

Влияние магнитного поля на неупругие свойства кристаллов LiF

© Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников*, Э.П. Белозёрова*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

* Костромской государственный технологический университет,
156005 Кострома, Россия

E-mail: zin@mol1223.phys.msu.su

E-mail: PHYSICS@blocke.kti.kostroma.su

(Поступила в Редакцию 28 августа 1998 г.)

В окончательной редакции 21 октября 1998 г.)

Исследовано влияние слабого магнитного поля 0.1–0.8 Т на внутреннее трение и дефект модуля Юнга кристаллов LiF в области амплитуд относительной деформации ε_0 от 10^{-6} до 10^{-4} на частотах 40 и 80 kHz. Показано, что при испытаниях в магнитном поле внутреннее трение возрастает, а эффективный модуль упругости уменьшается, что свидетельствует об увеличении пластичности образцов. Установлены зависимости внутреннего трения от величины магнитного поля при разных значениях амплитуды ε_0 .

Проблема влияния слабых магнитных полей на механические свойства диэлектрических, полупроводниковых и металлических материалов привлекает большое внимание исследователей. Значительная часть работ на эту тему посвящена изучению влияния магнитного поля (МП) на поведение дефектов в кристаллах в режиме активного нагружения или ползучести [1–3]. С другой стороны, имеется лишь несколько публикаций по влиянию МП на неупругое поведение материалов при знакопеременном нагружении. Среди них следует отметить работы [4,5], в которых исследовано влияние слабого МП на внутреннее трение (ВТ) металлов соответственно в герцевом и мегагерцевом диапазонах частот.

Цель данной работы — изучение влияния слабого МП на неупругие свойства кристаллов LiF при знакопеременной нагрузке в килогерцевой области частот. Неупругость кристаллов в этом частотном диапазоне контролируется дислокационными процессами. В условиях наших опытов такими процессами являлись вынужденные колебания дислокаций под действием ультразвука (УЗ) и их размножение в поле УЗ волны.

1. Техника эксперимента и исследованные образцы

Исследование неупругих свойств образцов LiF осуществляли методом двухкомпонентного резонансного осциллятора [6–8] на частотах 40 и 80 kHz. При продольных колебаниях в системе кварц–образец устанавливалась стоячая волна деформации. Амплитуда относительно деформации ε_0 составляла 10^{-6} – 10^{-4} . Исследования проводились при комнатной температуре. Измеряли ВТ (δ) и дефект модуля Юнга ($\Delta M/M$) (ДМЮ). Различия в собственных частотах пьезокварца и составного осциллятора не превышало 2%. Максимальные ошибки определения ВТ и ДМЮ образца составляли 8%, ам-

плитуды относительной деформации — 5%. Затухание ненагруженного кварца было на порядок ниже затухания системы.

МП создавалось с помощью постоянного магнита или электромагнита ЭМ–1, питание которого осуществлялось от универсального источника питания УИП–1. Значение индукции МП, B , варьировалось в интервале от 0.1 до 0.8 Т. Ориентация образца характеризовалась полярным углом Θ между осью четвертого порядка и направлением распространения УЗ волны. В работе использовались образцы LiF нулевой ориентации. Индукция МП, B , была направлена вдоль кристаллографического направления $\langle 100 \rangle$, перпендикулярно направлению распространения УЗ волны.

Исходное состояние образцов характеризовалось пределом текучести 3.5 МПа и плотностью дислокаций $6 \cdot 10^8 \text{ m}^{-2}$. Свежие дислокации до начала УЗ испытаний в образец не вводились. Основными двухвалентными примесями в исследованных кристаллах LiF по данным спектрографического анализа являлись Са и Ва.

За изменением состояния образца следили по данным вольт-амперных характеристик составного осциллятора (ВАХ). Плотность дислокаций и их распределение в образце контролировались с помощью избирательного травления.

