

УДК 538.221+621.3.014.12

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

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Харьков***ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФЕРРОМАГНИТНОМ РЕЗОНАНСЕ В УСЛОВИЯХ СКИН-ЭФФЕКТА**

В работе проанализировано влияние скин-эффекта на рассеяние спиновой волны, возбуждаемой при ферромагнитном резонансе, на дефектах кристаллической структуры. Показано, что в металлических ферромагнетиках скин-эффект приводит к целому ряду особенностей, в частности, к селективности ширины резонансной линии по отношению к размерам и локализации дефектов.

Ключевые слова: скин-эффект, ферромагнитный резонанс.

Введение

Процессы релаксации, происходящие в магнитной подсистеме ферромагнетика, отражаются на их высокочастотных свойствах, в частности, приводят к уширению резонансной линии.

В идеальном кристалле основными процессами релаксации, приводящими к диссипации энергии магнитных колебаний при резонансе, являются спин-спиновая и спин-решеточная релаксации [1]. При изучении ферромагнитного резонанса (ФМР) и различных каналов рассеяния однородной спиновой волны при ФМР в металлических ферромагнетиках было установлено существенное влияние электронов проводимости на ширину линии ФМР [1]. В массивных ферромагнетиках наличие электронов проводимости приводит к скин-эффекту, следствием которого является неоднородность прецессии намагниченности в пределах скин-слоя [2].

Цель статьи: анализ влияния скин-эффекта на сверхвысоких частотах на ширину линии ферромагнитного резонанса в металлах с дефектами кристаллической структуры.

Результаты исследований**1. Ограничения в области безобменной части спектра спиновых волн**

На сверхвысоких частотах глубина скин-слоя $\delta \sim 10^{-7}$ м, т.е. δ во много раз меньше размеров образцов. Внешнее однородное поле возбуждает колебания магнитного момента ферромагнетика (спиновую волну), которые распространяются от поверхности вглубь образца и затухает вследствие различных механизмов релаксации. Это приводит к ограничениям накладываемым на величины волновых векторов \vec{k} спиновых волн, которые возбуждаются в массивном ферромагнетике. Наименьшее значение \vec{k} в образцах, намагниченных параллельно поверхности, порядка $1/\delta$ т.е. $\vec{k} \sim 10^{-7}$ м⁻¹, что соот-

ветствует длине спиновой волны $\lambda \sim 10^{-7}$ м. Это означает, что основной вклад в рассеяние спиновой волны, возбуждаемой при ФМР, на дефектах кристаллической структуры должны вносить неоднородности с характерным средним размером $R \sim 10^{-6}$ м [1].

2. Дополнительное уширение линии ФМР и искажение её формы

Кроме этого, скин-эффект обуславливает дополнительное уширение резонансной линии, которое увеличивается с возрастанием частоты ω СВЧ поля, т.к. при этом уменьшается глубина скин-слоя ($\delta \sim 1/\sqrt{\omega}$) и, следовательно, возрастает неоднородность обменного взаимодействия [2]. Скин-эффект приводит также к довольно сильному искажению формы резонансной линии, что усложняет корректное определение ширины линии ФМР ΔH . Величина дополнительного уширения, связанного со скин-эффектом ΔH_δ , по порядку величин равно [2]

$$\Delta H_\delta \sim M_0 \frac{\sqrt{\alpha}}{\delta}, \quad (1)$$

где α – обменная постоянная, M_0 – намагниченность насыщения.

Оценки ΔH_δ для никеля в диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого гелия (4,2К) показывают, что эта величина может достигать сотен эрстед [3]. В гадолинии из-за более низкой электропроводности по сравнению с никелем эта величина варьируется от 10Э (T=300К) до 50Э при (T=4,2К) [4].

Постоянное наличие уширения ΔH_δ в массивных образцах маскирует эффекты уширения, связанные с другими релаксационными процессами. Из этого следует, что уширение резонансной линии дефектами структуры ферромагнетика должно значительно превосходить величину ΔH_δ .

