УДК 621.002.56 https://doi.org/10.15407/itm2019.04.137

А. Д. ГРИШКЕВИЧ, С. И. ГРИНЮК

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА НИЗКОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: Gryshkevych.O.D@nas.gov.ua

В роботі вирішувалася задача створення імпульсного джерела живлення розряду, сумісного з технологічними плазмовими пристроями магнетронного типу, що мають незбалансовану магнітну систему. Метою роботи було розроблення схеми модуляції розрядного струму магнетрона, що заснована на недорогих, доступних електронних компонентах. Розглядаються можливості реалізації комплексної технології поверхневої обробки, що базуються на використанні імпульсного потоку енергетичної газометалевої плазми, що генерується аномальним тліючим розрядом із замкнутим дрейфом електронів.

Досліджувалась застосовність двох схем модуляції розрядної напруги на основі індукційно-ємнісного накопичувача енергії. Вибрано резонансну схему модуляції іонного струму з подвоєнням зарядної напруги, що забезпечує отримання розрядних імпульсів тривалістю до 10 мс потужністю до 20 – 30 кВт з частотою проходження імпульсів до 100 Гц. Для комутації розрядної напруги використано тиристори типу Т161-160-16. Відпрацювання параметрів схем модуляції, що досліджують, проводилось спільно з макетом інтегрованого магнетронного плазмового пристрою, що включає планарний і циліндричний магнетронні розпилювачі незбалансованого і збалансованого типу відповідно.

Визначено діапазон робочих параметрів джерела розрядної напруги потужнострумового імпульсного магнетронного розряду. Досліджено параметри плазми в області обробки поверхні. Визначено частку металевих іонів в плазмі, що генерується. Отримано зразки покриттів з характеристиками, що перевищують характеристики покриття, отримані в режимі стаціонарного магнетронного розряду. Досліджений плазмовий технологічний пристрій забезпечує виконання всіх технологічних переходів іонно-плазмової обробки в єдиному вакуумному циклі.

Робиться висновок про те, що розроблена схема імпульсного розрядного джерела задовольняє вимогам технології формування функціональних наноструктурних покриттів з металевих матеріалів і придатна для проведення високоінтенсивної низькоенергетичної іонної імплантації іонів азоту.

Ключові слова: *іонно-плазмова технологія, високоінтенсивна низькоенергетична іонна імплантація, потужнострумовий імпульсний магнетронний розряд, планарна магнетронна розпилююча система, циліндрична магнетронна розпилююча система, імпульсне джерело живлення розряду.*

В работе решалась задача создания импульсного источника питания разряда, совместимого с технологическими плазменными устройствами магнетронного типа, имеющими несбалансированную магнитную систему. Целью работы было создание схемы модуляции разрядного напряжения разряда магнетрона, основанной на недорогих, доступных электронных компонентах. Рассматриваются возможности реализации комплексной технологии поверхностной обработки, базирующиеся на использовании импульсного потока энергетичной газометаллической плазмы, генерируемого аномальным тлеющим разрядом с замкнутым дрейфом электронов.

Исследовалась применимость двух схем модуляции разрядного напряжения на основе индукционно-емкостного накопителя энергии. Выбрана резонансная схема модуляции с удвоением зарядного напряжения, обеспечивающая получение разрядных импульсов длительностью до 10 мс мощностью до 20 – 30 кВт с частотой следования импульсов до 100 Гц. Для коммутации разрядного напряжения использованы тиристоры типа Т161-160-16. Отработка параметров исследуемых схем модуляции производилась совместно с макетом интегрированного магнетронного плазменного устройства, включающего планарный и цилиндрический магнетронные распылители несбалансированного и сбалансированного типа, соответственно.

Определен диапазон рабочих параметров источника разрядного напряжения сильноточного импульсного магнетронного разряда. Исследованы параметры плазмы в области обработки поверхности. Определена доля металлических ионов в генерируемой плазме. Получены образцы покрытий с характеристиками, превышающими характеристики покрытия, полученные в режиме стационарного магнетронного разряда. Исследованное плазменное технологическое устройство обеспечивает выполнение всех технологических переходов ионно-плазменной обработки в едином вакуумном цикле.

Делается вывод о том, что разработанная схема импульсного разрядного источника удовлетворяет требованиям технологии формирования функциональных наноструктурных покрытий из металлических материалов и пригодна для проведения высокоинтенсивной низкоэнергетичной ионной имплантации ионов азота.

