

А.И. Спольник, Л.М. Калиберда, А.Ю. Гайдусь

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков***ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

В работе проанализированы возможности использования ферромагнитного резонанса (ФМР) для исследования дефектов кристаллической структуры ферромагнетиков. На основании результатов теоретических и экспериментальных работ, в которых исследовано влияние дефектов структуры на ширину резонансной линии, сделан вывод о перспективности использования ФМР в качестве метода дефектоскопии магнитных материалов.

Ключевые слова: ферромагнитный резонанс, ширина линии, дефекты структуры.

Введение

Ферромагнитный резонанс (ФМР) до настоящего времени не получил широкого применения в качестве метода контроля и исследования дефектов кристаллической структуры ферромагнитных материалов. В то же время в целом ряде работ установлена высокая чувствительность ширины линии ФМР к процессам структурообразования, происходящим в кристаллах под действием механических, химических и радиационных воздействий. На наш взгляд, основным препятствием для прикладного применения ФМР является отсутствие единой теоретической и экспериментальной базы, убедительно обосновывающей эту возможность.

Основная часть

Общий подход к теоретическому рассмотрению задачи о влиянии различных дефектов кристаллической структуры на параметры МР, в частности, на ширину резонансной линии, основан на использовании метода вероятностей перехода, при котором наличие дефекта приводит к рассеянию прецессии вектора намагниченности, возникающей при резонансе однородного магнитона, т.е. к релаксации намагниченности.

Наиболее удобно такие расчеты проводить в рамках двухмагنونных процессов [1], так как основную роль играют процессы с участием двух магнов. Наличие дефекта приводит к уничтожению (рассеянию) магнона с волновым вектором $\vec{k} = 0$ (однородный магнон) и рождению магнона с волновым вектором $\vec{k} \neq 0$.

Нахождение времени релаксации τ однородного магнона позволяет определить ширину линии МР ΔH , так как

$$\Delta H = \frac{\hbar}{2\mu_0} \cdot \frac{1}{\tau}, \quad (1)$$

где \hbar – постоянная Планка, μ_0 – магнетон Бора.

Остановимся кратко на результатах исследований, связанных с наличием таких дефектов структуры, как дислокации и объемные дефекты (поры, включения).

Дислокации. В работе исследовано рассеяние магнов на системе случайно расположенных винтовых дислокаций, а также рассмотрен случай упорядоченного расположения дислокаций. При расчетах был использован подход, предложенный в [2]. При таком подходе рассматривается рассеяние однородного магнона на неоднородном упругом поле дислокации. Связь между магномом и дислокацией осуществляется за счет магнитоупругого взаимодействия. Энергия этого взаимодействия позволяет найти время релаксации магнона и, соответственно, ширину резонансной линии. Не приводя громоздких вычислений, остановимся на результатах теории.

Нами показано, что наличие скоплений, содержащих Z дислокаций, приводит к увеличению ширины резонансной линии ΔH в Z раз. Такая ситуация имеет место в пластически деформированных ферромагнитных металлах, в частности, в никеле.

Общий вывод, вытекающий из этих расчетов: ширина линии чувствительна к плотности дислокаций n , магнитным характеристикам ферромагнетика, а также зависит от положения резонансной частоты ω_0 в спектре спиновых волн:

$$\Delta H \sim \begin{cases} n \cdot \ln\left(\frac{1}{\alpha n}\right), & \omega_0 < \omega_{\max}; \\ \sqrt{n}, & \omega_0 = \omega_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где α – обменная постоянная; ω_{\max} – верхняя граница спектра спиновых волн.

Эти выводы объясняют экспериментальные результаты целого ряда работ, посвященных исследованию влияния пластической деформации на ширину линии ФМР (см., например, [3]). Так, в частности, было доказано, что на начальных стадиях пластической деформации $\Delta H \sim \sqrt{n}$.

Используя аналогичный подход, нами теоретически исследовано влияние движения дислокаций на ширину линии резонанса [4]. Расчеты показали, что результатом влияния движения дислокаций на ширину линии может быть как увеличение, так и уменьшение ΔH . Так при малых скоростях движения дислокаций вклад подвижных дислокаций практически совпадает с вкладом неподвижных. При скоростях движения дислокаций, превышающих минимальную фазовую скорость спиновых волн, ширина линии резонанса убывает. К сожалению, из-за сложности постановки экспериментов по выяснению влияния движения дислокаций на ΔH , экспериментального подтверждения теории пока нет.

