

УДК 537.533; 621.384

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ЭМИТТЕРА

**Д.А. АНТОНОВИЧ, д-р техн. наук, проф. В.А. ГРУЗДЕВ,
канд. физ.-мат. наук, доц. В.Г. ЗАЛЕССКИЙ, И.С. РУСЕЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)**

Рассмотрены особенности электропитания плазменных эмиттеров. Описана структура и принцип действия источника электропитания плазменного источника электронов на основе разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, способного работать в стационарном и импульсном режимах.

Введение

К настоящему времени накоплен опыт эксплуатации электронных источников с плазменным эмиттером в лабораторных и производственных условиях, который позволил выявить их технологические возможности и наиболее целесообразные области применения [1]. В частности, показано, что высокая эмиссионная способность обеспечивает генерацию электронных пучков, которые по яркости и плотности мощности находятся на уровне термокатодных пушек. При этом плазменные источники электронов (ПИЭЛ) обладают рядом преимуществ по сравнению с термокатодными пушками, что не только позволяет использовать источники в традиционных электронно-лучевых технологиях, но и разрабатывать на их основе новые технологии термического воздействия на материалы. Кроме этого, мгновенная готовность ПИЭЛ к работе и сохранение работоспособности при повышенных давлениях позволяет упростить вакуумное оборудование и значительно повысить производительность установок.

Создание электронно-лучевых устройств с ПИЭЛ требует создания как специализированных, так и универсальных систем электропитания. При этом использование ПИЭЛ вносит ряд особенностей в системы электропитания, в отличие от энергокомплексов на базе традиционных термокатодных пушек. Эти особенности обусловлены вольтамперными характеристиками газоразрядных структур формирующих эмиттирующую плазму, необходимостью применения обратных связей для автоматического регулирования параметров разряда с целью стабилизации эмиссионных характеристик ПИЭЛ, возможностью использования ПИЭЛ для генерации как сфокусированных, так и широких пучков, а также необходимостью автоматизации процесса управления режимами работы энергокомплекса с ПИЭЛ.

В настоящей работе описана структура и принцип действия блока питания разряда ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях [2], способного работать в стационарном и импульсном режимах.

Особенности электрического питания плазменных эмиттеров

Возможность использования ПИЭЛ для генерации как сфокусированных, так и широких пучков при незначительном изменении системы первичного формирования пучка и электронно-оптической системы [3, 4], с одной стороны, значительно расширяет спектр возможных технологий, реализуемых на базе одного электронно-лучевого энергокомплекса, с другой - требует использования системы электропитания, обеспечивающей работу энергокомплекса в различных режимах. При этом, как правило, применяются два режима электронно-лучевого воздействия - стационарный и импульсный.

Стационарный режим - непрерывное (в течение длительного промежутка времени - единицы - десятки секунд) воздействие электронным пучком с заданной плотностью мощности, генерируемым газовым разрядом со стабилизируемым током. При этом, как правило, он используется для сварки, резки и других технологий сфокусированными электронными пучками, плотность мощности которых должна достигать $10^8 \dots 10^9$ Вт/м². При ускоряющих напряжениях до 20 кВ такая плотность мощности в используемом ПИЭЛ достигается при токе разряда $I_p \sim 200$ мА с напряжением горения $U_p \sim 400 \dots 600$ В.

Сравнительная эмиссионная характеристика для термокатодного и плазменного источников электронов и типичная вольтамперная характеристика плазменного источника электронов представлены на рис. 1, а, б соответственно.

