

ядром Nb (1). При этом значение  $g_y$  будет максимальным, а его направление задается положением ядра Nb (2). Значение  $g_x$  будет близким к чисто спиновому, а его направление совпадает с направлением оси  $p$ -дырки. Принципиальным отличием  $O_{II}$  центров от  $O^-$  центров является то, что первые представляют собой дефекты, стабилизированные вакансией лития в ближайшем окружении (рис. 2), в то время как последние — samozахваченные дырки [8].

#### Список литературы

- [1] Корради Г., Полгар К., Зарицкий И. М., Ракитина Л. Г., Дерюгина Н. И. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 9. С. 115—122.
- [2] Schirmer O. F., Donnerberg H. J., Wohlecke M., Grabmaier B. C., Kuznetsov A. I. // Symp. Phys. Opt. Cryst. Budapest, Hungary, 1989. P. 8.
- [3] Rakitina L. G., Zaritskii I. M., Polgar K. // Appl. Magn. Res. 1991. V. 1. N 1.
- [4] Schirmer O. F., von der Linde D. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 1. P. 35—38.
- [5] Halliburton L. E., Sweeney K. L., Chen C. Y. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1984. V. B1. N 2—3. P. 344—347.
- [6] Bartram R. H., Swenberg C. E., Fournier J. T. // Phys. Rev. 1965. V. 139. N 3A. P. A941—951.
- [7] Du Varney R. C., Niclas J. R., Spaeth J.-M. // Phys. Stat. Sol. B. 1965. V. 128. N 2. P. 673—681.
- [8] Ракитина Л. Г., Зарицкий И. М., Корради Г., Полгар К. // ФТТ. 1990. Т. 31. № 4. С. 1112—1115.

Институт полупроводников АН УССР  
Киев

Поступило в Редакцию  
12 февраля 1991 г.

© Физика твердого тела, том 33, № 7, 1991  
Solid State Physics, vol. 33, N 7, 1991

## МАГНИТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА И ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ ВЫСОКОЧИСТОГО ГАДОЛИНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 4.2—350 К

*В. Ю. Бодряков, С. А. Никитин, А. М. Гишин*

Предлагаемая работа посвящена исследованию зависимостей модуля Юнга  $E$  и внутреннего трения  $Q^{-1}$ , измеренных методом изгибных автоколебаний образца-пластинки на частотах  $\sim 1$  кГц, для высокочистого поликристаллического гадолиния в области температур 4.2—350 К и магнитных полей до 1.3 Тл.

Как было установлено в результате нейтронографических исследований [1] и измерений констант анизотропии [2, 3], гадолиний ферромагнитно упорядочивается при температуре Кюри  $T_c \sim 293$  К с магнитными моментами атомов, лежащими вдоль гексагональной оси  $c$ . При температуре  $T_r \sim 230$  К происходит изменение направления оси легкого намагничивания и магнитные моменты отклоняются от оси  $c$  на угол  $\theta$ , зависящий от температуры. Исследования магнитных, электрических, тепловых и механических свойств гадолиния показывают наличие особенностей в поведении этих свойств в окрестности температуры Кюри  $T_c$  и температуры спиновой переориентации  $T_r$ . Подробный обзор этих исследований можно найти в [4]. Исследование упругих констант, а также параметров, характеризующих неупругие, диссипативные свойства гадолиния, выполнено [4, 5] с помощью ультразвуковой техники на частотах 1—100 МГц. Однако на таких высоких частотах может теряться часть информации о свойствах вещества, характерные времена релаксации которых больше периода колебаний ультразвуковой волны.

В нашей работе применены методы [6] измерения модуля Юнга  $E$  посредством измерения частоты автоколебаний образца-пластинки, возбужденных электростатическим способом. Внутреннее трение  $Q^{-1}$  определялось по числу затухающих колебаний пластинки между двумя заданными уровнями амплитуд после прерывания цепи обратной связи. Магнитное поле прикладывалось вдоль длинной оси колеблющейся пластинки. Температура измерялась с помощью медно-константановой термодпары.

Точность определения модуля Юнга равна 2 %, а его изменения — 0.002. Внутреннее трение определялось с точностью 3 %.

Образец представлял собой пластинку, вырезанную из слитка высокочистого (содержание примесей на уровне  $10^{-2}$ — $10^{-6}$  ат.%) поликристаллического отожженного гадолиния, полученного методом двойной вакуумной дистилляции. Отжиг проводился при 700 °С в течение 4 ч. Был исследован также неотожженный образец того же материала.

