

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА В ЖИДКОМ ГЕРМАНИИ

Глазов В. М., Ким С. Г., Сулейменов Т.

Разработана методика и создана аппаратура для измерения поглощения звука в высокотемпературных расплавах. Надежность методики установлена путем исследований поглощения звука в воде и в жидком индии. Результаты, полученные на этих веществах, хорошо согласуются с имеющимися литературными данными. Впервые исследована температурная зависимость поглощения звука в жидком германии. Обнаружен аномальный характер этой зависимости в интервале температур $T_{\text{жл}} \div 990$ К, который коррелирует с аномалиями температурной зависимости скорости звука, вязкости, плотности и других свойств и связывается с явлением «послеплавления».

Несмотря на то что германий относится к наиболее изученным полупроводниковым веществам, интерес к нему не ослабевает. Это обусловлено тем, что, являясь простым полупроводником, германий служит ключевым объектом, с которым сравниваются свойства и особенности поведения других более сложных полупроводниковых материалов. Сказанное в полной мере относится и к изучению свойств германия в жидком состоянии [1]. Настоящая работа посвящена исследованию поглощения звука в расплаве германия в широком диапазоне температур.

Экспериментальная техника измерения поглощения ультразвука в высокотемпературных расплавах в настоящее время развита слабо, о чем свидетельствуют крайне ограниченное количество литературных данных по коэффициенту поглощения (α) и отсутствию данных по жидкому германию. В связи с этим нами разработана методика и создана аппаратура для измерения коэффициента поглощения звука в высокотемпературных расплавах. Тепловая часть установки реализована на базе описанных в [2] аппаратуры и методики для исследований акустических свойств электронных расплавов при сравнительно низких ультразвуковых частотах (до $5 \div 7$ МГц). Поскольку поглощение на этих частотах столь мало, что практически не поддается измерениям, необходимо было расширить диапазон частот до $100 \div 120$ МГц. Это потребовало реализации иной схемы электрического тракта прохождения сигнала и применения других более высокочастотных приборов, а также специальной системы подвода и отвода высокочастотного сигнала соответственно к излучающему и приемному пьезопреобразователям.

На рис. 1 представлена функциональная блок-схема установки. Генератор (Г5-54) 1 вырабатывает прямоугольные импульсы длительностью $1 \div 5$ мкс и частотой следования 2 кГц, которые формируют радиоимпульсы из высокочастотного напряжения от генератора синусоидальных сигналов (Г3-19А) 2. От него радиоимпульсы через волновод поступают на излучающий пьезоэлемент 3, который преобразует радиоимпульсы в ультразвуковые импульсы с высокочастотным заполнением. Далее, уже в виде ультразвуковых волн через нижний неподвижный звукопровод 4 зондируется исследуемый расплав 5, размещающийся в контейнере 6. Прошедшие через расплав зондирующие ультразвуковые импульсы посредством верхнего подвижного звукопровода 7 поступают на приемный пьезоэлемент 8, откуда уже в виде радиоимпульсов через волновод поступают на супергетеродинный приемник 9. Высокочастотный генератор 2 и приемник 9 со временем изменяют свои характеристики.

Поэтому для контроля их работы реализована эталонная ячейка 10, представляющая собой звукопровод из того же материала и той же длины, что и звукопроводы 4 и 7 измерительной ячейки с теми же пьезоэлементами, но помещенный в термостат. Таким образом, эталонная ячейка является обычной линией задержки со стабильными характеристиками. Все четыре пьезоэлемента представляют собой шайбы из кварца X-среза и имеют одинаковые толщины с резонансной частотой основной гармоники $f=10$ МГц. Эталонная ячейка подключена параллельно измерительной. Таким образом, на приемник 9 поступают сигналы как с измерительной, так и с эталонной ячеек, но ввиду разных путей пробега волны сигналы эти разделены во времени. От приемника радиосигналы подаются на осциллограф (С1-75) 11, на экране которого высвечиваются сигналы, схематически изображенные на рис. 1 в квадратики, изображающем осцил-

