АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIII 1977 Вып. 3

УДК 534.6:539.32

ОБ ИЗУЧЕНИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А. А. Параджева, Л. П. Филиппов

Описан новый вариант резонансного метода определения модулей упругости. В качестве примера приведены резонансные измерения модуля упругости железа до 600° С.

Для исследования одного из важных вопросов физики твердого тела — вопроса об ангармоничности колебаний решетки — необходимо детальное изучение температурной зависимости модулей упругости в широкой области состояний. Выполнение этой работы требует совершенствования техники эксперимента и, в частности, отработки способов измерений, удобных для использования при температурах порядка тысяч градусов.

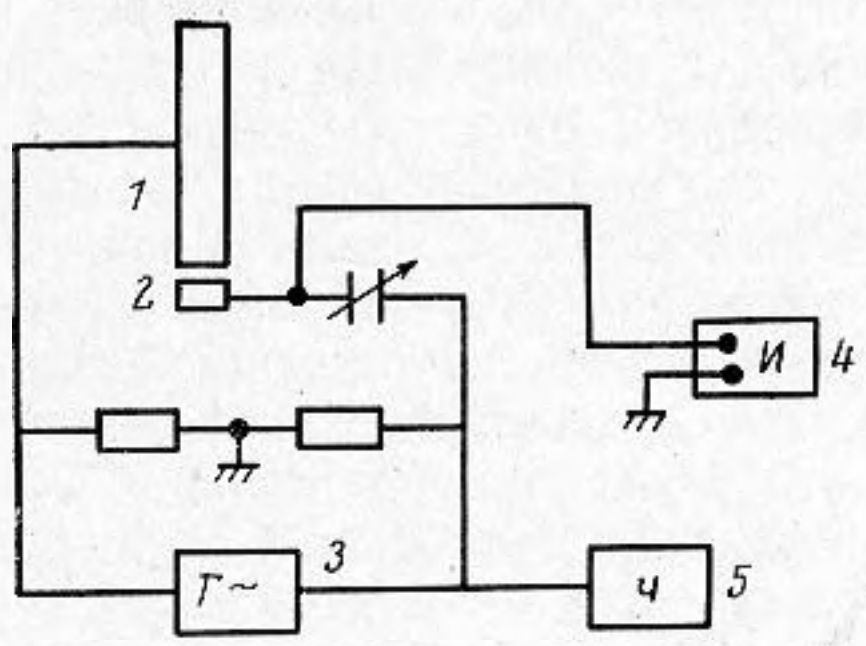
Для области высоких температур наиболее удобным представляется резонансный метод измерений с электростатическим возбуждением колебаний. Этот метод, развитый в работах [1, 2], позволяет обойтись без пьезоэлектрических преобразователей, присутствие которых в зоне высоких температур недопустимо, и не требует введения массивных волноводов, применение которых в таких условиях также весьма нежелательно по причине искажения ими поля температуры, и трудностей, связанных с созданием надежного акустического контакта. В данной статье мы сообщим о новом варианте метода электростатического возбуждения, характерными особенностями которого являются простота измерительной схемы, возможность использования стандартной аппаратуры и применимость в широком интервале температур.

Измерительная ячейка предлагаемой измерительной системы состоит из цилиндрического образца *1* и расположенного вблизи его торца возбуждающего электрода *2*, плоская поверхность которого параллельна торцу образца (фиг. 1). С помощью подведенных к образцу в его середине и к электроду проводов промежуток образец — электрод оказывается включенным в качестве одного из плеч в мостовую схему, на вход которой подается напряжение от генератора переменного тока. (Мы использовали генератор ЗГ-33.) В условиях, когда удвоенная частота генератора близка к одной из резонансных частот образца, колебания последнего приводят к появлению заметной периодической модуляции емкости образец — электрод. Режим работы электрической схемы при этом становится нелинейным, и на выходной диагонали моста появляется дополнительный сигнал комбинационной, утроенной частоты. Если мост уравновешен вблизи основной частоты, эту утроенную частоту не представляет труда зарегистрировать с помощью селективного приемника-измерителя. (Мы использовали для этой цели селективный микровольтметр В6-1.) Таким образом, измерения сводятся к определению частоты генератора, при которой на выходе приемника наблюдается сигнал максимальной величины. (Для измерения частоты мы использовали частотомер типа Ч3-22.)

