

УДК 537.533; 621.384

Формирование коротких импульсов тока пучка в плазменных источниках электронов

Абраменко С. Н., Антонович Д. А., Груздев В. А.

Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

e-mail: d.antonovich@psu.by

Аннотация

Предложен способ формирования импульсов тока пучка с длительностью до 100 нс с короткими (порядка 5 нс) фронтами. Для реализации способа, предлагается использовать плазменный источник электронов на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях с дополнительным электродом, который не участвует в формировании плазмы, но может формировать и регулировать минимум потенциала в системе ускорения электронов. Проведено моделирование соответствующей системы формирования импульсов напряжения на управляющем электроде плазменного источника электронов с длительностью порядка сотен наносекунд, с регулируемой частотой и скважностью следования импульсов. Амплитуда импульсов управляющего напряжения при этом составляла порядка 1000 В.

Abstract

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. 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.

Ключевые слова: Плазменный источник электронов, импульсы тока пучка, разряд в скрещенных $E \times H$ полях

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

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 сотен наносекунд и менее. 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 по сравнению 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 [4].

Импульсный режим тока эмиссии в ПИЭЛ при модуляции тока разряда соответствующим регулированием напряжения разряда возможен только при длительности импульсов более десятка микросекунд, что определяется временем установления стационарного состояния (фронтом нарастания тока разряда) и обусловлено, в основном, скоростью перемещения в структуре ионов газа. Скорость движения электронов при типичной средней энергии их 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 предложен способ 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 эмитирующей плазмы в ПИЭЛ

Эмитирующая плазма в ПИЭЛ формируется с помощью низковольтных разрядов в газе [1, 2]. Могут применяться разряды различного типа [4, 5], однако, для упрощенного концептуального 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 упрощенного анализа и 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 также значительная разница в массах электрона и иона газа. Вследствие этого, уход электронов из объема

разрядной камеры и 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 уход электронов из плазмы так, что уход электронов и ионов из плазмы уравнивается. С этого момента устанавливается стационарный режим разряда, постоянство концентраций зарядов n^+ и n^- , а также их соотношение 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, что обычно [6, 7] отображается следующими равенствами:

$$I_p = I_i + I_e \quad (1.1)$$

$$I_i = j_{ik}S_k + j_{ia}S_a = j_{ik}S_k + j_{eik}S + j_iS_a = j_i(1 + \gamma)S_k + j_iS_a \quad (1.2)$$

$$j_i = en_i \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \quad (1.3)$$

где j_{iek} – плотность тока электронов ионно-электронной эмиссии, γ – коэффициент ионно-электронной эмиссии катода, S_k и S_a – площади катода и анода;

$$I_e = \gamma_e S_a = en_e \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} e^{\frac{eU_{ac}}{kT_e}} S_a \quad (1.4)$$

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 реализуемой средней их энергии, составляющей обычно десятые доли электронвольт (эВ) [8]. Таким образом, импульсный режим тока эмиссии в ПИЭЛ при модуляции тока разряда соответствующим регулированием напряжения разряда I_p возможен только при длительности импульсов более десятков микросекунд.

Скорость движения электронов при типичной средней энергии их в газоразрядной плазме порядка 1-2 эВ составляет порядка 10^6 м/с и приблизительно в 10^2 раз превышает скорость ионов. Поэтому достаточно короткие импульсы тока ПИЭЛ можно получить при импульсном ускоряющем напряжении. Однако, при ускоряющем напряжении, типичном для технологических ПИЭЛ, 10-40 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 обсуждалось. Соответственно, для исследования 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 регулируемой частотой следования импульсов. При

