

УДК 538.955

## ШИРОКОПОЛОСНОЕ ВЫПРЯМЛЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ТОКА В МАГНИТНЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© 2024 г. К. В. Киселева<sup>1, 2, \*</sup>, Г. А. Кичин<sup>1</sup>, П. Н. Скирдков<sup>1, 3</sup>, К. А. Звездин<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup>Общество с ограниченной ответственностью “Новые спинтронные технологии”, Сколково, Россия

<sup>2</sup>Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования “Сколковский институт науки и технологий”, Сколково, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр “Институт общей физики имени А. М. Прохорова Российской академии наук”, Москва, Россия

\*E-mail: ksenia.kiseleva@skoltech.ru

Поступила в редакцию 29.08.2023 г.

После доработки 15.09.2023 г.

Принята к публикации 29.09.2023 г.

Экспериментально исследован эффект широкополосного выпрямления микроволнового тока в магнитных туннельных переходах с перпендикулярной магнитной анизотропией методом спин-трансферного ферромагнитного резонанса в планарном внешнем магнитном поле. Установлено, что параметры широкополосного выпрямления (диапазон частот, значение выпрямленного напряжения и область существования моды ферромагнитного резонанса) зависят от размера образца и его формы. Максимальное значение выпрямленного напряжения было продемонстрировано на слабо эллиптическом образце  $100 \times 150$  нм. При этом на сильно эллиптическом образце  $75 \times 250$  нм наблюдался самый большой диапазон рабочих частот примерно 2 ГГц.

DOI: 10.31857/S0367676524010192, EDN: RZNHND

### ВВЕДЕНИЕ

Растущий интерес к системам автоматизации и мониторинга процессов требует большого количества сенсоров и датчиков контроля. При уменьшении размеров датчиков проблемой становится эффективность энергоснабжения таких систем. Для решения данной проблемы важной задачей является поиск новых подходов к созданию автономных, маломощных сенсоров и датчиков.

Структуры на основе магнитного туннельного перехода (МТП), состоящего из двух слоев ферромагнетика с закрепленной намагниченностью и со свободной намагниченностью, разделенных слоем диэлектрика, могут стать решением проблемы энергоэффективности. Ранее было показано, что при приложении высокочастотного тока  $I_{RF}(t) = I_{RF} \sin(\omega t)$  к МТП в результате эффекта переноса спина намагниченность свободного слоя начинает прецессировать. Частота этой прецессии и, как следствие, частота осцилляции сопротивления за счет эффекта туннельного магнетосопротивления совпадает с частотой приложенного тока, в результате чего на выходе появляется постоянная компонента напряжения  $U_{DC} = I_{RF}(t)R(t)$ . Это

явление получило название спин-трансферного диодного эффекта [1].

Недавно было показано, что МТП с поверхностной перпендикулярной магнитной анизотропией (ПМА) имеют большую чувствительность [2, 3] по сравнению с образцами, где намагниченность свободного слоя лежит в плоскости [4]. В первую очередь это обусловлено тем, что в МТП с ПМА наблюдается легко-конусное состояние намагниченности, при котором намагниченность свободного слоя имеет некоторый угол относительно плоскости, что делает магнитное состояние менее стабильным и, как следствие, повышает чувствительность [5]. Помимо этого, при превышении некоторого порогового значения мощности в подобных системах эффект выпрямления приобретает нерезонансный характер, в результате чего можно наблюдать ненулевое постоянное напряжение в широком диапазоне частот. В теоретической работе [6] было предсказано наличие широкополосного выпрямления при приложении перпендикулярного магнитного поля [5]. Диапазон рабочих частот широкополосного режима был от 1 до 2.3 ГГц в то время, как рабочие частоты для резонансного режима находились в пределах от 2.8 до 3.3 ГГц. При таком широкополосном режиме

спин-трансферного диодного эффекта намагниченность, изначально находящаяся в легко-конусном магнитном состоянии, начинает прецессировать вокруг нормали к поверхности образца. Экспериментально такой широкополосный режим спин-трансферного диодного эффекта наблюдался в образцах с ПМА [2, 3].

В данной статье методом спин-трансферного ферромагнитного резонанса были изучены МТП с ПМА. Были измерены образцы разного размера и формы в планарном внешнем поле. Экспериментально было обнаружено наличие легко-конусного магнитного состояния в МТП с ПМА. При приложении планарного магнитного поля выпрямление высокочастотного тока происходило в широком диапазоне частот. С увеличением эллиптичности образцов наблюдалось увеличение диапазона рабочих частот.

