

МОДУЛЬНЫЙ БИПОЛЯРНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ МОЩНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

© 2014 г. В. О. Оскирко*, **, Н. С. Сочугов*, **, А. П. Павлов*, **

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

**ООО “Прикладная электроника”
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 15-80
E-mail: oskirkovo@gmail.com

Поступила в редакцию 18.11.2013 г.

Описаны схемотехнические решения, конструкция и основные параметры модульного импульсного биполярного источника электропитания для мощных ионно-плазменных установок. Модульный принцип построения источника питания позволил применить его в различных процессах. Представлены результаты испытаний разработанного устройства в качестве источника питания магнетронной распылительной системы мощностью 60 кВт и высоковольтного источника питания смещения подложки мощностью 40 кВт. Экспериментально показана эффективность применения биполярных импульсов для предотвращения дугообразования на катоде магнетрона.

DOI: 10.7868/S0032816214050127

ВВЕДЕНИЕ

Успех промышленного применения ионно-плазменных технологий и, в частности, технологий магнетронного напыления в значительной мере определяется параметрами источника питания (и.п.). Во многом именно от и.п. зависит стабильность процесса напыления и качество получаемого покрытия.

Нанесение покрытий с высокой скоростью на большую поверхность обуславливает необходимость применения протяженных магнетронных распылительных систем (м.р.с.). Для питания м.р.с. протяженностью свыше полуметра требуется источник с выходной мощностью от 10 до 100 кВт в зависимости от длины магнетрона. Чтобы перекрыть столь широкий диапазон мощностей, обеспечить технологичность, удобство эксплуатации и невысокую цену, при конструировании применяют принцип модульности, заключающийся в делении мощного и.п. на идентичные модули меньшей мощности. С эксплуатационной точки зрения принцип модульности обеспечивает минимизацию временных потерь при устранении неполадок за счет оперативной замены неисправного модуля на запасной.

У источников питания с модульной конструкцией есть и недостатки. Система управления таких и.п. существенно сложнее, так как она должна обеспечить выполнение ряда комплексных задач: равномерное распределение нагрузки на модули, синхронную реакцию всех модулей, сбор и анализ данных о состоянии модулей.

Одной из ключевых проблем технологий магнетронного напыления является дугообразование. В процессе распыления тлеющий разряд м.р.с. может перейти в дуговой, образующий локальный ионизированный канал с низким импедансом между катодом и анодом. Дугообразование сопровождается резким падением напряжения горения разряда и ростом тока. Дуговой разряд приводит к локальному плавлению и испарению некоторого количества материала катода. Испарившийся материал осаждается на подложке в виде микрокапель и микрочастиц, образующих дефекты в растущей пленке [1, 2].

Качество покрытия во многом зависит от энергии, выделяемой локально в дуговом разряде. Величина этой энергии в основном определяется временем реакции источника питания на дуговую пробой. Для подавления возникшего дугового разряда используют или полное снятие питающего напряжения, или резкую смену его полярности. Чтобы горячее катодное пятно на поверхности мишени остыло, повторное включение проводят спустя ~1 мс. Для быстрого обнаружения пробоя используются специальные способы детектирования по увеличению тока и падению напряжения [1, 3–7].

При учащении дуговых пробоев становится сложнее удерживать установленные параметры, а следовательно, получать заданные характеристики покрытия. Современный источник питания м.р.с. должен не только быстро и эффективно реагировать на дуговые пробои, но и снижать вероятность их возникновения. Для этого необходимо

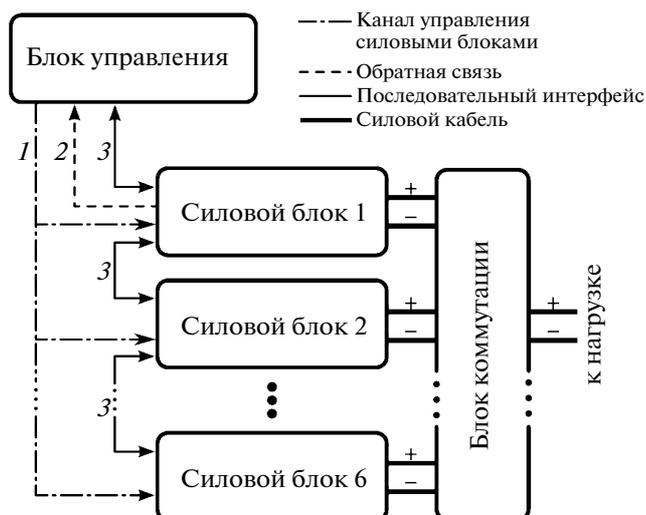


Рис. 1. Структурная схема источника питания м.р.с.
1–3 – оптические каналы.