Ключевые слова: *ионно-плазменная технология, высокоинтенсивная низкоэнергетичная ионная имплантация, сильноточный импульсный магнетронный разряд, планарная магнетронная распылительная система, цилиндрическая магнетронная распылительная система, импульсный источник питания разряда.*

This paper addresses the problem of the development of a discharge power source compatible with plasma magnetron-type process devices with an unbalanced magnetic system. The aim of the work was to develop a circuit for magnetron discharge voltage modulation based on inexpensive electron components. Consideration is given to possibilities of implementing a package surface treatment technology using a pulsed flow of an energetic gas–metal plasma generated by an anomalous glow discharge with closed electron drift.

The applicability of two discharge voltage modulation circuits based on an inductive/capacitive energy storage system was studied. A resonance modulation circuit with charging voltage doubling was chosen. The circuit makes it possible to generate discharge pulses of width up to 10 ms and power up to 20–30 kW at a pulse repetition rate up to 100 Hz. The discharge voltage was switched using type T161-160-16 thyristors. The parameters of the modulation circuits under study were tried out together with a prototype integrated magnetron plasma device with a planar and a cylindrical magnetron sputtering system of the unbalanced and the balanced type, respectively.

The operating parameter range of a high-current pulsed magnetron discharge voltage source was determined. Plasma parameters in the surface treatment area were studied. The metal ion content of the generated plasma was determined. Coatings with characteristics exceeding those obtained using a steady magnetron discharge were deposited. The plasma process deice studied in this work allows one to execute all process steps of ion-plasma treatment in a single vacuum cycle.

It is concluded that the pulsed discharge source circuit developed meets the requirements for the deposition of functional nanostructured metal coatings and is suitable for high-intensity low-energy nitrogen ion implantation.

Keywords: *physical vapor deposition, high-intensity low-energy ion deposition, high-current pulsed magnetron discharge, planar magnetron sputtering system, cylindrical magnetron sputtering system, pulsed discharge power source.*

Введение. Эффективным способом управления физико-механическими и эксплуатационными характеристиками металлических конструкционных материалов является изменение их структурно-фазового состояния. В практике современного машиностроения для модификации структурно-фазового состояния поверхности рабочего слоя пар трения находят применение ионно-плазменные технологии обработки энергетичной газометаллической плазмой [1, 2]. Для этих целей используют источники плазмы дугового и магнетронного типа. Магнетронные источники концентрированных потоков энергии имеют более универсальные потребительские характеристики, но приобретают возможность генерации потоков энергетичной газометаллической плазмы только при работе в режиме сильноточного импульсного разряда (СИМР). Этот режим может быть реализован при питании разряда специальным модулированным источником питания, работающим в частотном режиме с частотой следования мощных разрядных импульсов от нескольких герц до десятков килогерц. В настоящее время исследование и широкое использование технологий поверхностной обработки на основе СИМР сдерживается отсутствием или высокой стоимостью импульсных разрядных источников, удовлетворяющих специфическим требованиям комплексной ионно-плазменной технологии упрочнения поверхности имплантацией ионов азота с последующим нанесением наноструктурного функционального покрытия. Разработке низкобюджетного варианта импульсного источника питания СИМР и посвящена настоящая работа.

Состояние вопроса. Магнетронные распылительные системы (МРС) являются одним из основных инструментов ионно-плазменной обработки поверхности. Достоинством МРС является отсутствие микрокапельной фазы распыленного материала в генерируемой ими плазме. При формировании наноструктурных упрочняющих покрытий эта особенность определяет преимущества магнетронных распылительных систем перед системами вакуумно-дугового испарения [3].

Потребность в расширении функциональных возможностей технологии нанесения покрытий и необходимость дальнейшего повышения качества упрочняющей обработки стимулирует дальнейшее совершенствование магнетронных устройств. Использование для поверхностного упрочнения СИМР [4] является мировым трендом развития ионно-плазменной технологии.