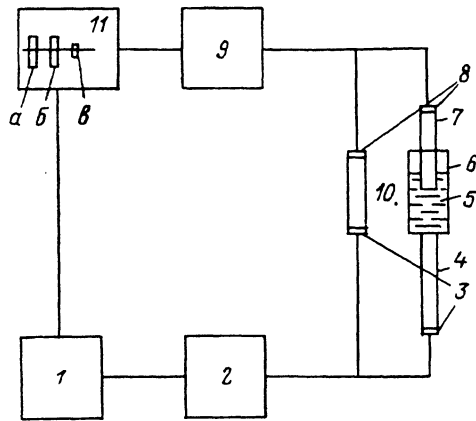


Рис. 1. Функциональная блок-схема установки для измерения поглощения звука в высокотемпературных расплавах.

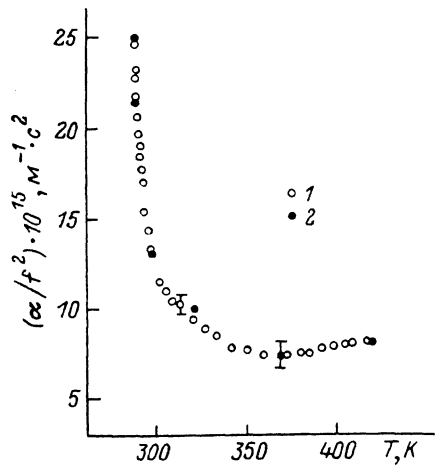


Рис. 2. Измерение поглощения ультразвука в дистиллированной воде.

1 — данные настоящей работы, 2 — результаты [4].

лограф: *a* — эталонный сигнал, *b* — первый сигнал, прошедший зондирующий расплав, *c* — сигнал, отраженный один раз от торца верхнего звукопровода, т. е. сигнал, трижды прошедший толщю расплава между торцами звукопроводов 4 и 7. Конечно, имеются сигналы и более высоких порядков отражения, но амплитуды их очень малы.

Рабочим сигналом является первый, прошедший толщю расплава один раз, зондирующий импульс (*b*). Контроль работы генератора 2 и приемника 9 состоит в том, чтобы следить за амплитудой сигнала, а при необходимости, регулируя резисторами уровней на генераторе и приемнике, доводить его величину до установленного перед началом измерений значения.

Несмотря на то что торцы звукопроводов 4 и 7 обрабатывались до очень высокой степени плоскостности и параллельности с применением оптического контроля при помощи лазерного луча, а соосность звукопроводов достигалась с высокой точностью по максимуму рабочего сигнала, при абсолютных измерениях коэффициента поглощения, заключающихся в измерении амплитуд рабочего сигнала при двух разных положениях верхнего звукопровода и фиксированной температуре, случайные погрешности составляют величину от 5 до 10 %. Такая погрешность при измерении коэффициента поглощения считалась вполне удовлетворительной и даже хорошей [3]. Однако при изучении структурных изменений в расплаве этого явно недостаточно. Поэтому нами разработана иная методика. Сначала измеряется температурная зависимость амплитуды рабочего сигнала при одном фиксированном положении верхнего звукопровода, а затем снимается политерма амплитуды рабочего сигнала при другом фиксированном положении верхнего звукопровода. Коэффициент поглощения

α при любой температуре в исследуемом диапазоне определяется из соотношения

$$\alpha = - \frac{1}{h_2 - h_1} \ln \frac{A_2}{A_1}, \quad (1)$$

где A_1 — амплитуда рабочего сигнала, снятого в нижнем положении верхнего звукопровода, A_2 — амплитуда рабочего сигнала, снятого в верхнем положении звукопровода.