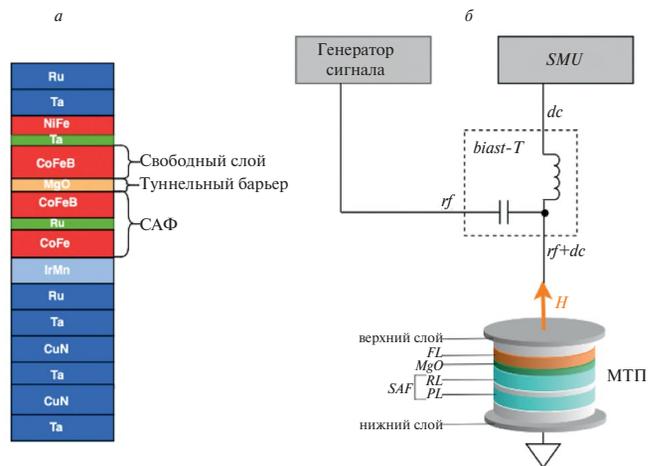


Рис. 1. Состав магнитного туннельного перехода (а); Схема метода спин-трансферного ферромагнитного резонанса (б).

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы представляют собой цилиндрические наностолбики со следующим составом слоев CoFe30 (2.6) / Ru (0.7) / CoFe40B20 (1.8) / MgO / CoFe40B20 (1.5) (рис. 1а). Нижние три слоя выступают в роли синтетического антиферромагнетика (САФ), нижний слой CoFeB – слой с закрепленной намагниченностью (поляризатор), MgO – туннельный барьер, верхний слой CoFeB – свободной слой. Исследовались образцы с круглыми основаниями

диаметрами 125 и 200 нм и эллиптическими основаниями  $100 \times 150$  и  $75 \times 250$  нм<sup>2</sup>.

Эффект выпрямления внешнего высокочастотного тока изучался методом спин-трансферного ферромагнитного резонанса (рис. 1б). Тройник смещения (bias T) используется для пропускания высокочастотного тока (0.5–6 ГГц) мощностью 0.1 мВт через МТП и измерения выпрямленного напряжения. Выпрямленное напряжение измерялось источником-измерителем (SMU). Измерения

