

УДК 537.9:538.91

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ MgO/CoFeB/Ta ГАРМОНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2023 г. А. С. Трушин¹, Г. А. Кичин¹, *, К. А. Звездин^{1, 2}

¹Общество с ограниченной ответственностью “Новые спинтронные технологии”,
Российский квантовый центр, Сколково, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр
“Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: g.kichin@nst.tech

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.

После доработки 16.09.2022 г.

Принята к публикации 26.09.2022 г.

Изучена структура типа тяжелый металл/ферромагнетик MgO/CoFeB/Ta с плоскостной намагниченностью и высокой спиновой поляризацией. Метод адиабатического гармонического напряжения Холла использован для исследования эффективного коэффициента затухания, а также для оценки значений величин эффективных полей, которые возникают в подобных структурах под действием спин-поляризованного тока.

DOI: 10.31857/S0367676522700193, EDN: JTZHOL

Управление намагниченностью наноструктур без использования внешних магнитных полей, представляет большой интерес, поскольку такой подход открывает широкие возможности для разработки новых спинтронных и логических устройств, которые можно просто и эффективно интегрировать в классические электронные схемы. Управление намагниченностью в таких структурах возможно за счет протекания спин-поляризованного тока перпендикулярно поверхности границы раздела слоев структуры [1].

Также возможно переключение намагниченности за счет эффектов, которые связаны со спин-орбитальным взаимодействием. Сюда относят такие эффекты как спиновый эффект Холла [2] и эффект Рашбы–Эдельштейна [3, 4]. Спиновый эффект Холла заключается в том, что при пропускании тока через систему с большим спин-орбитальным взаимодействием, на границе между магнитным материалом и немагнитным материалом с большим спин-орбитальным моментом аккумулируются спин-поляризованные электроны. Далее эти электроны диффундируют в магнитный слой, что приводит к переключению намагниченности. Эффект Рашбы–Эдельштейна связан с нарушением симметрии поверхностных состояний на границе раздела двух слоев и с возникновением нескомпенсированного электрического поля, что приводит к появлению эффективного магнитного поля, непосредственно

действующего на намагниченность магнитного слоя.

В обоих случаях создается эффект, схожий с возникновением дополнительного “эффективного магнитного поля”, которое влияет на намагниченность. Для оценки этого “эффективного магнитного поля” нами был использован метод адиабатического (низкочастотного) гармонического напряжения Холла. Такой подход впервые был предложен в работе [5], а подобная теория была разработана в первую очередь в статье [6].

Нами была исследована структура с намагниченностью, ориентированной в плоскости образца. Для описания динамики намагниченности используется уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \cdot \vec{H}_{eff} + \alpha \vec{M} \cdot \frac{\partial \vec{m}}{\partial t}, \quad (1)$$

где \vec{M} – намагниченность образца, γ – гиромагнитное отношение, α – константа затухания Гильберта, \vec{H}_{eff} – эффективное магнитное поле. В эффективное поле входят внешнее постоянное поле, поле размагничивания, анизотропии, а также дополнительное поле, которое связано с протекающим в образце спин-поляризованным током. Данная составляющая имеет вид:

$$\Delta \vec{H}_{sc} = a_J (\vec{m} \cdot \vec{p}) + b_J \vec{p}, \quad (2)$$

где a_J – коэффициент затухания, b_J – полевой член, \vec{m} – единичный вектор намагниченности,

