

## ФИЗИКА

УДК 537.533:621.384

### ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА ПУЧКА В ПЛАЗМЕННЫХ ЭМИССИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ $E \times H$ ПОЛЯХ

**С.Н. АБРАМЕНКО**, канд. техн. наук, доц. **Д.А. АНТОНОВИЧ**, д-р техн. наук, проф. **В.А. ГРУЗДЕВ**  
(Полоцкий государственный университет)

Предложен способ формирования импульсов тока пучка с длительностью до 100 нс с короткими (порядка 5 нс) фронтами в плазменном источнике электронов. Для реализации способа предлагается использовать плазменный источник электронов на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях с управляющим электродом, который не участвует в формировании плазмы, но может формировать и регулировать минимум потенциала в системе ускорения электронов. Приведена электродная структура такого источника. Проведено моделирование соответствующей системы электропитания, генерирующей импульсы напряжения на управляющем электроде плазменного источника электронов длительностью порядка сотен наносекунд, с регулируемой частотой и скважностью следования импульсов с применением различных ключевых элементов.

**Ключевые слова:** плазменный источник электронов, плазменный эмиттер, импульсы тока пучка, разряд в скрещенных  $E \times H$  полях, системы электропитания плазменных источников электронов.

**Введение.** Опыт промышленного применения электронных пучков показывает перспективность применения безнакальных электронно-оптических систем, одной из которых является плазменный источник электронов (ПИЭЛ) [1–3]. Одним из недостатков, сдерживающих расширение применения таких систем, для ряда технологий является сложность реализации в данных структурах импульсного режима работы с длительностью импульса тока пучка порядка сотни наносекунд и менее. Импульсный режим тока эмиссии в ПИЭЛ при модуляции тока разряда позволяет получать импульсы длительностью свыше десятка микросекунд, что определяется временем установления стационарного состояния (фронтом нарастания тока разряда) и обусловлено в основном скоростью перемещения в структуре ионов газа [4]. Скорость движения электронов при их типичной средней энергии в газоразрядной плазме приблизительно в 100 раз превышает скорость ионов, поэтому достаточно короткие импульсы тока пучка в ПИЭЛ можно получить при импульсном ускоряющем напряжении. Однако при ускоряющем напряжении, типичном для технологических ПИЭЛ в 30–40 кВ, разработка системы формирования импульсов ускоряющего напряжения достаточно проблематична. В данной работе предложено обоснование возможности реализации импульсного режима за счет применения ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях с управляющим электродом и соответствующей системой электропитания.

**Условия формирования эмиттирующей плазмы в ПИЭЛ.** Эмиттирующая плазма в ПИЭЛ формируется с помощью низковольтных разрядов в газе [1, 2]. Могут применяться разряды различного типа [5, 6], однако для упрощенного анализа газоразрядную структуру в общем случае можно представить как структуру, содержащую два электрода: катод, находящийся под отрицательным потенциалом, и анод, находящийся под положительным потенциалом. При определенном сочетании давления газа в структуре (разрядной камере) и напряжения между электродами в межэлектродном промежутке возбуждается процесс ионизации газа электронами, энергия которых, полученная при движении от электрического поля в газоразрядной структуре, становится выше энергии, необходимой для ионизации. Одновременно с процессом ионизации молекул газа (генерации ионов и электронов) происходит процесс ухода зарядов на стенки разрядной структуры. При определенном соотношении интенсивности этих процессов в разрядной структуре образуется газоразрядная плазма.

Для описания процессов в разрядной структуре ПИЭЛ плазма представляется физической моделью смеси трех газов: нейтрального, электронного и ионного, с собственной температурой каждого газа ( $T_0$ ,  $T_e$ ,  $T_i$  соответственно), которые могут значительно отличаться. Обычно  $T_e \gg T_i \gg T_0$ , и скорость хаотического движения электронов много больше хаотической скорости ионов, этому способствует значительная разница в массах электрона и иона газа. Вследствие этого уход электронов из объема разрядной камеры на ее стенки может значительно превосходить скорость ухода ионов на стенки. В то же время генерация зарядов (ионов и электронов) в процессе ионизации осуществляется парами, т.е. с одинаковой скоростью. В результате в процессе формирования плазмы происходит накопление ионов в ней, возрастает ее потенциал, и начинают формироваться пристеночные электрические слои, которые

