

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 533.9

ИЗМЕРЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ПОТЕРЬ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА С ЭНЕРГИЕЙ 100 кэВ/а.е.м. В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

© 2021 г. Р. О. Гаврилин^{а, *}, А. О. Хурчиев^а, А. В. Канцырев^а, М. М. Баско^б, С. А. Высоцкий^а,
Д. С. Колесников^а, И. В. Рудской^а, А. А. Голубев^а, В. А. Волков^а, А. А. Дроздовский^а,
Р. П. Куйбеда^а, П. А. Федин^а, С. М. Савин^а, А. П. Кузнецов^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Россия, Москва, 123182 Россия

^бИнститут прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук, Москва, 125047 Россия

*E-mail: roman_gavrilin@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020 г.

После доработки 19.08.2021 г.

Принята к публикации 20.08.2021 г.

Изучение процессов торможения тяжелых заряженных частиц в плазме относится к фундаментальным проблемам физики плазмы и физики высокой плотности энергии в веществе. В работе представлены результаты экспериментальных исследований энергетических потерь ионов железа Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м в водородной плазме. Приводится сравнение полученных экспериментальных данных по торможению на свободных электронах плазмы с существующими теоретическими моделями.

Ключевые слова: тормозная способность вещества, ионный пучок, плазма, лазерная интерферометрия, электронная плотность, степень ионизации, время-пролетная методика, энергетические потери ионов

DOI: 10.56304/S2079562920060226

1. ВВЕДЕНИЕ

Теория торможения ионов в холодном веществе развивается уже более 100 лет и восходит к работам Бора, Бете и Блоха (БББ) [1–3], рассматривавших торможение ионов в газах. В дальнейшем огромное количество работ было посвящено внесению поправок в классическое рассмотрение этого вопроса. Развитие физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза привело к распространению теории торможения тяжелых заряженных частиц и на ионизованные среды. Первые экспериментальные исследования тормозных потерь ионов в ионизованном веществе показали существенное увеличение тормозной способности плазмы по отношению к холодному (неионизованному) веществу. Было отмечено, что увеличение тормозной способности плазмы по сравнению с холодным веществом определяется двумя эффектами: взаимодействием налетающих ионов со свободными электронами плазмы и изменением скорости рекомбинационных процессов, приводящих к увеличению равновесного заряда налетающих ионов в ионизованной среде. При этом различия в энергетических потерях ионов возрастают с уменьшением их энергии. Большое количество экспериментальных работ по измерению тормозной способности плазмы было проведено для энергий ионов в диапазоне от 1.5 до 11 МэВ/а.е.м.

[4–10]. Зафиксирован рост энергетических потерь ионов в плазме по сравнению с холодным веществом в 1.2–3 раза в зависимости от начальной энергии и сорта частиц, а также температуры, плотности и степени ионизации плазмы. Однако в области низких энергий процессы, определяющие торможение ионов в плазме, экспериментально изучены недостаточно. Для ионов с энергиями менее 500 кэВ/а.е.м. имеется лишь несколько работ [11–13].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований энергетических потерь ионов железа Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м в водородной плазме сильноточного разряда, а также проведено сравнение полученных экспериментальных данных с существующими теоретическими моделями.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперимент по измерению энергетических потерь ионов $^{56}\text{Fe}^{+2}$ в плазме проводился на линейном тяжелоионном ускорителе ТИПр-1в ИТЭФ [14]. Экспериментальная установка состоит из плазменной мишени, установленной в транспортном канале ускорителя, и системы регистрации (рис. 1).

