

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ КСЕНОНА В ЗАКРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В.Б.Минцев, В.Е.Фортвов

Проведены измерения электропроводности ксенона в закритической области, промежуточной по плотности между газовой плазмой и твердым телом, при высоких давлениях и температурах. Установлена применимость газовой модели для описания электрофизических свойств среды в условиях эксперимента.

В настоящее время электронные свойства неупорядоченных систем хорошо изучены для хаотического распределения слабо взаимодействующих частиц, где применима модель газовой плазмы, и в случае конденсированных сред, где большое количество экспериментов по жидким металлам и легированным полупроводникам удовлетворительно описываются псевдопотенциальными моделями. Особый интерес представляет промежуточный случай околоскритических и скритических плотностей, где сильное межчастичное взаимодействие нарушает применимость соответствующих кинетических уравнений, а разработка полупирических моделей затруднена почти полным отсутствием экспериментального материала [1].

В работе проведены измерения статической электропроводности ксенона в сильнозакритических условиях $\rho \sim 1 + 4 \text{ г/см}^3$ ($\rho_{\text{кр}} = 1,1 \text{ г/см}^3$) при высоких давлениях и температурах $P \sim 20 + 110 \text{ кбар}$, $T \sim (1+2) \cdot 10^4 \text{ К}$ (рис. 1), где реализуется широкий спектр сильных межчастичных взаимодействий с участием нейтральных и заряженных частиц. Исследованная область параметров I на рис. 1 простирается от состояний пониженной плотности II, где электрофизические и термодинамические свойства вещества описываются плазменными моделями [2, 3], и непосредственно примыкает к полученной ударным сжатием жидкого ксенона области III твердотельных плотностей [4], где ударная сжимаемость системы описывается зонной теорией твердых тел, а электропроводность находится в согласии с полупроводниковыми моделями.

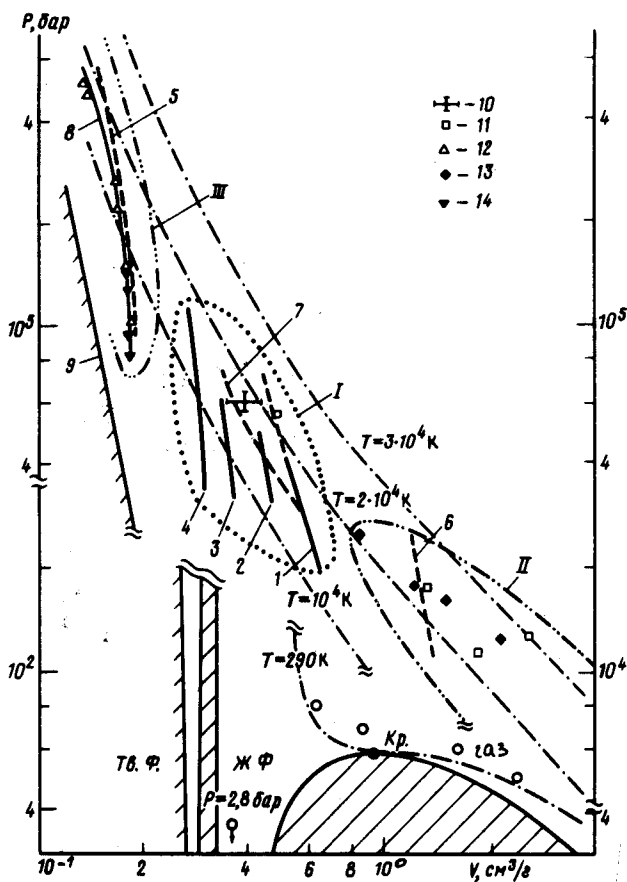


Рис. 1. Фазовая диаграмма ксенона. Расчетные ударные адиабаты: 1 - $P_0 = 50$ бар, 2 - $P_0 = 60$ бар, 3 - $P_0 = 70$ бар, 4 - $P_0 = 80$ бар, 5 - $P_0 = 2,8$ бар $T_0 = 165$ К, 6 - $P_0 = 20$ бар, 7 - ударная адиабата вторичного сжатия, 8 - расчет [4], 9 - изотерма $T = 0$ К. Данные термодинамических измерений 10 - метод "отражения", 11 - [5], 12 - [4]; данные измерений электропроводности: 13 - [2], 14 - [4]

