

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭМИССИОННОЙ СПОСОБНОСТИ КАТОДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫВОДА ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Кайканов М.И.¹

¹ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: Kaykanov@mail.ru

Представлены результаты исследования влияния эмиссионной способности катода на эффективность вывода импульсного электронного пучка из диодной камеры в атмосферу через выводное окно ускорителя. Эксперименты основаны на изменении импеданса электронного диода за счет изменения эмиссионной площади катода, поскольку высоковольтный импульсный генератор ускорителя представляет собой схему разряда емкостного накопителя энергии на диод через автотрансформатор без промежуточных формирующих линий. Таким образом, выходные параметры ускорителя зависят от динамических характеристик диода при прочих равных условиях: выходное напряжение источника питания, конструкция выводного окна ускорителя и т.д. В качестве исследованных катодов рассматривались игольчатые катоды. Изменение импеданса диода достигалось за счет изменения количества игл (22 и 44 иглы), а также посредством изменения величины катод-анодного зазора диода.

Ключевые слова: импульсный электронный ускоритель, наносекундный электронный пучок, импеданс диода.

INVESTIGATION OF CATHODE EMISSION ABILITY INFLUENCE ON ELECTRON BEAM EXTRACTION EFFICIENCY

Kaikanov M.I.

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, (634050, Lenin str., 30), e-mail: Kaykanov@mail.ru

The results of investigation of the cathode emission properties influence on the pulse electron beam efficiency extraction from generation chamber to the atmosphere through the exit window of the accelerator are presented. The experiments are based on the changes of electron diode impedance by variation the emission area of the cathode. A high-voltage pulse generator accelerator's diagram is based on the discharge of capacitive energy storage to the diode through an autotransformer without intermediate forming lines. Thus, the output parameters of the accelerator are depend on the dynamic characteristics of diodes at constant parameters: the output voltage of the power supply, the output window of the accelerator design, etc. The needle cathode was investigated. Changing the diode impedance is achieved by changing the number of needles (22 and 44 needles), and by changing the value of the anode-cathode gap of diode.

Keywords: pulsed electron accelerator, nanosecond electron beam, diode impedance.

Введение

Импульсные электронные ускорители находят широкое применение во многих областях науки и техники: возбуждение эксимерных лазеров, ионизация молекул газа и жидкостей для инициации химических процессов, обработка поверхности изделий из твердых сплавов, технологии электронно-стимулированного обеззараживания веществ, обработка сточных вод и т.д. [1; 3; 5].

В случаях, когда требуется выводить генерируемый электронный пучок из вакуумной камеры в атмосферу (зону обработки), в качестве анода выступает выводное окно ускорителя. Конструкция выводного окна ускорителя включает в себя тонкую (десятки-сотни мкм) разделительную фольгу (сплавы алюминия, титана). В частности, рассматриваемый в настоящей статье импульсный электронный ускоритель «АСТРА-М»

разработан для использования в технологической схеме очистки сточных вод [7]. В качестве разделительной фольги выводного окна ускорителя используется титановая фольга ВТ1-0 толщиной 50 мкм. Выводное окно ускорителя должно обеспечивать прохождение генерируемых в вакуумной камере ускоренных электронов при достаточной механической прочности.

Очевидным является необходимость исследований, связанных с решением вопроса по повышению эффективности вывода энергии электронного пучка из вакуумной камеры в атмосферу. Для ускорителей, схема высоковольтных генераторов которых содержит формирующие линии (двойные формирующие линии, одинарные формирующие линии и т.д.), оптимальным является режим согласования импеданса диода и выходного импеданса генератора [4].

Исключение формирующих линий позволяет существенно упростить конструкцию ускорителя. Во-первых, упрощение достигается за счет исключения искровых разрядников из схемы генератора, во-вторых, уменьшаются габариты комплекса в целом и облегчается обслуживание ускорителя, поскольку исключается необходимость использования схемы охлаждения и регенерации жидкого диэлектрика (трансформаторное масло, деионизованная вода и т.д.), используемого в формирующих линиях в качестве изолятора.

Высоковольтный генератор импульсного электронного ускорителя «АСТРА-М» собран по схеме разряда емкостного накопителя на электронный диод через повышающий импульсный трансформатор. Таким образом, выходные параметры генератора (ускоряющее напряжение, подводимая к электронному диоду энергия) зависят от импеданса диода, и, следовательно, имеется возможность повышения эффективности вывода электронного пучка за счет изменения параметров диода при прочих равных условиях (выходное напряжение источника питания, конструкция выводного окна ускорителя и т.п.).

Исследованию влияния эмиссионных свойств катода на эффективность вывода энергии импульсного электронного пучка из вакуумной камеры в атмосферу посвящена настоящая статья.

