

## Проблемы формирования толстых слоев олова методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени

© М.В. Макарова, К.М. Моисеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Впервые реализован и исследован процесс осаждения толстопленочного оловянного покрытия методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени. Описана физика этого метода осаждения для пленок различных материалов и проанализированы этапы и особенности технологического процесса осаждения оловянных покрытий. Проведен анализ возникших технологических проблем, таких как повышенное тепловое воздействие на подложку в процессе осаждения, нестабильный переход процесса после плавления мишени в режим самораспыления, пониженные скорости осаждения при работе с расплавленным оловом, не перешедшим в режим самораспыления. Предложены пути решения перечисленных проблем, в результате реализации которых отработан стабильный процесс нанесения оловянных покрытий с высокими скоростями осаждения порядка 9 мкм/мин. Выполнена оценка качества образцов оловянного покрытия, осажденного на керамические подложки из нитрида алюминия, полученных при различных процессах осаждения.*

**Ключевые слова:** жидкофазный магнетрон, олово, толстопленочное покрытие, вакуумное осаждение, ионное распыление, пары мишени

**Введение.** Одним из важных технологических этапов при сборке электронного изделия является нанесение припоя, чаще всего изготовленного на основе олова. В настоящее время в некоторых изделиях, например электровакуумных приборах, термоэлектрических (ТЭ) модулях, используется ручная пайка, которая не обеспечивает высокую точность сборки, что не позволяет улучшать выходные параметры приборов, а также применять автоматизацию процесса сборки. Так, для сборки термоэлектрических модулей необходима хорошая воспроизводимость толщины слоев припоя, которая варьируется от 5 до 15 мкм. Неравномерность, в свою очередь, не должна превышать  $\pm 5\%$ . В случае превышения этого допуска возникает сложность с обеспечением заданной параллельности противоположных стенок модуля, а также появляется высокая вероятность образования локальных зон неприпоя ТЭ-ветвей.

Нанесение подобного припойного слоя с высокой равномерностью необходимо при соединении и герметизации электровакуумных приборов для достижения вакуумной герметичности, при этом размеры паяемых изделий могут быть различными [1].

Одним из путей повышения точности сборки является автоматизация всех или некоторых операций, в том числе и нанесения припоя. На сегодняшний день припой в автоматизированных установках наносится методом трафаретной печати специальными дозаторами. Кроме того, нанесение припойного слоя олова возможно осаждением методом магнетронного распыления или гальваническим осаждением [2]. Метод трафаретной печати подразумевает спекание припойной пасты в печи при высоких температурах, что делает его неприменимым в случае, если изделие с нанесенным припоем нельзя нагревать [3]. При дозировании припоя его можно наносить лишь на малые площади, что является ограничением данного метода, если требуется нанести сплошной слой припоя на большую площадь с высокой равномерностью. При гальваническом осаждении слоя олова неравномерность получаемого покрытия слишком велика [4]. Использование классического метода магнетронного распыления обеспечивает заданную равномерность покрытия и воспроизводимость толщин осаждаемых пленок, но сам процесс является непроизводительным, так как толщина припойного слоя составляет от 10 до 25 мкм.

Возможным решением для реализации вакуумной технологии нанесения припойного слоя является метод ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени, или жидкофазного магнетронного распыления (ЖФМР), используемый для осаждения толстых пленок в вакууме. Этот метод отличается высокими скоростями осаждения, составляющими десятки микрометров в минуту. Благодаря проведению процесса в высоком вакууме достигается высокая чистота получаемых пленок. При этом из-за наличия ионизированной фазы имеем отличные показатели адгезии [5].

В настоящее время данный метод, как правило, применяется при осаждении толстых пленок меди для различных изделий микроэлектроники и силовой электроники. За счет применения этого метода достигается высокая производительность и качество осаждаемых слоев, а сам метод достаточно прост в реализации [5–7].