Генерация выбранных состояний (в области I) осуществлялась путем динамического сжатия и разогрева ксенона околокритических параметров $P_0 \sim 50 + 80$ бар, $T_0 \sim 298$ К, $\rho_0 \sim 0,4 \pm 1,6$ г/см³, - кружки на рис. 1. Опыты выполнены на взрывном устройстве [2]. Статическая электропроводность измерялась четырехзондовым методом. В каждом опыте фиксировалась также скорость ударной волны базовым электроконтактным методом (рис. 2). Эти измерения показали существенное затухание ударной волны, свидетельствующее о заметной (до 20%) неоднородности параметров ударно-сжатого вещества, что учитывалось при обработке всех экспериментов.

Для проверки используемой при дальнейшей интерпретации термодинамической модели была проведена серия экспериментов по фиксации калорического уравнения состояния ксенона методом "отражения" (рис. 2). На расстоянии ~ 7 см от среза заряда ВВ помещалась плоская плексигласовая преграда. Регистрация скорости ударной волны в ксеноне при подходе ее к преграде, а также фиксация скорости движения ударной волны в плексигласовой преграде позволили определить давление ($\pm 5\%$), плотность и энтальпию ($\pm 15\%$) ксенона после его двукратного сжатия в прямой и отраженной ударных волнах - точка 10 на рис. 1. Для описания термодинамических свойств ксенона была использована "химическая" модель, в которой кулоновское взаимодействие зарядов описывалось модифицированным дебаевским приближением [3], а от-

толквительное взаимодействие атомов и ионов на малых расстояниях воспроизводилось вириальным разложением в рамках потенциала Ленарда – Джонса – учитывались второй и третий вириальные коэффициенты. Видно (пунктир на рис. 1), что данная модель удовлетворительно описывает результаты однократного [5] и двухкратного сжатия газового ксенона и с точностью до 10% воспроизводит результаты [4] по ударной сжимаемости жидкости.

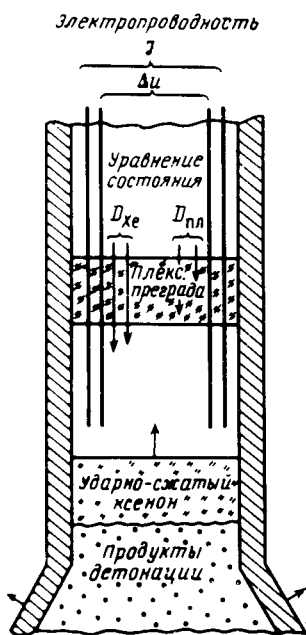


Рис. 2. Схема эксперимента

Полученные экспериментальные значения электропроводности ксенона лежат в пределах 10 ± 250 мО/см. В целом имеет место разумное согласие с проведенными ранее измерениями в области II [2] и результатами исследований при твердотельных плотностях [4]. При переходе из области III в область II электропроводность монотонно увеличивается от значений $\sigma \sim 1$ мО/см при $T \sim 7 \cdot 10^3$ К в конденсированном ксеноне до значений $\sigma \sim 500$ мО/см в неидеальной плазме ($T \sim 2,5 \cdot 10^4$ К). На рис. 3 представлены результаты измерений электропроводности при $P_0 = 50$ бар (штрих-пунктир) в зависимости от скорости ударной волны. Для оценки величины проводимости в условиях эксперимента было использовано интерполяционное выражение, полученное в τ -приближении:

$$\sigma = \frac{4e^2}{3\sqrt{\pi}m_e} \bar{Z} \int_0^{\infty} \frac{x^{3/2} \exp(-x) dx}{\nu_{ea}(x) + \gamma \nu_{ei}(x)} .$$