обеспечить импульсный среднечастотный режим работы, в котором каждый период состоит из отрицательного импульса с параметрами, необходимыми для распыления мишени, и паузы или положительного импульса [8, 9]. Длительности положительного и отрицательного импульсов определяются из условия равновесия в процессах, протекающих на поверхности мишени магнетрона [10, 11].

При нанесении толстых покрытий процесс напыления занимает продолжительное время, что требует от источника питания высокой надежности.

В данной статье описан модульный источник питания с биполярным импульсным выходным напряжением частотой до 100 кГц и мощностью до 60 кВт, отвечающий современным требованиям, предъявляемым к источникам питания для магнетронных распылительных систем.

ОБЩАЯ СХЕМА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ М.Р.С.

При создании источника питания использовался модульный принцип построения. Модулем является силовой блок со следующими предельными выходными параметрами: напряжение 330 В, ток 45 А, мощность 10 кВт. Структурная схема и.п. представлена на рис. 1. Управление группой силовых блоков осуществляется блоком управления. Блок коммутации обеспечивает последовательно-параллельное соединение выходов силовых блоков.

Для управления силовыми блоками служат оптические каналы 1–3. Канал 1 используется для синхронного формирования биполярных импульсов и задания требуемого уровня мощности.

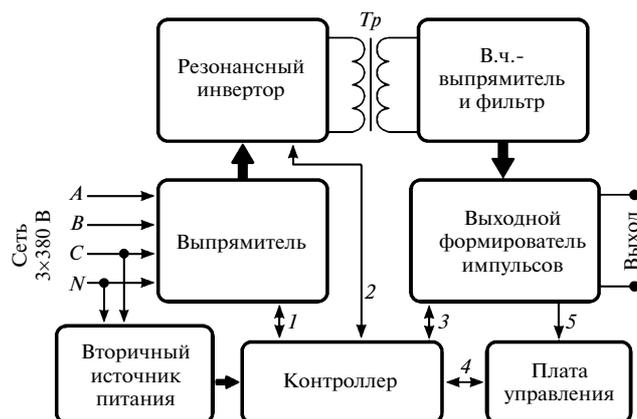


Рис. 2. Структурная схема силового блока. 1–5 – каналы управления и обратной связи.

Он состоит из оптических трактов, которые соединяют блок управления непосредственно с каждым силовым блоком.

Равномерное распределение мощности между силовыми блоками осуществляется следующим образом. Первый (ведущий) силовой блок получает от блока управления сигнал, определяющий заданный уровень тока, напряжения или мощности в зависимости от выбранного оператором режима стабилизации.

Блок управления отслеживает выходную мощность ведущего силового блока через оптический канал обратной связи 2 и задает для стабилизации такой же уровень мощности всем остальным силовым блокам через канал 1. Таким образом, все силовые блоки, кроме первого (ведущего), постоянно работают в режиме стабилизации мощности, ориентируясь на выходную мощность ведущего блока, что приводит к равномерному распределению нагрузки.

Оптический канал 3 используется для внутреннего обмена данными по протоколу RTU ModBus на скорости 500 кБод. В качестве сервера выступает блок управления, а все силовые блоки являются клиентами. Протокол передачи расширен введением дополнительных нестандартных функций, реализующих алгоритм автоматической инициализации сетевых адресов клиентов и минимизирующих количество запросов сервер-клиент.

СИЛОВОЙ БЛОК

На рис. 2 представлена структурная схема силового блока источника питания.

Силовой блок питается от трехфазной сети переменного тока. На его входе размещен выпрямитель, включающий в себя трехфазный выпрямительный мост, LC-фильтр и схему первоначальной зарядки емкостей, которая работает в режиме широтно-импульсной модуляции, ограничивая