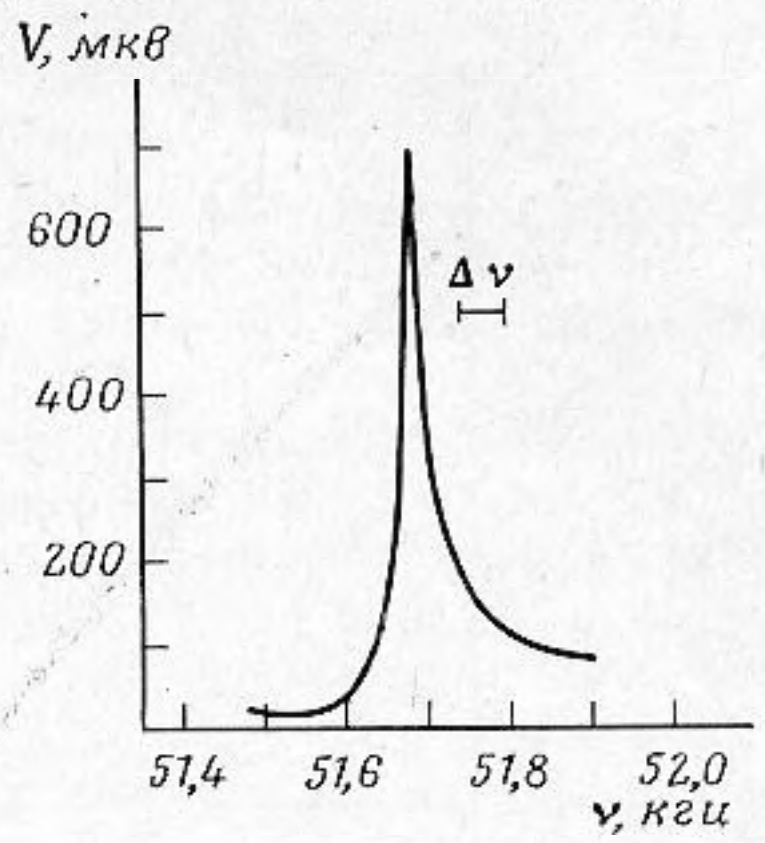
Переход от частот резонанса к модулям упругости производится с помощью известных формул [3]. Измерения с образцами существенно раз-

личных диаметров дают возможность в принципе получить сведения как о модуле Юнга, так и о коэффициенте Пуассона поликристаллических образцов.

Острота резонансных кривых и возможность достаточно точно и просто регистрировать резонансную частоту делают рассматриваемый метод весьма чувствительным. Воспроизводимость резонансных частот составляет сотые доли процента. В качестве примера на фиг. 2 приведена одна



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Измерительная схема: *1* — образец, *2* — возбуждающий электрод, *3* — генератор переменной частоты, *4* — селективный приемник, *5* — частотомер

