

## ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

© 2013 г. Н. С. Сочугов, В. О. Оскирко, Р. Е. Спириин

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

*E-mail: sochugov@lae.hcei.tsc.ru*

Поступила в редакцию 11.04.2012 г.

Описаны конструкция и электрические схемы источника питания для магнетронных распылительных систем мощностью до 5 кВт. Источник предназначен для работы в режиме постоянного тока и в импульсном режиме с частотой повторения импульсов до 100 кГц. Система дугоподавления ограничивает энерговыдел в дуговой разряд на уровне 110 мДж при работе в режиме постоянного тока и 9 мДж при работе в импульсном режиме. На примере тонкопленочных покрытий двух типов (пленки серебра и пленки легированного галлием оксида цинка) продемонстрированы возможности оптимизации покрытий выбором рабочих параметров источника питания.

DOI: 10.7868/S0032816213010345

### ВВЕДЕНИЕ

Магнетронные распылительные системы (м.р.с.) уже около тридцати лет являются одними из основных инструментов для нанесения тонкопленочных покрытий различного функционального назначения. В процесс совершенствования метода магнетронного осаждения покрытий вовлечено множество научных групп во всем мире, поэтому есть основания полагать, что вскоре на их основе будут разработаны новые технологические процессы и созданы новые производства. Современное состояние технологий и оборудования магнетронного осаждения покрытий достаточно полно отражено, например, в книгах [1, 2], хорошо известных специалистам.

К настоящему времени разработано несколько десятков модификаций метода магнетронного распыления, которые условно можно разделить на два типа: модификации, отличающиеся конструктивными особенностями самой м.р.с. (сбалансированные, несбалансированные, протяженные, трубчатые и т.д.), и модификации, отличающиеся типом электрического питания магнетронного разряда (постоянный, импульсный, высокочастотный, сильноточный и т.д.). Успех промышленного применения магнетронного распыления в значительной мере определяется именно параметрами источника питания м.р.с. Принципиальная нестабильность магнетронного разряда, связанная с возможностью перехода аномального тлеющего разряда в дуговой, обуславливает необходимость реакции источника питания на такие события. Кроме того, свойства получаемых покрытий могут существенно зависеть от парамет-

ров питания (постоянный или импульсный режим, длительность импульса и т.д.).

Дугообразование на катоде м.р.с. является одной из ключевых проблем, определяющих воспроизводимость процесса и качество получаемых покрытий. Острота проблемы возрастает при реактивном распылении, когда часть распыляемого катода покрывается диэлектрической пленкой. В работе [3] была предложена следующая классификация возникающих в м.р.с. дуг:

1) биполярная дуга, возникающая между катодом и подложкой или между катодом и анодом магнетронного разряда;

2) униполярная дуга, возникающая на поверхности катода между его проводящей частью и частью, покрытой диэлектрической пленкой;

3) микродуга – пробой диэлектрической пленки, образовавшейся на поверхности катода м.р.с.

Вероятности возникновения дуг этих типов при реактивном нанесении оксида алюминия соотносятся как 1:10:100 000, т.е. на одну биполярную дугу приходится порядка 100 тыс. микродуг. В случае отравленной мишени это соотношение меняется до 1:100:1000, и процесс становится нестабильным [3].

Наиболее опасными являются биполярные дуги, приводящие к образованию на поверхности катода катодного пятна и выбросу из него расплавленного материала мишени, в основном, в виде микрокапель. Появление микрокапель в покрытии может оказаться неприемлемым не только для технологий микроэлектроники, но и при нанесении, например, прозрачных проводящих или низкоэмиссионных покрытий на подложки большой площади [4].

Ключевыми параметрами, определяющими негативное влияние дуг на свойства покрытий, являются величина энергии, вложенной в дуговой разряд, и частота появления дуг. От вложенной в дугу энергии зависит объем материала мишени, распыленного из одного катодного пятна, а частота появления дуг определяет концентрацию дефектов в покрытии. При этом, если частота появления дуг зависит от многих параметров процесса (рабочее давление, материал мишени и т.д.), то вклад энергии в дугу определяется источником питания (и.п.).

Основным методом прекращения дуги является временное снятие напряжения с катода м.р.с. или подача на него импульса напряжения положительной полярности. Величина энергии, выделяемой в дуге, при этом зависит от времени реакции системы защиты и от энергии, запасенной в выходных цепях источника питания. Современные полупроводниковые приборы – биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) или мощные полевые транзисторы (MOSFET) позволяют сократить время реакции системы защиты до 1 мкс и менее, ограничив выделение энергии в дуговой разряд на уровне порядка 10 мДж на 1 кВт мощности магнетронного разряда.

