

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ СИСТЕМЫ Sn + S

УДК 539.63+537.226

С. С. Набатов, А. В. Лебедев, А. В. Набатова

Институт химической физики в Черноголовке РАН, 142432 Черноголовка

*Приведены экспериментальные данные, подтверждающие правомерность использования электрического отклика полупроводникового соединения на ударное сжатие как метода изучения химического взаимодействия в гетерогенных системах за фронтом ударной волны. Метод опробован на системе Sn + S при динамических давлениях свыше 20 ГПа.*

На основании анализа имеющихся в литературе экспериментальных данных в [1] сделан вывод, что в зависимости от интенсивности ударно-волнового воздействия реакция синтеза моносulfида олова (SnS) из простых веществ может протекать как в ударно-сжатом состоянии, так и после прекращения динамического воздействия. Что касается изучения кинетики данной реакции в ампуле сохранения после сброса давления, то здесь достигнут определенный прогресс, связанный с использованием термоэлектрических чувствительных элементов [1–4]. Изучение химического взаимодействия непосредственно в ударно-сжатом состоянии осложняется отсутствием методов, однозначно связывающих регистрируемые параметры с кинетикой превращения. Решить эту проблему в полном объеме вряд ли возможно в рамках одного метода, например метода оптической пирометрии [5] или метода построения кривых динамической сжимаемости [6]. Необходим комплексный подход к изучению химических взаимодействий в гетерогенных системах, инициируемых ударными волнами. Полезную информацию о протекании химической реакции можно получить, исследуя электрический отклик конденсированных веществ на ударное сжатие.

В работе [7] предложено использовать этот метод для изучения реакции  $\text{Sn} + \text{S} \rightarrow \text{SnS}$ . В основе метода лежит хорошо известный факт, что ЭДС, возникающая в измерительной цепи при прохождении ударной волны по металлическому образцу ( $\sim 1\text{--}10$  мВ), значительно меньше таковой для полупроводниковых веществ ( $\sim 100$  мВ). При этом считается, что электрический сигнал, генерируемый полупроводниками, в основном связан с объемным разделением зарядов во фронте ударной волны (явление ударной поляризации). Исходя из этих принципов смесь, содержащая металлический компонент, должна давать электрический отклик на ударное сжатие как металл, даже в том случае, если за фронтом волны она перешла в полупроводниковое состояние за счет химического взаимодействия. Образование полупроводникового соединения можно зарегистрировать путем зондирования ударно-сжатого вещества волной, отраженной от массивного электрода измерительной ячейки. Однако, и это отмечалось в [7], за счет возникновения температурной неоднородности при протекании экзотермической реакции могут возникать сигналы на уровне  $\sim 100$  мВ уже во время прохождения первой волны по образцу, связанные с явлением термо-ЭДС в полупроводниках. Также следует иметь в виду, что увеличение электропроводности вещества за фронтом зондирующей волны с ростом давления должно ослаблять

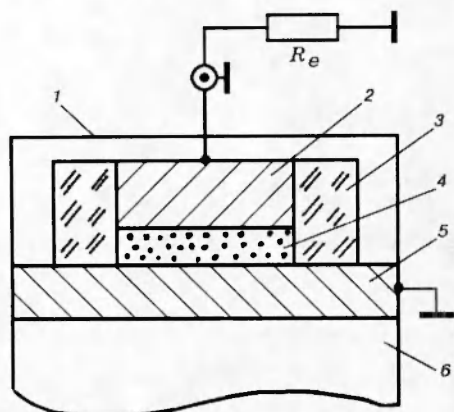


Рис. 1. Схема постановки экспериментов:

1 — электрический экран из медной фольги; 2 — верхний электрод; 3 — изоляционная втулка; 4 — образец; 5 — металлический экран; 6 — заряд взрывчатого вещества

сигналы ударной поляризации, тем самым ограничивая возможности метода. В предварительных экспериментах, проведенных при давлении  $p \approx 10$  ГПа в первой волне и  $\approx 15$  ГПа в зондирующей, не были зарегистрированы сигналы, соответствующие полупроводниковому состоянию образца. В настоящей работе приведены экспериментальные данные по изучению электрического отклика системы Sn + S при  $p > 15$  ГПа. Согласно [6] при давлении выше этого значения взаимодействие олова и серы может иметь место за фронтом ударной волны.

