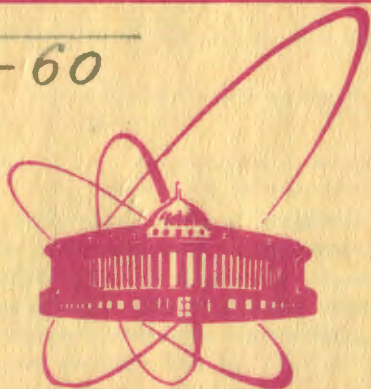


K-60



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

27

2446/2-81

18/5-81

P8-81-68

М.Колач, Б.С.Неганов, В.Н.Трофимов.

АТЕРМИЧЕСКАЯ НЕУПРУГАЯ РЕЛАКСАЦИЯ
В НЕИДЕАЛЬНЫХ
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ДО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Направлено в ЖЭТФ

1981

При изучении расхождения между теоретическим и общепринятым практическим пределами паразитного теплопритока к изолированному в наземных условиях и охлажденному до низких температур образцу было обнаружено релаксационное выделение энергии в поликристаллической меди высокой чистоты /99,98%/ после охлаждения до гелиевой температуры /1/. Поскольку этот эффект представляет препятствие для получения микроградусных температур ядерным размагничиванием, измерений с низкотемпературными гравитационными антеннами и сверхчувствительными тепловыми детекторами, мы изучили его основные особенности и попытались дать ему объяснение. Наиболее полно изучена релаксация в поликристаллической меди разного изготовления. Использовалось три образца, причем образец №1 - из литой быстрокристаллизованной меди, №2 - из проката, №3 - из литой меди с неизвестными условиями кристаллизации. Диссипируемая в ходе релаксации мощность приближенно может быть записана в виде $W(t) = W_1 \exp(-t/\tau_1) + W_2 \exp(-t/\tau_2)$. В таблице приведены параметры релаксации для всех трех образцов при 1 К.

Из таблицы видно, что даже для одного материала величины эффекта варьируются в очень широких пределах, причем если для двух образцов из литой меди они различаются более чем на три порядка, то для быстрокристаллизованной и прокатной меди практически совпадают. В то же время скорость релаксации на начальном участке для всех образцов различаются незначительно. В дальнейшем выяснилось, что основной особенностью

этого процесса является независимость скорости релаксации от температуры, так что "заморозить" его, понижая температуру, невозможно. На рис. 1 приведены графики релаксаций в образце №1, снятые с промежутком в 2 года, причем первое измерение /кривая 1/ проводилось при фиксированной температуре 1 К, а следующее /кривая 2/ - в диапазоне 4,2 - 1К. Отсюда следует, что скорость релаксации не

Таблица

№. образца	1	2	3
$W_1 (нВт/с)$	500	500	0,4
$W_2 (нВт/с)$	50	-	-
$\tau_1 (ч)$	60	75	100
$\tau_2 (ч)$	≥ 700	≥ 700	-

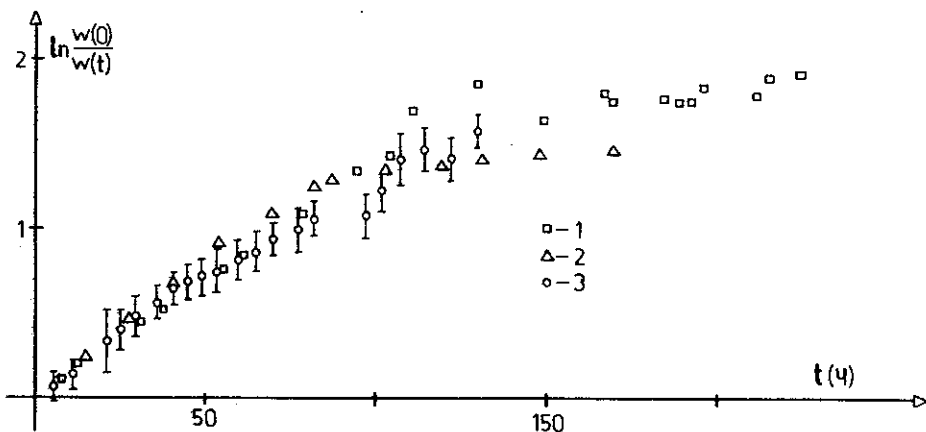


Рис.1. Релаксация диссипируемой мощности в образце №1: 1 - измерение 1978 г., $T=1\text{K}$; 2 - измерение 1980 г., первые три точки, $T=4,2\text{ K}$; следующие три точки - $T=3,2\text{ K}$; следующие две точки - $T=2,0\text{ K}$; следующие две точки - $T=1,3\text{ K}$; последние две точки - $T=1,0\text{K}$; 3 - измерение 1980 г., после отжига, $T=1,3\text{ K}$. По оси ординат отложен логарифм отношения мгновенной мощности к начальной.