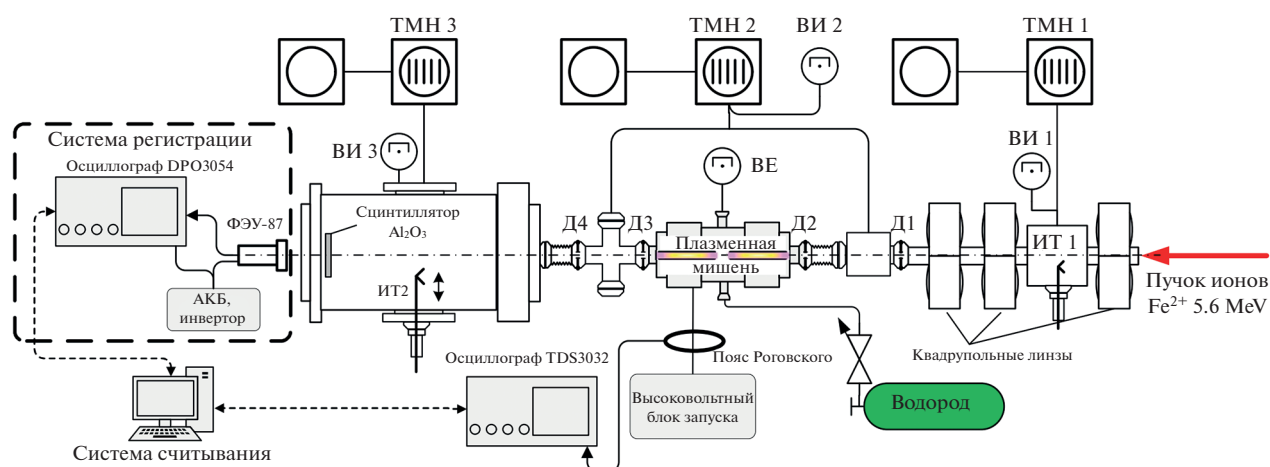


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки. ТМН – турбомолекулярный насос, ВИ – широкодиапазонный ионизационный вакуумметр, ВЕ – емкостной вакуумметр, ИТ – измеритель (коллектор) тока пучка, Д – диафрагма.

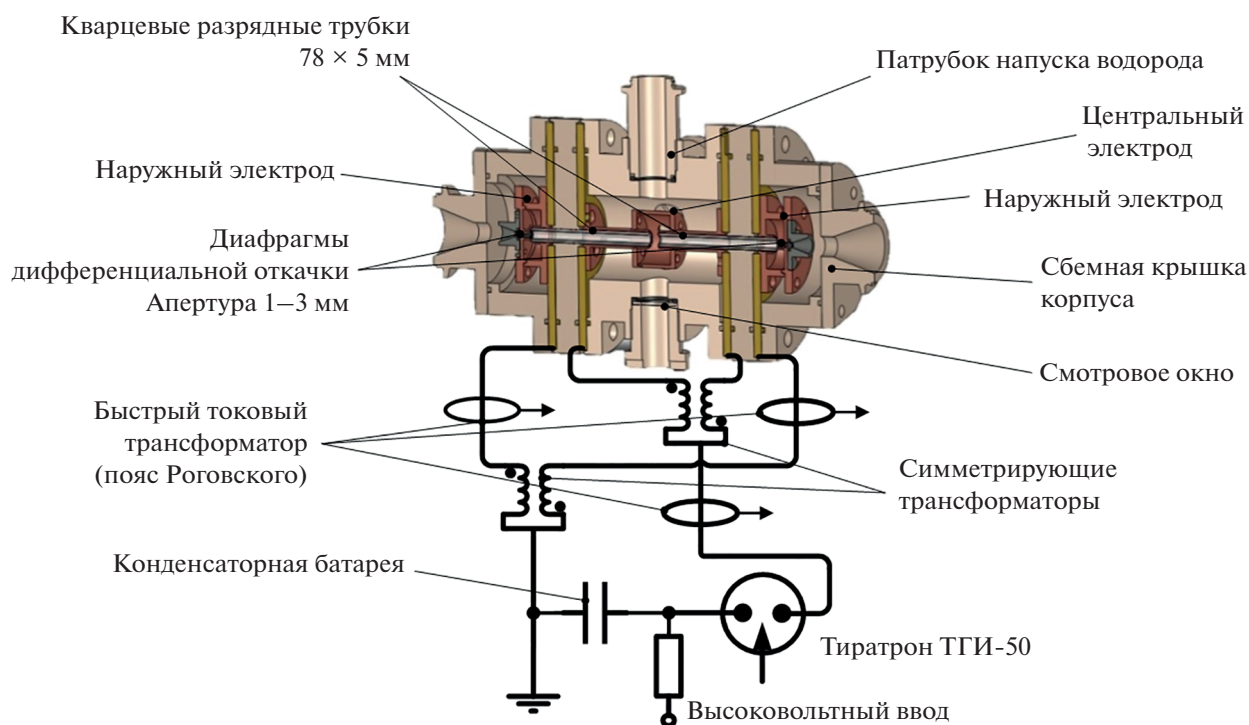


Рис. 2. Схема газоразрядной плазменной мишени и основных элементов электрической схемы.

