

"ОГНЕННЫЙ ШАР" СВЕТОВОГО ПРОБОЯ В ФОКУСЕ ЛУЧА ЛАЗЕРА

Г.А.Аскаръян, М.С.Рабинович, М.М.Савченко, В.Ж.Степанов

Известно, что световой пробой газа в фокусе луча лазера (см. обзор [1]) имеет взрывной характер из-за малого времени и большой концентрации энергии поглощенного света, причем возникающая ударная волна достаточно хорошо описывается решениями случая так называемого сильного взрыва.

В данной статье показано, что световой искре присуще и другое характерное для сильного высокотемпературного взрыва явление – так называемый "огненный шар" (см., например, [2]) – сильно ионизованная область, от которой отрывается и уходит вперед ударная волна, когда ее ионизирующее действие заметно ослабевает. Огненный шар (ОШ) создается ударной волной в тот период, когда она оказывала большое ионизирующее действие (на первой стадии за счет фотоионизации фронт ОШ может опережать фронт ударной волны). Известны следующие полуэмпирические соотношения [2], характеризующие ОШ в зависимости от энерговклада. Радиус ОШ в момент отрыва ударной волны $R_{\text{ОШ}} \approx AE^{2/5}$, где $A \approx 3 \cdot 10^3 \text{ см}/(\text{кг})^{2/5}$, время до отрыва, закон изменения радиуса со временем, максимальный размер ОШ и время жизни.

В нашем случае микровзрыв создавался световым пробоем воздуха в фокусе луча лазера с модулированной добротностью, дающей вспышку с энергией 1 Дж за время 30 нсек. Объем, занимаемый концентрированной плазмой, исследовался по возмущению внешнего магнитного поля.

Объем начального выделения энергии имел вытянутую форму, так как объем области фокуса имел продольный размер z_f в несколько раз больше поперечного радиуса ρ_f ($\rho_f/z_f \approx d/4f$, где диаметр луча на линзе $d \approx 1$ см и фокусное расстояние линзы $f \geq 5$ см). Объем "огненного облака" моделировался сфероидом с полуосями a и b , причем поперечная полуось b была больше ρ_f , так как разлет происходил с большими скоростями. Эксперимент показал, что магнитный момент нарастает за вре-

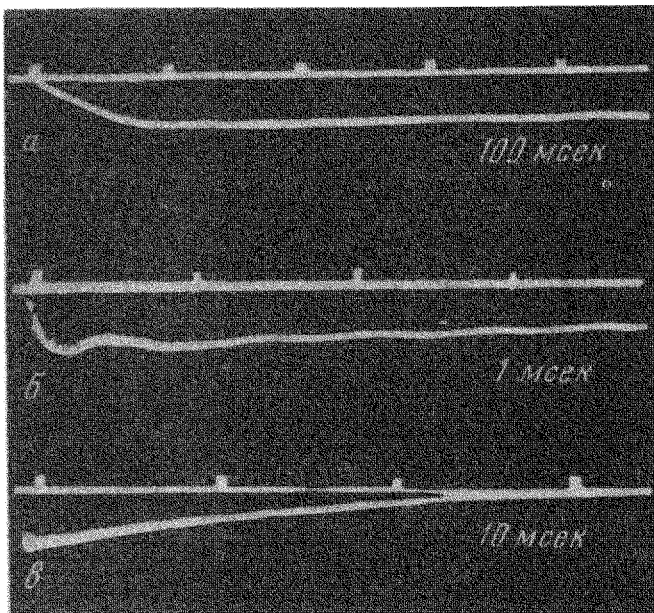


Рис.1

мя порядка ста наносек (см. рис.1), что в несколько раз превышает длительность вклада энергии света, а отношение магнитного момента к внешнему магнитному полю $M/H_0 \approx 10^{-5}$ см³. Можно оценить эффективный объем вытеснения поля, с помощью выражения для магнитного момента сверхпроводящего сфероида во внешнем магнитном поле $M = -VH_0/4\pi(1-n) \approx -VH_0/4\pi$ (так как фактор размагничивания $n \ll 1$ для вытянутого сфероида), т.е. $V_{эф} \approx 4\pi M/H_0 \approx 10^{-4}$ см³.

