

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДИМОСТИ ИОННОГО ПУЧКА, ФОРМИРУЕМОГО ДИОДОМ
С МАГНИТНОЙ САМОИЗОЛЯЦИЕЙ**

Исакова Ю.И., Хайлов И.П.

Научный руководитель: Пушкарев А.И., профессор, д.ф.-м.н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: isakova_yulia@tpu.ru

**DIVERGENCE OF A PULSED ION BEAM FORMED BY A DIODE WITH SELF-MAGNETIC
INSULATION**

Y.I. Isakova., I.P. Khailov

Scientific supervisor: Prof. A. I. Pushkarev, D. Sc., senior researcher Lab. № 1 ИИТР

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin av., 30, 634050,

E-mail: isakova_yulia@tpu.ru

Радиационно-пучковое модифицирование металлических изделий мощными ионными пучками (МИП) обеспечивает высокие скорости нагрева и последующего охлаждения их приповерхностного слоя, превышающие 10^7 - 10^8 К/с. Это позволяет получать составы и структуры, недоступные ни одному из традиционных металлургических способов. Для широкого промышленного внедрения методов модификации приповерхностных слоев мощными ионными пучками необходим надежный и экономичный источник МИП с большим ресурсом работы. Ионный диод с магнитной самоизоляцией и взрывоэмиссионным катодом имеет высокий ресурс непрерывной работы, превышающий 10^6 - 10^7 импульсов. У диодов другого типа ресурс работы без разрушения не превышает 1000 импульсов. Поэтому ионный ускоритель на основе диода со взрывоэмиссионным катодом и магнитной самоизоляцией наиболее перспективен для технологических применений.

Для модификации материалов с высокой теплопроводностью необходим МИП с плотностью энергии выше 2-5 Дж/см² при длительности импульса не более 100-150 нс. Высокую плотность энергии МИП на мишени можно получить путем эффективной фокусировки ионного пучка и устранения его рассыпания на пути дрейфа. В ионных диодах обычно используют геометрическую (баллистическую) фокусировку, выполняя анод и катод полуцилиндрическими или полусферическими. Но при транспортировке ионов до фокуса происходит их отклонение от начальной траектории из-за кулоновского расталкивания, влияния паразитных электрических и магнитных полей, диффузионного рассыпания и др. Цель выполненных исследований – исследование расходимости МИП в диоде и оптимизация конструкции диода с целью снижения угла расходимости ионного пучка.

Исследования выполнены на ионном ускорителе ТЕМП-4М [1], который состоит из емкостного накопителя - генератора импульсных напряжений, генератора наносекундных импульсов (двойной формирующей линии) и вакуумного диода с магнитной самоизоляцией. Ускоритель ТЕМП-4М формирует сдвоенные разнополярные импульсы – первый (плазмообразующий) отрицательный (400-500 нс, 100-200 кВ) и второй (генерирующий) положительный (120 нс, 200-250 кВ). Плотность энергии ионного пучка 0.5-5 Дж/см² (для разных диодов), частота следования импульсов 5–10 имп./мин. Конструкция диодного узла, расположение и калибровка диагностического оборудования ускорителя ТЕМП-4М подробно рассмотрены в наших работах [2,3].

Для генерации ионного пучка в ускорителе ТЕМП-4М используются диоды с магнитной самоизоляцией электронов. Для создания магнитной изоляции электронного потока в диоде собственным током, катод выполнен в виде полоска (плоский или фокусирующий) размером 22 см×4.5 см, который соединен к корпусу камеры диода только одним концом. Зазор между катодом и анодом выбирали из условия согласования импеданса диода с волновым сопротивлением двойной формирующей линии (4.9 Ом), он составлял 8-9 мм. Анод изготовлен из графита, катод – из нержавеющей стали с прорезями 2 см×0.5 см, прозрачность 70%. Electroды фокусирующего ионного диода имеют полуцилиндрическую конфигурацию, и геометрическая фокусировка происходит только в вертикальном сечении пучка. Внешний вид фокусирующего диода представлен на Рис. 1. Для увеличения эффективности фокусировки и предотвращения потерь ионов при транспортировке до мишени нами было предложено использовать металлический экран, установленный на заземленный электрод [4]. Экран выполнен из медной фольги, толщина которой превышает величину скин-слоя в экране для магнитного поля самоизоляции электронов (см. Рис. 1). Исследования показали [4], что использование сплошного металлического экрана улучшает экранирование в области транспортировки ионов, предотвращает уход низкоэнергетических электронов из ионного пучка и нарушение его электрической нейтральности.

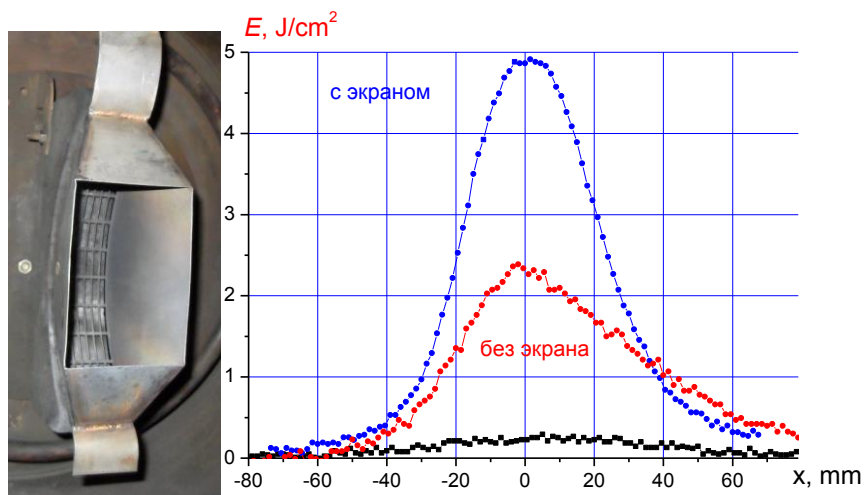


Рис. 1. Фотография фокусирующего диода с экраном и распределение плотности энергии МИП, формируемого диодом с экраном (1) и без экрана (2). Кривая 3 – исходный фон мишени

Выполненные исследования показали, что ширина МИП на полувысоте уменьшается с 60 мм до 40-42 мм при использовании экрана. Дивергенция МИП уменьшается с 11° до 8-9°.