А. Плазменная мишень

Сильноточная газоразрядная плазменная мишень (ПМ), используемая в данной работе, является модификацией [15] применявшейся ранее мишени [10]. Плазма создается сильноточным электрическим разрядом в двух коллинеарных кварцевых трубках с внутренним диаметром 5 мм и длиной 78 мм, заполненных водородом (рис. 2). Водород подается в центральную часть мишени че-

рез игольчатый клапан и откачивается через диафрагмы, расположенные на оси мишени. Рабочее давление газа в мишени составляет от 1 до 5 торр.

Конденсаторная батарея емкостью до 3.8 мкФ заряжается до напряжения 1.5–6 кВ и создает ток до 5 кА в каждом разрядном канале. Симметричность разряда в двух каналах достигается с помощью специальных катушек индуктивности, включенных в разрядную цепь. Типичные осцилло-

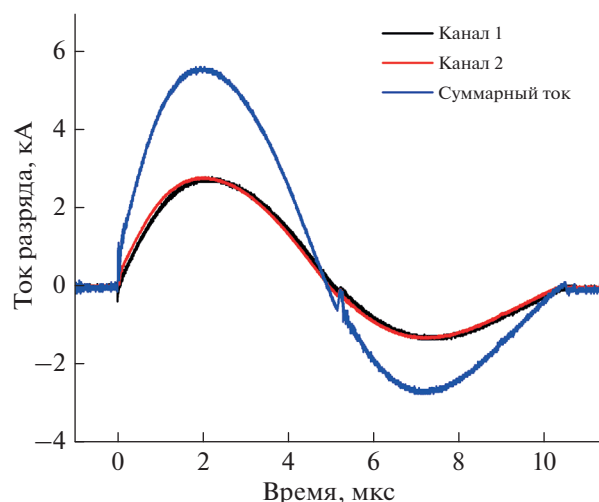


Рис. 3. Осциллограммы суммарного тока и токов в двух разрядных промежутках ПМ при напряжении 5 кВ, емкости накопителя 2.5 мкФ, давлении водорода 1 торр.

граммы разрядных токов показаны на рис. 3. Конструкция из двух последовательных коаксиальных разрядных промежутков позволяет снизить эффект фокусировки ионного пучка магнитным полем: фокусирующий эффект в первом разрядном канале компенсируется обратным эффектом во втором канале, что позволяет повысить пропускную способность плазменной мишени при прохождении ионного пучка.

Для определения линейной плотности свободных электронов плазмы применялась двухволновая лазерная интерферометрия с квадратурной регистрацией сигнала [16, 17]. Проведенные измерения показали, что при изменении начального давления водорода от 1 до 5 торр и напряжения на конденсаторной батарее от 1.5 до 5 кВ линейная плотность свободных электронов n_{fe} меняется в диапазоне от $2.9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ до $1.19 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$.

В. Ускоритель тяжелых ионов и транспортный канал

Ускоритель ТИПр-1 позволяет ускорять ионы с отношением массы к заряду $A/Z \leq 60$. В качестве инжектора частиц используется ионный вакуумно-дуговой источник MEVVA. Ускорение пучка ионов до энергии 100 кэВ/а.е.м. происходит в структуре с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), работающей на частоте 27.7 МГц. Ток пучка на выходе структуры с ПОКФ составляет 1.5 мА, длительность — до 400 мкс. Транспортный канал включает в себя три квадрупольные линзы и две диагностические камеры. Измерение тока пучка осуществлялось при помощи цилиндра Фарадея. Для установки плазменной мишени в транспортный канал ускорителя была использована дифференциальная ваку-

умная откачка, позволяющая поддерживать необходимое давление в ускорителе при работе плазменной мишени. Градиент давления водорода обеспечивался при помощи диафрагм Д1–Д4 с апертурами от 1.0 до 3.0 мм (см рис. 1). Система ионной оптики установки была оптимизирована исходя из выбранных наборов диафрагм [18] и обеспечила максимальную трансмиссию пучка через мишень к системе регистрации. Ток пучка на детекторе фиксировался коллектором ИТ2 и составлял от 10 до 30 мкА.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения потерь энергии ионов в плазме применялась время-пролетная методика с использованием высокочастотной (27.7 МГц) микроструктуры ионного пучка ускорителя в качестве опорного сигнала. Длина время-пролетной базы составляла 1115 мм. В качестве детектора пучка ионов был использован сапфировый сцинтиллятор (Al_2O_3), совмещенный с фотоэлектронным умножителем ФЭУ-87. Для предотвращения попадания излучения плазмы на детектор, на сцинтиллятор методом напыления был нанесен слой алюминия толщиной 700 нм. Для уменьшения влияния электромагнитных наводок, возникающих при работе высокопоточной плазменной мишени, система регистрации пучка ионов помещалась в экранирующий металлический корпус, а питание приборов системы регистрации осуществлялось через инверторный преобразователь напряжения с использованием аккумулятора. Данные меры позволили понизить уровень помех на ФЭУ примерно в 10 раз (рис. 4).