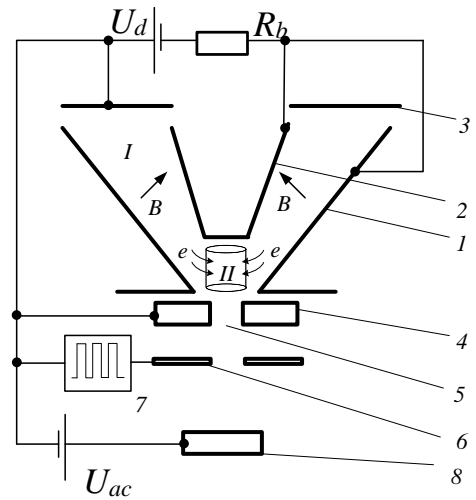
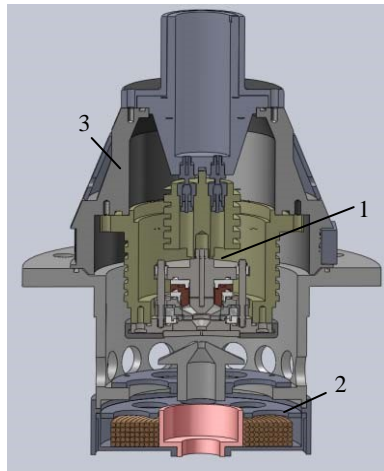
этом на основе анализа физических процессов в ПИЭЛ и ЭОС с термокатодами предполагается, что амплитуда импульсов управляющего напряжения будет достаточной порядка 500-1000 В при токе нагрузке порядка 0,1 А.

Плазменный источник электронов с дополнительным электродом

На рис. 1 приведен внешний вид (а) конструкция (б) и электродная структура (в) плазменного источника электронов [9, 10], который предполагается использовать в качестве базовой конструкции ПИЭЛ с управляющим электродом. Разряд возбуждается в пространстве между катодами 1 и 2 (б) (область I, рис. 1, в). Плазмообразующий газ подаётся в пространство между катодами, а перепад давлений, обеспечивается геометрией эмиссионного канала. Формирующаяся в разряде между катодами плазма диффундирует в область эмиссионного канала. Этому способствует электроды 3 и 4 (рис. 1, в) с анодным или промежуточным потенциалом, которые выполняют роль эмиттерного электрода. Извлечение электронов осуществляется через эмиссионный канал 5 в эмиттерном электроде 4 (рис. 1, в) с анодным (или близким к нему) потенциалом. Присутствие магнитного поля практически во всем объёме разрядной структуры способствует эффективной ионизации газа. В такой электродной структуре исключается стадия инициирования разряда [8, 9], что отражается на форме вольтамперных характеристик разряда, представленных на рис. 2.

В области эмиссионного канала (область II, рис. 1, в) магнитное поле имеет продольное оси канала направление индукции и не препятствует эмиссии электронов. Движение электронов в область II из области I осуществляется в слабом магнитном поле с поперечной компонентой вектора индукции, что в определённой мере ограничивает движение электронов в область эмиссионного канала (замагничивая только электроны) и затрудняет переключение электронного тока из плазмы в эмиссионный канал.

На рис. 3 представлены типичные характеристики данного источника.



а)

б)

в)

Рис.1. Плазменный источник электронов:

а – внешний вид; б – конструкция; в – электродная структура;

б – 1 – генератор плазмы; 2 – магнитная линза; 3 – корпус;

в – 1 – внешний катод; 2 – внутренний катод; 3 – анод; 4 – эмиттерный электрод; 5 – эмиссионный канал; 6 – дополнительный 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

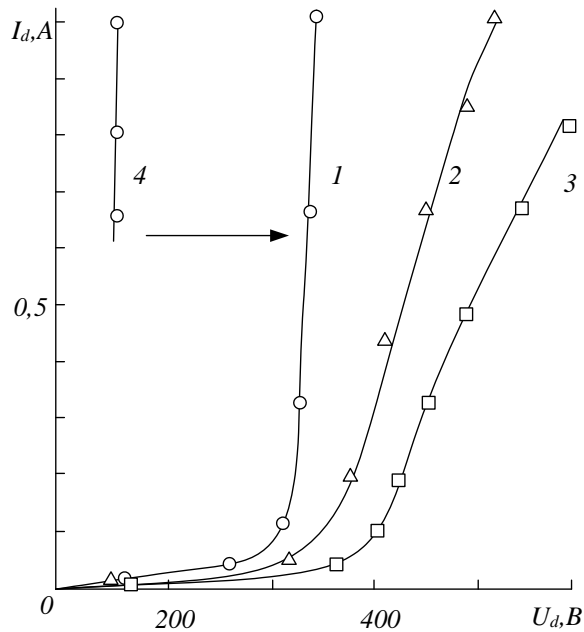


Рис. 2. Вольтамперные характеристики источника электронов:

