

метричным питанием - 35.3 дБ, для шайбы - 32.5 дБ, для цилиндрического катода - 33 дБ. При переходе от закрытого анодного блока к полукрытому (для катодов диаметром 50 мм) отношение мощностей на основной частоте и побочных колебаний для цилиндрического катода уменьшилось на 6 дБ, а для шайбового катода увеличилось на 2 дБ.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать вывод о работоспособности релятивистского магнетрона в дециметровом диапазоне длин волн и необходимости тщательного исследования работы шайбового катода с целью повышения уровня генерируемой мощности и КПД магнетрона.

В заключение авторы выражают благодарность И.И. Винтизенко за помощь в подготовке эксперимента.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Диденко А.Н., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П., Штейн Ю.Г., Юшков Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. № 1. С. 10-14.
- [2] Benford I., Sze H., Bromley D. Hartenack B. Progress on the relativistic magnetron. Proc. of 6th Int. Conf. on High-Power Particle Beams, Kobe, Japan. 1986. S. 2. P. 577-580.
- [3] Treado, Doggett W.O., Thomas G.E., Smith R.S., Jackson-Ford J., Jenkins D.J. // IEEE Trans. on Plasma, Science. 1988. V. 16. N 2. P. 237-248.

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом институте им. С.М. Кирова

Поступило в Редакцию
6 апреля 1989 г.
В окончательной редакции
28 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 22
01; 05.1; 10

26 ноября 1989 г.

ИМПУЛЬСНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРОТОННЫМ ПУЧКОМ

С.Л. Лешкевич, В.А. Скворцов,
В.Е. Фортон

Мощные ионные пучки (МИП) в настоящее время находят разнообразные применения во многих областях науки, техники и технологии. Весьма перспективным является использование МИП для осу-

существования инерционного управляемого термоядерного синтеза и изучения экстремальных состояний вещества [1]. Высокая стоимость и сложность экспериментов, а также трудности измерения быстроменяющихся физических параметров в зоне взаимодействия пучка с мишенью делают необходимым проведение предварительного математического моделирования для оценки ожидаемых в опытах физических параметров и самой целесообразности того или иного физического эксперимента.

В настоящей работе численно исследуются процессы, происходящие в плоской алюминиевой мишени толщиной 0,2 см при ее облучении нормально падающим моноэнергетическим протонным пучком с параметрами, характерными для термоядерных проектов [1]: кинетическая энергия частиц $E = 15$ МэВ, максимальный ток пучка $I = 10$ кА, диаметр пучка $d = 0.2$ см, длительность импульса синусоидальной формы (по основанию) $t = 100$ нс, общая энергия пучка 15 кДж.

Для описания нестационарного движения сплошной среды, возникающего в результате нагрева материала МИП, использовалась двумерная гидродинамическая модель, дополненная уравнением теплопроводности. В качестве исходных уравнений динамики сплошной среды были взяты дивергентные уравнения Эйлера, выражающие законы сохранения массы, импульса и энергии на фиксированной в пространстве координатной сетке. Уравнения движения сплошной среды интегрировались методом крупных частиц первого порядка точности по времени и пространству [2]. Уравнение теплопроводности решалось методом локальных итераций [3].

В качестве уравнения состояния, связывающего плотность, внутреннюю энергию и давление, использовалось широкодиапазонное полуэмпирическое уравнение состояния [4]. Оно описывает процессы высокотемпературного плавления, испарения, ионизации, учитывает экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию в мегабарном диапазоне давлений, результаты опытов по изэнтропической разгрузке ударно-сжатых образцов в области плотной плазмы, а также имеющуюся информацию о теплофизических свойствах металлов при пониженных давлениях и температурах. При построении этого уравнения состояния учитывались данные квантово-механических расчетов методом зонной теории, теоретических моделей Томаса-Ферми и Дебая-Хюккеля при экстремальных концентрациях внутренней энергии, что обеспечивает правильные асимптотические свойства этого уравнения состояния.

Параметры рассматриваемого пучка таковы, что при расчете объемного энерговыделения пучка можно пренебречь вкладом его собственного магнитного поля, нагревом плазмы обратным плазменным током, а также коллективными эффектами взаимодействия со средой, существенными при больших плотностях тока [5]. Поэтому доминирующим механизмом энерговыделения является энерговыделение отдельных частиц пучка, обусловленное индивидуальным кулоновским взаимодействием ионов пучка с электронами и ионами среды. В этом случае удельная мощность энерговыделения определяется простран-

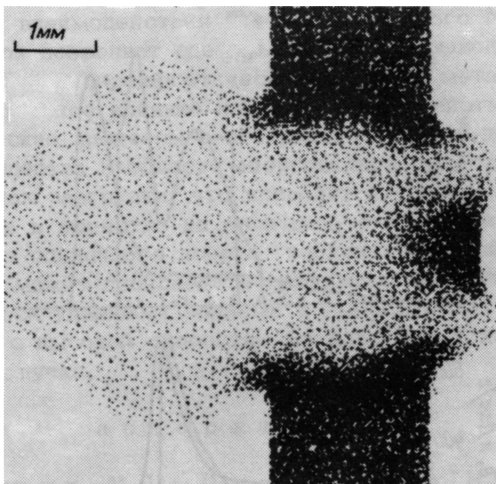


Рис. 1. Стилизованный компьютерный график распределения плотности вещества в расчетной области на момент окончания действия пучка ($t=100$ нс).

венной и временной формой импульса тока и тормозной способностью вещества в различных фазовых состояниях, расчет которой проводился по полумпирическому методу [6].

