

КВАЗИ-МЕТАЛЛИЧНОСТЬ ЖИДКОГО УГЛЕРОДА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Коробенко В.Н., Савватимский А.И., Фортов В.Е.

Государственное учреждение Объединенный институт высоких температур РАН,
komitet@iht.mpei.ac.ru

Планеты солнечной системы (Меркурий, Венера, Земля и Марс) представляют собой силикатные системы на основе кремния. Однако астрономы сообщают, что возможно существование карбоновых планет (преимущественно вблизи центра Галактики, где звезды содержат больше углерода, чем в окрестностях Солнца), основное содержание которых – углерод в различных фазовых состояниях. Поэтому иметь представление об углероде при высоких P и T – одна из насущных задач физики высоких параметров.

Эксперимент ставился как быстрый электрический взрыв, т.е. импульсный нагрев графита током за время 1-3 микросекунды. Используемый анизотропный графит имел высокую начальную плотность (2.2 г/см^3). Анизотропные образцы квадратного сечения, вырезанные вдоль плоскостей осаждения, пропускались через алмазные фильтры для получения образцов цилиндрической формы (диаметр 0.8 мм). Затем они помещались в сапфировые толстостенные капиллярные трубки (внутренний диаметр около 1 мм, внешний 10-12 мм). Таким образом, отношение внутреннего объема трубки V к начальному объему графита V_0 составляло $V/V_0 = 1.25 - 2.0$. Предполагалось, что расширение графита при нагреве и дальнейшее плавление приводят к заполнению трубки и дальнейшему нагреву в условиях квази-изохорического нагрева. Импульсный ток (68 кА) обеспечивал пинчевое давление 4.5 кбар, в среднем по сечению, обеспечивая, таким образом, плавление еще до заполнения трубки расширяющимся графитом (Рис.1).

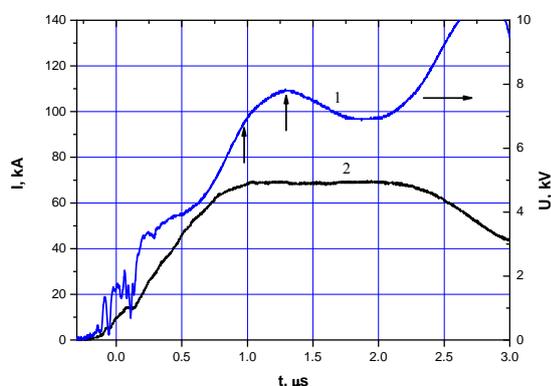


Рис.1. Напряжение U (кривая 1) и ток I (кривая 2) в зависимости от времени для случая $V/V_0 = 1.25$ (кривая 2 на Рис.2).

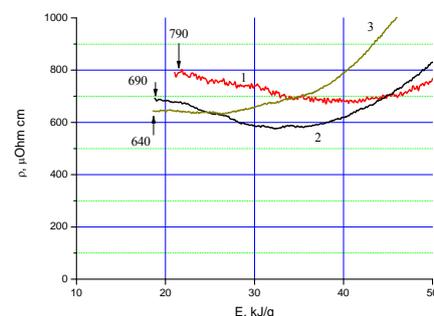


Рис.2. Удельное электросопротивление углерода ρ (с учетом расширения) в зависимости от удельной введенной энергии E , начиная от завершения плавления (стрелки).
 Кривая 1 – $V/V_0 = 2.0$; плотность $\gamma = 1.1 \text{ г/см}^3$.
 Кривая 2 – $V/V_0 = 1.25$; $\gamma = 1.76 \text{ г/см}^3$.
 Кривая 3 – $V/V_0 = 1.17$; $\gamma = 1.88 \text{ г/см}^3$.

На Рис.2 представлены результаты квази-изохорического нагрева жидкого углерода, начиная от завершения плавления (стрелки) до введенных энергий около 50 кДж/г. Цифры около точки плавления показывают, что с увеличением давления электросопротивление жидкого углерода падает. Этот результат находится в согласии с данными Мотохири Тогая, который использовал высокое статическое давление (20-100 кбар) и импульсный миллисекундный нагрев.

На Рис.3 представлен основной результат эксперимента.

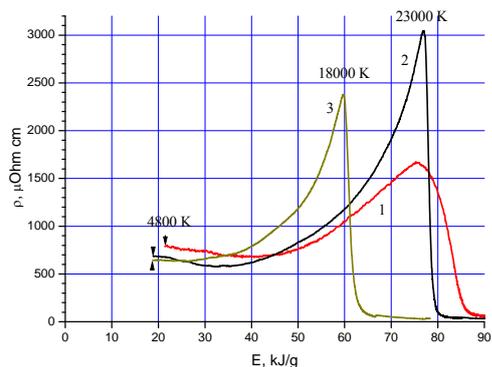


Рис.3. Удельное электросопротивление жидкого углерода вплоть до $\sim 20000 \text{ K}$.

Импульсный нагрев указан от энергии завершения плавления. Квази-изохорический нагрев начинается при окончании плавления (стрелки при температуре 4800 К). Пики всех кривых показывают момент начала разрушения трубок.
 Кривая 1 – $V/V_0 = 2.0$; плотность $\gamma = 1.1 \text{ г/см}^3$.
 Кривая 2 – $V/V_0 = 1.25$; $\gamma = 1.76 \text{ г/см}^3$.
 Кривая 3 – $V/V_0 = 1.17$; $\gamma = 1.88 \text{ г/см}^3$.
 Разрушение трубки для кривой 3 начинается раньше (большая плотность жидкого углерода приводит к большему давлению при той же введенной энергии).

Оценка температуры T сделана на основании измеренной ранее теплоемкости C_V для жидкого углерода: $\Delta E = C_V(T - T_{пл})$. Измерение T высокоскоростной пирометрией невозможно из-за расплавления тонкого слоя (2-3 микрона) сапфира.

1. Для квази-изохорического процесса нагрева (вплоть до $E = 75 \text{ кДж/г}$, $T \approx 23,000 \text{ K}$), производная $d\rho/dE$ изменяет отрицательное значение на положительное в широком диапазоне введенных энергий ($E = 25 - 40 \text{ кДж/г}$).
2. Основной результат при $E = 40-75 \text{ кДж/г}$ - зависимость электросопротивления от плотности: чем больше плотность, тем больше электросопротивление жидкого углерода. Подобное поведение жидкого лития при высоком давлении предсказано Нитоном и Ашкрофтом (Nature, 1999). Экспериментальное подтверждение получено во взрывных экспериментах ($\sim 600-2000 \text{ кбар}$); эта проблема обсуждается в работе Максимова Е.Г., Магницкой М.В., Фортова В.Е. «Непростое поведение простых металлов при высоком давлении», УФН. 2005; 175(8): 793-813. Дополнительная информация о подобном импульсном нагреве плотного изотропного графита будет сообщена в устном докладе. Работа поддержана грантом Президиума РАН (П-12) и грантом РФФИ (07-08-00070а).