напуск газа, $\text{мПа}\cdot\text{м}^3/\text{с}$ 1 – 2,8; 2, 4 – 1,7; 3 – 1,25

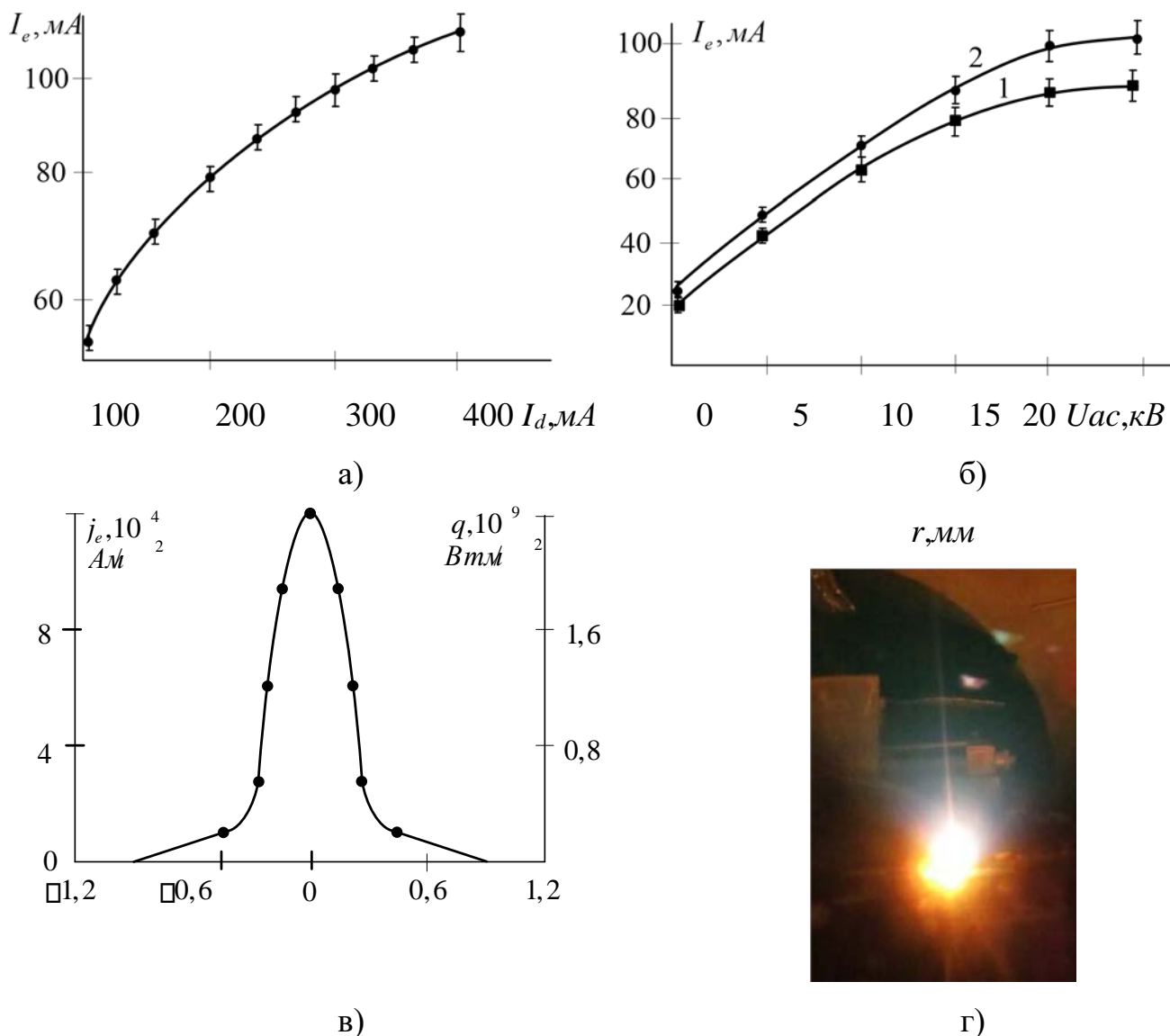


Рис. 3. Основные характеристики плазменного источника электронов (а – в) и фото пучка в процессе сварки (г):
 а) – г) – ускоряющее напряжение 18 кВ; напуск газа 1,5 мПа·м³/с; давление в рабочей камере 0,04 Па; б) – г) – ток разряда 0,2 А
 а – эмиссионная характеристика; б – вольтамперная характеристика; в – распределение плотности тока и плотности мощности по сечению пучка