Анализ физики процесса показывает, что метод ЖФМР может быть использован для получения толстых пленок широкого спектра проводящих материалов с высокими скоростями и малой неравномерностью покрытия. Однако в открытых литературных источниках отсутствуют работы, посвященные осаждению других материалов, в том числе и легкоплавких.

Целью данной работы является разработка технологического процесса осаждения толстопленочных покрытий олова методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени для их дальнейшего использования в качестве припойного слоя в термоэлектрических модулях.

**Теоретическая подготовка эксперимента.** Процесс осаждения пленок методом ЖФМР складывается из двух составляющих: физическое распыление материала ионами рабочего газа, как при классическом магнетронном распылении, и его термическое испарение. Разогрев и достижение требуемой температуры мишени обеспечивается и поддерживается за счет ионной бомбардировки. При этом энергия ионизации материала мишени значительно ниже, чем рабочего газа. Например, энергия ионизации для меди или олова составляет  $\sim 7$  эВ, а для аргона  $\sim 15$  эВ. Ионизации аргона практически не происходит при достижении давления паров материала над мишенью более  $10^{-2}$  Па из-за их высокой концентрации и более низкой энергии ионизации.

Реализация процесса ЖФМР возможна в высоком вакууме, порядка  $10^{-4}$  Па и ниже, но при этом давление насыщенных паров материала над тиглем (мишенью) в ходе процесса должно быть  $10^{-2}$  Па и выше. Данное значение является нижней границей, при которой возможно существование аномально-тлеющего разряда. В том случае, если невозможно добиться такого давления насыщенных паров материала над тиглем за счет его испарения, недостающую часть необходимо компенсировать добавлением рабочего газа; однако протекать в режиме самораспыления такой процесс не будет.

Давление насыщенного пара материала зависит от его температуры: при ее повышении давление увеличивается [4]. Поскольку разогрев материала мишени обеспечивается за счет бомбардировки ионами, то чем выше плотность ионного тока, тем выше температура мишени. Значение плотности ионного тока, в свою очередь, напрямую зависит от мощности блока питания, подаваемой на магнетрон.

Температура плавления и температура, при которой давление насыщенного пара превышает  $10^{-2}$  Па, совпадают далеко не для всех материалов [4]. Например, хром, кобальт, титан, палладий имеют температуру плавления, превышающую температуру, при которой давление их насыщенных паров оказывается более  $10^{-2}$  Па. Для перечисленных материалов процесс ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени возможен из твердой фазы без рабочего газа. В свою очередь, олово, алюминий, золото имеют температуру плавления ниже, чем температура, при которой обеспечивается необходимое давление насыщенного пара над мишенью. Поэтому для реализации процесса ЖФМР необходим дополнительный разогрев материала мишени после его плавления до требуемой температуры.

При реализации процесса ЖФМР таких материалов, как алюминий, цинк, медь, технологический процесс сводится лишь к полному расплавлению материала в тигле, так как для этих материалов температура плавления практически совпадает с точкой, соответствующей

давлению насыщенных паров  $10^{-2}$  Па, и в ходе реализации процесса не возникает больших сложностей [7–10].

Температура плавления олова равна  $231,9$  °С, а температура достижения давления насыщенных паров  $10^{-2}$  Па составляет  $988$  °С. Следовательно, можно выделить три основных диапазона температуры, в которых процесс будет протекать по-разному:

- менее  $231,9$  °С — олово находится в твердой фазе, возможно только распыление ионами рабочего газа;
- от  $231,9$  до  $988$  °С — олово находится в жидкой фазе, но горение разряда возможно только с добавлением рабочего газа;
- более  $988$  °С — олово находится в жидкой фазе, возможен процесс самораспыления без подачи рабочего газа.