Система дугоподавления должна также предотвратить повторное возникновение дуги при последующем включении источника питания. Повторное возникновение дуги произойдет, если образовавшееся на поверхности мишени катодное пятно не прекратило существование за время выключения. Например, в работе [5] показано, что эффективное гашение дуг на катоде из легированного галлием оксида цинка достигается при отключении источника питания на время не менее 100 мкс. Было также показано [6], что работа и.п. в импульсном режиме способствует снижению вероятности появления дуг. При увеличении частоты выше некоторого предела (40–80 кГц), зависящего от параметров процесса распыления, образование дуг на катоде м.р.с. прекращается.

Несмотря на то, что в мире уже созданы и.п. для м.р.с. с эффективными системами дугоподавления, в России на многих производствах и даже в исследовательских лабораториях используются и.п. совершенно устаревших конструкций [7]. Это существенно ограничивает возможности создания новых технологий нанесения тонкопленочных покрытий. Целью данной работы было создание универсального источника питания для магнетронных распылительных систем мощностью до 5 кВт, обладающего малым временем реакции на дугу, низким уровнем вкладываемой в дуговой разряд энергии, а также дающего широкие возможности для подбора оптимальных технологических режимов при магнетронном нанесении тонкопленочных покрытий. Исходя из такой постановки задачи, был разработан универсальный

источник питания, способный работать в режиме постоянного тока и в импульсном режиме с частотой повторения до 100 кГц.

## 1. УСТРОЙСТВО И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Источник питания выполнен в виде блока с размерами 460 × 420 × 172 мм и может устанавливаться в стандартную 19-дюймовую стойку. Управление источником осуществляется с помощью псевдосенсорных кнопок и энкодера, размещенных на передней панели, или дистанционно через интерфейс RS485. Для отображения текущих параметров используется четырехстрочный ж.к.-дисплей.

И.п. имеет максимальную выходную мощность 5 кВт и может работать в режимах стабилизации напряжения, тока или мощности. Диапазон изменения стабилизируемых выходных параметров составляет 65–650 В, 0.1–8 А и 0.1–5 кВт соответственно. И.п. имеет два режима работы: режим постоянного тока, при котором выходное напряжение подается на м.р.с. постоянно, и импульсный режим, при котором напряжение на м.р.с. подается с частотой, регулируемой в пределах 1–100 кГц, и коэффициентом заполнения, изменяемым в пределах 10–80%. Величина тока срабатывания системы дугоподавления является неизменной и составляет 17 А при работе в постоянном режиме и 13 А при работе в импульсном режиме.

Блок-схема и.п. представлена на рис. 1. Источник питания подключается к трехфазной сети через блок входных контакторов, подающих напряжение на мостовой выпрямитель. Блок входных контакторов обеспечивает также плавную зарядку емкости трехфазного мостового выпрямителя. Выпрямленное напряжение поступает на резонансный мостовой преобразователь, выход которого соединен с высокочастотным повышающим трансформатором, обеспечивающим гальваническую развязку выхода источника питания от сети.

Мостовой преобразователь собран по схеме последовательного резонансного инвертора [8] с резонансной частотой 90 кГц. В качестве ключевых элементов используются IGBT G4PF50WD. Особенностью процессов, протекающих в такой схеме, является то, что каждый такт отпириания накрест лежащих транзисторов сопровождается формированием двух полуволн тока нагрузки. Первая полуволна обуславливается колебательным характером процесса перезарядки конденсатора от источника питания через открытые транзисторы, вторая – процессом обратной перезарядки конденсатора через обратные диоды транзисторов. Для реализации режима прерывистого тока инвертора выполнено соотношение частот  $f_0 > 2f$ , где  $f_0$  – собственная резонансная частота выходной цепи инвертора,  $f$  – выходная частота инвертора. Мощность, передаваемая в нагрузку, определяет-

