

УДК 538.951

© 1990

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА $\text{FeGe}_2$

*К. Б. Власов, Е. В. Устелемова, Р. И. Зайнуллина,  
М. А. Миляев, С. В. Устелемов*

Приведены результаты исследования методом составного вибратора температурных зависимостей скоростей распространения продольных ультразвуковых волн и внутреннего трения  $Q^{-1}$  монокристалла  $\text{FeGe}_2$  вдоль трех кристаллографических осей [100], [001] и [110]. В области температур магнитных фазовых переходов  $T_1 = 265$  и  $T_2 = 287$  К обнаружены  $\lambda$ -подобные уменьшения скоростей звука. Температурная зависимость  $Q^{-1}$  при  $T < T_2$  имеет аномальный (осцилляционный) характер. Причиной осцилляций внутреннего трения, по-видимому, являются осцилляции пространственных производных намагниченности, обусловленные серией фазовых переходов соизмеримая—несоизмеримая магнитные структуры.

Соединение  $\text{FeGe}_2$  (пространственная группа  $D_{4h}^{19}$ ) имеет два магнитных фазовых перехода при  $T_1 = 265$  и  $T_2 = 287$  К. Согласно нейтронографическим исследованиям [1], в нем с понижением температуры реализуется следующая последовательность магнитных структур: парамагнетизм ( $T > T_2$ )—несоизмеримая структура ( $T_1 < T < T_2$ )—коллинеарная антиферромагнитная структура ( $T < T_1$ ). В магнитоупорядоченных состояниях моменты лежат в базисной плоскости. Однако обнаруженные нами [2-4] осцилляционная зависимость интегральных интенсивностей брэгговских рефлексов, ступенчатый характер температурных зависимостей параметров решетки, осцилляционная температурная зависимость магнитной восприимчивости позволяют предположить, что при  $T < T_1$   $\text{FeGe}_2$  обладает более сложной магнитной структурой и существенную роль играет сильная связь магнитной и кристаллической структур. Перечисленные особенности исследованных характеристик в [5] объясняются исходя из предположения о наличии нескольких взаимодействующих подсистем, в одной из которых с изменением температуры осуществляется серия фазовых переходов соизмеримая—несоизмеримая магнитные структуры.

Исходя из информативности ультразвуковых исследований, их чувствительности к различного рода фазовым переходам, нами были приняты измерения скорости распространения продольных ультразвуковых волн (УЗВ) и внутреннего трения монокристаллов  $\text{FeGe}_2$  вдоль разных кристаллографических направлений.

### 1. Методика эксперимента

Для измерения скорости распространения продольных УЗВ  $v$  и внутреннего трения  $Q^{-1}$  применялся метод составного вибратора. Резонансная частота составных вибраторов 65—70 кГц. Продольные ультразвуковые волны возбуждались кварцевыми пьезовибраторами X-среза. Для исследования  $v$  и  $Q^{-1}$  использовались монокристаллы  $\text{FeGe}_2$ , выращенные из расплава по методу Чохральского в направлениях [100], [001] и [110] на кафедре общей физики УПИ. Из них вырезались прямоугольные образцы размеров  $3 \times 3 \times 40$  мм, ориентированные вдоль выбранных кристаллографических направлений с точностью около  $1^\circ$ . Измерения температурной

зависимости скорости распространения звука и внутреннего трения проводились в цикле нагрева с интервалом 0.5 К со средней скоростью нагрева образца 6 град/ч. Измерения осуществлялись в атмосфере газообразного гелия при постоянном давлении. Заданная температура поддерживалась с точностью  $\pm 0.1$  К. Ошибка в определении относительного изменения скорости распространения продольных УЗВ под действием температуры не превышала  $10^{-3}$  %.