Материалы и методы исследования

Как отмечалось ранее, исследования проводились на импульсном сильноточном электронном ускорителе «АСТРА-М» [6]. Параметры высоковольтного генератора ускорителя: энергия, запасаемая в первичном емкостном накопителе, 88 Дж, выходной импеданс генератора 200-220 Ом, амплитуда ускоряющего напряжения на согласованной нагрузке 300-350 кВ, длительность импульса напряжения 450 нс (по основанию), подводимая к диоду энергия 60 Дж, частота следования импульсов до 50 имп./с.

В качестве разделительной использовалась фольга из титана ВТ1-0 толщиной 50 мкм. Данный материал и толщина фольги обеспечивают механическую прочность выводного окна при работе ускорителя в частном режиме. Диаметр выводного окна 70 мм. Очевидным является тот факт, что уменьшение толщины фольги обеспечит повышение энергии выводимого из камеры генерации в атмосферу импульсного электронного пучка. Однако в случае изменения параметров катода электронного диода результаты по повышению эффективности вывода электронного пучка, полученные для одной заданной толщины фольги, применимы для любых конструкций выводных окон.

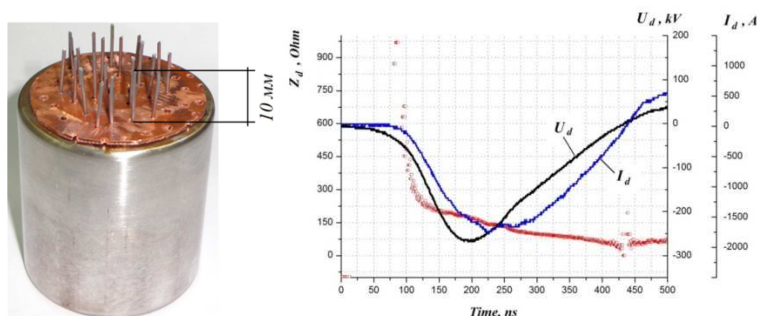
Эффективность вывода энергии электронного пучка исследовалась для игольчатого катода. Конструкция игольчатого катода с количеством игл $n=22$ показана на рис. 1. Иглы изготовлены из вольфрамовой проволоки диаметром 0.5 мм, верхние концы игл заточены. Высота игл 10 мм, расстояние между иглами 6 мм. Исследования проводились для $N= 44$ и $N= 22$ иглы.

Полученные результаты и их обсуждение

Изменение количества игл в конструкции катода, так же как и изменение величины катод-анодного зазора, обуславливает изменение импеданса диода, поскольку [2]:

$$Z_d(t) \sim \frac{(d_{AK}(t))^2 \cdot \sqrt{U(t)}}{S(t)}$$

где $S(t)$ – площадь эмитирующей поверхности катода (в случае игольчатого катода пропорциональна количеству игл N), $d_{AK}(t)$ – величина катод-анодного зазора.



*Рисунок 1. Параметры диода при работе с игольчатым катодом, 22 иглы $d_{AK}=20$ мм:
а - внешний вид катода; б - формы тока, напряжения и импеданса диода с игольчатым катодом.*

На рисунке 1 представлены осциллограммы тока и напряжения диода и рассчитанное значение импеданса в течение длительности импульса для игольчатого катода при $N=22$ иглы ($d_{AK}=24$ мм). Амплитудное значение напряжения составило порядка 265 кВ.

Величина импеданса диода в момент максимума напряжения составила 173 Ом. Рассчитанная по осциллограммам тока и напряжения величина подведенной к диоду энергии равна 59 ± 3 Дж (усреднение по 10 импульсам). При этом выведенная энергия в пучке составила величину 1.8 Дж. Т.е. эффективность вывода энергии из диодной камеры составляет крайне малую величину: порядка 3% от подведенной к диоду энергии.

Варьирование катод-анодного зазора ($d_{AK}=16-32$ мм) и площади эмитирующей поверхности ($N=22$ и 44 иглы) позволило изменить величину выведенной энергии электронного пучка и амплитуду ускоряющего напряжения. В таблице сведены значения импеданса диода Z_d при амплитудном значении ускоряющего напряжения, энергии E_{beam} (Дж) и плотности энергии J (мДж/см²) выведенного электронного пучка для различных d_{AK} и N .

