

Влияние давления и рода рабочего газа на характеристики сильноточной электронной пушки

*П.П. Кизириди, Г.Е. Озур**

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская Федерация

**ozur@lve.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Исследованы характеристики сильноточной электронной пушки в зависимости от давления и рода рабочего газа (аргон, воздух, гелий), наполняющего пушку. Инициирование взрывной эмиссии осуществлялось с помощью дуговых источников плазмы, встроенных в дисковый медный катод. Транспортировка сильноточного пучка (5–20 кэВ, 10–25 кА, 2–4 мкс) осуществлялась в ведущем магнитном поле индукцией 0.08 Тл. Показано, что зависимость энергии пучка в импульсе от давления газа является немонокотонной: сначала она растёт с увеличением давления, а затем падает, что связано с развитием плазменно-пучкового разряда, приводящего к падению импеданса пушки и сокращению длительности импульса пучка.

Ключевые слова: сильноточный электронный пучок, взрывная эмиссия, дуговые источники плазмы, пробой по поверхности диэлектрика, вакуумный диод, газонаполненный диод.

1. Введение

Низкоэнергетические (10–30 кэВ) сильноточные (до 30 кА) электронные пучки (НСЭП) представляют большой интерес для модификации поверхностных слоев металлических материалов [1–7]. Высокая плотность энергии (до 15 Дж/см²) и короткая длительность импульса (2–4 мкс) позволяют выделить энергию пучка в тонком (доли–единицы микрон) поверхностном слое, доводя его до плавления и даже частичного испарения. Разработанные нами источники НСЭП нашли применение не только в физическом эксперименте, но и на практике [1, 2, 6] для финишной обработки штампов, металлических зубных протезов и других изделий. Формирование НСЭП осуществляется, как правило, в пушках с плазменным анодом и взрывоэмиссионным катодом [6]. Традиционно актуальными задачами физики и техники генерирования НСЭП остаются обеспечение однородности распределения плотности энергии по сечению пучка, повышение стабильности параметров пучка от импульса к импульсу и расширение диапазона его параметров.

В [8, 9] мы предложили новый метод инициирования взрывной эмиссии путем встраивания в дисковый катод резистивно развязанных дуговых источников плазмы. Эксперименты [8, 9] с новым катодным узлом, построенном на этом принципе, показали улучшенную стабильность его работы по сравнению с наиболее часто используемым многопроволочным медным катодом и повышенную (в 1.4–2.4 раза) среднюю плотность эмиссионного тока. Кроме того, пониженные напряжения при пробое по диэлектрику по сравнению с вакуумным пробоем в отсутствие диэлектрика [10], позволяют понизить амплитуду импульса ускоряющего напряжения, расширяя тем самым диапазон параметров пучка. Благодаря независимости инициирования взрывной эмиссии от ускоряющего зазора и от среды его наполняющей, новый катодный узел является управляемым и может использоваться в режиме вакуумного или газонаполненного диода. Настоящая работа посвящена исследованию характеристик сильноточной электронной пушки с данным катодным узлом в зависимости от давления и рода рабочего газа.

2. Методика эксперимента

В экспериментах использовалась установка, устройство и принцип действия которой описаны в [8, 9]. Многоканальное инициирование взрывной электронной эмиссии осуществляется с помощью 69-ти параллельно срабатывающих, резистивно развязанных дуговых источников плазмы, электроды и трубчатые керамические изоляторы которых

встроены в катодную дисковую подложку из меди. Площадь эмитирующей части катода составляла 19.6 см^2 . Вывод коллекторного тока, т.е. тока в цепи тепловизионной мишени 11, осуществлялся в радиальном направлении (рис.1). Это позволяло регистрировать в одном импульсе как электрические параметры пучка (ускоряющее напряжение и ток), так и его тепловой отпечаток (термограмму), по которому определялись как полная энергия пучка, так и её распределение в поперечном сечении. Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя, тока катода и тока пучка на коллектор – поясами Роговского. Сигналы с датчиков подавались на входы 4-канального широкополосного (200 МГц) цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024. Энергия пучка в импульсе и её распределение по сечению определялись по термограммам, полученным с помощью тепловизора TESTO 875-1.

