

**Секция**  
**ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ**  
**ПУЧКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**  
**И ПРЕЦИЗИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**  
**В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ**  
**ЭЛЕКТРОНИКИ И ОПТИКИ**

<b>Формирование функциональных электрохимических покрытий на основе олова методами нестационарного электролиза и ультразвукового стимулирования .....</b>	<b>162</b>
А.А. Хмыль, И.И. Кузьмар, В.К. Бранцевич	
<b>Установка комбинированного магнетронно-лазерного осаждения пленочных покрытий.....</b>	<b>164</b>
А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов, К.Ю. Прокопчик	
<b>Анализ коллизий трех планарных позиционеров на одном статоре.....</b>	<b>166</b>
С.Е. Карпович, В.В. Поляковский	
<b>Конфигурация системы управления симулятором пространственных движений с 6 степенями свободы.....</b>	<b>168</b>
Е.А. Литвинов, Н.И. Кекиш, Л. Голдын	
<b>Алгоритм выбора метода автоматического контроля топологии планарных структур .....</b>	<b>170</b>
Д.С. Титко, Е.А. Титко, И.В. Дайняк	
<b>Исследование процесса ультразвуковой микросварки межсоединений в изделиях автоэлектроники.....</b>	<b>172</b>
И.Б. Петухов, В.О. Паламарчук	
<b>Индукционная пайка силовых диодов автоэлектроники .....</b>	<b>174</b>
В.Л. Ланин, В.Г. Хотькин	
<b>Опико-спектроскопические характеристики комплексированного разряда в СВЧ плазматроне на базе волноводно-щелевого аппликатора .....</b>	<b>176</b>
С.В. Бордусов, М.С. Лушакова	
<b>Исследование температурных профилей индукционной пайки.....</b>	<b>178</b>
В.Л. Ланин, В.Г. Левин	
<b>Нанесение пленок цирконата-титаната свинца методом ВЧ магнетронного распыления .....</b>	<b>180</b>
М.В. Евстафьева, Д.А. Голосов, С.М. Завадский	
<b>Формирование композиционных покрытий серебро-вольфрам при воздействии ультразвука .....</b>	<b>182</b>
Н.В. Богущ, Л.К. Кушнер, А.А. Хмыль	
<b>Исследование механизма повышения активности кавитации при взаимодействии сильно различающихся по частоте ультразвуковых полей.....</b>	<b>184</b>
А.В. Красовский, А.В. Котухов, Н.В. Дежкунов	
<b>Установка сушки при пониженном давлении сушильного агента .....</b>	<b>186</b>
В.П. Василевич, А.А. Костюкевич, А.И. Емельянов	
<b>Интенсификация процесса сушки влажных материалов .....</b>	<b>188</b>
В.П. Василевич, А.А. Костюкевич, А.И. Емельянов	

<b>Моделирование параметров инфракрасного нагрева при монтаже многовыводных электронных компонентов .....</b>	<b>190</b>
Т.Э. Лавор, В.Л. Ланин	
<b>Процесс СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин.....</b>	<b>192</b>
С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко, А.П. Достанко	
<b>Электрические характеристики возбуждения разряда с эффектом полого катода при низком вакууме.....</b>	<b>194</b>
А.И. Божко, С.В. Бордусов	
<b>Моделирование распределения электромагнитных полей в объеме плазмы СВЧ разряда .....</b>	<b>196</b>
С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко, А.П. Достанко, Т.В. Гордейчук	
<b>Исследование изменения профиля эрозии металлических мишеней при DC магнетронном распылении.....</b>	<b>198</b>
С.Н. Мельников, Д.А. Голосов, С.М. Завадский, А.П. Достанко, С.П. Кундас, Б.А. Тонконогов	
<b>Синтез покрытий из алмазоподобного углерода для просветления германиевой оптики .....</b>	<b>200</b>
Е.В. Телеш	
<b>Пассивация полевых транзисторов на GaAs .....</b>	<b>202</b>
Е.В. Телеш, А.П. Достанко	

## ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ОЛОВА МЕТОДАМИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА И УЛЬТРАЗВУКОВОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ

А.А. ХМЫЛЬ, И.И. КУЗЬМАР, В.К. БРАНЦЕВИЧ

*УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
kushner@bsuir.by*

Проблема повышения надёжности изделий электронной техники и их конкурентоспособности решается в настоящее время путём создания новых эффективных технологий, характеризующихся высокой производительностью, низкой энергоёмкостью, безотходностью, обеспечивающих отличное качество изготавливаемых изделий. Среди специальных электрохимических систем металлизации, обеспечивающих высокое качество и надёжность контактных паяных соединений, выделяются покрытия сплавом олово-висмут. Применение нестационарного электролиза позволяет формировать покрытие сплавом олово-висмут с улучшенной паяемостью, сохраняющей свое значение при длительном хранении.

*Ключевые слова:* катодное электроосаждение, олово-висмут, нестационарный электролиз, ультразвук, функциональные свойства.

В современной технологии радиоэлектронного приборостроения широко используются функциональные электрохимические покрытия сплавом олово-висмут, обладающие хорошей паяемостью и защитной способностью. Однако существующие процессы формирования данного покрытия на постоянном токе малопродуктивны. Как показывает опыт проводимых ранее исследований, максимального эффекта для обеспечения высоких функциональных и защитных свойств при получении сплавов, а также интенсификации процесса осаждения можно достичь рациональным сочетанием традиционных методов с нетрадиционными: осаждением на периодическом токе, программным изменением режима электролиза, использованием ультразвуковых колебаний [1].

Для исследований использовался электролит следующего состава: сульфат олова  $SnSO_4$  (50 г/л); висмут азотнокислый  $Bi(NO_3)_3$  (1,4 г/л); кислота серная  $H_2SO_4$  (125 г/л); неонол АФ-9-10 (2-8 г/л); добавка ЦКН-32 (2 г/л). Температура электролита – 18...25 °С. Электроосаждение проводили на источнике нестационарного электролиза ИП 24-5, разработанном в БГУИР. Согласно ГОСТ 9.302-88 исследовали функциональные свойства покрытий сплавом олово-висмут.

Результаты исследований функциональных и защитных свойств (паяемости, контактного электросопротивления, скорости коррозии) покрытий олово-висмут, полученных при воздействии интенсифицирующих факторов, приведены на рис. 1 и 2.

Установлено, что использование интенсифицирующих факторов позволяет формировать покрытия сплавом олово-висмут, обладающие высокой паяемостью, стабильным контактным электросопротивлением и улучшенными коррозионными свойствами. Применение нестационарного электролиза и ультразвукового стимулирования позволяет подобрать параметры осаждения, при которых можно избежать ухудшения паяемости с одновременным улучшением качества осадка.

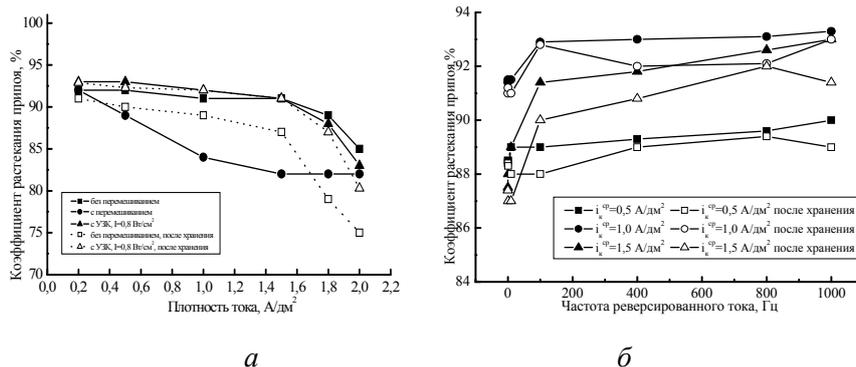


Рис. 1. Влияние условий формирования на паяемость покрытий сплавом олово-висмут, полученных на постоянном (а) и реверсированном ( $\gamma=1,67$ ) (б) токах,  $i_k^{cp}=0,5 \text{ A/dm}^2$

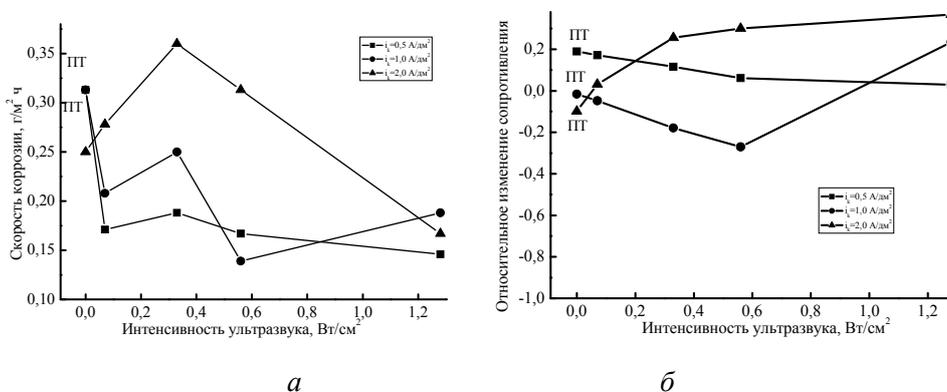


Рис. 2. Влияние условий формирования на защитные свойства покрытий сплавом олово-висмут (а) и контактное электросопротивление (б)

Важной особенностью таких покрытий является стабильность их свойств (контактное электросопротивление и паяемость) при эксплуатации и хранении.

Оптимальные условия получения покрытий сплавом олово-висмут:

- на импульсном токе: средняя плотность тока  $0,5 \text{ A/dm}^2$ , частота 10 Гц, скважность 1,25..2;
- на реверсированном токе: средняя плотность тока  $1,0 \text{ A/dm}^2$ , частота 1 Гц, коэффициент заполнения импульсов 1,67;
- предложено для электроосаждения использовать ультразвук интенсивностью  $0,7-1,2 \text{ Вт/см}^2$ .

Технико-экономические преимущества разработанного процесса формирования сплава олово-висмут:

- сохранение способности к пайке при длительном хранении и исключение оплавления покрытия после электроосаждения;
- повышение коррозионной стойкости за счет снижения пористости;
- интенсификация процесса осаждения.

#### Список литературы

1. Хмыль А. А. Формирование тонкопленочных систем металлизации в нестационарных условиях электролиза: Дисс. ... д-ра. техн. наук. Минск, 2001.

## УСТАНОВКА КОМБИНИРОВАННОГО МАГНЕТРОННО-ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.П. БУРМАКОВ, В.Н. КУЛЕШОВ, К.Ю. ПРОКОПЧИК

*Белорусский государственный университет  
пр-т Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь  
burmakov@bsu.by*

Рассматривается структура установки для формирования и исследования комбинированного плазменного потока, образованного магнетронным распылителем и одновременным частотно-импульсным лазерным воздействием на различные материалы в газах низкого давления. Приводятся результаты исследования особенностей формирования комбинированного потока.

*Ключевые слова:* магнетронное распыление, эрозионная лазерная плазма, осаждение пленок, характеристики комбинированного потока.

Магнетронная и импульсная лазерная плазма существенно отличается своими энергетическими и временными характеристиками. Комбинация указанных плазменных потоков позволят создать особые условия для формирования пленочных покрытий. Проведенные к настоящему времени исследования по магнетронно-лазерному осаждению немногочисленны и связаны с получением уникальных по механическим свойствам композиционных покрытий на основе многослойных металлокерамических структур типа  $Ti-Ti_xC_y$  на керамике [1], пленок  $SiC_x$  [2],  $TiC$  и  $TiCN$  [3], нанокристаллических соединений углерода и алмазоподобных пленок [4].

Реализация магнетронно-лазерного метода нанесения пленочных покрытий предполагает не только расположение магнетронного распылителя, мишени для лазерного воздействия и подложки в одном вакуумном объеме, но и создание системы контроля и управления параметрами лазерной и магнетронной плазмы, а также системы контроля и управления условиями осаждения (состав газовой среды, давление в вакуумной камере и т.д.). Для решения указанных задач нами создана установка, в которой можно выделить следующие основные части: вакуумная камера с устройствами откачки, контроля и поддержания давления, магнетронный распылитель с устройствами задания и контроля напряжения и тока разряда, система управления расходом рабочих газов, импульсно-частотный лазер с устройством фокусировки и сканирования лазерного луча, система регистрации эмиссионных оптических спектров.

В качестве вакуумной части использовалось оборудование промышленной вакуумной установки УРМ 3279013 с механическим и диффузионным насосами. Магнетронный распылитель с плоским катодом диаметром 5 см питался источником постоянного тока при типичной для магнетронных распылителей величине средней плотности мощности на катоде 25–75 Вт/см<sup>2</sup>. Крепление магнетрона в вакуумной камере позволяло ориентировать его относительно подложки путем изменения расстояния и углового положения. Подложкодержатель позволял закреплять на нем различные подложки диаметром не более 5 см и имел устройство нагрева подложек. Для регистрации изменений тока и напряжения магнетронного разряда при формировании лазерной плазмы, а также динамики ее излучения использовался цифровой осциллограф В-483 с временным разрешением 50 нс. Управление расходом газов в процессах магнетронного и комбинированного осаждения покрытий проводилось оптической системой на основе малогабаритного спектро-

метра S100 [5]. Рабочим газом являлся аргон или смесь аргона с реактивным газом (кислород, азот, углеродсодержащий газ) соответственно для процессов формирования пленок чистых материалов или пленок оксидов, нитридов, карбидов.

Лазерная плазма формировалась с помощью двухимпульсного лазера LS-2134D на кристалле АИГ:Nd<sup>3</sup>, работающего в однократном и частотном режиме 1–10 Гц на длине волны 1064 и 532 нм с длительностью отдельного импульса 12 нс и его энергией до 120 мДж. Система управления лазерным излучением позволяла задавать энергию накачки лазера, частоту следования импульсов в частотном режиме, временной интервал между двумя импульсами в двухимпульсном режиме. Изменение плотности мощности лазерного излучения на мишени проводилось фокусирующей линзой. Для сканирования луча по поверхности мишени применена механическая система, состоящая из двух последовательно расположенных призм полного внутреннего отражения, каждая из которых может независимо поворачиваться с помощью отдельного шагового двигателя. Характеристики плазменных потоков исследовались методом оптической эмиссионной спектроскопии с помощью спектрометра S100 и монохроматора МДР-12, на выходе которого помещалась ПЗС линейка.

С использованием аппаратуры оптической спектроскопии показана возможность управления плотностью ионной компоненты лазерной плазмы не только путем задания плотности мощности излучения на поверхность мишени, но и путем задания временной задержки между импульсами для двухимпульсного режима генерации. Определено влияние плотности мощности и давления рабочего газа на эмиссионно-спектральные характеристики лазерной плазмы. Установлено, что формирование комбинированного магнетронно-лазерного плазменного потока при плотности мощности лазерного излучения более 0,5 ГВт/см<sup>2</sup> сопровождается образованием импульсного дугового разряда, который шунтирует магнетронный разряд и влияет на характеристики комбинированного потока, приводя к росту интенсивности спектральных линий атомов и ионов аргона, атомных и ионных линий материала катода. Установлено, что процесс комбинированного осаждения покрытий можно проводить при низких давлениях в вакуумной камере, когда самостоятельное горение магнетронного разряда не реализуется. В этом случае лазерная плазма инициирует импульсный дуговой разряд, который приводит к зажиганию несамостоятельного магнетронного разряда в парах материала катода.

Созданная установка позволяет реализовать как методики комбинированного осаждения, так и методики раздельного осаждения в остаточной атмосфере и в среде различных газов с возможностью достаточно широких вариаций технологических параметров и имеет необходимый набор средств контроля и управления для воспроизводимого проведения процесса.

#### Список литературы

1. Krzanowski J.E., Nainaparampil J.J., Phani A.R. // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2003. Vol. 21. № 6. P. 1829–1836.
2. Jelinek M., Kocourek T., Zemek J. et. al // Applied Physics A. 2008. Vol. 93, № 3. P. 633–637.
3. Jelinek M., Kocourek T., Kadlec Ja., et. al // Laser Physics. 2009. Vol. 19, № 2. P. 149–153.
4. Voevodin A.A., Capano M.A., Safriet A.J. et. al // Applied Physics Letters. 1996. Vol, 69. № 2. P. 188–190.
5. Бурмаков А.П., Кулешов В.Н. // Журнал прикладной спектроскопии. 2007. Т. 74, № 3. С. 412–416.

## АНАЛИЗ КОЛЛИЗИЙ ТРЕХ ПЛАНАРНЫХ ПОЗИЦИОНЕРОВ НА ОДНОМ СТАТОРЕ

С.Е. КАРПОВИЧ, В.В. ПОЛЯКОВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
mmts@bsuir.by*

Проблема повышения производительности технологического оборудования при сохранении точности перемещений решается различными способами. В докладе предложен подход к реализации бесколлизийной работы многокоординатных систем в составе трех планарных позиционеров на одном статоре, обеспечивающий одновременное перемещение всех подвижных модулей. На основании анализа требований предложена геометрическая модель и алгоритм учета возможных коллизий.

*Ключевые слова:* коллизия, подвижный модуль, многокоординатная система перемещений.