Уменьшение уровня сигнала с 2.5 по 4.5 мкс вызвано срабатыванием ПМ и уменьшением транс-

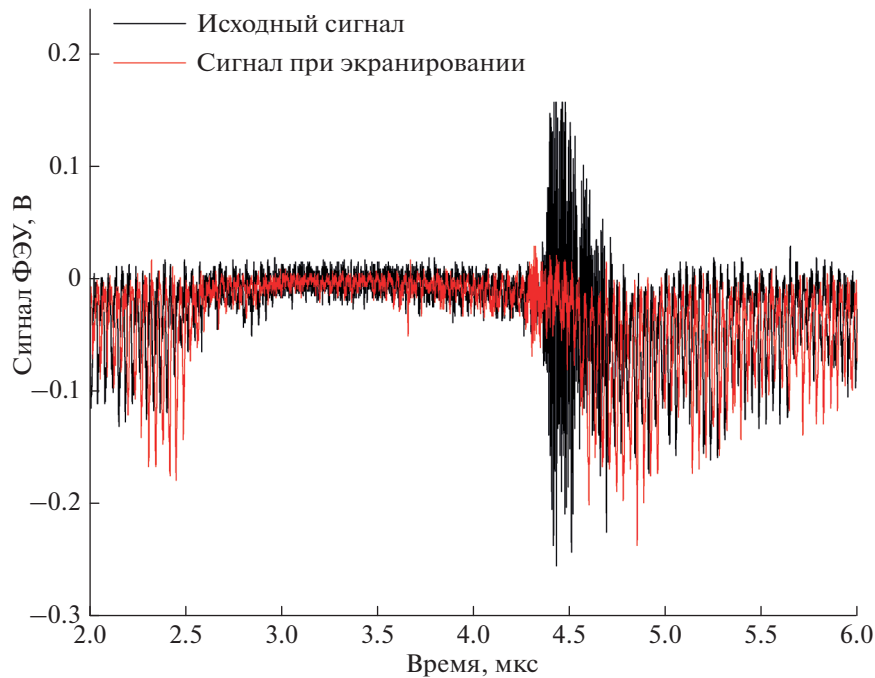


Рис. 4. Типичный сигнал ФЭУ с использованием защитного экрана.

миссии тока пучка. В интервале с 4.25 по 4.75 мкс хорошо наблюдается уменьшение уровня помехи. При измерении тормозных потерь ионов в плазме производилась запись следующих сигналов: ФЭУ, тока разряда плазменной мишени, измеряемого с помощью пояса Роговского, опорной частоты генератора ускорителя (см. рис. 1). В ходе обработки экспериментальных данных определялась временная задержка ΔT между опорным ВЧ сигналом и сигналом с ФЭУ, возникающая из-за замедления

ионов при взаимодействии с плазмой, для чего использовалась Фурье-фильтрация исходных сигналов (рис. 5).

Далее, из значений временной задержки вычислялись значения потерь энергии ионов ΔE по формуле:

$$\Delta E = E_0 \left[1 - \left(1 + \frac{c\Delta T}{L} \sqrt{\frac{2E_0}{m_u A}} \right)^{-2} \right] \text{ МэВ}, \quad (1)$$