Объемные дефекты. Под объемными дефектами понимаются трехмерные дефекты в виде пор, которые могут быть полыми или газонаполненными, а также немагнитные включения. Рассеяние однородного магнтона происходит на неоднородном размагничивающем магнитном поле внутри поры.

В двухмагнетонном приближении получены аналитические выражения, описывающие зависимость ширины линии от концентрации C , степени вытянутости и среднего размера пор R :

$$\Delta H \sim C \cdot N_{yy} \cdot R, \quad (3)$$

где N_{yy} – компонента тензора размагничивающих коэффициентов поры эллипсоидной формы.

Таким образом, показана высокая чувствительность ширины линии ФМР не только к концентрации пор, но и к их форме.

Рассмотрено влияние напряжений, которыми могут быть окружены неравновесные поры, заполненные газом. В теории упругости [5] получен тензор деформации вокруг таких “упругих” пор.

По аналогии с [2], исходя из выражения для магнитоупругой энергии, и заменив тензор деформации вокруг дислокации на тензор деформации, возникающей в ферромагнетике вокруг сферической “упругой” поры, было получено выражение для ширины линии ФМР ΔH :

$$\Delta H = 10^8 \cdot \left(\frac{B_1^2}{M_0^3} \right) (1 + \sigma)^2 \left(\frac{p}{E} \right)^2 \cdot n \cdot \frac{R^6}{\alpha^{3/2}}, \quad (4)$$

где B_1 – магнитоупругая постоянная; σ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга ферромагнетика;

p – давление, оказываемое порой на матрицу; n – количество пор в единице объема.

При этом, в соответствии с выражением (4), появилась возможность оценить давление гелия в порах и поверхностную энергию никеля.

Для создания ансамбля газонаполненных пор в металле был использован ионный ускоритель. Энергия ионов определяла глубину их имплантирования, что важно для последующих измерений ФМР. Это связано с наличием скин-эффекта на сверхвысоких частотах: при частоте ФМР $\omega_0 \sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$ толщина скин-слоя составляет десятые доли микрона. Подбором дозы облучения и параметров последующего отжига облученных образцов достигалась концентрация пузырьков гелия, позволяющая наблюдать вклад этих дефектов структуры в ширину линии ФМР.

Образцы для исследований изготавливались из поликристаллического никеля чистоты 99,99, имели форму дисков диаметром 3мм и толщину 0,1мм. Предварительно образцы отжигались в вакууме 10^{-4} Па при температуре $T = 1100 \text{ К}$ в течение 2 часов, а затем полировались электролитическим методом.

Облучение образцов было проведено при комнатной температуре в ионном ускорителе пучком ионов гелия с энергией 20 кэВ до дозы $4,0 \cdot 10^{21}$ ион·м⁻².

После облучения образцы подвергались изохронному отжигу в течение 30 минут, начиная с температуры $T = 700 \text{ К}$ и до температуры $T = 1100 \text{ К}$ через каждые 50 К. Данные о размерах и количестве пузырьков гелия были получены с помощью просвечивающего электронного микроскопа при ускоряющем напряжении 100 кэВ. Утончение производилось с необлученной стороны образцов.

В результате отжига в образцах возникли поры, заполненные гелием [6]. По мере возрастания температуры отжига увеличивались средний размер пор R и их концентрация n . Начиная с $T = 1000 \text{ К}$, величины R и n достигли максимальных значений и вышли на насыщение: $R \approx 3,0 \cdot 10^8 \text{ м}$ и $n \approx 6,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

Используя выражение (4), значения $\Delta H = 310 \text{ Э} = 23,9 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$, $\alpha = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $n = 6,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $\sigma = 0,28$, $E = 20 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и справочные данные магнитных величин, была получена величина давления гелия в порах при комнатной температуре $p = 10^8 \text{ Па}$. Предполагая далее, что при температуре отжига $T = 1000 \text{ К}$ давления гелия в порах равно

лапласовскому, т.е. $p = \frac{2\gamma}{\alpha}$, было получено значение

поверхностной энергии γ никеля при этой температуре:

$$\gamma = (4500 \pm 1800) \text{ мДж} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Такое значение согласуется с данными, полученными другими методами [7].