3. Влияние на положение резонансной частоты по отношению к спектру спиновых волн

Следующая особенность ФМР в массивных ферромагнетиках, связанная со скин-эффектом, заключается в ограничении, накладываемом на положение резонансной частоты ω_0 в спектре возбуждаемых в образце спиновых волн. В соответствии с [6], для определения положения ω_0 в спектре воспользуемся параметром X_m :

$$X_m = \sqrt{(2\pi)^2 + \left(\frac{\omega_0}{\gamma M_0}\right)^2} - \frac{H_i}{M_0} - 2\pi, \quad (2)$$

где H_i – статическое магнитное поле внутри образца, γ – гиромагнитное отношение.

Сравнение закона дисперсии спиновых волн, уравнение Киттеля для резонансных частот [2] и выражение (2) показывает, что различным значениям параметра X_m соответствуют различные положения ω_0 в спектре спиновых волн. Так при $X_m \leq 0$, $\omega_{\min} < \omega_0 < \omega_{\max}$, а при $X_m > 0$ $\omega_0 > \omega_{\max}$, ω_{\max} и ω_{\min} верхняя и нижняя границы безобменного спектра спиновых волн (область $\vec{k} \approx 0$), соответственно. Из-за скин-эффекта форма образца не играет роли для высокочастотный компонент тензора размагничивающих коэффициентов и $X_m \leq 0$, что соответствует случаю касательно намагниченной тонкой пластины. Отсюда следует, что в случае массивных металлических образцов из-за скин-эффекта ω_0 может лежать только в пределах $\omega_{\min} < \omega_0 < \omega_{\max}$ и не может превысить ω_{\max} . В случае образца цилиндрической формы из ферродиеlectrica, намагниченного вдоль оси $\omega_0 > \omega_{\max}$, в металлическом цилиндре $\omega_0 = \omega_{\max}$, поэтому в металлических ферромагнетиках в процессах релаксации будут участвовать спиновые волны со значениями \vec{k} , лежащими в пределах от $\vec{k} \sim 1/\delta$ до k_{\max} , ограниченного нижней ветвью спектра спиновых волн $\omega(\vec{k})$.

4. Селективность уширения линии ФМР по отношению к размерам дефектов

Это обстоятельство, т.е. совпадение частоты ω_0 с верхней границей безобменного спектра спиновых волн, оказалось принципиально важным при рассмотрении процессов релаксации, связанных с дефектами. Именно в этом случае, как было показано в работах [5 – 7], уширение резонансной линии, связанное с дефектами кристалла, зависит от их среднего характерного размера.

5. Локализация дефектов

Поскольку ФМР возбуждается в пределах скин-слоя, естественно и дефекты структуры должны быть либо полностью локализованы в его пределах, либо их распределение в объеме образца должно простираться