Разработка возможных вариантов электронной схемы

Было промоделировано несколько вариантов схем, использующих в качестве ключевого элемента биполярный транзистор (рисунок 4), полевой транзистор (рисунок 5), IGBT – транзистор (рисунок 6). В качестве программного продукта выступал пакет NI Multisim (13.0).

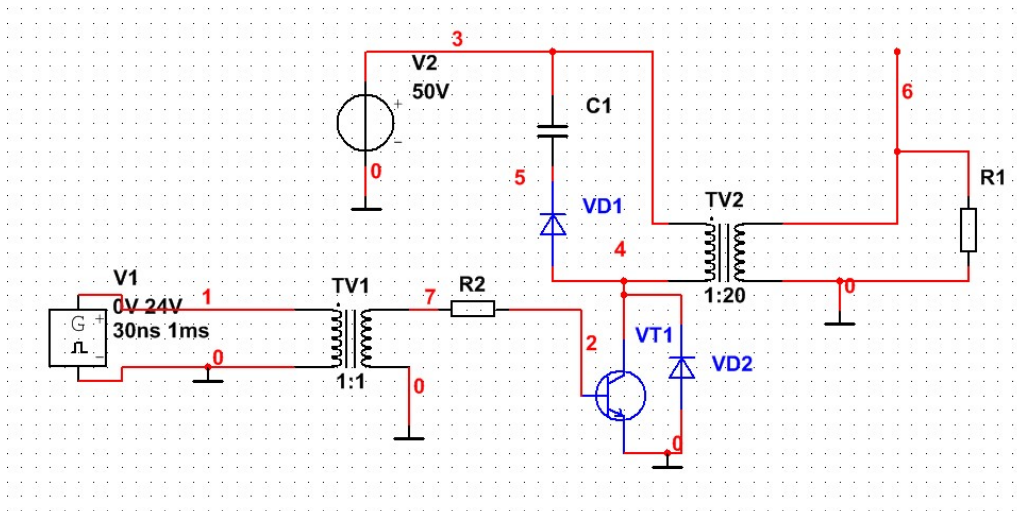


Рис. 4. Моделирование схемы на биполярном транзисторе

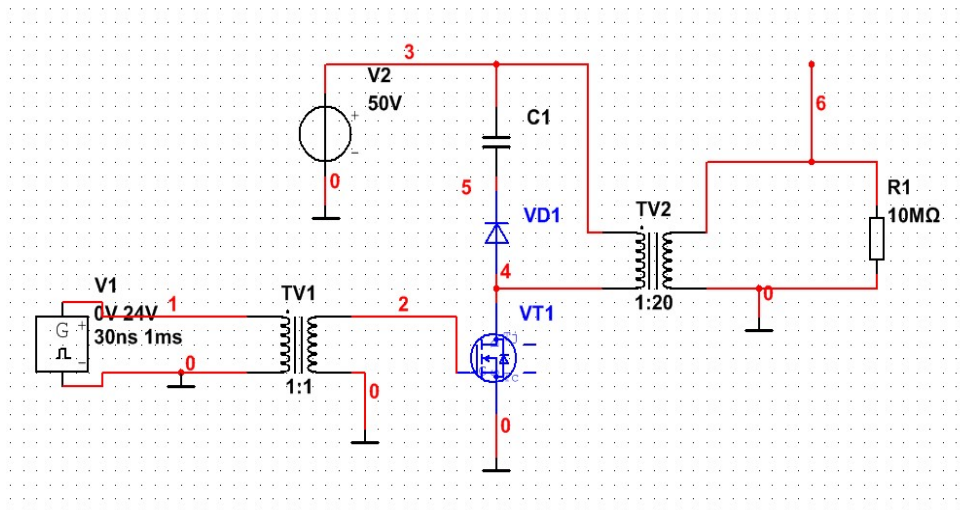


Рис. 5. Моделирование схемы на полевом транзисторе

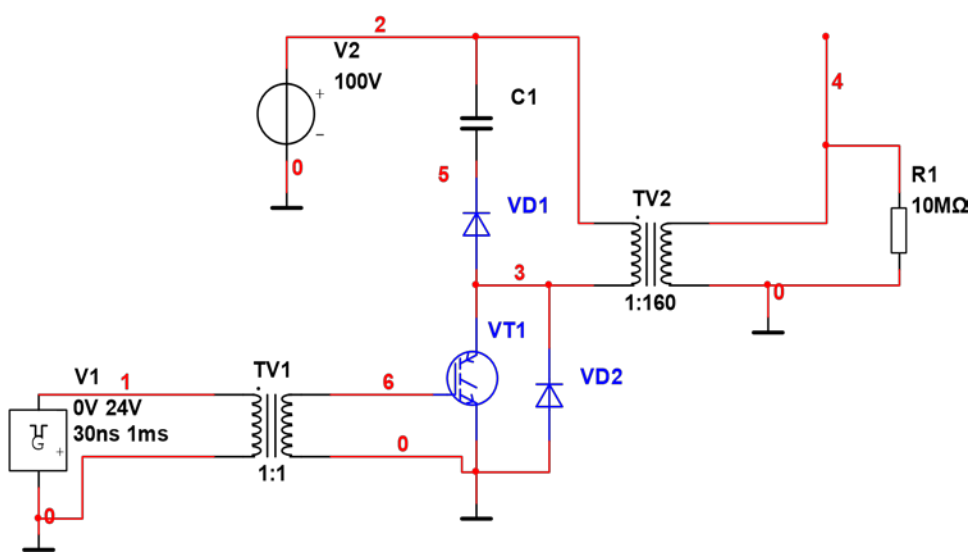


Рис. 6. Моделирование схемы на IGBT - транзисторе

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, выполняющий роль согласования и масштабирования. Одновременно защищает выход генератора импульсов от аварийных ситуаций. Цепочка C1-VD1 защитно-демпфирующая. Предотвращает самовозбуждение колебаний. Диоды VD2 (где имеются) – 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. 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×H полях за счет использования в конструкции дополнительного управляющего электрода и применения соответствующей схемы генерации управляющих импульсов.

Список литературы

1. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения / под ред. Е.М. Окс – Томск: НТЛ, 2005. – 216 с.
2. Источники электронов с плазменным эмиттером / под ред. Ю.Е. Крейнделя. – Новосибирск: Наука, 1983. – 120 с.