Охарактеризуем основные особенности реализации и применения СИМР. Особенностью аномального тлеющего разряда (магнетронного разряда) является то, что его наиболее эффективные сильноточные режимы локализуются вблизи границы его перехода в дуговую моду [5]. При увеличении мощности магнетронного разряда плотность тока на катод-мишень может превышать критическую плотность (по данным [6] это примерно 30 мА/см^2). Это приводит к нестабильности разряда в результате локального перегрева поверхности катода-мишени и образованию на его поверхности катодных пятен биполярных дуг. Дуги генерируют ионизированные атомные частицы, а также микрокапли материала катода-мишени величиной от 0,1 мкм до 10 мкм. Энергия, вложенная в вакуумную дугу, и частота возникновения микродуг влияют на объем выброса материала катода в виде микрокапельной фазы, которая попадает на подложку и является причиной появления дефектов микроструктуры в наноструктуре покрытия [7]. Нестабильность магнетронного разряда требует необходимость принятия мер для предотвращения или подавления дугообразования. Было установлено [8], что уровень энергии, которая может выделяться в биполярной дуге, в значительной степени зависит от типа источника питания разряда (стационарный или импульсный). Применение импульсных режимов практически снимает проблему дугогашения. Время существования катодного пятна зависит от многих условий и, как правило, не превышает 10 мкс. В [9] утверждается, что при частоте следования разрядных импульсов выше некоторого предела (40 – 80 кГц) образование дуг прекращается. В настоящей работе используется факт, установленный в [10], что импульсное распыление металлов допускает проведение рабочих процессов при существенно более низких частотах следования разрядных импульсов, порядка (50 – 150) Гц.

При нанесении металлических покрытий существенным для улучшения качества обработки является энергетичность распыляющего импульса и зарядовое состояние конденсирующихся частиц. Высокоэнергетичное распыление приводит к образованию в магнетронном разряде ионов распыленного металла. В результате этого МРС генерирует поток газометаллической плазмы. При предварительной подготовке напыляемой поверхности потоком газометаллической плазмы, содержащей энергетичные ионы материала распыляемого катода-мишени, на подложке образуется хорошо связанный с ней подслой материала покрытия толщиной порядка 10 нм. Это обеспечивает получение высоких адгезионных характеристик покрытия. В результате этого величина адгезии может приближаться к показателям, соответствующим эпитаксии [11].

Сильноточный импульсный режим магнетронного распыления обладает привлекательностью при использовании его в технологии в качестве источника плазмы высокой плотности. Если в стационарной МРС концентрация плазмы вблизи катода составляет величину порядка 10^{11} см$^{-3}$, то в СИМР плотность плазмы может превышать характерные для стационарного магнетронного разряда значения на три порядка. Импульсная плотность мощности на катоде может достигать значений от сотни до тысячи Вт/см^2. При этом, благодаря импульсному характеру разряда, средняя мощность, выделяемая в катоде МРС, остается в характерном для стационарного разряда диапазоне от 1 Вт/см^2 до 10 Вт/см^2, что не увеличивает риск дугообразования на катоде-мишени. Как сообщается в [12], увеличение амплитуды тока разряда в СИМР до сотен ампер обеспечивает генерацию плазмы с концентрацией до 10^{13} см$^{-3}$, при этом степень ионизации распыленного материала достигает (70 – 90) %.

Постановка задачи. Общей направленностью настоящей работы является обеспечение комплексной технологии упрочнения рабочих поверхностей возвратно-поступательных и вращательных пар трения.

Для проведения упрочняющей высокоинтенсивной низкоэнергетичной ионной имплантации используется плазма пучкового разряда. Пучковая плазма создается в пролетном промежутке «распыляемая мишень (катод МРС) – обрабатываемая подложка». Для проведения всех технологических переходов ионно-плазменной обработки целесообразно использование магнетронного генератора плазмы, работающего в режиме СИМР.

Отработку технологических режимов обработки допускается проводить при низкочастотных (менее 100 Гц) импульсных режимах магнетронного разряда. При отработке импульсного источника магнетронного разряда возможно использование одноимпульсных режимов.

Таким образом, в период подготовки экспериментальной отработки технологических режимов первоочередной задачей являлось создание действующего макета импульсного источника питания магнетронного разряда. Источник должен обеспечивать одноимпульсный и модулированный низкочастотный режим работы магнетрона.

Использование при отработке низкочастотного разрядного источника объясняется соображениями экономического характера. Это позволяет избежать значительных затрат на приобретение дорогостоящих высокочастотных сильноточных коммутирующих электронных компонентов. Ожидается, что полученные в низкочастотном режиме результаты могут быть экстраполированы для работы в более высокочастотных (до (30 – 60) кГц) режимах.