в скин-слое. Это необходимо учитывать при изучении радиационных дефектов: подбором энергии облучения, например, ионами инертных газов, можно добиться локализации дефектов в пределах скин-слоя [9]. Сложнее всего определить, что подразумевать под характерным размером дефекта в случае дислокаций – дефектов, всегда присутствующих в реальных кристаллах. При анализе явления рассеяния спиновых волн на дислокациях, как правило, рассматривалось упругое поле изолированной дислокации, а суммарный эффект определялся умножением на среднюю плотность дислокаций. В работе [5] был использован статистический подход к решению этой проблемы: учитывались корреляционные свойства тензоров внутренних напряжений и деформаций, создаваемых дислокациями. Учет корреляционных свойств привел к зависимости дислокационного уширения от размеров кристаллитов, из которых состоит кристалл. Такая зависимость имеет место при $\omega = \omega_{\max}$. Так как напряжение от отдельной дислокации убывает с расстоянием медленно, как $1/\gamma$ то в области малых \vec{k} корреляционная функция расходится. Учитывая, что из-за скин-эффекта область малых \vec{k} «вырезается», то расходимость автоматически устраняется. При этом целесообразно принимать k равным $1/\delta$, т.е. радиус экранирования упругого поля дислокации считать равным по порядку величины глубине скин-слоя ($r \sim \delta$). Это оправдано при хаотическом распределении дислокаций и их относительно невысоких плотностях ($n \leq 10^{10} \text{ м}^{-2}$). В случае ячеистой дислокационной структуры за r принимается размер ячейки сетки Франка. При плотностях дислокаций $n \geq 10^{12} \div 10^{14} \text{ м}^{-2}$ поля дислокаций в значительной мере компенсируются на меньших расстояниях чем δ , что приводит к нарушению $\Delta H \sim \sqrt{n}$ и уменьшению величины дислокационного уширения [5, 6]. При перемещении ω_0 от верхней границы ω_{\min} к нижней границе ω_{\max} безобменного спектра спиновых волн зависимость от характерных размеров дефектов уменьшается, и также уменьшается величина уширения линии. Качественно это объясняется уменьшением количества спиновых волн, с которыми вырождается спиновая волна, возбуждаемая при резонансе. В общем случае, ширина линии обусловленная дислокациями, прямо пропорциональна углу α между намагниченностью и осью вращения эллипсоида изменяется параметр X_m [6]. Для металлических образцов легко показать, что $X_m \cong -2\pi \sin^2 \alpha$, т.е. всегда $\omega_0 < \omega_{\max}$. Случай $X_m = 0$ соответствует положению внешнего статического магнитного поля в плоскости скин-слоя образца ($\alpha = 0$). Поведение функции $F(X_m)$ [6] в области $X_m \leq 0$ отражает качественное поведение дислокационного уширения при смещении ω_0 к ω_{\min} . Это под-

тверждено экспериментами на образцах никеля цилиндрической формы, подвергнутых пластической деформации растяжением. При деформациях, соответствующих первой стадии упрочнения, $\Delta H \sim \sqrt{p}$. В случае объемных дефектов (пор, включений) под характерным размером r понимается средний размер дефектов. При теоретическом рассмотрении релаксационных процессов, протекающих при ФМР, как правило, рассматриваются сферические поры радиуса r . При совпадении ω_0 с ω_{\min} , как было отмечено выше, уширение линии такими дефектами максимально и пропорционально величине r :

$$\Delta H = 9\pi M_0 \cdot (v/V) \cdot \sqrt{2\pi/\alpha} \cdot r, \quad (3)$$

где v – суммарный объем пор, V – объем скин-слоя. В этом выражении учтено, что $r \sim \delta$. В случае $r \gg \delta$ величина уширения значительно меньше, т.к. пропорциональна кубу малого параметра $(\sqrt{2\pi/\alpha} \cdot \delta^2/R)^3$:

$$\Delta H = \frac{18}{15\pi^2} \cdot M_0 \frac{v}{V} (\sqrt{2\pi/\alpha} \cdot \delta^2/R)^3 \cdot \sqrt{2\pi/\alpha} \cdot r. \quad (4)$$

Предсказанная теорией чувствительность ширины линии к размеру пор, обусловленная скин-эффектом, нашла экспериментальное подтверждение [7, 8].

Выводы

Несмотря на наличие таких отрицательных факторов влияния скин-эффекта на резонансные измерения уширения, ширины линии, как дополнительное уширение, маскирующее другие эффекты, искажение формы резонансной линии, ФМР представляет несомненный интерес в качестве информативного метода контроля и исследования структурных несовершенств ферромагнитных металлов и сплавов [10]. К положительным факторам влияние скин-эффекта можно отнести селективность по отношению к размерам и локализации дефектов. Это представляет интерес при исследованиях примесных нарушений, возникающих при радиационном воздействии на ферромагнетики [9]. При исследованиях прочност-

ных характеристик ферромагнитных металлов существенно чувствительность ширины линии ФМР к изменению дислокационной структуры в процессе пластической деформации. Это может дать информацию как о стадиях пластического упрочнения, так и о приближающемся разрушении металла.