Схема постановки экспериментов представлена на рис. 1. Образцы диаметром 10 мм и толщиной  $l \approx 2$  мм нагружали до давления  $p_1$  плоской ударной волной, генерируемой зарядом взрывчатого вещества (диаметр 60 мм), находящимся в контакте с алюминиевым экраном. Вторичное сжатие реакционной смеси до давления  $p_2$  осуществлялось ударной волной, отраженной от массивного верхнего электрода, изготовленного из меди. Этот электрод отделяли от образца алюминиевой фольгой толщиной 7 мкм. Электрические сигналы регистрировали цифровым осциллографом С9-27 с входным сопротивлением  $R_e = 75$  Ом. Образцы изготавливали прессованием до плотности монолита стехиометрической смеси олова и серы (размер частиц олова  $\approx 100$  мкм). Параметры ударного сжатия образцов рассчитывали методом отражения по известному значению давления в материале экрана. При этом использовали ударную адиабату монолитной стехиометрической смеси Sn + S, приведенную в [5]:  $D = 2,13 + 1,62U$  [км/с]. Здесь  $D$  — скорость фронта ударной волны,  $U$  — массовая скорость.

Характерные осциллограммы опытов приведены на рис. 2 ( $V$  — регистрируемое напряжение,  $t$  — время).

Проанализируем форму сигнала  $a$ , полученного при  $p_1 = 21$  ГПа и  $p_2 = 32,9$  ГПа. В момент входа ударной волны в образец ( $t_0$ ) появляется положительный сигнал  $\sim 20$  мВ, по порядку величины соответствующий ЭДС, генерируемой металлами. При отражении волны от электрода (время  $t_1$  рассчитывали по скорости ударной волны в смеси) возникает отрицательный импульс с амплитудой более 250 мВ, а затем сигнал меняет полярность. Этот отклик, возникающий при прохождении между электродами отраженной волны, по форме и характерным величинам напряжения имеет сходство с сигналами, генерируемыми образцами, изготовленными из чистого моносulfида олова [8]. Осциллограмма  $b$ , полученная при давлении 25,5 ГПа в первой волне и 39,6 ГПа в отраженной, качественно соответствует предыдущей, за исключением того, что еще при прохождении первой волны возникает короткий положительный импульс с амплитудой 150 мВ. Следует обратить внимание на то, что амплитуды электрических сигналов для отраженной волны значи-

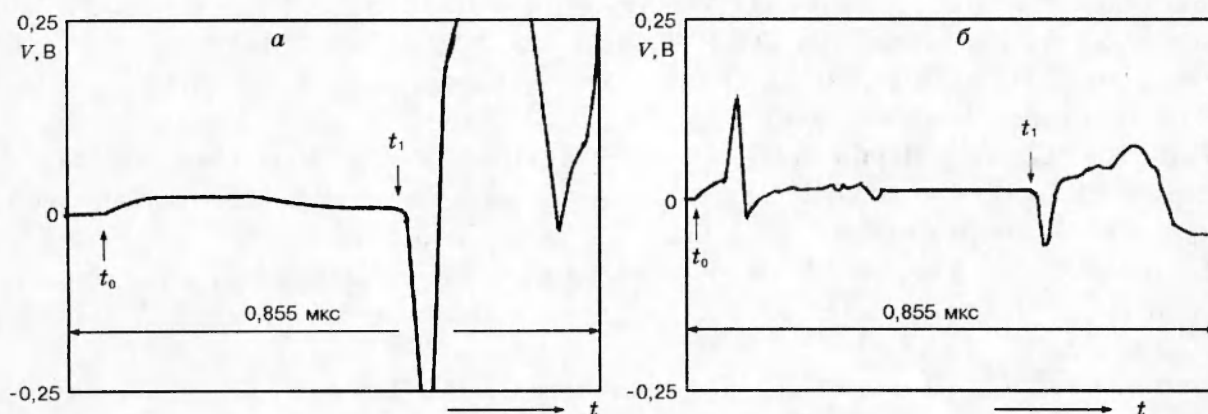


Рис. 2. Экспериментальные осциллограммы:

$t_0$  — вход ударной волны в образец,  $t_1$  — вход отраженной волны в образец; *a*:  $l = 1,84$  мм,  $p_1 = 21$  ГПа,  $p_2 = 32,9$  ГПа; *б*:  $l = 2,27$  мм,  $p_1 = 25,5$  ГПа,  $p_2 = 39,6$  ГПа

тельно меньше, чем в случае осциллограммы *б*. Скорее всего, это следствие более высокой электропроводности вещества за фронтом отраженной волны по сравнению с осциллограммой *а*.

Приведенные на рис. 2 осциллограммы показывают, что ударно-сжатая смесь реагирует на отраженную волну как полупроводниковое вещество. Разумно сделать вывод, что это связано с образованием SnS за фронтом первой волны при указанных амплитудах нагружения (21 и 25,5 ГПа). В рамках качественной модели метода нельзя оценить долю прореагировавшего вещества. Возможно, что реакция прошла лишь на такую глубину, что нарушились только контакты между частицами олова. При этом смесь приобрела полупроводниковые свойства, хотя в ней остался непрореагировавший металлический компонент. В пользу такого предположения свидетельствует короткий импульс в начале осциллограммы *б*. Его появление можно объяснить следующим образом. За фронтом ударной волны смесь перешла в полупроводниковое состояние за счет протекания реакции на небольшую глубину. Однако в какой-то локальной области вещества, контактирующей с поверхностью алюминиевого экрана, произошло очень быстрое завершение синтеза с соответствующим ростом температуры (согласно [1] температура разогрева SnS при протекании синтеза в адиабатических условиях превышает 1470 К). В этом случае по отношению к «горячему очагу» сжатая часть образца представляет собой полупроводниковый термоэлемент, генерирующий сигнал термо-ЭДС. Аналогичная ситуация имела место в экспериментах по сохранению при регистрации синтеза SnS с помощью термоэлемента из моносulfида олова [4], но только быстрое протекание реакции в отдельных очагах наблюдалось в миллисекундном диапазоне.

Таким образом, приведенные данные подтверждают высказанную ранее идею о возможности использования электрического отклика полупроводникового соединения на ударное сжатие как метода для изучения химического взаимодействия в гетерогенных средах за фронтом ударной волны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Набатов С. С., Иванчихина Г. Е., Колесников А. В. и др. Ударно-волновой синтез моносulfида олова // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 2-3. С. 40-48.

2. **Бацанов С. С., Шестакова Н. А., Ступников В. П. и др.** Ударный синтез халькогенидов олова // Докл. АН СССР. 1969. Т. 185, № 2. С. 330–331.
3. **Бацанов С. С., Гурьев Д. Л.** О взаимодействии серы с оловом в ударных волнах // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 2. С. 127–129.
4. **Набатов С. С., Шубитидзе С. О., Якушев В. В.** Использование явления термо-ЭДС в полупроводниках для изучения экзотермических процессов в ампуле сохранения // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 114–116.
5. **Бацанов С. С., Гогоуля М. Ф., Бражников М. А. и др.** Поведение реагирующей системы Sn + S в ударных волнах // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 3. С. 107–112.
6. **Бацанов С. С., Доронин Г. С., Клочков С. В., Теут А. И.** О возможности протекания реакции синтеза за фронтом // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 6. С. 134–137.
7. **Набатов С. С., Лебедев А. В.** Использование электрического отклика полупроводникового соединения для регистрации химического превращения за фронтом ударной волны // Хим. физика. 1994. Т. 13, № 12. С. 175–176.
8. **Набатов С. С., Лебедев А. В.** Термоэлектрические сигналы при ударно-волновом сжатии полупроводникового образца в плоской ампуле сохранения // Хим. физика. 1993. Т. 12, № 2. С. 167–169.

*Поступила в редакцию 29/III 1996 г.,  
в окончательном варианте — 30/X 1996 г.*

---