ВАХ $I(U)$ или $U_R(U)$ двухкомпонентного осциллятора представляет собой зависимость силы тока в кварце I при последовательном резонансе от напряжения U , подаваемого не его обкладки. Величина тока I пропорциональна напряжению U_R на дополнительном сопротивлении R , подключенном последовательно с осциллятором. Амплитуда относительной деформации образца ε_0 пропорциональна напряжению U_R . По углу наклона ВАХ к оси токов можно судить о диссипативных свойствах образца. Кривая $U_R(U)$ позволяет с большой точностью определять амплитуды ε_0 , при которых происходят изменения в поведении дислокаций, а по относительному расположению ВАХ разных образцов можно сравнить их пластичность [9,10].

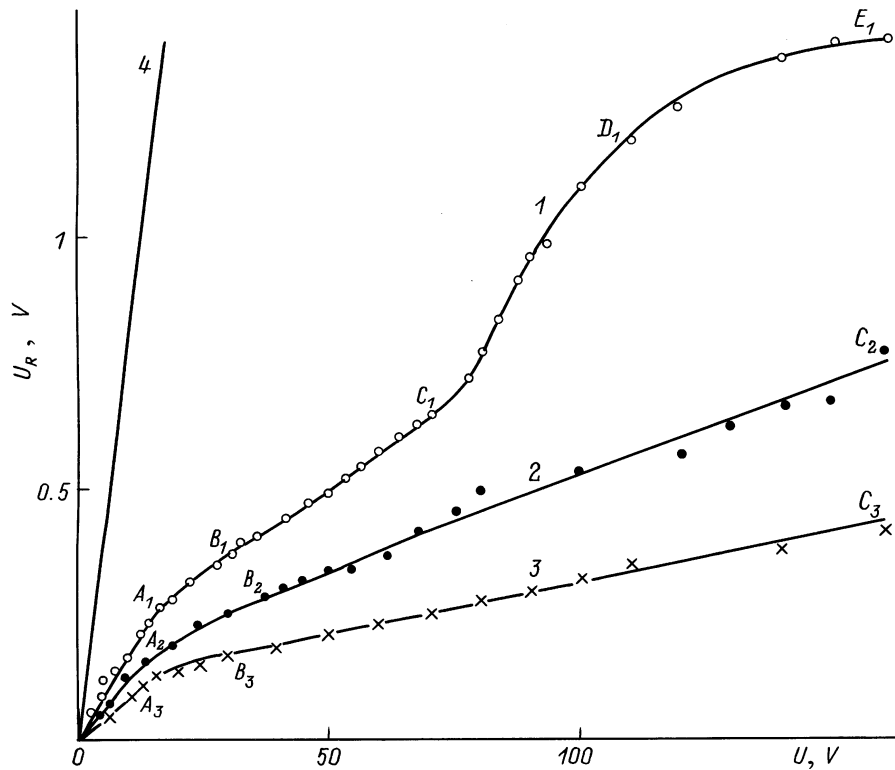


Рис. 1. Сравнение вольт-амперных характеристик $U_R(U)$ контрольного образца LiF (кривая 1) и образцов, испытанных в магнитных полях $B = 0.2$ Т (кривая 2) и $B = 0.5$ Т (кривая 3). $f_p = 80$ кГц. Прямая 4 относится к ненагруженному кварцу.

Исследования проводились в двух режимах. В первом измерении осуществлялись в процессе одновременного воздействия МП и УЗ. Полученные результаты сравнивались с данными для контрольных образцов ($B = 0$). При втором режиме МП при заданных U или U_R включалось лишь на определенное время, а затем снова выключалось. Такой режим позволял для одного и того же образца исследовать зависимости $U_R(U)$ или $\delta(\varepsilon_0)$ как в присутствии МП, так и при $B = 0$.

Для выявления возможного влияния на результаты измерений "эффекта включения" [11] были получены зависимости $U_R(U)$ для ненагруженного кварца в условиях: $B = 0$; при постоянно включенном МП $B = 0.8$ Т; в режимах последовательного включения и выключения МП $B = 0.8$ Т. Полученные результаты ложатся на одну прямую. Обработка этих данных по методу линейной регрессии показала, что зависимости $U_R(U)$, полученные при всех условиях испытания, аппроксимировались одной и той же линейной зависимостью, причем коэффициент корреляции во всех случаях превышал 0.99 (график 4 на рис. 1).