Для широкого класса прецизионного оборудования, включая тестеры печатных плат, автоматизированные сборочные комплексы БИС и СБИС, роботизированные участки, реализующие планарные технологии микроэлектроники, характерно одновременное перемещение нескольких планарных позиционеров на одном статоре. Учет возможных коллизий при этом потребовал аналитического решения траекторных задач для разработки алгоритмов управления позиционерами.

При этом в части математического моделирования и алгоритмизации случай с тремя планарными позиционерами на одном статоре является наиболее общим для систем перемещений автоматизированного оборудования микро- и наноэлектроники. Разработанный базовый алгоритм имеет модульную структуру, позволяющую добавлять или исключать планарные модули в рабочем пространстве статора.

Геометрическая модель системы перемещений, построенной на трех планарных ЛШД, в дальнейшем называемых координатными позиционерами КП1, КП2 и КП3, показана на рис. 1.

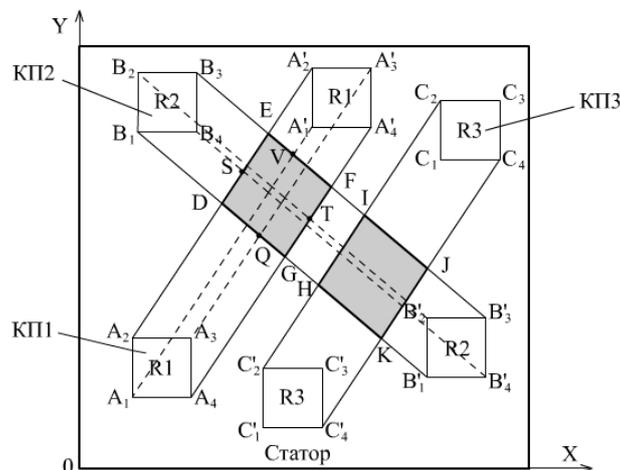


Рис. 1. Геометрическая модель анализа коллизий трех планарных позиционеров на одном статоре

Внешний прямоугольный контур на рис. 1 определяет рабочую зону на статоре, выход за границы которой в процессе перемещения позиционеров невозможен. Прямоугольники  $A_1A_2A_3A_4$ ,  $B_1B_2B_3B_4$  и  $C_1C_2C_3C_4$  определяют область или площадь, которую в данный момент времени занимают соответственно КП1, КП2 и КП3. Квадратные, а в общем случае – прямоугольные области позиционеров – это, по сути дела, их проекции на рабочую плоскость статора, соответствующие конструкции планарного модуля движения. Прямоугольники  $A'_1A'_2A'_3A'_4$ ,  $B'_1B'_2B'_3B'_4$  и  $C'_1C'_2C'_3C'_4$  определяют геометрическое место конечного положения соответственно КП1, КП2 и КП3. Предполагается, что проекции механических звеньев, установленных соответственно на КП1, КП2 и КП3, не выходят за контуры площади позиционера.

Рассмотрим геометро-кинематический анализ движения трех планарных позиционеров на одном статоре при их позиционном перемещении типа точка–точка по прямой с постоянной скоростью.

Геометрически зоны перемещения каждого позиционера описываются так называемым шлейфом, который представляет собой геометрическую область, в которой осуществляется движение позиционера при переходе из начальной позиции в конечную. Так, для позиционера КП1, в соответствии с рис. 1, шлейфом является фигура в виде шестиугольника  $A_1A'_1A'_2A'_3A'_4A_4$ .

Геометрическая область, образованная пересечением шлейфов разных позиционеров, является зоной, в которой возможно их столкновение (общая зона). Так, для КП1 и КП2 общей зоной является четырехугольник  $DEFG$ . Аналогично определяются общие зоны для оставшихся пар позиционеров.

Из анализа геометрической модели следует, что при совместном движении координатных позиционеров КП1, КП2 и КП3 возможны следующие ситуации:

- коллизии при одновременном движении позиционеров полностью отсутствуют, когда все три шлейфа движения, построенные по начальным и конечным положениям позиционеров, не пересекаются;

- коллизии в движении позиционеров возможны, если хотя бы два шлейфа из трех пересекаются. В этом случае для бесколлизийного движения позиционеров необходимо формировать и обеспечивать при движении необходимые условия, построенные на правиле приоритетов, устанавливающем очередность вхождения позиционеров КП1, КП2 и КП3 для каждой пары позиционеров в их общую зону;

- особые случаи коллизий, которые включают критические зоны, возникающие при некоторых частных конфигурациях, при которых полное движение позиционеров от начальной до конечной точки невозможно или возможно только при особых условиях.

Разработанный алгоритм решения задачи коллизии для трех позиционеров на одном статоре при их равномерном движении основан на том, что каждый позиционер представляется его проекцией на плоскость статора в виде геометрического места, ограниченного подвижным четырехугольником.

Не нарушая общности решения поставленной задачи по предотвращению коллизий, разработан и реализован алгоритм анализа коллизий трех планарных позиционеров КП1, КП2 и КП3, имеющих форму квадрата с длиной стороны  $L$ , при их прямолинейном движении между начальными и конечными положениями.

## КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИМУЛЯТОРОМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ С 6 СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Е.А. ЛИТВИНОВ<sup>1</sup>, Н.И. КЕКИШ<sup>1</sup>, Л. ГОЛДЫН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
mmts@bsuir.by

<sup>2</sup>Белостокский технический университет  
ул. Вейска, 45А, г. Белосток, 15-351, Республика Польша  
tomekh@pb.edu.pl

Для реализации движений рабочей платформы в трехмерном пространстве по трем линейным и трем угловым координатам предложена система управления в виде аппаратно-программного комплекса на базе цифрового процессора Analog Devices BlackFin BF532. В качестве исполнительных двигателей использованы асинхронные двигатели Siemens 1LA7096 4AA. Система перемещений предназначена для прецизионного оборудования производства изделий электронной техники.

*Ключевые слова:* система перемещений, система управления, прецизионное оборудование.

Конфигурационная структура симулятора пространственных движений, разработанного при участии НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы» НИЧ БГУИР и созданного на предприятии «Технологии виртуальной реальности» (г. Минск), представлена на рис. 1.



Рис. 1. Конфигурационная структура симулятора пространственных движений

Она включает персональный компьютер (ПК), контроллер управления платформой симулятора (КУПС), преобразователи частоты (инверторы) Mitsubishi Electric FR-S 500, асинхронные двигатели Siemens 1LA7096-4AA с редукторами МТС62А, угловые датчики ДК1-С и исполнительный механизм параллельной кинематики с шестью степенями свободы.

В соответствии со структурой, представленной на рис. 1, ПК передает в КУПС данные, необходимые для формирования команд на перемещение платформы симулятора. КУПС обрабатывает команды от ПК на управление платформой по заложенным

алгоритмам. Шесть инверторов осуществляют преобразование управляющих сигналов от КУПС в функции напряжения соответствующей частоты, посредством которых происходит управление шестью асинхронными двигателями, которые, в свою очередь, приводят в движение подвижную платформу исполнительного механизма. Управление инверторами реализовано двумя способами: по отдельным каналам скорости и направления (в КУПС имеются отдельные аналоговые выходы для управления скоростью и направлением вращения каждого двигателя) и с помощью интерфейса RS-485.

КУПС представляет собой аппаратно-программное решение на базе цифрового процессора Analog Devices BlackFin BF532, который обеспечивает необходимую вычислительную мощность для расчета пространственных координат и реализации алгоритмов управления платформой.

В контроллере применена микросхема NAND Flash Samsung K9K8G08U0M, позволяющая хранить большой массив данных для различных приложений, а встроенный интерфейс USB позволяет загружать в контроллер все настройки в виде отдельных файлов, как на обычное устройство-носитель информации (USB Mass Storage Device). Разработанный протокол обмена данными устройства с персональным компьютером обеспечивает функции внутрисхемного программирования, взаимодействие с программами симуляции движения на ПК и функции телеметрии (автоматическое тестирование, управление, анализ положения, определение состояния датчиков).

Контроллер управления платформой симулятора, структурная схема которого представлена на рис. 2, может обеспечить одновременное управление 42 двигателями. Это достигается за счет встроенных в плату контроллера двенадцати аналоговых выходов для прямого управления инверторами и шести цифровых интерфейсов RS-485.

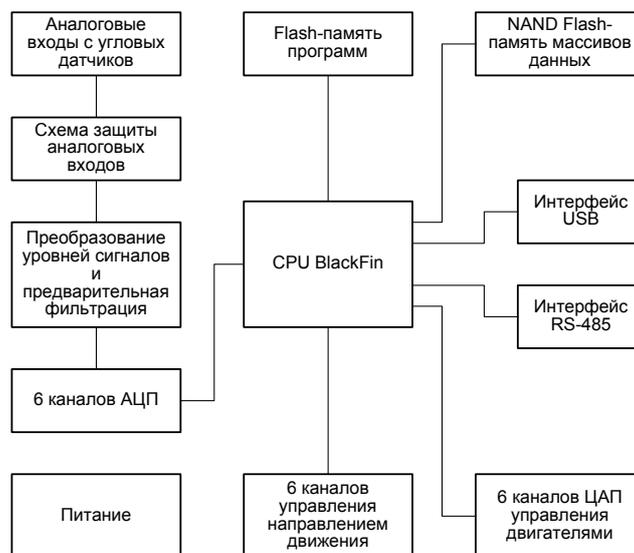


Рис. 2. Структурная схема КУПС

В свою очередь, один интерфейс RS-485 (UART) может осуществлять контроль до шести инверторов. Цифровые каналы UART реализованы на микросхеме CPLD семейства MAXII EPM570T100. Внутрисхемное программирование контроллера управления может осуществляться через интерфейсы RS-232 или USB 2.0.

В соответствии с представленной структурой разработано программное обеспечение для системы управления симулятором.

## АЛГОРИТМ ВЫБОРА МЕТОДА АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТОПОЛОГИИ ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУР

Д.С. ТИТКО, Е.А. ТИТКО, И.В. ДАЙНЯК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
dainiak@bsuir.by*

Одной из основных задач, возникающих при макропроектировании оборудования для автоматического контроля топологии интегральных схем и других изделий электронной техники, является выбор метода контроля. Для обоснованного выбора необходимо на основе классификации методов автоматического контроля топологии определить алгоритм, позволяющий сделать правильный выбор метода контроля в зависимости от характеристик контролируемых объектов и условий контроля, что и является целью работы.

*Ключевые слова:* планарная структура, дефект, топология, автоматический контроль топологии, микроэлектроника.

При выборе метода автоматического контроля топологии планарных структур необходимо учитывать следующие факторы: множество типов дефектов, подлежащих автоматическому контролю ( $M$ ); размер минимального обнаруживаемого дефекта для изолированных дефектов ( $S_{и}$ ); размер минимального обнаруживаемого дефекта для прилегающих дефектов ( $S_{п}$ ); допуск на положение (координаты) элементов топологии, их размеры и неровность края ( $S_{кр}$ ); возможная точность совмещения координатных систем сравниваемых изображений ( $\Delta K$ ); контраст изображения контролируемого оригинала в виде длины перехода тёмное/светлое в бинаризованной или полутоновой модели ( $L$ ); размер минимального элемента топологии ( $R$ ).

На первом этапе необходимо правильно выбрать группу методов автоматического контроля топологии. Ошибка на первом этапе может привести к катастрофическим последствиям, т.е. к созданию неработающей установки. Выбор конкретного метода из группы производится на следующем этапе и, как правило, диктуется конструктивными возможностями разработчика, хотя в некоторых случаях решение о конкретном методе принимается уже на первом этапе.

Метод контроля можно представить в виде дискретной функции семи переменных

$$F = f(M, \Delta K, S_{и}, S_{п}, S_{кр}, L, R). \quad (1)$$

Параметр  $M$ , входящий в формулу (1), представляет собой целочисленную характеристику множества типов дефектов. С точки зрения определения метода контроля существенными являются только три из них: изолированные дефекты  $I$ , прилегающие дефекты  $P$ , уход координат и размеров  $S$ . Поэтому переменную  $M$  представим булевым вектором, состоящим из трёх двоичных переменных, каждая из которых соответствует необходимости контроля дефектов определённого типа. Область определения переменной  $M$  состоит из семи значений:

$$M(I, P, S) = \{ [1,0,0], [1,1,0], [1,0,1], [1,1,1], [0,1,0], [0,1,1], [0,0,1] \}. \quad (2)$$

Переменные  $S_{и}$ ,  $S_{п}$ ,  $S_{кр}$ ,  $\Delta K$ ,  $L$ ,  $R$  задаются в микрометрах и используются для вычисления значений трёх коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , на основании анализа значений которых принимается решение о выборе метода. Эти коэффициенты рассчитываются по формулам

$$K_1 = \frac{S_{и}}{R}; \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{S_{п}}{S_{кр} + \Delta K + L}; \quad (4)$$

$$K_3 = \frac{S_{и}}{S_{кр} + \Delta K + L}. \quad (5)$$

Если  $K_1 \leq 0,5$ , то контроль можно производить любым из известных методов [1], хотя метод сравнения с эталоном является более предпочтительным, т.к. даёт в этом случае меньшее количество ложных дефектов (при дальнейшем уменьшении значения коэффициента  $K_1$  количество ложных дефектов будет уменьшаться и при значениях порядка 0,2 это количество будет практически одинаковым для обоих методов).

Если  $K_2 \geq 2$ , то контроль можно производить любым из методов [1] в соответствии с анализом коэффициента  $K_1$ . В противном случае – только методом сравнения с проектными данными с динамическим автосовмещением изображений.

Если  $K_3 \leq 1$ , то наиболее эффективным будет метод анализа топологии, в противном случае следует выбрать один из методов сравнения с эталоном [1].

Таким образом, используя реальные значения аргументов функции  $F$  можно получить численную оценку параметров  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , анализ которых позволит сделать вывод о степени соответствия требуемых условий контроля тому или иному методу.

В случае наличия больших допусков на месторасположение элементов топологии, а также в случае невозможности совмещения реального и эталонного изображений, целесообразно использовать методы анализа топологии. При этом для однородных изображений, например, полупроводниковая пластина или фотошаблон с маскирующим покрытием, целесообразно использовать метод группового анализа, а для неоднородных – метод индивидуального анализа элементов рисунка.

Таким образом, на основании анализа и исследований существующего в нашей стране и за рубежом оборудования разработан алгоритм выбора метода автоматического контроля топологии планарных структур, соответствующий условиям контроля. Способ автоматического контроля определяется путём вычисления соответствующего значения дискретной функции семи переменных (2) с учётом коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ . При этом в группе методов сравнения с эталоном наиболее точным и функционально полным является метод сравнения с проектными данными. Этот метод является наиболее предпочтительным, если контролируемый объект выполнен с соблюдением жёстких требований к месторасположению элементов топологии на подложке. Ограничением для использования этого метода является также сложность совмещения реального и искусственного изображений, в том числе по причине плохого контраста.

#### Список литературы

1. *Аваков С.М.* Автоматический контроль топологии планарных структур. Минск, 2007.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МИКРОСВАРКИ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ АВТОЭЛЕКТРОНИКИ

И.Б. ПЕТУХОВ, В.О. ПАЛАМАРЧУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь*

Всестороннее развитие электроники требует совершенствования процессов сборки изделий, что обосновано повышением качества и надежности компонентов. Важное место в надежности компонентов имеет качество исполнения проволочных межсоединений. В работе приведены результаты исследования прочностных характеристик межсоединений, выполненных по технологии ультразвуковой микросварки методом «клин-клин» в изделиях автоэлектроники.

*Ключевые слова:* ультразвук, микросварка, межсоединения, автоэлектроника.

При монтаже изделий электронной техники одним из наиболее распространенных способов электрического соединения между контактными площадками кристалла и выводами корпуса является соединение с помощью проволочных выводов, что объясняется высокой автоматизацией процесса, универсальностью по отношению к различным технологическим вариантам производства и геометрическим размерам изделий.

Прогресс в развитии методов формирования межсоединений позволил существенно снизить трудоемкость этих операций и добиться заметных успехов на пути к их полной автоматизации. Однако трудоемкость операций формирования межсоединений остается определяющей в процессе производства изделий микроэлектроники и для разных типов приборов составляет от 30 до 60% всей трудоемкости сборки. При этом на долю разрушения межсоединений приходится и значительный процент отказов изделий при эксплуатации. Поэтому присоединению выводов в изделия уделяется особое внимание.

Исследован процесс ультразвуковой сварки методом «клин-клин». Схема ультразвуковой системы микросварки изображена на рис. 1.