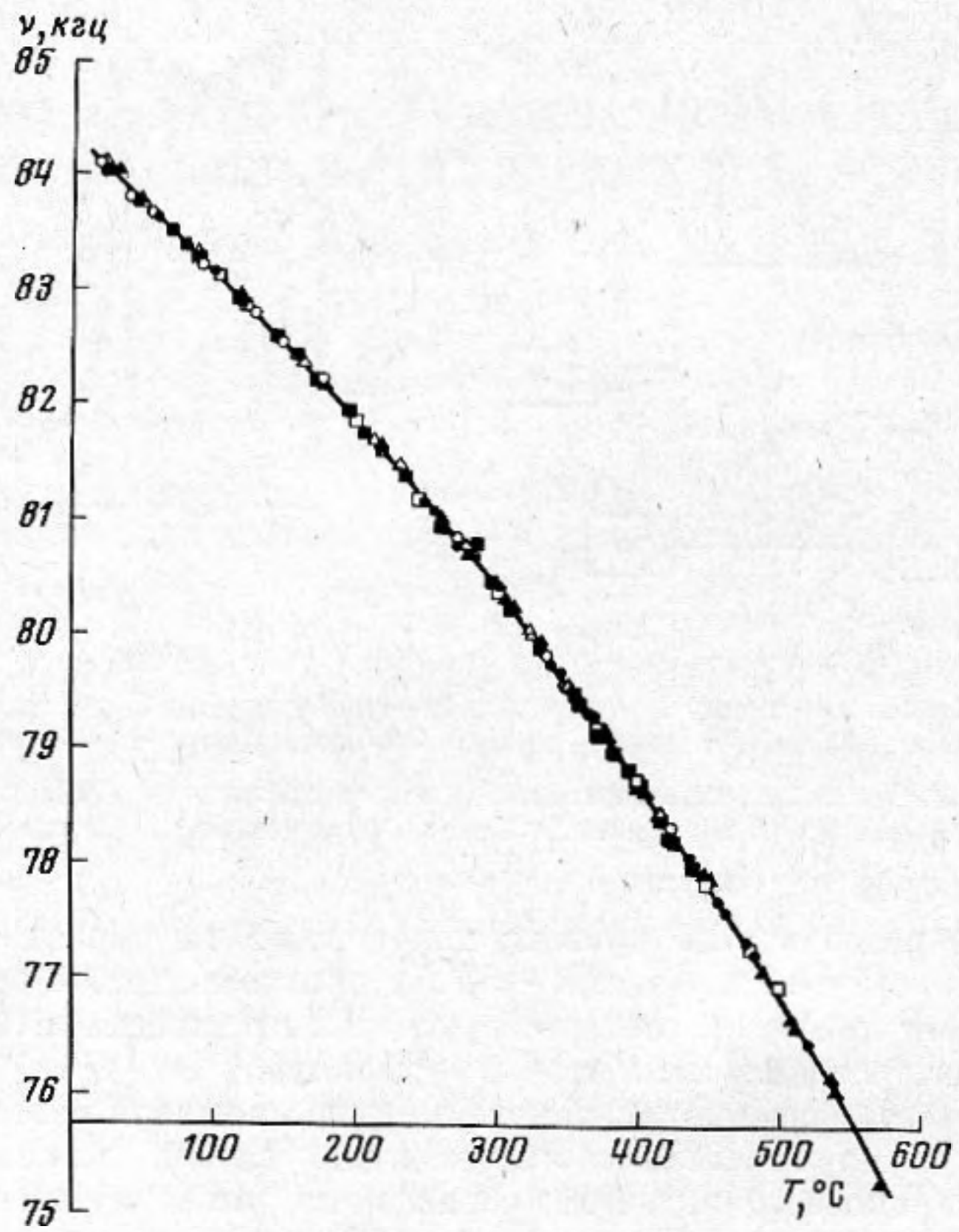
Фиг. 2. Зависимость напряжения на выходе моста от частоты генератора для образца из железа Армко. Интервал Δν отвечает погрешности по частоте 0,1%

из типичных резонансных кривых, полученная на образце из железа Армко диаметром ~6 *мм*, длиной ~50 *мм* при комнатной температуре; на фигуре отмечен интервал, соответствующий погрешности в 0,1%. Возбуждение образца проводилось на второй гармонике.

При разработке рассматриваемого метода много внимания было уделено выбору наилучших способов создания зазора образец — электрод. Сравнивались способы подвески образца на иглах в средней, узловой плоскости над электродом и различные варианты с механическим контактом электрода через прослойки или покрытия из диэлектриков. В результате оказалось, что удобнее всего ставить образец на крупинки порошка тугоплавкой керамики типа алунда, помещаемых на электрод. Торцы образца и электрода шлифовались и полировались на шлифовальном круге. При таком способе установки образца удается получить зазор порядка 10 микрон; емкость образец — электрод составляет в этом случае десятки пикофарад. Многократные опыты показали, что разделяющие крупинки не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на измеряемые значения модулей упругости и коэффициентов внутреннего трения.

Для отработки метода измерений температурной зависимости модуля упругости мы провели исследования поликристаллических образцов железа Армко. Образцы имели форму цилиндров длиной ~30 *мм* и диаметром ~5 *мм*. Измерительная ячейка помещалась в вакуумной камере внутри нагревателя, представляющего собой систему из 12 вольфрамовых проволок, натянутых параллельно образующей образца. Температура измерялась с помощью термопары платина — платинородиевый сплав, провода которой были приварены к середине, т. е. к узловой поверхности образца. В этих опытах изучались следующие вопросы: воспроизводимость измеренных значений резонансных частот при фиксированных температурах, отличающихся от комнатной; степень согласия результатов, полученных при данной температуре в процессе нагревания и в про-

цессе охлаждения образца; воспроизводимость результатов, полученных при разном монтаже системы образец — электрод; влияние высокотемпературного отжига на результаты измерений модуля Юнга; сопоставимость данных, полученных для образцов разных размеров и с помощью разных вариантов метода. Ответы на первые четыре вопроса этой программы иллюстрируются фиг. 3, где изображены результаты определения резонансных частот (по второй гармонике) для одного из образцов. Каждая



Фиг. 3. Температурная зависимость резонансной частоты образца железа Армко (результаты шести серий измерений)

из шести серий измерений соответствует новому монтажу образца на электроде, причем две серии измерений проводились после многочасового отжига образца при 1500° К. Среднее квадратичное отклонение для каждой серии составляет 0,04%.