у катода и анода с ростом потенциала становятся тормозящими для электронов, т.е. снижают и уравнивают уход электронов из плазмы. С этого момента устанавливается стационарный режим разряда, постоянство концентраций положительных ( $n_+$ ) и отрицательных ( $n_-$ ) зарядов, а также их соотношения ( $n_+/n_-$ ) в плазме; постоянное падение потенциала в пристеночных слоях. Кроме этого, устанавливается стационарный баланс ионного и электронного токов в газоразрядной структуре, и в целом ток разряда обычно [7, 8] отображается следующими равенствами (1–4):

$$I_p = I_i + I_e, \quad (1)$$

$$I_i = j_{ik}S_k + j_{ia}S_a = j_{ik}S_k + j_{iek}S + j_iS_a = j_i(1 + \gamma)S_k + j_iS_a, \quad (2)$$

$$j_i = en_i \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}, \quad (3)$$

где  $j_{iek}$  – плотность тока электронов ионно-электронной эмиссии;  
 $\gamma$  – коэффициент ионно-электронной эмиссии катода;  
 $S_k$  и  $S_a$  – площади катода и анода соответственно;

$$I_e = \gamma_e S_a = en_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} e^{-\frac{eU_{ac}}{kT_e}} S_a, \quad (4)$$

где  $U_{ac}$  – падение напряжения на пристеночном анодном слое, тормозящее часть теплового хаотического тока электронов на анод.

Из баланса токов для стационарного режима разряда следует, что устанавливающееся напряжение на пристеночных слоях зависит, кроме упомянутых ранее факторов, и от соотношения площадей газоразрядной камеры под катодным и анодным потенциалами.

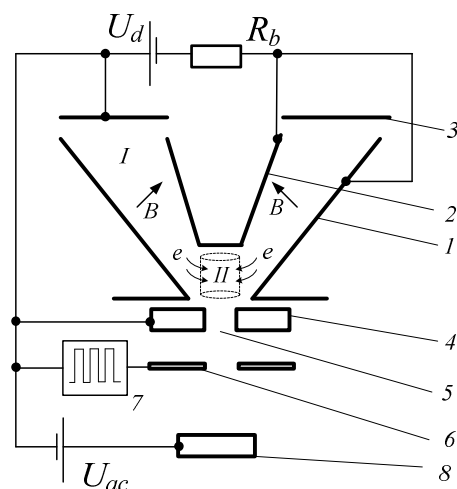
Реализация упомянутых базовых процессов, обеспечивающих формирование эмитирующей плазмы в ПИЭЛ, требует определенного времени для установления стационарного состояния с момента подачи напряжения ( $U_p$ ) на электроды. Эксперименты показывают, что это время (фронт нарастания тока разряда) составляет десятки микросекунд и обусловлено, по-видимому, в основном скоростью перемещения в структуре ионов газа при их средней энергии, составляющей обычно десятые доли электрон-вольт [9]. Таким образом, при модуляции тока разряда  $I_p$  соответствующим регулированием напряжения разряда возможен импульсный режим тока эмиссии в ПИЭЛ с длительностью импульсов более десятков микросекунд.

Скорость движения электронов при их типичной средней энергии в газоразрядной плазме порядка 1–2 эВ составляет величину порядка  $10^6$  м/с и приблизительно в сто раз превышает скорость ионов. Следовательно, достаточно короткие импульсы тока ПИЭЛ возможно получить при импульсном ускоряющем напряжении. Однако при типичном для технологических ПИЭЛ ускоряющем напряжении 20–40 кВ разработка системы формирования импульсов ускоряющего напряжения достаточно проблематична, в сравнении с другим возможным способом регулирования тока пучка в ПИЭЛ. Суть этого способа заключается в использовании для регулирования тока пучка дополнительного несвязанного с газоразрядной структурой электрода, который не участвует в формировании плазмы, но может формировать и регулировать минимум потенциала в системе ускорения электронов в ПИЭЛ. В электронных пушках с термокатодом этот способ можно считать единственно возможным и широко используемым для управления током пучка [1]. Однако возможности управления током пучка в ПИЭЛ триодного типа в открытых публикациях практически не обсуждались. В качестве базовой конструкции ПИЭЛ с управляющим электродом может выступать любая из ранее разработанных [10–12]. На рисунке 1 представлена электродная структура одного из вариантов такой структуры.