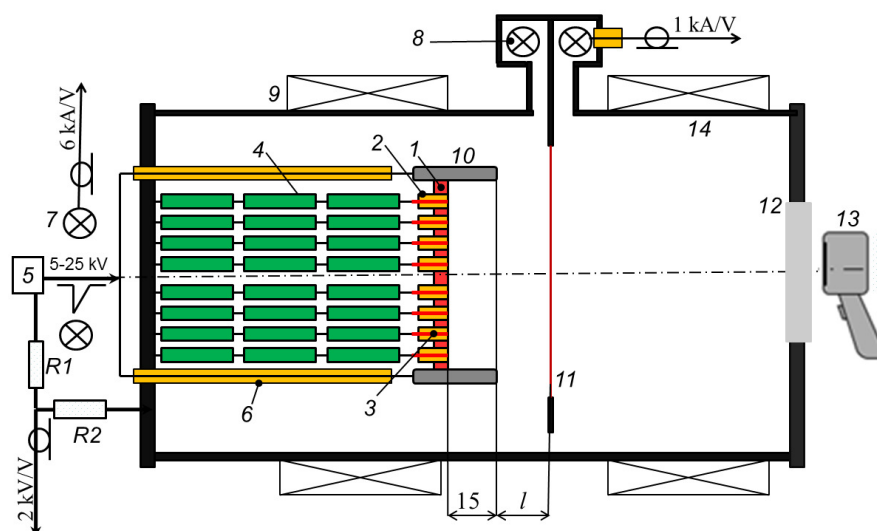


Рис.1. Схема эксперимента с одновременной регистрацией осциллограмм тока пучка и его термограмм. 1 – катод; 2 – керамические трубки; 3 – медные электроды; 4 – резистор ТВО-2 (1 кОм); 5 – генератор высоковольтных импульсов; 6 – изоляторы ввода ускоряющего напряжения; 7 и 8 – пояса Роговского; 9 – соленоид; 10 – экранирующий электрод; 11 – тепловизионная мишень (коллектор пучка); 12 – окно из флюорита кальция; 13 – тепловизор; 14 – корпус пушки. R1 и R2 – активный делитель напряжения.

В качестве рабочего газа использовались аргон, воздух и гелий, напускавшиеся стационарно с помощью прибора СНА-2. Ведущее магнитное поле, B_z , создавалось секционированным соленоидом 9 и составляло 0.08 Тл.

3. Результаты экспериментов и обсуждение

На рис.2 приведены типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения, тока пучка и полного тока катода, полученные при различных давлениях и роде газа.

На осциллограммах тока можно выделить три характерных стадии. При относительно низких давлениях газа, на первой стадии ток пучка нарастает до 5–10 кА (момент времени t_1 , значение тока I_1), на второй стадии ток существенно падает, что вызвано, на наш взгляд, рассасыванием плазмы, инжектируемой из дуговых источников (точнее, ее легкой компоненты, состоящей из ионизованного десорбированного газа), встроенных в катод. Диод переходит в режим плазменного прерывателя – спад тока сопровождается соответствующим индуктивным выбросом напряжения [11, 12]. На третьей стадии ток на коллектор нарастает благодаря распространению в ускоряющий зазор тяжелой компоненты катодной плазмы, состоящей из материала катода (медь), коллекторной плазмы, возникающей, прежде всего, из

десорбированного газа, а также благодаря ионизации рабочего и остаточного газа. Дополнительно, рост тока стимулируется за счёт появления взрывоэмиссионных центров под плазмой на кромке экранного электрода 10. Если же давление напускаемого в пушку газа достигает некоторой критической величины (0.13 Па в воздушном эквиваленте), то вторая стадия отсутствует: рост тока идёт монотонно, импеданс диода падает, длительность импульса пучка сокращается на время примерно равное t_2 (см. рис.2а). Это связано, на наш взгляд, с развитием пучково-плазменного разряда в рабочем газе, приводящего к резкому росту концентрации плазмы, как это наблюдалось, например, в [13]. Причём это происходит, несмотря на то, что длина свободного пробега электронов (как пучковых, так и плазменных) остаётся существенно больше характерных расстояний между электродами пушки. Вероятно также, что увеличение давления газа приводит к росту утечек тока вдоль изолятора высоковольтного ввода ускоряющего напряжения.