Анализ представленных характеристик выявляет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при построении системы питания разрядной системы ПИЭЛ. Во-первых, в ПИЭЛ ток пучка не ограничен пространственным зарядом (как в случае термокатодных пушек), и всегда равен току эмиссии, т.е. ПИЭЛ работает в режиме насыщения тока. При этом ток эмиссии пропорционален току разряда, и в качестве исполнительного элемента в схеме управления током пучка и его стабилизации целесообразно использовать источник тока [5]. Во-вторых, для газовых разрядов характерно превышение напряжения зажигания над напряжением горения разряда - в 1,5...2 раза (рис. 1, б). В-третьих, существует возмож-

ность кратковременного погасания разряда, особенно при низких токах разряда [6, 7]. Поэтому блок питания разряда (БПР) должен осуществлять и поджиг разряда (как в начальный момент, так и в случае погасания разряда во время рабочего цикла) и обеспечивать горение разряда с параметрами, достаточными для формирования требуемого тока пучка. Это вызывает определенные трудности при схемотехнической реализации БПР. В известных схемах электропитания ПИЭЛ полупроводниковые элементы применяются редко, а названные проблемы решаются в основном применением электронных ламп, что ограничивает повышение КПД таких устройств и затрудняет снижение массогабаритных параметров, усложняет реализацию и обратных связей и автоматическую регулировку параметров.

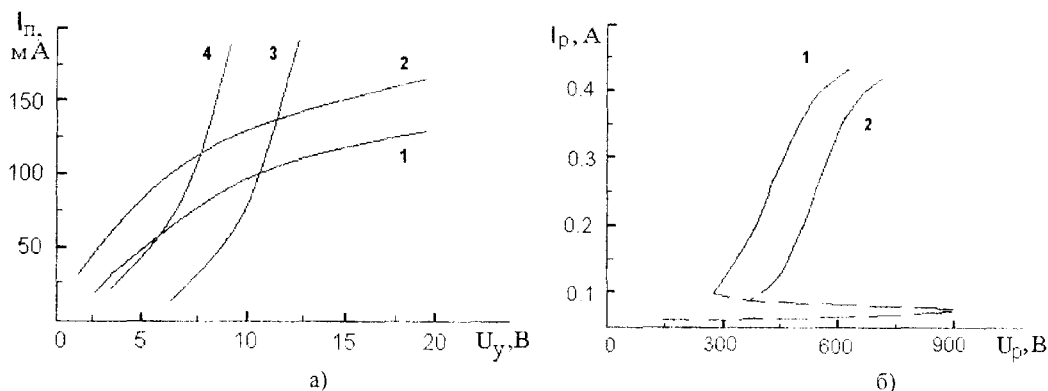


Рис. 1. Эмиссионные (а) и вольтамперные (б) характеристики:
1, 2 – плазменные источники; 3, 4 – термокатодные источники;
1 – $p = 1,2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.; 2 – $p = 6,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.;
3 – $U_{\text{управления}} = 0$; 4 – $U_{\text{управления}} = 500$ В

Особый интерес представляет импульсный режим электронно-лучевого воздействия, когда требуемый энерговыход достигается за счет использования мощного импульса ускоренных электронов за короткий промежуток времени. Проведенные исследования [4] показали возможность использования ПИЭЛ в технологиях термической обработки, допускающих импульсное воздействие. В этом случае преимущества плазменных источников электронов по сравнению с традиционными – термокатодными источниками, проявляются в большей степени.

Параметры импульсного воздействия, такие как длительность импульса, скважность, количество импульсов и т.д., при этом выбираются в соответствии с технологическими требованиями, предъявляемыми к термически модифицированному слою. Можно выделить два способа реализации импульсного режима.

При термической модификации слоев больших поверхностей (более 1 см^2) малой толщины (до 0,2 мм), обработка производится широким пучком с большой плотностью мощности (до 10^8 Вт/м^2). В этом случае длительность одного импульса должна быть сравнима со временем существования аномального сверхплотного импульсного разряда, которое составляет величину порядка сотен микросекунд [3, 8]. Число импульсов в пакете, скважность и число пакетов определяется величиной требуемого энерговыхода. Реализация такого режима накладывает ряд дополнительных требований на БПР: возможность формировать импульсы тока разряда с регулируемой длительностью, скважностью и амплитудой до нескольких десятков ампер, возможность «дозировать» воздействие, изменяя количество импульсов.