В результате нагрева металлической пластины ионным пучком часть материала преграды плавится и испаряется. Ионизованные пары с характерной температурой 10 эВ и плотностью 10^{-2} – 10^{-4} г/см разлетаются в виде плазменного факела навстречу пучку со скоростью в несколько десятков километров в секунду. В области энерговыклада формируется ударная волна, которая, распространяясь в осевом и радиальном направлениях от зоны энерговыклада, сжимает и необратимо нагревает первоначально холодный материал пластины. Вглубь зоны энерговыделения от ее границ к оси распространяется боковая волна разрежения. По разреженному виду бокового расширения материалу ионный пучок проникает глубже длины его первоначального поглощения. В первую очередь это более глубокое проникание МИП происходит на периферии зоны поглощения при $r=0.5d$, поскольку именно эта область прежде всего подвергается действию боковых волн разрежения. К моменту окончания действия пучка фактически происходит сквозное пробивание пластины и образование трубчатого канала с диаметром, примерно равным диаметру пучка (рис. 1). Таким образом, у тыльной стороны пластины формируется полая трубка сильно нагретого вещества, благодаря чему ударные волны в этой области распространяются как по направлению от оси симметрии, так и, схлопываясь, к оси. Эти интенсивные радиальные ударные волны приводят к сжатию материала вблизи оси, в то время как внешние части мишени

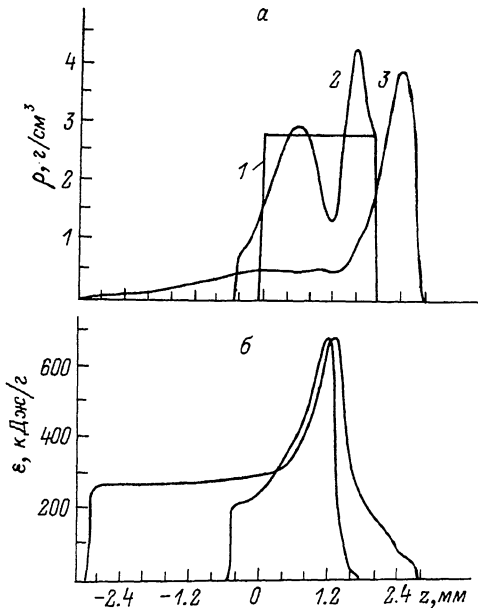


Рис. 2. Распределение плотности (а) и удельной внутренней энергии (б) в мишени на оси пучка в различные моменты времени: 1 - $t=0$, 2 - $t=50$ нс, 3 - $t=100$ нс.

сжаты в умеренной степени. Образовавшаяся плазменная пробка массой порядка $2 \cdot 10^{-4}$ г выталкивается высоким давлением в области энерговклада, а ее скорость по направлению действия пучка достигает 20 км/с. Ионный пучок, пройдя через пластину, на выходе из нее из однородного цилиндрического превращается в трубчатый. Боковые ударные волны, распространяясь в радиальном направлении по пластине, также разрушают ее, причем радиус образующегося отверстия превышает первоначальный радиус пучка.

Полученные в расчетах значения плотности и удельной внутренней энергии в пластине на оси пучка для различных моментов времени представлены соответственно на рис. 2, а и б. К моменту сквозного разрушения мишени и образования пробки вещество у тыльной стороны мишени сжимается сходящимися к оси цилиндрическими ударными волнами до наибольшей степени сжатия $\rho/\rho_0 = 1.8$ (рис. 2, а). Характер распределения внутренней энергии по глубине мишени в начальные моменты времени соответствует виду функции энерговыведения протонов и имеет характерный максимум на глубине, соответствующей длине пробега частиц (рис. 2, б). Распределение энергии в короне практически однородно, благодаря быстрому выравниванию температуры теплопроводностью. Максимальное давление в мишени достигает 6.5 Мбар, что близко к оценке по скейлинговой формуле [5].

Анализ результатов проведенного математического моделирования динамики взаимодействия короткоимпульсного МИП с алюминиевой преградой позволяет сделать следующие выводы. При взаимодействии МИП высокоэнергетических частиц с металлической мишенью существенное влияние на характер воздействия оказывают газодинамические процессы в преграде: за время действия пучка плотность вещества в области энерговыклада существенно падает в боковых волнах разгрузки, что приводит к увеличению глубины проникания пучка в вещество до величины, существенно превышающей длину пробега одиночного иона в конденсированной среде. В глубине мишени может происходить кумулятивное сжатие вещества сходящимися к оси ударными волнами и выброс этого сгустка плотного вещества с высокой скоростью из пластины в направлении распространения пучка.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Г а б о в и ч М.Д., П л е ш и в ц е в Н.В., С е м а ш к о Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. С.: 1986. 248 с.
- [2] Б е л о ц е р к о в с к и й О.М., Д а в ы д о в Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: 1982. 392 с.
- [3] Ж у к о в В.Т. Численные эксперименты по решению уравнения теплопроводности методом локальных итераций. М., Препринт ИПМ АН СССР, 1983. № 97. 22 с.
- [4] Б у ш м а н А.В., К а н е л ь Г.И., Н и А.Л., Ф о р т о в В.Е. Теплофизика и динамика конденсированных сред при интенсивных импульсных воздействиях, Черноголовка, 1988. 200 с.
- [5] Л е ш к е в и ч С.Л., С к в о р ц о в В.А., Ф о р т о в В.Е. Динамика разрушения металлической пластины короткоимпульсным ионным пучком. М., Препринт ИВТАН, 1988. № 6-244. 18 с.
- [6] Б а с к о М.М. // Физика плазмы. 1984. Т. 8. № 3. С. 519-529.

Институт высоких температур
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
19 апреля 1989 г.