T, °C	$E \cdot 10^4$, кг/мм²						
	данные авторов		литературные данные				
	$l \approx 30$ мм	$l \approx 20$ мм	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
20	2,087	2,077	2,088	2,088	2,148	2,148	2,217
100	2,037	2,032	2,041	2,041	2,104	2,104	2,180
200	1,972	1,966	1,983	1,983	2,035	2,035	2,101
300	1,900	1,891	1,917	1,911	1,961	1,956	2,011
400	1,817	1,810	1,851	1,830	1,879	1,871	1,923
500	1,732	1,720	1,779	1,739	1,793		1,833
600	1,633	1,610	1,703	1,600	1,699		1,726

Результаты измерений температурной зависимости модуля Юнга E для двух образцов длиной $l \approx 30$ и 20 *мм* приведены в таблице.

Данные для образца с $l \approx 30$ *мм* получены описанным выше методом; для образца с $l \approx 20$ *мм* был использован метод измерений с двумя электродами [2]. В последнем случае электрод на одном торце служил для возбуждения колебаний, и к нему прикладывалось переменное напряжение от генератора. Электрод на втором торце использовался для регистрации колебаний: последовательно с сопротивлением он подключался к источнику постоянного напряжения и периодический сигнал с сопротивления усиливался и регистрировался приемником. Вариант с двумя электродами требует более сложного монтажа образца, но он менее чувствителен к качеству изоляции промежутка образец — электрод.

При расчете модулей упругости учитывалось тепловое расширение образца по данным работы [9].

В таблице видно, что полученные нами результаты во всем изученном интервале температур очень близки к результатам работы [5].

При обсуждении полученного материала мы обратили внимание на отсутствие вытекающего из формул работ [10, 11] параллелизма температурных зависимостей модуля Юнга и обратного коэффициента теплового расширения. Монотонное убывание модуля Юнга с температурой не дает возможности объяснить существование максимума на кривой температурного расширения железа [9].

Отдельные эксперименты, проведенные с участием Г. И. Петрунина, показали возможность использования описанного метода и для изучения модулей упругости диэлектриков. В этих экспериментах измерялся модуль Юнга на стержне из плавленого кварца, один торец которого был металлизирован.

ЛИТЕРАТУРА

1. *P. G. Bordoni.* Metodo elettroacustico per ricerche sperimentali sulla elasticita. Nuovo cimento, 1947, *4*, 3—4, 177—200.
2. *P. G. Bordoni, N. Nuovo.* A tuned capasitive detector for high frequency vibrations. Acustica, 1958, *8*, 6, 351—362.
3. *L. Pochhammer.* Uber die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten kleiner Schwingungen in einem unbegrenzten isotropen Kreiscylinder. J. Reine Angew. Math., 1876, *81*, 324—336.
4. *В. М. Амоненко, Б. И. Шаповал, В. В. Лебедев.* Температурная зависимость внутреннего трения и упругих постоянных чистого железа. Физ. металлов и металловед., 1959, *8*, 2, 249—254.
5. *Р. И. Гарбер, А. И. Ковалев.* Исследование температурной зависимости модулей упругости железа. Заводск. лаборатория, 1958, 4, 477—479.
6. *W. Köster.* Betrachtungen über den Elastizitätsmodul der Metalle und Legierungen. Z. Metallkunde, 1948, *39*, 5, 145—158.
7. *O. Engler.* Der Elastizitätsmodul ferromagnitischer Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur und von Magnetfeld. Ann. Phys., 1938, *31*, 5, 145—163.
8. *М. Г. Лозинский.* Строение и свойства металлов и сплавов при высоких температурах. М., Металлургиздат, 1963.
9. *С. И. Новикова.* Тепловое расширение твердых тел., М., «Наука», 1974.
10. *Я. И. Френкель.* Введение в теорию металлов. Л., «Наука», 1972.
11. *В. С. Нешпор.* О связи между некоторыми термическими характеристиками твердых тел. Физ. металлов и металловед., 1959, *7*, 4, 559—564.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
физический факультет

Поступила
15 марта 1976 г.