

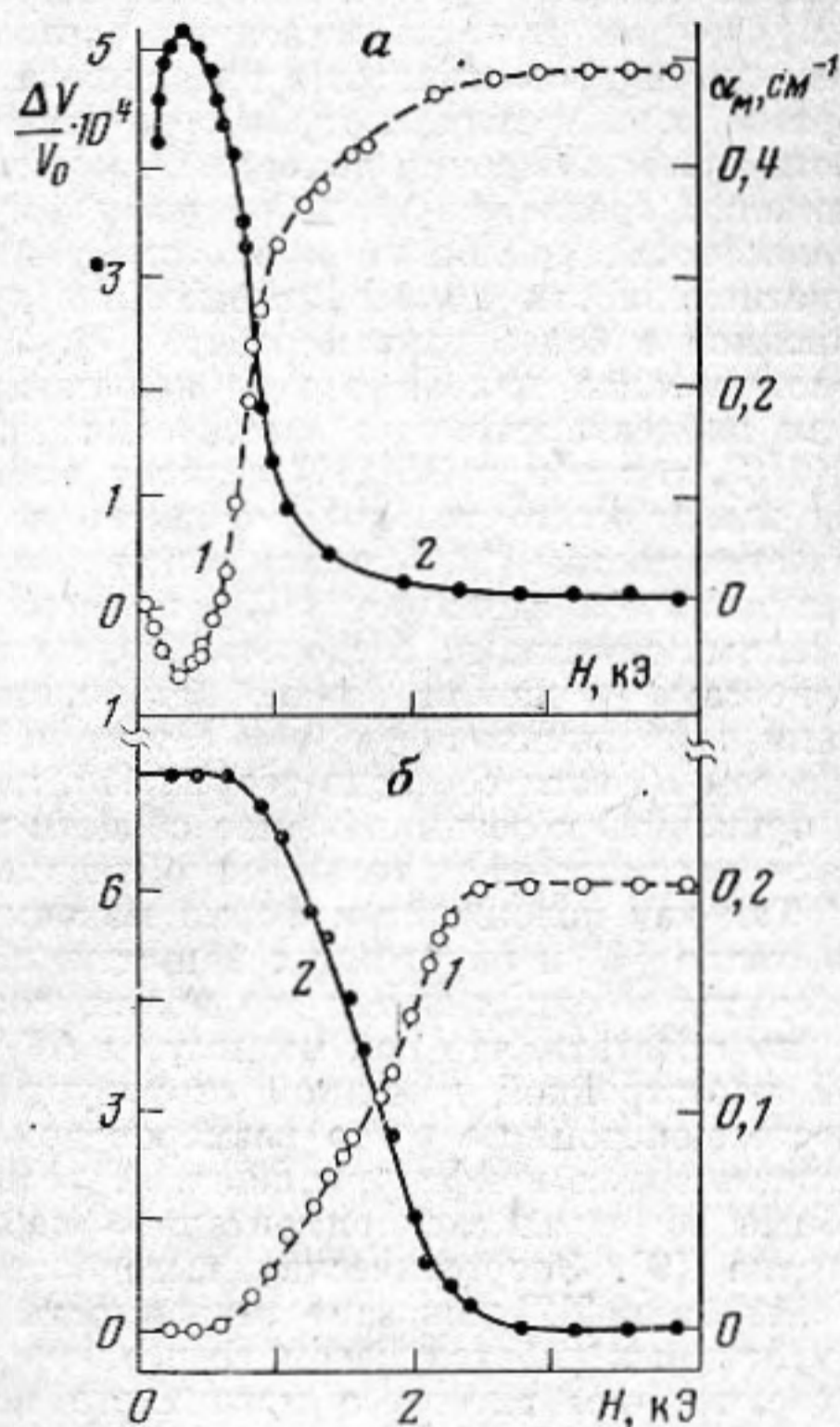
МАГНИТОУПРУГИЕ АНОМАЛИИ В МОНОКРИСТАЛЛЕ НИКЕЛЯ НА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ

Григорьев С. Б., Кудряшова Л. К.

