



Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН

VII Всероссийская Микроволновая конференция



25-27 ноября 2020 г.

ДОКЛАДЫ

МОСКВА – 2020г.



Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН

VII Всероссийская Микроволновая конференция¹

25 – 27 ноября 2020 г., Москва

ДОКЛАДЫ

Организаторы конференции:

- Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН
- Научный совет РАН по распространению радиоволн
- Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова (РНТОРЭС им. А.С.Попова)
- MTT-ED Moscow Chapter IEEE
- IEEE Russia Section
- IEEE Moscow AP Chapter

Любая часть материалов может быть скопирована, воспроизведена либо использована каким-либо другим образом только с письменного согласия редакции JRE (Журнал Радиоэлектроники) либо авторов публикаций. При использовании материалов и/или результатов публикаций авторов для научной работы ссылка на материалы настоящей конференции является ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ.

©Издание JRE – ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва 2020 г.

МОСКВА 2020

СПИНТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ С ПОГЛОЩАЮЩИМ НАНОПОКРЫТИЕМ НА БАЗЕ МЕТАМАТЕРИАЛА

Демин Г.Д., Андрюшин Р.Н., Дюзев Н.А.

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»
gddemin@edu.miet.ru, andrushin@ckp-miet.ru, dyuzhev@ckp-miet.ru

В настоящее время происходит стремительное развитие спиновой калоритроники- зарождающейся области физики на стыке спиновых и тепловых явлений в магнитных наноструктурах, применимой для реализации высокоэффективных миниатюрных харвестеров тепловой энергии. В работе предлагается концепция спинового диода на основе магнитного туннельного перехода, совмещенного с поглощающим тонкопленочным покрытием на базе метаматериала типа «металл-диэлектрик-металл». Проведенное моделирование адсорбционных свойств поглощающего покрытия демонстрирует практически единичную адсорбцию микроволновой энергии в широком частотном диапазоне (от сотни МГц до нескольких ГГц), что приводит к высокому градиенту температуры через туннельный слой перехода. Дополнительное включение в структуру диода тепловых барьеров из материалов с низкой теплопроводностью обеспечивает рост температурного градиента до сотен мК, что, вследствие туннельного магнитного эффекта Зеебека, позволяет эффективно утилизировать тепловые потери в процессе микроволнового разогрева и генерировать термо-напряжение на уровне сотен мкВ. С учетом высокой чувствительности спиновых диодов (более 200 мВ/мкВт), а также перспектив их масштабирования в область ниже 10 нм, это открывает возможность создания миниатюрных термоэлектрических элементов на их основе, которые позволят обеспечить стабильное питание малоомощных устройств Интернета вещей.

Введение

В контексте современного развития рынка Интернета вещей (IoT), который состоит из миллиарда взаимодействующих между собой «умных» устройств, важной задачей становится поиск новых технологий создания миниатюрных и энергоэффективных источников питания, которые могут обеспечить их долговременную автономную работу [1]. На сегодняшний день с подобной задачей не способны справиться обычные аккумуляторные элементы, которые имеют ограниченный запас энергии и не могут быть применимы для развертывания крупномасштабной IoT сети в местах, где их дополнительная подзарядка становится невозможной, а постоянное обслуживание требует больших финансовых затрат. Один из перспективных путей решения указанной проблемы – беспроводной сбор энергии из окружающей среды, источником которой могут быть механические вибрации, тепло, свет, микроволновое излучение. В условиях большого города, где присутствует большое количество телекоммуникационных сетей (мобильная сеть, радиосвязь, Wi-Fi), использование микроволновой энергии представляется особенно привлекательным для питания малогабаритных IoT устройств.