Разряд возбуждается в пространстве между катодами 1 и 2 (область  $I$ ). Плазмообразующий газ подается в пространство между катодами, а перепад давлений обеспечивается геометрией эмиссионного канала. Формирующаяся в разряде между катодами плазма диффундирует в область эмиссионного канала 5. Извлечение электронов осуществляется через эмиссионный канал в эмиттерном электроде 4 с анодным (или близким к нему) потенциалом. На управляющий электрод 6 поступают сигналы с генератора управляющих импульсов 7, создавая минимум потенциала в области ускорения, формируя импульсы эмиссионного тока в соответствии с управляющим сигналом.

Для реализации возможности формирования наносекундных импульсов тока пучка описанным способом необходимо разработать систему управления, способную формировать импульсы напряжения на управляющем электроде ПИЭЛ с длительностью порядка 100 нс, с короткими фронтами и регулируемыми

мой частотой следования импульсов. При этом на основе анализа физических процессов в ПИЭЛ и электронно-оптических структурах (ЭОС) с термокатодами предполагается, что будет достаточной амплитуда импульсов управляющего напряжения порядка 500–1000 В при токе нагрузки порядка 0,01 А.



1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – эмиттерный электрод;  
5 – эмиссионный канал; 6 – управляющий электрод; 7 – генератор управляющих импульсов;  
8 – ускоряющий электрод;  $U_d$  – напряжение горения разряда;  $U_{ac}$  – ускоряющее напряжение;  
 $R_b$  – балластное сопротивление;  $B$  – индукция магнитного поля

**Рисунок 1. – Электродная структура плазменного источника электронов на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях с управляющим электродом**

**Разработка возможных вариантов электронной схемы.** Для формирования управляющих импульсов с требуемыми параметрами необходимо увеличивать рабочую частоту переключений силовых ключей, традиционно используемых в подобных схемах. Рост частоты коммутации дополнительно позволит уменьшить номиналы индуктивностей и емкостей, а значит, и использовать компоненты меньших размеров. Вместе с тем увеличение скорости переключения приведет к росту динамических потерь. По этой причине необходимо выбирать оптимальные силовые транзисторы с учетом особенностей конкретного применения. Для устройств с высокими рабочими напряжениями (более 200 В) и низкими рабочими частотами принято считать оптимальными относительно медленные БТИЗ-транзисторы [13], имеющие малые потери проводимости, но значительные потери на переключение. В сегменте устройств с низкими рабочими напряжениями оптимально использовать МДП-транзисторы (MOSFET). Они уступают БТИЗ-транзисторам по удельной мощности, но имеют меньшие потери на управление и на переключение. В сегменте с рабочими напряжениями до 650 В и высокими рабочими частотами БТИЗ-транзисторы оказываются малоэффективными из-за высокой частоты коммутации. В то же время и обычные кремниевые MOSFET демонстрируют не всегда удовлетворительные результаты. По этой причине достаточно перспективными являются нитрид-галлиевые транзисторы [13].

В настоящее время выпускаются нитрид-галлиевые (IGBT) транзисторы с рабочим напряжением до 850 В и рабочими частотами 200 кГц и выше. В итоге они занимают тот сегмент, в котором даже MOSFET оказываются бессильными. Для кремниевых ключей частота коммутаций в таких случаях обычно не превышает 150 кГц.

В процессе исследования было промоделировано несколько вариантов схем, использующих в качестве ключевого элемента биполярный транзистор (рисунок 2), полевой транзистор (рисунок 3), IGBT-транзистор (рисунок 4). В качестве программного продукта использовался пакет NI Multisim (13.0).

Во всех трех вариантах схем в качестве источника выбран источник прямоугольных импульсов, который имитирует исходный управляющий сигнал. На всех трех схемах TV1 – согласующий импульсный ферритовый высокочастотный трансформатор, исполняющий роль согласования и масштабирования. Он одновременно защищает выход генератора импульсов от аварийных ситуаций. Цепочка C1-VD1 защитно-демпфирующая; предотвращает самовозбуждение колебаний. Диоды VD2 (в схемах, представленных на рисунках 2 и 4) защищают от пробоя транзисторы самоиндукцией. TV2 – повышающий выходной транзистор. Сопротивление R1 имитирует нагрузку. Цепь 4 выходная и выбрана для отслеживания параметров выходного импульса. Транзисторы и диоды были отредактированы из реальных высоковольтных моделей таким образом, чтобы не учитывался максимальный ток и напряжение пробоя.