При спекании порошков, отжиге, получении упрочненного слоя значительной толщины (до 1 мм) с высокой однородностью свойств по толщине и площади сечения обработка материалов осуществляется набором одиночных импульсов при длительности импульса, значительно превышающей время формирования и гашения разряда (в диапазоне от десятых долей до единиц секунд). При этом импульсы необходимо формировать с изменяемой длительностью и частотой.

Схемотехническая реализация блока питания разряда, учитывающая перечисленные особенности электропитания плазменных эмиттеров, приведена ниже.

Структурная схема блока питания разряда

Структурная схема БПР, учитывающего перечисленные особенности, представлена на рис. 2.

Блок питания разряда состоит из силового блока (СБ), блока выбора режима (БВР) и импульсного блока (ИБ). Силовой блок включает в себя блок регулировок (БР), повышающий трансформатор (Т1), изоляция обмоток которого рассчитана на 30 кВ, и выпрямитель (В). Силовой блок обеспечивает поджиг разряда в начальный момент и в случае кратковременного погасания разряда в процессе работы, формирует и стабилизирует требуемое напряжение горения разряда, автоматически регулирует ток разряда по току пучка.

дывается к первичной обмотке повышающего трансформатора T2. На вторичной обмотке T2 формируется напряжение 900 В, которое через выпрямитель (диодный мост VD17 - VD20) и фильтр (конденсатор C5) подается на анод и катод ПИЭЛ. В источнике электронов зажигается тлеющий разряд.

При зажигании разряда в ПИЭЛ ток через резистор R5 создает на нем падение напряжения. Это напряжение, величина которого определяется включением соответствующего переключателя SA1 - SA4, т.е. резисторами R1 - R4 (в начальный момент SA1) прикладывается к оптопаре UI, транзистор оптопары приоткрывается, уровень напряжения на входе 2 и выходе 13 микросхемы DA2 понижается, транзистор VT2 прикрывается, прикрывая транзистор VT1, который ограничивает напряжение, подаваемое в первичную обмотку трансформатора T2. Напряжение во вторичной обмотке уменьшается, снижая ток разряда до уровня, выбранного резистором R1. Резисторы R1 - R4 являются подстроечными для точной установки величины тока разряда внутри каждого из диапазонов.

При появлении в разрядной системе факторов, дестабилизирующих величину тока разряда (например, изменение давления), изменяется ток через резистор R5, что вызывает соответствующее изменение тока базы транзистора VT1, которое изменяет ток через R5 и, следовательно, ток базы VT1, что изменяет напряжение питания разряда и приводит к установлению тока разряда требуемой величины. Так достигается стабилизация тока разряда. В случае погасания разряда транзистор VT1 открывается полностью, при этом во вторичной обмотке трансформатора T2 формируется напряжение 900 В, которое зажигает разряд с прежним током.

Напряжение к ускоряющему промежутку прикладывается до включения БПР, поэтому после зажигания разряда в ПИЭЛ формируется пучок, величина тока которого определяется величиной тока разряда и в начальный момент минимальна (единицы миллиампер). Затем посредством систем фокусировки и наведения пучок наводится на стык свариваемого изделия. Линейная связь величины тока пучка в ПИЭЛ с величиной тока разряда позволяет использовать ту же схему при стабилизации тока пучка, что и при стабилизации тока разряда только сигнал о величине тока пучка берется с датчика тока пучка. Поэтому после наведения пучка на стык замыкается один из переключателей SA1 - SA4, задавая тем самым величину ток пучка, а переключатель SA5 переводится в режим стабилизации тока пучка (положение 22'). Требуемая величина тока пучка устанавливается в течение 1...1,5 с, для плавного ввода и вывода кратера. Для этого служит времязадающая цепочка C3R8.

При появлении в области ускорения и транспортировки факторов, дестабилизирующих величину тока пучка, происходит изменение тока датчика тока пучка, которое вызывает соответствующее изменение тока разряда. Увеличение (уменьшение) тока пучка приводит к уменьшению (увеличению) тока разряда, до тех пор, пока ток пучка не достигнет заданной величины.