подчиняется закону Аррениуса и на микроскопическом уровне релаксация определяется квантовыми эффектами. Используя циклический процесс охлаждения - нагрева с одновременным наблюдением релаксации, мы выяснили, что точка "замораживания" классической релаксации, т.е. область, в которой термически активированная релаксация сменяется квантовой, атермической, лежит для поликристаллической меди выше 50 K .

Чтобы понять физическую сущность обнаруженного эффекта, следует ответить на два вопроса: 1/ каким образом возникает неравновесное состояние в монокристаллическом образце, не подверженном внешним воздействиям, при охлаждении? 2/ какой микроскопический процесс контролирует релаксацию? Для ответа на первый вопрос рассмотрим феноменологическую модель, по которой первопричиной эффекта является неупругая релаксация термоупругих напряжений, возникающих, если тензор тепловых коэффициентов $\alpha_{ij}(\vec{r})$ не является постоянным во всем объеме образца. Области, имеющими отличные от идеальной решетки компоненты этого тензора, могут быть границы зерен. Оценивая возникающие при охлаждении термоупругие напряжения методом компенсации температурных напряжений и используя формальную

теорию неупругости^{/2/}, получим мощность диссипации на единицу массы в поликристаллическом образце:

$$W(t) = 3 \left(\frac{\alpha_T \Delta T}{1-2\nu} \right)^2 \frac{d}{a} \frac{2+\Delta}{1+\Delta} \frac{\delta E}{\tau \rho} \exp(-t/\tau), \quad /1/$$

где α_T - тепловой коэффициент разупорядоченной области /границы/, ΔT - эффективная разность температур границы и зерна, ν - коэффициент Пуассона, δE - релаксация модуля Юнга, Δ - степень релаксации, d - толщина границы, a - размер зерна, τ - постоянная времени релаксации, ρ - плотность.

Формула /1/ получена в предположении, что $d \ll a \ll L$, где L - размер образца, образец является изотропным, релаксация протекает в области границы и что достаточно учесть тангенциальную к плоскости границы компоненту напряжения. Подставляя в /1/ значения $\alpha_T = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; $\Delta T = 30 \text{ K}$; $1-2\nu = 0,3$; $d/a = 10^{-2}$; $\Delta = 0,1$; $E = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ нм}^{-2}$; $\tau = 10^2 \text{ с}$; $\rho = 9 \cdot 10^6 \text{ гм}^{-3}$, получим для кристаллической меди $W(0) \approx 900 \text{ пВт} \cdot \text{г}^{-1}$, т.е. правильный порядок величины. Ответ на второй вопрос пока находится в области догадок. Релаксация могла бы протекать путем туннельных переходов упругих диполей, образованных парами точечных дефектов, между неэквивалентными ориентациями в поле термоупругих напряжений. Несмотря на большую массу туннелирующих частиц, аналогичные процессы в последние годы наблюдались, видимо, неоднократно^{/3/}, и их теория начинает интенсивно развиваться /4/.

Поскольку релаксация протекает при любой, сколь угодно низкой температуре, то необходимо найти способы ее частичного или полного устранения. Один способ очевиден: использование монокристаллических образцов. Другой может быть связан с предварительной термообработкой. Для проверки этого предположения мы провели отжиг образца №1 при 900°C в течение 5 часов при остаточном давлении $10^{-3} \text{ мм рт ст.}$ и последующем медленном охлаждении. В результате отжига начальная мощность диссипации уменьшилась на 2 порядка до $5 \text{ пВт} \cdot \text{г}^{-1}$, а скорость релаксации, как видно из рис. 1 /кривая 3/, практически не изменилась. В связи с этим заметим, что в работе^{/5/}, в которой описана установка по ядерному размагничиванию, авторы отмечают, что они имели паразитный теплоприток к ступени размагничивания из отожженной меди $1,6 \text{ пВт} \cdot \text{г}^{-1}$, причину которого они не могли установить. Минимальная достигнутая температура медной ступени равнялась 10 мК . Устранение паразитного теплопритока, который можно объяснить атермической релаксацией, позволило бы еще улучшить этот показатель и увеличить время удержания сверхнизкой температуры.