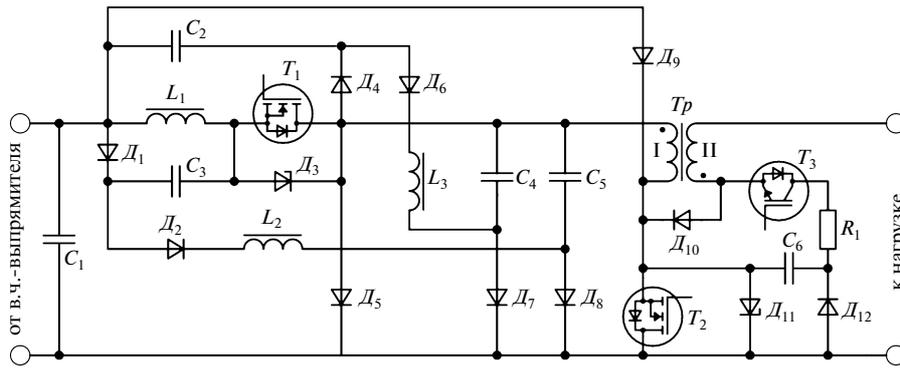


Рис. 3. Выходной формирователь импульсов.

величину зарядного тока при включении и.п. После зарядки входных емкостей блок готов к работе. С выпрямителя постоянное напряжение поступает в резонансный инвертор, где преобразуется в переменное напряжение частотой до 60 кГц. Инвертор построен по мостовой резонансной схеме с нагрузкой в виде последовательного резонансного контура, что ограничивает максимальный ток и снижает динамические потери в силовых элементах. Трансформатор Tr обеспечивает гальваническую развязку до 3 кВ, что позволяет соединять силовые блоки между собой произвольным образом.

Переменное напряжение с трансформатора поступает в высокочастотный выпрямитель, где выпрямляется и сглаживается фильтром, после чего постоянный ток преобразуется выходным формирователем импульсов в импульсное биполярное напряжение.

Контроллер силового блока формирует управляющие сигналы 1, 2 для схемы первоначальной зарядки и резонансного инвертора, а также транслирует поступающие в выходной формирователь импульсов из блока управления сигналы управления 3, обменивается данными с блоком управления и осуществляет непрерывную диагностику всех силовых элементов. Для отслеживания и стабилизации выходных параметров используется плата управления, которая преобразует аналоговые сигналы 5 с датчиков выходного формирователя импульсов в цифровые и получает задающие сигналы в цифровой форме от контроллера по каналу 4.

Выходной формирователь импульсов построен на основе полевых транзисторов. Его электрическая схема приведена на рис. 3.

Выходной формирователь импульсов позволяет получать на выходе среднечастотные импульсы положительной и отрицательной полярности. На рис. 4 приведены эпюры токов и напряжений, поясняющие принцип его работы.

Период формирования импульсов делится на три временных интервала. В интервале $[t_0, t_1]$ транзистор T_1 открыт, и через цепь $Tr(I)-D_{10}-Tr(II)-T_1-L_1-C_1$ в нагрузку R_H течет ток $I_H^- \approx U_{C1}/R_H$. Напряжение на выходе формирователя в этот период в установившемся состоянии практически равно напряжению на конденсаторе C_1 : $U_{H1} \approx U_{C1}$. Большая индуктивность намагничивания трансформатора Tr стабилизирует выходной ток. Для ограничения напряжения при уменьшении проводимости нагрузки используется диод D_9 , через который замыкается часть тока трансформатора Tr .

Следующий интервал начинается в момент времени t_1 . Транзисторы T_2 и T_3 открываются синхронно, и напряжение конденсатора C_1 прикла-

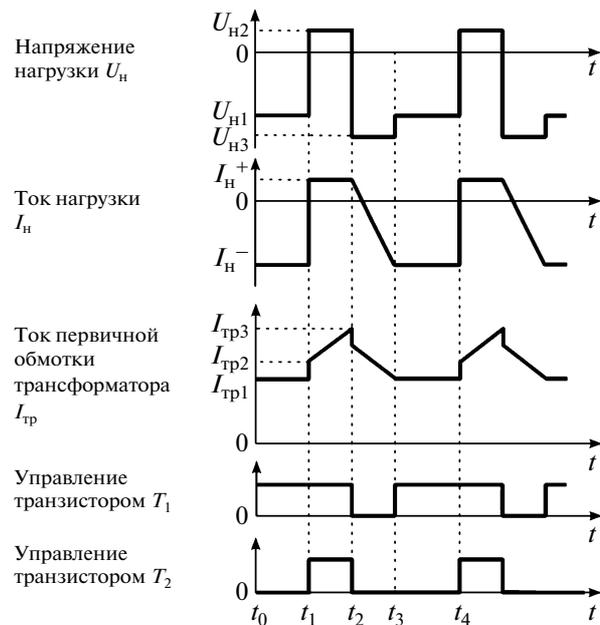


Рис. 4. Эпюры напряжения и тока выходного формирователя импульсов.