Импульсный источник питания разряда. В распыляющих системах СИМР чаще всего используются источники питания, генерирующие отрицательные униполярные импульсы. Форма импульса может быть симметричной (прямоугольной или колоколообразной). Для генерации сильноточных разрядных импульсов в магнетронных распылительных системах применяют различные схемы модуляции тока. Это могут быть генераторы напряжения, генераторы тока или источники смешанного типа. Нами была выбрана схема смешанного типа, как наиболее универсальная [12].

Основными элементами схемы импульсного источника тока разряда являются разрядная цепь емкостно-индуктивного типа и полупроводниковый коммутирующий элемент, задающий частоту модуляции разрядного тока. Использование в качестве коммутирующего элемента современных мощных высокочастотных полевых транзисторов или биполярных транзисторов с изолированным затвором на этапе макетирования было признано не целесообразным по экономическим соображениям. Было установлено, что тиристор типа Т171-250-16, имея на порядок меньшую стоимость, может с успехом коммутировать токи величиной до 200 А при времени запирания порядка 0,5 мс. Такие характеристики позволяют с успехом реализовать модуляцию разрядного тока с частотой до 100 Гц.

При выборе аналога схемы импульсного источника использовались данные работы [6]. Основные принципы выбора параметров разработанной схемы модуляции тока соответствуют рекомендациям работы [12]. При расчете параметров был использован полуэмпирический метод. Некоторые величины параметров схемы задавались приблизительно, а затем их значение уточнялось по результатам эксперимента. Рассматривались две различные схемы, представленные на рисунках 3 и 4. Схема 1 (рис. 3), использовалась для отработки режимов импульсного разряда при одноимпульсной работе источника. Схема 2 (рис. 4) являлась усовершенствованием схемы 1 и обладала возможностью реализации технологических режимов работы с частотой следования разрядных импульсов до 100 Гц. При разработке схемы использованы данные работ [13, 14].

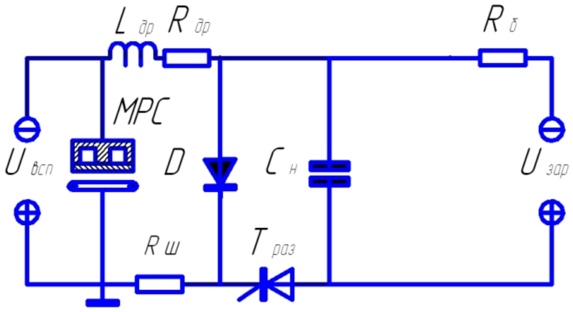


Рис. 3 – Схема 1 импульсного разрядного модулятора

Рассмотрим особенности расчета и работы схемы 1. В схеме используется разрядная цепь емкостно-индуктивного типа с последовательным включением индуктивности. Индуктивность (дроссель) одновременно выполняла роль ограничителя величины разрядного тока. В качестве накопителя энергии использовалась конденсаторная батарея $C_н$ емкостью 500 мкФ. Активное сопротивление дросселя $R_{др}$ = 2 Ом. Величина индуктивности дросселя связана с параметрами разряда соотношением

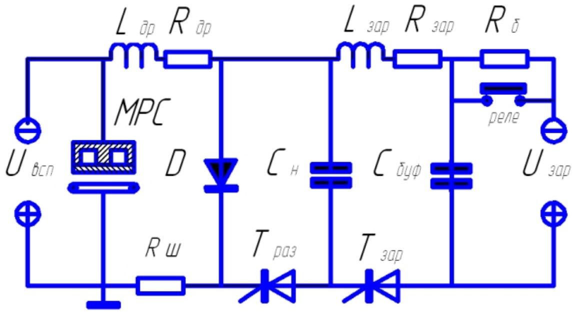


Рис. 4 – Схема 2 импульсного разрядного модулятора
с резонансной зарядкой накопительной емкости

$$L_{др} = 4 \big/ \text{®}^2 \times t_f^2 \big/ C_н \,, \qquad (1)$$

где $t_{фр}$ – длительность фронта нарастания тока разряда в импульсе.

Величина $t_{фр}$ предварительно определялась из эксперимента и для расчета была принята равной 7×10^{-3}с. Индуктивность дросселя, определенная из (1), равнялась 4×10^{-2} Гн.

