

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Лалетин В. М., Поддубная Н. Н.

Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь
poddubnaya.n@rambler.ru

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект [1,2] открывает широкие перспективы для разработки и создания приборов и устройств взаимного контроля и преобразования электрических и магнитных характеристик, магнитопольевых сенсоров, не требующих дополнительных источников энергии, устройств хранения и считывания информации [3–5]. Несмотря на перспективность таких материалов, пока еще рано говорить об их получении методами микроэлектроники. Причиной тому является отсутствие разработанных методик получения, удовлетворяющих требованиям термостабильности структур и воспроизводимости МЭ эффекта.

Метод ионно-лучевого распыления/осаждения (ИЛРО) [6, 7] позволяет средствами микроэлектроники создавать компактированные в едином объеме материалы, сочетающие одновременно магнитные и сегнетоэлектрические свойства. Особенности метода позволяют получать структуры с высокой адгезией контактирующих слоев, что создает условия для реализации МЭ взаимодействия.

Наибольших значений МЭ эффекта можно достичь на монокристаллических подложках арсенида GaAs и нитрида GaN галлия. Именно они оказываются весьма перспективными с точки зрения практической реализации. GaAs является широко используемым в микроэлектронике полупроводниковым СВЧ-материалом, что и послужило основой проведенным исследованиям.

Композиционные структуры Ni/GaAs и Co/GaAs получали металлизацией поверхности коммерчески доступных стандартных пластин полуизолирующего арсенида галлия GaAs в виде балок $10 \times 4 \times 0,6$ мм с пленками никеля (1,4 мкм) либо кобальта (1,9 мкм) с одной стороны, и пленкой золота (1 мкм) с противоположной. Балки откалывались вдоль естественных граней пластин арсенида галлия ориентацией (100). Пленки кобальта и никеля формировались методом ионно-лучевого распыления соответствующих мишеней ионами аргона с энергией 1600 эВ и плотностью тока пучка $0,25 \text{ мА/см}^2$ в рабочем вакууме не хуже 0,1 Па [7, 8]. Для уменьшения механических напряжений в ферромагнитном слое толщиной более 7 мкм, периодически проводилось прерывание осаждения и пассивация ионами аргона с энергией 0,4-0,6 кэВ.

Магнитоэлектрические измерения проводились при комнатной температуре в постоянном и переменном магнитных полях, а за величину магнитоэлектрического отклика принималось значение МЭ коэффициента по напряжению α . МЭ коэффициент по напряжению α (мВ/(см·Э)) определялся выражением $\alpha = dU/(h \cdot dH)$, где dU – индуцируемое напряжение, dH – напряженность магнитного поля, h – толщина пластины ЦТС, согласно описанной методике в [9, 10].

Полевая зависимость МЭ-коэффициента по напряжению для структуры Co/GaAs представлена на рис. 1 а. С ростом напряженности магнитного поля значение МЭ-сигнала возрастает, достигая максимума (5,3 В/А), далее уменьшается, проходит через ноль, достигает минимума и снова возрастает, стремясь к нулю. В случае структуры с никелем (рис.1 б) максимальная величина МЭ-коэффициента (81,2 В/А) наблюдается при размагничивающем поле 0,5 кА/м. В области магнитного поля от 0,5 до 0,8 кА/м происходит изменение полярности сигнала. Поведение полевой зависимости МЭ-коэффициента определяется характером сопряжения поликристаллической пленки кобальта с монокристаллической подложкой арсенида галлия, неоднородностями структуры пленки и ее свойствами.