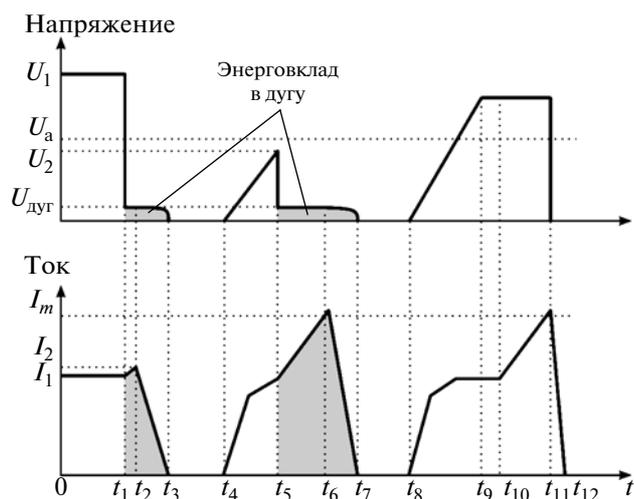


Рис. 5. Эпюры тока и напряжения, поясняющие работу системы дугоподавления.

дывается к первичной обмотке трансформатора Tr . При этом на его вторичной обмотке формируется положительное напряжение $U_{н2} = kU_1$, а ток обмотки замыкается через цепь: $T_3-R_1-D_{12}$ —нагрузка. Величина тока вторичной обмотки Tr может достигать 2 А (при $R_1 = 125$ Ом, $k = 0.3$). Длительность интервала $\tau = t_2 - t_1$ определяет длительность положительного импульса и может изменяться от 3 до 10 мкс.

В момент t_2 выключаются транзисторы T_1 , T_2 и T_3 . Отрицательный импульс напряжения на нагрузке в интервале $[t_2, t_3]$ формируется за счет энергии, накопленной в трансформаторе Tr . Напряжение $U_{н3}$ на этом интервале определяется суммой напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора. Напряжение на первичной обмотке ограничивается диодом D_9 на уровне U_{C_1} , а напряжение на вторичной обмотке равно kU_{C_1} . Таким образом, импульс напряжения на нагрузке в интервале времени $[t_2, t_3]$ имеет добавочную величину kU_{C_1} , что способствует быстрому росту нагрузочного тока.

В состав выходного формирователя импульсов входят демпфирующие цепи, обеспечивающие надежную работу транзисторов [12].

Для уменьшения скорости нарастания тока в момент включения транзистора T_1 используется дроссель L_1 . Возможность опасных всплесков напряжения на транзисторе T_1 при его выключении устраняется конденсаторами C_2 , C_3 . Накопленная в этих конденсаторах энергия коммутируется в конденсаторы C_4 , C_5 во время следующего включения транзистора T_1 , после чего C_4 , C_5 разряжаются в нагрузку.

Транзистор T_2 также имеет демпфер, ограничивающий скорость роста напряжения при его выключении. Когда транзистор выключается, происходит плавная зарядка конденсатора C_6 , после чего — при включении транзисторов T_2 и T_3 — конденсатор C_6 разряжается в нагрузку через цепь R_1-T_3 и $Tr(II)$.

Для защиты транзисторов T_1 и T_2 от перенапряжений в схему включены ограничители напряжения D_3 и D_{11} .

СИСТЕМА ДУГОПОДАВЛЕНИЯ

Разработанный источник питания м.р.с. имеет систему дугоподавления. Детектирование дуги осуществляется двумя способами: по падению напряжения (микродуги) и по превышению порогового значения тока. Гашение дуги осуществляется с помощью импульса положительной полярности, за которым следует пауза. На рис. 5 приведены эпюры тока и напряжения, поясняющие работу системы дугоподавления в различных условиях.

До возникновения дуги на интервале $[0, t_1]$ магнетрон находится в рабочем режиме, горит аномальный тлеющий разряд с током I_1 . Для детектирования падения напряжения устанавливается пороговое напряжение U_a , величина которого должна быть выше напряжения горения дуги $U_{дуг}$ и значительно ниже рабочего значения U_1 . Обычно $U_a = 50-150$ В.

В момент времени t_1 на катоде магнетрона происходит дуговой пробой, который сопровождается практически мгновенным падением напряжения до напряжения горения дуги.