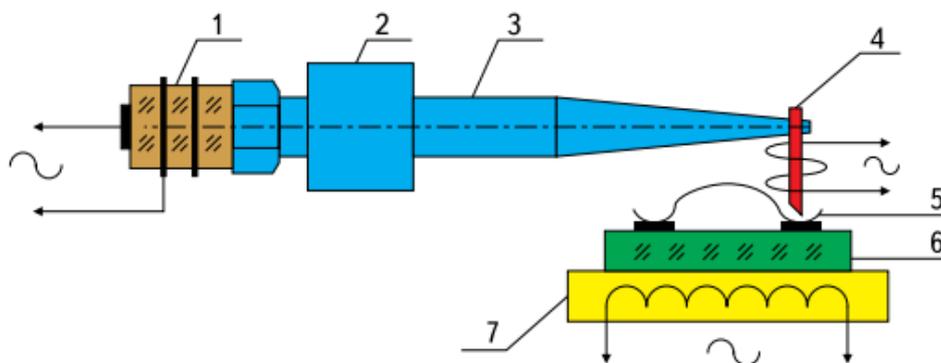
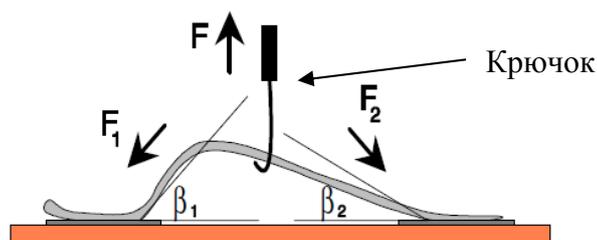


Рис. 1. Схема ультразвуковой системы микросварки:  
1 – УЗ-преобразователь; 2 – стакан; 3 – волновод; 4- инструмент;  
5 – микропроводник; 6 – кристалл; 7 – столик

В процессе исследования технологических параметров ультразвуковой микро-сварки получены зависимости прочности соединения от мощности колебаний, а так же от длительности импульса. Процесс проводился на многоопциональной сварочной установке ЭМ-4320 (УП «КБТЭМ–СО») с опцией разварки «клин-клин». Технологические параметры задавались оператором на цифровом табло УЗ генератора нажатием клавиш. Управление установкой проводилось в полуавтоматическом режиме.

Для исследования выбрана проволока толщиной 80 мкм, широко используемая при сборке изделий автоэлектроники. Сварка проводилась на алюминиевую подложку. Прочность получаемых соединений оценивалась испытанием полученных перемычек тянущим усилием с помощью крючка, как показано на рис. 2.



$$F = F_1 + F_2$$

при  $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$

Рис. 2. Испытание на прочность перемычек тянущим усилием с помощью крючка

Зависимость прочности соединений от мощности УЗ показана на рис. 3.

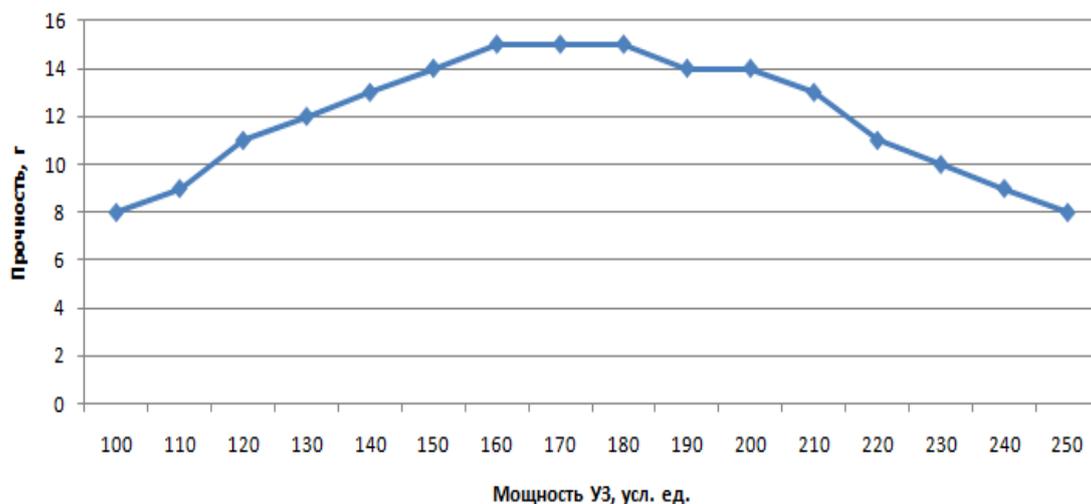


Рис. 3. Зависимость прочности соединения от мощности УЗГ

Анализ данных показал, что для данной проволоки большая прочность будет достигаться при следующих параметрах микросварки: мощность 150 – 190 усл. ед.; длительность воздействия импульса  $\geq 100$  мс.

Таким образом, получены данные для эффективной настройки технологического процесса, что позволит улучшить прочность получаемых соединений и, соответственно, их качество.

## ИНДУКЦИОННАЯ ПАЙКА СИЛОВЫХ ДИОДОВ АВТОЭЛЕКТРОНИКИ

В.Л. ЛАНИН, В.Т. ХОТЬКИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
vlanin@bsuir.by*

Широкое применение силовых диодов в автотракторной технике приводит к необходимости автоматизации процесса их производства. В этой связи большой интерес представляет исследование бесконтактного индукционного нагрева, при монтаже кристалла и внешнего вывода силового диода, что позволит снизить издержки производства.

*Ключевые слова:* силовой диод, индукционная пайка, моделирование, автоэлектроника.

Силовая электроника первоначально возникла как область техники, связанная преимущественно с преобразованием различных видов электроэнергии на основе использования электронных приборов. В дальнейшем достижения в области полупроводниковых технологий позволили значительно расширить функциональные возможности, силовых электронных устройств и соответственно области их применения. В автоэлектронике широко применяются диоды Д104 (рис. 1, а), которые выпускаются с полупроводниковым элементом в цилиндрическом корпусе с рифленой поверхностью для запрессовки в теплоотвод с внешним гибким и жестким выводами.

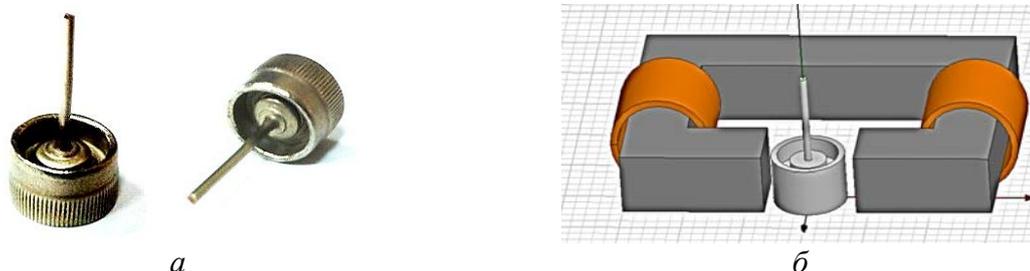


Рис. 1. Силовой диод Д104: а – общий вид; б – схема индукционной пайки силового диода

Индукционный нагрев переменным электромагнитным полем позволяет осуществлять с высокой производительностью различные технологические процессы: термообработку, плавку, сварку, пайку, выращивание кристаллов и т.д. Вихревые токи в расплавах вызывают пондеромоторные силы, которые улучшают растекание по паяемым поверхностям и перемешивают многофазные структуры в жидких средах. Индукционное устройство, применяемое для монтажа кристалла диода в корпус, представлено на рис. 1, б.

Получено распределения тепла при нагреве силового диода Д104 магнитным полем С-образного индуктора в пакете Comsol Multiphysics. Общая методика анализа включает: создание геометрической модели, задание свойств материала, задание граничных условий, разбиение на конечные элементы, просмотр и анализ результатов. Модель распределения температур основания и внешнего вывода диода представлена на рис. 2. Анализ модели показал, что при нагреве корпуса диода в С-образном индукторе в течение 20 с наблюдается неравномерность нагрева порядка 1–2 °С.

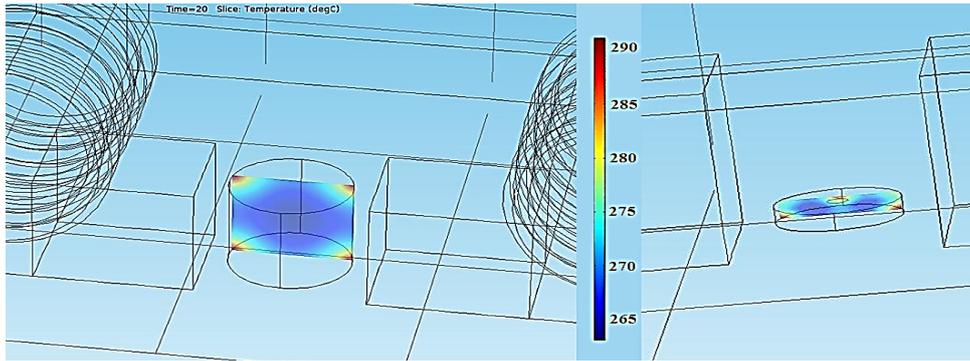


Рис. 2. Модель распределения температур основания и внешнего вывода диода

Индукционное устройство на С-образном магнитопроводе применено для запайки кристалла силового диода в металлический корпус. Поверхность кристалла предварительно металлизирована напылением, в качестве припоя использовался бессвинцовый припой ПОМ-3. Индукционная пайка проводилась при значениях тока в катушке возбуждения: 6 и 10 А, частота при этом равнялась 33 кГц. Время пайки при  $I = 6\text{ А}$  составило 50с, при  $I = 10\text{ А}$  - 28с.

На графиках (рис. 3) в области 215 °С видна ступенька фазового перехода, вызванная поглощением удельной теплоты плавления при расплавлении припоя. Нагрев проводился до температуры 240 °С, затем диод охлаждался потоком воздуха от вентилятора. Таким образом, индукционное устройство на магнитопроводе может с успехом применяться для запайки кристалла силового диода в металлический корпус. Результаты моделирования подтверждают практические исследования пайки на 85–90%.

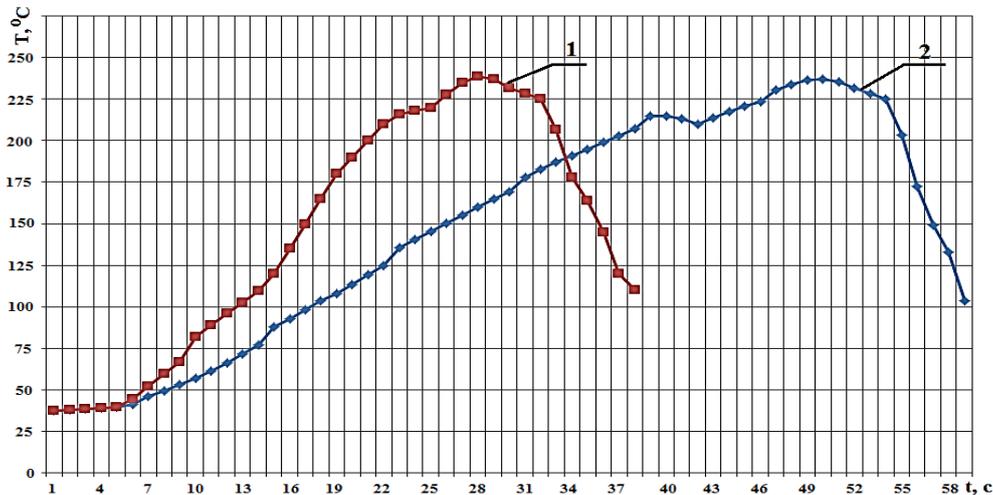


Рис. 3. Температурный профиль пайки: 1 –  $I = 6\text{ А}$ ; 2 –  $I = 10\text{ А}$

Устройство индукционного нагрева на магнитопроводе может с успехом применяться для запайки массивных элементов на печатную плату, а также для корпусирования изделий интегральной электроники. Применение С-образного индукционного устройства для пайки небольших элементов нецелесообразно ввиду небольшого коэффициента перекрытия ими зазора магнитопровода и необходимости создания электрических связей между контактными площадками, что не всегда возможно.

## ОПТИКО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСИРОВАННОГО РАЗРЯДА В СВЧ ПЛАЗМОТРОНЕ НА БАЗЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОГО АППЛИКАТОРА

С.В. БОРДУСОВ, М.С. ЛУШАКОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
bordusov@bsuir.by*

Представлены результаты экспериментов по исследованию оптических характеристик комбинированного разряда. Исследованы зависимости интенсивности свечения комбинированного разряда от давления плазмообразующих газов и коэффициента поглощения от подаваемого на электрод НЧ напряжения.

*Ключевые слова:* комплексированный разряд, плазма, оптико-спектроскопические характеристики, плазмотрон, СВЧ, НЧ.

Одной из разновидностей СВЧ разряда является комплексированный разряд, формируемый путем наложения на СВЧ разряд электромагнитного поля низкочастотного (НЧ) или высокочастотного (ВЧ) диапазона [1].

Одной из характеристик неравновесной плазмы газового разряда является ее оптическое излучение, определяемое режимами поддержания разряда [1]. Интенсивность оптического излучения зависит от мощности разряда, распределения электрических полей, наличия и величины магнитного поля давления газа, состава и расхода компонентов плазмообразующей смеси, энерговыклада и т. д. С целью выявления характерных эффектов взаимодействия СВЧ поля с комплексированным разрядом проводилось изучение интегральной оптической характеристики процесса формирования и поддержания такого разряда.

Эффективность поглощения СВЧ энергии плазмой комплексированного разряда определялась по величине коэффициента отражения СВЧ волны от плазменной нагрузки путем измерения мощности падающей и отраженной СВЧ волны.

В качестве СВЧ генератора использовался магнетрон с частотой генерации 2,45 ГГц, питаемый высоковольтным импульсным напряжением частотой 50 Гц.

Регистрация оптического эмиссионного спектра плазмы газового разряда осуществлялась с помощью спектрометра SL 40-2-2048 ISA, который имеет в своем составе два спектрографа. В спектрометре используется оригинальная вертикально-симметричная оптическая схема. Она имеет низкий уровень рассеянного света, обеспечивающий получение высокого качества изображения на плоском поле, позволяющий использовать фотоэлектрические линейки и матрицы для регистрации спектра.

Проведенные исследования показали, что характерной особенностью комплексированного разряда является более высокая стабильность повторения оптических сигналов в исследуемом диапазоне частот по сравнению с разрядом под действием СВЧ энергии. Характерные зависимости амплитуды оптического сигнала для диапазона давлений показаны на рис. 1.

При проведении исследований установлено, что в случае воздействия СВЧ и НЧ полей интенсивность оптического излучения плазменного образования возрастала (рис.1). Из зависимостей хорошо видно, что интенсивность свечения комплексированного разряда превышает аналогичные характеристики отдельно НЧ и СВЧ разрядов.

Исключение составляет свечение СВЧ разряда в узком диапазоне давлений  $\sim(10 - 15)$  Па, что обусловлено низким отражением СВЧ энергии от плазменной нагрузки.

Экспериментально установлено, что характер взаимодействия возбуждающего плазму СВЧ сигнала зависит не только от давления плазмообразующих газов, но и от величины подаваемого на потенциальный электрод напряжения. При этом коэффициент поглощения СВЧ сигнала в разряде имеет характерные минимальные значения в узких диапазонах величин возбуждающего разряд НЧ напряжения (рис. 2).

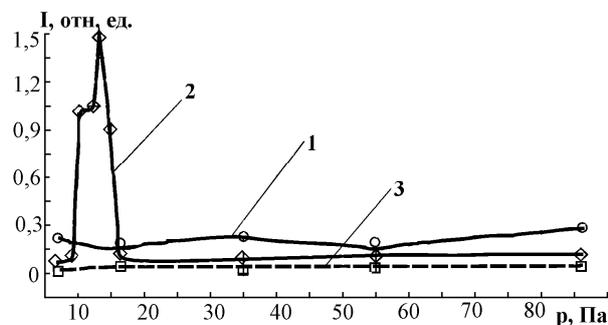


Рис. 1. Оптические сигналы разрядов в воздухе: 1 – СВЧ + НЧ; 2 – СВЧ; 3 – НЧ

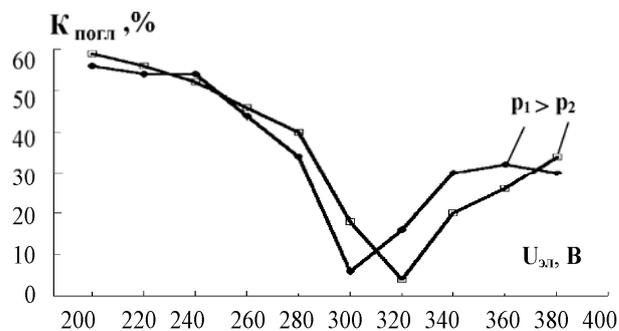


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения  $K_{\text{погл}}$  от НЧ напряжения на электроде при  $p_1 = 133$  и  $p_2 = 90$  Па воздуха

С повышением давления плазмообразующего газа наблюдается сдвиг этих значений в сторону более низких величин подводимого к потенциальному электроду НЧ напряжения. Характерные зависимости представлены на рис. 2. Этот эффект может быть объяснен тем, что при определенных разрядных условиях происходит существенное рассогласование эквивалентного волнового сопротивления разрядного устройства и характеристического сопротивления волноводного тракта.

Уменьшение величины  $K_{\text{погл}}$  с ростом подаваемого на электрод НЧ напряжения связано с повышением плотности плазмы (т. е. концентрации электронов в разряде), в результате чего происходит увеличение отраженной от плазмотрона СВЧ мощности.