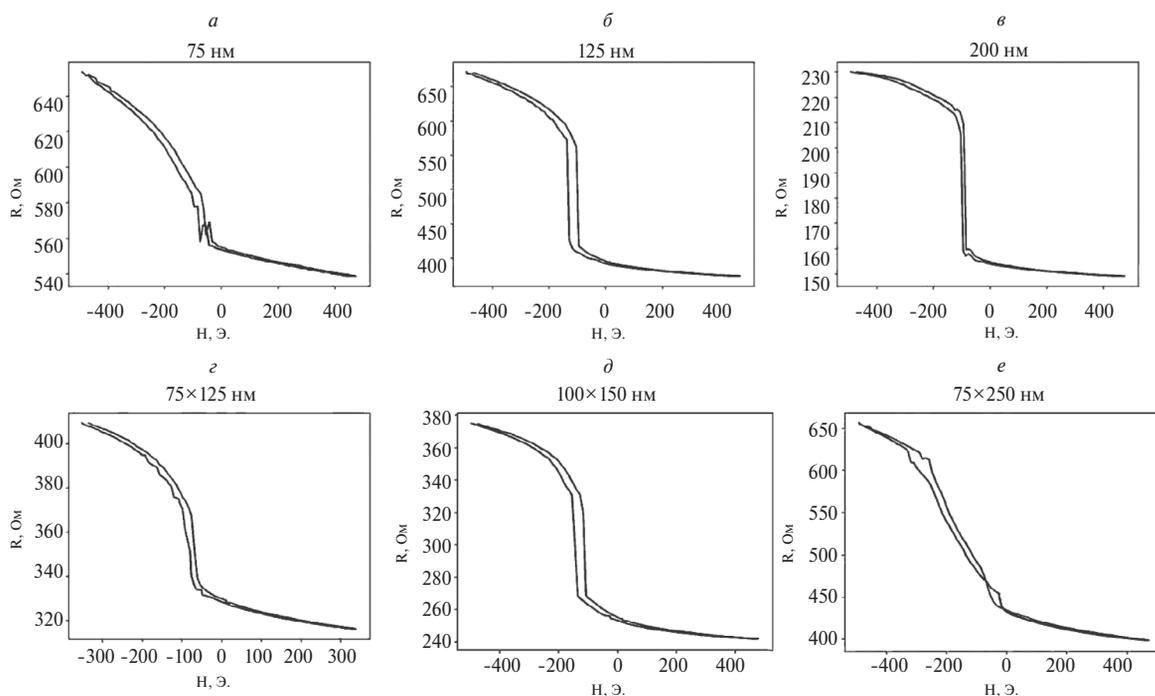


Рис. 2. Графики зависимости сопротивления от поля для МТП круглого диаметром 75 нм (а), круглого диаметром 125 нм (б), круглого диаметром 200 нм (в), эллиптического диаметром  $75 \times 125$  нм<sup>2</sup> (д), эллиптического диаметром  $100 \times 150$  нм<sup>2</sup> (е), эллиптического диаметром  $75 \times 250$  нм<sup>2</sup> (е).

проводились в планарном внешнем магнитном поле в диапазоне от  $-500$  до  $500$  Э.

Перед измерением методом спин-трансферного ферромагнитного резонанса на образце измерялась зависимость сопротивления от внешнего поля и из него вычислялось туннельное магнетосопротивление (ТМР). Для образцов, продемонстрировавших высокие значения выпрямленного напряжения, характерные значения ТМР превышали 60%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимости сопротивления от поля (рис. 2) для круглых и эллиптических образцов в планарном внешнем поле имели вид гистерезисов, свойственный МТП с легко-конусным магнитным состоянием, при котором намагниченность свободного слоя имеет некоторый угол наклона относительно нормали к плоскости. В зависимости от размера образца наблюдался различный наклон графика сопротивления. Так круглые образцы с диаметром  $75$  нм и эллиптические образцы с малой полуосью  $75$  нм продемонстрировали медленно меняющуюся с полем зависимость сопротивления. Подобный характер гистерезисов позволяет утверждать, что в таких МТП угол наклона намагниченности относительно нормали был меньше, чем в больших образцах. В результате легко-конусное магнитное состояние было ближе к вертикально направленной намагниченности.

В результате измерения методом спин-трансферного ферромагнитного резонанса на всех упомянутых образцах было обнаружено широкополосное выпрямление с характерным диапазоном рабочих частот от  $500$  МГц до  $1.5$  ГГц и более. При этом на эллиптических образцах спин-трансферный диодный эффект имел более широкий диапазон рабочих частот, чем для круглых образцов. Было замечено, что чем шире был диапазон рабочих частот, тем меньшее значение выпрямленного напряжения регистрировалось на выходе. Самое высокое значение выпрямленного напряжения  $2.96$  мВ для высокочастотного тока мощностью  $0.1$  мВт было для эллиптического образца  $100 \times 150$  нм (рис. 3в), тогда как диапазон рабочих частот от  $0.5$  до  $1.5$  ГГц был самым маленьким (рис. 4б). Самый широкий диапазон рабочих частот от  $0.5$  до  $2.5$  ГГц. (рис. 4е) был на эллиптическом образце  $75 \times 250$  нм (рис. 3е) с максимальным значением выпрямленного напряжения  $1.29$  мВ для высокочастотного тока такой же мощности.

Как на эллиптических (рис. 4), так и на круглых образцах (рис. 5) маленького диаметра область широкополосного выпрямления по частоте сильнее увеличивается при изменении поля, чем для образцов большего диаметра, где ширина по частоте практически не изменялась.

На эллиптических образцах чаще наблюдалось наличие одного основного пика выпрямления (рис. 4), который фактически определяет границу