Важным параметром импульсного источника является величина волнового сопротивления разрядной цепи, которое определяется как

$$^\circ{}_{взар} = \sqrt{L_{др} \big/ C_{н}}\ . \tag{2}$$

Определенная по (2) величина волнового сопротивления равнялась 9 Ом.

Так как схемы коммутации на основе тиристоров, в отличие от схем с использованием транзисторов, обеспечивают только открывание тиристора, необходимо было выбрать схемное решение, обеспечивающее стабильность импульсного режима модуляции и условия закрывания тиристора при достижении оптимальных условий передачи энергии накопителя в разряд. Условием стабильности, относительно перехода разряда из магнетронного в дуговой режим работы, является ограничение максимальной плотности импульсного тока на катод магнетрона. Эта величина зависит от конструкции разрядного устройства и предельных параметров разрядной цепи. Для ЦМРС, при площади распыляемой поверхности катода, равной 32 см^2, на основании данных эксперимента, критическая величина плотности была определена равной приблизительно 2 А/см^2. Для планарной магнетронной распылительной системы, при площади распыляемой поверхности катода, равной 17 см^2, критическая плотность равнялась также 2 А/см^2. Некоторую неопределенность величины критической плотности следует отнести за счет трудности ее определения при сильной неравномерности распределения плотности тока в поперечном сечении разряда. Вероятно, что в последующих приближениях значение критической плотности будет уточняться в сторону ее повышения.

Условием максимальной передачи накопленной энергии в разряд является неравенство

$$^\circ{}_{в} < R_{рц} < 2\,^\circ{}_{в}\ . \tag{3}$$

Активное сопротивление разрядной цепи $R_{рц}$ равно сумме сопротивлений измерительного шунта, $R_{ш}$ =1 Ом, активного сопротивления дросселя, $R_{др}$ = 2 Ом, и активного нелинейного сопротивления импульсного разряда $R_{раз.}$ Значение последнего принимаем равным отношению импульсного значения напряжения к импульсному значению тока (в предельном случае $R_{раз}$ = 660 В/60 А = 11 Ом). При этих значениях сопротивление разрядной цепи равнялось 14 Ом, что удовлетворяет неравенству (3). При $R_{рц} > 2\rho_{в}$ разряд становится апериодичным, что свидетельствует о значительном увеличении его сопротивления. При $R_{рц} < \rho_{в}$ падает эффективность преобразования накопленной энергии в импульсный разряд и магнетронный разряд переходит в дуговую моду. При срыве магнетронного разряда в дуговой запуск следующего разрядного импульса не происходит и реализация модулированного частотного режима невозможна.

Перед каждым разрядным импульсом конденсаторная батарея $C_{н}$ заряжается от зарядного источника $U_{зар}$ через балластное сопротивление $R_{б}$. Напряжение заряда определялось напряжением, допустимым для тиристора $T_{раз}$, и находилось в пределах от 1200 В до 1600 В. Разряд батареи производится запуском тиристора $T_{раз}$. Необходимым условием запуска тиристора является наличие гальванической связи между катодом тиристора и отрицательным полюсом конденсаторной батареи. Гальваническая связь устанавливалась стационарным слаботочным ($I_{раз} \approx$ (5 – 10) мА) разрядом магнетрона. С этой целью в схеме предусматривался вспомогательный источник питания разряда магнетрона $U_{всп}$. Величина давления аргона в вакуумной камере при работе в импульсном режиме устанавливалась в пределах от 0,25 Па до 1,33 Па. При этом величина максимального импульсного тока разряда находилась в пределах от 16 А до 32 А соответственно.

К очевидным недостаткам схемы 1 следует отнести значительные потери мощности на балластном сопротивлении $R_б$, что происходит перед каждым разрядным импульсом. Кроме того, в схеме отсутствует возможность оптимизации параметров схемы в реальном масштабе времени при изменениях рабочих параметров магнетронного разряда.

Параметры схемы 1 были оптимизированы на предельные характеристики разряда конкретной конструкции МРС. Использована возможность улучшения энергетических характеристик источника по схеме 1 путем увеличения напряжения зарядки $U_{зар}$ и увеличения магнитной индукции в области магнетронного разряда. Увеличение магнитной индукции эквивалентно повышению давления рабочего газа в вакуумной камере.