2. Результаты опытов

2.1. Влияние магнитного поля на вольт-амперные характеристики составного осциллятора с образцами LiF. Типичные

примеры ВАХ для осциллятора на частоте 80 кГц при $B = 0$ и ВАХ, полученные в процессе одновременного воздействия МП и УЗ, приведены на рис. 1. Кривые 1, 2 и 3 отвечают значениям $B = 0$, $B = 0.2$ Т и $B = 0.5$ Т соответственно. Для сравнения здесь же приведена прямая $U_R(U)$ ненагруженного кварца (график 4). Характерно, что на всех трех ВАХ можно выделить линейные участки (OA_1 , OA_2 , OA_3) и нелинейные области (A_1B_1 , A_2B_2 , A_3B_3), переходящие в участки B_1C_1 , B_2C_2 , B_3C_3 . Следов поступательного движения и размножения дислокаций на этих участках ВАХ не обнаружено.

Из рис. 1 видно, что ВАХ, полученные при одновременном действии МП и УЗ (кривые 2 и 3), располагаются значительно ниже, чем ВАХ, отвечающая условию $B = 0$ (кривая 1). Это показывает, что под влиянием МП образцы становятся более пластичными. Подчеркнем, что ВАХ1 и ВАХ2 соответствуют образцам с зеркальными сколами.

Отметим еще одну особенность, выявляющуюся при сравнении ВАХ1 с ВАХ2 и ВАХ3. Значительное изменение наклона ВАХ1 при переходе от участка B_1C_1 к участку C_1D_1 свидетельствует о существенном упрочнении образца под действием УЗ. ВАХ2 и ВАХ3, полученные при испытаниях в МП, подобного изменения наклона не обнаруживали. Следовательно, при совместном действии МП и УЗ не происходило упрочнения образцов вплоть до $U = 200$ В.

Изменение наклона ВАХ1 при переходе к области D_1E_1 связано с началом размножения дислокаций в поле УЗ волны, что подтверждается данными избирательного травления.

Используя методику, предложенную в [10], по точкам пересечения асимптот к участкам B_1C_1 , B_2C_2 и B_3C_3 с осью U_R определяли напряжения τ^{st} , которые необходимо преодолеть дислокационным сегментам на данном этапе УЗ действия. По терминологии [10], τ^{st} — это величины обобщенных барьеров Пайерлса–Набарро. Результаты оценки τ^{st} для ВАХ, соответствующих частоте 40 kHz, приведены в табл. 1. В табл. 1 представлены также оценки средних смещений колеблющихся дислокационных сегментов $\langle \xi \rangle$ при $\varepsilon_0 = 2 \cdot 10^{-5}$, полученные из данных для ДМЮ по методу [12] и отношения U/U_R для начальных участков ВАХ OA_i . Из табл. 1 видно, что в образцах, испытанных в МП, τ^{st} оказываются меньше по сравнению с данными для контрольных образцов и уменьшаются с возрастанием индукции B . Поскольку, согласно [13], τ^{st} пропорционально пределу текучести, измеренному в режиме активного нагружения, можно утверждать, что его величина уменьшается с ростом B . Отношения U/U_R , а следовательно, и диссипация механической энергии увеличиваются с ростом B . С возрастанием B увеличиваются также средние смещения колеблющихся дислокационных сегментов $\langle \xi \rangle$.

Подчеркнем, что представленные на рис. 1 данные относятся к трем различным образцам, два из которых имели зеркальные сколы. Влияние МП на неупругие свойства LiF можно продемонстрировать и результатами, полученными в опытах с одним и тем же образцом. Так, на рис. 2 представлена зависимость $U_R(U)$ образца LiF в МП $B = 0.8$ Т (точки 2, 4, 6 и т.д.) и в отсутствие МП (точки 1, 3, 5, 7 и т.д.). Из графика рис. 2 видно, что МП приводило к уменьшению U_R , а следовательно, и амплитуды относительной деформации ε_0 в пучности

Таблица 1. Величины обобщенных барьеров Пайерлса–Набарро τ^{st} , отношений U/U_R и смещений дислокационных сегментов $\langle \xi \rangle$ для LiF на частоте 40 kHz при различных значениях B