Таким образом, представленные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о том, что в объеме плазмы комплексированного разряда протекают сложные явления, связанные с формированием и поддержанием разряда. Установлено также, что на условия поглощения СВЧ энергии в случае комплексированного разряда существенное влияние оказывают характеристики плазменной нагрузки.

#### Список литературы

1. Бордусов С.В. Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники. Минск, 2002.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ

В.Л. ЛАНИН, В.Г. ЛЕВИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
vlanin@bsuir.by*

Постоянное развитие электроники требует совершенствования технологии сборки электронных модулей на современных электронных компонентах. Перспективным является применение методов нагрева деталей и материалов, основанных на бесконтактных технологиях. Приведены результаты исследования температурных профилей индукционного нагрева при пайке деталей электронных модулей с поверхностно-монтируемыми электронными компонентами.

*Ключевые слова:* магнитопровод, индукционная пайка, Comsol Multiphysics, скин-эффект, кольцевой индуктор, SMD-компоненты.

Прогресс в технологии РЭС достигается сейчас совершенствованием инструментов, оборудования, используемых материалов, а также путём разработки новых, более эффективных технологических процессов. Перспективным является применение методов нагрева деталей и материалов, основанных на бесконтактных технологиях с использованием кольцевого индуктора или магнитопровода. Но не только выбор технологии определяет эффективность процесса пайки. Также важно составляющей является контроль технологических параметров пайки с помощью контроллеров и других внешних вычислительных устройств.

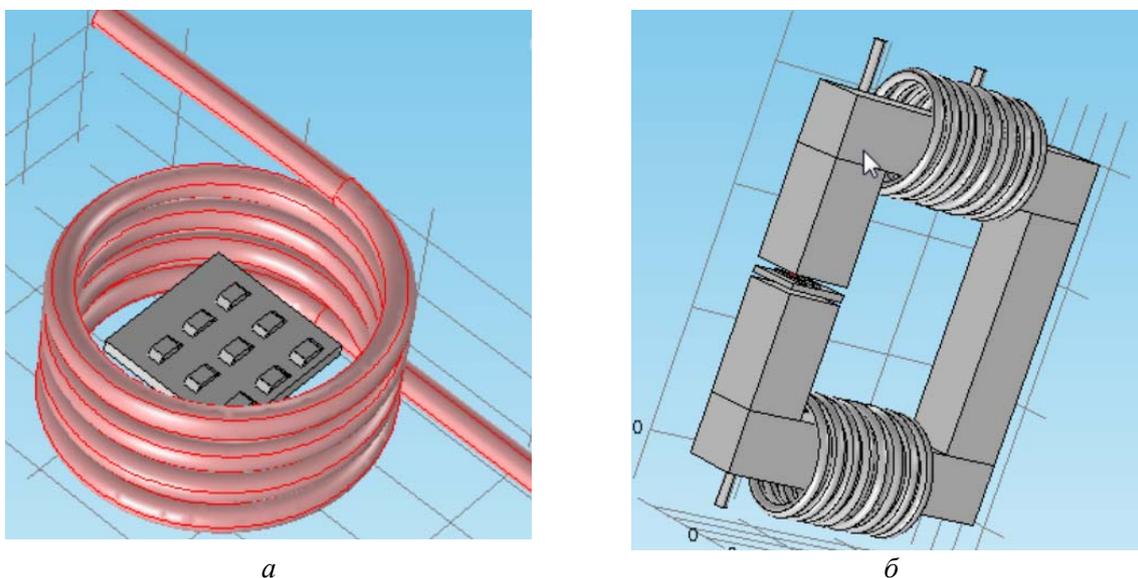


Рис. 1. Устройства индукционного нагрева с: *а* – кольцевым индуктором;  
*б* – с магнитопроводом

Моделирование в Comsol Multiphysics позволяет подобрать наиболее оптимальные параметры пайки и таким образом оптимизировать все параметры технологиче-

ского процесса, после чего с помощью ЭВМ можно задать данные параметры и произвести наиболее оптимальную пайку.

Снятые при моделировании параметры затем передавались устройству контроля. Контроль и измерение параметров проводились по схеме на рис. 2.

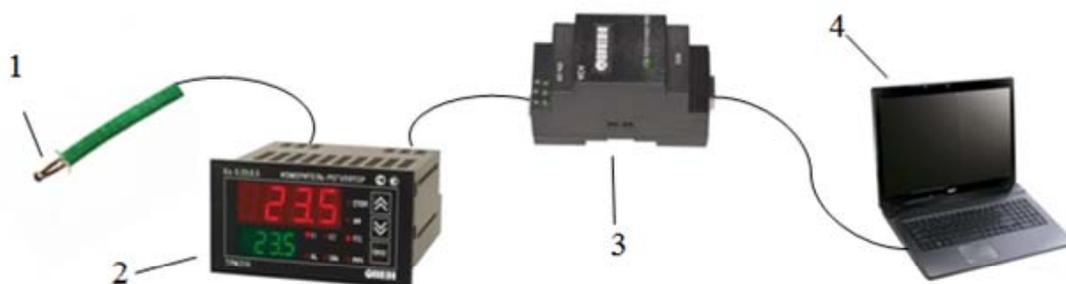


Рис. 2. Структурная схема измерения температуры: 1 – датчик температуры; 2 – измеритель-регулятор ТРМ210; 3 – автоматический преобразователь интерфейса АС4; 4 – портативный компьютер

На графиках (рис. 3) изображены термопрофили индукционной пайки, снятые с помощью измерителя-регулятора ТРМ210 и портативного компьютера.

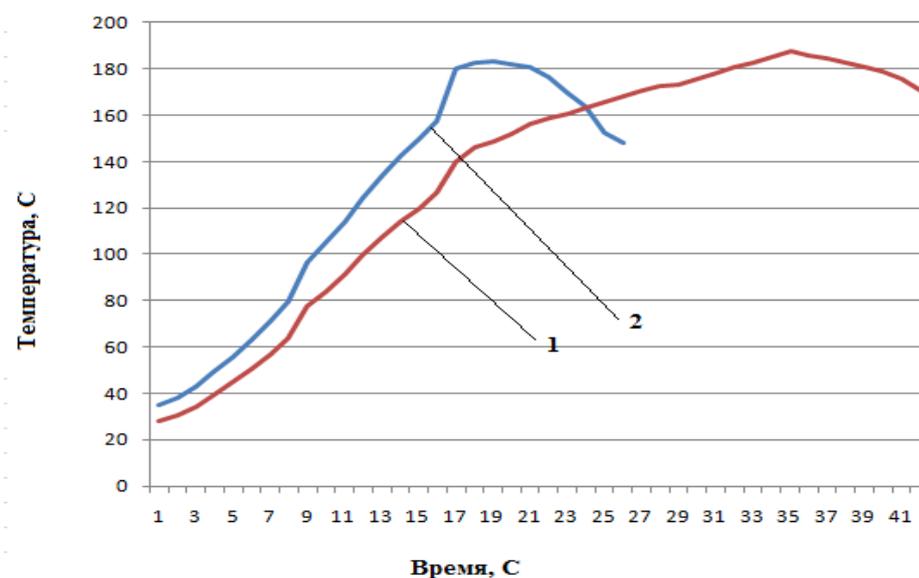


Рис. 3. Термопрофили индукционной пайки: 1 – с магнитопроводом; 2 – без магнитопровода

Анализ графических зависимостей показал, что нагрев с помощью устройства на магнитопроводе намного эффективнее обычного кольцевого индуктора. Время пайки сократилось на 14 секунд, эффективность нагрева выросла на 40–45%.

Таким образом, можно эффективно контролировать процесс пайки и заменить крупногабаритную и относительно дорогостоящую компьютерную технику микроконтроллерами. Одним из решений является использование миникомпьютеров, которые по функциональности не уступают обычным компьютерам, но при этом имеют несравнимо меньшие габариты и стоимость.

## НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА МЕТОДОМ ВЧ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

М.В. ЕВСТАФЬЕВА, Д.А. ГОЛОСОВ, С.М. ЗАВАДСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
szavad@bsuir.by*

В последнее время бурное развитие микроэлектроники поставило перед технологами новую проблему – необходимость поиска новых диэлектрических материалов для создания конденсаторных структур. Одним из перспективных решений является использование в качестве диэлектриков сегнетоэлектрических материалов.

*Ключевые слова:* сегнетоэлектрики, цирконат-титанат свинца, ВЧ магнетронное распыление.

Среди материалов для интегрированных сегнетоэлектриков основное место занимают твердые растворы титаната бария стронция и цирконата-титаната свинца, цирконата-титаната свинца-лантана, обладающие, с точки зрения практических приложений, наилучшими характеристиками. Одним из базовых материалов для таких применений являются твердые растворы цирконата-титаната свинца (ЦТС).

Структуры Pt/ЦТС/Pt могут быть использованы как сегнетоэлектрические конденсаторы для сегнетоэлектрической памяти с произвольной выборкой (ferroelectric random access memory (FeRAM)) для ряда устройств функциональной электроники, таких как пьезоэлектрические детекторы, устройства энергонезависимой и динамической памяти с произвольной выборкой (RAM), конденсаторов высокой емкости, микроактюаторов, приемников инфракрасного излучения и др. [1].

В данной работе исследовались пленки ЦТС, полученные методом ВЧ магнетронного распыления сегнетоэлектрической керамики состава  $\text{PbZr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46}\text{O}_3$ . В ходе проведения эксперимента камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления  $1.5 \times 10^{-2}$  Па. Предварительно производилась очистка подложек ионным пучком. Время очистки, энергия ионов и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли соответственно 3 мин, 700 эВ, 40 мА.

Были получены зависимости скорости нанесения слоев ЦТС от процентного содержания кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов. Пленки наносились при следующих условиях: общий расход рабочих газов поддерживался постоянным и составлял 60 мл/мин. Содержание кислорода изменялось от 0 до 50 %. При этом давление в камере составляло 0.8 Па. Прямая мощность поддерживалась постоянной и составляла 75 или 130 Вт. Мощность отраженной волны зависела от содержания кислорода и составляла 4 – 11 Вт. Расстояние мишень – подложка составляло 77 мм. В процессе нанесения температура подложки составляла от 100 °С до 500 °С. Установлено, что скорость нанесения уменьшается при увеличении содержания кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов. При мощности разряда 130 Вт и содержании кислорода 30 % в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов скорость нанесения составляла 0.05 нм/с.

Для исследований влияния параметров процесса ВЧ магнетронного распыления на элементный состав нанесенных слоев ЦТС пленки наносились на Si подложки до толщины 400 – 600 нм. Для распыления использовалась мишень, изготовленная из исходного промышленного порошка ЦТС-46. Элементный состав нанесенных пленок

анализировался методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА). На рис. 1 представлен типичный спектр рентгеновской флуоресценции пленок ЦТС на Si подложке.

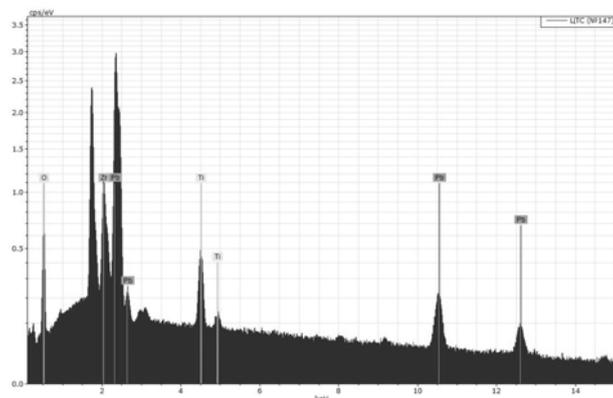


Рис. 1. Спектр рентгеновской флуоресценции пленок ЦТС на Si подложке

На рис. 2 представлена зависимость атомной концентрации элементов в нанесенной пленке от содержания кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов. В составе стехиометрической пленки должно присутствовать Pb – 20 ат. %, Zr – ат. 10.8 %, Ti – ат. 9.2 % и O<sub>2</sub> – 60 ат. %. Анализ элементного состава нанесенных слоев показывает, что в пленках наблюдается недостаток свинца (содержание около 2 – 5 ат. %), и недостаток Zr (содержание около 10 – 15 ат. %). Содержание кислорода в нанесенных пленках превышает содержание в исходной мишени, даже при содержании кислорода около 17 % в Ar/O<sub>2</sub> газов.

При увеличении содержания кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов отмечено уменьшение содержания Pb увеличение содержания циркония относительно титана. Содержание свинца в нанесенных пленках практически не зависит от процентного содержания кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов.

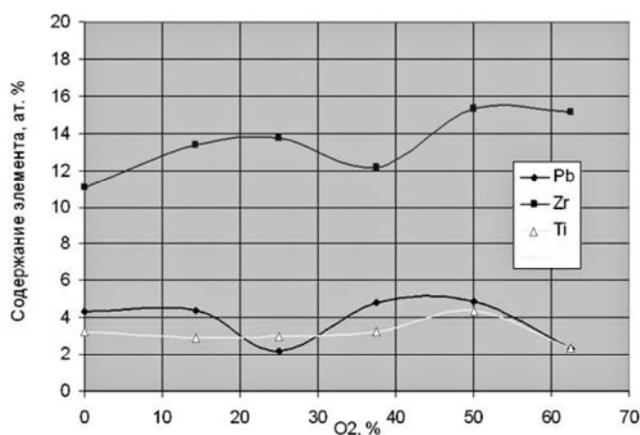


Рис. 2. Зависимость атомной концентрации элементов в нанесенной пленке ЦТС от содержания кислорода в Ar/O<sub>2</sub> смеси газов

#### Список литературы

1. Тентилова И.Ю., Кукишин С.А., Каптелов Е.Ю. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 4. С. 37-43.

## ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СЕРЕБРО-ВОЛЬФРАМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА

Н.В. БОГУШ, Л.К. КУШНЕР, А.А. ХМЫЛЬ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
kushner@bsuir.by

Для получения новых контактных материалов с высокой эрозионной стойкостью, возможно использование электрохимических покрытий на основе высокопроводящего металла серебра и тугоплавких металлов. В этой связи большой интерес представляют покрытия серебра с вольфрамом, осажденные электрохимическим методом при воздействии ультразвука.

*Ключевые слова:* композиционные покрытия, ультразвук, оксид вольфрама.

Среди тонких пленок, обеспечивающих высокое качество и стабильность свойств изделий во время их эксплуатации, выделяются электрохимические покрытия на основе благородных металлов. Однако их использование в качестве контактных покрытий ограничивается дефицитностью, дороговизной, низкой твердостью и износостойкостью. Поэтому актуальным является разработка новых направлений рационального использования благородных металлов, поиск новых материалов и условий их формирования.

Для соосаждения серебра и вольфрама использован сульфатноаммиачный электролит, содержащий 35 г/л  $\text{AgNO}_3$ , 170 г/л  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 1,5-35 г/л  $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$  (25 %). Для нанесения покрытий использовали ультразвуковую установку УЗГ53-22, работающую в диапазоне частот 22-27 кГц.

Исследования с помощью рентгеновского флуоресцентного анализа (РФА) показали, что в зависимости от концентрации вольфрама в электролите (и в осадке) обнаружены фазы гексагонального серебра, видимо, стабилизированного вольфрамом, смешанного оксида вольфрама и серебра (рис. 1).

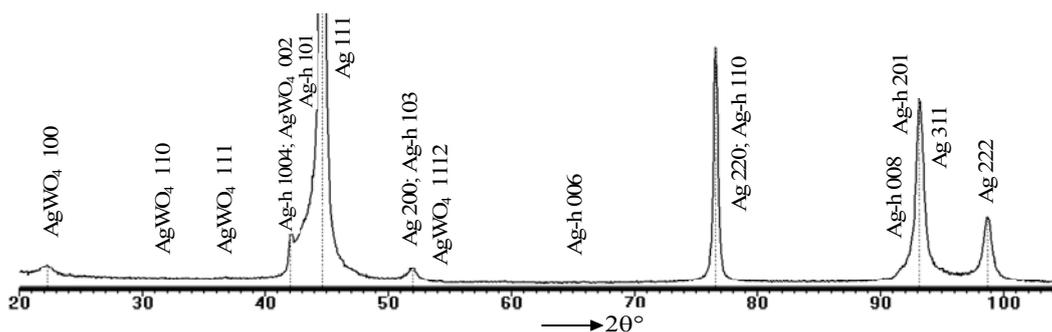


Рис. 1. РФА покрытия серебро-вольфрам (3,5 г/л  $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $i_k=0,7$  А/дм<sup>2</sup>)

Аналогичные результаты получены при исследовании химически осажденных покрытий серебро-вольфрам [1]. Исследование элементного состава пленок Ag-W методами РФА и энергодисперсионного (ЭДХ) микроанализа показало, что они содержат главным образом серебро, вольфрам и кислород (табл. 1). Показано, что вольфрам при-

существует в пленке главным образом в форме  $WO_x$ . Атомная концентрация кислорода приблизительно в 3 раза больше чем вольфрама.

Как показали проведенные исследования, состав композиционных покрытий зависит от содержания в электролите растворимой соли вольфрама и режима электролиза. С увеличением концентрации вольфрамата натрия в электролите с 1,5 до 35 г/л его содержание в осадке возрастает от 0,85 до 2,23 масс. %.

