенностью конструкции заслонки является то, что ее нижняя часть выполнена в виде конуса. Высота последнего должна удовлетворять условию $0.9H_1 \geq h \geq d$, где H_1 – высота внутренней полости корпуса, равная 24 мм, h – высота конусной части заслонки, d – внутренний размер полости корпуса, равный 19 мм. Это необходимо для устранения взаимодействия вершины конусной части заслонки с поверхностью испаряемого материала.

Выполнение конуса с высотой менее d приводит к перекоосу заслонки, разгерметизации полости корпуса и прекращению возвратно-поступательного движения заслонки. Выступ, выполненный в верхней части стакана не дает заслонке смещаться в моменты ее поднятия.

При включении нагревателя в полости корпуса температура повышается до равной или большей температуры испарения материала сложного состава, и, в первую очередь начинают испаряться легколетучие компоненты. Однако герметизация полости корпуса не позволяет им выходить за ее пределы. Это дает возможность насытить пространство полости атомами с большей температурой испарения, вследствие чего в объеме полости устанавливается равновесное состояние, соответствующее стехиометрической формуле испаряемого материала.

При соответствующей температуре сила давления паров испаряемого материала начинает превышать силу прижима заслонки к торцевой поверхности корпуса, что приводит к его разгерметизации (рис. 1в). Пары испаряемого материала выходят из кольцеобразного зазора, равного $D_2 - D_1$, и образуют поток атомов, направленных к поверхности подложки. Кольцеобразная форма потока за пределами испарителя устраняется тепловым движением и непосредственно в области поверхности подложки образуется поток атомов с равномерным распределением их плотности по его сечению.

Истечение потока атомов снижает величину давления в полости испарителя до давления, при котором сила давления паров испаряемого материала становится меньше силы прижима заслонки к торцевой поверхности корпуса. Поэтому заслонка закрывается, прерывая истечение атомов испаряемого материала. Далее процесс циклически повторяется. Во внутреннюю полость испарителя загружается испаряемый материал в количестве достаточном для осуществления необходимого числа циклов испарения для изготовления пленки требуемой толщины. Затем в резистивный динамический испаритель загрузка повторяется многократно, столько сколько требуется для изготовления необходимого количества пленочных элементов.

С помощью предлагаемого испарителя были сформированы тонкие пленки теллурида кадмия ($CdTe$) на поверхности диоксида кремния (SiO_2). Напыление осуществлялось из исследуемого испарителя, установленного в рабочей камере вакуумной установки УВН-2М-1. Перед напылением подложки диоксида кремния проходили процедуру очистки в плазме [13].

В полый корпус 1 испарителя (см. рис 1) загружались кристаллы химически чистого теллурида кадмия массой 2 г. Рабочая камера откачивалась до остаточного давления $1,5 \cdot 10^{-6}$ Торр. Температура подложки поддерживалась на уровне 200°C и контролировалась прецизионной термопарой хромель–копель. На спираль испарителя 3 от источника питания подавалось напряжение $U = 5$ В, ток в ее цепи $I = 80$ А (мощность 400 Вт). Время испарения CdTe продолжался 5 мин. Температура корпуса испарителя определялась с помощью инфракрасного пирометра СЕМ DT-8865. Полученные пленки исследовались методами сканирующей профилометрии, растровой электронной микроскопии (р.э.м.) и сканирующей зондовой микроскопии (с.з.м.).

Полученные пленки CdTe представлены на рис. 2а, их анализ показывает, что они имеют зернистую поликристаллическую структуру высокой плотности с отсутствующими порами и микрокаплями испаряемого вещества, характерными для пленок, формируемых с использованием традиционных методов резистивного испарения в вакууме (см. рис. 2б, 2в). При этом толщина пленки, измеренная на с.з.м. Solver Pro в контактном режиме, составила 150 нм, а средний размер зерен такой пленки, измеренный с помощью р.э.м. Carl Zeiss Supra 25, составил 35–40 нм.

