

## Исследование динамики частиц $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ускоренных в поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера

© А.В. Беликов

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики,  
197101 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: meddv@grv.ifmo.ru

(Поступило в Редакцию 27 сентября 2004 г.)

Впервые сообщается о результатах экспериментального исследования влияния плотности лазерной энергии на скорость твердых сапфировых частиц, ускоренных в поле субмиллиметрового импульса YAG:Er лазера. Описана оригинальная система измерения скорости. Показано, что для ускорения частиц сапфира, помещенных в воду (суспензия), требуется энергия практически в два раза меньше, чем для ускорения частиц сапфира, содержащих только воду, абсорбированную поверхностью (порошок). Установлено, что скорость частиц распределена неравномерно в течение времени действия лазерного импульса.

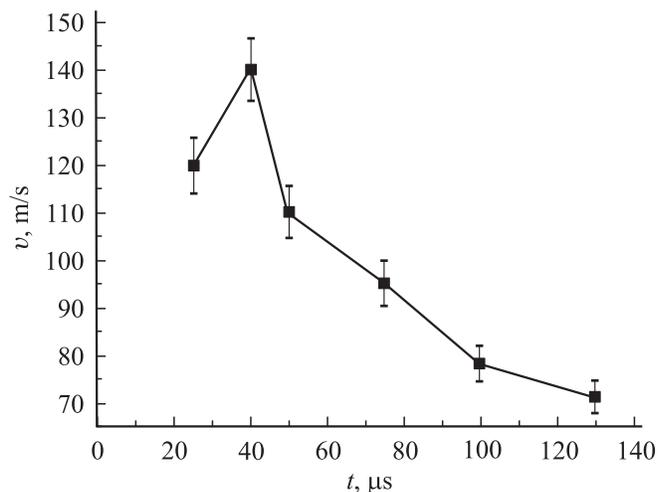
Идея о возможности светового давления восходит к Кеплеру, который в 1619 г. постулировал, что световое давление является той силой, которая определяет положение хвоста кометы всегда в сторону от солнца. Корпускулярная теория света, предложенная Ньютоном, сделала идею светового давления более правдоподобной и стимулировала многочисленные попытки его экспериментального измерения. В XVIII и XIX веках все попытки обнаружить световое давление или силу, которая не могла бы быть приписана конвекции в воздухе, окончились неудачей. В 1873 г. Уильям Крукс полагал, что открыл световое давление в частично эвакуированной камере, хотя в действительности он изобрел радиометр. Существование светового давления, свободного от возмущающих тепловых эффектов, было, наконец, экспериментально доказано в начале нашего века Лебедевым в России и Николсом и Хэллом в США [1]. Световое давление вновь привлекло внимание в свете новых достижений лазерной техники. Еще в 1962 г. в статье [2] было показано, что мощный световой луч способен оказывать сильное действие на заряженные и поляризующиеся частицы, причем сила может менять знак при переходе через резонансную частоту поляризуемости. Были отмечены возможности применения такого воздействия для сдерживания перепада концентрации частиц, транспортировки частиц, создания разрежений или сгущений в средах. В то же время в работе [3] было показано, что с поглощением света в облучаемой частице могут быть связаны три типа сил: нагрев и движение самой среды — конвекционное увлечение, нагрев среды от поглощающей поверхности частицы — радиометрическое давление и давление от испарений самой частицы — светореактивное давление. Все эти эффекты могут во много раз превосходить световое давление и проявляться с большой вероятностью в экспериментах. При этом светореактивное давление может достигать  $10^{12}$  атмосфер. Такое давление можно использовать, в частности, для ускорения макрочастиц [4] до скоростей  $10^6$ – $10^8$  см/с для получения

искусственных микрометеоров, частиц, дающих большие локальные энерговыделения при столкновениях с мишенью или друг с другом. Подобные частицы могут быть использованы для обработки композитных материалов (в том числе биологического происхождения) в тех случаях, когда возможности традиционных или лазерных технологий уже исчерпаны. Так, возможно использование потока  $\text{Al}_2\text{O}_3$  частиц, ускоренных лазерным излучением для увеличения скорости обработки эмали зуба человека [5]. В этом случае вода, окружающая частицы (суспензия) или абсорбированная поверхностью частиц (порошок), очень эффективно поглощая излучение на длине волны  $2.94 \mu\text{m}$ , испаряется, стимулируя тем самым светореактивное движение частицы. В настоящей работе мы впервые экспериментально исследовали влияние плотности лазерной энергии на скорость твердых сапфировых частиц, ускоренных в поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера, определили энергии, достаточные для ускорения сапфировых частиц различного диаметра, и оценили распределение скорости частиц по времени, прошедшему с момента лазерного воздействия.

