

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ  
ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ 10-12 Дж/см<sup>2</sup>**

М.Е. Аширбаев

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.И. Пушкарев  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 2а, 634050  
E-mail: [Muhit\\_2008@mail.ru](mailto:Muhit_2008@mail.ru)

**MODERNIZATION OF THERMAL IMAGING DIAGNOSTICS HIGH-POWER ION BEAMS TO  
MEASURE THE ENERGY DENSITY 10-12 J/cm<sup>2</sup>**

M.E. Ashirbayev

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.I. Pushkarev  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 2a, 634050  
E-mail: [Muhit\\_2008@mail.ru](mailto:Muhit_2008@mail.ru)

***Abstract.** Presented results of a research of transportation and focusing a pulsed ion beam gigawatt power, generated diode with explosive emission cathode in magnetic insulation regime. Changing the construction with focusing stripe diode allowed to reduce the divergence of the ion beam from  $8^{\circ}$  to  $4-5^{\circ}$ , to increase the energy density in focus till 10-12 j/cm<sup>2</sup>. When changing the ion beam energy density above the threshold for ablation of a target material using a metal grid with optical transparency of 50% to reduce the energy density. Performed research on the effect of metal grid transporting the ion beam. A great resource work of ion diodes with magnetic self-insulation and explosive emission cathode (more than 10pulses), high beam energy, stability in series of pulses makes them promising for various technological applications.*

Мощные ионные пучки (МИП) являются уникальным инструментом для модификации металлических изделий. Они обеспечивают высокие скорости нагрева и последующего охлаждения их приповерхностного слоя, превышающие  $10^7-10^9$  К/с. Давление в области поглощения МИП достигает  $10^8-10^{10}$  Па [1]. При этом образуются твердые растворы и вторичные фазы, не характерные для равновесной диаграммы фазовых состояний. Данный метод имеет более широкие возможности модификации структуры и свойств приповерхностного слоя по сравнению с термической обработкой, поверхностным пластическим деформированием и др. Целью выполненных исследований является модернизация тепловизионной диагностики для расширения диапазона измерения плотности энергии.

Исследования выполнены на ускорителе ТЕМП-4М [2], который состоит из емкостного накопителя, ДФЛ и диода с магнитной самоизоляции. Ускоритель формирует сдвоенные разнополярные импульсы – первый отрицательный (300 - 500 нс, 150 - 200 кВ) и второй положительный (120 нс, 250 -300 кВ). Измерение магнитной индукции в А-К зазоре проводили с помощью датчика [3]

Для измерения плотности энергии МИП мы использовали тепловизионную диагностику, которая регистрирует плотность энергии пучка, поглощенного в мишени [4]. Но при высокой плотности энергии происходит абляция материала мишени и данная диагностика не позволяет измерить полную плотность

энергии МИП. В работе [5] для снижения плотности энергии МИП авторы использовали металлическую сетку, установленную перед мишенью. Показания тепловизионной диагностики затем корректировали на коэффициент оптической прозрачности сетки. Но коэффициент прозрачности металлической сетки может снижаться при облучении ионным пучком за счет образования плазмы. В работе [6] обнаружен эффект отсечки ионного пучка в коллимированном цилиндре Фарадея за счет перекрытия коллимирующего отверстия абляционной плазмой. Поэтому мы выполнили тестирование тепловизионной диагностики с использованием металлической сетки с оптической прозрачностью 50%. На рисунке 1 показано распределение плотности энергии МИП, формируемого фокусирующим диодом. Расстояние от диода до мишени 185 мм, расстояние от диода до металлической сетки 5 см.

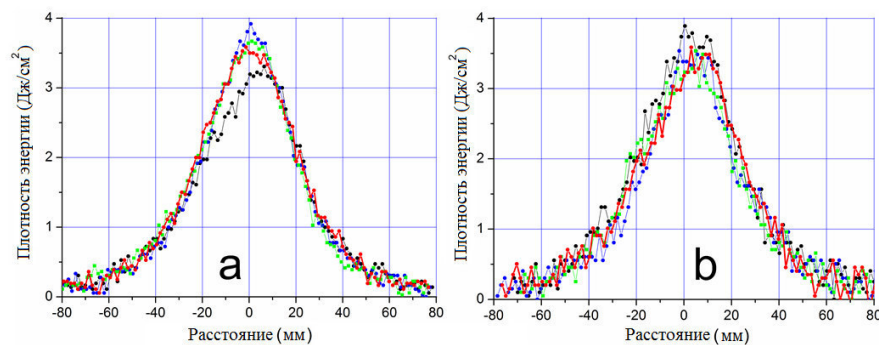


Рис. 1 Распределение плотности энергии МИП в вертикальном сечении диода при использовании одной (а) и двух (б) сеток. 4 последовательных импульса

Плотность энергии МИП в фокусе и распределение плотности энергии по сечению, рассчитанные с учетом оптической прозрачности сеток (50 и 25%), в пределах точности измерения совпадают.