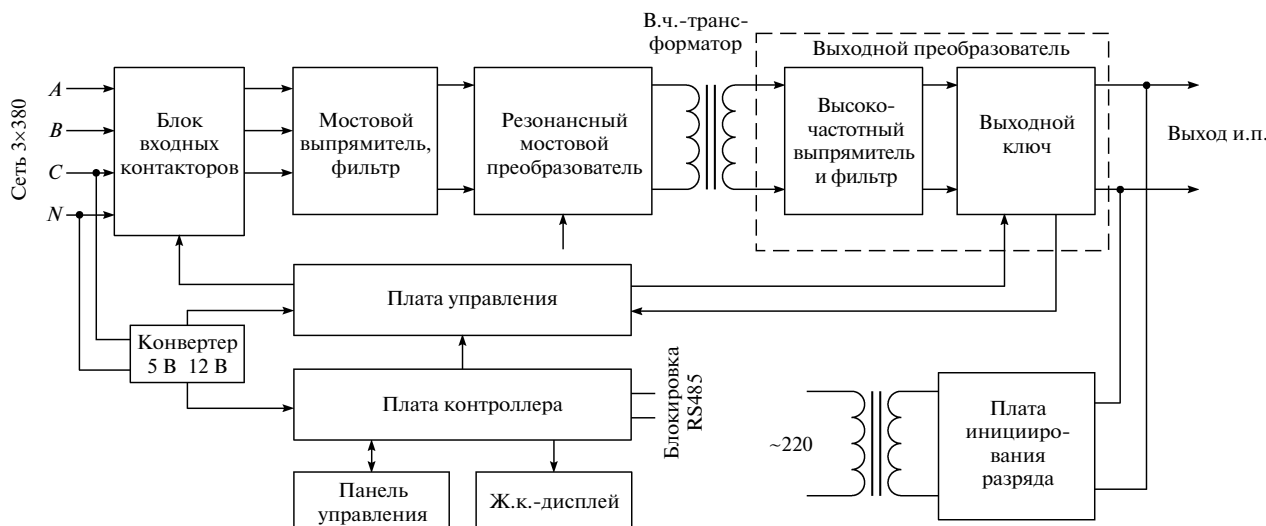


Рис. 1. Блок-схема источника питания.

ся частотой повторения импульсов в инверторе. Достоинством способа частотного регулирования является отсутствие необходимости в дополнительном блоке регулирования напряжения перед инвертором. К недостаткам схемы следует отнести необходимость установки достаточно большой фильтрующей емкости в выходном высокочастотном выпрямителе. Вторичная обмотка трансформатора, стоящего на выходе инвертора, соединена с высокочастотным выпрямителем выходного преобразователя. Выходной ключ коммутирует выпрямленное высокочастотное напряжение на нагрузку в постоянном или частотном режиме, а также выполняет функцию дугогашения.

Плата управления формирует сигналы, необходимые для работы преобразователей: частотно-модулированные сигналы для ключей инвертора, сигнал управления выходным транзистором и контакторами. Эти сигналы через оптическую развязку поступают к драйверам транзисторов. Плата управления также принимает и преобразует сигналы обратной связи для осуществления стабилизации по напряжению, току или мощности, кроме того, на плату поступает сигнал защиты с драйвера выходного ключа, запускающий процесс подавления дуги.

Плата контроллера выдает сигналы для платы управления, обеспечивая интерактивное управление источником с панели управления (изменение выходных параметров, переключение режимов работы), обеспечивает связь и.п. с управляющими устройствами по интерфейсу RS485, а также формирует и передает информацию для отражения на жидкокристаллическом дисплее. На ж.к.-дисплей выводятся установленное значение стабилизируемого параметра (тока, напряжения или мощности), текущие выходные значения то-

ка, напряжения или мощности. При работе в импульсном режиме на дисплее также отражаются установленные значения частоты повторения и коэффициента заполнения импульсов.

Поскольку напряжение зажигания магнетронного разряда значительно выше напряжения горения, то для возбуждения разряда в и.п. имеется блок инициирования разряда, обеспечивающий подачу на катод магнетрона импульсов напряжения амплитудой 1 кВ и длительностью 30 мс. Частота повторения импульсов – 1 Гц. Ток разряда ограничен резистором на уровне 300 мА. Включение и выключение блока инициирования осуществляется с панели управления или дистанционно.