Магнитные туннельные переходы (МТП), состоящие из двух ферромагнитных (ФМ) слоев, разделенных туннельной прослойкой, обладают спин-диодным эффектом выпрямления микроволнового сигнала, поступающего от токоведущей линии принимающей антенны [2]. Данный эффект обусловлен возбуждением устойчивых колебаний намагниченности в одном из ФМ слоев (свободном слое) МТП под действием переменного тока, в то время как намагниченность другого ФМ (опорного) слоя остается закрепленной соседним антиферромагнитным слоем. Поскольку сопротивление МТП зависит от взаимной ориентации намагниченностей ФМ слоев, его величина изменяется с частотой входного тока, что приводит к генерации постоянного напряжения на электродах МТП. Как известно, мощность от большинства источников микроволнового сигнала (FRS/GMRS, LTE (включая 3G/4G), Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth), поступающая на вход спинового диода, варьируется в диапазоне от 4 до 1000 мкВт, что отвечает условиям генерации в диоде осцилляций намагниченности свободного слоя, обеспечивающих приемлемый уровень постоянного выходного сигнала по напряжению (от сотен мкВ до десятков мВ). Максимальная чувствительность спиновых диодов на базе МТП, зарегистрированная в эксперименте, превышает 200 мВ/мкВт и соответствует выходному напряжению на уровне 20 мВ [3]. Данная величина достаточна для стабильного питания малоомощных сенсорных узлов в составе IoT сети, потребляющих в районе нескольких десятков нВт. В [4] была экспериментально продемонстрирована возможность питания фотодетектора от спинового диода, где в

качестве источника излучения выступали такие приборы, как рация (6.3 мкВт) и радиотелефон (4 мкВт). Несмотря на огромное количество работ по изучению механизмов управления эффективностью преобразования микроволнового излучения в спиновом диоде на базе МТП, сравнительно мало исследований другого не менее интересного явления в данном устройстве – туннельного магнитного эффекта Зеебека, возникающего в присутствии ненулевого градиента температуры через туннельный барьер МТП и обеспечивающего генерацию термо-ЭДС. Данный эффект представляется привлекательным с точки зрения утилизации нежелательных тепловых потерь, возникающих в процессе неоднородного микроволнового разогрева структуры МТП и уменьшающих эффективность, с целью их последующего преобразования в электричество [5].

В данной работе нами рассмотрена оригинальная концепция спинового диода на основе МТП с тепловыми барьерами и поглощающим тонкопленочным покрытием из метаматериала, которая позволяет осуществлять сбор как тепловой, так и электромагнитной энергии в СВЧ-диапазоне частот.

Предлагаемая конструкция спинового диода с поглощающим покрытием на базе метаматериала

На Рис. 1 схематически проиллюстрирована модельная система «излучатель-принимающая антенна со спиновым диодом», где в роли излучателя выступает рупорная антенна, а в качестве принимающей антенны - патч-антенна, микрополосковая линия которой подводится к токопроводящей шине спиного диодной структуры. Для численной оценки величины микроволнового переменного тока и соответствующей мощности, поступающей с антенны на МТП в заданном диапазоне частот СВЧ излучения, расстояние между излучателем и микрополосковой линией приемника было выбрано в качестве варьируемого параметра.

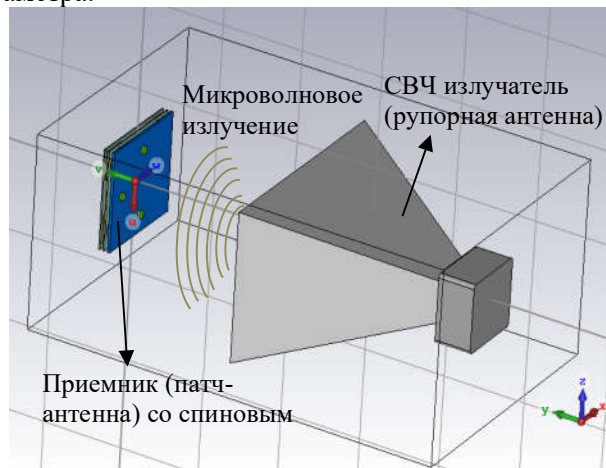


Рис. 1. Иллюстрация системы «излучатель-принимающая антенна со спиновым диодом».

На Рисунке 2а изображена предлагаемая нами конструкция спинового диода на основе МТП, содержащего в своей структуре тепловые барьеры (для усиления градиента температуры при асимметричном разогреве туннельной структуры микроволновым излучением) и тонкопленочное поглощающее покрытие, обеспечивающее практически единичную адсорбцию электромагнитной энергии в ГГц диапазоне частот. Для анализа была выбрана магнитная гетероструктура состава IrMn(7.5 нм)/CoFe(2.5 нм)/Ru(0.85 нм)/CoFe(0.5 нм)/CoFeB(3 нм)/тепловой барьер (x нм)/MgO(0.78 нм)/тепловой барьер (x нм)/CoFeB(3 нм), которая является модификацией структуры МТП из [6]. К верхнему и нижнему слою МТП подведены металлические шины Cu толщиной 250 нм, в то время как поперечное сечение МТП имеет прямоугольную форму ширины 120 нм и длины 250 нм. Поглощающее покрытие состоит из тонкопленочной структуры «металл-диэлектрик-металл» (на основе стеклотекстолита FR-4), перспективность которой для широкополосного поглощения микроволнового излучения в S- диапазоне (2-4 ГГц) и C-диапазоне (4-8 ГГц) частот была показана в [7].