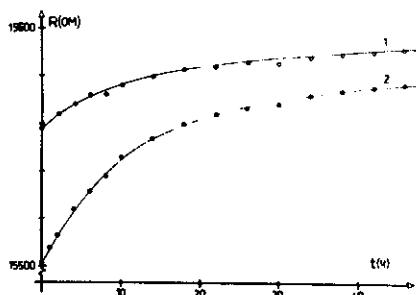


Рис. 2. Релаксация сопротивления терморезистора Allen-Bradley 0,25 номиналом 50 Ом после охлаждения: 1 - на 0,26К; 2 - на 1,63К. Конечная температура в обоих случаях равна 1К.

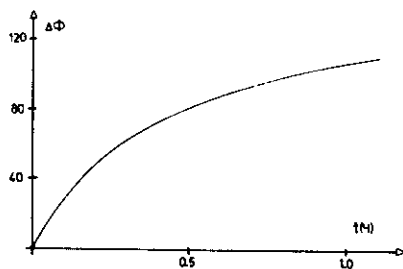


Рис. 3. Релаксация продольной намагниченности стержня из никель-цинкового феррита после быстрого охлаждения от 293 до 4,2К. Изменение магнитного потока отложено в квантах магнитного потока, $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ Гс. см⁻².

Использованный нами калориметрический метод не является единственно возможным для наблюдения атермической релаксации. Если между парой напряжение-деформация и другими парами сопряженных термодинамических величин имеется связь, то возникновение и релаксация термоупругих напряжений должны приводить к релаксации и связанным с ними параметров. Два примера эффектов, обусловленных, по нашему мнению, термоупругими напряжениями, иллюстрируются рис. 2, 3. На рис. 2 приведен график релаксации сопротивления угольного резистора типа Allen-Bradley 0,25 после охлаждения. В качестве опорного в этом случае использовался термометр из монокристаллического GaAs. Постоянная времени релаксации составляет примерно 10 часов, а степень релаксации зависит от изменения температуры и составляет, например, 0,24% от конечного значения сопротивления при охлаждении на 1,63 К /кривая 2/ и 0,1% при охлаждении на 0,26К /кривая 1/. Конечная температура в обоих случаях равна 1 К. Следует заметить, что на графиках приведена запись лишь "неупругой" части полного отклика терморезистора на изменение температуры. Этот тип релаксации может быть объяснен наличием тензорезистивного эффекта. На рис. 3 приведена запись релаксации продольной намагниченности поликристаллического образца из никель-цинкового феррита после быстрого охлаждения от 293 до 4,2 К. Образец в виде цилиндрического стержня диаметром 2 и длиной 16 мм размещался в одном из отверстий сквида циммермановского типа. Магнитометр работал

в режиме с замкнутой обратной связью по магнитному потоку как нуль-индикатор. По оси ординат отложено изменение потока $\Delta\Phi$ в квантах $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Гс} \cdot \text{см}^{-2}$. В этом случае релаксация может быть связана с магнитострикцией феррита.

Позитивный аспект атермической релаксации связан с тем, что она может быть использована для определения степени отклонения монокристаллических образцов от идеальности и вследствие чувствительности к параметрам дефектов и потенциальных барьеров, преодолеваемых этими дефектами при туннелировании, - для изучения структуры твердых тел и кинематики самих релаксационных процессов. Чувствительность калориметрического метода быстро возрастает при понижении температуры и может достигать величины $10^{-17} \text{ Вт} \cdot \text{г}^{-1}$ для металлов и $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{г}^{-1}$ для диэлектриков при легко получаемой в настоящее время стационарной температуре 10 мК. Поскольку теплоприток за счет космического и естественно-радиоактивного фона равен примерно $10^{-14} \text{ Вт} \cdot \text{г}^{-1}$, то реализация такой чувствительности возможна лишь в подземной лаборатории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неганов Б.С., Трофимов В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1978, 28, вып. 6, с. 356.
2. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. Атомиздат, М., 1975.
3. Startsev V.I. et al. phys.stat.sol.(a), 1980, 59, p.377.
4. Нацик В.Д. ФНТ, 1979, 5, с. 400.
5. Mueller R.M. et al. Cryogenics, 1980, 6, p.395.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 января 1981 года.