

05

## **Магнитоэлектрический эффект в структурах на основе металлизированных подложек арсенида галлия**

© В.М. Лалетин, А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, Н.Н. Поддубная

Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси,  
Витебск, Беларусь

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси  
по материаловедению, Минск, Беларусь

E-mail: poddubnaya.n@rambler.ru

Поступило в Редакцию 26 июня 2014 г.

Впервые экспериментально исследован магнитоэлектрический эффект в области электромеханического резонанса для структур в виде подложек арсенида галлия, металлизированных, с одной стороны, тонкими пленками никеля или кобальта, а с другой — золота (Ni–GaAs–Au, Co–GaAs–Au). Зависимость магнитоэлектрического эффекта от поля намагничивания в структуре Ni–GaAs–Au имеет аномальный вид, несвойственный известным композиционным магнитоэлектрическим материалам на основе керамических пьезоэлектриков. Максимальное значение магнитоэлектрического коэффициента при резонансе составляет 81.2 V/A, что соответствует гигантскому магнитоэлектрическому эффекту при комнатной температуре. Показано, что этот резонанс характеризуется высокой добротностью до 8000.

Магнитострикционно-пьезоэлектрические структуры интересны для исследований тем, что в них наблюдается взаимное превращение магнитного поля в электрическое и, наоборот, электрического в магнитное. Этот эффект, получивший название магнитоэлектрического (МЭ), возникает в результате механического взаимодействия магнитострикционной и пьезоэлектрических фаз [1]. В качестве пьезоэлектрической компоненты обычно используется керамика на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС). Это вызвано тем, что она имеет хорошие диэлектрические и пьезоэлектрические свойства. Наряду с ЦТС известны другие материалы, у которых наблюдается пьезоэлектрический эффект.

Таким является арсенид галлия, обладающий одновременно полупроводниковыми (полуизолирующими) и пьезоэлектрическими свойствами, широко используемый в микроэлектронике, особенно частот СВЧ-диапазона [2]. Поэтому представляет интерес рассмотреть этот материал в качестве подложки при изготовлении слоистых тонкопленочных МЭ-структур металл–пьезоэлектрик.

Целью данной работы являлось исследование МЭ-эффекта в композиционных структурах Ni–GaAs–Au, Co–GaAs–Au в области электромеханического резонанса. Объектом исследования служили образцы арсенида галлия в виде балок длиной 10 мм, шириной 4 мм и толщиной 0.6 мм, поверхность которых методом ионно-лучевого распыления была металлизирована пленкой никеля толщиной 1.4 мкм или кобальта толщиной 1.9 мкм с одной стороны, а с противоположной — пленкой золота толщиной 1.0 мкм [3]. Балки откалывались вдоль естественных граней стандартных пластин полуизолирующего арсенида галлия ориентацией (100).

МЭ-эффект исследовали путем измерения напряжения, возникающего на образце при наложении на него переменного и медленно меняющегося магнитных полей. При этом плоскость образца располагалась вдоль магнитных полей. Переменное магнитное поле создавалось катушками Гельмгольца. Его амплитуда составила 0.8 А/м в диапазоне частот 100–300 кГц. При исследовании структуры Co–GaAs–Au подмагничивающее поле создавалось с помощью электромагнита, в случае структуры Ni–GaAs–Au — катушками Гельмгольца.

МЭ-коэффициент по напряжению ( $\alpha_E$ ) определяли исходя из толщины образца ( $h$ ), величины напряжения ( $dV$ ) и напряженности переменного магнитного поля ( $dH$ ):

$$\alpha_E = dV / (hdH).$$

В МЭ-комposite электрические заряды, генерируемые переменным магнитным полем, будут компенсироваться токами утечки, возникающими в материале. Время их релаксации можно определить по формуле