Детектирование начала пробоя системой дугоподавления происходит в течение интервала $[t_1, t_2]$, составляющего ~ 0.5 мкс. За это время происходит рост тока, но из-за большой индуктивности выходного формирователя импульсов ток увеличивается менее чем на 0.1 А.

Далее открываются транзисторы T_2 и T_3 . В результате на выходе и.п. снимается отрицательное напряжение и формируется положительный импульс, который способствует быстрому спаду выходного тока. Время спада тока зависит от величины паразитной индуктивности проводов, соединяющих источник питания и м.р.с. Длительность положительного импульса регулируется от 3 до 10 мкс. В конце положительного импульса выключается транзистор T_1 , после чего следует пауза, регулируемая в диапазоне 1–50 мс. Во время паузы гаснет катодное пятно на поверхности мишени.

При использовании такого способа детектирования дуги энергия горения дугового разряда не превышает 10 мДж при выходной мощности 10 кВт.

Однако возможны ситуации, когда необходимо детектировать пробои другим способом. Представленные в интервале $[t_4, t_7]$ эпюры тока и напряжения (см. рис. 5) характеризуют работу системы дугоподавления при превышении порогового значения тока.

В момент времени t_4 и.п. формирует импульс, и загорается тлеющий разряд м.р.с., что сопровождается увеличением тока и ростом напряжения на магнетроне. В момент t_5 возникает дуговой пробой, но напряжение еще не достигло порогового значения U_a . Следовательно, система не обнаруживает падения напряжения, происходящего в этот момент.

Ток дугового разряда начинает увеличиваться с постоянной скоростью, определяемой внутренней индуктивностью выходного формирователя импульсов. В момент t_6 выходной ток достигает установленного порогового значения I_m , после чего и.п. формирует положительный импульс, гасящий дугу.

Энергия горения дугового разряда в этом случае в зависимости от величины порогового значения составляет от 10 до 1000 мДж. Во время работы величина порогового тока I_m устанавливается на 10–20% выше рабочего значения, что позволяет избежать ложных срабатываний системы дугоподавления и уменьшить энергозатраты в дугу.

Стоит отметить, что не всегда нужно стремиться к уменьшению энергии дуги, иногда для устранения причины ее возникновения необходимо позволить дуге существовать некоторое время. Для этого и.п. имеет дополнительную, регулируемую от 0 до 50 мкс задержку срабатывания системы дугоподавления. Управляя величиной энергии дугового разряда, можно осуществлять очистку поверхности мишени магнетрона, тем самым снижая вероятность образования последующих дуг и повышая стабильность процесса распыления.

Задавая пороговое значение тока, можно ограничивать максимальную рабочую мощность, предотвращая перегрев мишени и выход магнетрона из строя. На рис. 5 (интервал $[t_8, t_{12}]$) приведен пример такого ограничения. В момент t_8 загорается тлеющий разряд. К моменту t_9 ток достигает своего установившегося значения. Далее, выходные значения тока и напряжения не меняются, м.р.с. работает в заданном режиме. К примеру, из-за увеличения давления рабочего газа в камере в момент t_{10} происходит увеличение тока тлеющего разряда до I_m , и система дугоподавления снимает напряжение с выхода источника питания. Таким образом контролируется выходной ток и, следовательно, рабочая мощность.

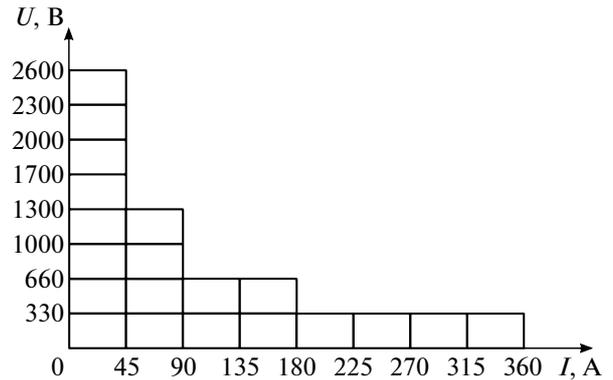


Рис. 6. Схема возможных конфигураций источников питания с.и.о.п. и м.р.с. на базе разработанных силовых блоков.

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ СИСТЕМЫ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОДЛОЖКИ

Для получения необходимых параметров пленок во многих случаях требуется предварительная ионная бомбардировка подложки. Она открывает большие возможности для регулирования структуры и свойств покрытий, кроме того, используется для очистки и активации поверхности, на которую осаждается покрытие. Энергия ионов легко регулируется подачей отрицательного напряжения смещения на проводящую подложку от дополнительного источника питания.