B, T	0	0.2	0.5
τ^{st}, MPa	0.68	0.38	0.28
U/U_R	66.7	75.0	100.0
$\langle \xi \rangle, \mu m, \varepsilon_0 = 2.0 \cdot 10^{-5}$	0.22	0.31	0.93

Таблица 2. Величины скачков амплитуды относительной деформации $\Delta\varepsilon_0$ LiF в магнитном поле

$\varepsilon_0, 10^{-6}$	1.2	3.9	6.8	14.6	20.5	25.6	31.7	51.2	73.0	109.0
$\Delta\varepsilon_0, 10^{-6}$	0.2	0.5	0.9	1.7	2.2	6.1	3.7	2.4	1.2	0

Примечание. ε_0 — амплитуда относительной деформации при выключенном магнитном поле, $\Delta\varepsilon_0$ — соответствующее уменьшение амплитуды, вызываемое магнитным полем. Результаты получены на частоте $f_p = 80$ kHz в магнитном поле $B = 0.5$ Т.

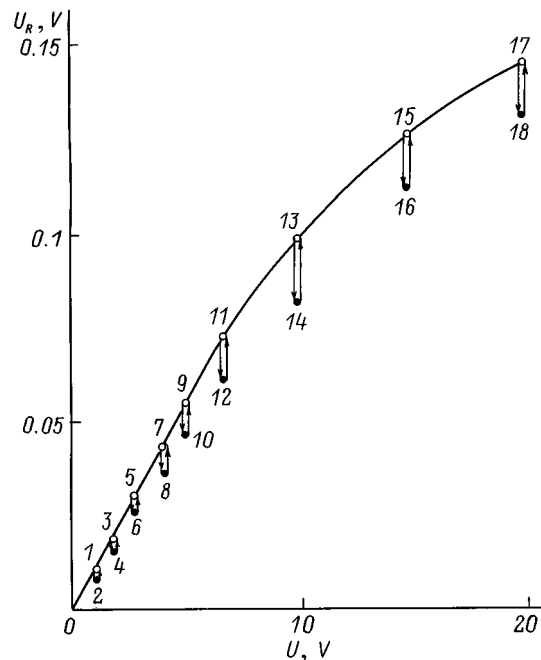


Рис. 2. Сбросы $\Delta(U_R)$ на вольт-амперной характеристике образца LiF, вызываемые магнитным полем $B = 0.8$ Т. Точки 2, 4, 6, 8 и т.д. соответствуют измерениям в МП, точки 1, 3, 5 и т.д. — в отсутствие МП. $f_p = 80$ kHz.

стоячей УЗ волны. Изменения U_R , ΔU_R , а следовательно, и $\Delta\varepsilon_0$, вызываемые МП, зависят от величины амплитуды ε_0 . В табл. 2 представлены величины скачков $\Delta\varepsilon_0 = \varepsilon_0^{\beta=0} - \varepsilon_0^B$ для исследованного диапазона амплитуд ε_0 на частоте 80 kHz при $B = 0.5$ Т. Наибольшие величины $\Delta\varepsilon_0$ достигаются в области амплитуд $\varepsilon_0 \sim 10^{-5}$, при этом максимальное значение $\Delta\varepsilon_0$ наблюдается при $\varepsilon_0 = 2.56 \cdot 10^{-5}$.

2.2. Влияние магнитного поля на внутреннее трение и дефект модуля Юнга LiF. ВТ, δ образцов LiF увеличивалось в МП, что можно видеть из рис. 3. На нем приведены амплитудные зависимости ВТ для двух образцов LiF на частоте 40 kHz. Кривые 1 и 2 относятся к одному и тому же образцу. Точки, отвечающие кривой 1, получены в МП $B = 0.2$ Т, кривой 2 — при $B = 0$. Из сравнения этих кривых видно, что амплитудная зависимость ВТ в МП начиналась при меньших ε_0 , чем при $B = 0$. Кривая 3 относится к контрольному образцу с зеркальным сколом. Сопоставление кривых 1, 2 и 3 на рис. 3 показывает, что амплитудная зависимость $\delta(\varepsilon_0)$ образца, подвергаемого в процессе испытаний воздействию МП, начинается при меньших ε_0 , чем контрольного образца. Соответствующее малым амплитудам значение ВТ (так называемое амплитудно-независимое ВТ) оказывается меньше у контрольного образца. Все три кривые $\delta(\varepsilon_0)$ рис. 3 спрямляются в координатах Гранато–Люкке [14]. Это указывает на то, что амплитудные зависимости $\delta(\varepsilon_0)$ обусловлены отрывом дислокаций от закрепляющих центров.