## 2. РАБОТА ВЫХОДНОГО КЛЮЧА И СХЕМЫ ДУГОЗАЩИТЫ

Узлом, определяющим основные технические характеристики и.п., является выходной преобразователь, содержащий высокочастотный выпрямитель и выходной ключ (рис. 2). Напряжение на конденсаторной батарее измеряется с помощью резистивного делителя  $R_2$ ,  $R_3$ , а выходной ток с помощью датчика тока LAN25-NP. Режим работы выходного ключа определяется способом управления силового транзистора  $T_1$ . При работе и.п. в непрерывном режиме транзистор  $T_1$  открыт, а контактор  $K_1$  разомкнут. В этом режиме в цепь нагрузки последовательно включены индуктивности  $L_1 = 60$  мкГн и  $L_2 = 700$  мкГн. Так как суммарная индуктивность цепи достаточно велика, то и.п. в данном режиме фактически работает как источник тока.

При работе в импульсном режиме контактор  $K_1$  замкнут, а на затвор транзистора  $T_1$  подаются импульсы управления с частотой от 1 до 100 кГц и

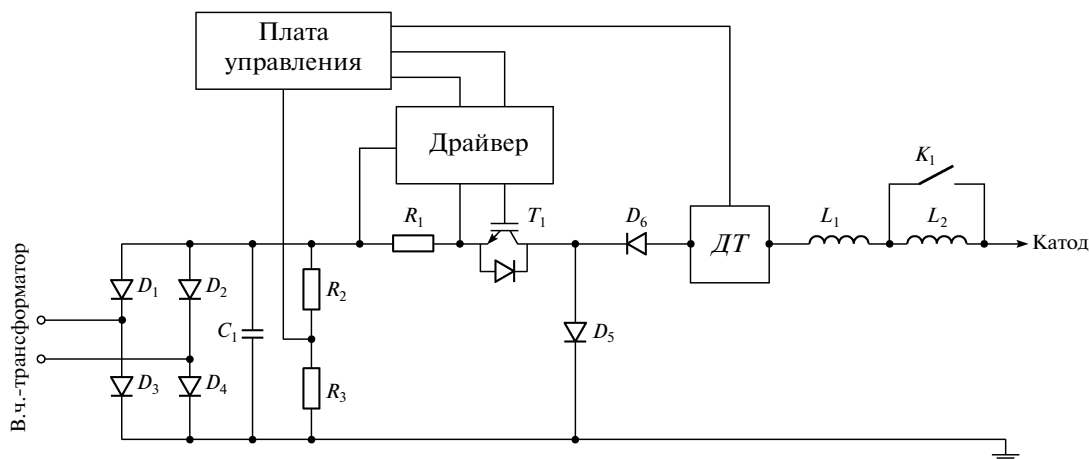


Рис. 2. Схема выходного преобразователя.

коэффициентом заполнения от 10 до 80%. Шаг изменения частоты составляет 1 кГц, шаг изменения коэффициента заполнения – 1%. В цепь нагрузки в импульсном режиме включен только дроссель  $L_1$ , ограничивающий скорость нарастания тока через магнетрон до уровня  $dI/dt = 5–10$  А/мкс в рабочем диапазоне напряжений магнетрона  $U = 300–600$  В.

В качестве ключа  $T_1$ , коммутирующего батарею конденсаторов  $C_1$  на нагрузку, используется полевой транзистор CMF20120D. Данный MOSFET на основе карбида кремния имеет рабочее напряжение до 1200 В. Запас ключа по напряжению позволяет создавать различные модификации источника, базируясь на уже имеющемся выходном преобразователе. В случае необходимости увеличения выходного напряжения до 1 кВ изменения силовой схемы коснутся лишь высокочастотного трансформатора. Выбор полевого транзистора также обусловлен низкими потерями при переключении.

Осциллограммы напряжения и тока и.п., работающего с магнетронной распылительной системой в импульсном режиме с частотой повторения 50 кГц при коэффициенте заполнения импульсов 40%, представлены на рис. 3. Импульсы напряжения с амплитудой около 580 В имеют прямоугольную форму с длительностью фронтов не более 0.8 мкс. Затухающие колебания напряжения с периодом 1.3 мкс, возникающие за фронтом импульса напряжения, связаны с резонансной зарядкой конструктивной емкости м.р.с. и емкости двойного электрического слоя через индуктивность  $L_1$ . Оценка суммарной емкости, исходя из периода колебаний и индуктивности  $L_1$ , дает величину около 700 пФ, что является типичной для используемых в экспериментах м.р.с. с дисковым катодом  $\varnothing 75–100$  мм.