Скорость осаждения в процессе ЖФМР сильно зависит от составляющей, получаемой за счет испарения материала. Для оценки скорости испарения материала проанализированы значения давления насыщенного пара олова в зависимости от его температуры:

Давление, Па	..... $10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
Температура, °С	... $577,0$	$625,9$	$680,7$	$742,0$	$813,0$	$894,0$	$988,0$	$1372,0$

Как следует из приведенных выше данных, вплоть до температуры  $988$  °С олово испаряется крайне неинтенсивно. Это означает, что вклад испарения в общую скорость осаждения будет мал, а сами значения скорости осаждения будут примерно соответствовать значениям скоростей при классическом магнетронном распылении. Поэтому необходимо работать при температурах, превышающих  $988$  °С [8].

Особенностью процесса ЖФМР является существенный перенос теплоты на подложки за счет интенсивного массопереноса. Поскольку количество теплоты увеличивается с возрастанием вкладываемой в разряд мощности, то при длительном времени процесса осаждения подложки могут разогреваться до температур в  $200$  °С и выше, что может привести к расплавлению легкоплавких материалов, уже осажденных на подложки. Поэтому при отработке технологии нанесения оловянных покрытий данным методом одной из важных задач является определение такого значения мощности, которое обеспечивало бы высокие скорости осаждения, не расплавляя при этом получаемые пленки.

**Условия проведения экспериментов.** Для отработки технологического процесса проведены эксперименты по осаждению пленок олова при следующих условиях:

- в диапазоне температуры мишени  $231,9$ ... $988$  °С с добавлением рабочего газа;
- при температуре около  $988$  °С — для определения граничной мощности перехода в режим самораспыления;

- в режиме самораспыления при найденной оптимальной температуре.

В качестве подложек использованы: пластины полированного и шлифованного нитрида алюминия (AlN) размером 60×48 мм и толщиной 0,25 мм; диски теллурида висмута диаметром 20 мм и толщиной 1 мм.

В качестве материала тигля для плавления олова выбран молибден, так как он наиболее совместим с оловом по смачиваемости и активности химического взаимодействия. Последнее обстоятельство крайне важно, поскольку в случае несовместимости активностей химического взаимодействия материала тигля и мишени происходит диффузия материала мишени в материал тигля с последующим его разрушением.

Реализация процесса проведена с использованием магнетрона с диаметром мишени 100 мм. Осаждение проводилось как при единичной загрузке подложек (осаждение на неподвижную подложку), так и при групповой загрузке подложек (с реализацией последовательного прожаривания подложек над мишенью магнетрона).

Толщины пленок измеряли с помощью микрометра Schut 0-2T (погрешность измерений  $\pm 1$  мкм). Скорость осаждения высчитывали делением среднего значения толщины полученной пленки на время ее осаждения. Среднюю толщину пленки определяли как среднее арифметическое по трем измерениям в произвольных точках подложки. Изображения поверхностей пленок с увеличением получали с помощью оптического микроскопа.

Подбор мощностей для определения границ диапазонов температур осуществляли экспериментальным путем: нижняя граница 231,9 °C — точка плавления олова, верхняя граница 988 °C — точка перехода в режим самораспыления. При выключении потока газа на мощности, соответствующей первой точке, наблюдается быстрое падение ионного тока и, соответственно, гашение разряда. При мощности, превышающей значение во второй точке, наблюдается стабильный режим самораспыления.

**Проведение процесса с частичным добавлением рабочего газа при малой мощности разряда.** Процесс реализован в диапазоне температуры олова 231,9...988 °C, с подачей потока аргона 2 л/ч при мощности 1,6 кВт. Максимальное значение скорости осаждения олова на неподвижную подложку не превысило 0,9 мкм/мин.

При классическом магнетронном распылении скорость осаждения, реализуемая протяженными магнетронами с длиной мишени 500 мм и при значении мощности 1,5 кВт, не превышает 0,35...0,40 мкм/мин. При этом скорость осаждения ограничена максимально возможной мощностью, вкладываемой в разряд, так как при магнетронном рас-

пылении легкоплавких металлов с высокими мощностями наблюдается локальное оплавление мишеней и образование капельной фазы.