$$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon \rho,$$

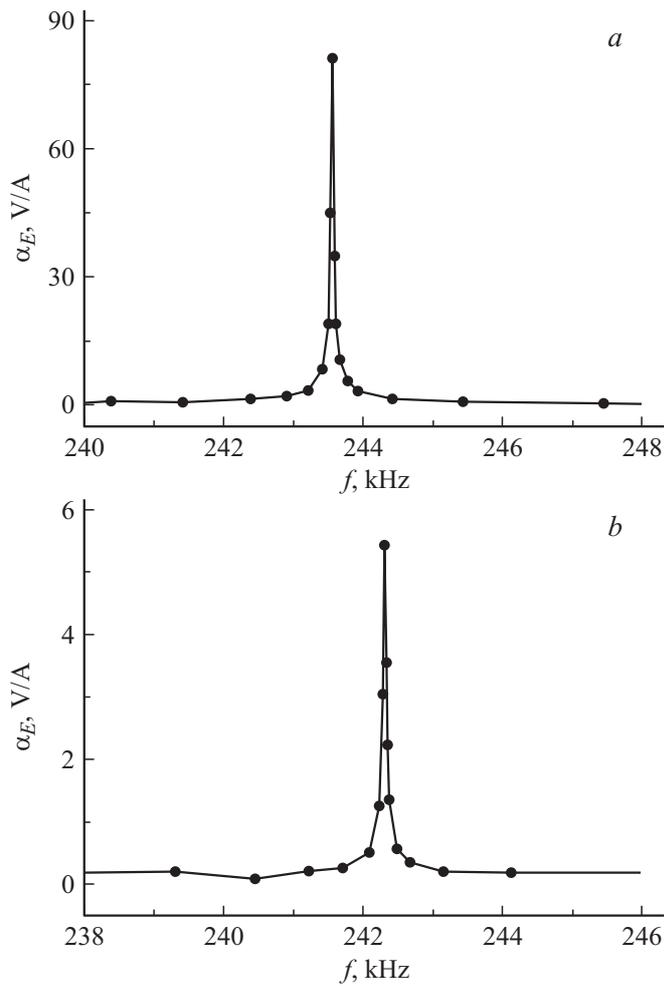
где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $\rho$  — удельное сопротивление,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная, равная  $8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление арсенида галлия равны соответственно 12.9 и  $10^5 \text{ W} \cdot \text{m}$ . Исходя из этих данных, определим время релаксации. Оно равно  $1.1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ . Этот параметр можно использовать для определения граничной частоты ( $f_c$ ), ниже которой использование структур Ni–GaAs–Au, Co–GaAs–Au нецелесообразно:

$$f_c = 1/\tau \sim 100 \text{ kHz}.$$

В композиционных материалах МЭ-эффект связан с механическим взаимодействием пьезоэлектрической и магнитоэлектрической подсистем, поэтому в области электромеханического резонанса наблюдается значительное увеличение МЭ-коэффициента [4]. С целью изучения резонансных МЭ-характеристик исследовано влияние частоты переменного магнитного поля на МЭ-коэффициент. Измерения проводили при величине подмагничивающего поля, соответствующей максимальному МЭ-сигналу. Для структуры Co–GaAs–Au это значение составило  $3.6 \text{ kA/m}$ , в случае структуры Ni–GaAs–Au —  $0.5 \text{ kA/m}$ . Результаты исследований представлены на рис. 1. Для структуры Ni–GaAs–Au на частоте  $243.56 \text{ kHz}$  наблюдается резонансное увеличение МЭ-коэффициента, достигающее в пике  $81.2 \text{ V/A}$ . Разность частот на уровне 0.7 от максимального сигнала  $\Delta f = 30 \text{ Hz}$ , что соответствует добротности, равной 8000. Для структуры Co–GaAs–Au резонанс наблюдается на частоте  $242.31 \text{ kHz}$  с величиной МЭ-коэффициента  $5.3 \text{ V/A}$  при добротности 7500. Исходя из полученных данных следует, что значения резонансных частот и добротности в структурах Co–GaAs–Au и Ni–GaAs–Au находятся в хорошем согласии друг с другом. Следовательно, можно утверждать, что упругие свойства подложки играют основную роль в формировании МЭ-резонанса тонкопленочных структур. Значительные расхождения в значениях резонансного МЭ-коэффициента объясняются магнитоэлектрическими свойствами пленок кобальта и никеля. Величина пьезомагнитного коэффициента для никеля примерно на порядок больше, чем для кобальта.