Список литературы

1. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / Гуревич А.Г. – М.: Наука, 1973. – 591 с.
2. Ахнезер А.И. Спиновые волны / А.И. Ахнезер, В.Г. Барьяхтар, С.В. Пелетминский. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
3. Андерс А.Г. Температурная зависимость ширины линии ФМР в монокристаллах никеля / А.Г. Андерс, А.И. Спольник // ФТТ. – 1974. – Т. 16, вып. 11. – С. 3406-3410.
4. Андерс А.Г. Ширина линии ФМР в монокристаллическом гадолинии / А.Г. Андерс, Д.П. Белозеров, А.И. Спольник // ФНТ. – 1977. – Т. 3, вып. 12. – С.1538-1541.
5. Ахиезер А.И. К теории уширения линии ферромагнитного резонанса дислокациями / А.И. Ахиезер, В.С. Бойко, А.И. Спольник // ФТТ. – 1974. – Т. 16, вып. 11. – С.3411-3416.
6. Ахиезер А.И. Теория дислокационного уширения линии однородного ферромагнитного резонанса / А.И. Ахиезер, В.В. Ганн, А.И. Спольник – ФТТ. – 1975. – Т. 17, вып. 8. – С.2340-2346.
7. Спольник А.И. Особенности уширения линии ферромагнитного резонанса объемными дефектами в металлах / А.И. Спольник, Л.М. Калиберда, М.А. Чегорян // УФЖ. – 1989. – Т. 34, вып. 5. – С.764-769.
8. Спольник А.И. Применение ферромагнитного резонанса для исследования коррозии и качества поверхности / А.И. Спольник, И.В. Волчок, Л.М. Калиберда // Доповіди НАН України. – 1999. – №2. – С.102-105.
9. Применение ферромагнитного резонанса к исследованию кинетики образования структурных несовершенств в никеле при облучении ионами гелия / [Спольник А.И., Волчок И.В., Калиберда Л.М., Чегорян М.А.] // Труды VIII МК «Фізичні явища в твердих тілах». – Х.: ХНУ, 2007. – С. 11-14.
10. Спольник А.И. Новые возможности магнитной спектроскопии для изучения дефектной структуры металлов и сплавов / А.И. Спольник, И.В. Волчок, Л.М. Калиберда // Мат. 55-й междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности». – Х.: ХФТИ, 2014. – С. 144.

Поступила в редколлегию 25. 02.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Пуятин, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОТІКАННЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ФЕРОМАГНІТНОМУ РЕЗОНАНСІ В УМОВАХ СКІН-ЕФЕКТУ

О.І. Спольник, А.Ю. Гайдусь, Л.М. Калиберда

У роботі проаналізовано вплив скін-ефекту на розсіювання спінової хвилі, порушеної при феромагнітному резонансі, на дефектах кристалічної структури. Показано, що в металевих феромагнетиках скін-ефект призводить до цілого ряду особливостей, зокрема, до селективності ширини резонансної лінії по відношенню до розмірів і локалізації дефектів.

Ключові слова: скін-ефект, феромагнітний резонанс.

FEATURES PASSING OF RELAXATION PROCESSES FERROMAGNETIC RESONANCE IN A SKIN-EFFECT CONDITION

O.I. Spolnik, A.Y. Gaidus, L.M. Kaliberda

In the work analyzed the influence of the skin-effect on the spin waves scattering excited by ferromagnetic resonance, on defects in the crystal structure. It is shown that metallic ferromagnets skin-effect leads to a number of features, particularly the selectivity to the resonance line width in relation to the dimensions and the localization effects.

Keywords: skin-effect, ferromagnetic resonance.