

УДК 537.525:621.325

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ И ИХ ПОДВИЖНОСТИ В АНОДНОЙ ПЛАЗМЕ

И. В. МЕЛЬНИК

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,
Украина, Киев, 03056, пр-т Победы 37*

Аннотация. Описана итерационная методика расчета энергетической эффективности триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда, основанная на учете влияния нагрева анодной плазмы ускоренными электронами пучка и медленными вторичными электронами разряда, отраженными от анода. Увеличение температуры анодной плазмы влияет на ее объем, а также на концентрацию и подвижность ионов в ней, поэтому учет в предлагаемой модели термодинамических параметров плазмы позволил получить уточненные значения тока разряда и энергетической эффективности источников электронов. Достоинством предложенной итерационной методики расчета является то, что модель является замкнутой и самосогласованной и не требует использования аппроксимированных литературных данных о термодинамических параметрах разрядной плазмы.

Ключевые слова: ???

ВВЕДЕНИЕ

Технологические источники электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) находят широкое применение в промышленности при реализации различных термических технологических операций, включая высокопродуктивную сварку, пайку, отжиг малогабаритных изделий, нанесение композитных покрытий сложного химического состава в среде различных газов, включая инертные и активные, а также вакуумный переплав тугоплавких металлов и диэлектрических материалов с целью их очистки от вредных примесей [1–7].

Основными преимуществами источников электронов ВТР являются возможность работы в низком и среднем вакууме, в среде различ-

ных технологических газов, относительная простота конструкции источника и используемого технологического вакуумного оборудования, а также простота управления током электронного пучка [8].

Проблема состоит в том, что газодинамические системы управления током электронного пучка, используемые в технологическом оборудовании на основе источников электронов ВТР, часто не удовлетворяют современным требованиям электронно-лучевых технологий из-за их низкого быстродействия [8–11]. В связи с этим в настоящее время значительный интерес представляют теоретические и прикладные исследования, связанные с разработкой малоинерционных систем электрического управления током ВТР [12, 13]. Теорети-

DOI: [10.20535/S0021347017070056](https://doi.org/10.20535/S0021347017070056)
© И. В. Мельник, 2017

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ладохин, С.В.; Левицкий, Н.И.; Чернявский, В.Б.; [и др.]. *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве*. К.: Сталь, 2007. 605 с.
2. Завьялов, М.А.; Крейндель, Ю.Е.; Новиков, А.А.; Шантурин, Л.П. *Плазменные процессы в технологических электронных пушках*. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
3. Grechanyuk, M. I.; Melnyk, A. G.; Grechanyuk, I. M.; Melnyk, V. G.; Kovalchuk, D. V. Modern electron beam technologies and equipment for melting and physical vapor deposition of different materials. *Elektrotechnica and Electronica*, Vol. 49, No. 5–6, P. 115–121, 2014. URL: <http://epluse.fnts.bg/EplusE/EplusE-abstracts-2014-05-06.pdf>.
4. Mattausch, G.; Zimmermann, B.; Fietzke, F.; Heinss, J. P.; Graffel, B.; Winkler, F.; Roegner, F. H.;

Metzner, C. Gas discharge electron sources - proven and novel tools for thin-film technologies. *Elektrotechnica and Electronica*, Vol. 49, No. 5–6, P. 183–195, 2014. URL: <http://epluse.fnts.bg/EplusE/EplusE-abstracts-2014-05-06.pdf>.

5. Feinaeugle, P.; Mattausch, G.; Schmidt, S.; Roegner, F.-H. A new generation of plasma-based electron beam sources with high power density as a novel tool for high-rate PVD. *Proc. of 54-th Annual Tech. Conf. on Society of Vacuum Coaters*, Chicago, 2011, pp. 202–209.