Конечно, такая методика измерения амплитуды рабочего сигнала с существенным временным разрывом (до 5—6 ч) между измерениями в нижнем и в верхнем положениях подвижного звукопровода для одной и той же температуры была бы совершенно неприемлемой при отсутствии контроля работы генератора 2 и приемника 9. Однако эта методика с описанной выше эталонной ячейкой при поддержании постоянства амплитуды эталонного сигнала в течение всего эксперимента по надежности не уступает абсолютным измерениям при фиксированной температуре, а по разбросу экспериментальных точек пре-

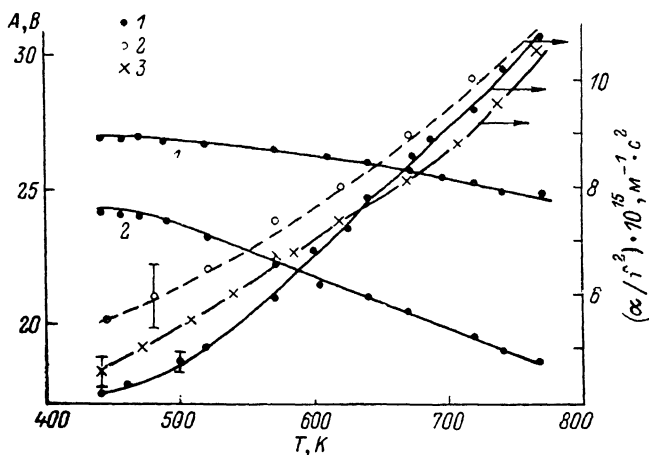


Рис. 3. Измерение поглощения ультразвука в жидком индии.

Кривые 1, 2 — политермы амплитуды звуковых волн, измеренные при нижнем (1) и верхнем (2) положениях подвижного звукопровода. Экспериментальные точки 1—3 соответствуют результатам настоящей работы и работ [3] и [6] соответственно.

восходит последние, поскольку при этом ликвидируются излишние механические перемещения, нарушающие соосность верхнего и нижнего звукопроводов.

Надежность методики оценивается чувствительностью в измерении амплитуды сигнала. На экране осциллографа при помощи калиброванного сигнала, подаваемого на второй вход двухплечевого осциллографа С1-75, можно надежно фиксировать изменения амплитуды с точностью до 0.05 деления (линейный размер деления 1 см) при средней величине рабочего сигнала порядка 5—8 делений сетки экрана, чувствительность в измерении A составляет 0.014 и менее. Изменения же температуры и величины перемещения ($h_2 - h_1$) с помощью ХА-термопары и индикаторного микрометра соответственно можно надежно регистрировать с точностью 0.01 мВ и 0.01 мм при значениях измеряемых величин 40 мВ и 10—50 мм.

Таким образом, чувствительность методики оценивается величиной порядка 0.014. Это в 5—10 раз превосходит чувствительность методик, достигнутых в работах 60-х годов [3].

Для тарировки установки и проверки ее надежности исследовали температурную зависимость коэффициента поглощения звука в дистиллированной воде и в расплаве индия марки Ин-00.

На рис. 2 представлены результаты исследования воды в сравнении с литературными данными [4]. Результаты представлены в обычно принятых величинах α/f^2 , т. е. в нормированных на квадрат частоты значениях коэффициента поглощения звука. Совпадение наших данных с литературными показывает,

что разработанная методика, во-первых, надежна, во-вторых, позволяет изучать структурные изменения, поскольку аномальное уменьшение коэффициента поглощения звука с ростом температуры в воде связано со структурной перестройкой при ее нагреве [4].

Для апробации методики при высоких температурах исследовали еще одно эталонное вещество — индий. На рис. 3 приведены результаты исследований. Политерма 1 проведена через экспериментальные значения амплитуды сигнала при нижнем положении, а политерма 2 — при верхнем положении подвижного звукопровода, отличающемся от нижнего на 20 мм.

Монотонный рост величины поглощения α/f^2 , рассчитанного при помощи соотношения (1) по точкам политерм 1 и 2, при нагревании, по-видимому, характерен для жидкостей, нагрев которых не сопровождается существенными структурными изменениями. На рис. 3 для сравнения представлены также данные работ [3, 5]. Видно, что по общему характеру зависимости наши данные