Форма импульсов тока близка к треугольной. При подаче импульса напряжения ток в м.р.с. на-

чинает нарастать со скоростью 0.6 А/мкс, определяемой процессами ионизации в зоне магнетронного разряда. При закрытии транзистора  $T_1$  напряжение на выходе и.п. падает за время  $< 1$  мкс, ток, текущий в индуктивности  $L_1$ , спадает до нуля за 5–7 мкс, замыкаясь через диод  $D_5$ .

Защита источника питания и магнетронной распылительной системы при возникновении дуг осуществляется с помощью драйвера выходного ключа (рис. 4). Величина тока, протекающего через силовой транзистор  $T_1$  (рис. 2), определяется по падению напряжения на резисторе  $R_1$ , включенном последовательно с ним. Резистор изготовлен из манганинового провода и имеет сопротивление 0.03 Ом. Напряжение с резистора  $R_1$  (рис. 2) поступает на делитель напряжения схемы драйвера выходного ключа  $R_5, R_6$  (рис. 4) и через ограничительное сопротивление  $R_4$  поступает на вход CS микросхемы драйвера IR2128. Когда напряжение превышает пороговое значение, мик-

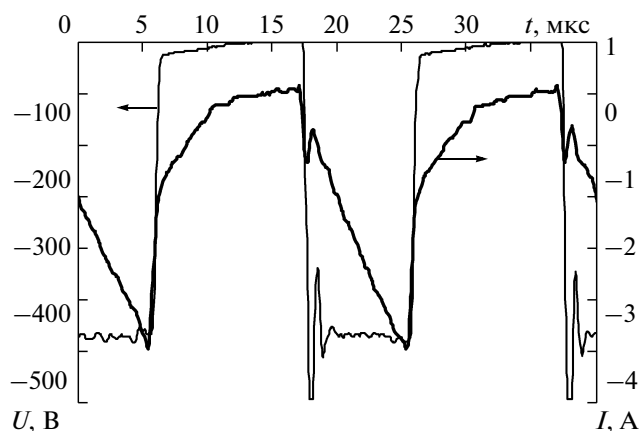


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и тока на м.р.с. при работе и.п. в импульсном режиме.

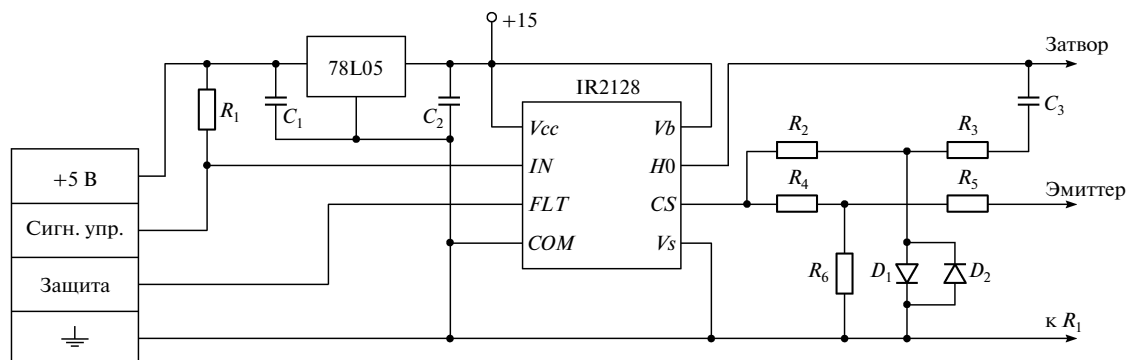


Рис. 4. Схема драйвера выходного ключа.

росхема снимает управляющий сигнал с затвора транзистора. Время выключения транзистора  $T_1$  не более 0.8 мкс с момента превышения на резисторе  $R_1$  порогового значения.

В режиме постоянного тока или при низких частотах повторения импульсов потери в транзисторе преимущественно статические, а при работе на высоких частотах большой вклад вносят уже динамические потери при переключениях. Для снижения тепловой нагрузки на транзистор  $T_1$  при работе на высоких частотах, в выходную цепь драйвера включена схема, позволяющая в высокочастотных режимах снизить ток срабатывания защиты. В импульсном режиме формируется добавка напряжения на вход  $CS$ , которую можно задать с

помощью резистора  $R_3$ . Порог срабатывания защиты в режиме постоянного тока составляет 17 А, а в импульсном режиме по мере увеличения рабочей частоты снижается до 13 А.