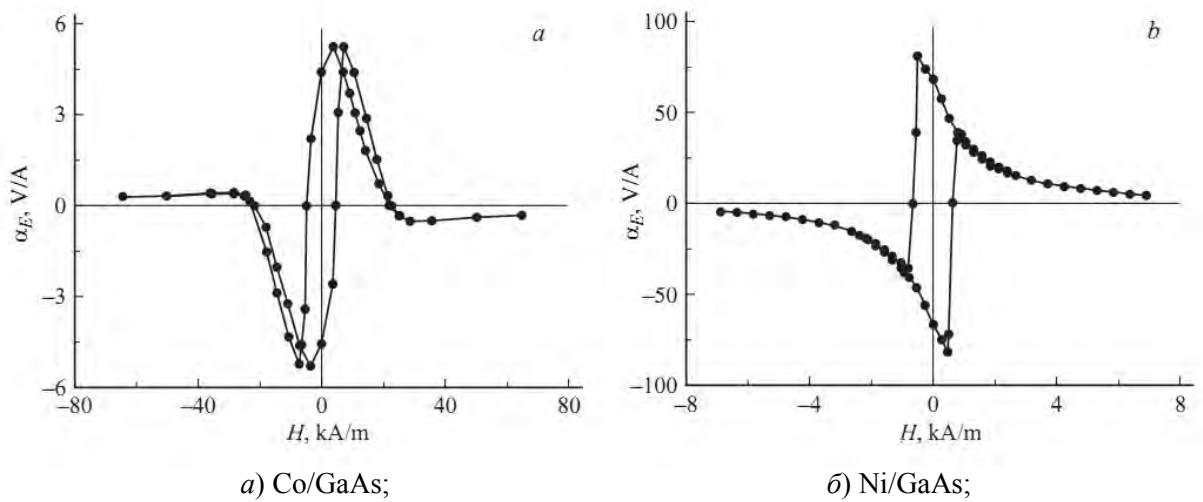


Рис. 1. Полевая зависимость МЭ коэффициента для структур на основе GaAs.

Арсенид галлия имеет постоянную решетки 0,565 нм с расстоянием между ближайшими соседними атомами 0,245 нм. Пленка кобальта толщиной более 1 мкм, полученная методом ИЛРО, обладает свойствами, близкими к своему объемному аналогу [11]. Известно, что кобальт имеет гексагональную решетку с параметрами $a = 0,2505$ нм, $c = 0,4089$ нм. Близость значения параметра a кобальта к характеристикам кристаллической решетки арсенида галлия указывает на то, что сопряжение в области интерфейса будет определяться сочетанием кристаллического ориентационного и адгезионного факторов. Это предполагает однородную по толщине структуру пленки вплоть до критической толщины, при которой будет наблюдаться или отслоение пленки от подложки или ее внутренняя стратификация. Это подтверждают электронно-микроскопические изображения поперечного сечения в области интерфейса, на которых пленка кобальта имеет плотную столбчатую структуру с поперечными размерами столбцов от 200 до 400 нм (рис. 2).

Однородная структура пленки кобальта и возникающие в ней внутренние упругие напряжения обуславливают вид полевой зависимости МЭ-коэффициента структуры Co/GaAs (рис. 1).

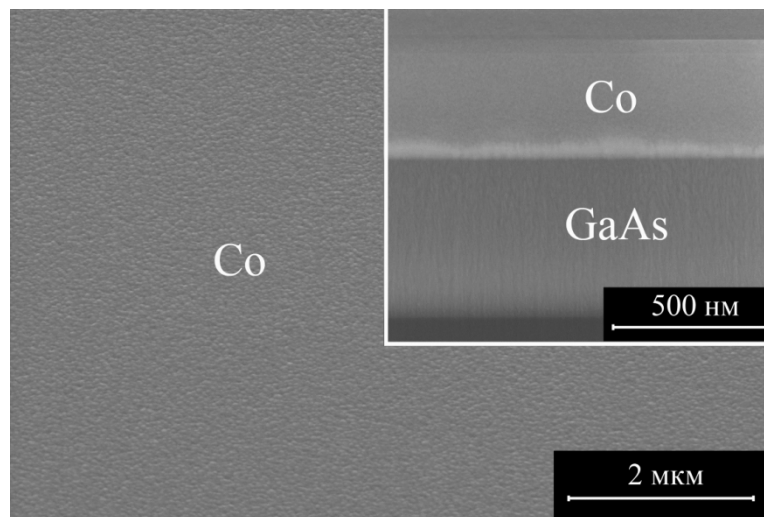


Рис. 2. Микрофотография поверхности пленки кобальта толщиной 1,34 мкм на арсениде галлия (увеличение 50 000 \times) и поперечного сечения гетероструктуры GaAs/Co 1,34 мкм (увеличение 250 000 \times) (на вставке).

