

СВЕРХРЕШЕТКА МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ВЕЩЕСТВЕ ЛАЗЕРНОЙ МИШЕНИ И УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАЗМЫ ПРИ СФЕРИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Н.Г. Борисенко, В.М. Дороготовцев, А.И. Исаков, Ю.А. Меркульев,
Ю.А. Михайлов, А.И. Нижитенко, С.И. Федотов

Представлены результаты экспериментальных исследований возможности увеличения устойчивости сферического сжатия плазмы за счет создания сверхрешетки микронеоднородностей внутри стенки сферической оболочечной мишени.

В теоретических исследованиях обычно анализируются процессы возникновения и развития неустойчивостей в однородной по заряду и плотности лазерной плазме и механизмы, стабилизирующие ее движение. К последним относятся ослабление неустойчивостей за счет теплового выравнивания, конвективного переноса и возникновения пондеромоторных сил при генерации магнитных полей.

В [1-3] предлагается использовать микропористые среды и вещества с металлическими кластерами (коллоидными частицами [4]) в качестве мишеней, расширяющих исследовательские (в основном, диагностические) методы. Технология материалов позволяет создавать слои вещества в виде микропористой структуры [2,3] или слои, содержащие сверхрешетку включений (примесей) [4,5]. Специальная технология отжига позволяет регулировать диаметр пор или включений d от 10 до 1000 Å и период сверхрешетки a от 50 до 10000 Å. Схематически такая мишень показана на рис. 1. Если предположить, что вся сверхрешетка "поршня", имевшая размер неоднородностей d и период a , перешла в плазму, то в простых предположениях близости среднего заряда ионов Z_i в обеих частях плазмы при температурах $T_i = 0,1 \div 0,5$ кэВ можно оценить характерное время диффузионного выравнивания состава плазмы $\tau = a^2/16D$ [6], где D — коэффициент диффузии, приближенно определяемый из соотношения $D = \lambda_i v_i / 3 = v_i^2 / 3\nu_{ii}$; здесь λ_i и v_i — длина пробега и тепловая скорость ионов; $\nu_{ii} = (\pi/2)^{3/2} Z^4 e^4 n_i \ln \Lambda_i / M_i^{1/2} (kT)^{3/2}$ — частота ион-ионных столкновений [6]; M_i — масса иона примеси; n_i — концентрация ионов основы; $\ln \Lambda_i$ — кулоновский логарифм, который можно оценить как $\ln \Lambda_i = \ln [3kT_i r_{di} / Z_{eff}^2 e^2]$; r_{di} — радиус Дебая; для неизотермической плазмы $r_{di} = (kT_i / 4\pi e^2 n_i)^{1/2}$. Для микровключений с $d = 200$ Å, $a = 1000$ Å, $Z_i = 10$ и $n_i = 3 \cdot 10^{22}$ см⁻³ характерное время жизни микронеоднородностей в плазме "поршня" порядка 10^{-7} с, т.е. превосходит время сжатия лазерной мишени, равное $10^{-9} - 10^{-8}$ с. Предположение об однородности теплового поля и поля давлений в зоне микровключения не строгое, но учет неоднородности существенно не меняет вывод — решетка неоднородностей в плазме существует в течение времени, соизмеримого со временем нагрева и сжатия лазерной мишени.

Длительное существование такой сверхрешетки в плазме может дать ряд положительных эффектов: 1) обеспечить высокочастотную стабилизацию наиболее опасных гидродинамических неустойчивостей "поршня" за счет мелкомасштабной разномассовости; 2) порождать упругие взаимодействия между частями плазмы из-за появления сильных магнитных полей на микронеоднородностях; 3) создавать вязкие силы в плазме за счет обмена импульсом между различными частицами плазмы при выравнивании неоднородностей; 4) обеспечивать симметризацию сжатия плазмы из-за появления нелокальных механизмов переноса, т.е. взаимодействие объемных элементов плазмы, таким образом создавая микротурбулентность плазмы; 5) увеличивать поглощение за счет резонансного поглощения света лазера в "короне" из-за переноса микронеоднородностей в эту область.

Есть отрицательные эффекты, которые могут проявиться при сжатии и нагреве таких мишеней со сверхрешеткой микронеоднородностей, например, появление за счет крупных микровключений гидродинамических неустойчивостей плазмы, которые без включений не возникли бы, эффективное перемещение на границе с термоядерным топливом и пр. Нестационарные процессы нагрева и сжатия такой плазменной решетки, включающие указанные выше процессы, пока не поддаются последовательному расчету,

поэтому были предприняты экспериментальные исследования на установке "Дельфин" с целью определения значений параметров d и a , при которых происходит ухудшение параметров плазмы.

Для этой цели проведены разработки технологии получения оболочечных мишеней, в которых внутри стенки равномерно распределены микронеоднородности (рис. 1). Условие, которое ставилось из качественных соображений, заключается в том, чтобы среднее расстояние между неоднородностями было много меньше толщины стенки оболочки ($a \ll \Delta R$), а разномассовость элементов стенки оболочки с объемами $(\Delta R)^3$ не превышала одного процента. Из всех разновидностей технологии изготовления полых микросфер, содержащих неоднородности, указанным выше условиям удовлетворила лишь одна. По методам, описанным в ранних работах, изготавливались оболочки из стекла, содержащие окисел металла, восстанавливающийся в атмосфере водорода при повышенной температуре [5]. Использовались кобальт, серебро, медь, свинец и др. Проще всего условия однородности выделения металлической фазы достигались при использовании серебра, к тому же его заряд существенно отличается от среднего заряда стекла. Различные температурные режимы восстановления приводят к выделению серебра в виде капель размерами от 20 до 200 Å с расстояниями между ними от 100 до 600 Å [5] при концентрации окисла серебра в стекле до 0,5 мольного процента. Были приготовлены стеклянные оболочки без серебра и с тремя концентрациями серебра — 0,1%, 0,25% и 0,5%. При известном количестве серебра средний размер металлических включений находился измерением коэффициента поглощения света с длиной волны 0,44 мкм. В нескольких случаях измерения были сравнены с прямым наблюдением серебряных частиц на сканирующем электронном микроскопе (после разрушения оболочки) и показали согласие с точностью до 30%.