Принято считать, что магнитоупругие эффекты в ферромагнитных металлах на частотах мегагерцового диапазона обусловлены главным образом потерями на микровихревые токи, связанные с локальными изменениями намагниченности, которые возникают за счет двух элементарных магнитных процессов: магнитострикционного смещения доменных границ и вращения вектора намагниченности в отдельных доменах. Теоретические расчеты показывают, что при намагничивании ферромагнитного монокристаллического металла как затухание α_M , так и скорость распространения продольных ультразвуковых волн V должны монотонно изменяться с ростом напряженности внешнего магнитного поля H [1]. Однако при экспериментальном исследовании магнитоупругих эффектов было обнаружено, что при определенных ориентациях H относительно кристаллографических осей для некоторых направлений распространения ультразвуковой волны наблюдаются аномальные зависимости α_M и V от H , которые заключаются в появлении максимума затухания и минимума скорости. Существует несколько точек зрения на природу механизма, ответственного за эти аномалии. Одни авторы [2] объясняют максимумы затухания ферроакустическим резонансом, другие [3, 4] — наличием в кристалле анизотропных внутренних напряжений, которые обуславливают с ростом внешнего поля не укрупнение, а первоначальное дробление доменной структуры при определенных направлениях H . Аномалии скорости в работе [5] объясняются существованием так называемой «неустойчивости направления намагниченности», которая может возникать при намагничивании однодоменного образца, когда H достигает значения, равного некоторому «критическому полю». Величина «критического поля» определяется из условия обращения в бесконечность производной $d\phi(H)/dH$, где $\phi(H)$ — угол между направлением намагниченности M и осью [001] образца определяет равновесное направление вектора M и находится из условия минимума свободной энергии кристалла. Поэтому в полях, близких к критическому, относительно малые возмущения M могут вызвать значительные изменения ϕ , т. е. проекции вектора намагниченности на выбранное направление, что вследствие существования магнитоупругого взаимодействия должно приводить к аномальной зависимости упругих постоянных от H .

В настоящей работе проведены одновременные измерения затухания и скорости распространения продольных ультразвуковых волн с целью установления корреляции между магнитоупругими аномалиями α_M и V . Измерения магнитоупругого затухания производились стандартным импульсным методом, для измерения скорости использовался видоизмененный метод интерференции импульсов, описанный в работе [6]. Изучение магнитоупругих аномалий проводилось на частотах 50 и 86 МГц при различных ориентациях внешнего магнитного поля относительно кристаллографических осей монокристалла никеля. Образец имел форму цилиндра, ось которого совпала с направлением [111], и был отожжен в атмосфере водорода при 1000° С. Продольная ультразвуковая волна распространялась вдоль оси цилиндра, а образец мог намагничиваться как параллельно оси, так и вдоль любого направления, перпендикулярного оси цилиндра.

Результаты измерений приведены на фигуре в виде зависимости коэффициента магнитоупругого затухания α_M и относительного изменения скорости $\Delta V/V_0$, где $\Delta V = V(H) - V_0$, $V(H)$ и V_0 — скорости распространения ультразвуковой волны в магнитном поле и размагниченном состоянии соответственно, от напряженности внеш-



Зависимость относительного изменения скорости $\Delta V/V_0$ — (1) и коэффициента магнитоупругого затухания α_M — (2) от напряженности внешнего магнитного поля H для продольной ультразвуковой волны, распространяющейся вдоль кристаллографической оси [111]; частота звука 86 МГц: (а) — $H \parallel [111]$, (б) — $H \parallel [110]$

него магнитного поля H . Экспериментальные точки есть среднее нескольких измерений; величина затухания в магнитно-насыщенном образце принята равной нулю. Как следует из фигуры, характер изменения α_M и $\Delta V/V_0$ с ростом H существенно зависит от направления намагничивания. Когда образец намагничивается вдоль оси $[1\bar{1}0]$, как α_M , так и $\Delta V/V_0$ в соответствии с теоретическими представлениями [1] монотонно изменяются при увеличении напряженности внешнего магнитного поля. Однако при намагничивании в кристаллографических направлениях $[111]$ и $[\bar{1}\bar{1}2]$ наблюдаются минимумы $\Delta V/V_0$ и соответствующие им максимумы затухания α_M , положение которых на оси H не зависит от частоты ультразвуковой волны.