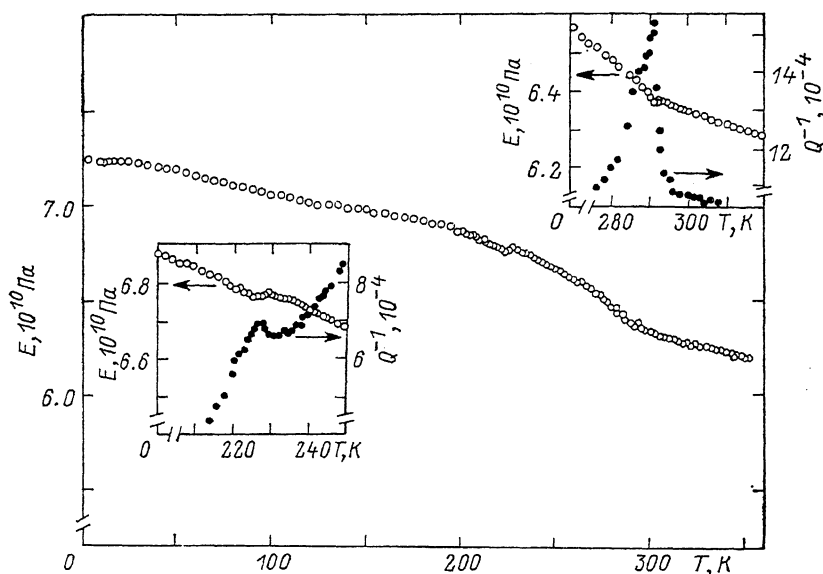


Рис. 1. Температурные зависимости модуля Юнга  $E$  и внутреннего трения  $Q^{-1}$  высокочистого поликристаллического гадолиния в отсутствие магнитного поля.

На рис. 1 представлена температурная зависимость модуля Юнга  $E(T)$  в температурном интервале 4.2—350 К. Видно, что на кривой  $E(T)$  наблюдается сравнительно слабо выраженные минимумы в районе спин-переориентационного перехода с температурой перехода  $T_r=228$  К и в районе перехода парамагнетизм—ферромагнетизм гадолиния с температурой перехода  $T_c=292.5$  К. Кроме того, в точке Кюри происходит заметное изменение наклона кривой  $E(T)$ . Области вблизи температур  $T_r$  и  $T_c$  увеличены и представлены на вставках к рис. 1. Слабый излом кривой  $E(T)$  можно наблюдать также около 120 К. На монотонно уменьшающуюся с понижением температуры зависимость внутреннего трения  $Q^{-1}(T)$  накладывались острые максимумы, приходящиеся на температуры указанных магнитных переходов. Ход кривых  $Q^{-1}(T)$  в районе этих переходов также показан на вставках к рис. 1. Необходимо отметить, что наши исследования указывают на наличие незначительного температурного гистерезиса в ходе кривых  $E(T)$  и  $Q^{-1}(T)$  при температурах, меньших температуры Кюри.

Изотермы зависимостей модуля Юнга  $E$  от внешнего магнитного поля  $B$  ( $\Delta E$ -эффект) приведены на рис. 2. Как видно из этого рисунка, в исследованном интервале полей до 1.3 Тл при температурах, превышающих температуру Кюри  $T_c$ ,  $\Delta E$ -эффект весьма мал и становится заметным лишь при охлаждении ниже  $T_c$ . В интервале температур 250—270 К происходит

смена знака кривизны зависимостей  $E(B)$ . Во всем указанном диапазоне полей и температур наблюдается рост модуля Юнга с увеличением поля (положительный  $\Delta E$ -эффект). На вставке к рис. 2 приведены температурные зависимости модуля Юнга в присутствии постоянного магнитного поля. Следует отметить более быстрый рост в большем поле модуля Юнга с понижением температуры.

Зависимости  $E(T)$  и  $Q^{-1}(T)$  для образца, не прошедшего отжиг, имели тот же характер, что и после отжига; в частности, для модуля Юнга результаты согласуются количественно с точностью не хуже 2%. Однако в точках магнитных фазовых переходов в первом случае на зависимости  $E(T)$  не наблюдалось ярко выраженных минимумов, а на зависимости  $Q^{-1}(T)$  — максимумов.

