

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ МИКРОПРОВОДОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ МАГНИТОСТРИКЦИЕЙ В НУЛЕВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

^{*}*Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, Cantoblanco, Spain,*

^{**}*НИИП ЦМТ ТЕХМЕД,*

ул. Академией, 3/3, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова

Введение

В последнее время возрос интерес к исследованиям магнитных характеристик литого аморфного микропровода в стеклянной изоляции. В частности, такой микропровод на основе Co с отрицательной магнитострикцией обладает отличными магнитомягкими свойствами и прекрасными характеристиками гигантского магнитоимпеданса.

Простейшая доменная структура в таком микропроводе предложена в [1]. Основные домены этой структуры представляют собой эллиптические диски с осью намагниченности, направленной перпендикулярно к оси микропровода. Однако в очень тонких микропроводах с радиусом r_c меньшим размера доменной стенки получены бездоменные структуры [2–5].

В данной работе представлен теоретический расчет магнитных свойств тонкого ($r_c \sim 1$ мкм или меньше) литого аморфного микропровода с отрицательной магнитострикцией в стеклянной изоляции.

Цель данной работы – получение аналитического решения известного уравнения Брауна, которое имеет вид [2, 3]

$$\theta''(\rho) + 1/\rho \theta'(\rho) + (\eta/\rho - 1/\rho^2)\sin\{2\theta(\rho)\}/2 = 0, \quad (1)$$

где $0 < \theta(\rho) < \pi/2$ – относительная намагниченность микропровода (которая геометрически равна величине угла $\theta(\rho)$, измеряемого между осью цилиндра и его магнитным моментом), $\rho = r/r_c$ – относительная радиальная координата (за единицу измерения взята длина радиуса цилиндра), $\rho^0 < \rho < 1$, где $(\rho^0)^2 = A/[K(r_c)^2]$, а $\rho^0 < 0,1$ по физическому смыслу – относительный радиус области внутри микропровода, где намагниченность однородна и направлена вдоль оси цилиндра, то есть $\theta(\rho) = 0$ [4, 5]; A – константа обменной энергии, K – константа энергии анизотропии рассматриваемого микропровода.

Ранее показано [5], что если магнитострикция микропровода отрицательна, то параметр $\eta = 1$ (если магнитострикция положительна, $\eta = -1$ [5], этот случай в данном сообщении не рассматривается).

Согласно результатам [6], примем вид функции

$$1/f(\rho) = 1/(\rho^0)^2 \{|\sigma_{\min} - \sigma_z|/\sigma_z\}, \quad (2)$$

где σ_{\min} – минимальная из функций σ_ρ , σ_ϕ (в нашем случае использование σ_ρ или σ_ϕ не изменяет вид функции). Следует отметить, что случай, когда функциями σ_ρ , σ_ϕ пренебрегали, рассмотрен в [4, 5].

Следуя [1, 7], примем следующую модель формирования напряжений для литого аморфного микропровода в стеклянной изоляции. Благодаря электрохимическому взаимодействию наружная поверхность жилы подвержена сильному сцеплению со стеклянной оболочкой. От наружной поверхности до радиуса b происходят релаксационные уменьшения этих напряжений. По физическому смыслу радиуса b , внутри которого релаксация только пластическая, можно считать, что для тонкого микропровода $b \sim \rho^0$.

Действительно, намагниченность провода с отрицательной магнитострикцией, когда напряжения уменьшаются, должна стремиться к оси цилиндра. Согласно [1, 7], представим формулы для остаточных напряжений в жиле микропровода в виде

$$\sigma_\rho = P(1 - b^2/\rho^2) + \sigma^0, \quad \sigma_\phi = P(1 + b^2/\rho^2) + \sigma^0, \quad \sigma_z = \nu(\sigma_\rho + \sigma_\phi) \sim P + \sigma^0, \quad (3)$$

где ν – коэффициент Пуассона (который в случае упругопластической релаксации изменяется в пределах $\nu \sim 0,3 - 0,5$), а σ^0 – все остальные неучтенные напряжения, для которых выполняется $\sigma^0 < P$ [1, 7] и которые сокращаются.