Здесь \bar{Z} – активность, связанная в рамках кольцевого дебаевского приближения с концентрацией электронов n_e соотношением $\bar{Z} = n_e / (1 + \tilde{\gamma}/2)$ [3]. Частота столкновений электронов с ионами ν_{ei} вычислялась в соответствии с модифицированной теорией Займана [6]. Проведенные вычисления (кривая 1) дают удовлетворительное согласие с эксперимен-

том. На рис. 3 приведен также расчет с $\bar{Z} = n_e$ (кривая 2), что соответствует принятым обычно вычислениям [6]. Таким образом, полученные данные по электропроводности удается удовлетворительно описать с помощью газовой модели плазмы.

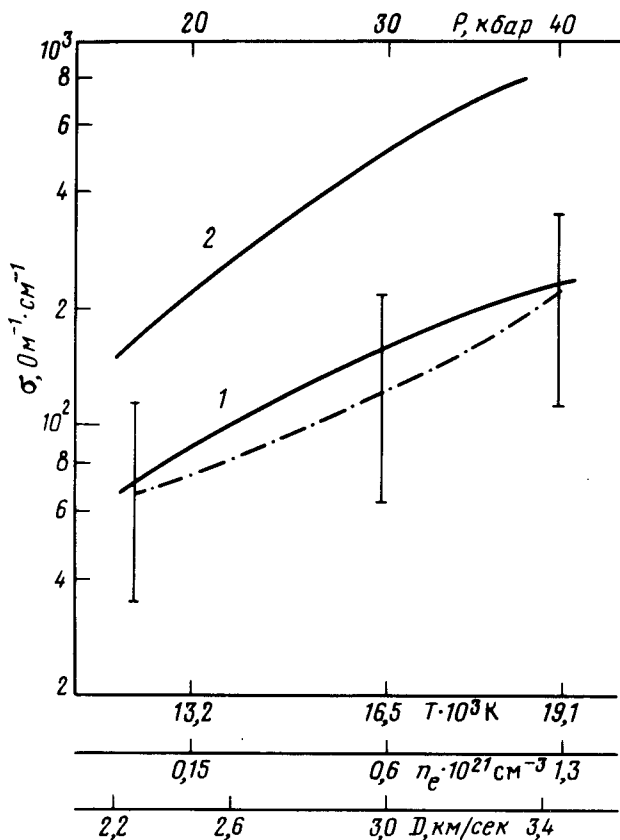


Рис. 3. Электропроводность на ударной адиабате ксенона при $P_0 = 50$ бар. По оси абсцисс отложены расчетные значения давления, температуры и концентрации электронов на фронте ударного разрыва

В заключение авторы благодарят В.К.Грязнова за помощь в проведении термодинамических расчетов, а также Г.А.Павлова и А.Н.Дремина за полезные обсуждения.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 июня 1979 г.

Литература

- [1] В.А.Алексеев, Н.А.Андреев, В.Я.Прохоренко. УФН, 106, 393, 1972.
- [2] Ю.В.Иванов, В.Б.Минцев, В.Е.Фортов. А.Н.Дремин. ЖЭТФ, 71, 216, 1976.
- [3] В.К.Грязнов, И.Л.Иосилевский, В.Е.Фортов. ПМТФ, №3, 73, 1973.
- [4] R.N.Keeler, M. van Thiel, V.J.Alder. Physica, 31, 1437, 1965; Р. Киллер. Сб. Физика высоких плотностей энергии, под ред. П.Кальдеролы и Г.Кнопфеля. М., изд. Мир, 1974, стр. 120.
- [5] В.Е.Фортов, А.А.Леонтьев, В.К.Грязнов, А.Н.Дремин. ЖЭТФ, 71, 225, 1976.
- [6] В.К.Грязнов, Ю.В.Иванов, А.Н.Старостин, В.Е.Фортов. ТВТ, 14, 3, 1976.