Таким образом, скорость осаждения при режиме ЖФМР с подачей рабочего газа (без перехода в режим самораспыления) примерно в 2,5 раза выше, чем при осаждении олова из твердой фазы, и для осаждения пленки толщиной 5 мкм необходимое время составляет порядка 4,5 мин. Несмотря на существенное (в 2,5 раза) увеличение скорости осаждения, ее значение примерно на порядок ниже, чем при ЖФМР в режиме самораспыления.

При такой скорости осаждения проведение процесса невозможно, так как при тепловом воздействии на подложки со стороны магнетрона в течение 4,5 мин происходит их разогрев до температуры плавления олова. При этом расплавленная пленка собирается по поверхности в капли (рис. 1). Необходимо отметить тот факт, что капли не являются так называемой капельной фазой метода, а образуются именно после разогрева подложек и плавления пленки. Такие пленки не удовлетворяют заданным критериям качества.



**Рис. 1.** Изображение поверхности оловянной пленки при реализации процесса с добавлением потока газа без перехода в режим самораспыления и без вращения подложек (увеличение 2×)

### **Определение мощности перехода в режим самораспыления.**

Нахождение граничной мощности (т. е. минимальной), при которой возможен процесс самораспыления, осуществлялось следующим образом. Процесс плавления олова стабилизировался по мощности. Начальная мощность составляла 1,5 кВт, так как теоретически мощ-

ность, необходимая для разогрева олова, должна быть немного выше, чем мощность, необходимая для плавления меди. Такое предположение сделано исходя из того, что температуры перехода в режим самораспыления для этих материалов близки по своим значениям. Во время проводимых ранее на этой же установке экспериментах с осаждением меди установлено, что для меди такая мощность составляет 1,2 кВт при тех же параметрах проведения процесса. После полного перехода олова в жидкую фазу его разогревают в течение одной минуты для достижения теплового баланса, после чего отключают подачу газа. Прекращение горения аномально-гтеющего разряда свидетельствовало о том, что температура олова меньше температуры, давление при которой равно необходимому давлению для поддержания аномально-гтеющего разряда. Стабильное горение разряда после отключения газа свидетельствовало бы о переходе олова в режим самораспыления.

При увеличении мощности вплоть до значения 1,8 кВт не удавалось приблизиться к режиму самораспыления при выключении подачи потока газа разряд гас. Значения параметров, при которых удалось реализовать режим самораспыления, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение граничных параметров

Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Описание
1,8	648	2,8	Предел по напряжению блока питания составляет 650 В. Работа блока питания в таком режиме крайне нежелательна
1,9	630	3,0	Стабильный режим с минимально возможной мощностью для реализации технологического процесса и минимальной скоростью осаждения в режиме самораспыления
2,0	588	3,4	Стабильный режим самораспыления, не требующий постоянного контроля оператора

Следует отметить, что при увеличении мощности, вкладываемой в разряд, возрастает скорость вращения расплавленной массы олова в тигле против хода часовой стрелки. Скорость вращения довольно велика, и олово при неправильно подобранном его количестве в тигле может перетекать через стенки, а любая неровность на дне тигля способствует образованию вихревых потоков и расплескиванию олова.

**Проведение процесса в режиме самораспыления.** Для самораспыления выбран режим стабилизации мощности при ее значении 2,0 кВт как наиболее стабильный и минимальный по мощности. Параметры и описание технологического процесса самораспыления олова представлены в табл. 2.