Питание схемы осуществляется через трансформатор T1, выпрямитель (диодный мост VD1-VD4), фильтр (конденсатор C2) и стабилизатор напряжения (микросхема DA1).

Использование такой схемы СБ обеспечивает:

- поджиг разряда в начальный момент и при пропадании разряда в любой момент технологического цикла;
- стабилизацию заданного тока разряда или тока пучка, автоматическую и/или ручную регулировку тока разряда по заданному току пучка;
- ввод и вывод кратера.

Импульсный режим работы. Блок выбора режима и импульсный блок схемотехнически объединены. Для обеспечения различных режимов работы ПИЭЛ используется электронный ключ в качестве которого используется тиристор. Это обусловлено рядом причин. Во-первых, электронный ключ находится под высоким потенциалом, поэтому необходимо вводить гальваническую развязку между ключом и схемой его управления. В одном из режимов работы БПР формирует импульсы секундной длительности, тогда при использовании транзисторной ключевой схемы целесообразна оптоэлектронная развязка, так как при применении индуктивной развязки необходима триггерная система, поддерживающая ключ в открытом состоянии заданное время. Это усложняет схему и снижает ее надежность. Плазменные источники электронов является сложной нагрузкой системы электропитания [9], сопротивление которой нелинейно и может изменяться в зависимости от ряда факторов. Это, а также высокая коммутлируемая мощность и наличие паразитных параметров у оптоэлектронных элементов развязки (темновой ток), затрудняет стабильную работу оптоэлектронной системы развязки и требует ее усложнения [10], поэтому транзисторные схемы применять нецелесообразно.

Во-вторых, тиристоры могут коммутировать более высокую по сравнению с транзисторами мощность, обладают большей помехозащищенностью и надежностью, при этом также отпадает необходимость в триггерной системе.

Ввиду того, что невозможно отключить тиристор при наличии постоянного напряжения между анодом и катодом (снять напряжение с управляющего электрода), предлагается использовать схему (рис. 4) [11].

Сигнал воздействия для электронного ключа формирует схема управления, структура которой представлена на рис. 5

Она состоит из трех частей: схемы формирования импульсов (СФИ), схемы подсчета и прерывания импульсов (СППИ) и схемы подачи импульсов.

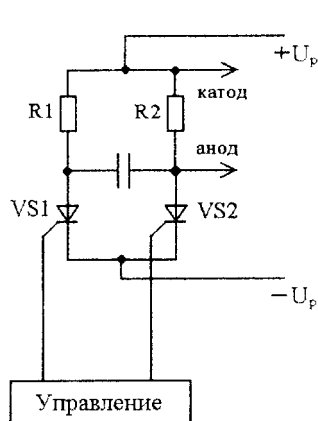


Рис. 4. Тиристорный ключ

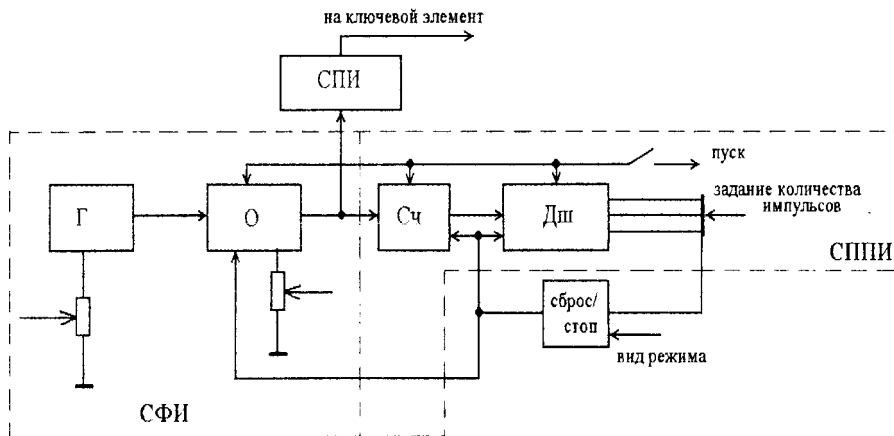


Рис. 5. Схема управления тиристорным ключом

Схема формирования импульсов (рис. 6) представляет собой последовательно включенный генератор (Г) и одновибратор (О). Их совместное использование обусловлено широким диапазоном изменения частоты и скважности (10^4 раз).