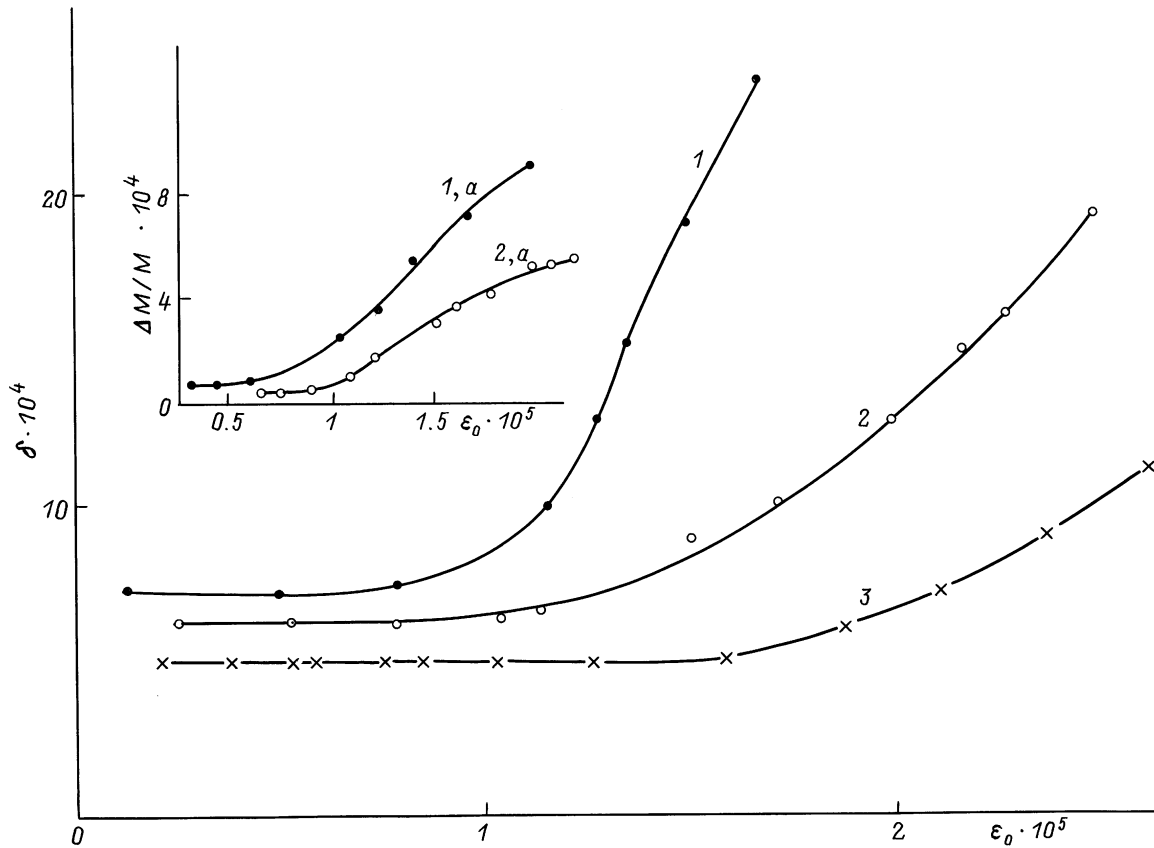


Рис. 3. Амплитудные зависимости ВТ, $\delta(\epsilon_0)$ образца LiF, полученные в присутствии МП (кривая 1) и при $B = 0$ (кривая 2). Кривая 3 отвечает контрольному образцу. Во врезке представлены амплитудные зависимости ДМЮ, $\Delta M/M(\epsilon_0)$ образца, соответствующие кривым 1 и 2. $f_p = 40$ kHz, $B = 0.2$ Т.

