

## ТЕХНОЛОГИЯ МИКРО- И МАКРООБОЛОЧЕК И ПРОБЛЕМА РЕАКТОРНЫХ МИШЕНЕЙ

А.А. Акунец, В.М. Дороготовцев, Ю.А. Меркульев

*На основе анализа физических процессов, происходящих при изготовлении сферических оболочек для лазерных мишеней, предлагаются новые варианты технологии, позволяющие получать мишени вплоть до реакторного размера (диаметром до 10 мм).*

В работах /1, 2/ показано, что существующий в настоящее время метод изготовления сферических оболочек для лазерных мишеней не позволяет получать симметричные образцы диаметром более 2 мм. В последние годы на установке "Дельфин" произошел переход от сферических оболочек диаметром 0,3 мм к 1,0 мм. Это означает увеличение массы изготавливаемых образцов в  $30 \div 100$  раз. В ряде лабораторий эксперименты ведутся с мишенями диаметром 2,0 мм /3,4/. Поскольку в ближайшем будущем ожидается переход к мишеням диаметром до 5,0 мм, а следующий этап потребует для экспериментов по вспышке мишеней диаметром до 10 мм, начали развиваться новые, подчас чрезвычайно дорогостоящие, методы изготовления лазерных мишеней. Так, разработаны специальные станки, дающие точность  $100 \text{ \AA}$ , для изготовления полусфер /3/, а также полусферических "куколок" для изготовления полусфер методом многослойного напыления. Еще более изощренная техника /4/ дает возможность получать сферу на капилляре. Затем на эту сферу напыляют металлы, а потом осаждают слой полимера. Окончив формирование многослойной оболочки, сферу-основу вымывают через капилляр.

Поскольку основной причиной, приводящей к появлению асимметрии полых микросфер — лазерных мишеней, является гравитация, а время тепловой обработки образца при свободном падении ограничено (для большинства установок  $0,2 \div 0,3$  с), появились предложения изготавливать лазерные мишени на космических станциях /5, 6/. По этой программе проводятся подготовительные эксперименты в условиях, имитирующих невесомость /7/.

В данной работе предлагаются технологические принципы, позволяющие изготавливать лазерные мишени диаметром от 4,0 до 10 мм. По нынешней технологии частичка исходного вещества (капля) с добавками газообразователя в условиях, близких к свободному падению, пролетает в атмосфере разреженного теплообменного газа через горячую зону. Основным, наиболее длинным по времени, является процесс ее нагрева в условиях слабого вынужденного конвективного теплообмена. Характерное время нагрева сферы приблизительно записывается в виде  $\tau_1 = C\rho R_s^2/3\lambda_g$ , где  $R_s$  — радиус сферы;  $\lambda_g$  — теплопроводность газа;  $C$  и  $\rho$  — теплоемкость и плотность вещества сферы.

В то же время для сферической оболочки, формируемой из капли радиуса  $R_s$ , с отношением радиуса оболочки к толщине стенки  $A$  время нагрева  $\tau_2 = C\rho R_s^2/A\lambda_g$ . Из геометрических соображений  $R_0/R_s = (A/3)^{1/3}$ , где  $R_0$  — радиус оболочки. Из приведенных выше формул получаем  $\tau_1/\tau_2 = (A/3)^{1/3}$ . Для характерных значений аспектного отношения лазерных мишеней  $A = 200$  имеем  $\tau_1/\tau_2 \cong 4$ . Отсюда следует, что если в качестве исходной частицы используется не сплошная капля, а оболочка с  $A = 200$ , можно увеличить предельный диаметр изготовленной мишени до  $4 \div 5$  мм.