При срабатывании защиты на выходе  $FLT$  микросхемы IR2128 формируется сигнал *Fault*. Этот сигнал через оптическую развязку поступает на плату управления и отключает сигнал управления транзистором  $T_1$  на время 800 мкс. Эта пауза после срабатывания защиты необходима для падения разогнанного в индуктивностях тока и погасания катодного пятна. В режиме стабилизации тока или мощности отключение выходного ключа на время паузы после срабатывания дугозащиты может привести к увеличению напряжения на емкости фильтра, поэтому система управления отключает также инвертор. Включение инвертора происходит с задержкой 100 мкс относительно включения выходного ключа. Таким образом, работа и.п. начинается за счет энергии, накопленной в емкости выходного преобразователя. Напряжение на емкости при этом уменьшается. При частом повторении дуг напряжение на конденсаторе снизится существенно, что будет приводить к уменьшению вероятности образования дуг.

На рис. 5а представлены осциллограммы тока и напряжения при возникновении дуги на м.р.с., работающей в постоянном режиме с напряжением 400 В и током 1.8 А. В момент времени  $t_1$  на м.р.с. возникает биполярная дуга, что приводит к падению напряжения на м.р.с. до уровня  $\sim 40$  В, соответствующего напряжению горения дугового разряда. Ток разряда начинает нарастать со скоростью  $dI/dt = U/(L_1 + L_2) = 0.5$  А/мкс. Наблюдаемая на осциллограмме нелинейность нарастания тока связана с частичным насыщением сердечника индуктивности  $L_2$ .

В момент времени  $t_2$  ток достигает порогового значения 17 А, и драйвер управления выходного транзистора формирует сигнал выключения. Ток продолжает расти до момента закрытия транзистора, происходящего через 0.8 мкс, но этот рост не-

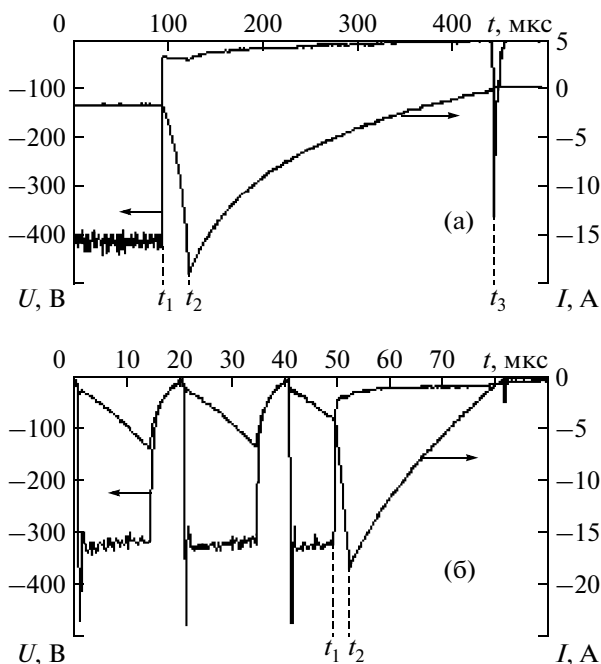


Рис. 5. Осциллограммы срабатывания дугозащиты в постоянном (а) и импульсном (б) режимах работы и.п.

значителен. После закрытия ключа ток, текущий в индуктивностях  $L_1$  и  $L_2$ , течет через диод  $D_5$  (рис. 3) и спадает с характерным временем порядка 200 мкс, определяемым сопротивлением дугового разряда.

В момент времени  $t_3$  прекращается функционирование катодного пятна и происходит обрыв тока, приводящий к выбросу напряжения на м.р.с. Энергия, вложенная в дуговой разряд, примерно равна энергии, запасенной в индуктивностях  $L_1$  и  $L_2$ . Поскольку амплитуда тока в момент выключения транзистора  $T_1$  равна 17 А, то эта энергия составляет 110 мДж. Эта величина, с одной стороны, недостаточна для формирования в катодном пятне большого количества микрокапель, а с другой стороны, позволяет удалять с поверхности мишени загрязнения. Таким образом, такая величина энерговклада не приводит к появлению дефектов в наносимом покрытии, но дает возможность провести тренировку даже сильно загрязненной мишени.