В схеме 2 недостатки схемы 1 частично устранялись. Для устранения потерь мощности при зарядке накопительного конденсатора использовалась идея резонансной зарядки накопительной емкости, предложенная в [14].

На рисунке 4 показана схема 2 с резонансной зарядкой накопительной емкости. С целью реализации резонансной зарядки в схему 1 дополнительно были включены буферная емкость $C_{буф}$, индуктивность $L_{зар}$ и силовой коммутирующий (зарядный) тиристор $T_{зар}$. Дополнительные компоненты схемы образовывали колебательный контур, в котором при включении $T_{зар}$ создаются условия для начала колебательного процесса. За время $t = \text{®}\sqrt{L_{зар} C_н}$, после прохождения первого полупериода колебания, направление тока в колебательном контуре изменялось на противоположное и тиристор $T_{зар}$ закрывался. В этот момент буферная емкость $C_{буф}$ автоматически отключалась от накопительной емкости $C_{н.}$, заряженной до удвоенного зарядного напряжения. Первоначально буферная емкость $C_{буф}$ заряжалась через ограничительное балластное сопротивление $R_б$. После перехода в рабочий режим балластное сопротивление закорачивалось с помощью реле (смотри рис. 4), а буферная емкость постоянно подзаряжалась от источника $U_{зар}$. Для согласованной работы с зарядным контуром СИМР было существенно важно, чтобы величина буферной емкости была на порядок больше величины накопительной емкости. Электрические параметры схемы зависят от добротности катушки $L_{зар}$, которая равна $Q = {}^{\circ}{}_{в}\big/R_{зц}$, а также от индуктивности $L_{зар}$ и от соотношения величин буферной и накопительной емкости.

При расчете параметров схемы требовалось, чтобы добротность зарядной цепи была значительно больше 1. Волновое сопротивление зарядного контура зависит от максимальной амплитуды тока в зарядном контуре и определяется из выражения

$${}^{\circ}{}_{взар} = U_{зар\max} e^{-\text{®}/4Q} \big/ I_{зар\max} \approx U_{зар\max} \big/ I_{зар\max} \,. \qquad (4)$$

Значение максимального тока импульса определяется допустимым значением тока для силового высоковольтного тиристора в зарядной цепи $T_{зар}$. На частотах менее 100 Гц эта величина составляет около 200 А. Для расчета принималось это значение тока. Таким образом, при напряжении зарядки 800 В волновое сопротивление зарядного контура равно 4 Ом. Величина накопительной емкости $C_н$ принималась равной 500 мкФ. Величину индуктивности катушки получаем из выражения

$$L_{зар} = \circ^{2}_{зар} C_н . \qquad (5)$$

Значение индуктивности равняется 8×10^{-3} Гн. Омическое сопротивление катушки индуктивности равняется 0,4 Ом. Добротность катушки индуктивности $Q > 10$.

Средний ток зарядного источника $U_{зар}$, а значит и его необходимая мощность определяется из выражения

$$I_{ср} = \yen U_{зар} C_н f_{имп} , \qquad (6)$$

где $f_{имп}$ – частота следования униполярных импульсов; $\yen = 1 + e^{-\circledR/2Q}$ – коэффициент повышения напряжения на накопительной емкости.

При $Q = 10$ напряжение удваивается, так как $\gamma \to 2$.

Из выражения (6) следует, что при частоте 10 Гц средний ток выпрямителя достигает 8 А, а мощность – 6,4 кВт. То есть используемый в эксперименте зарядный источник удовлетворял частотному режиму 10 Гц.

Так как буферная емкость конденсаторной батареи 5000 мкФ на 800 В является довольно громоздким компонентом схемы, была рассмотрена возможность ее уменьшения путем увеличения частоты $f_{имп}$. При расчете необходимой емкости $C_н$ значение волнового сопротивления зарядной цепи и мощность зарядного источника оставляли неизменными за счет пропорционального уменьшения индуктивности $L_{зар}$ и емкости $C_н$. В таблице приводятся расчетные параметры схемы 2, определенные для трех значений частоты следования разрядных импульсов. В этом случае энергия, накапливаемая емкостью, определялась как $E_н = 2 C_н U^2_{зар}$.