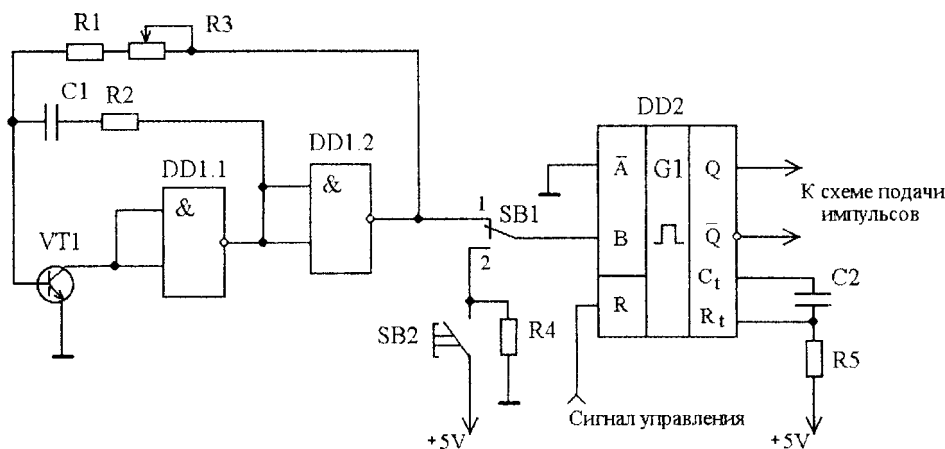


Рис. 6. Схема формирования импульсов управления

Генератор служит для установки и регулирования следования импульсов в пределах 1...1000 Гц. Одновибратор осуществляет регулировку скважности импульсов и формирует импульсы секундной длительности. Переключатели SB1, SB2 служат для выбора одно- и многоимпульсного режима. При переключении SB1 в положение 1 - импульсный режим. При переключении SB1 в положение 2 и кратковременном нажатии SB2 на выходе схемы формируется одиночный импульс, длительность которого определяется времязадающей цепочкой R5C2. С выхода схемы формирования импульсов сигнал поступает на схему подачи управляющих импульсов (рис. 7), которая необходима для формирования импульсов управления, поступающих через высоковольтный разделительный трансформатор на управляющие электроды тириستоров.

Схема подсчета и прерывания импульсов состоит из последовательно включенных счетчика импульсов, дешифратора и триггера. Дешифратор определяет количество импульсов и формирует сигнал о прохо-

ждении заданного числа импульсов. Триггер, по сигналу с дешифратора, формирует сигнал остановки работы схемы формирования импульса и сигнал, переводящий счетчик в исходное состояние.