Выполненные исследования показали, что металлическая сетка, используемая для ослабления ионного пучка, может изменять расходимость МИП. При расположении сетки в области высокой плотности энергии МИП (вблизи фокуса) ширина пучка на полувысоте уменьшается. На рисунке 2 показано распределение плотности энергии МИП, формируемого фокусирующим диодом.

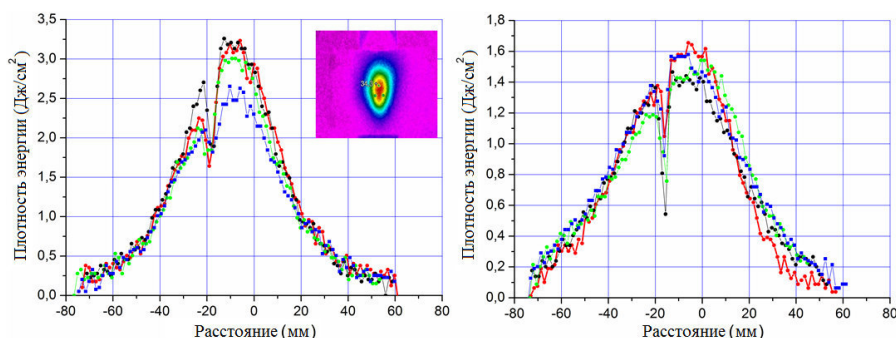


Рис. 2. Распределение плотности энергии МИП в вертикальном сечении диода при использовании одной сетки (а) и без сетки (б). 4 последовательных импульса

Расстояние от диода до мишени 195 мм, расстояние от диода до металлической сетки 10 см (фокусное расстояние 14.5 см). Для совмещения распределений плотности энергии по сечению, полученных на разных импульсах, в мишени выполнено 3 отверстия диаметром 3 мм (см. рис. 2а).

При высокой плотности энергии МИП в области металлической сетки происходит дополнительная фокусировка пучка, его ширина на полувысоте уменьшается с 60 мм до 50-55 мм. Плотность энергии МИП при этом увеличивается.

Таблица 1

Расчет плотности энергии МИП, необходимой для испарения стали

		Объемная плотность энергии	Поверхностная плотность энергии МИП
1	Нагрев до плавления 30-1530 °С	975 Дж/г	1.52 Дж/см <sup>2</sup>
2	Плавление	277 Дж/г	0.43 Дж/см <sup>2</sup>
3	Нагрев до кипения 1535 - 2862°С	1100 Дж/г	1.72 Дж/см <sup>2</sup>
	Всего		3.67 Дж/см <sup>2</sup>

Выполненные исследования показали, что использование металлической сетки для ослабления пучка может вносить значительную погрешность. При высокой плотности энергии ионного пучка в области металлической сетки происходит изменение расходимости пучка. Плотность энергии на мишени, измеренная с помощью тепловизионной диагностики, при использовании сеток и без сеток может отличаться в 1.5-2 раза даже при отсутствии абляции материала мишени. Оптимизация расположения металлических сеток в области транспортировки МИП позволяет устранить эту погрешность.

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.

*Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Наука, проект № 2159.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко В. И. Скворцов В А, Фортов В.Е., Шаманин И. В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. - М: Физматлит, 2003. - 286 с.
2. Pushkarev A.I., Isakova Yu.I. A gigawatt power pulsed ion beam generator for industrial application // Surface & Coatings Technology 228 (2013) S382–S384
3. Аширбаев М.Е. Измерение магнитной индукции в А-К зазоре диода с магнитной самоизоляцией // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых (Томск, 21–24 апреля 2015 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 1556 с.
4. Isakova Yu.I., Pushkarev A.I. Thermal imaging diagnostics of powerful ion beams // Instruments and Experimental Techniques, 2013, Vol. 56, No. 2, pp. 185–192.
5. Davis H.A., Bartsch R.R., Olson J.C., Rej D.J., and Waganaar W.J. // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82 (7), P. 3223.
6. Renk T.J., Harper-Slaboszewicz V., Mikkelson K. A., Ginn W. C., Ottinger P.F. and Schumer J.W. Use of a radial self-field diode geometry for intense pulsed ion beam generation at 6 MeV on Hermes III // Physics of plasmas 21, 123114 (2014)