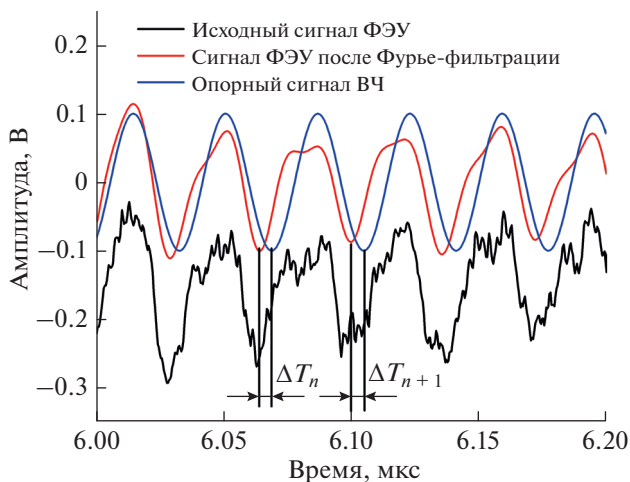


Рис. 5. Пример обработки сигнала ФЭУ и опорного ВЧ сигнала, включающей Фурье-фильтрацию исходных данных.

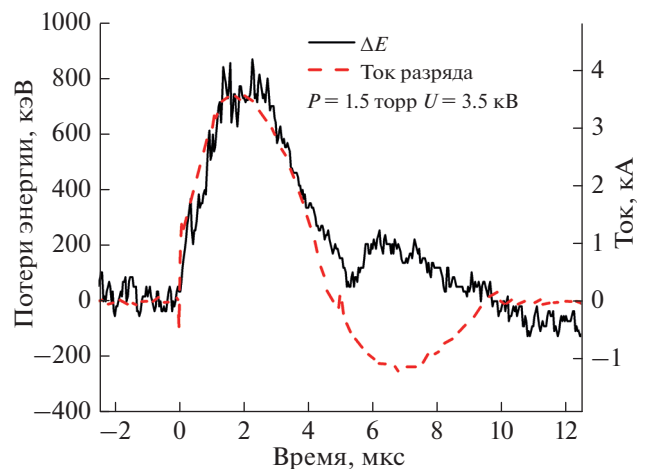


Рис. 6. Временная зависимость потерь энергии ионов Fe^{+2} в плазме и тока разряда.

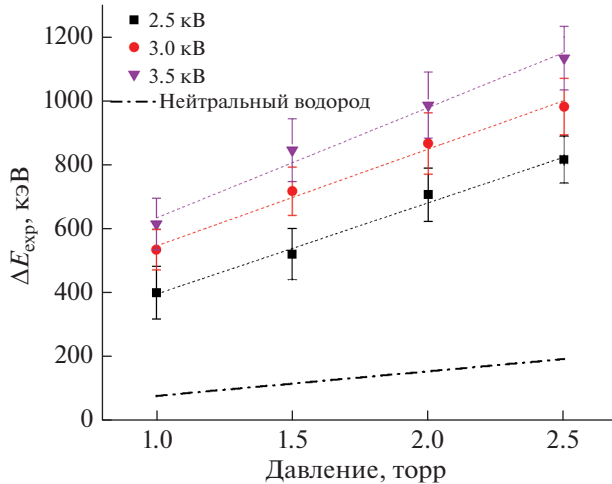


Рис. 7. Зависимость максимального экспериментально измеренного значения потерь энергии ионов в плазме $\Delta E_{\text{эксп}}$ от начального давления водорода при различных напряжениях и расчетные значения потерь энергии в нейтральном водороде.

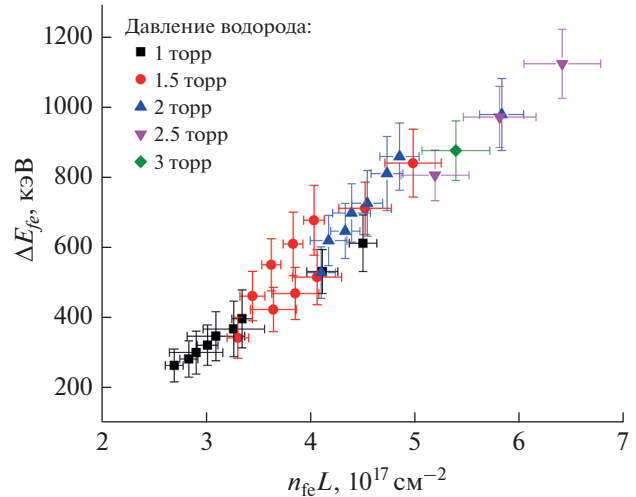


Рис. 8. Сводный график полученных экспериментальных данных для потерь энергии ионов Fe^{+2} на свободных электронах плазмы в зависимости от их линейной плотности.

