

УДК 537.67

ВЛИЯНИЕ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ СЛОЯМИ СПИН-ИНЖЕКЦИОННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ

© 2023 г. С. Г. Чигарев¹, *, О. А. Бышевский-Конопко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязинский филиал,
Фрязино, Россия

*E-mail: chig50@mail.ru

Поступила в редакцию 12.06.2023 г.

После доработки 19.06.2023 г.

Принята к публикации 28.06.2023 г.

Экспериментально исследовано влияние немагнитной электропроводящей прослойки Мо толщиной 5 нм, размещенной между магнитными слоями Fe и Fe₃O₄ структуры спин-инжекционного излучателя типа “стержень–пленка”, на эффективность его работы. Установлена возможность увеличения мощности излучения более чем в два раза. Обнаружено, что прослойка Мо влияет также на сопротивление структур, увеличивая его. Качественно обосновано влияние прослойки Мо на сопротивление за счет возникновения между слоями структуры контактной разности потенциалов отличной от контактной разности потенциалов двух металлов.

DOI: 10.31857/S0367676523702617, EDN: ZVRPVB

ВВЕДЕНИЕ

Освоение терагерцевого диапазона частот (1–30 ТГц), в том числе и поиск его еще не известных потенциальных возможностей, требует расширения круга исследований в различных областях науки и техники. Для этого необходимо наличие общедоступных, компактных, устойчиво работающих в широком температурном диапазоне, надежных и простых в эксплуатации источников и приемников сигналов. Существующие источники ТГц излучения, построенные как на основе классических принципов, развитых в СВЧ электронике, так и использующие новые принципы, практически полностью перекрывают указанный диапазон частот. Однако все они не отвечают вышеперечисленным требованиям. Поэтому сохраняется актуальность продолжения поиска новых принципов построения ТГц устройств.

Многообещающие возможности в этом направлении дает спинтроника [1–8], одно из новых направлений электроники, в котором рассматривается электронно-волновое взаимодействие при транспорте спинов в многослойных тонкопленочных магнитных структурах, как с электрическими, так и магнитными полями. Эффекты, наблюдаемые при этом, используются при создании элементов вычислительной техники, сенсоров [9, 10], источ-

ников и приемников электромагнитного излучения, в том числе ТГц диапазона [11]. Одним из перспективных способов транспорта спина для создания источников и приемников ТГц сигналов является спиновая инжекция током с плотностью $j > 10^6$ А/см² в магнитных гетероструктурах, образованных ферромагнитными пленками наноразмерной толщины [12].

Спин-инжекционный механизм возбуждения электромагнитных колебаний [13, 14] можно рассматривать как один из принципов создания квантовых генераторов с токовой накачкой. К настоящему времени разработан и экспериментально апробирован ряд источников ТГц излучения, построенных с использованием этого механизма [15–18]. Эксперименты показали его перспективность. Однако на сегодня остается открытым вопрос повышения его эффективности.

В [19, 20] рассмотрена работа спин-инжекционных излучателей с двухслойными магнитными переходами и установлена связь магнитосопротивления и эффективности работы излучателей. Помимо этого, многослойные структуры позволяют исследовать влияние электропроводящих ультратонких пленок (спейсеров) толщиной менее 5 нм, разделяющих магнитные слои структуры, на эффективность работы излучателей. Интерес свя-

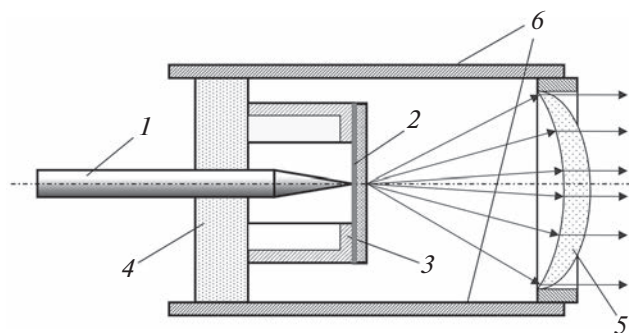


Рис. 1. Спин-инжекционный излучатель со структурой “стержень–пленка”. 1 – Ферромагнитный стержень (Fe) с диаметром острия 10–50 мкм, 2 – образец с той или иной многослойной структурой, 3 – держатель подложки, 4 – диэлектрическая базовая площадка излучателя, 5 – менисковая фокусирующая линза, 6 – держатель линзы. Стрелками показан поток излучения.