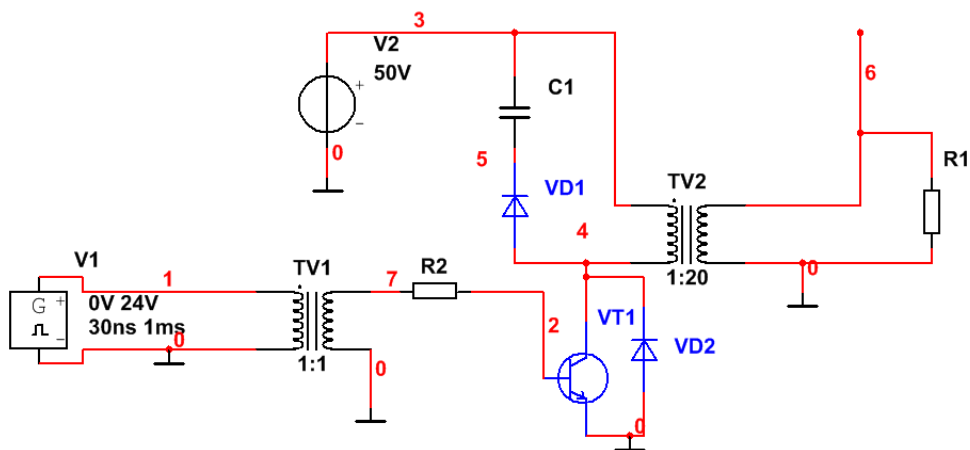


Рисунок 2. – Моделирование схемы на биполярном транзисторе

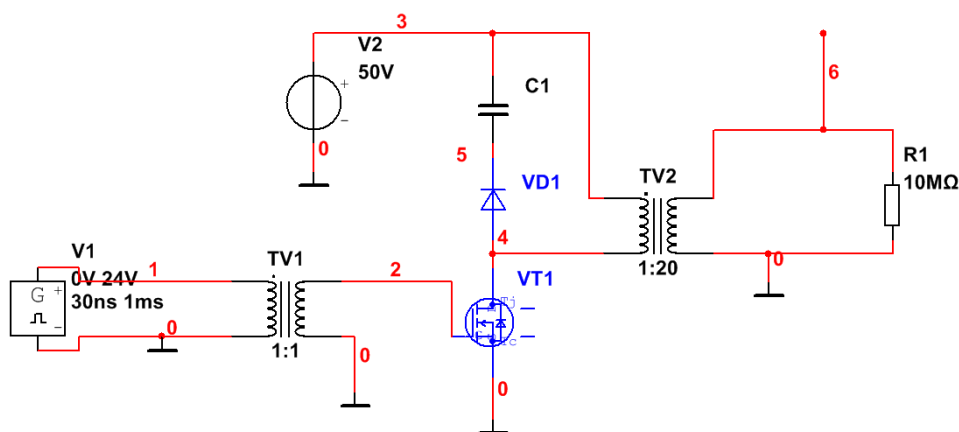


Рисунок 3. – Моделирование схемы на полевом транзисторе

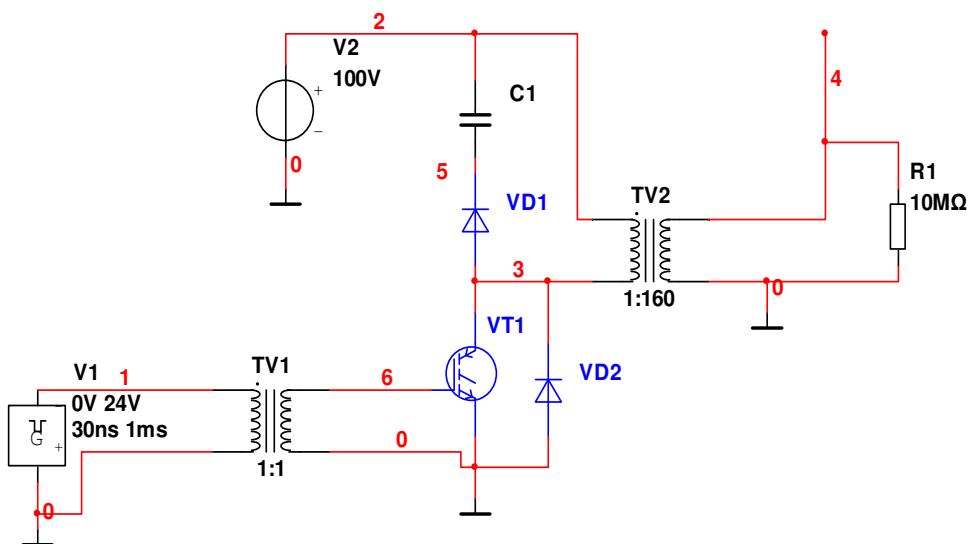


Рисунок 4. – Моделирование схемы на IGBT- транзисторе

Результаты моделирования показали возможность формирования импульсов напряжения на нагрузке с амплитудой до 1000 В, длительностью фронтов до 5 нс и длительностью импульса порядка 20 нс для схемы с биполярным транзистором, порядка 55 нс – для схемы с полевым транзистором и порядка 1 нс – для схемы с IGBT-транзистором.

**Заключение.** Полученные предварительные результаты показывают возможность формирования импульсов тока пучка наносекундной длительности в ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных  $E \times H$  полях за счет использования в конструкции дополнительного управляющего электрода и применения соответствующей схемы генерации управляющих импульсов. Реализация таких режимов работы позволит плазменным источникам электронов успешно конкурировать с лазерными технологиями обработки материалов, особенно при необходимости получения большей, чем 3–4 мм, глубины воздействия. Импульсный режим работы обеспечивает существенное увеличение плотности мощности электронного пучка в импульсе в сравнении со стационарным случаем, что позволит локализовать термическое воздействие и достигать большей толщины модифицируемого слоя (чем при стационарном воздействии) с высокой однородностью свойств, т.е. повысить эффективность энергозатрат как при обработке однородных материалов, так и материалов с покрытиями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / под ред. Е. М. Окса. – Томск : НТЛ, 2005. – 216 с.
2. Источники электронов с плазменным эмиттером / под ред. Ю. Е. Крейнделя. – Новосибирск : Наука, 1983. – 120 с.
3. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В. Т. Барченко [и др.] ; под ред. В.Т. Барченко. – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
4. Антонович, Д. А. Эмиссионные свойства плазменного эмиттера электронов / Д. А. Антонович, В. А. Груздев, В. Г. Залесский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2008. – № 9. – С. 114–123.
5. Капцов, Н.А. Электрические явления в газах и вакууме / Н.А. Капцов. – М., Л. : ГИТТЛ, 1950. – 836 с.
6. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 736 с.
7. Груздев, В.А. Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов / В. А. Груздев, В. Г. Залесский // Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 82–90.
8. Груздев, В.А. Физические процессы формирования электронных пучков в плазменных источниках / В. А. Груздев, В. Г. Залесский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2007. – № 9. – С. 2–14.
9. Zaleski, V. G. Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures / V. G. Zaleski, D.A. Antonovich // J. Phys. D, Appl. Phys. – 2007. – № 40. – P. 7771–7777.
10. Universal plasma electron source / V.A. Grusdev [et al.]. – Vacuum. – 2005. – № 77. – P. 399–405.
11. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 1 / Д. А. Антонович [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 37 – 44.
12. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 2 / Д. А. Антонович [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2017. – № 4 – С. 45–51.
13. Справочник по транзисторам [Электронный ресурс] / Электронный портал. Datasheets. – Режим доступа: <http://kazus.ru/guide/transistors/>. – Дата доступа: 09.09.2017.

Поступила 20.09.2017

## FORMATION OF NANOSECOND BEAM CURRENT PULSES IN PLASMA EMISSION SYSTEMS BASED ON DISCHARGE IN CROSSED $E \times H$ FIELDS

S. ABRAMENKO, D. ANTONOVICH, V. GRUZDEV

*The method for forming beam current pulses with duration of up to 100 ns with short (about 5 ns) fronts is proposed. To implement this method, it is proposed to use a plasma electron source based on the discharge in crossed  $E \times H$  fields with an additional electrode that does not participate in plasma formation, but can generate and control the minimum potential in the electron acceleration system. Shown an electrode structure of such a source. Modeling of the corresponding voltage pulse generation system on the control electrode of a plasma electron source with duration of the order of hundreds of nanoseconds is performed, with an adjustable frequency and a duty cycle of pulses. The amplitude of the control voltage pulses is about 1000 V.*

**Keywords:** Plasma electron source, beam current pulses, discharge in crossed  $E \times H$  fields.