Амплитудные зависимости ДМЮ $\Delta M/M(\epsilon_0)$ для образца, ВТ которого представлено кривыми 1 и 2 соответственно, показаны во врезке к рис. 3. Видно, что амплитудная зависимость $\Delta M/M(\epsilon_0)$, полученная в МП, начинается при меньших ϵ_0 (кривая 1, а), чем при $B = 0$ (кривая 2, а), это согласуется с кривыми 1 и 2 для ВТ.

Для получения кривых амплитудной зависимости ВТ образца при разных значениях B была использована следующая экспериментальная процедура. Задавая определенное значение амплитуды ϵ_0 и поддерживая его постоянным, уменьшали индукцию МП от 0.76 Т до 0. Измеряли ВТ, δ для каждого выбранного в этом интервале значения B . После этого увеличивали амплитуду до нового значения ϵ_0 и снова измеряли ВТ при разных B . Кривые $\delta(\epsilon_0)$ образца LiF для разных B в интервале от 0.76 Т до 0 представлены на рис. 4. Видно, что ВТ LiF при малых амплитудах ϵ_0 с увеличением B возрастает, а начало амплитудной зависимости сдвигается в область меньших ϵ_0 . Из рис. 4 видно также, что кривые $\delta(\epsilon_0)$ для $B = 0$ и $B = 0.14$ Т практически совпадают. Следовательно, существует пороговое значение B , при достижении которого прекращается влияние МП на амплитудную зависимость ВТ LiF. Кривые $\delta(\epsilon_0)$ рис. 4 спрямляются в координатах

Гранато–Люкке. Следуя [14], оценивали ”деформации отрыва” $\Gamma \sim F_m/l_c$, где F_m — максимальная сила взаимодействия дислокации и закрепляющего ее центра, а l_c — средняя длина колеблющегося дислокационного сегмента. Результаты таких оценок даны в табл. 3. Здесь же представлены амплитуды ϵ_0 , отвечающие началу амплитудной зависимости ВТ; соответствующие им амплитуды напряжения σ_0 ; τ^{st} ; отношения U/U_R для начальных участков OA_i (см. рис. 1) и средние смещения колеблющихся дислокационных сегментов при

Таблица 3. Некоторые количественные характеристики, полученные по результатам испытаний образца LiF в магнитных полях с различной индукцией B

B, T	0	0.14	0.26	0.51	0.64	0.76
$\epsilon_0, 10^{-5}$	2.0	2.0	1.5	1.3	1.0	0.87
σ_0, MPa	1.7	1.7	1.3	1.1	0.87	0.76
τ^{st}, MPa	0.73	0.69	0.64	0.50	0.49	0.42
$\Gamma, 10^{-4}$	1.22	1.21	1.17	1.15	1.13	0.94
U/U_R	97.9	98.4	102.3	104.3	111.6	118.8
$\langle \xi \rangle, \mu m$	0.12	0.13	0.22	0.29	0.33	0.4
$\epsilon_0 = 4 \cdot 10^{-5}$						

$\varepsilon_0 = 4.0 \cdot 10^{-5}$. Из табл. 3 следует, что значения Γ уменьшаются с увеличением B . Это может иметь место как в результате уменьшения F_m , так и увеличения средней длины колеблющегося сегмента дислокации l_c . Отношение U/U_R на участках OA_i , а следовательно, и амплитудно-независимое ВТ вплоть до 0.8 Т возрастает пропорционально индукции МП B . Средние смещения $\langle \xi \rangle$ в присутствии МП превосходят смещения дислокационных сегментов при $B = 0$ и возрастают при увеличении B . Следуя [15], примем, что для одной и той же амплитуды ε_0 смещение колеблющегося дислокационного сегмента пропорционально l_c^2 . Отсюда можно заключить, что с увеличением B величина l_c возрастает, т.е. все большее количество сегментов отрывается от стопоров. Эти выводы соответствуют представлению о том, что МП способствует откреплению дислокаций от парамагнитных центров [16].