В зависимости от задачи используется различное напряжение смещения. К примеру, для низкоэнергетической ионной бомбардировки во время роста пленки необходимо напряжение от 10 до 150 В, для ионного травления – от 400 до 800 В, а для субимплантации – от 1 кВ [13–15].

Благодаря модульному принципу на основе разработанных силовых блоков возможно создание источников питания для системы ионной обработки подложки (с.и.о.п.) для всех вышеперечисленных процессов. На рис. 6 приведены возможные конфигурации источников при использовании до восьми силовых блоков. Последовательное соединение этих блоков позволяет получить напряжение 2.6 кВ, а их параллельное соединение – увеличить выходной ток до 360 А.

Для источников питания с.и.о.п., так же как и для источников питания м.р.с., актуальна проблема дугообразования. Катодные пятна, образующиеся на подложке, приводят к существенным дефектам в напыляемом покрытии. Образование дуг радикально устраняется применением вышерассмотренных среднечастотных биполярных импульсов, существенное уменьшение энергии горения дуги на подложке достигается с помощью разработанной системы дугоподавления.

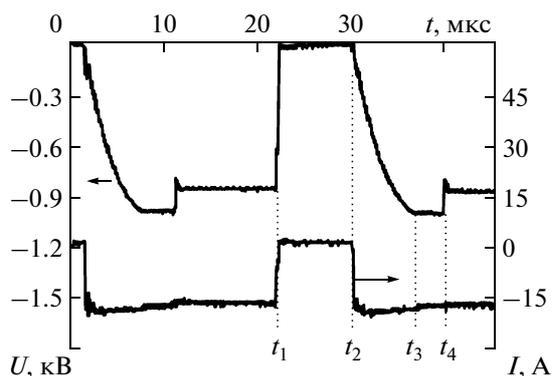


Рис. 7. Осциллограммы тока и напряжения на выходе источника питания с.и.о.п.

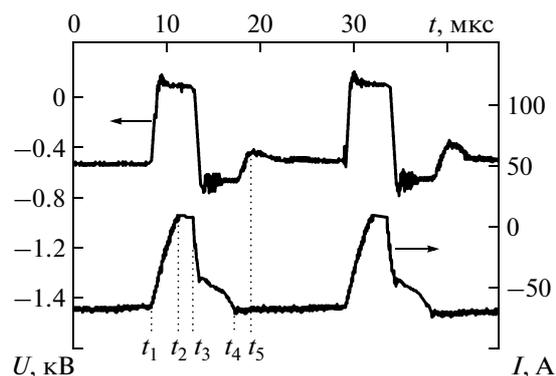


Рис. 8. Осциллограммы тока и напряжения на выходе источника питания м.р.с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С.И.О.П. И М.Р.С.

Нами разработан источник питания с.и.о.п. с рабочим напряжением до 1.3 кВ, током до 45 А и мощностью до 40 кВт. В его состав вошли четыре силовых блока, соединенные между собой последовательно.

Испытания и.п. с.и.о.п. проводились на установке для нанесения покрытий методом магнетронного распыления. Источник питания обеспечивал предварительную ионную очистку поверхности подложки перед нанесением покрытия. Площадь поверхности подложки составляла 2 м².

Осциллограммы тока и напряжения на выходе и.п. с.и.о.п. приведены на рис. 7. Источник работал в следующем режиме: частота следования импульсов 35 кГц, амплитуда отрицательных импульсов 900 В, длительность положительных импульсов 10 мкс. Ионный ток на подложку при этом составил 15 А.

Во время положительного импульса (интервал $[t_1, t_2]$ на рис. 7) через подложку течет электронный ток ~ 2 А. Высокая электронная проводимость плазмы приводит к тому, что практически все напряжение падает на ограничительных сопротивлениях выходных формирователей импульсов силовых блоков, из-за чего амплитуда положительного импульса мала и на осциллограмме практически не видна.

Импульсы тока на осциллограмме имеют форму, близкую к прямоугольной, с длительностью фронта и спада < 1 мкс. Крутизна фронта и спада определяется в основном индуктивностью соединительных проводов между источником питания и подложкой.