Обсуждаемые здесь результаты изучения упругих свойств гадолиния находятся в качественном согласии с результатами Розена [5]. Тем не менее необходимо отметить и ряд отличий. Во всем температурном диапазоне значения модуля Юнга, найденные Розеном, меньше определенных нами (на 10—20%). Так, при  $T=4.2$  К, по нашим данным, модуль Юнга  $E=7.24 \cdot 10^{10}$  Па, а внутреннее трение  $Q^{-1} \approx 10^{-4}$ . По данным Розена, при  $T=4.2$  К значение модуля Юнга составляет  $E=6.27 \cdot 10^{10}$  Па. Глубина минимумов на кривых  $E(T)$  в  $T_r$  и  $T_c$  у Розена в несколько раз больше

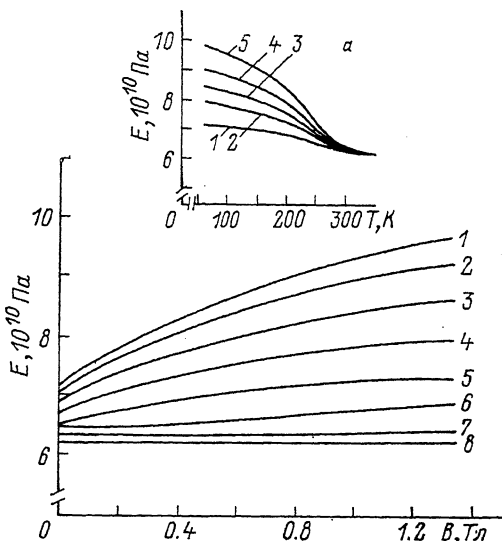


Рис. 2. Полевые зависимости модуля Юнга высокочистого поликристаллического гадолиния.

$T$ , К: 77.5 (1), 128 (2), 178 (3), 219 (4), 252 (5), 270 (6), 302 (7), 350 (8). а: 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.4, 4 — 0.7, 5 — 1.3 Тл.

наблюдаемых нами. Возможно, это связано с большей чистотой исследованных нами образцов [7]. Обнаруженный Розеном минимум на кривой  $E(T)$  вблизи 15 К нами не наблюдался. В результатах изучения неупругих свойств гадолиния имеются существенные качественные расхождения наших результатов с приводимыми в [5]. Согласно Розену, изучавшему температурные зависимости коэффициентов затухания продольной и поперечной ультразвуковых волн, коэффициенты затухания при уменьшении температуры ниже комнатной несколько возрастают, пройдя через острые максимумы в  $T_c$  и  $T_r$ , а при температурах ниже примерно 180 К, меняются слабо до 15 К, где вновь проходят через острые максимумы. В то же время определенное нами внутреннее трение  $Q^{-1}$  с понижением температуры в исследованном температурном диапазоне уменьшается более чем на порядок, как и в [5], проходя через максимумы в  $T_c$  и  $T_r$ . Максимум  $Q^{-1}(T)$  при  $T=15$  К нами не наблюдалось. Наблюдаемая Розеном высота максимумов коэффициентов затухания ультразвуковой волны в  $T_r$  заметно превосходила высоту максимумов в  $T_c$ ; напротив, согласно нашим результатам, высота максимума  $Q^{-1}(T)$  в  $T_c$  примерно на порядок превосходит высоту максимума в  $T_r$ .

Таким образом, в данной работе впервые проведено исследование упругих и неупругих свойств высокочистого поликристаллического гадолиния на звуковых частотах  $\sim 1$  кГц. Обнаружено, что характер температурных зависимостей  $E(T)$  и  $Q^{-1}(T)$  существенным образом отличается от результатов, полученных с помощью ультразвуковой техники, и зависит от степени совершенства структуры образца.

Авторы благодарят О. Д. Чистякова за предоставление высококчистого образца гадолиния.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Cable J. M., Wollan E. O. // Phys. Rev. 1968. V. 165. P. 733—734.
- [2] Corner W. D., Tanner B. K. // Phys. C. Solid State Phys. 1976. V. 9. P. 627—633.
- [3] Low K. S., Martin D. J. // J. Magn. and Magn. Mater. 1981. V. 25. P. 194—196.
- [4] С. А. Никитин. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. М., 1989. 248 с.
- [5] Rosen M. // Phys. Rev. 1968. V. 174. P. 504—514.
- [6] Шубин В. В. // Автореф. канд. дис. М., 1986. 18 с.
- [7] Savage S. J., Palmer S. B. // Phys. Lett. 1977. V. 60A. P. 358—360.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
4 марта 1991 г.