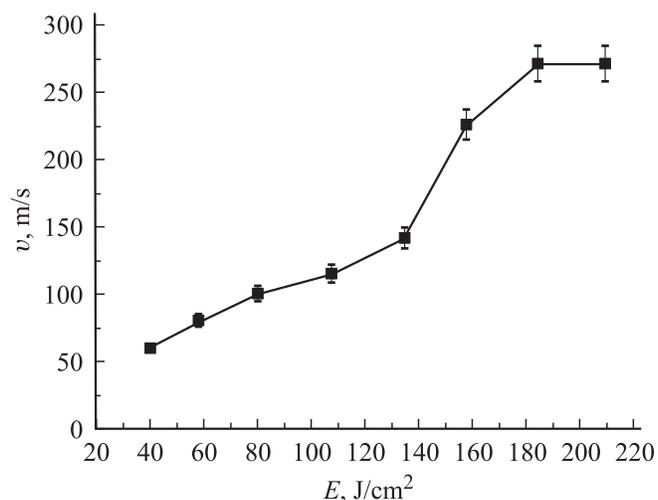
В исследовании использовался макет лазера на кристалле YAG:Er ( $\varnothing 6.3 \times 100$  мм), работающий в режиме свободной генерации на длине волны  $2.94 \mu\text{m}$ . Длительность лазерного импульса по полувысоте составляла величину порядка  $250 \mu\text{s}$ . Излучение, проходя через  $\text{CaF}_2$  линзу, фокусировалось в пятно диаметром  $600 \pm 50 \mu\text{m}$ , что позволяло достигать плотности энергии  $250 \text{ J/cm}^2$ . В качестве твердых частиц использовался сверхчистый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  порошок фирмы Swam-Blast. Паспортная плотность материала частиц составляла величину  $3.97 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Диаметр частиц соответствовал 12, 27, 40 и  $160 \mu\text{m}$ . Мы исследовали порошок и водную суспензию частиц. Водная суспензия готовилась в пропорции: в 300 мг частиц добавлялось 0.2 мл воды. В эксперименте частицы в виде порошка или суспензии помещались в стеклянную кювету, дно которой было изготовлено из сапфира. Толщина слоя твердых частиц была  $200 \pm 50 \mu\text{m}$ . Лазерное излучение фокусировалось

в плоскость контакта между твердыми частицами и дном кюветы. Ускоренные лазерным излучением твердые частицы покидали область взаимодействия и фотографировались высокочувствительной видеокамерой MINTRON с управляемым затвором, сопряженной с ЭВМ и блоком синхронизации. Оптическая ось объектива видеокамеры была перпендикулярна направлению распространения лазерного луча и проходила через область взаимодействия лазерного излучения с частицами. Блок синхронизации вырабатывал стартовый синхроимпульс, инициирующий лазерную генерацию и кадровый синхроимпульс. Мы могли изменять временной сдвиг  $\Delta t_L$  между началом кадрового синхроимпульса ( $t_0$ ) и началом лазерного импульса ( $t_L$ ). Время экспозиции, т.е. время, в течение которого затвор камеры остается открытым, могло быть изменено от  $100 \mu\text{s}$  до  $2 \text{ms}$  и в настоящем эксперименте составляло величину  $500 \mu\text{s}$ . В эксперименте также можно было изменять временной сдвиг  $\Delta t_S$  между началом кадрового синхроимпульса ( $t_0$ ) и моментом открытия затвора видеокамеры ( $t_S$ ). Таким образом, в течение  $500 \mu\text{s}$  можно было сфотографировать события, происходящие спустя промежуток времени  $\Delta t_S$ . В эксперименте, сокращая  $\Delta t_S$ , мы добивались отсутствия изображения скопления разлетающихся частиц на экране монитора, при этом незначительное увеличение  $t_S$  приводило к появлению изображения. Этот момент времени  $t_1$  мы принимали за начало процесса движения частиц. Оценив разность между  $t_L$  и  $t_1$ , мы определяли задержку между началом лазерного импульса и началом движения частиц. Далее, увеличивая  $t_S$ , мы могли регистрировать скопление разлетающихся частиц в течение времени  $\Delta t$ , определяемого разностью между  $t_S$  и  $t_1$ . ЭВМ использовалась для управления блоком синхронизации, сбора, хранения и обработки получаемых в эксперименте фотографий. На полученных фотографиях измерялась длина наиболее интенсивных треков, оставляемых разогретыми в поле лазерного импульса твердыми частицами, летящими в направлении, близком к нормали к поверхности слоя частиц, что позволяло минимизировать неточность в определении длины трека, вызванную разлетом частиц под углами. Зная  $\Delta t$  и длину трека, можно, поделив длину на время, легко определить среднюю скорость движения частиц за этот промежуток времени.