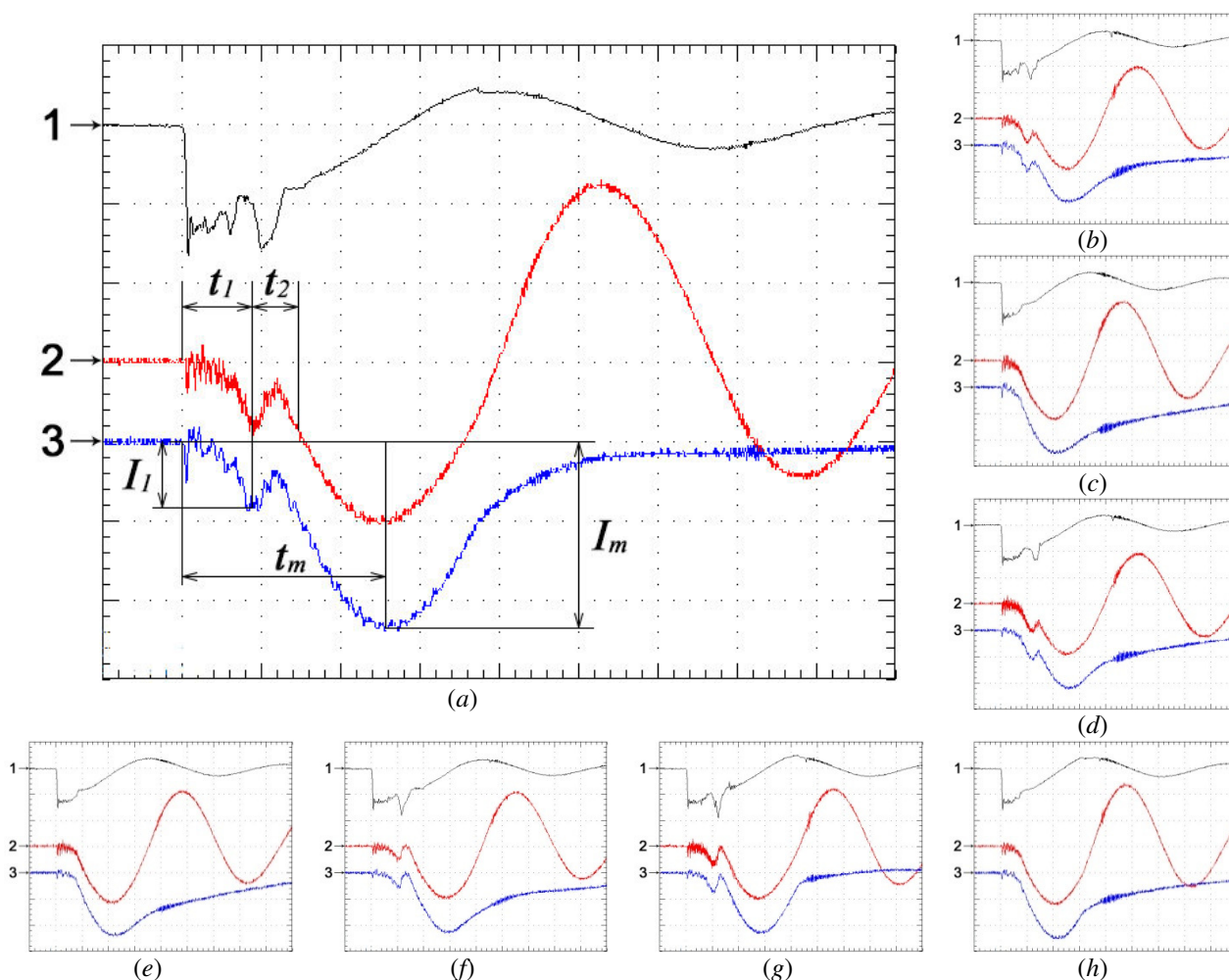


Рис.2. Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (Ch1, чёрный луч, 10 кВ/дел), полного тока катода (Ch2, красный луч, 12 кА/дел) и тока пучка на коллектор (Ch3, синий луч, 10 кА/дел), полученных для различных давлений и родов газа: (a) – $p_{Ar} = 0.05$ Па, (b) – $p_{Ar} = 0.09$ Па, (c) – $p_{Ar} = 0.13$ Па, (d) – $p_{Air} = 0.09$ Па, (e) – $p_{Air} = 0.13$ Па, (f) – $p_{He} = 0.3$ Па, (g) – $p_{He} = 0.5$ Па, (h) – $p_{He} = 0.7$ Па. Зарядное напряжение генератора высоковольтных импульсов, питающего электронную пушку, $U_{ch} = 12$ кВ.

Падение импеданса диода и сокращение длительности импульса приводит к уменьшению энергии пучка в импульсе. Например, на рис.3 представлены термограммы пучка, полученные при давлениях рабочего газа (аргон) 0.09 и 0.13 Па. Полная энергия