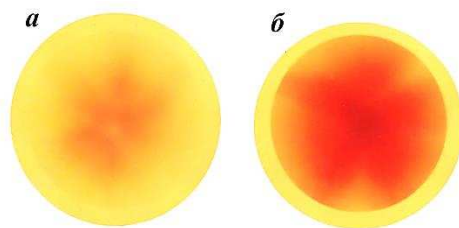
Таблица 1 - Зависимость выходных параметров ускорителя от величины катод-анодного зазора при разном количестве эмиссионных центров игольчатого катода

Тип катода	d_{AK} , мм	U_m , кВ	I_{diode} , кА	Z_{diode} , Ом	E_{diode} , Дж	E_{beam} , Дж	J_{beam} , мДж/см ²
44 иглы	16	242	1,75	132	58 ± 3	0.6	16
	20	250	1,7	152	58 ± 3	0.8	21
	24	265	1,63	173	59 ± 3	1.8	47
	28	280	1,58	178	60 ± 3	1.1	29
	32	287	1,5	187	60 ± 3	0.6	16
22 иглы	16	263	1.78	161	58 ± 3	1.1	29
	20	270	1.72	165	59 ± 3	1.8	47
	24	275	1.65	175	60 ± 3	2.7	70
	28	290	1.59	184	58 ± 3	2.1	55
	32	294	1.48	201	58 ± 3	1.5	39

Максимальная энергия выведенного электронного пучка составила 2.7 Дж (табл. 1), при количестве игл 22 шт., катод-анодном зазоре 24 мм. В обоих случаях ($N=22$ и 44 иглы) увеличение катод-анодного зазора привело к увеличению амплитуды ускоряющего напряжения диода до максимального значения 290 кВ. Но в результате кулоновского расталкивания электронов в пучке (рассыпание пучка) при повышении величины катод-анодного зазора происходит снижение эффективности вывода электронного пучка из диодной камеры.

Однородность распределения энергии по сечению пучка исследована посредством дозиметрических пленок типа ПОР с финезиновым радиационно-чувствительным покрытием. Пленка размещалась на выводном окне ускорителя с внешней стороны. На рис. 2 показаны «автографы» выведенного электронного пучка для катода из 22 игл при значениях катод-анодного зазора 16 и 24 мм. Как видно по полученным «автографам», изменение

импеданса диода за счет увеличения катод-анодного зазора действительно повышает эффективность вывода электронного пучка при прочих равных входных параметрах ускорителя (зарядное напряжение от источника питания).



*Рисунок 2. Отпечатки выведенного электронного пучка на дозиметрической пленке типа ПОР. Катод игольчатый (22 иглы), величина катод-анодного зазора:
а - 16 мм; б - 24 мм.*

Заключение

Полученные в результате проведенных исследований данные позволяют сделать следующие основные выводы. Уменьшение количества эмитирующих центров (игл) приводит к росту импеданса электронного диода, в результате происходит рассогласование выходного импеданса генератора и сопротивления нагрузки – электронного диода. Рассогласование импеданса генератора и диода приводит к уменьшению энергии, подводимой к электронному диоду ускорителя. При этом амплитудное значение ускоряющего напряжения, прикладываемого к диоду, возрастает, поскольку генератор ускорителя представляет собой схему «импульсный трансформатор – нагрузка». Следовательно, происходит увеличение кинетической энергии электронов в пучке. В результате наблюдается повышение эффективности вывода электронного пучка из диодной камеры ускорителя в зону обработки. Однако применение игольчатой конструкции катода не позволяет развить амплитудного значения ускоряющего напряжения на диоде выше 294 кВ, при этом эффективность передачи энергии, подведенной к диоду, в энергию электронного пучка не превысило 4.5%: максимальная энергия электронного пучка составила 2.7 Дж при подведенной к диоду энергии 59 Дж при данной конструкции выводного окна.

Список литературы

1. Кайканов М.И., Ремнев Г.Е., Юдина Н.В., Егоров И.С., Лоскутова Ю.В. Исследование реологических свойств нефти при облучении импульсным сильноточным электронным пучком // Известия вузов. Физика. - 2012. - Т. 55. - № 6/2. – С. 37-42.
2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. - М. : Наука, 2004. - 704 с.

3. Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е., Пономарев Д.В., Ежов В.В., Гончаров Д.В. Использование импульсных электронных пучков в плазмохимии // Известия ТПУ. – 2006. - Т. 309. - № 2. - С. 103-108.
4. Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И., Фурман Э.Г. и др. Источники импульсных электронных и ионных пучков на основе наносекундного генератора напряжения с согласующим трансформатором // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 88-91.
5. Сазонов Р.В., Пономарев Д.В., Холодная Г.Е., Кайканов М.И., Егоров И.С. Импульсный плазмохимический синтез и свойства наноразмерных порошков оксидов титана и кремния // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/3. – С. 68–74.
6. Egorov I., Esipov V., Remnev G., Kaikanov M., Lukonin E., and Poloskov A. A high-repetition rate pulsed electron accelerator // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – V. 20. - № 4. – P. 1334-1339.
7. Treatment of Industrial and Household Waste Water with the Pulse Electron Accelerator-Based Setup / Egorov I.S., Kaikanov M.I., Kolokolov D.Yu. et.al. // Известия вузов. Физика. – Т. 55. – № 10/3. – С. 61-64.

Рецензенты:

Лопатин В.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией № 5 Института физики высоких технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Пушкарёв А.И., д.ф.-м.н., профессор, с.н.с. лаборатории № 1 Института физики высоких технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.