Сравним этот объем с объемом ОШ в момент отрыва от него ударной волны, используя приведенную выше полуэмпирическую формулу для $R_{ОШ}$ сферического взрыва. Объем

$$V_{\text{ОШ}} \approx \frac{4\pi}{3} R_{\text{ОШ}}^3 \approx 4 A^3 E^{6/5} \approx 10^{-4} \text{ см}^3$$

для $E \approx 1 \text{ дж} \approx 3 \cdot 10^{-13} \text{ кт}$. Таким образом, объем вытесненного магнитного поля совпадает по порядку величины с объемом ОШ в момент отрыва от него ударной волны, что можно объяснить резким уменьшением ионизирующего действия проводимости и диамагнетизма фронта самой ударной волны после отрыва от ОШ.

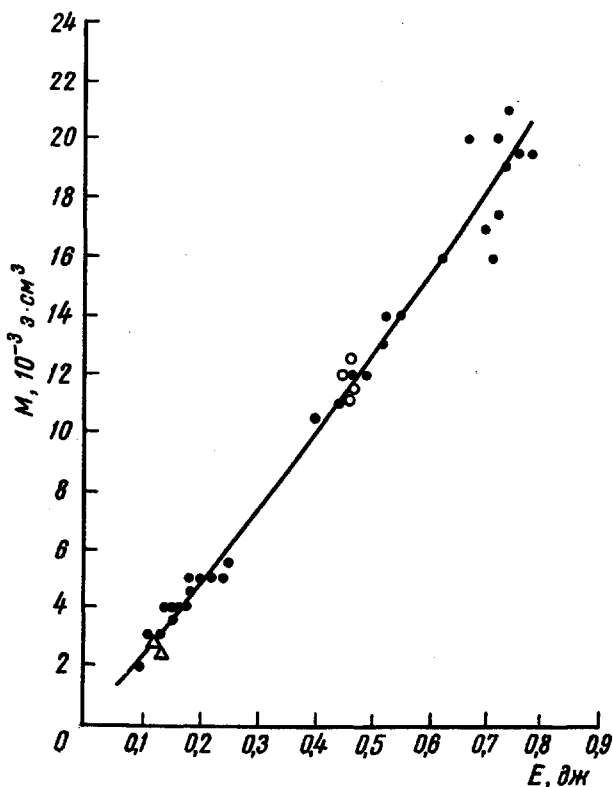


Рис.2

Оценим скорости движения вещества в момент отрыва ударной волны, используя сначала решение [2] для сильного точечного взрыва $R(t) \approx (E/\rho_0)^{1/5} t^{2/5}$ и предполагая, что отрыв происходит при $R = C_{\text{кр}}$ — критической скорости, при которой резко падает ионизация. Тогда время отрыва $t_{\text{кр}} \approx (E/\rho_0 C_{\text{кр}}^5)^{1/3}$, и используя данные [2] $t_{\text{кр}} \approx 10 \text{ мсек}$ при $E \approx 20 \text{ кт}$ получим $C_{\text{кр}} \approx 10^6 \text{ см/сек}$.

Используя решение для цилиндрической ударной волны $R^2 \approx (E/\rho_0 l)^{1/2} t$ получим для момента времени отрыва $t_{\text{кр}} \approx (E/\rho_0 l)^{1/2} (1/C_{\text{кр}}^2)$ для нашего случая $E \approx 1 \text{ дж}$; $\rho_0 \approx 10^{-3} \text{ г/см}^3$; при длине $l \approx 2a \approx 0,1 \text{ см}$ и $C_{\text{кр}} \approx 10^6 \text{ см/сек}$ получим $t_{\text{кр}} \approx 10^{-7} \text{ сек}$, что близко к времени нарастания магнитного момента (см.рис.1), где приведен сигнал, пропорциональный M на трех раз-

вертках с метками времени 100 нсек (а); 1 мксек (б), 10 мксек (в);

Магнитный момент "огненного облака" равен

$$M = -VH/4\pi \approx \alpha b^2 H_0/3 \approx -IR_{кр}^2 H_0/6,$$

но $R_{кр}^2 \approx (E/\rho_0 l)/C_{кр}^2$, поэтому $M \approx -EH_0/6\rho_0 C_{кр}^2 \sim E/\rho_0$ в пренебреже-