Экспериментально показано магнитоэлектрическое взаимодействие в гетероструктурах арсенид галлия/кобальт и арсенид галлия/никель. Величина МЭ коэффициента по напряжению структур Ni/GaAs и Co/GaAs в области электромеханического резонанса достигает, соответственно, 81,2 и 5,3 В/А. Высокое значение резонансного МЭ-коэффициента для структур с никелем связано с большой величиной добротности (8000) и относительно малой величиной диэлектрической проницаемости арсенида галлия. Результаты объясняются высокой адгезией слоев металла при ионно-лучевом распылении позволяют рассчитывать на расширение границ применимости магнитоэлектрического эффекта при комнатных температурах на коммерчески доступные материалы микроэлектроники и интеграцию в устройства формирования-обработки сигнала на единой подложке.

Выражаем благодарность А.И. Стогнию и Н.Н. Новицкому за предоставленные структуры, полученные методом ионно-лучевого распыления/осаждения на базе НПЦ по материаловедению НАН Беларуси.

Список литературы

1. Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D. and Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // J. Appl. Phys. 2008. V.103. P.031101-1-35.
2. Cheng J.H., Wang Y.G., and Xie D. Resonance magnetoelectric effect in Ni/Pb(Zr,Ti)O₃/Terfenol-D trilayered composites with different mechanical boundary conditions // Appl. Phys.Lett. 2014. V.104. P. 252411.
3. Bhadra D., Masud M.G., De S.K., and Chaudhuri B.K. Large magnetoelectric effect and low loss high relative permittivity in 0-3 CuO/PVDF composite film exhibiting unusual ferromagnetism at room temperature // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V.45. 485002.
4. Ma J., Hu J.M., Li Z., and Nan C.W. Recent progress in multiferroic magnetoelectric composites: from bulk to thin films // Adv. Mater. 2011. V.23. 1062.
5. Petrie J.R., Fine J., Mandal S., Sreenivasulu G., Srinivasan G., and Edelstein A.S. Enhanced sensitivity of magnetoelectric sensors by tuning the resonant frequency // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. 043504.
6. Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Шарко С.А., Беспалов А.В., Голикова О.Л., Кецко В.А. Формирование плоскопараллельной межфазной границы в гетероструктуре Ni/PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃ // Неорганические материалы. 2012. Т. 48. № 8. С. 947-951.
7. Стогний А.И., Пашкевич М.В., Новицкий Н.Н., Грибков Б.А., Миронов В.Л., Гераськин А.А., Кецко В.А., Fetta F., Garad H. Контролируемое получение наноразмерных пленок Co на Si(100) ионно-лучевым осаждением // Неорганические материалы. 2011. Т. 47. № 8. С. 962-968.
8. Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Шарко С.А., Беспалов А.В., Голикова О.Л., Sazanovich A., Dyakonov V., Szymczak H., Кецко В.А. Влияние толщины слоя кобальта на магнитоэлектрические свойства гетероструктур Co/PbZr_{0.45}Ti_{0.55}O₃/Co // Неорганические материалы. 2013. Т.49. № 10. С. 1090-1094.
9. Petrov V.M., Srinivasan G., Laletin V.M., Bichurin M.I., Tuskov D.S., Poddubnaya N.N. Magnetoelectric effects in porous ferromagnetic-piezoelectric bulk composites: Experiment and theory // Phys. Rev. B. 2007. V.75, P.174422.
10. Poddubnaya N.N., Laletin V.M., Stognij A.I., Novitskii N.N. Dependence of magnetoelectric effect in layered lead zirconate-titanate/nickel heterostructures on the interface type // Functional Materials. 2010. V.17. №3. P.329-334.
11. Stognij A., Novitskii N., Sazanovich A., Poddubnaya N., Sharko S., Mikhailov V., Nizhankovski V., Dyakonov V. and Szymczak H. Ion-beam sputtering deposition and magnetoelectric properties of layered heterostructures (FM/PZT/FM)_n, where FM – Co or Ni₇₈Fe₂₂ // The European Physical Journal Applied Physics. 2013. V.63. Issue 02. 21301-p1 (7 pages).