

04; 07; 12

© 1991

ТЕПЛОВАЯ СТРУКТУРА ОБЛАКА ВЕЩЕСТВА,  
ИСПАРЕННОГО ИМПУЛЬСОМ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯА.В. Булгаков, Б.Н. Козлов,  
А.П. Майоров, И.И. Пилюгин,  
М.Р. Предтеченский, В.Г. Шебелин

Исследования показывают, что различные компоненты облака импульсно испаренного вещества могут нести признаки существенно различных температур. Так, Дрейфус и др. [1] различие энергий бесстолкновительного разлета атомов и молекул, отличающихся к тому же на порядок от колебательного возбуждения молекул, объясняют электронным механизмом испарения [2].

Наши эксперименты показывают, что значительная неоднородность (различные скорости распространения различных компонентов) характерна и при газодинамическом режиме (см., например, [3]) разлета облака.

Изменения параметров испаренного облака проводились на расстоянии 120 мм от мишени при помощи времяпролетного масс-спектрометра с возможностью ионизации электронным ударом. В качестве мишени использовалась ВТСП  $Y-Ba-Cu-O$  керамика. Испарение производилось излучением одномодового  $Nd:YAG$ -лазера (энергия в импульсе до 50 мДж, длительность импульса по полувысоте 22 нс). Плотность мощности излучения на мишени менялась в диапазоне  $(0.1-8.0) \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Подробнее эксперимент описан в работе [4].

При плотности мощности, близкой к  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, наблюдаются нейтральные и положительно заряженные кластеры, состоящие преимущественно из окиси иттрия. Скорости распространения кластеров и кластерных ионов практически совпадают и лежат в интервале 1.5-3.0 км/с. Состав кластеров и влияние на их количество диаметра пятна облучения на мишени свидетельствуют в пользу того, что они образуются в результате охлаждения в расширяющемся облаке. Этот факт однозначно указывает на существенную роль газокINETических столкновений в процессе разлета облака. В этом случае лишь наиболее быстрые частицы из внешнего слоя облака будут разлетаться с близкими кинетическими энергиями, соответствующими температуре поверхности облака. Для основной же части потока должны быть характерны близкие локальные средние скорости для всех видов частиц. В то же время эксперимент показывает, что в среднем различные компоненты облака движутся с различными скоростями. Атомарные ионы обладают большими скоростями разлета, чем нейтральные атомы и молекулы. Среди нейтральных

