

Магнитоэлектрические устройства электроники и информатики на основе мультиферроидных гетероструктур

Ю. Фетисов, д. ф. - м. н.¹

УДК 621.3 | ВАК 05.27.01

Совершенствование устройств электроники и информатики в настоящее время происходит в основном за счет использования новых физических эффектов или новых материалов. Перспективными с этой точки зрения являются так называемые магнитоэлектрические (МЭ) эффекты в мультиферроидных гетероструктурах, содержащих механически связанные ферромагнитные и пьезоэлектрические слои. МЭ-эффекты возникают в результате комбинации магнитострикции ферромагнитного слоя, пьезоэффекта в пьезоэлектрическом слое, акустического резонанса структуры и проявляются во взаимном преобразовании переменных электрических и магнитных полей. МЭ-эффекты существуют в структурах различных составов, наблюдаются при комнатной температуре и их характеристиками легко управлять с помощью постоянных магнитных и электрических полей. В результате проведенных за последние годы исследований создан целый ряд новых устройств различных типов, использующих МЭ-эффекты в гетероструктурах. В статье описаны принципы работы МЭ-устройств, приведены их основные характеристики и возможные области применений.

В современной электронике широко применяют устройства преобразования сигналов двух типов: использующие явление электромагнитной индукции (такие как индуктивности, трансформаторы, датчики магнитных полей и т. д.) [1] и использующие пьезоэффект (трансформаторы, датчики и т. д.) [2]. В последние годы в мире проводятся интенсивные исследования по созданию новых устройств, использующих МЭ-эффекты в искусственно созданных композитных гетероструктурах. МЭ-устройства за счет применения одновременно электромагнитной индукции, пьезоэффекта и акустического резонанса обладают функциональными возможностями и характеристиками, превосходящими характеристики индукционных и пьезоэлектрических устройств [3, 4].

Композитная гетероструктура представляет собой слоистую структуру, содержащую чередующиеся ферромагнитные (ФМ) и ферроэлектрические (ФЭ) слои, механически соединенные друг с другом. Структура обладает одновременно ярко выраженными магнитными

и электрическими свойствами, поэтому и называется «мультиферроидная». Намагниченность структуры M можно изменять с помощью электрического поля E , а электрическую поляризацию P – с помощью магнитного поля H . Физический механизм управления свойствами структур проявляется в двух эффектах: при воздействии магнитного поля H ФМ-слой деформируется из-за магнитострикции, эта деформация передается ФЭ-слою и он, вследствие пьезоэлектрического (ПЭ) эффекта, изменяет свою электрическую поляризацию (прямой МЭ-эффект); при воздействии электрического поля E на ФЭ-слой он деформируется из-за обратного пьезоэффекта или электрострикции, эта деформация передается ФМ-слою и он изменяет свою намагниченность M из-за обратной магнитострикции (эффект Виллари) – обратный МЭ-эффект [5]. Эффективность преобразования полей зависит от величины деформаций на границе раздела слоев и резко возрастает при их увеличении, поэтому на МЭ-эффекты существенно влияют акустические резонансные явления в структуре [6].

Эффективное преобразование полей в мультиферроидных гетероструктурах и возможность управлять параметрами структур с помощью магнитного и электрического

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, профессор; Научно-образовательный центр «Магнитоэлектрические материалы и устройства», директор, fetisov@mirea.ru.

полей позволяют использовать их для создания новых устройств электроники и информатики.

Исследования и разработки в области МЭ-устройств проводятся в ведущих университетах США (Oakland University, Northeastern University, Virginia Technological University), Китая (Beijing University, Tsinghua University, Shanghai Institute of Ceramics) и Европы (University of Kiel, Ostbayerische Technische Hochschule). В России аналогичными разработками занимаются в МИРЭА – Российском технологическом университете, Новгородском государственном университете им. Ярослава Мудрого и ряде других организаций. Исследования финансируются либо из государственных научных фондов, либо компаниями электронного сектора.