пучка, выделенная в тепловизионной мишени при $U_{ch} = 12$ кВ, составляет 53 Дж и 22.2 Дж, соответственно. Зависимости энергии пучка в импульсе от давления и рода газа представлены на рис.4. Вначале, рост энергии обусловлен улучшением согласования импеданса пушки с питающим её генератором высоковольтных импульсов, а затем при достижении некоторого критического значения давления это согласование, напротив, ухудшается вследствие развития вышеупомянутого пучково-плазменного разряда.

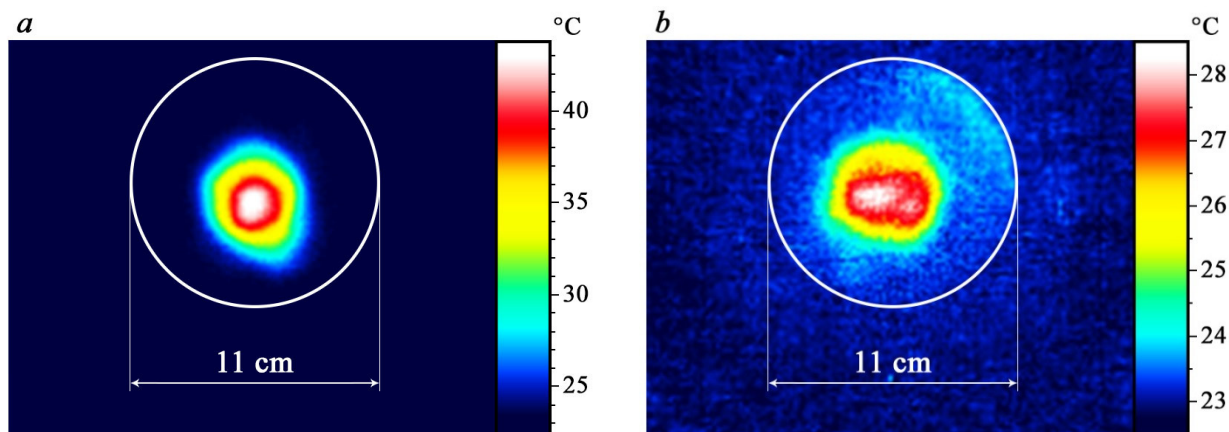


Рис.3. Термограммы пучка. (a) – $p_{Ar} = 0.09$ Па, (b) – $p_{Ar} = 0.13$ Па. $U_{ch} = 12$ кВ.