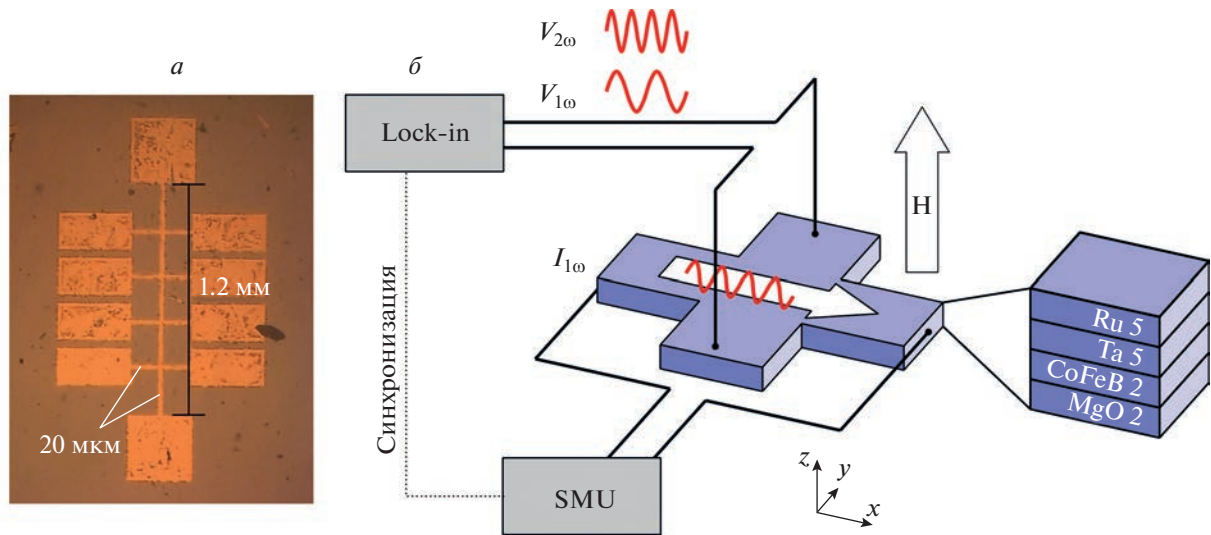


Рис. 1. Микрофотография образца (а) и схема эксперимента (б).

\vec{p} – единичный вектор направления поляризации немагнитного слоя структуры. При больших значениях тока как раз член ΔH_{sc} играет ключевую роль в переключении намагниченности. Гармонический метод позволяет эффективно измерять компоненты поля ΔH_{sc} . Для вектора \vec{p} , направленного по оси y , где за ось x принимается направление протекания тока. ΔH_{sc} имеет вид:

$$\Delta H_{sc} = (\Delta H_x, \Delta H_y, \Delta H_z) = (-a_J \cos \theta_0, b_J, a_J \sin \theta_0 \cos \varphi_H), \quad (3)$$

где θ_0 – это полярный угол равновесного положения намагниченности образца, а φ_H азимутальный угол направления внешнего поля. Для образца, с намагниченностью в плоскости, верно, что $\theta_0 \approx \frac{\pi}{2}$. Дальнейшее теоретическое рассмотрение полагается на варьирование магнитной энергии образца по углам отклонения намагниченности от состояния равновесия, в предположении малости этого угла [6]. Это обстоятельство накладывает естественные ограничения на направление и величину внешнего поля, которое должно быть направлено приблизительно по нормали к образцу и, в конкретно данном методе, не выводить намагниченность из плоскости.

Формула для поля, порожденного коэффициентом затухания, имеет вид:

$$H_{DL} = \Delta H_z = -2 \left(\frac{\partial V_{2\omega}^{XX}}{\partial H} / \frac{\partial^2 V_{\omega}^{XX}}{\partial H^2} \right), \quad (4)$$

а для поля, порожденного полевым членом:

$$H_{FL} = \Delta H_y = \frac{\sin 2\theta_H}{2\xi H_K} \left[\left(\frac{\partial V_{\omega}}{\partial H} \right) \left(\frac{\partial (1/V_{2\omega})}{\partial H} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

где $\xi = \frac{\Delta R_p}{\Delta R_A}$ – отношение изменения сопротивления, вызванного планарным эффектом Холла и вызванного аномальным эффектом Холла. $H_K = \frac{K_{eff}}{M_s}$, где K_{eff} – эффективная энергия внеплоскостной анизотропии, M_s – намагниченность насыщения.

Нами был изучен образец, представляющий собой наноразмерную магнитную гетероструктуру, Структура слоев: MgO (2)|CoFeB (2)|Ta (5)|Ru (5) (в скобках указаны толщины слоев в нм). В качестве подложки использовался оксид магния(II). Намагниченность ориентирована в плоскости образца. Образец имеет крестообразную форму длиной 1.2 мм и шириной 20 мкм (см. рис. 1а).

Схема эксперимента показана на рис. 1б. Для генерации тока был использован источник-измеритель SMU NI-PXIe-4137. Данная модель имеет встроенную функцию генератора сигналов произвольной формы, что позволяет формировать в том числе синусоидальный сигнал тока с частотами вплоть до ~ 5 кГц. Такая возможность позволяет использовать данный прибор совместно с синхронным детектором, чтобы делать измерения продольного и холловского напряжения на первой и на второй гармониках. Сразу после SMU дополнительно был установлен фильтр высоких частот, убирающий лишний высокочастотный шум, что важно для эффективного детектирования сигнала на второй гармонике. Сигнал с