зан с тем, что при контакте магнитных слоев между ними возникает обменное взаимодействие, приводящее к плавному переходу намагниченности одного слоя, инжектора, в намагниченность другого, рабочего, слоя [21]. Появляется переходная область с плавно изменяющейся ориентацией намагниченности, в которой электроны способны релаксировать без излучения, то есть, снижается эффективность процесса формирования инверсной заселенности спиновых энергетических подзон в рабочей области, необходимой для ТГц излучения в спин-инжекционных излучателях [13, 14]. Экспериментальные результаты, представленные в [19, 20], говорят о работоспособности двухслойных структур и без спейсера. Тем не менее, представляет интерес оценить, насколько обменное взаимодействие, возникающее между двумя магнитными слоями, снижает эффективность работы излучателей с такими структурами.

ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Исследование режимов возбуждения ТГц излучения в магнитных переходах проводили в излучателе со структурой “стержень–пленка” [15], схема которого представлена на рис. 1. Цилиндрический стержень 1 с заострением диаметром ~30 мкм был выполнен из меди, вторым электродом выступала массивная медная пластина 3. Исследовались режимы работы с использованием образцов с многослойными структурами 2. Одна структура Si/Fe(30)/Mo(5)/Fe₃O₄/(120) имела спейсер, другая без спейсера Si/Fe(30)/Fe₃O₄/(120). В скобках указана толщина слоев в нм. Образцы были изготовлены в ИПТМ РАН (г. Черноголовка) в рамках совместной работы. В таких структурах часть тока проходила по проводящим слоям от стержня к массивной пластине (ток утечки), минуя рабочую область маг-

нитного перехода, а другая часть пронизывала его и стекала через нижний проводящий слой, нанесенный на кремниевую подложку, в массивную медную пластину. Эта часть тока участвовала в излучательном процессе.

Качественная оценка процентного распределения токов по слоям для структуры с молибденовым спейсером показывает, что ток утечки по слою Fe₃O₄ составляет порядка 4% от общего тока, по слою Mo – 29%, а по слою Fe проходит 68% тока. Эта часть участвует в излучательном процессе. Для магнитного перехода без спейсера ток утечки по слою Fe₃O₄ составляет 6%, а по слою Fe протекает 94%. Такое распределение токов по слоям накладывает условие на нанесение слоев на кремниевую подложку. Первым, нижним слоем на диэлектрической подложке должен быть магнитный слой с меньшим сопротивлением, то есть слой Fe. Тогда в структуре со спейсером порядка 70% тока пронизывает магнитный переход, т.е. участвует в излучательном процесс, а в структуре без спейсера работает более 90% тока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовали источник питания постоянного тока. Измерения проводили с пошаговым изменением напряжения U . Один шаг на холостом ходу соответствовал изменению напряжения на 10 В. Генерируемое в точке контакта стержень–пленка излучение фокусировали менисковой линзой из высокоомного кремния 5. Сигнал регистрировали ячейкой Голея фирмы “Тидекс”. Аналоговые величины для дальнейшей обработки оцифровывались с помощью запоминающего осциллографа АКТАКОМ АСК-3117. Уровень шума в проводимых измерениях не превышал 5% от измеряемой величины. Целью экспериментов было определение различия режимов работы излучателей с различными структурами.

Прежде всего, было определено влияние прослойки Mo между магнитными слоями на эффективность работы излучателей. Результаты этих исследований представлены на рис. 2, где видно существенное, не менее чем в 2 раза, увеличение эффективности работы излучателя с прослойкой Mo. В этом, прежде всего, проявляется устранение немагнитной, проводящей прослойкой Mo обменной связи между слоями. Однако следует обратить внимание на связь сопротивления излучателя с мощностью сигнала, рассмотренной в [19, 20]. В них показано, что даже в одном излучателе после подмагничивания структуры наблюдается увеличение сопротивления излучателя и увеличение мощности сигнала. Для определения проявления такой связи в различных исследуе-

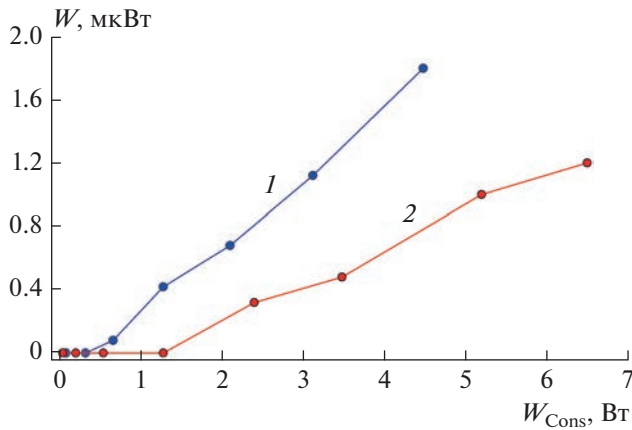


Рис. 2. Зависимость мощности сигнала от потребляемой мощности. 1 – Структура с молибденовой прослойкой, 2 – без нее.