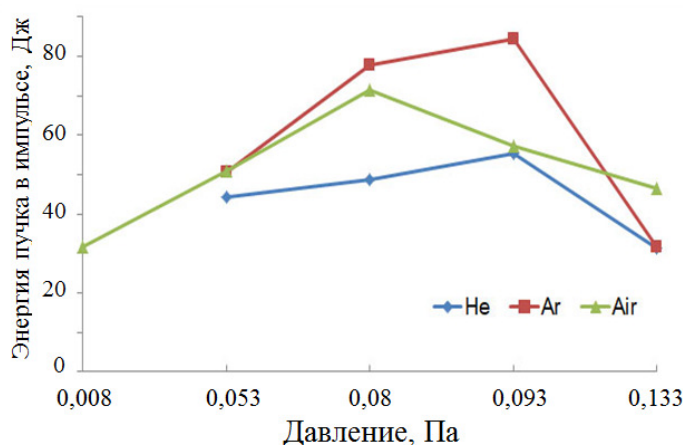


Рис.4. Энергия пучка в импульсе в зависимости от давления и рода рабочего газа: аргона, воздуха и гелия. $U_{ch} = 17$ кВ. Значения давления даны в воздушном эквиваленте (по показаниям ионизационного датчика ПМИ-2). Энергия при давлении воздуха 0.008 Па соответствует вакуумному диоду.

Отметим, что близость сечений ионизации аргона и азота (основного компонента воздуха) обуславливает схожесть осциллограмм при одном и том же давлении. Напротив, в случае гелия для получения аналогичных осциллограмм требовалось давление примерно в 6 раз больше, что обусловлено его существенно меньшим сечением ионизации (примерно в 8 раз).

4. Заключение

Продемонстрирована работоспособность сильноточной электронной пушки в режиме вакуумного и газонаполненного (аргон, воздух, гелий) диода. Сильноточная электронная эмиссия обеспечивается благодаря резистивно развязанным дуговым источникам плазмы, встроенным в дисковый медный катод и инициируемым пробоем по поверхности диэлектрика. Показано, что зависимость энергии пучка в импульсе имеет немонотонный

характер. Вначале, рост энергии пучка в импульсе с давлением газа обусловлен улучшением согласования импеданса пушки с питающим её генератором высоковольтных импульсов, Затем при достижении некоторого критического значения давления (в нашем случае 0.13 Па в воздушном эквиваленте) эта энергия падает вследствие развития пучково-плазменного разряда, которое приводит к падению импеданса пушки и уменьшению длительности импульса.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № FWRM-2021-0007).

5. Литература

- [1] Meisner L.L., Rotshtein V.P., Semin V.O., Meisner S.N., Markov A.B., Yakovlev E.V., D'yachenko F.A., Neiman A.A., Gudimova E.Yu., *Surf. Coat. Technol.*, **404**, 12644, 2020; doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126455
- [2] Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Sano S., Yu Z., Mishima S., *J. Mater. Process. Technol.*, **187–188**, 77, 2007; doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.080
- [3] Li M.C., Hao S.Z., Wen H., Huang R.F., *Appl. Surf. Sci.*, **303**, 350, 2014; doi: 10.1016/j.apsusc.2014.03.004
- [4] Murray J.W., Kinnell P.K., Cannon A.H., Bailey B., Clare A.T., *Precis. Eng.*, **37**(2), 443, 2013; doi: 10.1016/j.precisioneng.2012.11.007
- [5] Zou J., Zhang K., Dong C., Qin Y., Hao S., Grosdidier T., *Appl. Phys. Lett.*, **89**(4), 041913, 2006; doi: 10.1063/1.2234306
- [6] Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., *Физика плазмы*, **44**(1), 21, 2018; doi: 10.7868/S0367292118010146
- [7] Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Meisner L.L., Rotshtein V.P., Neiman A.A., D'yachenko F.A., *Appl. Surf. Sci.*, **437**, 217, 2018; doi: 10.1016/j.apsusc.2017.12.107
- [8] Кизириди П.П., Озур Г.Е., *Письма в ЖТФ*, **46**(15), 47, 2020; doi: 10.21883/PJTF.2020.15.49750.18364
- [9] Петров В.И., Кизириди П.П., Озур Г.Е., *ЖТФ*, **91**(11), 1764, 2021. doi: 10.21883/JTF.2021.11.51541.80-21
- [10] Месяц Г.А., *Импульсная энергетика и электроника*. (Москва: Наука, 2004).
- [11] Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Ким А.А., Ковальчук Б.М., Кокшенёв В.А., *Физика плазмы*, **12**(10), 1260, 1986;
- [12] Mendel C.W., Goldstein S.A., *J. Appl. Phys.*, **48**(7), 1004, 1977; doi: 10.1063/1.323797
- [13] Незлин М.В., *Динамика пучков в плазме*. (Москва: Энергоатомиздат, 1982).