Полученный резонансный МЭ-коэффициент для структуры Ni–GaAs–Au соизмерим по величине с МЭ-коэффициентом для структуры Ni–ЦТС–Ni ( $113 \text{ V/A}$ ), в котором объемное соотношение пьезоэлектрика к ферромагнетику составляет 1:1 и обеспечено за счет большей толщины слоев никеля в сотни микрометров [5]. Он также гораздо больше МЭ-коэффициента для структуры Ni–ЦТС–Ni (до  $8.0 \text{ V/A}$ ) с



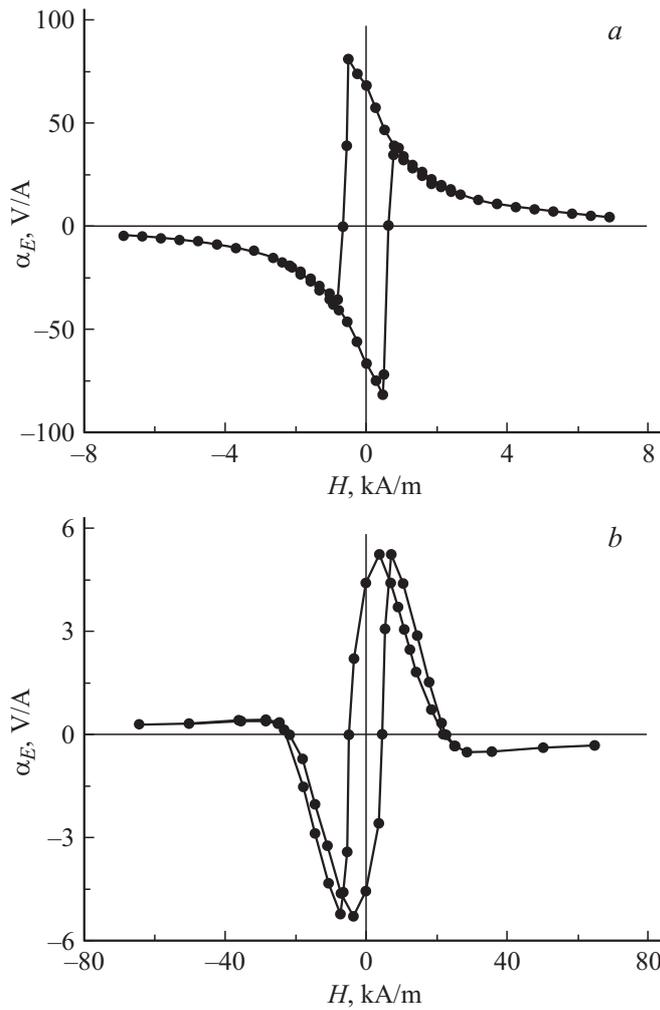
**Рис. 1.** Частотная зависимость МЭ-коэффициента для структур Ni-GaAs-Au (a) и Co-GaAs-Au (b).

близкими по толщине пленками никеля [6]. При сравнении резонансного МЭ-коэффициента необходимо принять во внимание высокую добротность структуры Ni-GaAs-Au (8000) и относительно невысокую

диэлектрическую проницаемость арсенида галлия (13). В структурах Ni–ЦТС–Ni в зависимости от технологии получения добротность меняется от 100 до 1000 [7]. Диэлектрическая проницаемость ЦТС примерно на 2 порядка больше, чем в арсениде галлия. МЭ-коэффициент обратно пропорционален диэлектрической проницаемости, что совместно с высокой добротностью объясняет большую величину резонансного МЭ-коэффициента в структуре Ni–GaAs–Au в сравнении с известными структурами Ni–ЦТС–Ni.

Полевые зависимости МЭ-коэффициента по напряжению для структур Co–GaAs–Au и Ni–GaAs–Au представлены на рис. 2. Для структуры, содержащей кобальт, с ростом напряженности магнитного поля значение МЭ-сигнала возрастает, достигая максимума (5.3 V/A), далее уменьшается, проходит через ноль, достигает минимума и снова возрастает, стремясь к нулю. В случае структуры с никелем полевая зависимость МЭ-коэффициента имеет аномальный вид. Максимальная величина МЭ-коэффициента (81.2 V/A) наблюдается при размагничивающем поле в 0.5 kA/m. В области магнитного поля от 0.5 до 0.8 kA/m происходит изменение полярности сигнала.