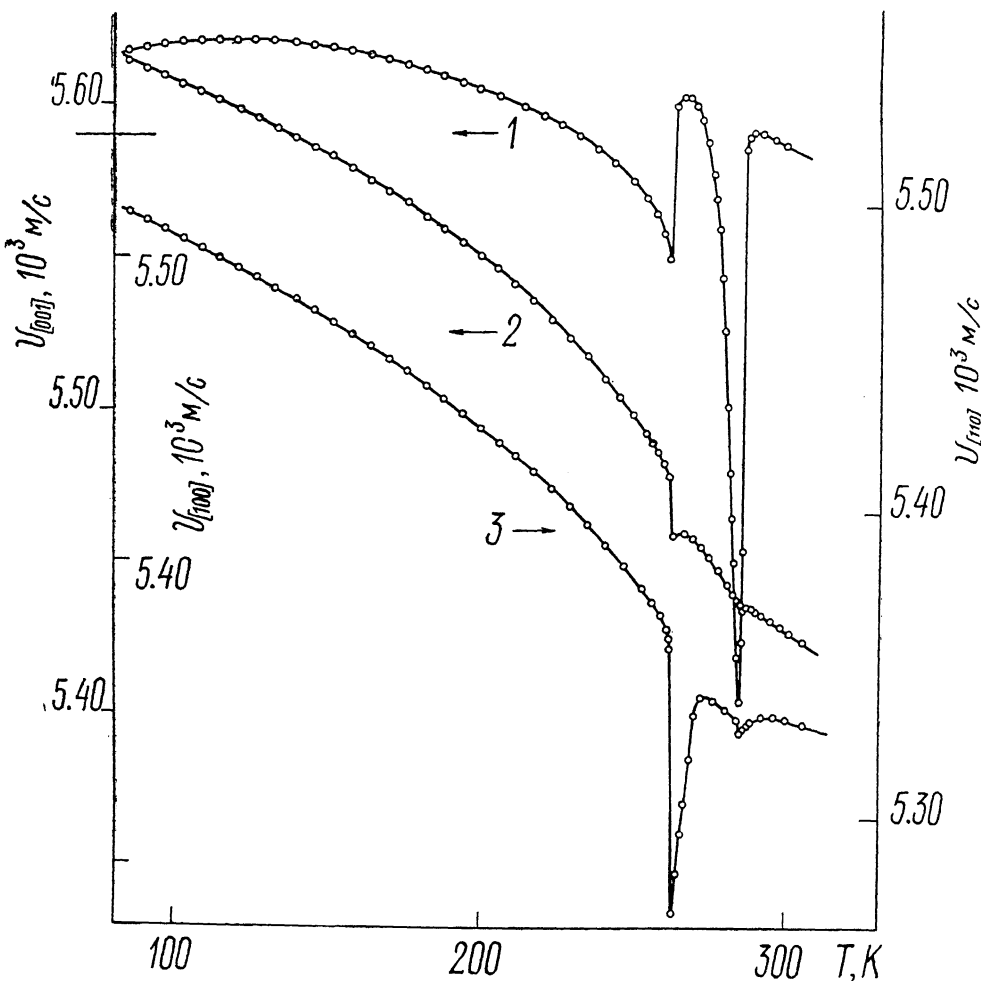


Рис. 1.

## 2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости скоростей распространения продольных УЗВ вдоль кристаллографических осей [100] (1), [001] (2) и [110] (3). Видно, с понижением температуры наблюдается анизотропное возрастание скорости звука: наибольшее — вдоль оси [001], наименьшее — вдоль [100]. В области температур магнитных фазовых переходов  $T_1$  и  $T_2$  наблюдаются анизотропные  $\lambda$ -подобные уменьшения скоростей звука. При  $T_1$  наибольшее уменьшение обнаруживается при распространении УЗВ вдоль оси [110] ( $\Delta v/v=1.7$  %) и наименьшее — вдоль [001] ( $\Delta v/v=0.37$  %). При  $T_2$  на температурных зависимостях скоростей распространения продольных УЗВ наблюдаются малые аномалии вдоль осей [110] и [001] и большая аномалия вдоль [100], достигая  $\Delta v/v=4.4$  %.