В начале отрицательного импульса на интервале $[t_2, t_3]$ (см. рис. 7) протекает большой электронный ток, обусловленный формированием двойного электрического слоя. Поскольку на интервале $[t_2, t_4]$ ток формируется только за счет энергии, запасенной в индуктивности выходного

формирователя импульсов, то его величина ограничена на уровне 15 А. По мере уменьшения электронного тока увеличивается ионный ток на подложку до рабочего значения, что сопровождается ростом напряжения.

После ионной очистки осуществлялся процесс напыления пленок TiO₂ в смеси аргона и кислорода с помощью и.п. м.р.с. Источник содержал шесть силовых блоков. На рис. 8 приведены осциллограммы импульсов тока и напряжения на выходе источника во время процесса напыления.

При выборе рабочей частоты и длительности положительных импульсов использовались рекомендации из работы [10]. Источник питания м.р.с. работал в следующем режиме: установочный уровень тока 55 А, частота следования импульсов 50 кГц, длительность положительных импульсов 4 мкс, порог срабатывания системы дугоподавления 70 А.

В данном режиме и.п. работал не менее часа. Напряжение разряда составляло 550 В. Малое количество дуг позволяет полагать, что в этом режиме с помощью среднечастотных биполярных импульсов достигается равновесие в процессах, протекающих на поверхности мишени магнетрона. То есть за время положительного импульса снимается заряд, накопившийся на поверхности диэлектрической пленки во время отрицательного импульса.

Для пояснения протекающих процессов следует подробнее рассмотреть осциллограммы на рис. 8.

В течение отрицательного импульса успевает накопиться положительный заряд на поверхности слоя диэлектрика, образовавшегося на мишени магнетрона при реактивном распылении. В момент времени t_1 формируется положительный импульс напряжения. Включение реверсивного импульса вызывает изменение тока с -70 до $+6$ А за промежуток времени $t_2 - t_1$. Длительный спад тока (~ 2 мкс) возникает из-за паразитной

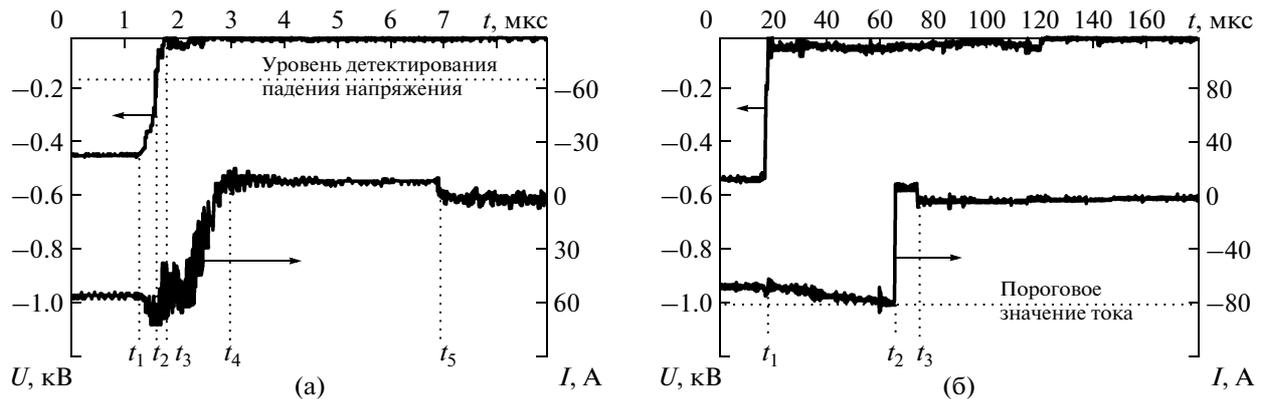


Рис. 9. Осциллограммы тока и напряжения источника питания м.р.с. при детектировании дуги по падению напряжения (а) и по росту тока (б).

индуктивности подводящих к магнетрону проводов.

Далее в промежутке времени t_2-t_3 из плазмы разряда к мишени протекает электронный ток, снимающий положительный заряд с диэлектрической пленки, покрывающей часть поверхности катода. Величина снимаемого заряда определяется величиной тока и длительностью импульса. Электронный ток ограничен сопротивлением источника питания на уровне 6 А и достигался при небольшом положительном напряжении.

В течение времени t_1-t_3 происходит снижение концентрации плазмы в магнитной ловушке. Поэтому непосредственно после подачи на катод отрицательного напряжения, в момент времени t_3 , ток разряда существенно ниже тока, протекавшего до момента t_1 подачи напряжения положительной полярности. Но поскольку в интервале времени t_3-t_4 к разряду прикладывается увеличенное напряжение, то ток разряда быстро растет. В момент t_4 величина тока достигает рабочего значения, и напряжение на выходе источника снижается за промежуток времени t_5-t_4 до значения, соответствующего этому току по вольт-амперной характеристике.