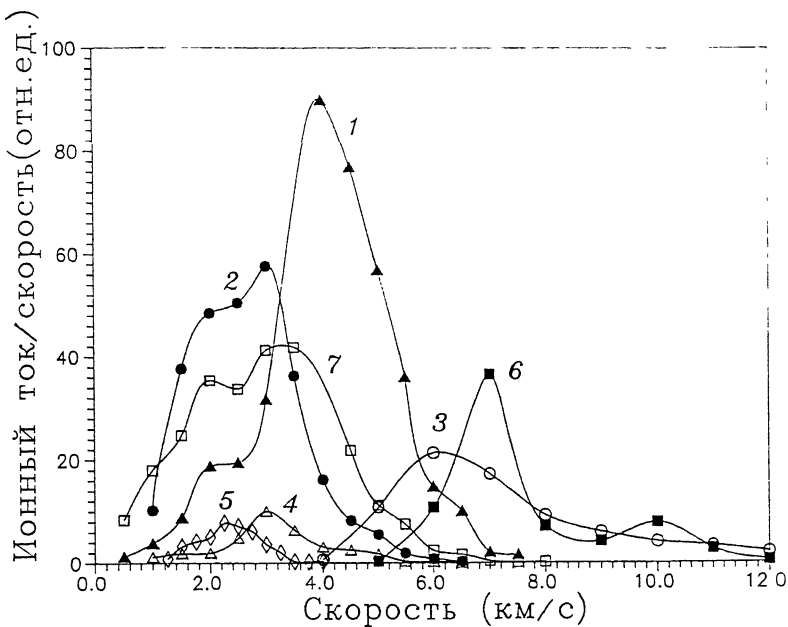


Рис. 1. Распределения некоторых продуктов импульсного лазерного испарения  $Y - Ba - Cu - O$  керамики по скоростям разлета. Скорость определяется как отношение расстояния от мишени до источника ионов масс-спектрометра к задержке между лазерным импульсом и моментом измерения количества ионов данной массы в источнике. По оси ординат отложен сигнал масс-спектрометра, пропорциональный количеству ионов в источнике в момент измерения, поделенный в каждой точке на соответствующую скорость. Распределения измерены при плотности мощности излучения  $9.3 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, диаметре пятна излучения 2 мм, расстоянии от мишени до точки измерения 120 мм. Сигналы нейтральных компонентов и ионов облака обозначены: 1 - Ba, 2 - BaO, 3 - Ba<sup>+</sup>(:10), 4 - YO, 5 - Y<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (\*5) (максимальный из сигналов нейтральных кластеров), 6 - BaO<sup>+</sup>(:10), 7 - Cu. Другие нейтральные кластеры и кластерные ионы (анализировались массы до 2000 а.е.м.) имеют скоростные распределения, близкие к 5.

компонентов с большей скоростью разлетаются отдельные атомы, с меньшей - сложные молекулы и кластеры. При этом непосредственной зависимости от массы частицы нет: нейтральные атомы меди (65 а.е.м.) разлетаются в среднем медленнее атомов бария (138 а.е.м.). Увеличение плотности энергии и площади пятна излучения на мишени, приводящее к увеличению количества испаряемого за импульс вещества на два порядка, ведет к увеличению средних

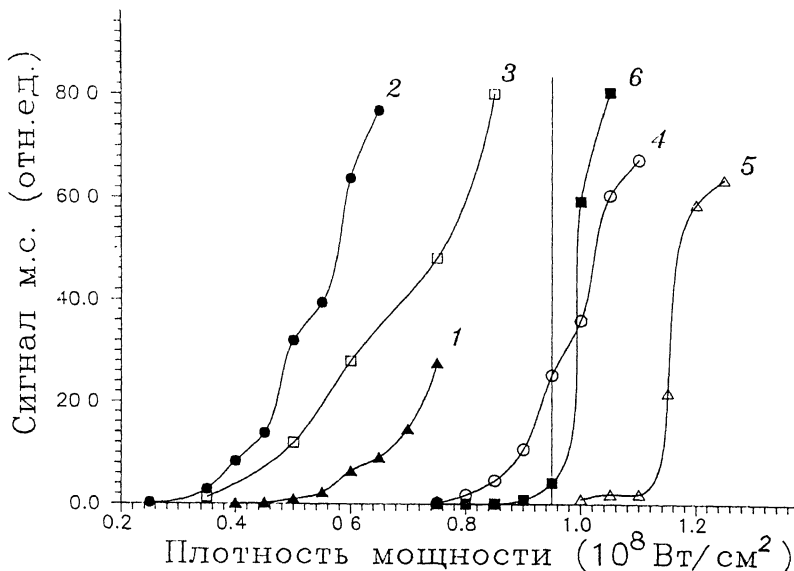


Рис. 2. Зависимость сигналов различных продуктов импульсного лазерного испарения  $Y-Va-Cu-O$  керамики от средней плотности мощности лазерного излучения в области порогов их регистрации при наиболее вероятной скорости компонента. Диаметр пятна излучения на мишени - 2 мм, вертикальной чертой отмечена плотность мощности, соответствующая условиям измерения скоростей на рис. 1. Сигналы нейтральных компонентов и ионов обозначены: 1 -  $Va(:10)$ , 2 -  $VaO$ , 3 -  $Cu$ , 4 -  $Y$ , 5 -  $O^+(:10)$ , 6 -  $Va^+(:100)$ .

скоростей нейтральных компонентов не больше, чем в два раза. Но различие в средних скоростях разлета разных составляющих, тем не менее, остается.

Характерный набор распределений различных компонентов по скоростям показан на рис. 1. Распределения даны для плотности мощности  $9 \cdot 10^7$  Вт/см $^2$ , диаметра пятна излучения 2 мм, при этом снимается слой керамики толщиной до 300 нм.

Измерение средней кинетической энергии нейтральных компонентов, приходящих в область анализа в различные моменты времени, показало, что для основной их части время испарения и газодинамического разгона не превышает 1 мкс. Разброс скоростей ионов в головной части облака соответствует температуре в сотни тысяч градусов. В то же время конденсация в хвостовой части облака свидетельствует о сравнительно небольшой, в несколько тысяч градусов, температуре.

Для объяснения наблюдаемых закономерностей авторы предлагают использовать следующие качественные представления о процессе формирования и разлета облака.