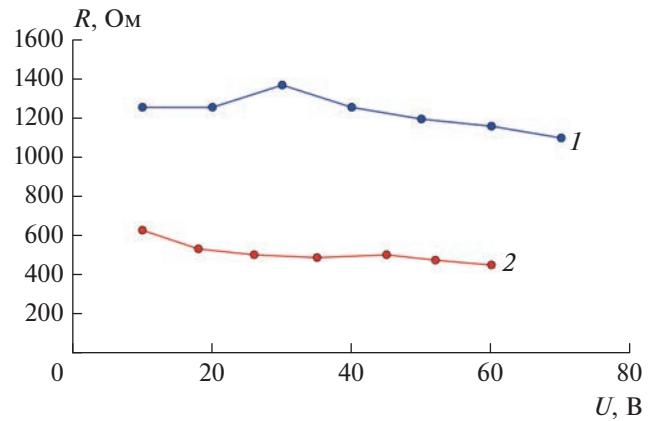


Рис. 3. Зависимость сопротивления излучателя R от напряжения U. 1 – Структура с молибденовой прослойкой, 2 – без нее.

мых в данной работе структурах были измерены их сопротивления.

Так, на рис. 3 изображена зависимость сопротивления R исследуемых излучателей от подаваемого на них напряжения U. Эти результаты показывают существенное влияние молибденовой прослойки на сопротивление образца. Использование немагнитной прослойки увеличивает сопротивление практически в два раза. Хотя из приведенных выше оценок эта прослойка, шунтируя основной токопроводящий слой Fe, должна была бы уменьшить сопротивление.

Такое несоответствие качественно объяснимо на основе результатов, представленных в [22]. Согласно им на границе раздела магнитных слоев возникает разность потенциалов, отличная от контактной разности потенциалов двух металлов, определяемая формулой

$$(\zeta_{1\uparrow} + \zeta_{1\downarrow})_{x=0} - (\zeta_{2\uparrow} + \zeta_{2\downarrow})_{x=+0} = 2e[\varphi(+0) - \varphi(-0)], \quad (1)$$

где e – заряд электрона, $\zeta_{\uparrow\downarrow}$ – квазиуровни Ферми в подзонах с соответствующей ориентацией спинов относительно направления намагниченности в том или ином слое (обозначаются направлением стрелок), φ – электростатический потенциал, определяемый источником питания в каждом слое. В свою очередь квазиуровни Ферми, возникают при расщеплении спинэнергетических подзон при переходе спинполяризованного потока границы раздела слоев. Возникающая разность потенциалов на границе раздела при протекании сквозь него спинполяризованного тока говорит о наличии контактного сопротивления

$$R = Z_1 Z_2 \frac{(Q_1 \cos \chi - Q_2)^2}{Z_1 + Z_2 \cos^2 \chi}. \quad (2)$$

Здесь Z_1, Z_2 – спиновое сопротивление того или иного слоя, $Q_{12} = (\sigma_{12}^{\uparrow} - \sigma_{12}^{\downarrow}) / (\sigma_{12}^{\uparrow} + \sigma_{12}^{\downarrow})$ – параметр

поляризации проводимости, $\sigma_{12}^{\uparrow\downarrow}$ – парциальная проводимость, χ – угол между намагниченностями контактирующих слоев. Молибденовая пленка, устраняя обменную связь между магнитными слоями, обеспечивает максимальное различие направления намагниченности слоев вплоть до значения $\chi = \pi$. Возникающая обменная связь при непосредственном контакте между магнитными слоями “сглаживает” различие между ориентацией намагниченностями слоев, что уменьшает контактное сопротивление, одновременно снижая эффективность работы излучателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты доказывают существенное влияние немагнитного слоя, разделяющего магнитные слои в структуре спин-инжекционного излучателя, на эффективность его работы. Показана роль контактного сопротивления на границе раздела магнитных слоев в общем сопротивлении излучателя.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН на 2023 год (проект № 075-01110-23-01).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fert A., George J.-M., Jaffrès H., Mattana R., Seneor P. // Europhys. News. 2003. V. 34. No. 6. P. 227.
2. Zutic I., Fabian J., Das Sarma S. // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. No. 2. P. 323.
3. Maekawa S. Concepts in spin electronics. N.Y.: Oxford University Press, 2006, 416 p.