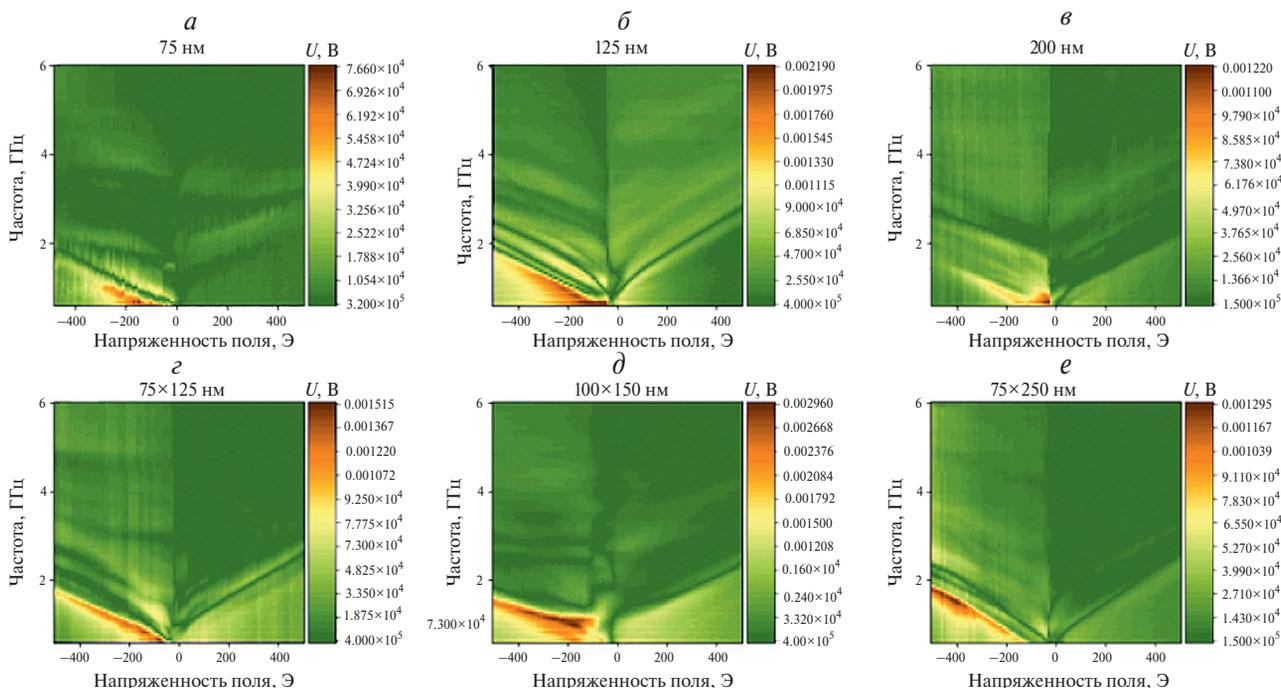


Рис. 3. Графики зависимости выпрямленного напряжения от частоты микроволнового тока и внешнего поля для МТП круглого диаметром  $75$  нм (а), круглого диаметром  $125$  нм (б), круглого диаметром  $200$  нм (в), эллиптического размером  $75 \times 125$  нм<sup>2</sup> (г), эллиптического размером  $100 \times 150$  нм<sup>2</sup> (д), эллиптического размером  $75 \times 250$  нм<sup>2</sup> (е).