Переменный ток $I_e \cos(\omega t)$ на входе спиного диода от линии передачи антенны, принимающей СВЧ излучение, обеспечивает градиент температуры через туннельный барьер (Рисунок 1б). Основной Джоулев разогрев структуры МТП происходит в приграничной к диэлектрику (MgO) области ферромагнитного слоя (CoFeB), куда поступает переносимый микроволновым током спин-

поляризованный поток электронов, что приводит к нестационарному скачку температуры $\Delta T_B(\omega) = \sum_{\kappa=0 \dots n} \Delta T_{B\kappa}(\omega) \cos \kappa \omega t$ на туннельном барьере МТП, что было показано нами в [5].

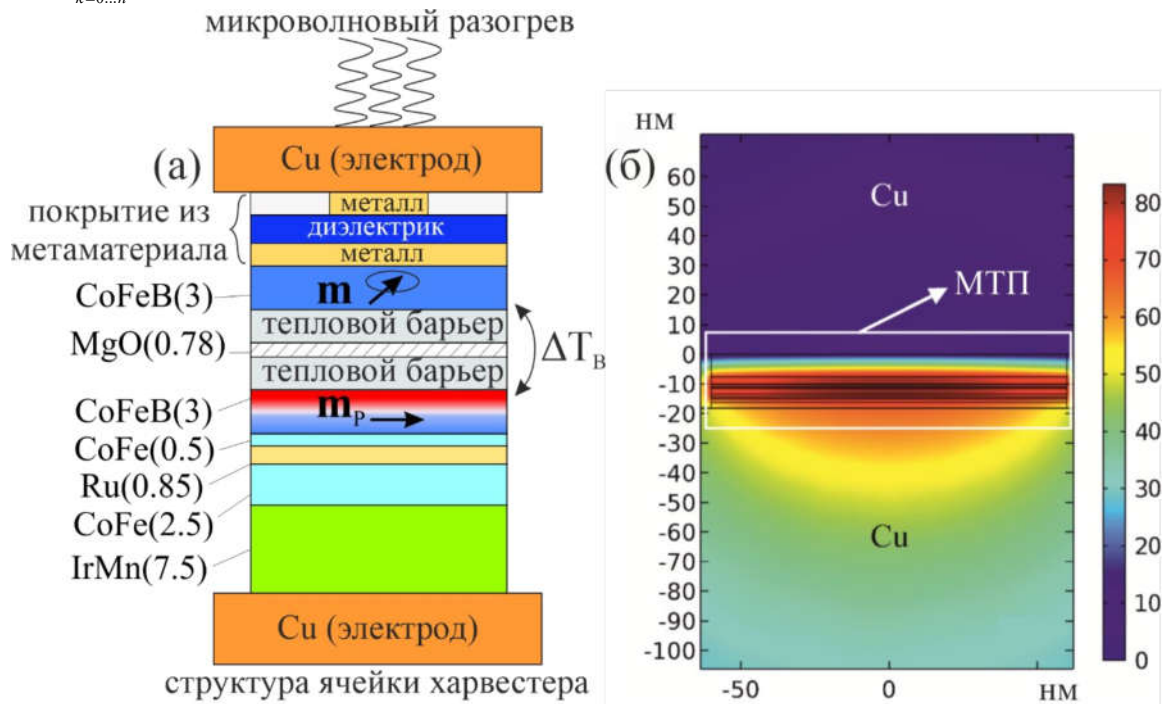


Рис. 2. (а) Предлагаемая конструкция спинового диода на основе МТП с тепловыми барьерами и поглощающим покрытием из метаматериала. б) Приращение температуры МТП $T - T_0$ (в мК) вдоль среза туннельной структуры, возникающее вследствие электромагнитного разогрева микроволновой мощностью 10 мкВт, $T_0 = 20$ К – комнатная температура.