3. *В.Т. Барченко, О.Л. Вересов, О.И. Гребнев, В.А. Груздев, В.Г. Залесский, А.А. Лисенков.* Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / под ред. В.Т. Барченко. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
4. *Капцов, Н.А.* Электрические явления в газах и вакууме – М., Л. : ГИТТЛ, 1950. – 836 с.
5. *Райзер, Ю.П.* Физика газового разряда – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 736 с.
6. *Груздев, В.А., Залесский В.Г.* Формирование эмиссионного тока в плазменных эмиттерах электронов – Прикладная физика. – 2009. – № 5. – С. 82–90
7. *Груздев, В.А., Залесский В.Г.* Физические процессы формирования электронных пучков в плазменных источниках – Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2007. – №9. – С. 2–14.
8. *V. G. Zalesski, D.A. Antonovich.* Peculiarities of plasma electron sources operation at high pressures – J. Phys. D, Appl. Phys. – 2007. – № 40. – P. 7771–7777.
9. *V.A. Grusdev, V.G. Zalesski, D.A. Antonovich, Yu.P. Golubev.* Universal plasma electron source. – Vacuum. – 2005. – № 77. – P. 399–405.
10. *Антонович Д.А., Груздев В.А., Залесский В.Г., Солдатенко П.Н. Поболь И.Л.* Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть 1 – Вестник ПГУ. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 37 – 44