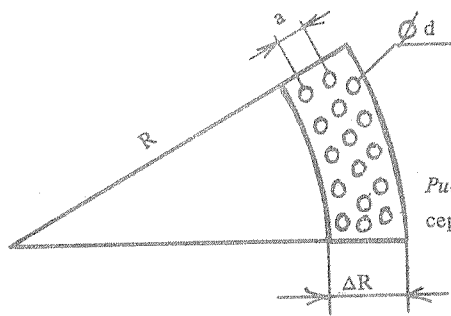


Рис. 1. Схема оболочечных термоядерных мишеней из стекла с кластерами серебра: $R = 250$ мкм, $\Delta R = 1,5 - 3,0$ мкм.

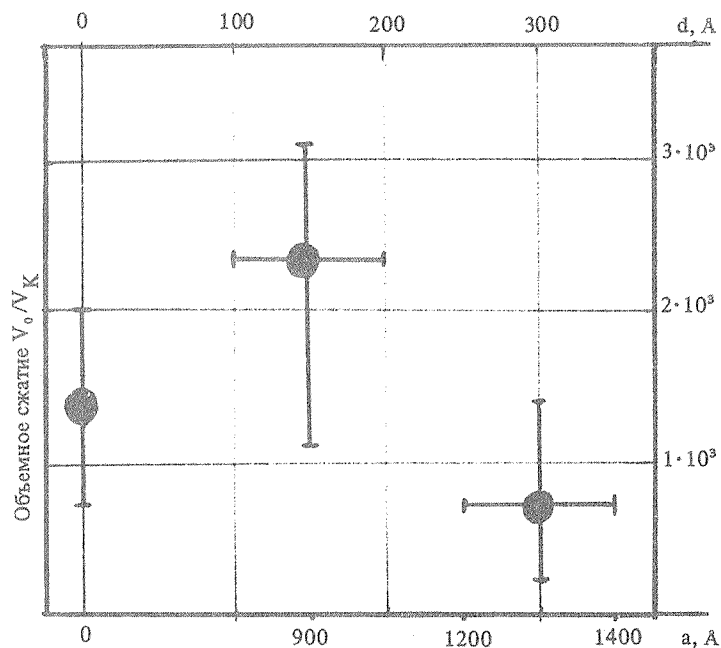


Рис. 2. Зависимость степени объемного сжатия плазмы от диаметра d кластеров серебра. Нижняя шкала дает среднее расстояние a между кластерами.

На установке "Дельфин" в условиях сферического облучения /7/ (энергия 0,8 – 2 кДж, длительность импульса 2 нс, расходимость $1,2 \cdot 10^{-4}$ рад) зафиксированы сжатия на всем наборе оболочек, причем статистическая обработка не позволяет достоверно утверждать о преимуществе какой-либо серии оболочек (рис. 2). Среднеквадратичная величина объемного сжатия 1500, однако имеется некоторая тенденция к увеличению сжатия на мишенях с микровключениями серебра диаметром $150 \pm 50 \text{ \AA}$ и средним расстоянием между включениями около 900 \AA , а для мишеней с включениями диаметром 250 \AA ($a = 1300 \text{ \AA}$) достигаемое сжатие уменьшается.

Таким образом, предположение о влиянии микронеоднородной плазмы на устойчивость сжатия получило экспериментальное подтверждение. Разработаны методы изготовления стеклянных и полимерных оболочек, содержащих сверхрешетку микронеоднородностей. Обнаружено, что в мишенях диаметром 500 мкм с толщиной стенки 1,5 – 3,0 мкм микровключения серебра диаметром до 200 \AA со средним расстоянием между ними до 1000 \AA не ухудшают условий сжатия, в то время как наличие микровключений диаметром 300 – 400 \AA приводит к уменьшению степени сжатия.

Авторы благодарны Г.В. Склизкову за полезные обсуждения, сотрудникам лаборатории лазерной плазмы и нейтронно-физической лаборатории за помощь в эксперименте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д ю д е р ш т а д т Дж., М о з е с Г. Инерциальный термоядерный синтез. М., Энергоатомиздат, 1984, с. 238.
2. H a l p e r n G. H., K i m H. J. Appl. Phys., 49, № 4, 3784 (1978).
3. C o n d e v i l l e A. et al. J. Vac. Sci. Technol., 18, № 3, 1227 (1981).
4. B i e g K. W. J. Vac. Sci. Technol., 18, № 3, 1231 (1981).
5. А п п е н Г. Химия стекла. М., Химия, 1975.
6. Г о л а н т В. Е. и др. Основы физики плазмы. М., Атомиздат, 1977.
7. Б а с о в Н. Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 37, вып. 2, 109 (1983).
8. E v a n s R. G. Laser and Particle Beams, 4, pt. 3–4, 325 (1986).

Поступила в редакцию 27 мая 1987 г.