В облаке испаряемого вещества образуется температурная неоднородность. Это связано с тем, что молекулы хвостовой части облака покидают поверхность при температуре, характерной для испарения вещества (близкой к энергии связи с поверхностью, выраженной в единицах температуры), в то время как внешняя часть облака, поглотившая большее количество энергии, нагревается до значительно большей температуры. Режим расширения облака быстро становится сверхзвуковым, теплопередача между различными областями облака неэффективна. (Исключение, видимо, составляет электронный газ в облаке).

Полагая значительной роль столкновений в облаке, мы должны допустить, что с падением плотности облака идет быстрое охлаждение смеси. В связи с окончанием столкновений между частицами замедляется и прекращается обмен энергией между различными степенями свободы. При этом будет нарушаться локальное тепловое равновесие. Из детального баланса постепенно будут исключаться процессы рекомбинации, образования соединений, конденсации. В наших экспериментах доказано лишь существование конденсации. Вопрос о том, когда заканчиваются столкновения, остается открытым — плотность облака, измеряемая масс-спектрометром, значительно ниже оцениваемой по измеренному количеству вещества, выносимого за импульс. Последнее, видимо, связано с наличием в облаке частиц труднорегистрируемого конденсата или непосредственно вынесенных микрокапель мишени.

В слоях с различной тепловой „историей” вещество облака после „замораживания” распространяется в различных состояниях — от ионов в фронтальной части, до атомов, соединений и частиц конденсата в более глубоких слоях. Средняя скорость распространения определенного компонента лимитируется тем, что в других, быстрее или медленнее распространяющихся и, соответственно, более горячих или холодных слоях облака этот компонент находится преимущественно в другом химическом или фазовом состоянии.

Так, при температурах поверхности, близких к порогу абляции керамики, барий распыляется преимущественно в виде окиси и появляется в атомарном виде при увеличении мощности излучения лишь во внешних, более горячих и быстрее распространяющихся слоях облака. Поэтому атомы меди, которая регистрируется в эксперименте только в атомарном виде и в незначительных количествах в кластерах, распространяются в среднем медленнее атомов бария.

На рис. 2 показаны зависимости максимальных сигналов различных компонентов от плотности мощности излучения. Отметим соответствие последовательности появления компонентов в облаке при увеличении плотности мощности излучения (максимальной температуры в облаке), и средних скоростей их распространения. С меньшими скоростями разлетаются компоненты, появляющиеся при меньшей плотности мощности излучения.

Скорость каждого компонента определяется не только температурой, но и составом смеси. Например, потеря мишенью части кислорода при многократном облучении в вакууме приводит к уменьшению средних скоростей переноса всех атомарных компонентов на десятки процентов. Возможно, кислород, обладая большим сродством к электрону, способствует длительному удержанию отрицательных зарядов в плазме облака, а следовательно, более полной рекомбинации в горячих слоях (увеличению количества быстрых нейтральных атомов), дополнительному ускорению слоя за счет энергии, выделяющейся при рекомбинации.

Таким образом, мы полагаем, что различные части облака вещества, испаренного мощным импульсом излучения, могут характеризоваться на порядки различающимися температурами на всех стадиях разлета и содержать компоненты смеси в характерном для таких температур виде (ионы, атомы, сложные молекулы, конденсат).

Именно этим объясняется различие средних скоростей разлета разных компонентов смеси в случае импульсной абляции при существенной роли столкновений в отличие от случая отсутствия столкновений между частицами испаренного вещества.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] D r e y f u s R.W., K e l l y R., W a l k u p R.E. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. N 21. P. 1178-1180.
- [2] K r u e g e r F.R. // Z. Naturforsch. 1983. V. 38. N 4-6. P. 385-394.
- [3] V e r t e s A., J u h a s z P., D e W o l f M., G i j b e l s R. // Int. J. Mass. Spectrom. Ion Processes. 1989. V. 94. N 1-2. P. 63-85.
- [4] Булгаков А.В., Майоров А.П., Предтеченский М.Р., Козлов Б.Н., Пилюгин И.И., Шебелин В.Г. // Сверхпроводимость 1991 (в печати);  
B u l g a k o v A.V., M a j o r o v A.P., P r e d t e c h e n s k y M.R., K o z l o v B.N., P i l u g i n I.I., S h e r E.M., S h c h e b e l i n V.G., Y a n u t a A.N. // Proc. Beijing Int. Conf. on High  $T_c$  superconducting, P. 109-111, Singapur W.S., 1990.

Поступило в Редакцию  
27 июня 1991 г.  
В окончательной редакции  
25 сентября 1991 г.