В последнее время в лазерных экспериментах стали применяться мишени с аспектным отношением  $400 \div 600$ . Однако дальнейшего увеличения аспектного отношения для экспериментов по ЛТС не требуется и с технологической точки зрения трудно осуществимо. Столь тонкие оболочки теряют устойчивость и разрушаются внешним давлением в одну атмосферу. Возможна последовательность операций изготовления лазерных мишеней в вакууме или при давлении газа от 100 до 1000 Па, в составе которой изготовление особотонкостенных оболочек с аспектным отношением от 1000 до 4000, и нанесение на поверхность оболочек металла разложением металлоорганики или карбонильных соединений с последующим покрытием слоем полимера. Покрытия могут наноситься при левитации в потоке гелия отдельной частицы /3/ или на небольшое количество образцов на вибрирующем столике в вакуумной установке, в которой производится оболочка-основа /3, 7/. Таким образом, начиная тепловую обработку оболочки диаметром 4,0 мм с

$A = 200$ , т.е. толщиной 10 мкм, можно закончить обработку при диаметре 10,0 мм с  $A = 3100$ , т.е. с толщиной стенки 1,6 мкм.

Экспериментальная проверка подтвердила эти оценки. Были получены оболочки диаметром 4,0 мм с  $A = 2500$ .

При последующем нанесении металла желательно обеспечить однородность покрытия и толщину, достаточную для сохранения устойчивости при атмосферном давлении. Для оболочки диаметром 10 мм из стекла с покрытием алюминием требуется толщина покрытия около 5 мкм, железа около 4 мкм, а покрытие из полимера должно иметь толщину около 40 мкм.

В большинстве опубликованных проектов лазерных термоядерных реакторов диаметр мишени выбирался от 5,0 до 20,0 мм, при этом требовалось, чтобы мишень без трития стоила не более 10 копеек или центов США. Выбор материала мишени в основном диктовался условиями сжатия и нагрева плазмы. В последние годы появились работы, в которых доказывается необходимость ограничить выбор веществ для мишени теми, которые могут поднять энергетический выход в плазме мишени за счет цепных реакций синтеза /8/, деления /9/. Обсуждаются также конструкции мишеней, в которых тритий применяется только в центре для инициирования горения, в периферийных областях мишени тритий нарабатывается для применения в последующих вспышках /10/.

Обсуждаемый вариант метода изготовления мишеней позволяет иметь в виде оболочки-основы небольшое количество стекла, а в виде покрытий иметь основную массу из урана, тория и лития, дейтерированных после нанесения дейтерированного полимера в виде поверхностного слоя. Покрытия могут быть выполнены в виде малоплотных слоев из тех же веществ /11/. Применяющиеся с недавнего времени двухоболочечные каскадные мишени требуют оболочку-основу с диаметром в  $3 \div 4$  раза меньше, чем однооболочечные /12/. Лазерные мишени из полусфер, выточенных на станке или мишени, произведенные в космосе, по-видимому будут дорогими и для реакторных применений неприемлемыми. Предложенный вариант метода изготовления заготовок-оболочек наиболее прост и дешев и может найти применение как при изготовлении лазерных термоядерных мишеней для экспериментов, так и в дальнейшем для отработки промышленного способа изготовления реакторных мишеней.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гамалий Е. Г. и др. Труды ФИАН, 94, 29 (1977).
2. Исаков А. И., Меркульев Ю. А., Никитенко А. И. Труды ФИАН, 127, 62 (1980).
3. Helsey W. G. et al. In "Laser Program Annual Report 1982" UCRL-50021-82, USA, 1983.
4. Jzawa Y., Norimatsu T., Yamana ka C. J. Vac. Sci. and Technol., A3, 1252 (1985).
5. Nolen R. L., Downs R. L., Ebner M. A. In: Materials processing in the reduced gravity environment of space, ed. by G. Rindone, Elsevier, New York, 1982, p. 343.
6. Lee M. C., Kendall J. M., Wang T. G. ibid., p. 105.
7. Lee M. C. et al. ibid., p. 95.
8. McNally J. R. Nucl. Fusion, 11, 187 (1971).
9. Seifritz W., Naegele H. Trans. Amer. Nucl. Soc., 21, 18 (1975).
10. Shigco K. et al. J. Phys. Soc. Jap., 51, 3018 (1982).
11. Grigliami F. J. Vac. Sci. and Technol., A3, 1208 (1985).
12. Басов Н. Г. и др. Письма в ЖЭТФ, 37, 503 (1985).

Поступила в редакцию 26 июня 1987 г.  
После переработки 20 сентября 1987 г.