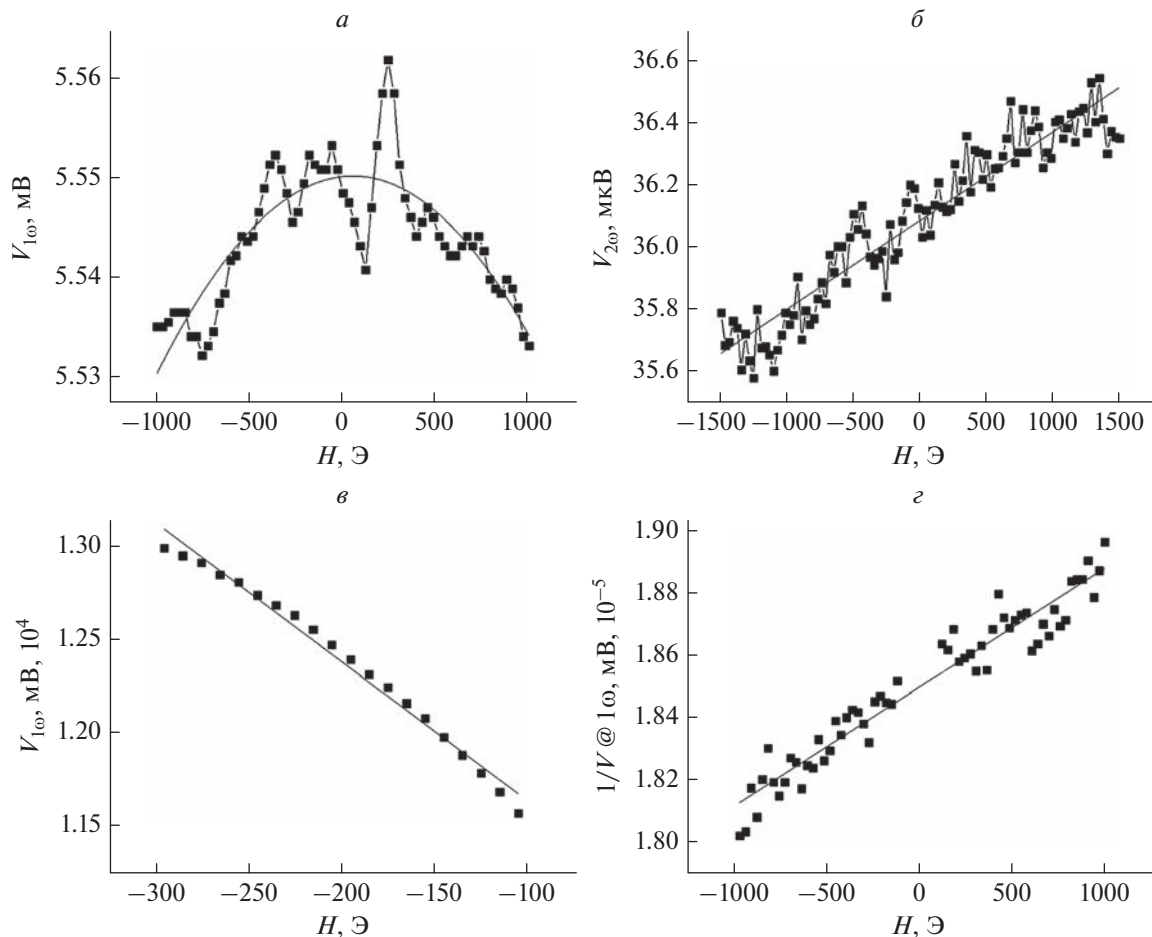


Рис. 2. Первая гармоника отклика и аппроксимация при продольном подключении (*а*); вторая гармоника отклика и аппроксимация при продольном подключении (*б*); первая гармоника отклика и аппроксимация при поперечном подключении (*в*); обратная второй гармонике отклика величина и аппроксимация при поперечном подключении (*г*).

SMU подавался на образец, а также синхронизировался с синхронным усилителем Stanford Research 830. Через образец пропускался ток с максимальной плотностью $0.5 \cdot 10^7 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Подключение приборов к образцу производилось при помощи контактных зондов. Сам образец был помещен в постоянное магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости его поверхности. Поле варьировалось в пределах от -1500 до 1500 Э. В эксперименте измерялось как продольное напряжение, так и поперечное, холловское напряжение. Результаты исследования сравнивались с результатами, полученными в работе [7], а также с данными работ [6, 8–10], где порядок слов был инвертирован (Ta|CoFeB|MgO).

Результаты эксперимента представлены на рис. 2: рис. 2*а* и 2*б* – продольное напряжение, измеренное на первой и на второй гармонике, рис. 2*в* и 2*г* – поперечное (холловское) напряжение и величина, обратная амплитуде второй гармонике. Последнее представлено в таком виде для удобства аппроксимации и подстановки в

формулу (5). Значение сигнала на первой гармонике при продольном подключении аппроксимируется параболой. Остальные величины аппроксимируются линейными зависимостями. В результате измерений для нашей структуры было получено значение ослабляющей компоненты поля $H_{DL} = 17$ Э, что согласуется со значением, полученным в работе [8], где для схожих параметров было получено $H_{DL} = 15$ Э.