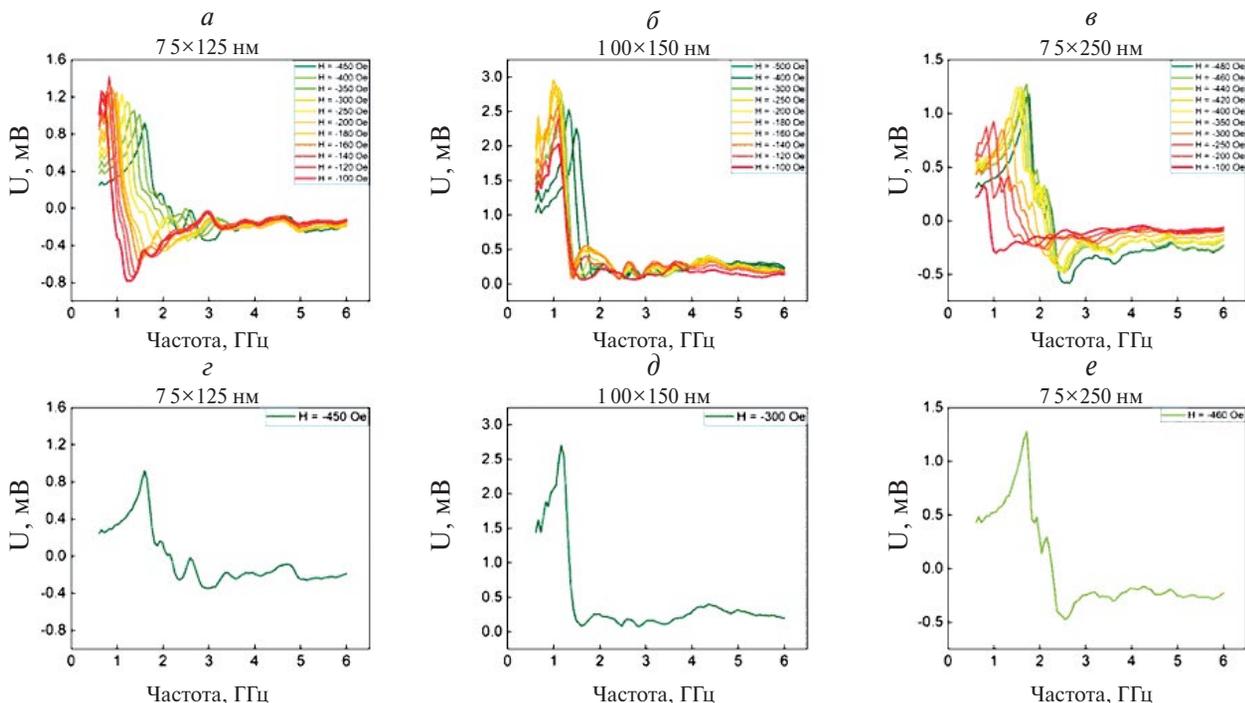


Рис. 4. Графики зависимости выпрямленного напряжения от частоты микроволнового тока при фиксированных значениях внешнего поля для эллиптических МТП размером  $75 \times 125 \text{ нм}^2$  (а),  $100 \times 150 \text{ нм}^2$  (б),  $75 \times 250 \text{ нм}^2$  (в),  $75 \times 125 \text{ нм}^2$  (д) при напряженности поля  $H = -450 \text{ Э}$ ,  $100 \times 150 \text{ нм}^2$  при  $H = -300 \text{ Э}$  (д),  $75 \times 250 \text{ нм}^2$  при  $H = -460 \text{ Э}$  (е).

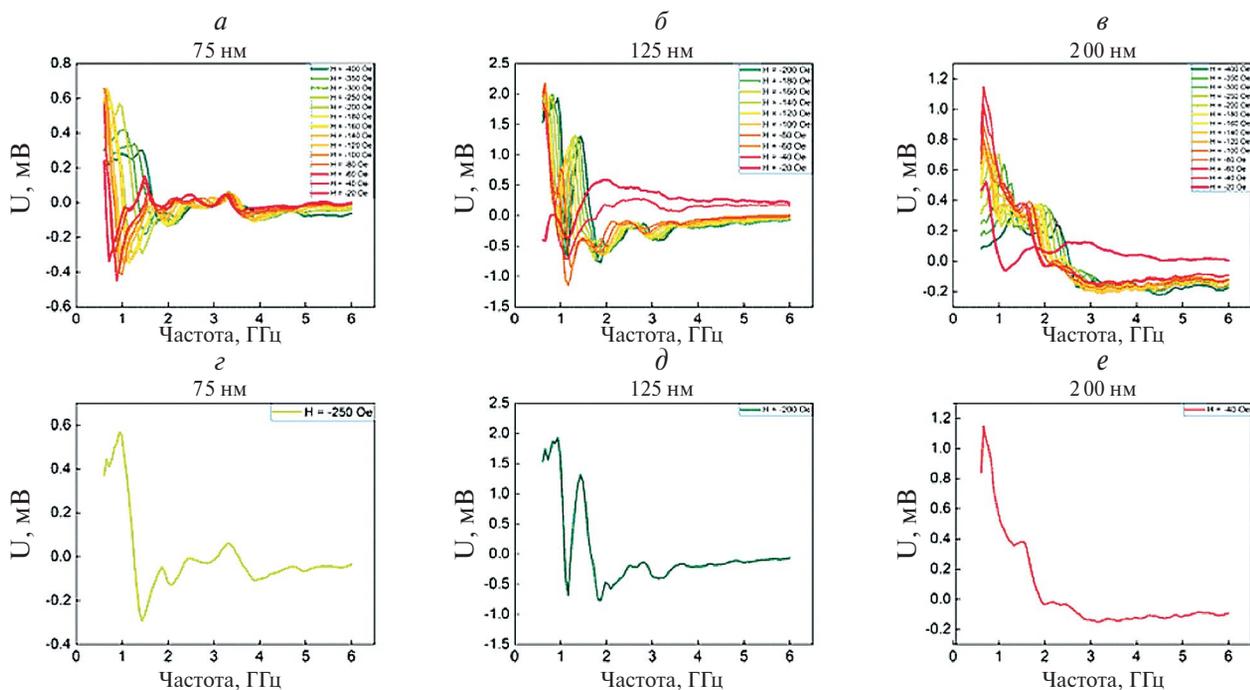


Рис. 5. Графики зависимости выпрямленного напряжения от частоты микроволнового тока при фиксированных значениях внешнего поля для круглых МТП диаметром  $75 \text{ нм}$  (а),  $125 \text{ нм}$  (б),  $200 \text{ нм}$  (в),  $75 \text{ нм}$  при напряженности поля  $H = 250 \text{ Э}$  (д),  $125 \text{ нм}$  при  $H = -200 \text{ Э}$  (д),  $200 \text{ нм}$  при  $H = -40 \text{ Э}$  (е).