Табл. 1. Результаты ЭДХ-спектроскопического исследования элементного состава серебряных покрытий

Концентрация $Na_2WO_4 \times 2H_2O$ , г/л	Интенсивность ультразвука, Вт/см <sup>2</sup>	Элементный состав покрытия					
		Ag		W		O	
		масс. %	ат. %	масс. %	ат. %	масс. %	ат. %
0	0	99,29	95,38	00,00	00,00	0,71	4,62
3,5	0	98,24	93,84	0,88	0,49	0,88	5,67
9	0	97,44	92,54	1,53	0,85	1,03	6,60
3,5	0,56	98,35	93,84	0,76	0,43	0,89	5,74
3,5	1,28	96,89	89,89	1,63	0,89	1,47	9,22

Исследовано влияние ультразвука на формирование композиционных покрытий серебро-вольфрам в сульфатноаммиачном электролите серебрения. Электроосаждение в ультразвуковом поле показало, что с ростом интенсивности ультразвука происходит увеличение содержания вольфрама и кислорода в осадке и уменьшение размера зерна (рис. 2).

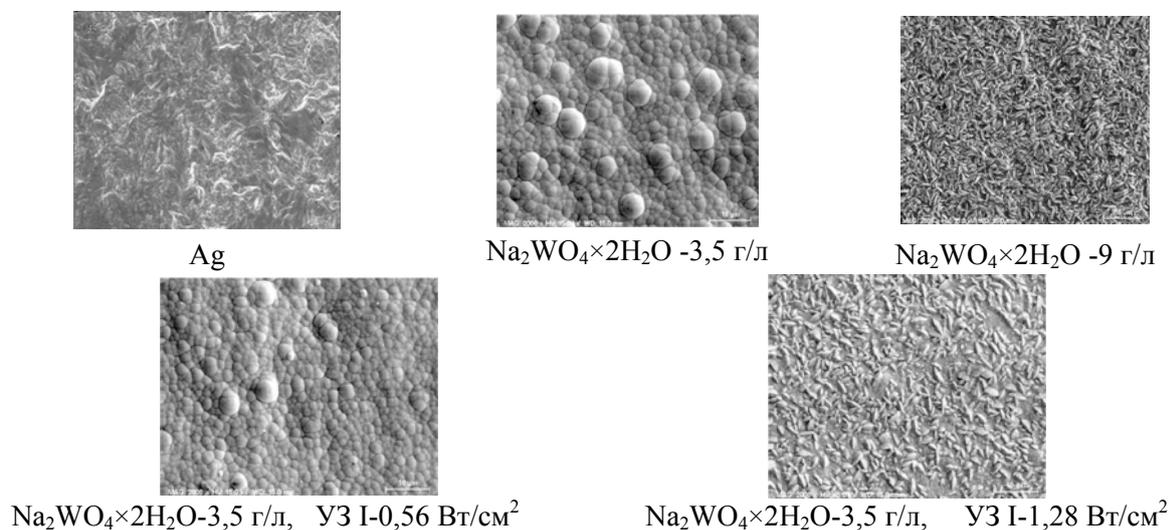


Рис. 2. Микроструктура покрытий, полученных при различных условиях электролиза

#### Список литературы

1. Inberg A., Bogush V., Croitoru N. et. al // The Journal of Electrochemical Society. 2003. № 150 (5). P. C285-C291.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОВЫШЕНИЯ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СИЛЬНО РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ПО ЧАСТОТЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ

А.В. КРАСОВСКИЙ, А.В. КОТУХОВ, Н.В. ДЕЖКУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
dny@bsuir.by*

В настоящее время ультразвук применяется довольно широко для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях является. Общеизвестно, что ключевым фактором при этом является кавитация – явление образования, роста и захлопывания микропузырьков в жидкости [1].

*Ключевые слова:* кавитация, интенсивность ультразвука, звуколюминесценция, гидродинамика.

В работах [2-4] показано, что воздействие низкочастотным (НЧ) ультразвуком на кавитационную область, генерируемую высокочастотным (ВЧ) полем, является эффективным методом повышения активности кавитации. В частности, во взаимодействующих ВЧ и НЧ полях с частотами  $f_1$  и  $f_2$  наблюдалось сверхддитивное усиление звуколюминесценции (ЗЛ). Если используется импульсно модулированное ВЧ поле, то интенсивность ЗЛ в комбинированном поле, создаваемом одновременно работающими ВЧ и НЧ излучателями, во много раз превосходит сумму интенсивностей ЗЛ, генерируемых при работе каждого из излучателей в отдельности [2].

Очевидный механизм усиления ЗЛ во взаимодействующих полях - это увеличение суммарной энергии, вводимой в жидкость при работе двух излучателей и интерференция полей. Возможными механизмами являются также следующие.

1. Возникновение комбинационных частот  $f_1+f_2$  и  $f_1-f_2$  и расширение в результате этого спектрального состава результирующего поля, что может приводить к расширению диапазона размеров пузырьков, вовлекаемых в кавитационный процесс.

2. Уменьшение порога ВЧ кавитации в течение полупериода разрежения НЧ поля (которое является квазистатическим по отношению к ВЧ полю) и увеличение в результате числа пузырьков, кавитирующих под действием ВЧ поля.

3. Подавление процесса кластеризации кавитационной области. Известно, что одной из основных причин уменьшения эффективности концентрации энергии пузырьками в составе кавитационной области является воздействие пузырьков друг на друга посредством ударных волн или за счёт гидродинамических сил. Наиболее сильно взаимодействуют пузырьки в составе устойчивых образований – кластеров. Возможно, что большие пузырьки, генерируемые НЧ полем, оказывают сильное воздействие на кластеры ВЧ пузырьков, препятствуя их образованию и увеличивая однородность распределения пузырьков по объему кавитационной области. За счет этого могут обеспечиваться более оптимальные условия для захлопывания полостей и повышаться активность кавитации.

4. Кавитирующие пузырьки при захлопывании, как известно, распадаются на мелкие части. Число образующихся при этом фрагментов (осколков), может достигать 10 и более. Фрагменты пузырька, захлопнувшегося под действием НЧ поля могут быть подходящими зародышами для кавитации в ВЧ поле. Поскольку эти новые зародыши

содержат гораздо меньше воздуха, чем пузырьки, стабильно существующие в жидкости, то они и захлопываются в ВЧ поле с большей скоростью.

В данной работе эксперименты проводились на частотах 21,7 кГц (НЧ) и 880 кГц (ВЧ). Рабочая емкость установки выполнена в виде цилиндра из нержавеющей стали с полыми водоохлаждаемыми стенками внутренним диаметром 120 мм и длиной 180 мм. ВЧ излучатель вмонтирован в дно емкости, НЧ излучатель - на боковой поверхности емкости на уровне фокального пятна ВЧ излучателя. На уровне фокального пятна установлен фотоумножитель.

На рис. 1 представлены результаты одновременной регистрации выходного сигнала Н гидрофона (верхняя осциллограмма) и сигнала фотоумножителя L (нижняя осциллограмма). Время работы НЧ и ВЧ излучателей отмечено закрашенными участками соответственно верхней и нижней полос над рисунком.

Особенность экспериментов, выполненных в данной работе, состоит в том, что воздействия НЧ и ВЧ полей на жидкость разнесены во времени. Установлено, что если интенсивность НЧ поля выше порога кавитации, то усиление интенсивности ЗЛ, генерируемой ВЧ полем, имеет место и в том случае, когда ВЧ поле включается через некоторый промежуток времени  $\Delta t$  после отключения НЧ поля. Таким образом, наблюдается своего рода эффект последствия НЧ поля на кавитацию, генерируемую ВЧ полем.

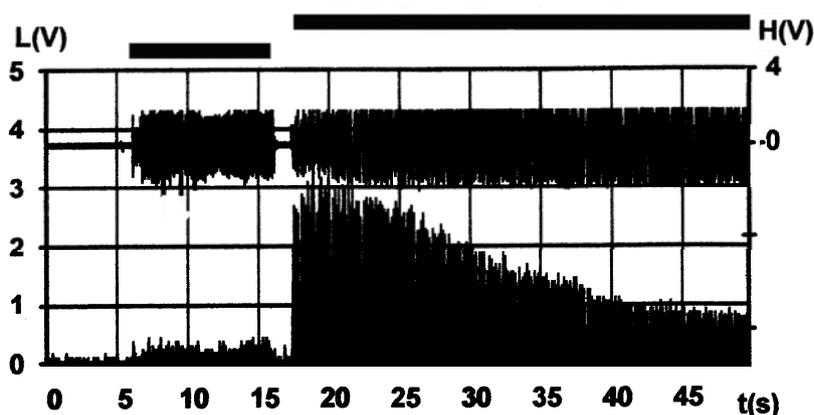


Рис. 1. Осциллограммы выходных сигналов гидрофона Н (верхняя) и фотоумножителя L (нижняя)

Этот результат позволяет считать, что основным фактором при взаимодействии сильно различающихся по частоте ультразвуковых поле является генерирование новых зародышей кавитации при захлопывании пузырьков. После отключения НЧ поля они сокращают свои размеры за счет диффузии газа из пузырька в окружающую жидкость. В результате количество кавитирующих под действием ВЧ поля пузырьков уменьшается, что приводит к соответствующему уменьшению интенсивности ЗЛ.

#### Список литературы

1. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация. Наука. М. 2008.
2. Дежкунов Н.В. // Письма в Журнал технической физики. 2001. Т 12, № 27. С. 15-22.
3. Дежкунов Н.В. // Инженерно-физический журнал. 2003. Т 76, № 1. С. 120-127.
4. Дежкунов Н.В., Томаль В.С., Ланин В.Л. и др. // Научно-технический журнал ОА КОНТЕНАНТ. 2013. Т 12, № 4. С. 22-27.

## УСТАНОВКА СУШКИ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА

В.П. ВАСИЛЕВИЧ, А.А. КОСТЮКЕВИЧ, А.И. ЕМЕЛЬЯНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
kostukevich@bsuir.by*

Сушка пищевых продуктов широко применяется одна из технологий консервации, гарантирующая длительное их хранение. Продукты, высушенные и герметично упакованные, могут храниться несколько лет в неконтролируемых температурных условиях. В этой связи большое внимание уделяется разработке новых высокопроизводительных энергосберегающих установок сушки, обеспечивающих сохранение потребительских качеств высушиваемых продуктов.

*Ключевые слова:* сушка, установка сушки, сушильный агент, влага.

Пищевые продукты в процессе хранения претерпевают различные микробиологические, биохимические и ферментативные изменения, которые приводят к их порче. Одним из средств подавления роста микроорганизмов и ферментативной активности является удаление влаги путем естественной или искусственной сушки. Влажные пищевые продукты, подвергаемые сушке, состоят из твердого сухого каркаса, воды, небольшого количества воздуха и паров. Процесс удаления влаги сопровождается изменением физико-химических показателей продукта, его теплофизических характеристик и структурно-механических свойств. Продукты растительного происхождения, как объект сушки, характеризуется большим количеством воды и малым содержанием сухих веществ. Основная часть воды находится в свободном виде и только около 5 % связано с клеточными коллоидами и прочно удерживается. Этим объясняется легкость высушивания плодовоовощного сырья до влажности 12–14 % и затрудняется удаление остаточной влаги. Свободная влага не связана с молекулами вещества, может свободно перемещаться из клетки в клетку. Она используется для питания и поддержания жизнедеятельности клетки. Связанная влага образуется в результате взаимодействия с молекулами вещества и характеризуется следующими физико-химическими свойствами:

- слабо, либо совсем не растворяет вещества, которые растворимы в свободной воде;
- имеет удельную теплоемкость ниже обычной и примерно равной теплоемкости льда;
- замерзает при низких отрицательных температурах
- обладает повышенной плотностью по сравнению со свободной влагой;
- не электропроводна, в отличие от чистой воды, так как не содержит растворенных веществ.

Продукты растительного происхождения имеют капиллярно-пористую структуру. Химический состав его представлен углеводами, белками, липидами. В небольших количествах содержатся биологически активные вещества, которые определяют вкус и биологическую ценность сырья: полифенолы, витамины, органические кислоты, минеральные вещества. Эти компоненты наиболее подвержены неблагоприятным изменениям при подготовке материала к сушке, а также в процессе самой сушке, что и приводит к снижению биологической ценности готового продукта.

Таким образом, пищевые продукты представляют собой сложный структурный объект сушки и обезвоживание его без загрязнений и потерь пищевых качеств является очень трудной задачей.

На рис. 1 приведена комбинированная схема предлагаемой сушильной установки, соответствующей вышеперечисленным требованиям.

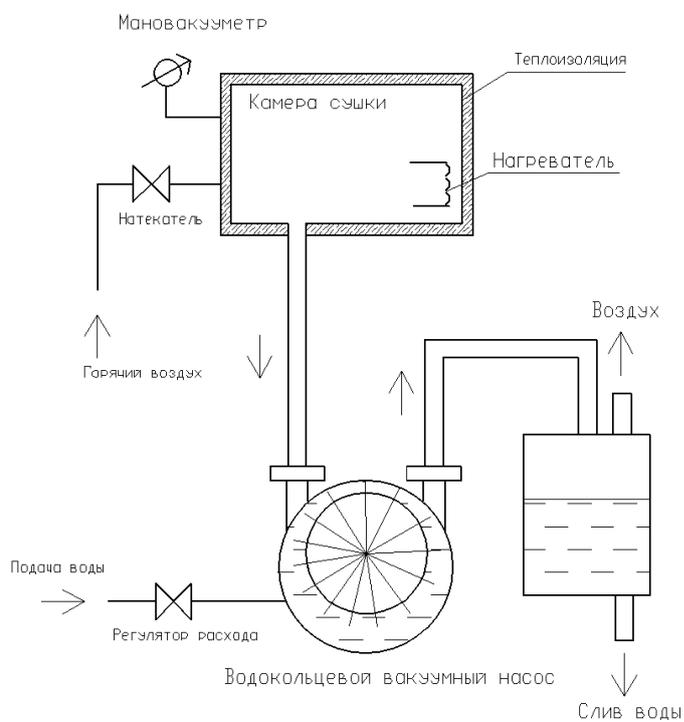


Рис. 1. Схема сушильной установки

Работа установки заключается в следующем. Отфильтрованный воздух, нагретый с помощью ИК модуля до температуры сушки 55–65 °С, через регулируемый натекаТЕЛЬ подаётся в теплоизолированную камеру сушки. В камере с помощью водокольцевого вакуумного насоса создается необходимое давление и скорость потока сушильного агента. Потери тепла по тракту подачи агента компенсируются внутренним нагревателем, находящимся в камере сушки. С его помощью осуществляется также предварительный прогрев высушиваемого продукта до температуры сушки. Производительность вакуумного насоса должна быть достаточной для поддержания скорости потока воздуха и заданного пониженного давления (100–900 мбар) в условиях активного паро-выделения с высушиваемого продукта. Давление в камере измеряется моновакууметром с точностью  $\pm 10$  мбар.

Пары влаги с высушиваемого продукта частично конденсируются в водокольцевом насосе, смешиваются с рабочей жидкостью насоса и поступают в слив, а частично удаляются с сушильным агентом в атмосферу. Для удаления связанной влаги (второй период сушки) скорость потока сушильного агента и давление в камере могут корректироваться в сторону снижения. Чистота процесса сушки обеспечивается применением бесконтактного радиационного метода нагрева сушильного агента высушиваемого продукта, а также создания пониженного давления и потока сушильного агента с помощью вакуумной системы на основе водокольцевого насоса.

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.П. ВАСИЛЕВИЧ, А.А. КОСТЮКЕВИЧ, А.И. ЕМЕЛЬЯНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
kostukevich@bsuir.by*

Сушка - одна из широко применяемых технологий в различных сферах деятельности человека: в пищевой промышленности, фармацевтике, машиностроении, быту и т. п. В этой связи большой интерес представляет исследование методов интенсификации процесса сушки при сохранении потребительских качеств высушиваемых продуктов, что позволит снизить издержки производства.

*Ключевые слова:* сушка, кривая сушки, сушильный агент, влага.

В процессе сушки влажных материалов происходят взаимосвязанные процессы внутреннего и внешнего тепло - и массообмена между материалом и сушильным агентом. Наружные процессы характеризуются испарением влаги с поверхности материала в окружающее пространство и внешним теплообменом между нагретым сушильным агентом и поверхностью материала. При испарении влаги с поверхности нарушается равновесие. Внутренние части продукта имеют более высокую влажность и, соответственно, более низкую температуру по сравнению с поверхностными слоями. За счет разности влагосодержания поверхностных и внутренних слоев возникает градиент влагосодержания. Это приводит к процессам внутреннего тепло - и массообмена, при которых происходит перемещение влаги из внутренних, более влажных слоев, к поверхностным. На перемещение влаги внутри продукта влияет также и термодиффузия, которая обусловлена перепадом температур. Под ее влиянием влага перемещается от участков с более высокой температурой к участкам с более низкой температурой.

Процесс сушки описывается временной зависимостью изменения влагосодержания  $W(\tau)$ , которая называется кривой сушки (рис. 1) и имеет три характерных периода: период подогрева продукта, период постоянной скорости сушки и период падающей скорости сушки.