Таким образом, разработанный биполярный источник питания предотвращает возникновение дуг. Возможность увеличения рабочей частоты до 100 кГц и длительности положительных импульсов до 10 мкс позволяет избежать возникновения дуг при работе с различными материалами. Результаты испытаний системы дугоподавления представлены на рис. 9.

В момент времени t_1 (см. рис. 9а) возникает дуговой пробой, который детектируется по падению напряжения в момент t_2 . Колебания тока при образовании дуги обусловлены разрядом выходной паразитной емкости источника питания. После детектирования дугового пробоя источник питания в момент времени t_3 отключает отрица-

тельное напряжение и вырабатывает положительный импульс, который способствует быстрому падению отрицательного тока. К моменту времени t_4 отрицательный ток спадает до нуля, и дуговой разряд гаснет. Далее, в течение интервала времени t_4-t_5 протекает положительный электронный ток, после чего следует длительная пауза, необходимая для остывания образовавшегося катодного пятна. Таким образом, время горения дуги составляет <2 мкс, а энергия дугового разряда не превышает 3 мДж.

Осциллограмма на рис. 9б иллюстрирует работу системы дугоподавления при обнаружении дуги по превышению порогового значения тока. Данный способ детектирования дуги характеризуется намного большей энергией горения дугового разряда. До возникновения дуги рабочий ток составлял 60 А, а после возникновения, в момент t_1 , происходит линейный рост тока до порогового значения 80 А. Для достижения порогового значения потребовалось 20 мкс, а энергия горения дугового разряда составила 70 мДж.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан модульный биполярный источник питания высокой мощности с системой дугоподавления, обладающей широкими возможностями по способу детектирования и реакции на дугообразование. Показано, что питание магнетронной распылительной системы и системы смещения подложки биполярным импульсным напряжением позволяет снижать вероятность дугообразования.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института сильноточной электроники СО РАН и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-08-31164 мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Christie D.J., Walde H.V., Ash T.J.* // Proc. 48th Annual Techn. Conf., Society of Vacuum Coaters. USA. Denver, 2005. P. 39.
2. *Tomasel F., Carter D., Walde H., Gonzalez J., McDonough G., Roche G.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. P. 139.
3. *Carter D., Walde H., McDonough G., Roche G.* // Proc. 45th Annual Techn. Conf. Society of Vacuum Coaters. USA. Lake Buena Vista, 2002. P. 570.
4. *Nyderle R., Winkler T., Labitzke R.* // Proc. 46th Annual Techn. Conf. Society of Vacuum Coaters. USA. San Francisco, 2003. P. 491.
5. *Rettich T., Anderson L.* // Proc. 47th Annual Techn. Conf. Society of Vacuum Coaters. USA. Dallas, 2004. P. 237.
6. *Christie D.J., Seymour E.A.* // Proc. 46th Annual Techn. Conf., Society of Vacuum Coaters. USA. San Francisco, 2003. P. 257.
7. *Сочугов Н.С., Оскирко В.О., Спирип П.Е.* // ПТЭ. 2013. № 2. С. 62. DOI: 10.7868/S0032816213010345.
8. *Kirchhoff V., Kopte T.* // Proc. 39th Annual Techn. Conf. Society of Vacuum Coaters. USA. Philadelphia, 1996. P. 117.
9. *Scholl R., Belking A., Zhao Z.* // Proc. 42th Annual Techn. Conf. Society of Vacuum Coaters. USA. Chicago, 1992. P. 169.
10. *Belkind A., Freilich A., Scholl R.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. V. 17. № 4. P. 1934.
11. *Belkind A., Freilich A., Scholl R.* // Proc. 41th Annual Techn. Conf. Society of Vacuum Coaters. USA. Boston, 1998. P. 321.
12. *Боровиков В., Красников Ю.* // Современная электроника. 2006. № 8. С. 36.
13. *Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е.* // ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2008. № 2. С. 119.
14. *Наумов В.В., Бочкарев В.Ф., Трушин О.С., Горячев А.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 8. С. 92.
15. *Bugaev S.P., Oskotov K.V., Sochugov N.S.* // Surface and Coating Technology. 2002. T. 156. № 1–3. P. 311.