На рис. 5б представлены осциллограммы тока и напряжения при возникновении дуги на м.р.с., работающей в импульсном режиме с частотой повторения 50 кГц, коэффициентом заполнения 60%, амплитудой напряжения 320 В и амплитудой тока 6А. В момент времени  $t_1$  возникает биполярная дуга, и ток разряда начинает нарастать со скоростью  $dI/dt = U/L_1 = 5$  А/мкс. При достижении током величины 13 А драйвер транзистора  $T_1$  формирует сигнал закрытия транзистора. Поскольку скорость нарастания тока в импульсном режиме работы определяется индуктивностью  $L_2 = 60$  мкГн, то до момента закрытия ключа  $t_2$  ток нарастает до 17 А. Энергия, запасенная в индуктивности, в этом случае составляет 9 мДж. Такая низкая величина вложенной в дуговой разряд энергии практически исключает образование микрокапель.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Источник питания был использован при разработке технологий нанесения тонкопленочных покрытий различного функционального назначения. Было показано, в частности, что возможность независимого изменения частоты повторения импульсов и их скважности позволяет оптимизировать параметры получаемых покрытий.

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента пропускания на длине волны 550 нм ( $T_{550}$ ), коэффициента отражения на длине волны 10 мкм ( $R_{и.к.}$ ) и поверхностного сопротивления пленки ( $R_{sh}$ ) многослойного низкоэмиссионного покрытия структуры  $TiO_2/ZnO:Ga/Ag/ZnO:Ga/TiO_2$  от скважности импульсов  $Q$  при нанесении слоя серебра. Это покрытие должно быть максимально

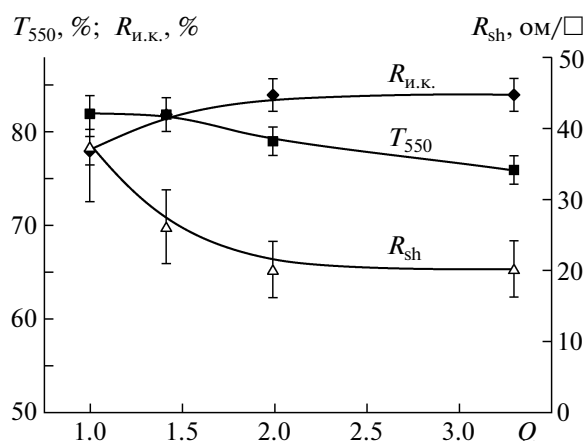


Рис. 6. Зависимость прозрачности  $T_{550}$  в видимом диапазоне, отражения в и.к.-диапазоне  $R_{и.к.}$  и поверхностного сопротивления  $R_{sh}$  многослойного  $TiO_2(10\text{ нм})/ZnO:Ga(20\text{ нм})/Ag(7.5\text{ нм})/ZnO:Ga(28\text{ нм})/TiO_2(20\text{ нм})$ -покрытия от скважности импульсов в процессе осаждения слоя Ag.

прозрачным в видимом диапазоне и максимально отражающим в и.к.-диапазоне.

Основным функциональным слоем, отвечающим за коэффициент отражения всего покрытия в и.к.-диапазоне, является пленка серебра. Коэффициент отражения увеличивается с увеличением толщины слоя серебра, однако при этом уменьшается его прозрачность в видимом диапазоне. Соотношение отражения в и.к.-диапазоне и прозрачности в видимом диапазоне определяется структурой пленки серебра. Увеличение плотности пленки приводит к улучшению требуемых характеристик.

Скважность изменялась от единицы, что соответствует режиму магнетронного распыления на постоянном токе, до 3.3. При этом средняя мощность разряда поддерживалась постоянной. Все остальные слои покрытия наносились в неизменных условиях.

Как можно видеть, скважность импульсов напряжения  $Q$  при нанесении слоя серебра оказывает существенное влияние на характеристики всего покрытия. Поверхностное сопротивление уменьшается практически в 2 раза при увеличении  $Q$  от 1 до 3.3. При  $Q = 2$ , когда длительность импульсов напряжения равна паузе между ними, полученное многослойное покрытие имеет оптимальные характеристики для данной структуры. Минимальное поверхностное сопротивление  $R_{sh} = 20$  Ом, максимальное отражение в и.к.-диапазоне  $R_{и.к.} = 84\%$ . Прозрачность на длине волны 550 нм  $T_{550} = 79\%$ .

Изменение структуры тонких пленок, наносимых в импульсном режиме, связано с тем, что при больших значениях импульсных токов меняются физические условия получения пленок. Осаждение

пленок происходит с большей мгновенной скоростью конденсации из более интенсивного потока распыленных частиц. Таким образом, импульсный режим работы и.п. с достаточно высокой скважностью может оказаться полезным для нанесения ультратонких или плотных пленок металлов.