Поскольку при ФМР на СВЧ проявляется скин-эффект, то дефекты поверхности, в частности, ее шероховатость, также будут оказывать влияние на ширину линии. Это позволяет использовать ФМР для оценки качества поверхности, а также для определения степени коррозионного поражения ферромагнитных металлов, которое приводит к образованию поверхностных дефектов. Экспериментальная проверка этих возможностей была проведена на образцах никеля, которые подвергались коррозии в воздухе при температуре 600К. Было установлено, что по ширине линии ФМР можно оценивать кинетику коррозии, в частности, её скорость в различных агрессивных средах [8].

При использовании метода ФМР для структурных исследований в массивных металлических образцах очень важно учитывать наличие скин-эффекта, который влияет на получаемые результаты. Особенности ФМР в металлах подробно анализируются в [9].

Выводы

Метод ФМР обладает целым рядом преимуществ по сравнению с другими методами структурных исследований. Они заключаются не только в

информативности этого метода, но также и в его экспрессности. Эти обстоятельства позволяют утверждать, что метод ФМР может дополнить уже известные методы дефектоскопии металлов, позволяя исследовать и наблюдать кинетику структурной перестройки, происходящей в ферромагнетиках под влиянием таких внешних воздействий, как деформационное, химическое, тепловое, радиационное.

По ширине линии ФМР можно:

1. Оценивать плотность дислокаций и ее изменения при пластической деформации кристаллов.
2. Определять начальную стадию перестройки дислокационной структуры при переходе от хаотического к упорядоченному расположению дислокаций.
3. Оценивать отношение количества подвижных дислокаций к количеству неподвижных в условиях пластической деформации.
4. Оценивать концентрацию и форму объемных дефектов различного происхождения: пор, немагнитных включений, пузырьков газа.
5. Диагностировать качество многослойных структур, неоднородность магнитных пленок по площади [10–11].
6. В случае газонаполненных пор оценивать давление газа в них и поверхностную энергию ферромагнетика.
7. Изучать радиационные дефекты в твердых телах [12].
8. Оценивать скорость коррозионного поражения ферромагнетиков в различных агрессивных средах.

Список литературы

1. Orhan Yalcin. Ferromagnetic resonance – Theory and Applications / Orhan Yalcin. – InTech, 2013. – 248 p. – doi:10.5772/50583.
2. Korner M. Two-magnon scattering in permalloy thin films due to rippled substrates / M. Korner, K. Lenz, R.A. Gallardo, M.A. Fritzsche, S.F. Mucklich // Phys.Rev. – 2013. – В. Vol.88. – P. 054405(1–10).
3. Пинчук В.Г. Исследование дислокационной структуры ферромагнетиков методом ферромагнитного резонанса / В.Г. Пинчук, Ю.М. Плескачевский, С.В. Короткевич, С.О. Бобович // Материалы. Технологии Инструменты. – 2010. – Т.15, № 4. – С. 114–118.
4. Спольник А.И. Рассеяние однородной спиновой волны на движущихся дислокациях / А.И. Спольник, А.Ю. Гайдусь, Л.М. Калиберда // Системы обработки інформації. – Х.: ХНУПС, 2016. – Вып. 7(144). – С. 32–35.
5. Poroelasticity / A.H. Cheng. – Springer International Publishing – Switzerland, 2016. – 893 p.
6. Денисов Е.А. Водород и гелий в никеле и стали 12Х18Н10Т / Е.А. Денисов, И.Е. Бойцов, И.Л. Малков, Т.Н. Компаниец, А.А. Юхимчук // Журнал технической физики. – 2013. – Том 83, Вып. 6. – С. 17–21.
7. Кумыков В.К. Измерение поверхностного натяжения алюминия в твердом состоянии / В.К. Кумыков, И.Н. Сергеев, В.А. Созаев, М.В. Гедгагова // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – №5. – С. 93–95.
8. Яхьяев Н.Ш. Лабораторные методы измерения и приборы контроля коррозии / Н.Ш. Яхьяев, А.К. Камолов // Молодой ученый. – 2016. – № 12. – С. 455–458.
9. Спольник А.И. Особенности протекания релаксационных процессов при ферромагнитном резонансе в условиях скин-эффекта / А.И. Спольник, А.Ю. Гайдусь, Л.М. Калиберда // Системы обработки інформації. – Х.: ХУПС, 2015. – Вып. 5(130). – С. 48–50.
10. Козлов В.И. Сигнал ФМР как "Носитель" информации о неоднородности пленки по площади / В.И. Козлов // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2014. – № 3(522). – С. 23–27.
11. Куприянова Г.С. Ферромагнитный резонанс как метод диагностики качества многослойных структур и их функциональных свойств / Г.С. Куприянова, А.Н. Орлова, А.Ю. Зюбин, А.В. Асташёнок // Вестник СПбГУ. – 2016. – Сер. 4. – Т. 3(61). – С. 49–52.