В период подогрева продукта (участок  $AB$  кривой сушки) влагосодержание изменяется незначительно. Этот период можно выделить при низкотемпературных режимах сушки продуктов.

Период постоянной скорости сушки (участок  $BC$  кривой сушки) характеризуется постоянной скоростью снижения влагосодержания и температурой материала. В этот период удаляется преимущественно свободная влага, и интенсивность процесса определяется только параметрами сушильного агента и не зависит от влагосодержания и физико-химических свойств продукта. Этот период продолжается до наступления критического влагосодержания (точка  $C$  на кривой сушки).

В периоде падающей скорости сушки (участок  $CD$  кривой сушки) скорость сушки уменьшается по мере снижения влагосодержания продукта. Температура продукта увеличивается и к концу периода приближается к температуре сушильного агента. Процесс сушки продолжается до достижения равновесного влагосодержания, после этого удаление влаги прекращается. В этот период удаляется связанная влага, и постепенное снижение скорости сушки объясняется увеличением энергии связи влаги с материалом. В этот период процесс удаления влаги зависит от влагосодержания, характе-

ра связи влаги с материалом, физико-химических свойств материала и параметров сушильного агента.

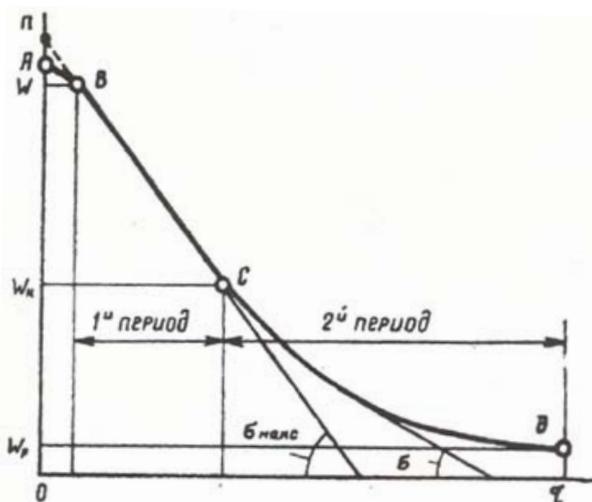


Рис. 1. Кривая сушки

Основные технологические факторы, влияющие на процесс сушки это: температура, скорость движения, влажность и давление сушильного агента.

Увеличение температуры сушильного агента приводит к ускорению процесса сушки. Допустимые температуры зависят от вида материала и способа сушки.

Скорость потока сушильного агента оказывает влияние на скорость сушки только в периоде постоянной скорости сушки. Чем выше скорость потока, тем выше скорость сушки. В конце сушки скорость потока не оказывает существенного влияния на скорость сушки.

При постоянной температуре и скорости сушильного агента снижение скорости сушки на начальном этапе прямо пропорционально увеличению относительной влажности сушильного агента. Затем эта зависимость уменьшается и снова возрастает на конечном этапе сушки. В этот момент зависимость процесса сушки от относительной влажности сушильного агента определяется значением равновесного влагосодержания, которое соответствует остаточной влажности высушиваемого материала.

Понижение давления значительно ускоряет процесс сушки, особенно на первом этапе сушки.

Как следует из рассмотренного, интенсификация сушки влажных материалов может осуществляться по следующим направлениям:

- снижение продолжительности первого периода сушки, обусловленного удалением большой массы свободной влаги (до 90% общего влагосодержания), физически и химически не связанной с молекулами высушиваемого вещества;
- точное поддержание температурного режима второго периода сушки – удаление связанной влаги, не допуская термодеструкции и снижения потребительских качеств высушиваемых продуктов;
- обеспечение максимальной чистоты процесса сушки при поддержании необходимых технологических параметров: температуры, скорости потока, влажности и пониженного давления сушильного агента.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНФРАКРАСНОГО НАГРЕВА ПРИ МОНТАЖЕ МНОГОВЫВОДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Т.Э. ЛАВОР, В.Л. ЛАНИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
vlanin@bsuir.by*

Использование инфракрасного нагрева при монтаже многовыводных электронных компонентов на печатные платы является одним из важнейших направлений в технологии сборки электронных модулей. Для оптимизации параметров инфракрасного нагрева эффективно создание геометрической модели и моделирование температуры в зоне нагрева с помощью пакета Solid Works. Повышение эффективности ИК-нагрева достигнуто за счет применения концентратора ИК-излучения и защитной маски для корпуса компонента.

*Ключевые слова:* инфракрасный нагрев, электронные компоненты, монтаж на платы, моделирование.

Большие трудности возникают при пайке электронных модулей с плотным размещением многовыводных поверхностно-монтируемых компонентов SMD на печатной плате, что заставляет разрабатывать новые технологии, способные повысить качество пайки, увеличить ее скорость и снизить стоимость изделий. Это особенно важно при монтаже корпусов BGA на печатные платы, которые нагреваются первыми, а затем тепло передается контактными площадками и сферическим выводам из припоя для формирования паяных соединений.

Экспериментальная проверка работоспособности инфракрасных (ИК) устройств на реальных объектах довольно дорога, а зачастую невозможна не только по экономическим, но и по конструктивным соображениям. В таких случаях моделируют теплообмен в системе ИК нагрева с помощью прикладных пакетов. В модуле Flow Simulation, интегрированном в систему SolidWorks, можно моделировать геометрию ИК нагревателей и выполнять тепловые расчеты и анализы «в одном окне». Это значительно снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта геометрии через промежуточный формат данных (например, SAT, IGES и т. д.).

Поскольку процессы, происходящие при пайке ИК излучением, главным образом касаются печатной платы с электронными компонентами и ИК нагревателя, то для оптимизации работы расчетного модуля Flow Simulation пакета SolidWorks Premium x64 Edition необходимо построить упрощенную геометрическую модель, состоящую из печатной платы, паяемого компонента, верхнего и нижнего ИК нагревателей. Для достижения более эффективного использования излучаемой ИК-энергии применен концентратор в виде кварцевого «стакана», который локализует ИК излучение от нагревателя на печатной плате в заданной зоне. Для уменьшения нагрева BGA корпуса использована маскирующая алюминиевая фольга толщиной 250 мкм.

Для оптимизации параметров ИК нагревателей целевой функцией примем минимизацию нагрева электронных компонентов для возможного снижения теплового удара. Моделирование выполнено для мощности ИК нагревателя: 500, 750 и 1000 Вт и расстоянии от нагревателя до печатной платы: 20 и 30 мм. Уравнение регрессии для

обычного ИК нагрева печатной платы, полученное с помощью метода наименьших квадратов в пакете Mathcad, имеет вид:

$$y(x_1, x_2) = 39.765x_1 + 0.528x_2 - 9.854 \cdot 10^{-3} x_1 x_2 - 0.933x_1^2 - 7.736 \cdot 10^{-5} x_2^2 \quad (1)$$

Уравнение регрессии нагрева электронных компонентов имеет вид:

$$y(x_1, x_2) = 44.611x_1 + 0.703x_2 - 0.012x_1 x_2 - 1.006x_1^2 - 2.795 \cdot 10^{-5} x_2^2 \quad (2)$$

Для нахождения комбинации факторов найдем кривую равного выхода при значении температуры, равном максимальной из заданного диапазона, а именно 250°C. Средствами Mathcad находим уравнение линии уровня и строим ее двухмерный график (рис. 1):

$$39.765x_1 + 0.528x_2 - 9.854 \cdot 10^{-3} x_1 x_2 - 0.933x_1^2 - 7.736 \cdot 10^{-5} x_2^2 = 523.2 \quad (3)$$

В присутствии кварцевого стакана и металлической маски уравнение нагрева имеет вид:

$$y(x_1, x_2) = 40.624x_1 + 0.216x_2 - 8.094 \cdot 10^{-3} x_1 x_2 - 0.811x_1^2 - 1.364 \cdot 10^{-5} x_2^2 \quad (4)$$

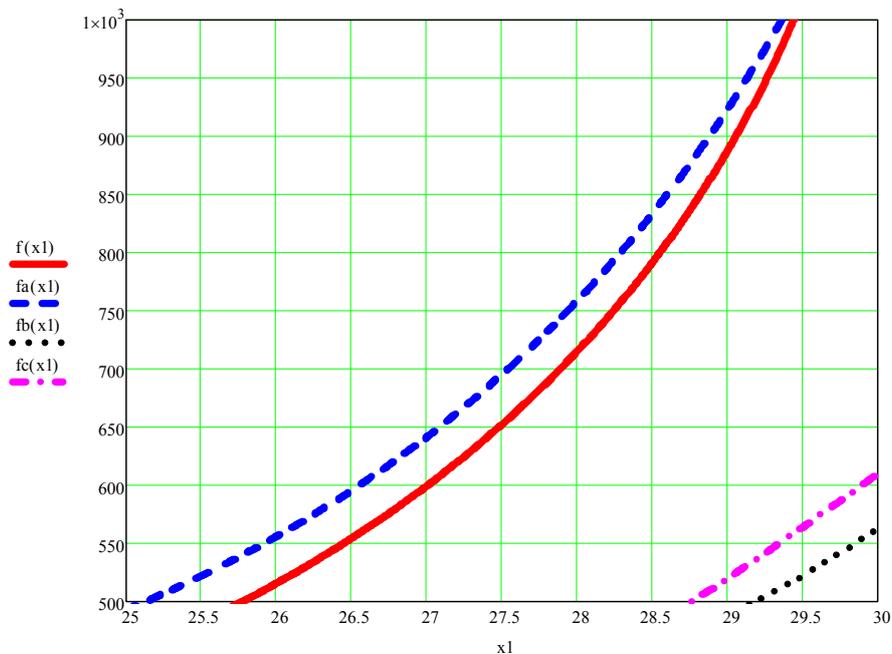


Рис. 1. Кривые равного выхода на уровне 250,0 °С (523,2 К):  
1 – обычный ИК нагрев, 2 – с концентратором и маскирующей пластиной

Из рис. 1 следует, что минимум нагрева паяемого электронного компонента будет достигнут при использовании кварцевого стакана и алюминиевой маскирующей пластины. В пределах границы диапазона с минимальными отклонениями оптимальное значение мощности нагревателя составляет  $W = 498,45 \approx 500$  Вт. При этом оптимальное расстояние между нагревателем и платой  $h = 28,75$  мм.

Таким образом, использование кварцевого стакана уменьшает потери излучаемой ИК энергии и способствует ее концентрированию на площадке для пайки. В результате температура нагрева в зоне монтажа электронных компонентов увеличивается на 13–15%, а температура корпуса самих компонентов снижается на 15–17%.

## ПРОЦЕСС СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО, А.П. ДОСТАНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
bordusov@bsuir.by*

Представлены результаты исследований процесса СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин, который заключается в предварительном нагреве полупроводниковых пластин СВЧ энергией.

*Ключевые слова:* СВЧ разряд, СВЧ плазмохимическая обработка.

В существующих технологических процессах плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности полупроводниковых пластин в большинстве случаев применяется ВЧ или СВЧ разряд. Скорости плазмохимических реакций определяются потоками частиц на подложку и ее температурой [1]. Процесс удаления фоторезиста может начинаться с некоторой задержкой, величина которой зависит от начальной температуры реактора и пластин [2]. Переход в последнее время микроэлектронной промышленности на использование полупроводниковых пластин диаметром более 150 мм влечет использование плазменных реакторов объемом более 4000 см<sup>3</sup>, что в значительной степени влияет на величину задержки процесса плазмообразования. При формировании СВЧ разрядов больших объемов и площадей существуют определенные трудности, поскольку для использования в промышленных целях СВЧ разрядные плазменные источники разрабатываются под частоту 2,45 ГГц, имеющих короткую длину электромагнитной волны (12,2 см) и малую глубину проникновения в плазму [3].

Поскольку СВЧ магнетроны средней мощности технологического назначения имеют максимальную мощность порядка 0,8-1,5 кВт [4], возникает необходимость оказания дополнительных стимулирующих воздействий на процесс групповой СВЧ плазмохимической обработки материалов.

В целях активации процесса нами предложено проводить нагрев полупроводниковых пластин СВЧ энергией до начала плазменной обработки, что представляет интерес с точки зрения наименьших затрат на конструктивное изменение существующего СВЧ плазмохимического оборудования.

В основе разработанной технологии двухстадийного процесса СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности Si пластин лежит эффект нагрева энергией сверхвысокой частоты полупроводниковых пластин, имеющих высокий тангенс угла диэлектрических потерь, до начала плазмообразования.

В качестве генератора СВЧ колебаний использовался магнетрон М-112. Объектами обработки служили кремниевые пластины диаметром 76 мм, толщиной 0,3 мм с нанесенной на поверхность пленкой фоторезиста S1813G2SP15 толщиной  $1,4 \pm 0,1$  мкм, обработанной по стандартным режимам операции фотолитографии. При проведении экспериментов по изучению скорости удаления фоторезиста кремниевые пластины располагались в реакторе по 2 штуки.

Проведенные эксперименты показали, что задержка процесса плазмообразования в вакуумной камере плазмотрона по отношению к началу генерации СВЧ энергии магнетроном приводит к увеличению скорости удаления фоторезиста с поверхности

кремниевых пластин примерно в 1,7 раза и достигает значений 40 нм/с. То есть повышение эффективности процесса плазменного удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин может быть достигнуто путем использования двухстадийного способа обработки. Первая стадия – разогрев полупроводниковых пластин с фоторезистом СВЧ энергией. Вторая – взаимодействие СВЧ плазмы с разогретым фоторезистом.

СВЧ энергия в начальный момент времени не затрачивается на возбуждение и поддержание СВЧ разряда, а поглощается кремниевыми пластинами, имеющими высокий тангенс угла диэлектрических потерь, за счет чего и происходит их разогрев. При последующем взаимодействии кислородной плазмы с предварительно разогретым фоторезистом процесс окислительной деструкции фоторезиста протекает более интенсивно с образованием летучих компонентов продуктов реакции, которые непрерывно удаляются из реакционной камеры вакуумным насосом.

На рис. 1 представлена зависимость скорости удаления фоторезиста с поверхности Si пластин от времени задержки начала момента плазмообразования по отношению к началу генерации магнетроном СВЧ энергии. Удаление фоторезиста проводилось одновременно с поверхности 2-х Si пластин.

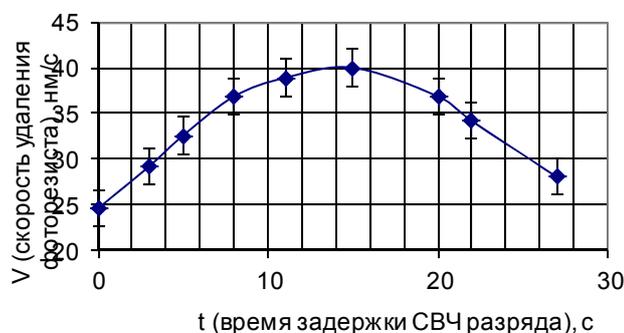


Рис. 1. Зависимость скорости удаления фоторезиста с поверхности Si пластин от времени задержки начала момента плазмообразования по отношению к началу генерации СВЧ энергии

Такая комбинация двух этапов процесса удаления фоторезиста в едином технологическом цикле позволила сократить время обработки двух Si пластин с 57 до 35 с и, соответственно, повысить скорость обработки с 24 до 40 нм/с.

Достоинством такого способа СВЧ плазмохимической обработки полупроводниковых пластин является возможность интенсификации процесса без изменения конструкции СВЧ разрядного модуля технологического назначения и увеличения подводимой к разряду СВЧ мощности.

#### Список литературы

1. *Достанко А.П., Кундас С.П., Бордусов С.В. и др.* Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. Минск, 2001.
2. *Долгополов В.М., Иванов В.И., Кротков В.А. и др.* // Электронная техника. Сер. 7. Технол., организ. произв. и оборуд. 1982. № 5 (114). С. 27 – 30.
3. *Бордусов С.В.* Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники. Минск, 2002.
4. *Диденко А.Н., Зверев Б.В.* СВЧ-энергетика. М., 2000.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ РАЗРЯДА С ЭФФЕКТОМ ПОЛОГО КАТОДА ПРИ НИЗКОМ ВАКУУМЕ

А.И. БОЖКО, С.В. БОРДУСОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
bordusov@bsuir.by*

Ключевая особенность обработки в импульсной плазме заключается в том, что высокая мощность (десятки киловатт) в импульсе приводит к практически полной диссоциации рабочего газа. В то же время обрабатываемое изделие большую часть времени (в промежутках между короткими импульсами ~220 мкс, следующих с частотой 100-1000 Гц) находится в послесвечении плазмы, распадающейся во времени. Средняя мощность низкая и не приводит к разогреву изделия. Осаждение и травление может проводиться при комнатной температуре изделий, т.е. можно обрабатывать структуры, не допускающие нагрева.

*Ключевые слова:* полый катод, низкий вакуум, плазма, модулятор, плазмообразование.