Следует отметить, что аномалии на температурных зависимостях скоростей распространения продольных УЗВ вдоль разных кристаллографи-

ческих осей проявляются при обеих температурах  $T_1$  и  $T_2$ , тогда как при высоких частотах (10—20 МГц) в работах [6, 7] на температурных зависимостях скоростей распространения продольных УЗВ аномалии обнаружены только при температуре  $T_1$  вдоль оси [001] и только при  $T_2$  вдоль [100].

На рис. 2 приведены температурные зависимости внутреннего трения  $Q^{-1}$  при распространении продольных УЗВ вдоль кристаллографических осей [100] (1), [001] (2) и [110] (3). В отличие от температурных зависимостей скоростей распространения продольных УЗВ температурная зависимость внутреннего трения при  $T < T_1$  имеет аномальный (осцилляционный)

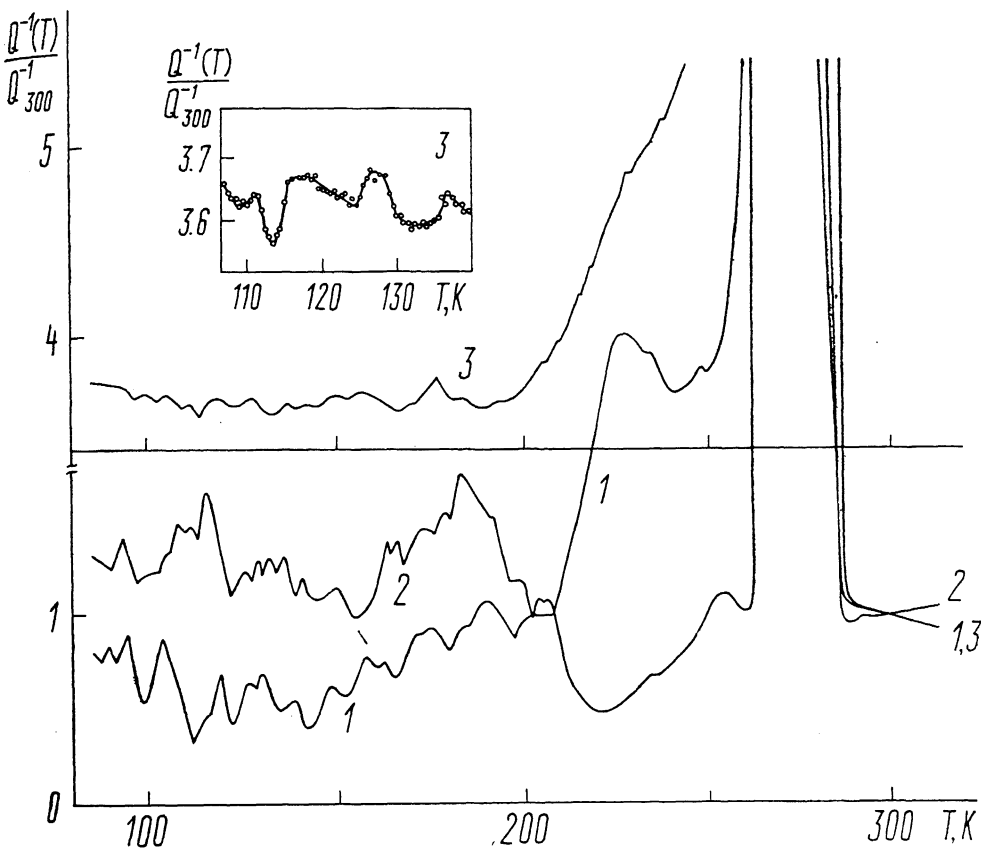


Рис. 2.

характер. Осцилляции  $Q^{-1}$  при распространении УЗВ вдоль разных осей отличаются друг от друга и по форме, и по амплитуде. Амплитуда осцилляций  $Q^{-1}$  вдоль оси [110] мала по сравнению с амплитудами осцилляций  $Q^{-1}$  в других направлениях. При распространении продольных УЗВ вдоль осей [100] и [001] во всем исследованном интервале  $T < T_1$  не наблюдается роста неосциллирующей части внутреннего трения  $Q^{-1}$  по сравнению с  $Q^{-1}$  в парамагнитной области, в то время как вдоль оси [110] эта часть  $Q^{-1}$  возрастает более чем в 3 раза.