12. Гусева В.Б. Применение радиоспектроскопии для изучения радиационных дефектов в твердых телах / В.Б. Гусева, С.П. Зацепин, С.О. Чолах, С.Ф. Конев. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 64с.

References

1. Orhan, Yalcin (2013), *Ferromagnetic resonance – Theory and Applications*, InTech, 248 p., DOI:10.5772/50583.
2. Korner, M., Lenz, K., Gallardo, R.A., Fritzsche, M.A. and Mucklich, S.F. (2013), Two-magnon scattering in permalloy thin films due to rippled substrates, *Phys.Rev. B*, Vol. 88, pp. 054405(1–10).
3. Pynchuk, V.H., Pleskachevskiy, Yu.M., Korotkevych, S.V. and Bobovych, S.O. (2010), "Yssledovanye dyslokatsyonnoi strukturi ferromahnytykov metodom ferromahnytnoho rezonansa" [Investigation of the dislocation structure of ferromagnets by the ferromagnetic resonance method.], *Materials. Technologies. Instruments*, Vol. 15, No. 4, pp. 114-118.
4. Spolnik, A.I., Gaidus, A.Y and Kaliberda, L.M. (2016), "Rasseyanye odnorodnoy spynovoy volni na dvyzhushchykhsya dyslokatsyyakh" [Scattering of homogeneous spin wave on moving dislocations], *Information Processing Systems*, No. 7(144), pp. 32-35.
5. Cheng, A.H. (2016), *Poroelasticity*, Springer International Publishing, Switzerland, 893 p.
6. Denysov, E.A., Boitsov, Y.E., Malkov, Y.L., Kompanyets, T.N. and Yukhymchuk, A.A. (2013), "Vodorod y helyi v nykele y staly 12X18H10T" [Hydrogen and helium in nickel and steel12X18H10T], *Journal technical physics*, Vol. 83, No. 6, pp. 17-21.
7. Kumikov, V.K., Serheev, Y.N., Sozaev, V.A. and Hedhahova, M.V. (2013), "Yzmerenye poverkhnostnogo natiazheniya aliumely v tverdom sostoianyy" [Measurement of the surface tension of alumel in the solid state], *Modern scientific technologies*, No. 5, pp. 93-95.
8. Yakhyaev, N.Sh. and Kamolov, A.K. (2016), "Laboratornie metodi yzmerenyya y prybori kontrolya korrozyy" [Laboratory measurement methods and corrosion control devices], *Young scientist*, No. 12, pp. 455-458.
9. Spolnik, A.I., Gaidus, A.Y. and Kaliberda, L.M. (2015), "Osobennosti protekaniya relaksatsyonnykh protsessov pry ferromahnytnom rezonanse v uslovyakh skyn-effekta" [Features passing of relaxation processes ferromagnetic resonance in a skin-effect condition], *Information Processing Systems*, No. 5(130), pp. 48-50.
10. Kozlov, V.Y. (2014), "Syhnal FMR kak "Nosytel" ynformatsyy o neodnorodnosti plenky po ploshchady" [FMR signal as "Media" of information about the film nonuniformity over the area], *Electronic technics. Serias 1. Microwave- technics*, No. 3(522), pp. 23-27.
11. Kupryyanova, H.S., Orlova, A.N., Zyubyn, A.Yu. and Astashenok, A.V. (2016), "Ferromahnytniy rezonans kak metod dyahnostyky kachestva mnohosloynnykh struktur y ykh funktsyonal'nykh svoystv" [Ferromagnetic resonance as a method for diagnosing the quality of multilayer structures and their functional properties], *Messenger SPbHU*, Ser. 4., Vol. 3(61), pp. 49-52.
12. Huseva, V.B., Zatsypyn, S.P., Cholakh, S.O. and Konev, S.F. (2014), "Prymenenye radyospektroskopyy dlya yzucheniya radyatsyonnykh defektov v tverdikh telakh" [Application of radio spectroscopy for the study of radiation defects in solids], Publishing house Ural. university, Ekaterynburh, 64p.