Результаты моделирования

Моделирование в программном пакете CST Microwave Studio диаграммы направленности микроволнового излучения с рупорной антенны в спектре частот от 0 до 12 ГГц показывает, что его основная часть попадает на приемник со спиновым диодом (Рис. 3а). На Рис. 3б представлена частотная зависимость амплитуды переменного тока на входе спинового диода при различном расстоянии d_{mw} между излучателем и принимающей патч-антенной. Как видно из рисунка, при непосредственной близости с излучателем (при расстоянии 5 мм) в диоде генерируется большой переменный ток с основными пиками при частоте 3.8 ГГц, 7-9 ГГц, в то время как на расстоянии 100-500 мм значение амплитуды переменного тока составляет нескольких сотен мкА, что является достаточным для генерации постоянного напряжения в спиновом диоде. На Рис. 3в показана временная зависимость теплового скачка через туннельный барьер МТП при частоте тока 6 ГГц. Данный скачок меняется с той же частотой, что и микроволновый ток, и может быть разложен в ряд по отдельным гармоникам, основные из которых (нулевая и первая) линейно возрастают с ростом микроволновой мощности. С увеличением частоты тока амплитуда переменных компонент уменьшается, что связано с конкуренцией двух факторов, влияющих на скачок температуры - периода колебаний $T = 2\pi / \omega$ микроволнового тока и характерного времени теплоотвода τ_T , определяемого соотношением $\Delta T_{B\kappa}(\omega) \propto \Delta T_{B0} / \sqrt{1 + (\kappa \omega \tau_T)^2}$.

Резонансная частота, на которой наблюдается пик нулевой гармоники ΔT_{B0} , соответствует максимуму генерируемого термо-напряжения, что обеспечивается влиянием стационарного спин-зависимого эффекта Зеебека. Согласно Рис. 3г, вследствие наличия данного эффекта, распределение температуры по срезу МТП, а также тепловой скачок через туннельный барьер сильно зависит от ориентации намагниченностей ФМ слоев. Также отметим, что скачок температуры пропорционален входной мощности микроволнового излучения, падающей на спиновый диод. Так при увеличении мощности в 10 раз (с 1 до 10 мкВт) пропорционально растёт ΔT_B .