области широкополосного выпрямления и является основной ФМР модой свободного слоя. Тогда как на круглых образцах, помимо основного пика, сразу после него наблюдались дополнительные моды выпрямления (рис. 5). Явно эти моды наблюдались для образцов диаметром 125 (рис. 5б и 5д) и 200 нм (рис. 5в и 5е).

По сравнению с круглыми образцами, где основная ФМР мода наблюдалась на отрицательных полях до 250 Э (рис. 5г, 5д, 5е), в эллиптических образцах она наблюдалась в больших значениях внешнего магнитного поля (рис. 4г, 4д, 4е).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был изучен эффект широкополосного выпрямления микроволнового тока в магнитных туннельных переходах разной геометрии в планарном магнитном поле. В зависимости от размера образца легко-конусное магнитное состояние имело разный угол наклона намагниченности к нормали, что было подтверждено результатами измерений гистерезисов. Так, круглые МТП с диаметром 75 нм и эллиптические МТП с малой полуосью 75 нм имели меньший угол наклона относительно нормали, чем образцы большего диаметра. Самый широкий диапазон рабочих частот от 0.5 до 2.5 ГГц наблюдался на эллиптических образцах с малой полуосью 75 нм. При этом самое большое значение выпрямленного напряжения и самый маленький диапазон рабочих частот

наблюдался на округлом эллиптическом образце размером 100×150 нм. Для круглых образцов диапазон полей, в котором существовала ФМР мода и широкополосное выпрямление, располагался ниже 250 Э, тогда как для эллиптических образцов – выше 300 Э. Таким образом, была показана возможность управления параметрами широкополосного выпрямления (диапазоном частот, значением выпрямленного напряжения и областью существования ФМР моды по полю) за счет правильного подбора формы и размера МТП.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tulapurkar A., Suzuki Y., Fukushima A. et al. // Nature. 2005. V. 438. No. 7066. P. 339.
2. Fang B., Carpentieri M., Hao X. et al. // Nature Commun. 2016. V. 7. Art. No. 11259.
3. Zhang L., Fang B., Cai J. et al. // Appl. Phys. Lett. 2018. V. 113. Art. No. 102401.
4. Wang C., Cui Y.-T., Sun J.Z. et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. Art. No. 053905.
5. Buzdakov A.G., Skirdkov P.N., Zvezdin K.A. // J. Physics D: Appl. Phys. 2022. V. 55. No. 11. Art. No. 115001.
6. Prokopenko O., Krivorotov I.N., Bankowski E. et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. Art. No. 123904.

## Broadband rectification of microwave current in magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy

K. V. Kiseleva<sup>a, b, \*</sup>, G. A. Kichin<sup>a</sup>, P. N. Skirdkov<sup>a, c</sup>, K. A. Zvezdin<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup> New Spintronic Technologies LLC, Russian Quantum Center, Skolkovo, 143026 Russia

<sup>b</sup> Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Skolkovo, 143026 Russia

<sup>c</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: kseniia.kiseleva@skoltech.ru

We experimentally studied the effect of broadband rectification of microwave current in magnetic tunnel junctions with perpendicular magnetic anisotropy with using the method of spin-transfer ferromagnetic resonance in a planar external magnetic field. It was found that the parameters of broadband rectification (frequency range, rectified voltage value and the region of existence of the ferromagnetic resonance mode) depend on the size of the sample and its shape. The maximum value of the rectified voltage was on a round elliptical sample of 100×150 nm. At the same time, the widest operating frequency range of approximately 2 GHz was observed on strongly elliptical MTJs with the size of 75×250 nm.

**Keywords:** magnetic tunnel junction (MTJ), spin-transfer ferromagnetic resonance (ST-FMR), easy-cone state, spin-transfer diode effect (STDE), surface perpendicular magnetic anisotropy.