Таблица – Расчетные величины параметров схемы модуляции тока в схеме 2

№ варианта	F, Гц	$C_н$ мкФ	$E_н$ Дж	$C_{буф}$ мкФ	$T_{зар}$ мс	$T_{раз}$ мс	$L_{зар}$ мГн	$L_{раз}$ мГн
1	10	500	640	5000	2π	4,5π	8,0	40
2	50	100	128	1000	2π/5	0,9π	1,6	8
3	100	50	64	500	2π/10	0,4π	0,8	4

Экспериментальные результаты и обсуждение. Схема импульсного коммутатора, созданного по схеме 1, отрабатывалась в одноимпульсном режиме совместно с магнетронным распылителем.

Эксперименты проводились в вакуумной камере установки ВУП 5М, имеющей объем 20 л. Камера откачивалась до давления 10^{-3} Па. Затем в камеру подавался рабочий газ (аргон или азот) до давления 0,5 Па. Напряжение зарядного источника равнялось 1200 В. Через 7 мс после подачи импульса напряжения, при достижении максимума разрядного тока, тиристорный ключ

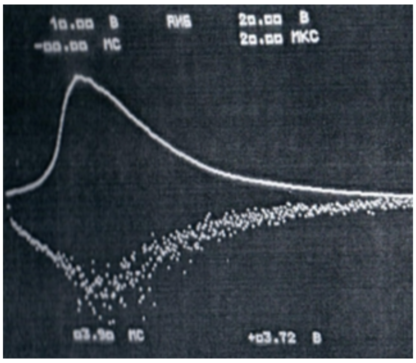


Рис. 5 – Осциллограммы тока импульса (верхняя кривая) $I_{макс}$=37А, и напряжения импульса (нижняя кривая)

закрывался. После закрытия ключа разрядный ток замыкался через силовой диод D. Рис. 5 иллюстрирует изменение тока и разряда за 50 мс после включения тиристора.

Форма осциллограммы напряжения импульса имела невыраженный характер, что не позволяло точно определить максимальное напряжение импульса. Из рис. 5 видно, что форма импулься тока имела апериодический характер, что свидетельствовало о неудовлетворительном согласовании параметров разрядной цепи. Энергия разрядного импульса определялась как:

$$E_{имп} = \int (I_{имп} U_{имп}) dt \, . \tag{7}$$

Баланс энергии в импульсном источнике питания определялся как

$$C_н U^2_{зар} \Big/ 2 = \int I(t) U(t) dt + E_{пот} + E_{ост} ,$$

где $E_{пот}$ – потери на резистивных элементах схемы; $E_{ост}$ – остаточная энергия в накопительном конденсаторе.

Энергетический КПД определялся как:

$$\eta_{симр} = E_{имп} \Big/ E_н - E_{ост} \, . \tag{8}$$

Энергетический КПД СИМР ЦМРС равнялся η = 217/360 – 14,4= 0,63.

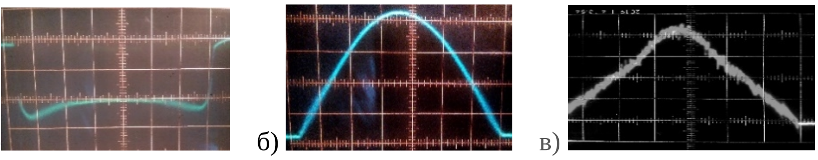
Величина КПД определялась потерями в емкостном накопителе и разрядных цепях схемы. Пути снижения потерь понятны и доступны для реализации.

Экспериментально была подтверждена возможность практического использования импульсного модулятора тока магнетронного разряда по схеме 1. Определены недостатки схемы 1, требующие устранения и доработки.

Для доработки схемы в качестве коммутирующего элемента использовали высоковольтный тиристор 16-го класса Т171-250-16. Зарядное напряжение емкостного накопителя было повышено до 1600 В. Расчетная допустимая величина плотности разрядного тока на катод была принята равной $J_р$ = 2 А/см^2 при максимальной площади эрозионной зоны катода 16,6 см^2. Исходя из условий согласованности, волновое сопротивление $ρ_в$ зарядной цепи должно быть не более 18 Ом. Величина емкости накопительного конденсатора определялась при условиях, что $C_н = L_{др}/ρ^2_{в.}$ Индуктивность дросселя равнялась $4×10^{-2}$ Гн при величине волнового сопротивления разрядной цепи $ρ_в$ ≈ 18 Ом. При этих условиях величина накопительной емкости была выбрана равной 100 мкФ.