На рис. 3 приведены температурные зависимости внутреннего трения  $Q^{-1}$  при распространении продольных УЗВ вдоль осей [100] (1), [001] (2) и [110] (3) в интервале температур между  $T_1$  и  $T_2$ . В этом температурном интервале  $Q^{-1}$  на порядки величин превышает  $Q^{-1}$  при  $T < T_1$  и обнаруживается сильная анизотропия внутреннего трения. Так, на кривой  $Q_{[110]}^{-1}(T)$  при  $T_1 = 263$  К наблюдается резкий рост, а с дальнейшим повышением температуры до  $T_2$  — постепенное уменьшение внутреннего трения. На кривой же  $Q_{[100]}^{-1}(T)$  при  $T_1$  имеет место небольшой максимум, затем рост внутреннего трения  $Q^{-1}$  с повышением температуры и резкое

его уменьшение при  $T_2 = 286$  К. В интервале температур  $T_1 < T < T_2$  максимальные значения  $Q^{-1}(T)$  вдоль разных осей отличаются на порядки величин, при этом  $Q_{[100]}^{-1} > Q_{[110]}^{-1} > Q_{[001]}^{-1}$ . На этом большом фоне также проявляются слабые осцилляции  $Q^{-1}$  (см. вставку к рис. 3).

В парамагнитной области ( $T > T_2$ )  $Q^{-1}$  практически не зависит от температуры.

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить исходя из сделанного в [5] предположения о наличии в  $\text{FeGe}_2$  по крайней мере трех взаимодействующих подсистем: упругой, магнитной подсистемы локализованных электронов и магнитной подсистемы коллективизированных электронов.

Предполагается, что при  $T > T_1$  подсистема локализованных электронов находится в разупорядоченном состоянии, в то время как при  $T < T_1$  эта подсистема имеет коллинеарную антиферромагнитную структуру с вектором антиферромагнетизма  $\mathbf{L}$  в базисной плоскости. В этой подсистеме при  $T = T_1$  происходит магнитный фазовый переход 1 рода. В подсистеме же коллективизированных электронов при  $T \leq T_2$  возникает модулированная магнитная структура, которая сохраняется и при  $T < T_1$ . Сильная магнитоупругая связь между магнитной подсистемой коллективизированных электронов и кристаллической решеткой, по-видимому, приводит к существованию несоизмеримых кристаллической и магнитной структур при  $T < T_2$ .

Согласно [1], при  $T_1 < T < T_2$  несоизмеримая магнитная структура

представляет собой плоскую спираль с вектором модуляции вдоль оси [100]. Можно полагать, что наблюдаемая нами большая анизотропия внутреннего трения в этом интервале температур обусловлена существованием доменов плоской спирали.

В случае, когда длина продольной УЗВ значительно превышает размеры доменов, соприкасающиеся домены находятся под воздействием однородных, но периодических во времени напряжений, сопровождающих упругую волну. Из-за возникающих при этом различий в величинах плотностей магнитоупругой энергии соприкасающихся доменов [8] происходит взаимное изменение их объемов за счет смещения границ между ними. Смещение границ сопровождается при этом поглощением энергии, например, из-за флуктуационного последействия и т. д.

При распространении продольной УЗВ вдоль оси [100] ее волновой вектор ориентирован неэквивалентно по отношению к векторам модуляции соприкасающихся доменов, ориентированных вдоль осей [100] и [010]. Так как плотность магнитоупругой свободной энергии должна зависеть от взаимной ориентации волнового вектора УЗВ и вектора модуляции в доменах, то это приведет к периодическому во времени взаимному изменению их объемов и смещению границ между ними.