Для получения значения полевого члена магнитное поле необходимо дополнительно немного отклонять от вертикали. Для этих целей был использован постоянный магнит, который создавал продольное поле величиной ~ 5 Э. В связи с этим, при малых величинах перпендикулярной компоненты поля (менее 100 Э) нарушалось условие $\theta_H \ll 1$, используемое в выводе формул, что приводило к повышенной погрешности результатов измерений. Эти области были исключены из итоговых графиков. Помимо этого, в силу приближения $H_K \gg H$, где H_K оценивается примерно в

2000 Э [3], развертка по полю для первой гармоники ограничена по модулю 300 Э. Положительная область графика не рассматривается в силу наличия в этой области пиков, схожих по форме с пиками, которые получаются при измерении первой гармоники при продольном подключении. Оба этих графика аппроксимированы линейными зависимостями. Отношение планарного эффекта Холла к аномальному составляет 0.1. В результате исследований получено значение в $H_{FL} = 440$ Э, что несколько меньше чем в работе [8], где H_{FL} составляло 500 Э. Полученные в эксперименте значения несколько отличаются от значений, которые были получены в работе [7] и больше схожи со значениями из работы [4], где слои структуры были выращены в обратном порядке. Численные результаты в этих работах сопоставимы. Отклонение результатов в меньшую сторону мы связываем с особенностями технологии производства и точностью определения H_K , которое следует измерять отдельно, например, с помощью вибрационного магнитометра.

Получаемые в результате эксперимента величины напрямую связаны с фундаментальными физическими параметрами материалов, поэтому сразу возникает желание вычислить угол спинхолла. Однако, как показывает работа [8], стоит рассматривать полученные значения полей, создаваемых спиновым током, лишь как эффективные для данной конкретной структуры в целом, а не для входящих в нее отдельных немагнитных материалов. Так же стоит отметить, что имеет место зависимость параметров H_{FL} и H_{DL} от толщин слоев MgO и Ta, входящих в структуру, а также от температуры и подаваемой плотности тока. Первое обстоятельство связано с тем, что переходный слой между слоями структуры не идеально ровный и поэтому сильно влияет на создаваемое эффективное поле. Для извлечения корректных зна-

чений, относящихся не ко всей структуре в целом, а к отдельным ее слоям, необходимо проводить дополнительные исследования.

Таким образом, нами было продемонстрировано использование гармонического метода Холла для измерения и оценки эффективных магнитных полей, которые создаются спиновым током. Полученные результаты хорошо согласуются с описанными в литературе. Исследование структуры показало, что в начальном приближении прямой и обратный порядок следования слоев в структуре незначительно влияет на значение H_{FL} и H_{DL} . Метод показал свою эффективность и удобство использования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00432).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brataas A., Kent A.D., Ohno H.* // Nature Mater. 2012. V. 11. P. 372.
2. *Ralph D.C., Stiles M.D.* // J. Magn. Magn. Mater. 2008. V. 320. P. 1190.
3. *Bychkov Y.A., Rashba E.I.* // J. Phys. C. 1984. V. 17. P. 6039.
4. *Edelstein V.M.* // Solid State Commun. 1990. V. 73. P. 233.
5. *Pi U.H., Kim K.W., Bae J.Y. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. Art. No. 162507.
6. *Hayashi M., Kim J., Yamanouchi M., Ohno H.* // Phys. Rev. B. 2014. V. 89. Art. No. 144425.
7. *Wong Q.Y., Gan W.L., Luo F.L. et al.* // J. Phys. D. 2018. V. 51. Art. No. 115004.
8. *Cecot M., Karwacki Ł., Skowroński W. et al.* // Sci. Rep. 2017. V. 7. Art. No. 968.
9. *Gamou H., Du Y., Kohda M., Nitta J.* // Phys. Rev. B. 2019. V. 99. Art. No. 184408.
10. *Kim G.W., Cuong D.D., Kim Y.J. et al.* // NPG Asia Mater. 2021. V. 13. Art. No. 60.

Study of magnetic heterostructure MgO/CoFeB/Ta using the harmonic method

A. S. Trushin^a, G. A. Kichin^{a, *}, K. A. Zvezdin^{a, b}

^aNew Spintronics Technologies LLC, Russian Quantum Center, Skolkovo, 143026 Russia

^bProkhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: g.kichin@nst.tech

The heavy metal/ferromagnet type MgO/CoFeB/Ta structure with in-plane magnetization and high spin polarization was studied. We use the adiabatic harmonic Hall voltage method to study the effective damping coefficient and to estimate the values of the effective fields that arise in such structures under the action of a spin-polarized current.