Используя описанную выше экспериментальную процедуру, можно получить зависимости ВТ от индукции МП для разных значений $\varepsilon_0 = \text{const}$. Характерные зависимости $\delta(B)$ образца LiF для широкого диапазона ε_0 приведены на рис. 5. Кривые рис. 5 соответствуют амплитудам ε_0 , при которых в процессе УЗ вибрации образца не наблюдалось появления новых дислокаций. Для малых ε_0 , отвечающих амплитудно-независимому ВТ, δ линейно зависит от B (см. график 1 на рис. 5). Это согласуется с данными о линейной зависимости величины U/U_R для начального участка ВАХ OA_i от индукции магнитного поля B . С уве-

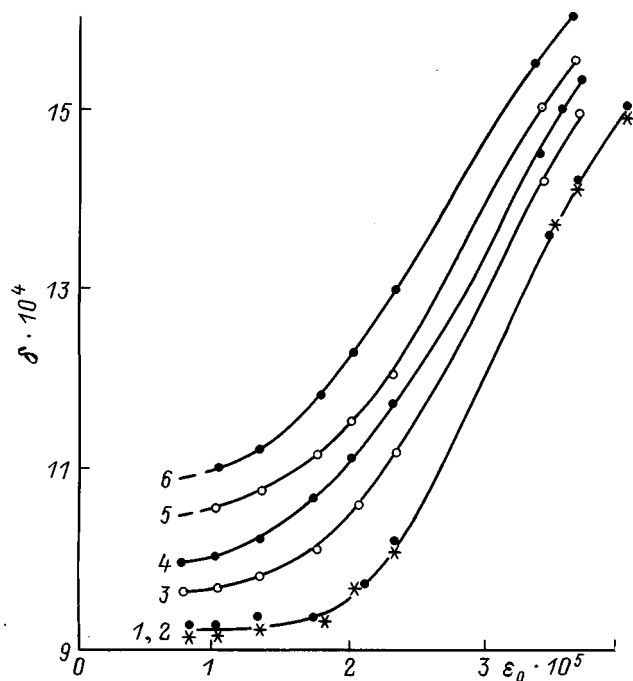


Рис. 4. Амплитудные зависимости $\delta(\varepsilon_0)$ образца LiF при различных значениях индукции МП B : точки кривой 1 (звездочки) соответствуют $B = 0$; кривой 2 (черные кружки) — $B = 0.14$ Т; 3 — 0.26 Т; 4 — 0.51 Т; 5 — 0.64 Т; 6 — 0.76 Т. $f_p = 80$ kHz.