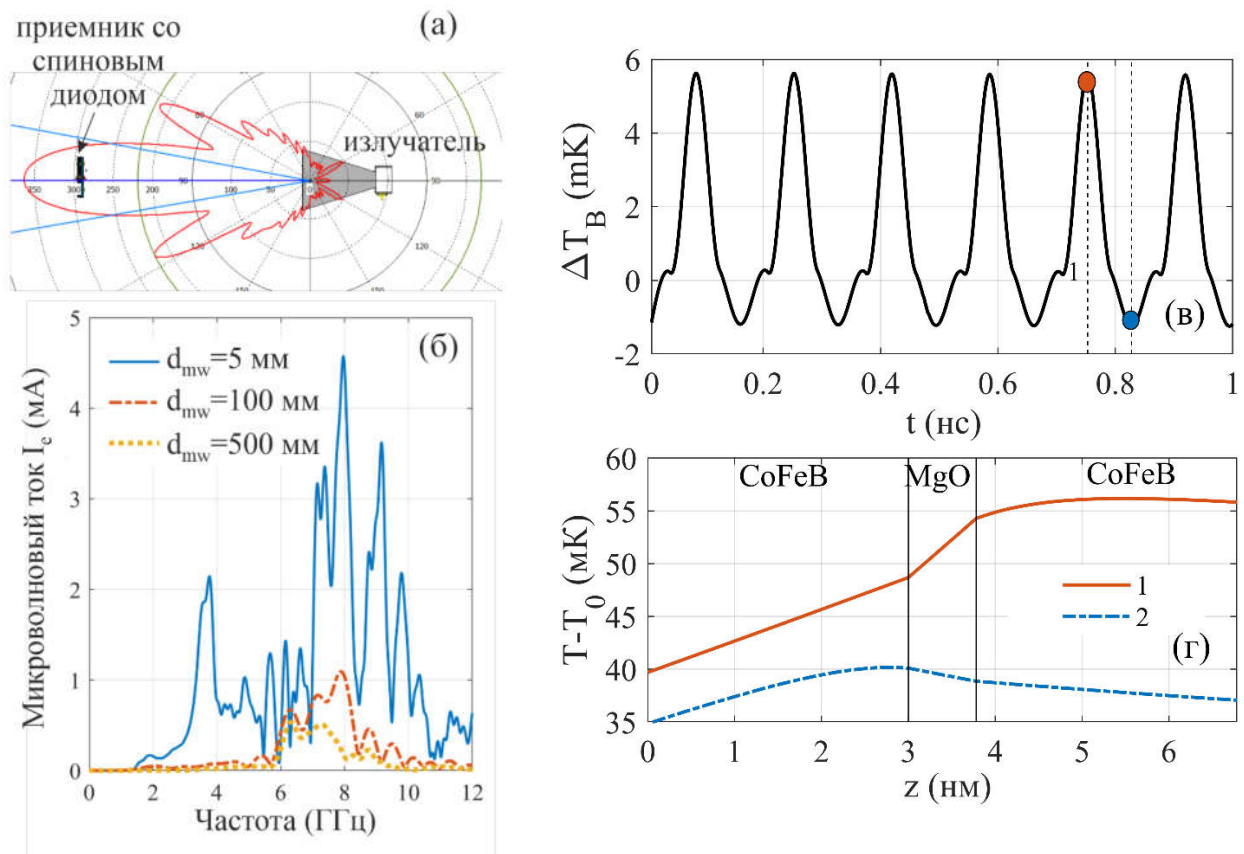


Рис. 3. (а) Диаграмма направленности электромагнитного излучения с рупорной антенны (при частоте 6 ГГц), поступающего на патч-антенну со спиновым диодом. (б) Сгенерированный в микрополоске переменный ток как функция частоты микроволнового излучения при различном расстоянии между излучателем и принимающей антенной. (в) Временная зависимость теплового скачка ΔT_B на прослойке МТП (без тепловых барьеров) при микроволновом токе с амплитудой 250 мкА и частотой 6 ГГц (входная мощность - около 1 мкВт). (г) Приращение температуры МТП $T - T_0$ вдоль направления теплового спинового транспорта, где 1(2)- параллельная (антипараллельная) ориентация намагниченностей \mathbf{m} and \mathbf{m}_p ФМ слоев, T_0 - комнатная температура.

Моделирование показало, что включение в состав спинового диода тепловых барьеров по обе стороны от туннельной прослойки МТП приводит к усилению амплитуды скачка температуры ΔT_B в сотни раз по сравнению с обычным МТП. Пиковое значение ΔT_B возрастает с 5 до 123 мК при внедрении в структуру хорошо известных ViTe тепловых барьеров (Рис. 4а). При этом величина ΔT_B увеличивается обратно пропорционально коэффициенту теплопроводности материала тепловых барьеров. Для достижения максимального эффекта усиления термо-индуцированного напряжения, генерируемого спиновым диодом, следует использовать материалы с наиболее низкой теплопроводностью - халько-алтимонаты CuSbSe (0.25-0.3 Вт/м·К), медные халькогениды CuS (0.45 Вт/м·К), CuTe (0.6 Вт/м·К), селениды олова SnSe (0.3-0.35 Вт/м·К), теллурид германия и сурьмы GeSbTe (0.5 Вт/м·К). Согласно Рис. 4б, наиболее перспективным материалом для этой цели является CuSbSe и позволяет достичь увеличения теплового скачка ΔT_B практически в 150 раз (до 780 мК). С учётом коэффициента Зеебека в МТП, равного сотням мкВ/К, генерируемое в спиновом диоде термо-напряжение будет составлять около сотни мкВ, что достаточно для подзарядки маломощной сенсорной электроники, что представляет как фундаментальный, так и практический интерес на пути реализации спинтронных термоэлектрических элементов на основе спин-диодных структур.