6. Yarmolich, D.; Nozar, P.; Gleizer, S.; Krasik, Y. E.; Mittica, G.; Ancora, C.; Brillante, A.; Bilotti, I.; Taliani, C. Characterization of deposited films and the electron beam generated in the pulsed plasma deposition gun. *Japan. J. Applied Physics*, Vol. 50, No. 8S1, 2011. DOI: [10.1143/JJAP.50.08JD03](https://doi.org/10.1143/JJAP.50.08JD03).

7. Mattausch, G.; Scheffel, B.; Zywitzki, O.; Metzner, C.; Roegner, F. H. Technologies and tools for the plasma-activated EB high-rate deposition of Zirconia. *Elektrotechnica and Electronica*, Vol. 47, No. 5–6, P. 152–158, 2012. URL: <http://epluse.fnts.bg/EplusE/EplusE-abstracts-2012-05-06.pdf>.

8. Denbnovetsky, S. V.; Melnyk, V. I.; Melnyk, I. V.; Tugay, B. A. Model of control of glow discharge electron gun current for microelectronics production applications. *Proc. SPIE*, Vol. 5065, P. 64–76, 2003. DOI: [10.1117/12.502174](https://doi.org/10.1117/12.502174).

9. Шиллер, З.; Гайзиг, У.; Панцер, З. *Электронно-лучевая технология*. М.: Энергия, 1980. 528 с.

10. Рыкалин, Н. Н.; Зуев, И. В.; Углов, А. А. *Основы электронно-лучевой обработки материалов*. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.

11. Grechanyuk, N.; Kucherenko, P.; Grechanyuk, I.; Shpack, P. Modern technologies and equipment for obtaining of new materials and coatings. *Elektrotechnica and Electronica*, Vol. 41, No. 5–6, P. 122–128, 2006.

12. Denbnovetsky, S. V.; Melnik, V. I.; Melnik, I. V.; Tugay, B. A. Investigation of forming of electron beam in glow discharge electron guns with additional electrode. *Proc. of XVIII Int. Symp. on Discharges and Electrical*

Insulation in Vacuum, 17–21 Aug. 1998, Eindhoven, The Netherlands. IEEE, 1998, Vol. 2, pp. 637–640. DOI: [10.1109/DEIV.1998.738827](https://doi.org/10.1109/DEIV.1998.738827).

13. Мельник, И. В. Исследование зависимости энергетической эффективности триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда от его параметров и геометрических размеров электродной системы. *Электронное моделирование*, Т. 35, № 5, С. 71–81, 2013. URL: <http://www.emodel.org.ua/index.php/uk/30-archive/2013-год/35-5/215-35-5-6-u.html>.

14. Мельник, И. В. Оценка времени увеличения тока высоковольтного тлеющего разряда в триодной электродной системе при подаче управляющих импульсов. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 56, № 12, С. 51–61, 2013. URL: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347013120066>.

15. Грановский, В. Л. *Электрический ток в газах*. Т. 1: *Общие вопросы электродинамики газов*. М.-Л.: Гос. изд. технико-теоретич. литературы, 1952. 432 с.

16. Райзер, Ю. П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.

17. Велихов, Е. П.; Ковалев, В. С.; Рахимов, А. Т. *Физические явления в газоразрядной плазме*. М.: Наука, 1987. 160 с.

18. Синкевич, О. А.; Стаханов, И. П. *Физика плазмы. Стационарные процессы в частично ионизированном газе*. М.: Высшая школа, 1991. 191 с.

19. Ильин, В. П. *Численные методы решения задач электрофизики*. М.: Наука, 1985. 334 с.

20. Васильев, В. П. *Численные методы решения экстремальных задач: Учебное пособие для вузов*. М.: Наука. ГРФЛ, 1988. 552 с.

21. Новиков, А. А. *Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой*. М.: Энергоатомиздат, 1983. 96 с.

22. Мельник, И. В.; Тугай, С. Б. Аналитический расчет положения границы анодной плазмы в высоковольтном разрядном промежутке при зажигании вспомогательного разряда. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 55, № 11, С. 50–59, 2012. URL: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347012110064>.

Поступила в редакцию 05.09.2016

После переработки 16.11.2016