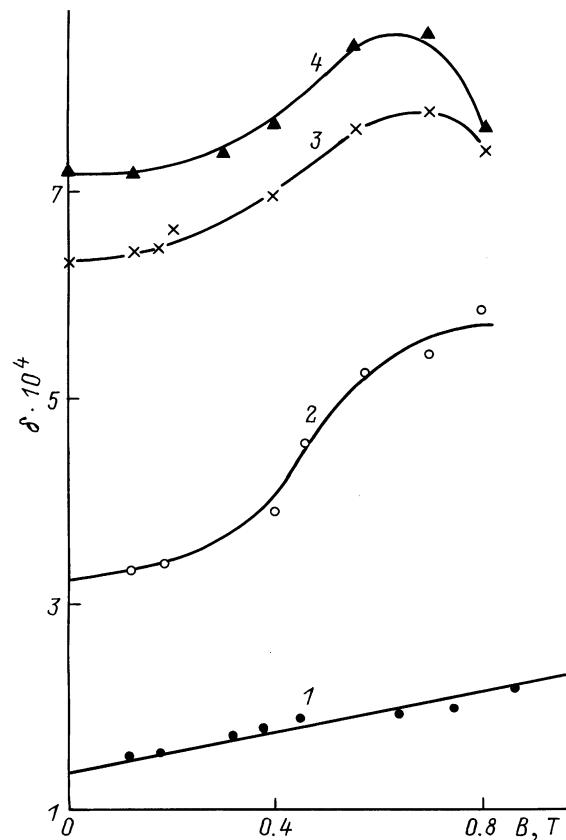


Рис. 5. Зависимости $\delta(B)$ образца LiF при разных амплитудах $\varepsilon_0 = \text{const}$ в отсутствие размножения дислокаций в поле УЗ волны. $f_p = 80$ kHz. Кривая 1 соответствует амплитуде $\varepsilon_0 = 1.7 \cdot 10^{-5}$; 2 — $\varepsilon_0 = 3.6 \cdot 10^{-5}$; 3 — $\varepsilon_0 = 1.8 \cdot 10^{-4}$; 4 — $\varepsilon_0 = 2 \cdot 10^{-4}$.

личением ε_0 характер зависимости $\delta(B)$ усложняется. Так, при $\varepsilon_0 = 3.6 \cdot 10^{-5}$ (см. график 2 на рис. 5) появляются две области B , $B < 0.2$ Т и $B > 0.55$ Т, в пределах которых δ слабо зависит от B . Амплитуда $\varepsilon_0 = 3.6 \cdot 10^{-5}$ лежит в интервале амплитуд, для которых кривые $\delta(\varepsilon_0)$ спрямляются в координатах Гранато-Люкке. Именно в этом интервале амплитуд МП вызывает значительные скачки $\Delta\varepsilon_0$ (см. табл. 2). Графики 3 и 4 на рис. 5 соответствуют области амплитуд, при которых происходит упрочнение образца под действием УЗ (см. участок C_1D_1 ВАХ1 на рис. 1). Видно, что на кривых $\delta(B)$ для этой области ε_0 обнаруживается максимум.

Приведенные экспериментальные данные и результаты их анализа убедительно доказывают существование эффекта влияния слабого магнитного поля на неупругие свойства кристаллов LiF. Полученные результаты качественно согласуются с данными по влиянию постоянного магнитного поля на внутреннее трение других диамагнитных материалов [4,5] и с эффектами, обнаруженными в ЦГК в присутствии магнитного поля при иных способах нагружения [1–3].

Список литературы

- [1] А.А. Урусовская, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер. Изв. РАН. Сер. физ. **61**, 5, 937 (1997).
- [2] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Изв. РАН. Сер. физ. **60**, 9, 173 (1996).
- [3] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Е. Жуликов, А.М. Карякин. Изв. РАН. Сер. физ. **61**, 5, 850 (1997).
- [4] О.И. Дацко, В.И. Алексеенко. ФТТ **39**, 7, 1234 (1997).
- [5] M.I. Molotskii, R.E. Kris, V. Fleurov. Phys. Rev. **B51**, 18, 12531 (1995).
- [6] J. Marx. Rev. Scient. Instrum. **22**, 7, 503 (1951).
- [7] Е.Г. Швидковский, А.А. Дургарян. Научные доклады высшей школы. Физ.-мат. науки **5**, 211 (1958).
- [8] С.П. Никаноров, Б.К. Кардашев. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. Наука, М. (1985). 250 с.
- [9] Н.А. Тяпунина. В сб.: Физика деформационного упрочнения монокристаллов. Наук. думка, Киев (1972). С. 228.
- [10] Е.К. Наими. Измерения внутреннего трения, дефекта модуля Юнга и стартовых напряжений дислокаций методом вольт-амперных характеристик составного вибратора. Деп. в ВИНТИ, рег. № 2589 Деп. (1985). 17 с.
- [11] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **35**, 2, 320 (1993).
- [12] G.S. Baker. J. Appl. Phys. **33**, 5, 1730 (1962).
- [13] А.А. Предводителев. В сб.: Физика деформационного упрочнения монокристаллов. Наук. думка, Киев (1972). С. 74.
- [14] А. Гранато, К. Люкке. В сб.: Ультразвуковые методы исследования дислокаций. ИЛ, М. (1963). С. 27.
- [15] Д. Ниблетт, Дж. Уилкс. УФН **80**, 1, 125 (1963).
- [16] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова, Е.Ю. Михина, Е.А. Петржик. Изв. РАН. Сер. физ. **57**, 11, 2 (1993).