Достоинства обработки в импульсной плазме, кроме низкой температуры обрабатываемых изделий, состоит в том, что между импульсами может произойти полная смена газа в реакторе. Таким образом, обеднения газа активными частицами не происходит. Для каждого импульса может быть выбрана свой газ-реагент, что дает дополнительные возможности при нанесении пленок. Для реализации смены газа между импульсами их частота должна быть не более 100 Гц, так как используемые средства откачки и быстродействующие затворы не позволяют быстрее проводить замену газа.

В [1] показано, что высокие скорости нанесения пленок могут быть получены при использовании струи распадающейся плазмы, истекающей по направлению к подложке. В электроде выполнено отверстие диаметром 1-5 мм, через которое подают газ в реактор. Генерируемая в отверстии интенсивная плазма струей направляется к обрабатываемому изделию. Вдоль оси распространения струи достигаются высокие скорости осаждения пленок.

Так же под действием ионной бомбардировки происходит распыление материала катода. Известно, что распыление происходит тем интенсивнее, чем выше энергия падающих на поверхность ионов и чем больше их количество [2]. Характер распыления катода в тлеющем разряде можно определить, зная распределение общего тока по катоду. В общем случае ток распределяется по поверхности полого катода неравномерно, вследствие чего материал катода распыляется неравномерно, благодаря чему атомы диффундируют из областей сильного распыления в области слабого распыления. При длительном горении разряда этот процесс приводит к заметному изменению формы полости, увеличивая расстояние а между противоположными участками катода. Поскольку величина а определяет эффективность разряда с полым катодом, происходящие изменения формы полости вызывают изменения в механизме разряда, что приводит к изменению распределения тока по катоду.

Целью данной работы являлось изучение электрических режимов формирования импульсного разряда при низком вакууме. Эксперименты проводились с использованием в качестве источника электрической энергии для возбуждения разряда импульсного модулятора, структурная схема которого представлена на рис. 1.

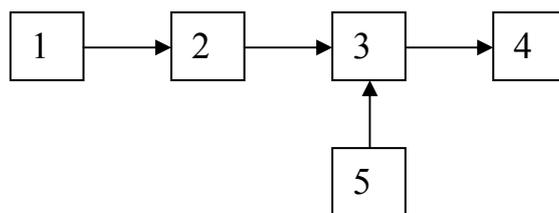


Рис. 1. Структурная схема импульсного модулятора: 1 – генератор управляющих импульсов; 2 – буферный усилитель; 3 – силовой ключ; 4 – нагрузка; 5– источник питания

Модулятор предназначен для формирования высоковольтных прямоугольных электрических импульсов отрицательной полярности.

Форма и параметры импульсов электрического сигнала на катоде определялись визуально с использованием осциллографа, подключаемого к разрядной системе.

Экспериментально установлено, что в зависимости от величины давления плазмообразующего газа возможны различные режимы поддержания импульсного разряда, отличающиеся формой и величиной рабочего импульса напряжения на катоде (рис.2).

Представленная на рис. 2, *а* форма импульса напряжения на электроде-катоде трубчатой формы характерна для низкого вакуума и соответствует режиму нормально-го тлеющего разряда. Форма импульсов напряжения, представленная на рис. 2, *б* соответствует переходному режиму от нормального тлеющего разряда к режиму разряда с полым катодом, а представленная на рис. 2, *в* – режиму разряда с полым катодом.

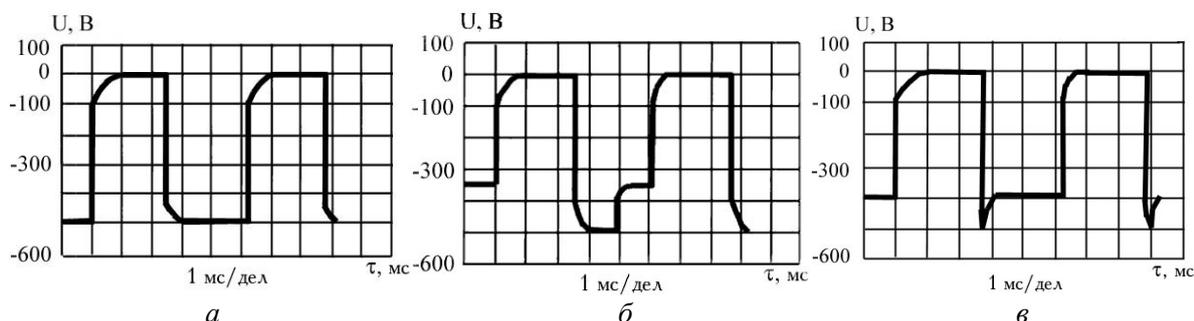


Рис. 2. Форма импульса напряжения на электроде-катоде в различных режимах поддержания разряда: *а* – тлеющий разряд; *б* – переходной; *в* – разряд с полым катодом

Каждый режим разряда характеризуется определенной величиной рассеиваемой в разряде мощности. Величина давления плазмообразующего газа, соответствующего переходному режиму разряда, зависит от сорта газа, конструктивных особенностей электрода-катода и не зависит от величины подаваемого на электрод напряжения.

Проведенными исследованиями также установлены характерные особенности поведения переднего и заднего фронтов рабочего электрического импульса при различных режимах плазмообразования.

#### Список литературы

1. Кузнецов В.И. // Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника. 1992. № 2 (1668). С. 105.
2. Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. М., 1969.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ОБЪЕМЕ ПЛАЗМЫ СВЧ РАЗРЯДА

С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО, А.П. ДОСТАНКО, Т.В. ГОРДЕЙЧУК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
bordusov@bsuir.by*

Представлены результаты моделирования в программе CSTStudioSuite распределения СВЧ полей в резонаторе прямоугольной формы СВЧ плазмотрона как для условий пустого резонатора, так и для условий при помещении в резонатор кремниевых платин.

*Ключевые слова:* резонатор, СВЧ электромагнитное поле, СВЧ мощность.

Для эффективного проведения плазменных процессов обрабатываемые материалы необходимо размещать в областях СВЧ разряда, где его химическая активность максимальна [1, 2]. Такие области характеризуются наибольшей интенсивностью электромагнитного поля и более высокой температурой плазмы [3, 4]. При возбуждении СВЧ разряда в центре объемного резонатора распределение электромагнитного поля в нем относительно пустого резонатора существенно искажается. Проведение экспериментального изучения структуры распределения электромагнитного и тепловых полей в объеме плазмы СВЧ разряда трудоемкий процесс, который реальной картины распределения поля не отразит, поэтому был проведен процесс моделирования распределения электромагнитного поля в области СВЧ аппликатора при различных условиях.

Моделирование распределения СВЧ полей в резонаторе прямоугольной формы СВЧ плазмотрона при различных условиях проводилось в программе CSTStudioSuite. Модель резонатора в программном комплексе CSTStudioSuite строилась на основании разработанного в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники СВЧ газоразрядного модуля технологического назначения с большим разрядным объемом (около 9000 см<sup>3</sup>).

Данный модуль создан на базе резонатора прямоугольной формы [5]. Конструктивно модуль выполнен в виде переносного блока. Основными элементами модуля являются: прямоугольный резонатор; магнетрон типа М-105; волноводный тракт; отверстие связи; реактор, выполненный из кварцевой трубы диаметром 200 мм и длиной 350 мм; подложкодержатель; органы управления и контроля.

Результаты моделирования распределения структуры СВЧ поля, представленные на рис. 1, показали следующее:

1. В пустом резонаторе наблюдается периодичность распределения плотности СВЧ энергии, максимальная интенсивность СВЧ поля наблюдается в области отверстия связи.

2. Внесение в резонатор объекта в виде Si пластин (имеющей высокий тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta = 0,15$ ) приводит к существенному изменению как структуры, так и интенсивности электрической составляющей СВЧ поля внутри моделируемой конструкции (интенсивность снижается).

3. Наличие плазмы наряду с пластинами в моделируемой конструкции, оказывает существенное влияние на распределение СВЧ поля, так как является дополнительной, помимо Si пластины, поглощающей нагрузкой для потока СВЧ энергии, и кроме

того обладает электропроводящими свойствами, поэтому плотность потока энергии в области пластины, окруженной плазмой, существенно снижается.

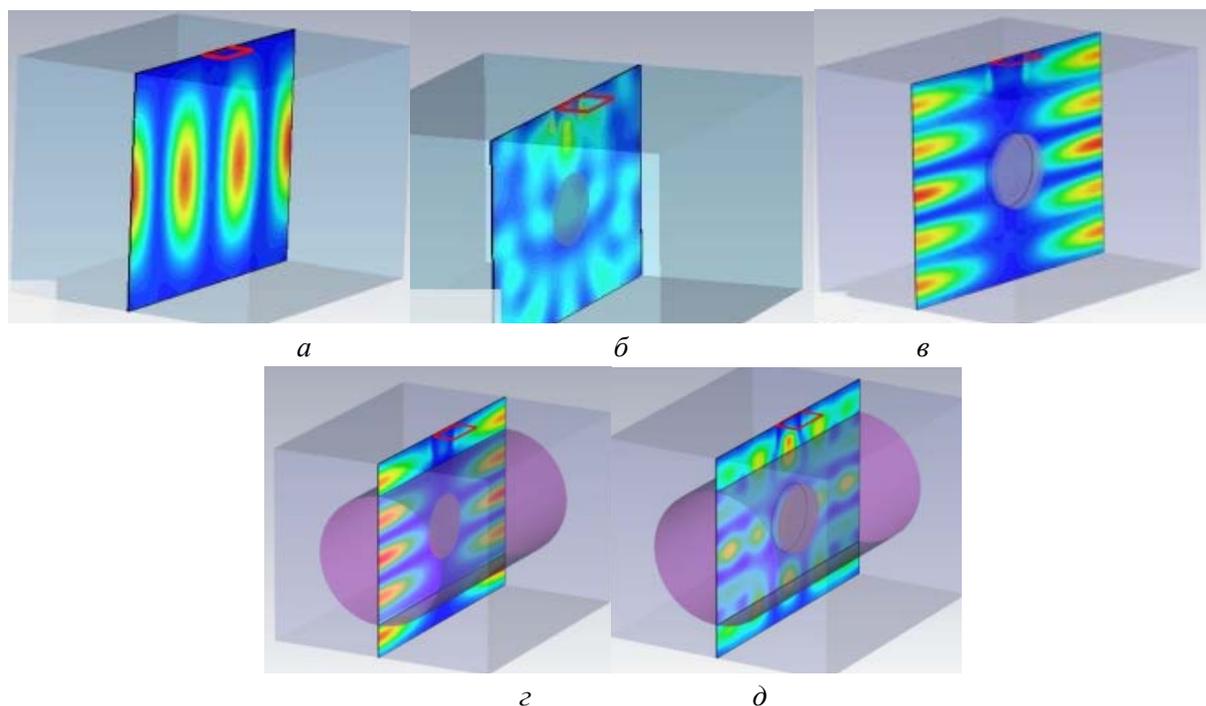


Рис. 1. Данные по распределению структуры СВЧ поля в плоскости резонатора: *а* – резонатор с идеальной средой; *б* – резонатор с одной кремниевой пластиной; *в* – резонатор с пятью кремниевыми пластинами; *г* – резонатор с плазмой, в который помещена одна кремниевая пластина; *д* – резонатор с плазмой, в который помещены пять кремниевых пластин

#### Список литературы

1. *Бордусов С.В.* Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники: монография. Минск, 2002.
2. *Бордусов С.В.* // Электронная обработка материалов. 2001. №3 (209). С.72 – 78.
3. *Достанко А.П., Бордусов С.В., Свадковский И.В. и др.* Плазменные процессы в производстве электронной техники. Минск, 2001.
4. *Кудреватова О.В.* // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. 1987. №.9 (1266). С. 40.
5. *Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Достанко А.П.* // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы IV Междунар. науч.–техн. конф. Минск, 19 – 21 октября 2009 г. С. 56–57.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЭРОЗИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ ПРИ DC МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ

С.Н. МЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>, Д.А. ГОЛОСОВ<sup>1</sup>, С.М. ЗАВАДСКИЙ<sup>1</sup>, А.П. ДОСТАНКО<sup>1</sup>,  
С.П. КУНДАС<sup>2</sup>, Б.А. ТОНКОНОГОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
s\_melnikov@tut.by

<sup>2</sup>Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова  
ул. Долгобродская, 23, г. Минск, 220070, Республика Беларусь  
boristonkonogov@iseu.by

Приведены результаты экспериментальных исследований динамики изменения профиля эрозии металлических Cu и Ti мишеней при DC магнетронном распылении. На основе полученных данных установлено, что форма профиля эрозии мишени не зависит ни от материала мишени, ни от времени распыления. Коэффициент использования материала мишени является характеристикой определенной магнетронной распылительной системы и зависит только от параметров магнитной системы магнетрона. При увеличении зоны эрозии мишени напряжение разряда постепенно снижается, что ведет к уменьшению средней энергии ионов и, как следствие, снижению коэффициента распыления.

*Ключевые слова:* магнетронное распыление, ионное распыление, эрозия мишени

В настоящее время метод магнетронного распыления завоевал лидирующие позиции среди процессов формирования тонкопленочных слоев в микроэлектронике [1]. Поскольку в микроэлектронике широко используются мишени из драгоценных металлов и многокомпонентных сплавов, эффективное использование материала мишени во многих случаях является главным критерием при разработке промышленных магнетронных распылительных систем (MPC). В результате этой работы было исследование динамики распыления металлических мишеней с целью получения данных для разработки методики, которая бы позволяла предсказывать профиль зоны эрозии, время работы и коэффициент использования материала мишени.

Проведена серия экспериментов по распылению Cu (чистота 99,9 %) и Ti (чистота 99,9 %) мишеней методом DC магнетронного распыления на магнетронной системе RIF.039.001 оригинальной конструкции. Во всех экспериментах использовался режим стабилизации тока разряда магнетрона  $I_t = 0,2$  А. Для Cu мишени проведено 8 процессов с общим временем распыления 20 часов, а для Ti мишени – 5 процессов с общим временем распыления 12 часов. После каждого процесса распыления мишень извлекалась из камеры, производилось ее взвешивание и измерение профиля эрозии.

На рис. 1 и рис. 2 представлено изменение профилей эрозии Cu и Ti мишеней. Скорость эрозии Cu мишени в зоне максимальной плотности тока составляла 0,225 мм/час. Для Ti мишени скорость эрозии составляла 0,068 мм/час. Коэффициент использования материала мишени  $K_t$  определялся путем взвешивания мишени при максимальной выработке. При глубине эрозии в области максимального распыления 96,5 % от толщины мишени  $K_t$  превышал 32 %. Нормирование полученных профилей зоны эрозии Cu мишени после серии процессов распыления показало практически пол-

ное совпадение профилей. Нормированные профили эрозии Ti мишени также полностью совпадали с профилями Cu мишени.

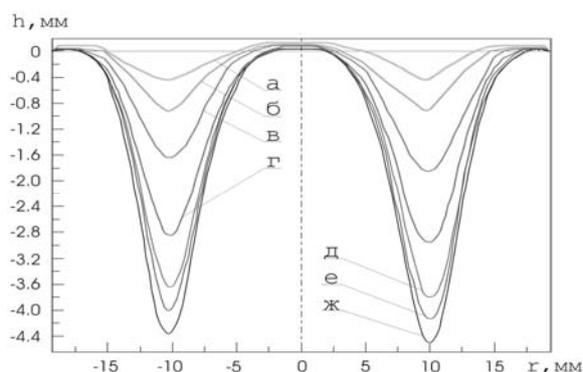


Рис. 1. Профили эрозии Cu мишени при различном времени распыления: а – 2 часа; б – 4 часа; в – 8 часов; г – 12 часов; д – 16 часов; е – 18 часов; ж – 20 часов

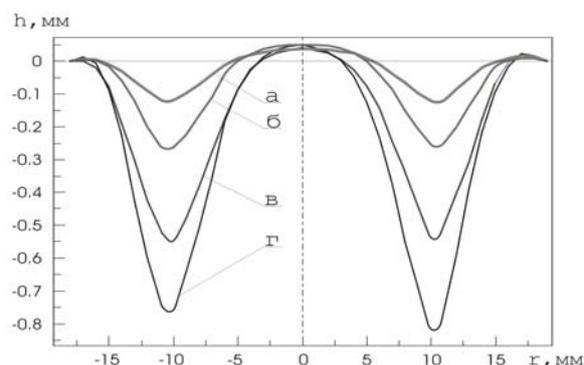


Рис. 2. Профили эрозии Ti мишени при различном времени распыления: а – 2 часа; б – 4 часа; в – 8 часов; г – 12 часов

Для определения соотношения между профилем эрозии мишени и распределением магнитного поля проведено моделирование магнитного поля магнетрона RIF.039.001. Анализ распределения индукции магнитного поля показал, что магнитная система магнетрона имела небольшую несбалансированность II-го типа, что вызывало смещение максимума горизонтальной составляющей магнитного поля  $B_r$  к оси магнетрона при удалении от мишени.