В эксперименте мы определили пороговое значение плотности лазерной энергии, при котором начинается движение частиц различного диаметра. Оказалось, что для ускорения частиц диаметром  $12 \mu\text{m}$  из суспензии достаточно  $0.3 \text{J}/\text{cm}^2$ , а для ускорения частиц диаметром  $12 \mu\text{m}$  из порошка необходимо уже  $0.7 \text{J}/\text{cm}^2$ . Для ускорения частиц диаметром  $27 \mu\text{m}$  из порошка необходимо  $1.5 \text{J}/\text{cm}^2$ , для ускорения частиц диаметром  $40 \mu\text{m}$  —  $2.2 \text{J}/\text{cm}^2$ , а для частиц диаметром  $160 \mu\text{m}$  —  $6.0 \text{J}/\text{cm}^2$ , т.е. для ускорения частиц сапфира, помещенных в воду (суспензия), требуется энергии практически в два раза меньше, чем для ускорения частиц сапфира, содержащих только воду, абсорбированную



**Рис. 1.** Зависимость средней скорости движения частиц от времени, прошедшего после начала лазерного импульса (порошок из частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диаметром  $12 \mu\text{m}$ , YAG:Er лазер, плотность энергии  $135 \text{J}/\text{cm}^2$ ).



**Рис. 2.** Зависимость средней скорости движения частиц от плотности энергии лазерного импульса (порошок из частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диаметром  $12 \mu\text{m}$ , YAG:Er лазер, скорость регистрировалась спустя  $40 \mu\text{s}$  после начала действия лазерного импульса).

поверхностью (порошок). Мы экспериментально установили, что скорость частиц распределена неравномерно в течение времени действия лазерного импульса (рис. 1) и скорость частиц увеличивается с ростом плотности энергии лазерного излучения (рис. 2). Так, для частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  диаметром  $12 \mu\text{m}$  скорость в течение времени действия лазерного импульса сначала резко растет, на сороковой микросекунде достигает максимума и далее постепенно уменьшается к концу лазерного импульса, кроме того, частицы продолжают двигаться после окончания лазерного импульса. Необходимо отметить, что подобная закономерность наблюдалась и для частиц

других диаметров. В поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера непоглощающая частица из  $Al_2O_3$ , окруженная водой, абсорбированной поверхностью (порошок), может быть ускорена до скорости 275 m/s, что при диаметре частицы  $12\ \mu m$  соответствует кинетической энергии порядка  $0.27\ \mu J$ , достаточной для разрушения такого твердого материала, как эмаль зуба [5].

## Список литературы

- [1] *Nichols E.F., Hull G.F.* // Phys. Rev. 1903. N 17. P. 26.
- [2] *Аскарьян А.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1962. Вып. 42. С. 1567.
- [3] *Аскарьян А.Г., Мороз Е.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1962. Вып. 43. С. 2319.
- [4] *Аскарьян А.Г., Рабинович М.С., Савченко М.М.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Вып. 5. С. 258.
- [5] *Altshuler G.B., Belikov A.V., Sinelnik Y.A.* // Lasers in Surgery and Medicine. 2001. Vol. 28. С. 435–444.