**Технологический процесс осаждения олова в режиме самораспыления**

Этап	Параметры	Описание
Плавление и разогрев олова	$P = 6,1 \cdot 10^{-1}$ Па $Q = 18$ л/ч $P = 1,8$ кВт $U = 597$ В $I = 3,23$ А $t = 5$ мин	Гранулы олова при плавлении при больших мощностях лопаются и разлетаются каплями по окружающему пространству, в связи с чем возникает опасность замыкания катода и анодного кольца магнетрона, а также повышения теплоотвода от тигля. Поэтому на этапе плавления необходимо плавное повышение мощности
Снижение потока газа	$P = 3,1 \cdot 10^{-1}$ Па $Q = 9$ л/ч $P = 2,0$ кВт $U = 585$ В $I = 3,6$ А $t = 0,5$ мин	В случае отсутствия этого шага при переходе в режим самораспыления при работе на мощностях 1,9...2,0 кВт разряд может погаснуть из-за скачка параметров при резком прекращении подачи газа
Тренировка без газа	$P = 8,3 \cdot 10^{-3}$ Па $Q = 0$ л/ч $P = 2,0$ кВт, $U = 588$ В $I = 3,6$ А $t = 0,5$ мин	Шаг необходим для стабилизации параметров процесса в режиме самораспыления, а именно ионного тока и напряжения. При этом также удаляются возможные загрязнения из расплавленного материала мишени
Осаждение на подложку	$P = 8,3 \cdot 10^{-3}$ Па $Q = 0$ л/ч $P = 2,0$ кВт $U = 588$ В $I = 3,6$ А $t = 5$ мин, 1 мин	Рабочий процесс. Проведено два процесса при разном времени осаждения на единичную неподвижную подложку

Скорость осаждения в реализованном технологическом процессе составила  $\sim 9$  мкм/мин, что соизмеримо со скоростью осаждения меди, равной  $\sim 11$  мкм/мин [5].

Как видно на изображениях поверхности (рис. 2), за счет теплового воздействия пленки оплавляются, что приводит к их короблению и отслаиванию. Следовательно, необходимо уменьшение теплового потока на подложку или уменьшение ее теплопроводности для увеличения времени разогрева до критической температуры.



**Рис. 2.** Изображение поверхности оловянной пленки, полученной в режиме самораспыления без вращения подложек:  
*а, б* — осаждение в течение 1 мин и 5 мин соответственно



**Осаждение покрытия с учетом особенностей технологического процесса.** Так как уменьшение теплового воздействия за счет реализации системы охлаждения подложки на используемой установке невозможно, уменьшение теплового потока обеспечивалось за счет вращения подложек, которое также необходимо для группового процесса, что важно на производстве. Осаждение на вращающуюся подложку происходило в течение 5 мин с параметрами, указанными в табл. 2. Скорость вращения составила 6 об/мин. Изображения образцов представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Изображение оловянной пленки, осажденной на подложки AlN с использованием вращения:  
*а* — полированный AlN; *б* — шлифованный AlN

Осаждение олова на подложки из материала с низкой теплопроводностью (теллурида висмута) также дало положительный результат (рис. 4). Осаждение осуществляли в течение одной минуты без вращения подложкодержателя. Толщина пленки составила  $\sim 9$  мкм. Цвет пленки – белоснежный. Капель и короблений не наблюдается.



**Рис. 4.** Изображение оловянной пленки, осажденной на теллурид висмута

**Обсуждение результатов.** Несмотря на то что олово быстро переходит в жидкую фазу при мощностях менее 1,5 кВт, переход в режим самораспыления обеспечивается за счет вложения достаточно высокой мощности в разряд для обеспечения необходимой температуры расплава. Минимальная мощность для стабильного технологического процесса самораспыления составляет 1,9 кВт.

Высокие скорости осаждения олова достигаются исключительно в режиме самораспыления, так как давление насыщенных паров олова, вплоть до температуры перехода в режим самораспыления, имеет невысокие значения, и вклад составляющей скорости за счет термического испарения крайне мал. Скорость осаждения в режиме самораспыления составила ~9 мкм/мин при мощности 2 кВт, а при реализации процесса с добавлением рабочего газа – всего ~0,9 мкм/мин в диапазоне температур 231,9...988 °С при мощности 1,5 кВт, что на порядок меньше.

Для реализации технологического процесса ЖФМР легкоплавких материалов необходимо обращать внимание на конструкцию тигля, а именно на высоту его стенки и массу, так как при вращении олово сдвигает тигель и выплескивается через стенки. В случае вытекания олова резко увеличивается теплоотвод от тигля, и реализация технологического процесса становится невозможной. Дополнительная фиксация тигля в используемой конструкции магнетрона приведет к увеличению теплоотвода от тигля, что сделает невозможным процесс ЖФМР в режиме самораспыления.