Поступила в редколлегию 29.09.2017
Одобрена к печати 16.11.2017

Відомості про авторів:

Спольнік Олександр Іванович

доктор фізико-математичних наук професор
завідувач кафедри Харківського національного
технічного університету сільського господарства
ім. П. Василенка,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4389-8813>
e-mail:alspol@ukr.net

Каліберда Любов Мстиславівна

доцент кафедри Харківського національного
технічного університету сільського господарства
ім. П. Василенка,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8452-3308>
e-mail: silva@kharkov.com

Information about the authors:

Spolnik Oleksandr

Doctor of Physics and Mathematics Sciences Professor
Head of Department of Kharkiv Vasylenko National
Technical University of Agriculture,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4389-8813>
e-mail:alspol@ukr.net

Kaliberda Lubov

Associate Professor of Department
of Kharkiv Vasylenko of National Technical
University of Agriculture,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8452-3308>
e-mail: silva@kharkov.com

Гайдусь Андрій Юрійович

кандидат технічних наук доцент
доцент кафедри Харківського національного
технічного університету сільського господарства
ім. П. Василенка,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8414-5765>
e-mail: garmani0604@gmail.com

Gaidus Andriy

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Associate Professor of Department
of Kharkiv Vasylenko National Technical
University of Agriculture,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8414-5765>
e-mail: garmani0604@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ ФЕРОМАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ДЕФЕКТІВ КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ

О.І. Спольнік, Л.М. Каліберда, А.Ю. Гайдусь

В роботі проаналізовані можливості використання феромагнітного резонансу (ФМР) для дослідження дефектів кристалічної структури феромагнетиків. На підставі результатів теоретичних і експериментальних робіт, в яких досліджено вплив дефектів структури на ширину резонансної лінії, зроблено висновок про перспективність використання ФМР в якості методу дефектоскопії магнітних матеріалів.

Ключові слова: феромагнітний резонанс, ширина лінії, дефекти структури.

INFORMATION OPPORTUNITIES OF FERROMAGNETIC RESONANCE IN THE STUDY OF DEFECTS OF CRYSTALLINE STRUCTURE

O. Spolnik, L. Kaliberda, A. Gaidus

In the paper, the possibilities of using ferromagnetic resonance (FMR) for studying defects in the crystal structure of ferromagnets are analyzed. A general approach to the theoretical treatment of the problem of the effect of various crystal structure defects on the FMR parameters is based on the use of the transition probabilities method, in which the presence of a defect leads to the scattering of a homogeneous spin wave excited at resonance. The most significant contribution to spin wave processes is made by dislocations and volume defects - pores and nonmagnetic inclusions. The influence of dislocations is due to the inhomogeneous elastic fields that they create in crystals. Gas-filled pores can also create elastic stresses in the material. The presence of inhomogeneous elastic stresses causes a magnetoelastic interaction between the defect of the spin wave, which leads to its scattering. The obtained analytical expressions describing the effect of gas-filled pores on FMR revealed the effect of gas pressure in the pores, their concentration and the elastic characteristics of the ferromagnet on the width of the resonance line. In the case of dislocations, the width of the resonance line depends essentially on the distribution of dislocations in the crystal, their density, and the magnetic characteristics of the ferromagnet. Experimental investigations of FMR in nickel samples containing helium bubbles were carried out. The experiments allowed to determine the gas pressure in the formed bubbles along the width of the resonance line and to estimate the surface energy of nickel in the solid state. Based on the results of theoretical and experimental studies of the influence of structural defects on the width of the resonance line, it was concluded that the FMR is promising as a method for flaw detection of ferromagnetic metals and alloys.

Keywords: ferromagnetic resonance, line width, structural defects.