Рассмотрим примеры некоторых разработанных к настоящему времени МЭ-устройств с различными функциональными возможностями и перспективные области их применений. Данная информация может представлять

интерес как для инженеров, разработчиков новой элементной базы электроники, так и изготовителей электронных устройств.

МЭ-УСТРОЙСТВА И ИХ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЙ Электрически перестраиваемые индукторы

Разработаны индукторы (inductor), величина индуктивности которых перестраивается электрическим полем. Конструкция индуктора схематически показана на рис. 1а [7]. Индуктор представляет собой гетероструктуру, содержащую механически связанные пластину из пьезоэлектрика $PbZrTiO_3$ (PZT) размерами 5×30 мм и толщиной 0,5 мм и наклеенные на нее с обеих сторон слои из аморфного ферромагнетика FeBSiC (Metglas 2605CO) толщиной по 23 мкм, помещенную внутрь электромагнитной катушки. Индуктивность устройства L определяется индуктивностью катушки с сердечником внутри, а управляют

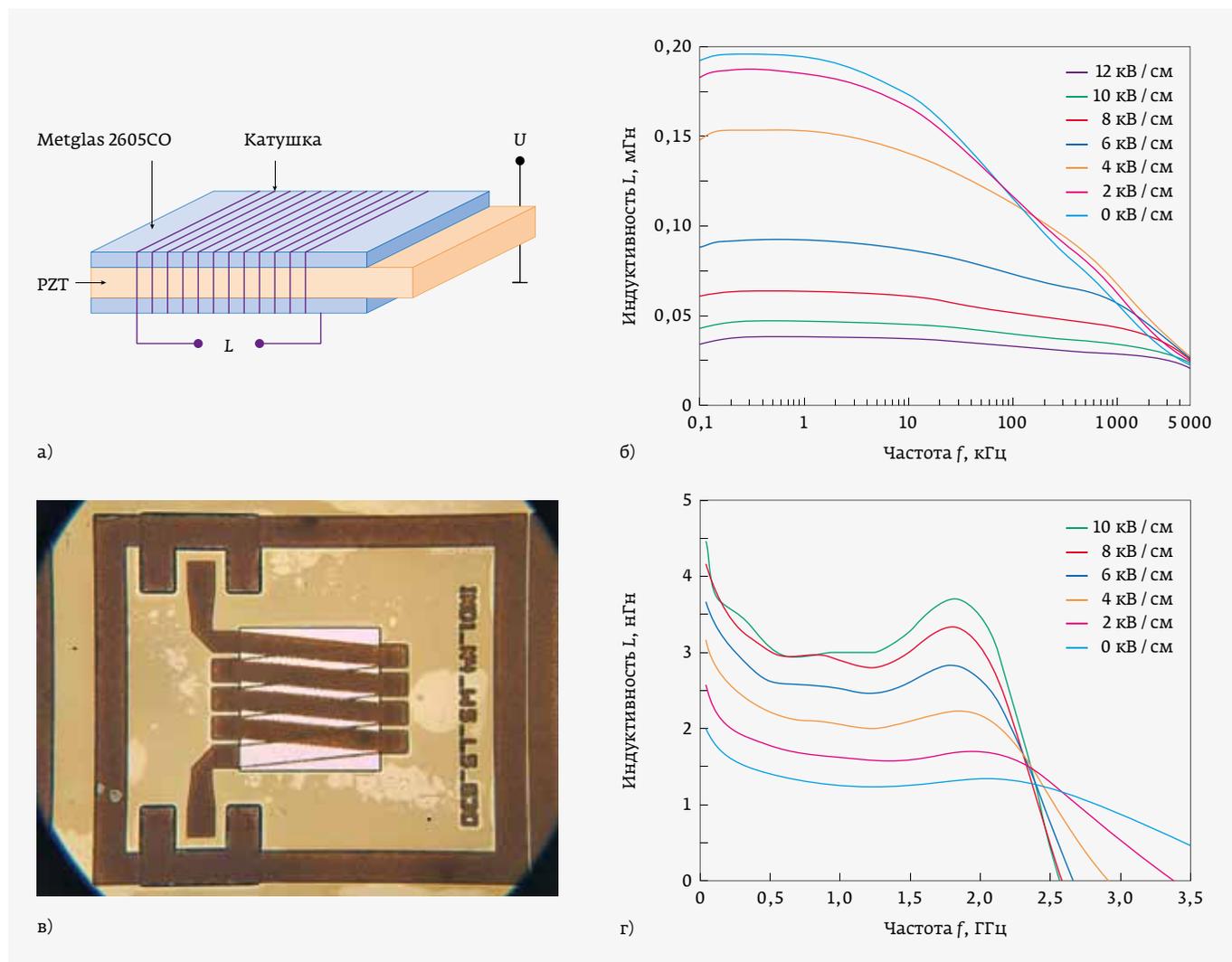


Рис. 1. МЭ-индукторы, перестраиваемые электрическим полем: а – конструкция; б – частотные характеристики; в – конструкция высокочастотного МЭ-индуктора; г – характеристики высокочастотного МЭ-индуктора

индуктивностью, прикладывая постоянное напряжение U до 600 В к электродам PZT-слоя. При появлении в PZT-слое электрического поля E пьезоэлектрик деформируется вдоль оси, деформация передается магнитным слоям, которые изменяют свою магнитную проницаемость. На рис. 1б приведены частотные зависимости индуктивности $L(f)$ при разных управляющих полях $E=0-12$ кВ/см. Изменение индуктивности достигает 450% на частоте 100 Гц и уменьшается до 50% на частоте 5 МГц. На рис. 1в [8] показана конструкция высокочастотного индуктора в микрополосковом исполнении, содержащего пластину пьезоэлектрика PMN-PT толщиной 0,5 мм и многослойную ферромагнитную структуру с 24 слоями из FeGaB/Al₂O₃. При приложении к пьезослою электрического поля $E=0-10$ кВ/см индуктивность устройства изменялась на 190% в диапазоне до 2 ГГц (рис. 1д) [4]. Значительная перестройка индуктивности в сочетании с высокой добротностью ($Q \sim 2-10$) делают такие устройства перспективными для применений в радиотехнике.

Управляемые трансформаторы

Разработаны МЭ-трансформаторы, коэффициент трансформации которых перестраивается магнитным полем [9]. Трансформатор содержит ФМ-ПЭ-гетероструктуру, помещенную внутрь возбуждающей электромагнитной катушки. На катушку подают входное напряжение U_1 , которое создает возбуждающее магнитное поле с частотой, равной частоте акустического резонанса структуры. Выходное напряжение U_2 , генерируемое структурой вследствие прямого МЭ-эффекта, снимают с электродов ПЭ-слоя. Изменяя внешнее управляющее магнитное поле H , можно управлять коэффициентом трансформации напряжения.

На рис. 2а схематически показана одна из конструкций маломощного МЭ-трансформатора [10], а на рис. 2б – его внешний вид. Основной частью трансформатора является гетероструктура, содержащая продольно поляризованную PZT-пластину размерами 20×10×2 мм, расположенную между двумя слоями никель-кобальтового феррита