Эксперименты по нанесению пленок прозрачного проводящего оксида цинка, легированного алюминием (ZAO), на полимерные подложки, напротив, показали предпочтительность работы и.п. в постоянном режиме (таблица). Пленки прозрачных проводящих оксидов на полимерных подложках в настоящее время находят применение в производстве гибких электрооптических и электролюминесцентных устройств, приборов с пластиковыми LCD-дисплеями. Также они могут использоваться в качестве пленок, экранирующих электромагнитное излучение [9], и в качестве антистатических, просветляющих и барьерных слоев.

Эксперименты проводились с м.р.с. с вращающимся цилиндрическим катодом  $\varnothing 85$  и длиной 400 мм. Материалом катода служил сплав ZnAl (2 мас. %). Покртия наносились на образцы полиэтилентерефталатной пленки, перемещающейся относительно м.р.с. Были получены образцы пленок ZAO при работе и.п. в постоянном режиме, а также с частотами повторения 10 и 40 кГц при постоянной средней мощности 1.4 кВт. Скважность при работе в импульсных режимах составляла  $Q = 2$ , т.е. длительность импульсов напряжения, подаваемых на м.р.с., составляла 50 и 12.5 мкс соответственно. Измерения подвижности и концентрации носителей зарядов проводились методом Ван-дер-Пау в магнитном поле 0.61 Тл при комнатной температуре. Электрофизические параметры пленок для трех режимов распыления мишени приведены в таблице, из которой следует, что пленки, полученные в режиме постоянного тока, имеют меньшее удельное сопротивление и большую концентрацию носителей.

Исследования поверхности, проведенные с помощью атомно-силового микроскопа, показали, что пленки, полученные на постоянном токе, имеют наименьшую шероховатость: 14.8 нм. Для образцов, полученных на частотах 10 и 40 кГц, шероховатость покрытия составляла около 20 нм. Прозрачность пленок в видимом диапазоне составляла около 94% для всех режимов нанесения. Таким образом, возможность работы и.п. в постоянном режиме обеспечивает получение пленок ZAO с более высокой проводимостью.

## ВЫВОДЫ

Разработан источник питания для магнетронных распылительных систем, способный работать в режиме постоянного тока и в импульсном режи-

Электрофизические параметры пленок легированного алюминием оксида цинка

Режим	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом · см	Концентрация носителей заряда $N$ , см <sup>-3</sup>	Холловская подвижность $\mu$ , см <sup>2</sup> /В · с
10 кГц	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{20}$	12.2
40 кГц	$1.17 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{20}$	15.1
Постоянного тока	$1 \cdot 10^{-3}$	$4.7 \cdot 10^{20}$	13.3

ме с частотой повторения до 100 кГц. Срабатывание системы дугоподавления происходит при превышении током предельного значения, равного 17 А при работе в режиме постоянного тока и 13 А при работе в импульсном режиме. Время срабатывания системы дугоподавления не превышает 0.8 мкс, что при работе источника питания в импульсном режиме ограничивает энергозатраты в дуговой разряд на уровне 9 мДж. При работе в режиме постоянного тока величина энергозатрат в дуговой разряд выбрана на уровне 110 мДж для обеспечения быстрой тренировки распыляемых мишеней. Широкие пределы регулировки частоты повторения и коэффициента заполнения импульсов позволяют выбирать оптимальные параметры процесса нанесения покрытий.

Работа была выполнена в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (ГК № 02.740.11.0760).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008.
2. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. М.: Техносфера, 2010.
3. Koski K., Holsa J., Juliet P. // Surface and Coatings Technology. 1999. V. 115. P. 163.
4. Milde F., Schulze D., Teschner G. // Proc. of 44th Annual Technical Conference of Vacuum Coaters. Philadelphia, USA. 2001. P. 375.
5. Carter D., Walde H., Nauman K. // Thin Solid Films. 2011. doi:10.1016/j.tsf.2011.04.103.
6. Belkind A., Freilich A., Scholl R. // Surface and Coatings Technology. 1998. V. 108–109. P. 558.
7. Кашанов Н.Ф., Лучкин Г.С., Тагиров Р.Ф. // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 2. С. 346.
8. Моин В.С. Силовые транзисторные преобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 86.
9. Yanga T.L., Zhang D.H., Maa J. et al. // Thin Solid Films. 1998. V. 326. P. 60.