В эксперименте с разрядом МРС регистрировался колоколообразный импульс тока, имеющий симметричную форму. Максимальная амплитуда импульса тока разряда равнялась 32 А при напряжении импульса 400 В. По этим данным судили о достижении цели доработки схемы модулятора разрядного тока в МРС.

На ионный коллектор относительно анода подавалось отрицательное смещение от 100 В до 200 В. Регистрировался импульс ионного тока насыщения на коллектор, имеющий треугольную форму. В максимуме величина импульса ионного тока для аргона составляла 9 А, для азота – 7 А. На рисунке 6 приведены осциллограммы импульсов напряжения, тока разряда и ионного тока на коллектор.



а) б) в)

Рис. 6 – Осциллограммы СИМР: напряжение разряда (а); ток разряда (б); ионный ток на коллектор (в). Цена деления в оциллограммах: по X – 1 мс/дел, по Y – для напряжения 200 В/дел, для тока разряда 7,5 А/дел, для ионного тока 2 А/дел.

Таким образом, в результате улучшился показатель согласованности разрядной цепи. Удвоение величины волнового сопротивления разрядной цепи до величины, превышающей величину активного сопротивления разрядной цепи, стало условием надежного запирания коммутирующего тиристора. В результате было достигнуто повышение энергетического КПД схемы питания разряда. Из-за малой мощности зарядного источника $U_{зар}$ частота следования разрядных импульсов не превышала 0,5 Гц. Дальнейший рост разрядного тока ограничивался экспериментально определенной допустимой предельной плотностью тока на катод, определенной по моменту перехода разряда в дуговой режим при средней по площади области эрозии плотности, равной 2 А/см^2.

Заключение. Разработаны и исследованы действующие макеты плазменных технологических устройств, позволяющие генерировать высокоэнергетические потоки газометаллической плазмы. Научная новизна разработанных технологических устройств состоит в том, что они позволяют проводить отработку и оптимизацию комплексных технологических процессов упрочнения внутренних и наружных рабочих поверхностей пар трения в едином технологическом цикле. Для питания разрядов плазменных устройств опробованы два варианта схемы генерации импульсного разряда. Выбрано оптимальное низкобюджетное схемное решение импульсного источника питания магнетронного разряда. Получены исходные данные для проектирования опытного варианта технологических устройств и опытного технологического процесса.

1. *Степанова Т. Ю.* Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.
2. *Сулима В. А., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д.* Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение. 1988. 240 с.
3. *Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В.* Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покритий. Томский политехнический университет. Томск : Изд-во Томского политехнического университета. 2010. 254 с.
4. *Свадковский И. В.* Направления развития магнетронных распылительных систем. Доклады БГУИР. 2007. № 2(18). С. 112–121.
5. *Грановский В. Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука. 1971. 543 с.
6. *Мозгрин Д. В., Фетисов И. К., Ходаченко Г. В.* Экспериментальное исследование сильноточных форм квазистационарного разряда низкого давления в магнитном поле. Физика плазмы. 1995. Том 21, №5. С. 422–433.

7. *Аксенов И. И., Андреев А. А., Белоус В. А. и др.* Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование. Киев.: Наукова думка, 2012. 727 с.
8. *Кадыржанов К. К.* Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. М.: изд. МГУ, 2005. 640 с.
9. *Сочугов Н. С., Оскирко В. О., Спирин Р. Е.* Источник питания для магнетронных распылительных систем. ПТЭ. 2013, № 2. С. 62–68. https://doi.org/10.1134/S0020441213010302
10. *Кузьмичев А. И.* Импульсные магнетронные распылительные системы. Сб. трудов Харьковско научной ассамблеи ISTFE-14. Харьков: ННЦ ХФТИ. 2014, С. 221–244.
11. *Белостоцкий Б. Р., Любавский Ю. В., Овчинников Ю. В.* Основы лазерной техники. Твердотельные ОКГ. М.: Советское радио. 1972. 408 с.
12. *Вакуленко В. М.* Некоторые особенности колебательного заряда емкостного накопителя энергии. Журнал прикладной спектроскопии. 1969. Т. XI, вып 3. С. 456–464.

Получено 29.10.2019,
в окончательном варианте 24.11.2019