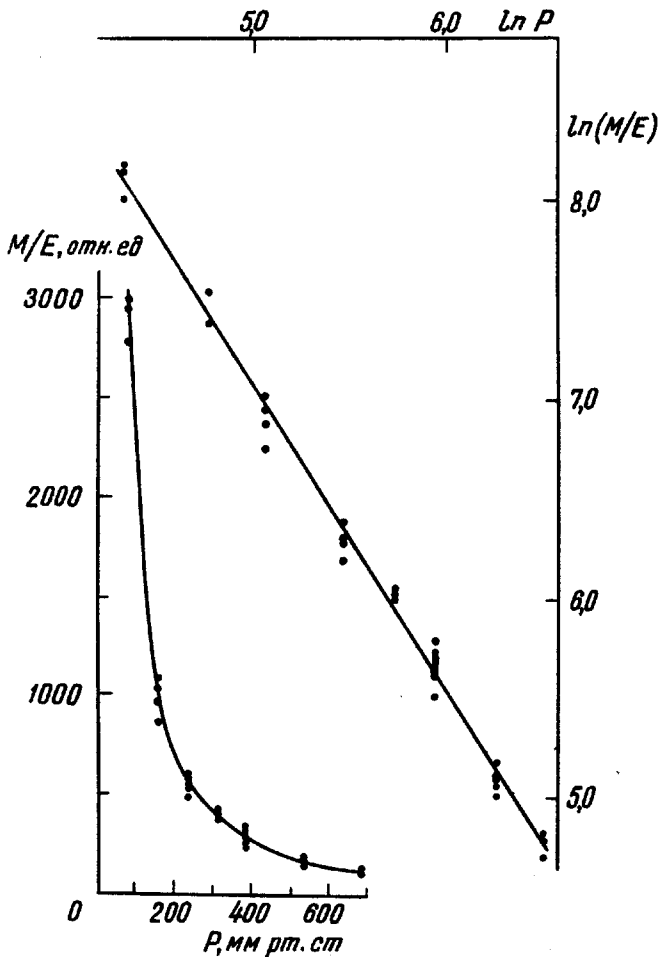


Рис.3

нии слабой возможной зависимостью $C_{кр}$ от некоторых величин. (Эту зависимость для случая вытеснения магнитного поля можно оценить из условия равенства скорости расширения $C_{кр}$ скорости проникания магнитного поля $v_H \approx c^2/4\pi\sigma\delta$; где σ — проводимость, и δ — толщина слоя проникания. Для $\sigma \approx T_{кр}^{3/2} \approx R_{кр}^3$ и $\delta \approx \alpha R_{кр}$ получим $C_{кр} \approx V/R_{кр}^{1/4}$. Это даст зависимость $M \approx E^{4/3}/\rho_0^{4/3} l^{1/3}$.)

На рис.2 приведена экспериментально полученная зависимость M , от выделившейся в искре энергии E , которая измерялась по разности показаний двух калориметров, измерявших определенную долю от падающей и прошедшей световой энергии. Полученная зависимость $M(E)$ близка к линейной. На рис.3 приведена зависимость $(M/E)(P_0)$. Эта зависимость близка к обратной.

В заключение приведем сравнение "времени жизни" ОШ $T_{\text{ош}} \approx VE^{1/2}$, где $V \approx 10 \text{ сек}/(\text{кт})^{1/2}$ [2] с "временем жизни" магнитного момента. Для вклада $E \approx 1 \text{ дж}$ это время $T \approx 10 \text{ мксек}$, что по порядку величины совпадает с временем жизни магнитного момента (см. рис.1). Таким образом модель ОШ удовлетворительно объясняет достаточно большой круг явлений.

Выражаем благодарность студенту-дипломнику Л.Коломийцеву за участие в эксперименте.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
30 декабря 1966 г.

Литература

- [1] Ю.П.Райзер. УФН, 87, 29, 1965.
- [2] Ю.П.Райзер, Я.Б.Зельдович. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. Москва, 1966; "The Effect of Nuclear Wear.", апрель, 1962 (есть русский перевод).