Появление аномалий скорости и затухания при одних и тех же значениях напряженности внешнего магнитного поля и отсутствие указанных эффектов при намагничивании вдоль оси $[1\bar{1}0]$ указывают на то, что наблюдаемые магнитоупругие аномалии обусловлены одинаковым механизмом. Поскольку положения максимумов затухания и минимумов $\Delta V/V_0$ не зависят от частоты ультразвуковой волны, а изменение скорости не имеет дисперсионного характера, эти эффекты не могут быть объяснены ферроакустическим резонансом. Теория «неустойчивости вектора намагниченности» для некоторых направлений H (в работе [5] это направление $[001]$) не дает даже качественного согласия с экспериментом. Причина расхождений, по-видимому, заключается в том, что эта теория базируется на модели однодоменного образца, т. е. модели, которая сразу исключает возможность изменения намагниченности путем смещения доменных границ. Вместе с тем поля, в которых обнаружены аномалии, соответствуют многодоменному, ненасыщенному состоянию образца. Учет процессов вращения, но в многодоменном состоянии, т. е. учет вращения вектора намагниченности из всех возможных начальных направлений типа «легкая ось», выполнен в более ранней работе [7]. При рассмотрении вопросов намагничивания монокристалла никеля в диагональном $[1\bar{1}0]$ и тригональном $[111]$ направлениях были найдены значения критических полей для точек неустойчивости как при $H \parallel [1\bar{1}0]$, так и при $H \parallel [111]$. Однако в наших экспериментах магнитоупругие аномалии имеют место только для одного из этих направлений, а именно при $H \parallel [111]$. Известно также [1], что для монокристалла никеля ультразвуковая волна, распространяющаяся вдоль оси $[100]$, не может вызвать магнитоупругого смещения доменных границ, и, следовательно, магнитоупругое затухание определяется только процессами вращения. Однако, как показывают эксперименты [8], при любом направлении намагничивания в этом случае наблюдается только монотонное изменение α_M с ростом H , хотя согласно теории [7], намагничивание вдоль оси $[110]$ также должно приводить к возникновению области неустойчивости намагниченности. Таким образом, рассмотренная теория не объясняет существования магнитоупругих аномалий.

Так как положение и форма максимумов α_M зависят от термической обработки кристалла [4] и внутренних напряжений [3], а минимумы $\Delta V/V_0$ и максимумы α_M находятся в одних и тех же полях, соответствующих многодоменному состоянию, можно полагать, что как минимумы $\Delta V/V_0$, так и максимумы α_M связаны со сложной перестройкой доменной структуры в процессе намагничивания, при которой вместо монотонного роста размеров доменов с увеличением H возможно появление разветвленных конфигураций, т. е. возникает дробление доменной структуры. Подобные эффекты экспериментально наблюдались непосредственно на поверхности образца [9]. Энергетическая выгодность такого дробления обоснована в работах [10, 11], а в [12] доказана зависимость этого процесса от внутренних напряжений. В указанных работах рассмотрен также процесс роста толщины доменной границы с увеличением внешнего магнитного поля. Такое размытие доменной структуры, с одной стороны, приводит к увеличению числа доменных границ в ультразвуковом пучке, а с другой стороны — к росту эффективной массы доменной стенки, что, согласно феноменологической теории [1], проявляется в увеличении затухания α_M и в уменьшении скорости, тем самым объясняя появление магнитоупругих аномалий в монокристалле никеля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Simon G. Die Dämpfung elastischer Wellen hoher Frequenz in kubischen, ferromagnetischen Einkristallen.— Ann. der Physik, 1958, Bd 1, Hf.1, s. 23–25; Der Einfluss von Blochwandverschiebungen auf die Dämpfung von Ultraschallwellen in ferromagnetischen Metallen.— Ann. der Physik, 1961, Bd 7, Hf. 3, s. 140–143.
2. Taborov V. F., Tarasov V. F. Dependence of ultrasonic attenuation in ferromagnetic metals on temperature and magnetic field intensity.— IEEE Trans. Son. Ultrason., 1967, v. 14, № 1, p. 1–4.
3. Basu B. K., Sethna P. P. On ultrasonic attenuation in nickel single crystals.— Appl. Phys. Letters, 1966, v. 9, № 5, p. 341–342.
4. Григорьев С. Б., Кудряшова Л. К. Магнитоупругое затухание в никеле на высоких ультразвуковых частотах.— Физ. тв. тела, 1972, т. 14, № 7, с. 1997–1999.
5. Fedders P. A., Icheng Wu., Miller J. G., Bolef D. I. Has acoustic ferromagnetic resonance in metals been observed?— Phys. Rev. Letters, 1974, v. 32, № 25, p. 1443–1445.
6. Григорьев С. Б., Кудряшова Л. К., Кулешов А. А., Михайлов И. Г. Магнитоупругие аномалии в монокристалле никеля.— В кн.: Матер. XI Всес. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Ч. 1. Душанбе.: Изд-во Дониш, 1981, с. 263–264.
7. Витков М. Г. Неплоские вращения вектора намагниченности в кристаллах.— Физ. металлов и металловед., 1964, т. 18, № 4, с. 518–524.