Выполненный литературный обзор показал, что в ионном диоде с магнитной самоизоляцией расходимость пучка может быть меньше 2-3°. В прежних конструкциях диода ширина анода и катода были одинаковыми (Рис. 1). Но для формирования магнитного поля с высокой магнитной индукцией в А-К зазоре требуется только узкий полосковый катод. Анод может быть значительно шире, что снижает искажение электрического поля в А-К зазоре. С целью дальнейшей оптимизации конструкции диода для снижения расходимости пучка мы увеличили ширину анода в фокусирующем полосковом диоде, что позволило значительно улучшить фокусировку МИП. На Рис. 2 показан внешний вид фокусирующего диода с широким анодом. Катод имел ширину 4.5 см, а анод – 9 см. Изменение конструкции фокусирующего диода позволило снизить расходимость МИП с 8° до 4-5° и увеличить плотность энергии в фокусе до 10-12 Дж/см², см. рис. 2.

Изменение конструкции фокусирующего диода также увеличило стабильность полного тока в диоде и плотности энергии МИП в серии импульсов. Стандартная девиация плотности энергии МИП в серии импульсов снизилась с 10-15% [5] до 5-6%, а стандартная девиация полного тока в диоде – с 5-6% до 2-3%.

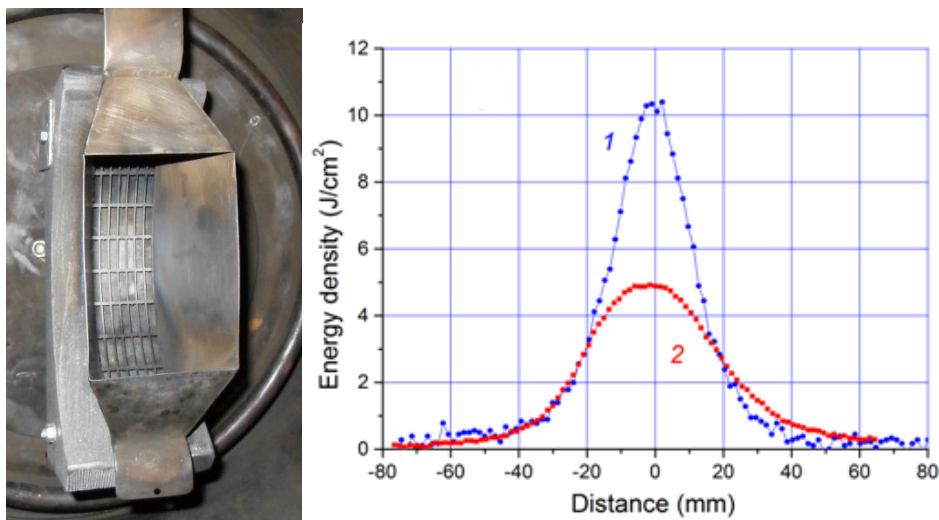


Рис. 2. Фотография фокусирующего диода с измененным анодом и распределение плотности энергии МИП в фокусной плоскости в вертикальном сечении диода с широким (1) и узким (2) анодами.

Выполненные исследования показали, что расходимость мощного ионного пучка, формируемого диодом в режиме магнитной самоизоляции, существенно зависит от однородности электрического поля в анод-катодном зазоре. Искажение поля на периферии диода увеличивает расходимость ионного пучка в области транспортировки. Для снижения расходимости МИП была изменена конструкция диода - ширина анода увеличена в 2 раза по сравнению с шириной полоскового катода. Изменение конструкции фокусирующего диода позволило снизить расходимость ионного пучка с 8° до 4-5°, увеличить плотность энергии в фокусе до 10-12 Дж/см² и снизить стандартную девиацию плотности энергии в серии импульсов с 10-15% до 5-6%.

Большой ресурс работы ионных диодов с магнитной самоизоляцией и взрывоэмиссионным катодом (более 10⁶ импульсов), высокая стабильность энергии пучка в серии импульсов делает их перспективными для различных технологических применений.

Список использованных источников:

1. Pushkarev A.I., Isakova Yu.I. A gigawatt power pulsed ion beam generator for industrial application // Surface & Coatings Technology - 228 - 2013 – pp.382–384.
2. Isakova Y. I. Diagnostic Equipment for the TEMP-4M Generator of High-current Pulsed Ion Beams // Journal of the Korean Physical Society - Vol. 592011 - №. 6 - pp. 3531-3535.
3. Isakova Y. I., Pushkarev A. I. Thermal Imaging Diagnostics of Powerful Ion Beams // Instruments and Experimental Techniques - Vol. 56 – №. 2 - 2013 - pp. 185–192.
4. Pushkarev A.I., Isakova Y.I., Khaylov I.P. The influence of a shield on intense ion beam transportation // Laser and particle beams – Vol. 31 - issue 03 – 2013 - pp. 493-501.
5. Isakova Y.I., Pushkarev A.I., Khaylov I.P. Statistical analysis of the ion beam production in a self magnetically insulated diode // Physics of plasmas - 20 (9) – 2013 – 093105.