В случае распространения продольных УЗВ вдоль осей [001] и [110] их волновой вектор ориентирован симметричным образом по отношению к векторам модуляции соприкасающихся доменов: в первом случае он перпендикулярен, а во втором — под углом  $45^\circ$  к ним. Поэтому при прохождении ультразвука соприкасающиеся домены остаются в эквивалентных условиях, не меняют своих объемов и не происходит смещения границ

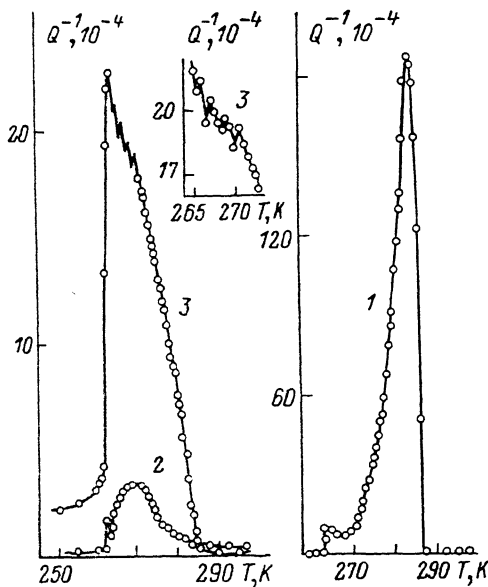


Рис. 3.

между ними, а следовательно, не должно возникать внутреннего трения, обусловленного смещениями границ. Это согласуется с экспериментальными данными, согласно которым внутреннее трение  $Q_{[100]}^{-1}$  при распространении продольной УЗВ вдоль оси [100] на порядки величин превышает внутренние трения  $Q_{[001]}^{-1}$  и  $Q_{[110]}^{-1}$ .

При  $T < T_1$ , как уже было сказано, сосуществуют две магнитные подсистемы локализованных и коллективизированных электронов. Основные неосциллирующие магнитные свойства, а также монотонная часть внутреннего трения, по-видимому, обусловлены антиферромагнитной структурой  $d$ -электронов с вектором антиферромагнетизма  $L$ , направленным вдоль оси [110]. При наличии доменов этой структуры внутреннее трение должно быть большим вдоль оси [110] по сравнению с внутренним трением в других направлениях. Это предположение подтверждается экспериментально.

Осцилляции внутреннего трения с изменением температуры, по-видимому, обусловлены осцилляциями с температурой пространственных производных намагниченности  $M_n^0$  периодической структуры, оказывающими влияние на упругую и магнитоупругую энергии возмущенного состояния [9]. Осцилляции же производных  $M_n^0$  с температурой обусловлены серией фазовых переходов соизмеримая—несоизмеримая магнитные структуры [5].

#### Список литературы

- [1] Corliss L. M., Hastings J. M., Kunmann W., Thomas R., Zhuang J., Butera R., Mukamel D. // Phys. Rev. 1985. V. 31. N 7. P. 4337—4346.
- [2] Зайнуллина Р. И., Власов К. Б., Устелемова Е. В., Мильяев М. А., Сыромятников В. Н. // ФММ. 1987. Т. 64. № 5. С. 1019—1021.
- [3] Зайнуллина Р. И., Мильяев М. А., Устелемова Е. В., Власов К. Б., Сыромятников В. Н. // ФММ. 1988. Т. 66. № 5. С. 892—895.
- [4] Зайнуллина Р. И., Мильяев М. А., Сыромятников В. Н. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 4. С. 246—248.
- [5] Zainullina R. I., Vlasov K. B., Milyaev M. A., Ustelemova E. V., Syromyatnikov V. N. // Phys. St. sol. (b). 1989. V. 155. P. 317—323.
- [6] Зиновьева Г. П., Михельсон А. В., Андреева Л. П., Кренцис Р. П., Гельд П. В. // ФТТ. 1972. Т. 14. № 5. С. 1578—1581.
- [7] Pluzhnikov V., Feder D., Fawcett E. // J. Magn. Magn. Mater. 1982. V. 27. N 3. P. 343—346.
- [8] Sharira Y. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 4. P. 1588—1594.
- [9] Бучельников В. Д., Шавров В. Г. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 5. С. 81—86.

Институт физики металлов  
УрО АН СССР  
Свердловск

Поступило в Редакцию  
13 ноября 1989 г.