Поведение полевых зависимостей МЭ-коэффициента в рассматриваемом случае определяется характером сопряжения поликристаллических пленок кобальта и никеля с монокристаллической подложкой арсенида галлия, неоднородностями структуры пленок и их свойствами. Арсенид галлия имеет постоянную решетки 0.565 nm с расстоянием между ближайшими соседними атомами 0.245 nm [2]. Пленки кобальта и никеля толщиной более 1 μm, полученные методом ионно-лучевого распыления, обладают свойствами, близкими к своим объемным аналогам [3]. Известно, что кобальт имеет гексагональную решетку с параметрами  $a = 0.2505$  nm,  $c = 0.4089$  nm [8]. 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 nm. Можно предположить, что однородная



**Рис. 2.** Полевая зависимость МЭ-коэффициента для структур Ni–GaAs–Au (a) и Co–GaAs–Au (b).

структура пленки кобальта и возникающие в ней внутренние упругие напряжения явились причиной, определяющей вид полевой зависимости МЭ-коэффициента структуры Co–GaAs–Au (рис. 2, b).

Никель характеризуется кубической гранцентрированной решеткой с параметром  $a = 0.3524 \text{ nm}$  [8], которая рассогласована по кристаллическим параметрам с арсенидом галлия. Связь пленки никеля с подложкой в рассматриваемом случае определяется адгезионным фактором, обусловленным процессами перемешивания на интерфейсе при осаждении в условиях ионного распыления. Электронно-микроскопические изображения поперечной структуры области интерфейса показывают, что пленки никеля при толщине  $1.4 \mu\text{m}$  имеют клиновидно-столбчатую структуру, неоднородную в продольном и поперечных направлениях. Для таких структур свойственна неоднородная релаксация упругих напряжений. При этом покрытия никеля обладают адгезией, достаточной для обеспечения работоспособности структуры. Можно предположить, что сложный характер кристаллической текстуры и связанная с ней магнитная анизотропия пленок никеля для Ni–GaAs–Au, приводят к аномальному поведению полевой зависимости МЭ-коэффициента на рис. 2, а.

Таким образом, в данной работе предложены и исследованы новые МЭ-материалы на основе арсенида галлия, содержащие пленки никеля и кобальта микронной толщины. Показано существование МЭ-эффекта, величина которого для структур Ni–GaAs–Au и Co–GaAs–Au в области электромеханического резонанса достигает 81.2 и 5.3 V/A соответственно. Высокое значение резонансного МЭ-коэффициента для структуры Ni–GaAs–Au объясняется большой добротностью (8000) и относительно малой величиной диэлектрической проницаемости арсенида галлия (13). Наблюдаемая аномальная полевая зависимость МЭ-эффекта связывается с анизотропной структурой пленки никеля по отношению к подложке арсенида галлия, обусловленной существенным рассогласованием параметров кристаллических решеток.

## Список литературы

- [1] *Van Suchtelen* // Philips Res. Rep. 1972. V. 27. P. 28–37.
- [2] *Sze S.M., Kwok K.Ng.* // Semiconductor devices, physics and technology. New Jersey: Wiley, 1985. 1032 p.
- [3] *Stognij A., Novitskii N., Sazanovich A., Poddubnaya N., Sharko S., Mikhailov V., Nizhankovski V., Dyakonov V., Szymczak H.* // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2013. P 63:21301.

- [4] Филиппов Д.А., Бичурин М.И., Петров В.М., Лалетин В.М., Поддубная Н.Н., Srinivasan G. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 1. С. 15–20.
- [5] Laletin V.M., Puddubnaya N.N., Srinivasan G., De Vreugd C.P., Bichurin M.I., Petrov V.M., Fillipov D.A. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 222 507.
- [6] Paddubnaya N.N., Laletin V.M., Stognij A.I., Novitskii N.N. // Functional materials. 2010. V. 17. N 3. P. 329–333.
- [7] Поддубная Н.Н., Новицкий Н.Н., Стогний А.И. // Материалы. Технологии. Инструменты. 2013. Т. 18. № 3. С. 22–25.
- [8] Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971. 1032 с.