4. *Grunberg P.A.* // *Rev. Mod. Phys.* 2008. V. 80. No. 4. P. 1531.
5. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И., Эпштейн Э.М.* // *УФН.* 2009. Т. 179. № 4. С. 359; *Gulyaev Yu.V., Zilberman P.E., Panas A.I., Epshtein E.M.* // *Phys. Usp.* 2009. V. 52. No. 4. P. 335.
6. *Звездин А.К., Звездин К.А., Хвальковский А.В.* // *УФН.* 2008. Т. 178. № 4. С. 436; *Zvezdin A.K., Zvezdin K.A., Khvalkovskiy A.V.* // *Phys. Usp.* 2008. V. 51. No. 4. P. 412.
7. *Zhou X., Ma L., Shi Z., Fan W.J. et al.* // *Phys. Rev. B.* 2015. V. 92. No. 6. Art. No. 060402.
8. *Lau Y.C., Betto D., Rode K. et al.* // *Nature Nanotech.* 2016. V. 11. P. 758.
9. *Walowski J., Münzenberg M.* // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 120. No. 14. Art. No. 140901.
10. *Fernandez-Pacheco A., Streubel R., Fruchart O. et al.* // *Nature Commun.* 2017. V. 8. Art. No. 15756.
11. *Dhillon S.S., Vitiell M.S., Linfield E.H. et al.* // *J. Physics D.* 2017. V. 50. Art. No. 363001.
12. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Эпштейн Э.М., Эллиот Р.Д.* // *Радиотехн. и электрон.* 2003. Т. 48. № 9. С. 1030; *Gulyaev Yu.V., Zil'berman P.E., Epshtein E.M., Elliott R.J.* // *J. Commun. Technol. Electron.* 2003. V. 48. No. 9. P. 942.
13. *Kadigrobov A., Ivanov Z., Claeson T. et al.* // *Europhys. Lett.* 2004. V. 67. No. 6. P. 948.
14. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И., Эпштейн Э.М.* // *Письма в ЖЭТФ.* 2007. Т. 86. № 5. С. 381; *Gulyaev Y.V., Zil'berman P.E., Panas A.I. Epshtein E.M.* // *JETP Lett.* V. 86. No. 5. P. 328.
15. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Панас А.И. и др.* Патент РФ № 2464683. Твердотельный источник электромагнитного излучения, кл. H01S 3/16. 2012.
16. *Вилков Е.А., Чигарев С.Г., Маликов И.В. и др.* Патент РФ № 2617732. Твердотельный источник электромагнитного излучения, кл. H01S 3/16. 2017.
17. *Вилков Е.А., Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е. и др.* Твердотельный источник электромагнитного излучения. Патент РФ № 2688096, кл. H01S 3/16, H01S 1/02, H01L 23/00. 2019.
18. *Шаталов А.С., Загорский Д.Л., Чигарев С.Г., Дюжинов И.Н.* Твердотельный источник электромагнитного излучения и способ его изготовления. Патент РФ № 2715892, кл. H01S 3/16. 2020.
19. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Маликов И.В. и др.* // *Радиотехн. и электрон.* 2012. Т. 57. № 3. С. 359; *Gulyaev Yu.V., Zil'berman P.E., Malikov I.V. et al.* // *J. Commun. Technol. Electron.* 2012. V. 57. No. 3. P. 329.
20. *Зильберман П.Е., Маликов И.В., Михайлов Г.М. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2014. Т. 78. № 2. С. 197; *Zilberman P.E., Malikov I.V., Mikhailov G.M. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2014. V. 78. No. 2. P. 128.
21. *Вонсовский С.В.* *Магнетизм.* М.: Наука, 1971. 1032 с.
22. *Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е., Чигарев С.Г.* // *Радиотехн. и электрон.* 2015. Т. 60. № 5. С. 441; *Gulyaev Yu.V., Zil'berman P.E., Chigarev S.G.* // *J. Commun. Technol. Electron.* 2015. V. 60. No. 5. P. 411.

Influence of the exchange interaction between the magnetic layers of a THz spin-injection emitter on its operation efficiency

S. G. Chigarev^a, *, O. A. Byshevski-Konopko^a

^a *Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino Branch, Fryazino, 141190 Russia*

*e-mail: chig50@mail.ru

The effect of a 5 nm thick non-magnetic electrically conductive Mo layer placed between the magnetic layers Fe and Fe₃O₄ of the “rod–film” type spin emitter structure on the efficiency of its operation was investigated experimentally. The possibility of increasing the radiation power by more than 2 times was established. It is found that the Mo layer also affects the resistance of the structures, increasing it. The influence of the Mo layer on resistance is qualitatively substantiated due to the appearance of a contact potential difference between the layers of the structure different from the contact potential difference between the two metals.