Коэффициент распыления материала мишени рассчитывался исходя из массы распыленного материала. В течение первых процессов, когда происходило начальное формирование зоны эрозии, коэффициент распыления как для Cu, так и для Ti мишеней имел более низкие значения ( $Y_{Cu} = 1,55$ ;  $Y_{Ti} = 0,378$ ). После формирования зоны эрозии коэффициент распыления возрастал и достигал максимума ( $Y_{Cu} = 1,8$ ;  $Y_{Ti} = 0,393$ ) и далее от процесса к процессу по мере увеличения зоны эрозии мишени линейно уменьшался до 0,97 для Cu мишени и 0,344 для Ti мишени. Снижение коэффициента распыления в первую очередь связано с уменьшением напряжения разряда.

Средняя энергия бомбардирующих мишень ионов  $E_i$  рассчитывалась по методике, предложенной в [2]. Установлено, что отношение  $E_i/U_i$ , где  $U_i$  – напряжения разряда, для Cu мишени в процессе распыления мишени уменьшалось с 0,81 до 0,55, а для Ti мишени – с 0,9 до 0,87.

Таким образом, на основе полученных данных установлено, что форма профиля эрозии мишени не зависит ни от материала мишени, ни от времени распыления. Коэффициент использования материала мишени является характеристикой определенной МРС и зависит только от параметров магнитной системы магнетрона. Это позволяет при моделировании эрозии мишеней производить один расчет для заданной конфигурации магнитной системы и масштабировать полученный профиль в зависимости от времени распыления. В режиме стабилизации тока разряда магнетрона при увеличении зоны эрозии мишени напряжение разряда постепенно снижается, что ведет к уменьшению средней энергии ионов и, как следствие, снижению коэффициента распыления.

#### Список литературы

1. Pauleau Y. Materials surface processing by directed energy techniques. Elsevier Ltd., 2006.
2. Yamamura Y., Tawara H. // Atomic data and nuclear data tables. 1996. Vol. 62. P. 149–253.

## СИНТЕЗ ПОКРЫТИЙ ИЗ АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА ДЛЯ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ГЕРМАНИЕВОЙ ОПТИКИ

Е.В. ТЕЛЕШ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
etelesh@mail.ru*

Исследованы процессы синтеза алмазоподобных покрытий путем осаждения из вторичного ионного пучка, сформированного в модернизированном ускорителе с анодным слоем. Исследована энергия и состав пучков из метана и пропана. Измерены электрофизические, трибологические и оптические характеристики алмазоподобных покрытий на различных подложках.

*Ключевые слова:* алмазоподобный углерод, ионный пучок, просветляющие покрытия, германий, ИК оптика

Алмазные и алмазоподобные покрытия (АПП) широко применяются для защиты поверхности окон лазеров, просветления инфракрасной оптики и т.п. Существующие методы формирования таких покрытий основаны на ионном распылении графита или деструкции углеводородов. В данной работе для получения покрытий использовался метод прямого осаждения углерода из вторичного ионного пучка, сформированного в ускорителе с анодным слоем (УАС). Внешний вид пучка приведен на рис. 1, а.

Экспериментальные исследования проводили на установке вакуумного напыления ВУ-1А, оснащенной модернизированным ионным источником на основе УАС, зондовым контролем и системой эмиссионного спектрального анализа состава ионного пучка. Измерение энергии ионов проводилось с использованием многосеточного зонда. Анализ эмиссионных спектров излучения показал наличие линий атомарного углерода, ионов углерода, азота и  $\text{OH}^+$ . Установлено, что для всех применяемых газов интенсивность пиков атомарного углерода значительно ниже интенсивности пиков от ионов углерода, что свидетельствует об эффективных процессах деструкции и ионизации рабочего газа.

Измерение энергии ионов показало, что она зависит от напряжения на диафрагме  $U_d$ . Диафрагма из графита применялась для предотвращения воздействия на подложку первичного ионного пучка. При ускоряющем напряжении первичного ионного пучка 3 кВ и токе разряда 100 мА, энергия ионов вторичного ионного пучка составила около 50 эВ. При этом напряжение на диафрагме изменялось от 0 до 20 В. Повышение  $U_d$  приводило к соответственному увеличению энергии. Для формирования качественных АПП энергия конденсирующихся частиц должна находиться в диапазоне 20–60 эВ.

Формирование покрытий осуществляли осаждением из ионных пучков метана и пропана. Температура подложек не превышала 40°C. С ростом мощности первичного разряда происходило увеличение скорости нанесения, которая находилась в диапазоне 0,15–0,40 нм/с. Было установлено, что увеличение  $U_d$  от 30 до 200 В привело к снижению скорости с 0,4 до 0,16 нм/с.

Для исследования оптических параметров пленки алмазоподобного углерода наносились на подложки из стекла К8. Покрытия имели окраску от желтоватого до коричневого цвета, толщина покрытий составляла 0,17–0,37 мкм. На рис. 1, б приведена спектральная зависимость коэффициента пропускания. По спектральной зависимости

отражения был определен коэффициент преломления покрытий, который находился в диапазоне 2,2...2,4.

Были также сняты ЭПР–спектры, измеренные на спектрометре Radiopan-SE/x на частоте 9,3 ГГц. Они показали наличие ярко выраженного сигнала с  $g=2,00286$ , что свидетельствует об образовании структуры  $\alpha$ -C (рис.2, а). Это подтверждается также измерением электрической прочности покрытия, которая составила  $1,1 \cdot 10^6$  В/см, а удельное объемное сопротивление –  $1,4 \cdot 10^8$  Ом·см. Полученные результаты свидетельствуют о высоком проценте содержания алмазной фазы в покрытиях.

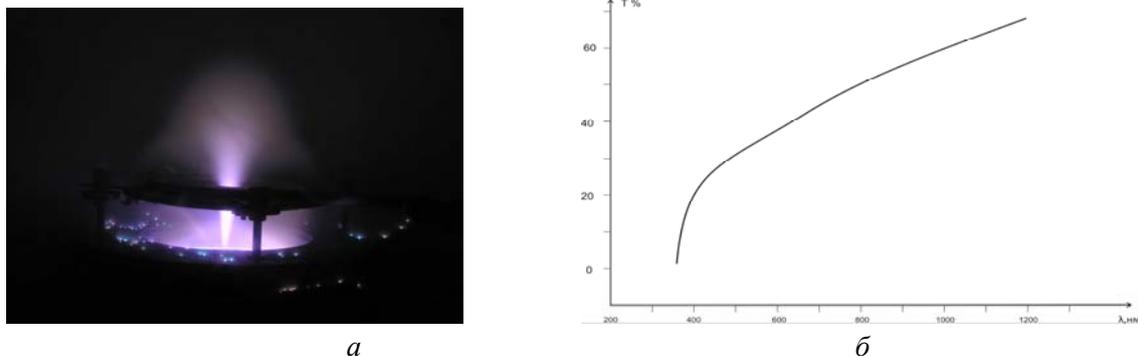


Рис. 1. Внешний вид пучка (а) и спектральная зависимость коэффициента пропускания (б)

Покрытия из АПП толщиной  $\sim 1,1$  мкм были нанесены на поверхность германиевой подложки. На рис. 2, б приведена спектральная зависимость пропускания системы АПП/германий.

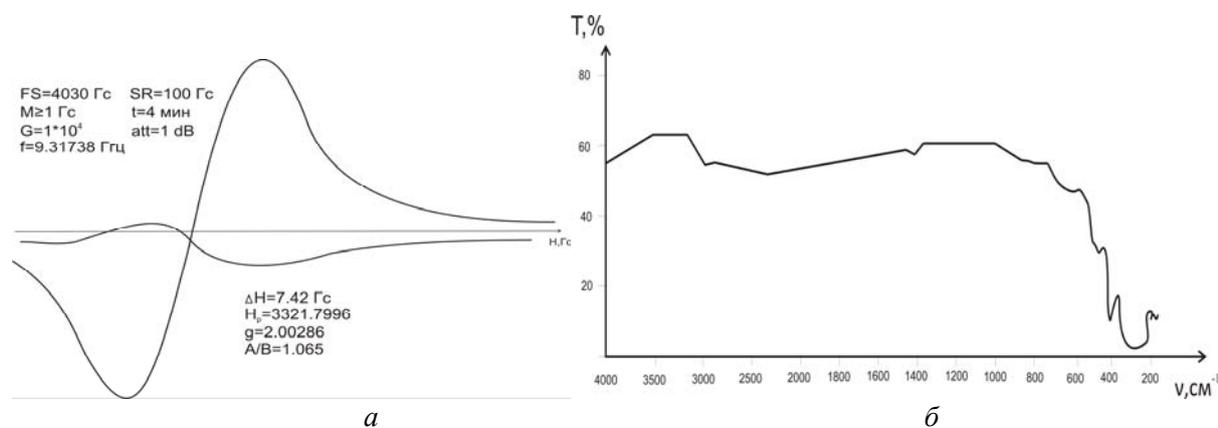


Рис. 2. ЭПР–спектр (а) и спектральная зависимость пропускания системы АПП/германий (б)

Анализ этой зависимости позволяет сделать вывод о перспективности использования полученных покрытий для просветления германиевой оптики ИК диапазона.

Для измерения трибологических характеристик покрытия толщиной  $\sim 0,3$  мкм наносились на подложки из кремния. Измеренная на трибометре ТАУ-1Н износостойкость составила 1240 циклов истирания. Измерение микротвердости покрытий дало результаты от 1145 до 2155HV. Исследование адгезии покрытий методом отрыва липкой ленты показало, что покрытия имели отличное сцепление со всеми использованными в экспериментах подложками.

## ПАССИВАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА GaAs

Е.В. ТЕЛЕШ, А.П. ДОСТАНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
etelesh@mail.ru*

Ионно–лучевое распыление является перспективным методом для формирования пассивации на GaAs из-за минимального воздействия на полупроводник а также позволяет сформировать качественные слои с высокими плотностью и адгезией. Осуществлена пассивация полевых транзисторов слоями SiON, полученными реактивным ионно-лучевым распылением кварцевой мишени.

*Ключевые слова:* пассивация, реактивное ионно-лучевое распыление, оксинитрид кремния, арсенид галлия, полевые транзисторы.

Оксинитрид кремния SiON часто применяется для пассивации поверхности активных структур на GaAs. Обычно пленки SiON получают реактивным распылением кремния в атмосфере азота и кислорода или осаждением из газовой фазы. При проведении таких процессов необходимо тщательно контролировать давление и расход рабочих газов, т.к. от этого сильно зависят свойства пленок. Предложено использовать ионно-лучевое распыление кварцевой мишени с использованием только одного реактивного газа – азота, что позволит упростить технологический процесс формирования пассивирующих слоев.

Формирование покрытий из SiON проводили на установке Z-400 «LEYBOLD-HERAEUS», оснащено ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем. Мишенью служил диск из кварца диаметром 80 мм и толщиной 10 мм. Остаточный вакуум в камере составлял  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. Температура подложки не превышала 50°C. Увеличение мощности ионного пучка приводило к росту скорости нанесения ( $V_H$ ) покрытий. Степень компенсации также оказывала сильное влияние на скорость нанесения. На рис.1 приведены зависимости  $V_H$  от мощности разряда и тока компенсатора ( $I_K$ ). Установлено, что оптимальный  $I_K$  составлял 11 А. Содержание азота в рабочем газе при этом составляло около 25%. На рис. 2, а приведена зависимость  $V_H$  и скорости травления в травителе  $NH_4F:H_2O:HF=150:300:60$  от содержания азота. Установлено, что снижение  $V_H$  способствует повышению плотности пленок, что выражается в уменьшении их скорости травления.

ИК спектры пропускания плёнок SiON, полученных при различных содержаниях азота, приведены на рис. 2, б. Спектры регистрировались двухлучевым спектрофотометром ИКС-29 в спектральной области 1400–400  $cm^{-1}$ . Полученные пленки имели две характерные полосы поглощения: полосу около  $\nu_{as} = 1085 cm^{-1}$ , соответствующую валентным антисимметричным колебаниям  $Si \rightarrow \leftarrow O \leftarrow Si$  и полосу около  $\delta_{as} = 800 cm^{-1}$ , соответствующую деформационным дважды вырожденным колебаниям  $Si - O - Si$ . Положение максимума полосы  $\nu_{as} = 1085 cm^{-1}$  практически не зависела от энергии распыляющих ионов, в то же время состав газа оказывал влияние на положение максимума. Максимум поглощения был получен при 50% –ном содержании азота. Покрытия, сформированные ионно–лучевым распылением, не содержали ОН группы в количестве, которое может быть определено методом ИК спектроскопии. Это свидетельствует о высокой плотности пленок.

Плётки SiON обладали высокой адгезией. Результаты измерений свидетельствуют, что наибольшей адгезией обладали плётки, сформированные при больших уско-

ряющих напряжениях и токах компенсатора. Эти условия процесса способствуют увеличению энергии распыленных частиц.

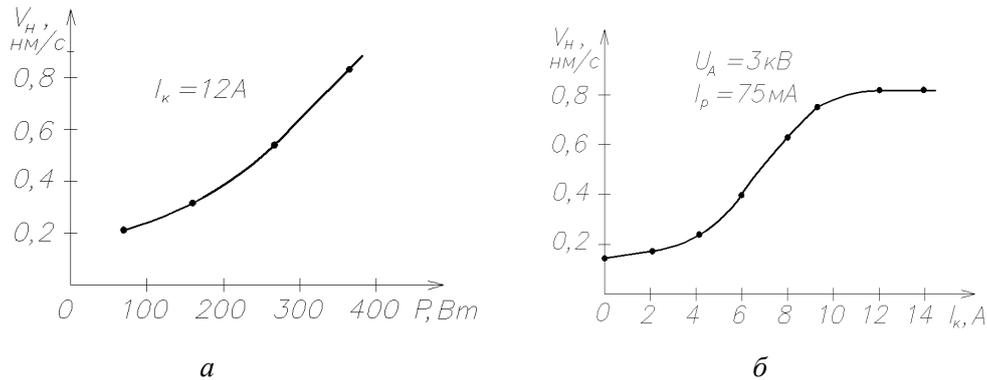


Рис. 1. Зависимость  $V_H$  от мощности разряда (а) и тока компенсатора (б)

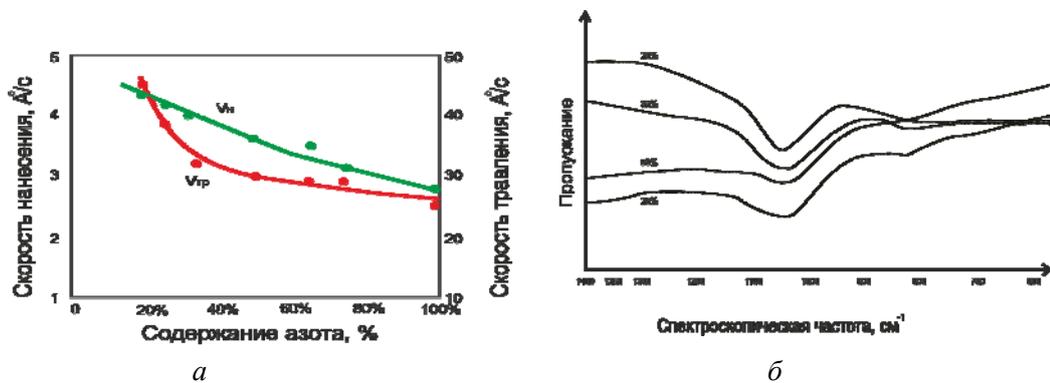


Рис. 2. Зависимость скорости нанесения и травления пленок (а) и ИК спектров (б) от содержания азота в рабочем газе

Осуществлена пассивация полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТБШ) с применением полученных пленок SiON. Топология пары ПТБШ приведена на рис. 3, а. Ускоряющее напряжение составляло 3 кВ, ток разряда  $-100 \text{ mA}$ ,  $I_k - 10,5 \text{ A}$ , соотношение  $\text{Ar/N}=3:1$ . Исследовалось влияние параметров процесса пассивации на ВАХ ПТБШ (рис. 3, б)

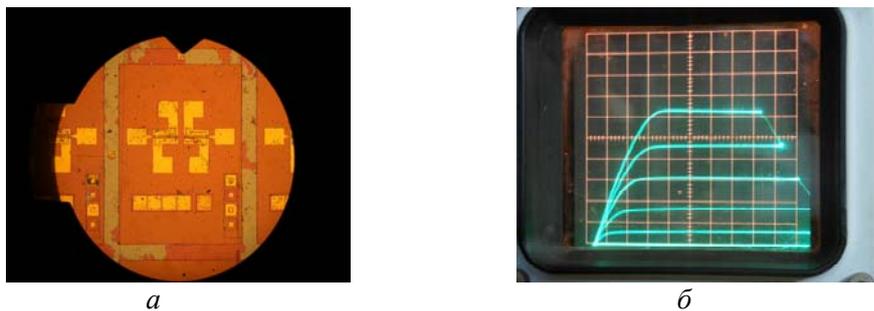


Рис. 3. Топология (а) и ВАХ (б) пары ПТБШ

После пассивации ток насыщения вырос с 12,1 до 12,9 мА, напряжение насыщения уменьшилось с 1,48 до 1,44 В, а крутизна увеличилась с 6,95 до 7,1 мА/В. Т.о. характеристики ПТБШ практически не изменились, что подтверждает перспективность разработанной технологии пассивации.