где L — длина время-пролетной базы в метрах, ΔT — временная задержка в секундах, E_0 — начальная энергия ионов [МэВ], m_u — масса нуклона [МэВ], A — масса иона [а.е.м.], c — скорость света [м/с]. Измерения энергетических потерь ионов Fe^{+2} при прохождении плазмы были проведены при напряжении на накопителях в диапазоне от 1.5 до 5 кВ и начальном давлении водорода от 1 до 4 торр. Измерения проводились с временным разрешением 400 пс. Пример зависимости потерь энергии ионов ΔE от времени представлен на рис. 6.

Экспериментально полученные максимальные значения потерь энергии ионов в плазме ΔE составили от 0.4 до 1.13 МэВ в зависимости от начального давления водорода (рис. 7).

Приведенные на рис. 7 расчетные потери энергии ионов в нейтральном водороде были получены с помощью программы SRIM-2013 [19] и составили от 0.08 до 0.19 МэВ.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Для адекватного сопоставления полученных экспериментальных результатов с существующими теориями торможения ионов в ионизированной среде необходимо выделить вклад свободных электронов в полную тормозную способность плазмы. В общем случае полную тормозную способность вещества можно записать в виде суммы четырех слагаемых:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \equiv S = S_{\text{fe}} + S_{\text{be}} + S_{\text{fi}} + S_{\text{nu}}, \quad (2)$$

представляющих соответственно вклады свободных электронов (fe), связанных электронов (be), свободных ионов (fi) и ядер (nu). Игнорируя незначительные вклады свободных ионов и ядер и учитывая, что в эксперименте измеряется относительное изменение тормозных потерь по сравнению с величиной потерь на молекулярном водороде, можно записать следующее выражение для тормозной способности, измеряемой в эксперименте S_{exp} :

$$S_{\text{exp}} = y S_{\text{fe}} + (1 - y) S_{\text{H}} - S_{\text{H}_2}, \quad (3)$$

где S_{H} и S_{H_2} — тормозная способность атомарного и молекулярного водорода соответственно, y — степень ионизации плазмы. Отсюда выражение для удельной тормозной способности свободных электронов S_{fe} принимает следующий вид:

$$S_{\text{fe}} \equiv -\frac{dE_{\text{fe}}}{\rho_{\text{fe}} dx} = S_{\text{exp}} + S_{\text{H}_2} - (1 - y) S_{\text{H}}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{fe}} = y \rho_{\text{H}}$ — плотность ионизованной части газа.

Для каждого режима разряда плазменной мишени потери энергии $\Delta E_{\text{эксп}}$ были сопоставлены с ранее полученными значениями линейной плотности свободных электронов n_{fe} и степени ионизации плазмы y . По приведенным выражениям вычислены максимальные величины потерь энергии на свободных электронах $\Delta E_{\text{fe}} = S_{\text{fe}} \rho_{\text{fe}}$. На рис. 8 представлена полученная зависимость потерь энергии на свободных электронах плазмы от величины их линейной плотности.

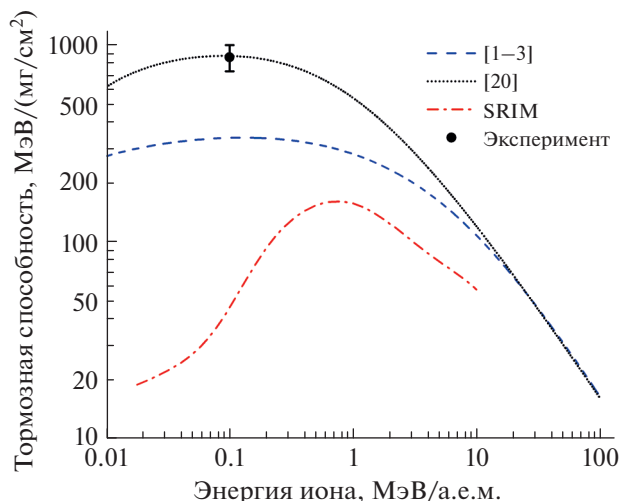


Рис. 9. Расчетные тормозные способности плазмы и нейтрального водорода для ионов Fe^{+2} различных энергий и экспериментально полученное значение.