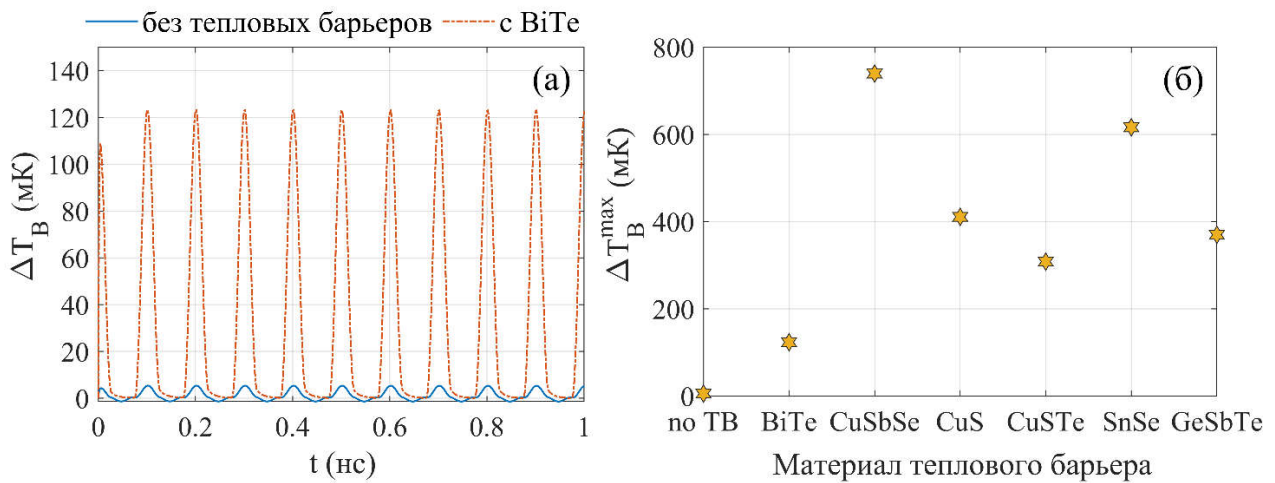


Рис. 4. (а) Временная зависимость скачка температуры ΔT_B на туннельном барьере МТП в отсутствии и в случае включения BiTe тепловых барьеров в состав МТП. (б) Изменение скачка температуры ΔT_B в зависимости от материала тепловых барьеров (при толщине теплового барьерного слоя, равной 3 нм) при входной мощности излучения 10 мкВт.

Выводы

Проведенное в работе моделирование работы спинового диода на основе МТП с поглощающим покрытием демонстрирует возможность его использования в качестве термоэлектрического элемента для преобразования микроволновой энергии в широком диапазоне частот, что связано с достижением относительно высокого градиента температуры (от десятков до сотен мК) через туннельную структуру в процессе ее электромагнитного разогрева. Показано, что включение тепловых барьеров из материалов с низкой теплопроводностью (BiTe, CuS, CuSbSe, SnSe, GeSbTe) по обе стороны от туннельного слоя МТП позволяет на несколько порядков увеличить амплитуду скачка температуры на ферромагнитных электродах, пропорционально которой также возрастает напряжение, генерируемое спин-диодной структурой. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании и разработке нового класса харвестеров на основе магнито-туннельного эффекта Зеебека в МТП, предназначенных для зарядки маломощных IoT устройств в составе беспроводных сенсорных систем.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке финансовой поддержке Гранта Президента РФ (идентификационный номер 075-15-2019-1139) с использованием оборудования ЦКП "Микросистемная техника и электронная компонентная база", поддержанного Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khan W.Z. et al., Industrial internet of things: Recent advances, enabling technologies and open challenges // *Computers & Electrical Engineering*, vol. 81, p. 106522, Jan. 2020.
2. Suzuki Y. and Kubota H., Spin-torque diode effect and its application // *J. Phys. Soc. Jpn.*, vol. 77, no. 3, p. 031002, March 2008.
3. Zhang L. et al., Ultrahigh detection sensitivity exceeding 10^5 V/W in spin-torque diode // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 113, no. 10, p. 102401, Sep. 2018.
4. Fang B. et al., Experimental demonstration of spintronic broadband microwave detectors and their capability for powering nanodevices // *Phys. Rev. Applied*, vol. 11, no. 1, p. 014022, Jan. 2019.
5. Demin G.D., Zvezdin K.A. and Popkov A.F., Bolometric properties of a spin-torque diode based on a magnetic tunnel junction // *Adv. Cond. Matter. Phys.*, Article 51009765, pp. 1-9, Jan. 2019.
6. Chao C.T. et al., Determination of thermal stability of magnetic tunnel junction using time-resolved single-shot measurement, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 1, pp. 1–4, Jan. 2014.
7. Assal A.E. et al., Toward an ultra-wideband hybrid metamaterial based microwave absorber // *Micromachines*, vol. 11, no. 10, p. 0930, Oct. 2020.