При осаждении легкоплавкого материала данным методом выявлена проблема расплавления пленки на подложке вследствие ее разогрева, что приводит к короблению поверхности пленки и образованию капель. Частично проблема решается при использовании вращения подложек, что позволяет снижать тепловое воздействие, но при этом уменьшается и скорость осаждения. Оказалось, что при осаждении на подложки из материалов с низкой теплопроводностью покрытия получаются более качественными: гладкими, сплошными, без образования на поверхности капель материала. Оптимальным решением для предотвращения расплавления пленок является реализация системы охлаждения подложек в процессе осаждения.

**Заключение.** В результате проведенных экспериментов впервые получены толстопленочные покрытия из легкоплавкого материала (олова) методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени. В процессе отработки режимов выявлен ряд особенностей процесса осаждения, основными из которых являются повышенные мощности разряда для перехода в режим самораспыления по сравнению с мощностями, необходимыми для расплавления мишени, и подплавление формируемого на подложке оловянного покрытия за

счет интенсивного теплопереноса. В остальном же данный метод позволяет за короткий промежуток времени получать качественные оловянные покрытия с толщинами в несколько десятков микрон, без капельной фазы и с хорошей адгезией, пригодные для использования в качестве припойного слоя в термоэлектрических модулях.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алексеев С.Н. *Электровакуумные приборы*. Ульяновск, УлГТУ, 2003.
- [2] Духопельников Д.В. *Магнетронные распылительные системы с электромагнитами. Автореф. дис. ... канд. техн. наук*. Москва, 2007.
- [3] Разумнева Н. *Прямая печать проводящих материалов*. URL: <https://www.dipaul.ru/pressroom/pryamaya-pechat-provodyashchikh-materialov/> (дата обращения: 25.08.2017).
- [4] Гамбург Ю.Д. *Гальванические покрытия. Справочник по применению*. Москва, Изд-во «Техносфера», 2006.
- [5] Макарова М.В., Моисеев К.М. Исследование свойств медных пленок, полученных методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени. *Вакуумная техника, материалы и технологии. Сб. тр. 12-й Международ. науч.-техн. конф.* Москва, 2017, с. 124–128.
- [6] Макарова М.В., Васильев Д.Д., Моисеев К.М. Процесс ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени. *Будущее машиностроения России. Сб. тр. 9-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, с. 298–305.
- [7] Тумаркин А.В., Ходаченко Г.В., Степанова Т.В., Щелканов И.А. Магнетронный разряд с расплавленным катодом. *Успехи прикладной физики*, 2013, т. 1, № 3, с. 276–282.
- [8] Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. Москва, Изд-во «Интеллект», 2009.
- [9] Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. *Физические величины: справочник*. Москва, Энергоатомиздат, 2015.
- [10] Dida G.C., Apreutesei M., Arvinte R., Marin A., Cella A.O., Munteanu D. Magnetron sputtering technique used for coatings deposition; technologies and applications. *Reports of 7th Intern. Conf. on Materials Science and Engineering BRAMAT, Braşov*, 2011, pp 29–33.

Статья поступила в редакцию 26.09.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Макарова М.В., Моисеев К.М. Проблемы формирования толстых слоев олова методом ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-1-1717>

**Макарова Мария Владимировна** – студентка 2-го курса магистратуры, кафедра «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: технология формирования тонкопленочных структур в вакууме, осаждение толстых пленок различных материалов с высокими скоростями в вакууме, вакуумное технологическое оборудование. e-mail: m.v.makarova@list.ru

**Моисеев Константин Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область науч-

ных интересов: технология формирования тонкопленочных структур в вакууме, реактивное магнетронное высокочастотное распыление, ионно-лучевая обработка, вакуумное технологическое оборудование, функциональные покрытия в инновационных устройствах. e-mail: mkm430@ya.ru