После усреднения по всем экспериментальным точкам получено среднее значение тормозной способности свободных электронов для ионов железа Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м.:

$$S_{\text{Fe}} = (860 \pm 130) \text{ МэВ/}(\text{мг/см}^2).$$

На рис. 9 измеренное нами значение S_{Fe} представлено в сопоставлении с тремя теоретическими кривыми для зависимости тормозной способности S от энергии ионов железа. Кривая [20] рассчитана по формулам работы [20] для тормозной способности S_{Fe} на свободных электронах плазмы. Кривая [1–3] по формуле Бете с эффективным зарядом согласно формуле Бетца [21]. Кривая SRIM описывает полную тормозную способность нейтрального холодного газа водорода, рассчитанную по программе SRIM. Подробное обсуждение сравнения с теоретическими моделями будет дано в отдельной публикации.

Таким образом, получено, что тормозная способность ионизованного водорода более чем в 15 раз превосходит тормозную способность холодного газа для ионов Fe^{+2} с энергией 100 кэВ/а.е.м.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00967-А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Bohr N. // Philos. Mag. 1913. V. 25. P. 10.
2. Bethe H.A. // Ann. Phys. 1930. V. 5. P. 325.
3. Bloch F. // Ann. Phys. 1933. V. 16. P. 285.
4. Deutsch C., Maynard G. et al. // Open Plasma Phys. J. 2010. V. 3. P. 88.
5. Hoffmann D.H.H., Weyrich K., Wahl H. et al. // Phys. Rev. A. 1990. V. 42. P. 2313.
6. Rosmej O.N., Blazevic A., Korostiy S. et al. // Phys. Rev. A. 2005. V. 72. P. 052901.
7. Gardes D., Chabot M., Nectoux M., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2001. V. 464. P. 253.
8. Gardès D., Chabot M., Nectoux M. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1998. V. 415. P. 698.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)00451-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00451-3)
9. Golubev A., Turtikov V., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2001. V. 464. P. 247.
10. Belyaev G., Basko M., Golubev A. et al. // Phys. Rev. E. 1996. V. 53. P. 2701.
11. Jacoby J., Hoffmann D.H.H., Laux W. et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 1550.
12. Sakumi A., Shibata K., Sato R. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2001. V. 464. P. 231.
13. Cheng R et al. // Laser Part. Beams. 2018. V. 36. P. 98.
<https://doi.org/10.1017/S0263034618000010>
14. Kulevoy T.V. et al. // Proc. Intl. Topical Meeting on Nuclear Research Application and Utilization of Accelerators. 2009. AP/P5-07. P. 1.
15. Gavrilin R.O., Khurchiev A.O., Kolesnikov D.S. et al. // GSI Report 2019–2. 2019. P. 38.
<https://doi.org/10.15120/GSI-2019-01053>
16. Kuznetsov A., Byalkovskii A., Gavrilin R. et al. // Plasma Phys. Rep. 2013. V. 39. P. 248.
17. Khurchiev A.O., Gavrilin R.O. et al. // GSI Report 2019–2. 2019. P. 7.
<https://doi.org/10.15120/GSI-2019-01053>
18. Khabibullina E.R., Gavrilin R.O., Fedin P.A. et al. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1532.
<https://doi.org/10.1134/S1063778819110061>
19. <http://www.srim.org>.
20. Basko M.M. // Sov. J. Plasma Phys. 1984. V. 10. P. 689.
21. Betz H.-D. // Rev. Mod. Phys. 1972. V. 44. P. 465.

Stopping Power Measurement for 100 keV/u Fe Ions in Hydrogen Plasma

R. O. Gavrilin^{1, *}, A. O. Khurchiev¹, A. V. Kantsyrev¹, M. M. Basko², S. A. Visotskiy¹,
D. S. Kolesnikov¹, I. V. Roudskoy¹, A. A. Golubev¹, V. A. Volkov¹, A. A. Drozdovsky¹,
R. P. Kuibeda¹, P. A. Fedin¹, S. M. Savin¹, and A. P. Kyznetsov¹

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125047 Russia

*e-mail: roman_gavrilin@mail.ru

Received December 28, 2020; revised August 19, 2021; accepted August 20, 2021

The interaction of a heavy ion beam with matter is a fundamental problem of the plasma physic and high-energy density in matter physics. The paper presents the results of experimental studies of energy losses of Fe^{+2} ions with an energy of 100 keV/u in a hydrogen plasma. The experimental data of plasma free electron stopping power are compared with theoretical models.

Keywords: stopping power, ion beam, plasma, laser interferometry, electron density, degree of ionization, time-of-flight method, ion energy losses