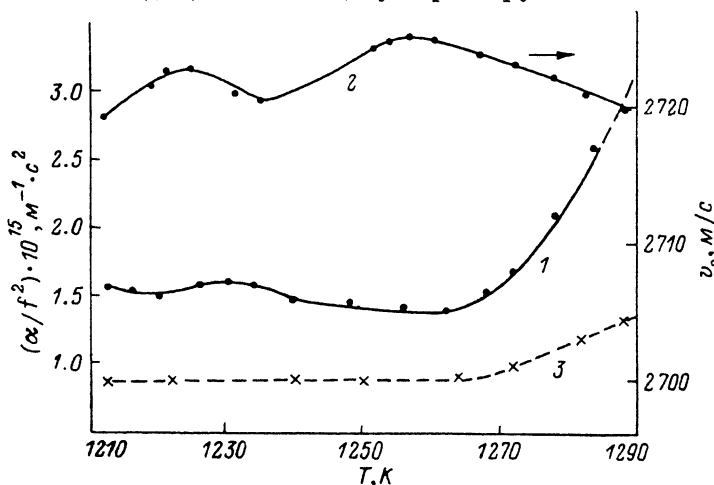


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента поглощения ультразвука в жидком германии.

1 — экспериментальная политерма α/f^2 , 2 — политерма v_s [5], 3 — расчетная политерма α/f^2 .

мало отличаются от литературных. При высоких температурах они занимают промежуточное положение между результатами работ [3] и [5]. В целом можно отметить неплохое согласие полученных нами данных с литературными. Таким образом, и в области высоких температур описанная методика является достаточно надежной.

Для исследования поглощения звука в жидком германии использовали германий марки ГПЗ-1. Измерения проводились при несущей частоте импульсов $f=72$ МГц в атмосфере высокочистого аргона.

На рис. 4 представлены результаты исследований. Видно, что зависимость $\alpha/f^2 \sim f(T)$ носит сложный характер. В интервале $T_{пл} \div 1000$ К наблюдается ясно выраженный максимум величины поглощения, а при дальнейшем нагреве поглощение звука в жидком германии заметно растет, аналогично тому как это имеет место у большинства жидких металлов. Наблюдаемая картина четко коррелирует с результатами исследований вязкости и плотности [6], скорости звука (рис. 4) [7] и объясняется структурными изменениями в жидком германии, связанными с явлением «послеплавления» [8]. Представляет интерес сопоставить полученные результаты с рассчитанными по формуле Стокса — Кирхгофа [9]:

$$\alpha = \frac{2\pi f^2}{\rho v_s^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\chi \tau_p^2 v_s^2 T}{C_p^2} \right), \quad (2)$$

где ρ — плотность, η — динамическая вязкость, χ — теплопроводность, α_p — коэффициент теплового расширения, C_p — теплоемкость, v_s — скорость распространения звука.

Необходимые для расчета экспериментальные значения величин, входящих в соотношение (2), были заимствованы из работ [1, 7]. Результаты расчета представлены на рис. 4 (нижняя кривая). Можно отметить определенное качественное согласие с экспериментальной кривой. Отсутствие изменений α/f^2 в определенном интервале температур выше $T_{пл}$, по всей вероятности, также можно связать с явлением «послеплавления».

Л и т е р а т у р а

- [1] Регель А. Р., Глазов В. М. Физические свойства электронных расплавов. М., 1980. 296 с.
- [2] Глазов В. М., Тимошенко В. И., Ким С. Г. — Зав. лаб., 1985, т. 51, в. 3, с. 22—26.
- [3] Гитис М. Б., Михайлов И. Г., Ниязов С. — Акуст. ж., 1968, т. 14, в. 1, с. 57—61.
- [4] Шляпников В. В. — Автореф. канд. дис. М., 1970.
- [5] Bek R. Untersuchung der Ultraschallausbreitung und der struktur in Bi—In-Schmelzen. Diss. Stuttgart, 1980. 87 p.
- [6] Глазов В. М., Петров Д. А. — Изв. АН СССР, ОТН, 1958, № 2, с. 15—19.
- [7] Глазов В. М., Ким С. Г. — ДАН СССР, 1983, т. 273, в. 2, с. 371—374.
- [8] Регель А. Р., Глазов В. М. Закономерности формирования структуры электронных расплавов. М., 1982. 320 с.
- [9] Михайлов И. Г. Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. М.—Л., 1949. 152 с.

Московский институт
электронной техники

Получена 25.03.1988
Принята к печати 6.05.1988