# The problems of thick tin layer formation by ion sputtering in magnetron systems in target vapors

© M.V. Makarova, K.M. Moiseev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article describes the process of thick-film tin coating deposition by the ion sputtering in magnetron systems in target vapors realized and studied for the first time. The physics of this deposition method for films of various materials is described and the stages and features of the technological process of deposition of tin coatings are analyzed. The analysis of the arising technological problems such as increased thermal effect on the substrate during the deposition process, unstable process transition into the self-sputtering regime after melting the target, and reduced deposition rate when working with molten tin, not having gone to the self-sputtering regime is performed. The ways of solving the listed problems are proposed, as a result of which the stable process of applying tin coatings with high deposition rates of about  $9 \mu\text{m} / \text{min}$  has been worked out. The quality of the samples of the tin coating deposited on ceramic substrates made of aluminum nitride obtained during variations of the deposition process is evaluated.*

**Keywords:** liquid-phase magnetron, tin, thick-film coating, vacuum deposition, ion sputtering, target vapors

## REFERENCES

- [1] Alekseev S.N. *Electrovacuumnye pribory* [Electronic tubes]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2003.
- [2] Dukholpelnikov D.V. *Magnetronnye raspylitelnye sistemy s electromagnitami. Diss. cand. tekhn. nauk. Avtoreferat* [Magnetron sputtering systems with electromagnets. Cand. eng. sc. diss. Author's abstract]. Moscow, 2007.
- [3] Razumneva N. *Pryamaya pechat ptovodyashchikh materialov* [Direct printing conducting materials]. Available at: <https://www.dipaul.ru/pressroom/pryamaya-pechat-provodyashchikh-materialov/> (accessed August 25, 2017).
- [4] Gamburg Yu.D. *Galvanicheskie pokrytiya* [Galvanic coatings. Reference book on application]. Moscow, Technosfera Publ., 2006.
- [5] Makarova M.V., Moiseev K.M. Issledovanie svoystv mednykh plenok, poluchennykh metodom ionnogo raspyleniya v magnetronnykh sistemakh v parakh misheni [Investigation of the properties of copper films obtained by ion sputtering in magnetron systems in target vapors]. In: *Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologii. Sb. trudov 12-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnichskoy konferentsii* [Vacuum technology, materials and technologies. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Scientific-Technological Conference]. Moscow, 2017, pp. 124–128.
- [6] Makarova M.V., Vasilyev D.D., Moiseev K.M. Protssess ionnogo raspyleniya v magnetronnykh sistemakh v parakh misheni [The process of ion sputtering in magnetron systems in target vapors]. In: *Budushchee mashinostroeniya v Rossii. Sb. trudov 9 Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov* [The future of mechanical engineering in Russia. Proceedings of the 9th All-Russia Conference of Young Scientists and Specialists]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, pp. 298–305.

- [7] Tumarkin A.V., Khodachenko G.V., Stepanova T.V., Shchelkanov I.A. *Uspekhi prikladnoy fiziki — Advances in Applied Physics*, 2013, vol. 1, no. 3, pp. 276–282.
- [8] Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Intellect Publ., 2009.
- [9] Grigoryeva I.S., Meilikhova E.Z. *Fizicheskie velichiny: spravochnik* [Physical quantities: reference book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2015.
- [10] Dida G.C., Apreutesei M., Arvinte R., Marin A., Cella A.O., Munteanu D. *Magnetron sputtering technique used for coatings deposition; technologies and applications*. Reports of 7<sup>th</sup> Intern. Conf. on Materials Science and Engineering BRAMAT. Braşov, 2011, pp 29–33.

**Makarova M.V.**, second year Master' Degree student, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: technology of thin-film structure formation in vacuum, high rate deposition of thick films of various materials in vacuum, vacuum technological equipment. e-mail: m.v.makarova@list.ru

**Moiseev K.M.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Electron Beam Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: technology of thin-film structure formation in vacuum, reactive magnetron high-frequency sputtering, ion-beam processing, vacuum technological equipment, functional coatings in innovative devices. e-mail: mkm430@ya.ru