8. Григорьев С. Б., Кудряшова Л. К. Магнитоупругое затухание, обусловленное вращением намагниченности.— Физ. тв. тела., 1975, т. 17, № 1, с. 170–175.
9. Шур Я. С., Штольц Е. В., Глазер А. А. О перестройке доменной структуры магнитно-одноосных ферромагнетиков в магнитном поле.— Физ. металлов и металловед., 1959, т. 8, № 5, с. 685–688.
10. Барьяхтар В. Г., Иванов Б. А. О доменных структурах ферромагнетиков в магнитном поле, перпендикулярном оси легкого намагничивания.— Физ. металлов и металловед., 1974, т. 38, № 1, с. 214–215.
11. Барьяхтар В. Г., Иванов Б. А., Квирикадзе А. Г., Клепиков В. Ф. О фазовом переходе ферромагнетика из однодоменного в многодоменное состояние.— Физ. металлов и металловед., 1973, т. 36, № 1, с. 18–22.
12. Барьяхтар В. Г., Попов В. А. К теории доменной структуры ферромагнетиков.— Физ. металлов и металловед., 1972, т. 34, № 1, с. 5–11.

Ленинградский
государственный
университет
им. А. А. Жданова

Поступила в редакцию
31.V.1982

УДК 534.2–16

ОБ АКУСТОФОТОРЕФРАКТИВНОМ ЭФФЕКТЕ

Чабан А. А.

В данной работе предлагается новый метод акустофоторефрактивной записи [1–3], в котором используется модулированный по интенсивности световой пучок.

Интересный акустофоторефрактивный эффект обнаружен совсем недавно. Он наблюдался тогда, когда во время прохождения через кристалл звука подавался мощный световой импульс с длительностью, существенно меньшей периода звуковой волны. Дело в том, что в пьезоактивном кристалле неоднородные электрические поля, созданные звуковой волной и практически постоянные во все время освещения, приводят к перераспределению по объему фотовозбужденных носителей тока и возникновению неоднородного по кристаллу связанного заряда. Возникающие вследствие этого остаточные электрические поля благодаря механизму линейного электрооптического эффекта создают периодическое в пространстве возмущение в величине показателя преломления, которое и наблюдалось по рассеянию пробного светового пучка [1–3]. Естественно, что в проведенных экспериментах требовалась очень высокая интенсивность и очень малая длительность записывающего светового пучка.

Ниже будет показано, что такое же явление можно достаточно просто наблюдать, если осветить кристалл, через который распространяется звук, не очень интенсивным, но достаточно длительным световым потоком, промодулированным с частотой звуковой волны. Такие условия ближе к обычно используемым при наблюдении хорошо изученного фоторефрактивного эффекта [4, 5]. Модуляция светового пучка с частотой звука искусственно усиливает рождение фотовозбужденных носителей тока при определенных конфигурациях звукового поля. Передвижение звуковой волны по кристаллу во время записи не выравнивает уже перенос носителей (до их захвата) под действием электрического поля звуковой волны во всех частях образца, поскольку при определенных конфигурациях звукового поля концентрация носителей в объеме оказывается выше. Таким образом, возникает неоднородный в пространстве связанный электрический заряд. При этом не требуется особо большой мощности светового потока, поскольку при модуляции светового потока эффект будет нарастать во времени и при длительности светового импульса, превышающей на порядок период звуковой волны.

Отметим, что для пьезополупроводников воздействие модулированного света на звуковую волну в задачах несколько иного рода уже исследовалось ранее (см., например, работу [6]).

Пусть через фоторефрактивный кристалл вдоль кристаллофизической оси X_1 распространяется звуковая волна с относительной деформацией $du/dx_1 = A \sin(kx_1 - \omega t)$. Для простоты считаем, что вдоль этой оси могут распространяться чисто продольная и чисто поперечные звуковые волны (продольная нормаль). В момент времени $t=0$ включается освещение с интенсивностью $I_0(1 + \beta \sin \omega t)$. Количество электронов, выбрасываемых в единицу времени в зону проводимости,

$$g(t) = \alpha I_0^m (1 + \beta \sin \omega t)^m. \quad (1)$$

Здесь α — некоторый коэффициент, характеризующий эффективность возбуждения электронов. Для линейного фоторефрактивного кристалла $m=1$, для нелинейного — $m=2$ [7].

Подчеркнем, что одновременно с неоднородным по объему изменением показателя преломления из-за акустофоторефрактивного эффекта появится и хорошо известное однородное (в принятых предположениях о геометрии эксперимента) по образцу изменение показателя преломления из-за обычного фоторефрактивного эффекта [4, 5]. Поскольку последний эффект хорошо изучен и легко наблюдаем, будем