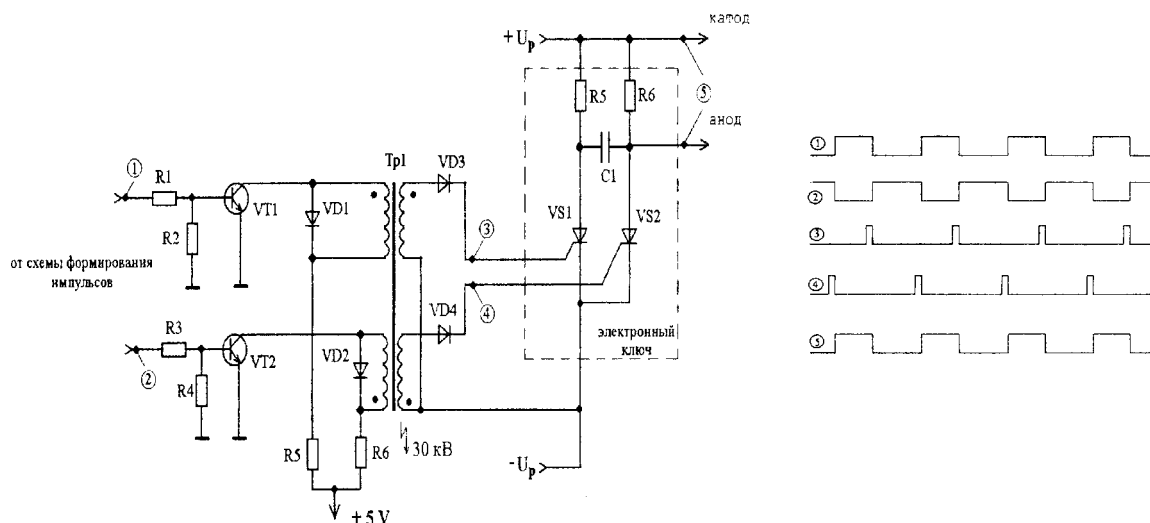


Рис. 7. Схема подачи импульсов на электронный ключ и осциллограммы, поясняющие ее работу

Вывод

Предложенный способ построения блока питания разряда ПИЭЛ позволяет реализовать различные режимы работы источника электронов, что значительно расширяет спектр реализуемых электронно-лучевых технологий на базе одного электронно-лучевого энергокомплекса. Помимо этого, применение описанного способа электропитания разрядной системы ПИЭЛ позволяет ввести автоматическую регулировку и стабилизацию тока разряда для достижения требуемого тока пучка, внедрить процессорное управление током пучка, а также снизить массогабаритные характеристики блока питания разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Возможности и перспективы использования плазменных источников электронов для реализации электронно-лучевых технологий в машиностроении / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Ю.П. Голубев, Д.А. Антонович // Тяжелое машиностроение. - 2004. - № 9. - С. 25 - 32.
2. Пат. ВУ 220 U, МПК H01J 3/04 Плазменный источник электронов / В.А. Груздев, В.Г. Залесский. - № 20000085; Заявл. 1.06.2000.
3. Universal plasma electron source / V.A. Grusdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev // Vacuum. - 2005 - V. 77. - P. 399 - 405.
4. Плазменный источник электронов с пучком большого сечения / В.А. Груздев, В.Г. Залесский, Д.А. Антонович, Ю.П. Голубев // Инженерно-физический журнал. -2002. - Т. 75, № 3. - С. 166- 170.
5. Особенности электропитания электронных пушек с плазменным катодом / С.И. Белюк, В.М. Бураков, С. В. Гавринцев, Ю.А. Локтионов // В кн.: Источники электронов с плазменным эмиттером; Под ред. Ю.Е. Крейнделя. - Новосибирск: Наука, 1983.-С. 91 -95.
6. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндел, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 212 с.
7. Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю.Е. Крейнделя. - Новосибирск: Наука, 1983. - 235 с.
8. Plasma source of charged particles based on superdense pulse glow discharge / V.A. Gruzdev, V.G. Zalesski, D. A. Antonovich, Yu.P. Goloubev // Proc. III Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology. - Minsk, 2000. - V. I. - P.60-63.
9. Управление эффективностью эмиссии сильноточных электронных источников с плазменным эмиттером / С.И. Белюк, В.Г. Мартюшев, И.В. Осипов, Н.Г. Ремпе // Плазменная эмиссионная электроника: Материалы I Всесоюз. совещ. / Акад. наук СССР. Сиб. отд. - Улан-Удэ, 1991. - С. 36 - 39.
10. Белкин В.С. Широкополосный повторитель с оптронной гальванической развязкой на 40 кВ // ПТЭ. - 1982. - № 4 - С. 111-114.
11. Королев Ю.Н. Тиристоры. - М.: Знание, 1968. - 64 с.