Параметр P определен ранее [8], и порядок его величины оценивается произведением разно-

сти коэффициентов термического расширения металла и стекла на разность между температурами застывания жилы микропровода в стеклянной оболочке и комнатной температурой эксперимента и модулем Юнга металлической жилы.

Основываясь на приведенных аргументах для неизвестной функции $1/f(\rho)$, в уравнении (1) получим:

$$1/f(\rho) = \{1/(\rho^0)^2\} \{b^2/\rho^2\} \sim 1/\rho^2. \quad (4)$$

С учетом формулы (4) асимптотический вид уравнения (1)

$$\theta''(\rho) + 1/\rho \theta'(\rho) = 0. \quad (5)$$

В отличие от уравнения (1) уравнение (5) линейно и легко интегрируется. Частное решение уравнения (5), учитывающее граничные условия [4–6], имеет вид

$$\theta(\rho/\rho^0) = C \ln |\rho/\rho^0|, \quad (6)$$

$$C = \pi / 2 \ln |1/\rho^0|.$$

Интегрируя выражение (6) от ρ^0 (которое для численной оценки примем $\rho^0 \sim 0,1$) до единицы, получим выражение для относительной намагниченности микропровода:

$$M / M_0 \sim 0,2. \quad (7)$$

Если считать, что $M_0 \sim 0,06$ Т, то M может быть $\sim 0,01$ Т, что является достаточно большой величиной для измерений и практического использования.

Выводы

1. Полученный результат – формула (6) для намагниченности не содержит вращательных мод (мод закручивания и выпучивания [2, 3]), которые найдены для однородно–изотропного цилиндра [2, 3].

2. Микропровод остается намагниченным в нулевом поле. Величина намагниченности зависит от технологического параметра ρ^0 .

3. Благодаря существованию остаточной намагниченности, микропровод можно использовать как элемент памяти в микроэлектронике.

4. Сравнение измеренной намагниченности с теорией позволяет определять технологические параметры ρ^0 и соответственно b из формулы (7).

Автор С.А. Баранов выражает благодарность за поддержку этой работы НАТО грантом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baranov S.A. Magnetic properties of Co-based amorphous microwire // JMMM. 2003. 266. P. 278–281.
2. Браун У.Ф. Микромагнетизм. Москва, 1974.
3. Aharoni A., Shtrikman S. Magnetization curve of the infinite cylinder // Phys. Rev. 1958. 109.5. P. 1522–1528.
4. Baranov S.A., Larin V.S., Torcunov A.V., et al. Magnetic properties of glass insulated amorphous microwires // In M.Vazquez, A. Hernando eds. Nanostructured and Noncrystalline materials. Proceeding of the Fourth International Workshop on Non /crystalline Solids. World Scientific. Singapore 1995. P. 425–428.
5. Баранов С.А. Магнитные свойства микропровода с тонкой жилой // Эффекты Баркгаузена и аналогичные физические явления. Ижевск, 1995. С. 12–14.
6. Antonov A., Dykhne A.A., Lagar'kov A., Usov N. Structure of 90° domain wall in Co – based amorphous wire // Phys. A. 1997. 241. P. 425–427.
7. Баранов С.А. Изучение электрохимических и термопластических процессов, участвующих в формировании магнитной структуры микропровода // Электронная обработка материалов. 2002. № 3. С. 84–86.
8. Баранов С.А., Бержанский В.Н., Зотов С.К. и др. Ферромагнитный резонанс в аморфных магнитных проводах // ФММ. 1989. Т. 67. Вып. 1. С. 73–78.

Поступила 16.04.04

Summary

The effect of the residual quenching stresses on the magnetization distribution in thin cast amorphous microwire with negative magnetostriction in zero magnetic field is studied. The cast amorphous microwire with negative magnetostriction has total magnetization in zero magnetic field and does not have curling and buckling mode.