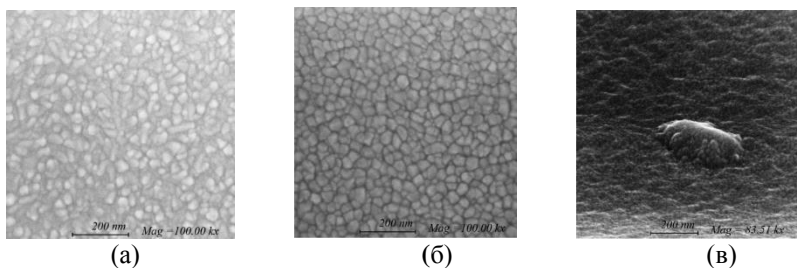


Рисунок 2 - Р.э.м.-изображения поверхностей пленок CdTe, сформированных с помощью предложенного испарителя (а, толщина пленки 150 нм) и испарителя с открытым тиглем (б, в, толщина пленки 170 нм, б – изображение поверхности пленки без наклона подложки, в – изображение поверхности пленки, выполненное под углом 60° к ее нормали

Среднеарифметическое отклонение профиля, характеризующее шероховатость поверхности отмеченной пленки, определенное стилусным профилометром KLA Tencor-P6, составило $r_a = 10\text{--}20$ нм, что соответствует наивысшему оптическому классу чистоты 14 согласно ГОСТ 2789-73 и классу чистоты для оптических деталей 0-10 согласно ГОСТ 11141-84.

Таким образом, представленные в данной работе результаты свидетельствуют о целесообразности применения разработанного резистивного динамического испарителя для формирования тонких пленок многокомпонентных материалов.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-5205.2016.9 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00494 А, №16-47-630459).

Список использованных источников

1. Барыбин А., Томилин В., Шаповалов В. Физико-технологические основы макро-, микро–и нанoeлектроники. М.: ЛитРес, 2015, С.713.
2. Soifer V.A. // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2014. Т. 84. №. 1. С. 9. DOI: 10.1134/S1019331614010067
3. Байдуллаева А., Борщ В.В., Велешук В.П., Власенко А.И., Даулетмуратов Б.К., Левицкий С.Н., Мозоль П.Е. //Технология и конструирование в электронной аппаратуре. Политехпериодика, Одесса, Украина, 2007. С.40-434. Грицюк, Б. Н., Ляхов, А. А., Мельничук, С. В., Стребежев, В. Н. // Журн. техн. физики. 2001. Т. 71. № 9. С. 54.
4. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. С. 266–271, 274–276.
5. Головяшкин А.Н., Лежнев Д.В. //Технология и конструирование в электронной аппаратуре. Политехпериодика, Одесса, Украина, 2001. С. 42-44.
6. Пичугин В.Ф. Пичугин ВФ Материаловедение поверхности и тонких пленок. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 8. Богдан Г.И., Некрасов М.М. Пленочная электроника и полупроводниковые интегральные схемы. Киев: Вища школа, 1979. С. 48–49.
7. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика. СПб.: Политехника, 2004.
8. Данилин Б.С. Вакуумная техника в производстве интегральных микросхем. М.: Энергия, 1972.
9. Bicht, Craig. U.S. Patent Application No. 11/359,056.
10. Волков А. В., Казанский Н. Л., Моисеев О. Ю. // Компьютерная оптика. 2002. № 24. С. 74-77.
11. Кострицкий А.И., Карпов В.Ф., Кабанченко М.П. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. М.: АН СССР, 1991.
12. Казанский Н. Л., Колпаков В. А. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда. М.: Радио и связь, 2009.

УДК 53.083

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ИМИТАТОРА ТЕПЛОВОГО ОБЪЕКТА

А.С. Перцович, Д.М. Живоносная, А.В. Раев
Самарский университет, г. Самара

Создание бортовых комплексов обороны (БКО) летательных аппаратов требует разработки оборудования для обеспечения испытаний оптико-электронных систем (ОЭС) БКО летательных аппаратов.[1]

Каждый тепловой объект обладает своей сигнатурой(*средневековое лат. signatura - знак, от лат. signo - указываю, обозначаю*). Под