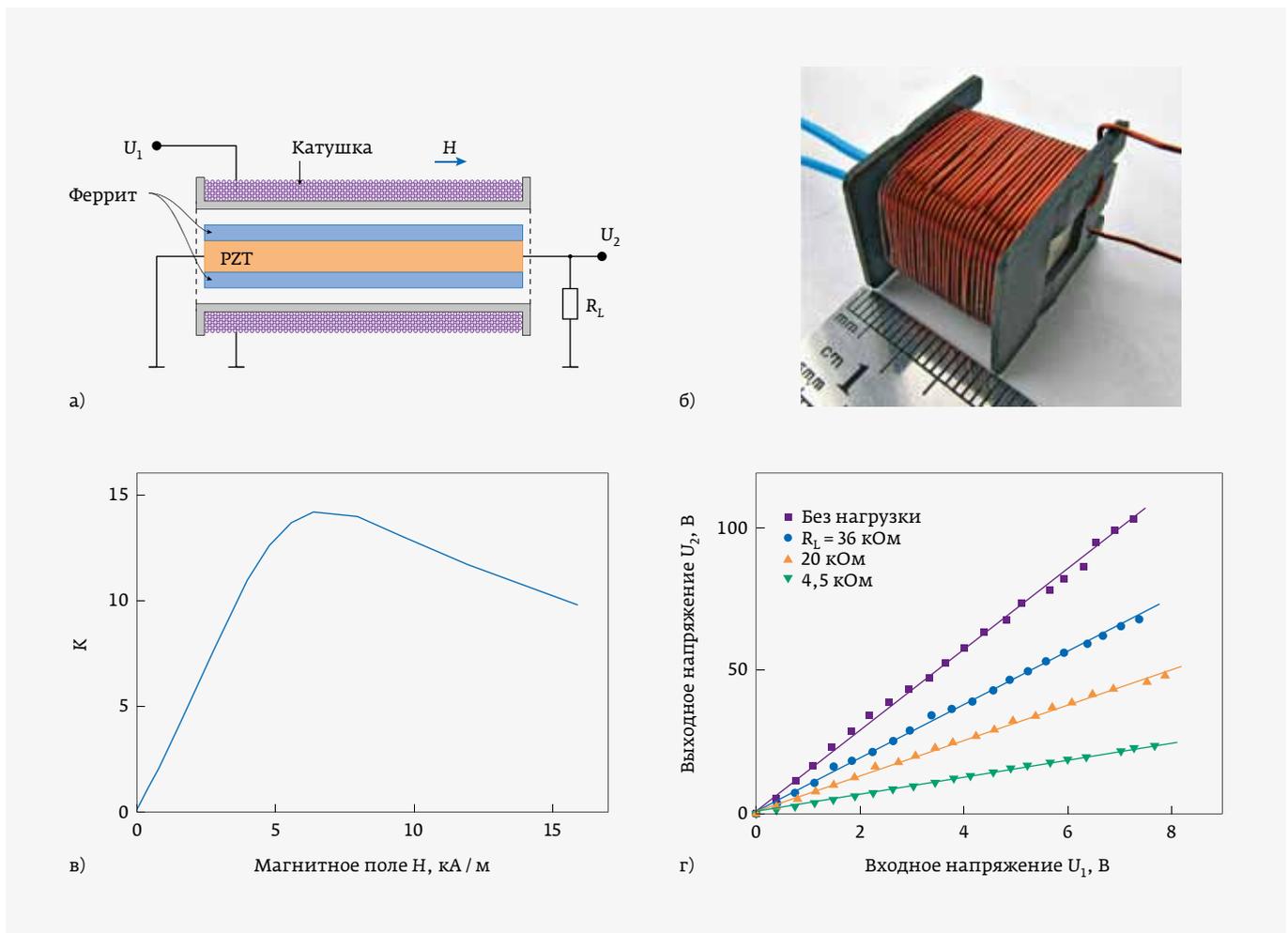


Рис. 2. МЭ-трансформатор: а – конструкция; б – внешний вид; в – зависимость коэффициента трансформации $K=U_2/U_1$ от управляющего поля H ; зависимость U_2 от U_1 при разных нагрузках R_L



Разработка и производство конденсаторов

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы

K50-15, K50-17, K50-27, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104

объемно-пористые танталовые конденсаторы

K52-1, K52-1M, K52-1BM, K52-1B, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы

K53-1A, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-82

суперконденсаторы (ионисторы)

K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31, K58-32, K58-33

накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов МИК, МИЧ, ИТИ

Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям ISO 9001



NiCoFe₂O₃ толщиной по 0,5 мм. На катушку, содержащую 120 витков, подают напряжение до $U_1=10$ В с частотой 99 кГц, равной частоте продольных акустических колебаний структуры. Выходное напряжение U_2 с электрода поступает на нагрузку R_L . Как видно из рис. 2в, изменение управляющего постоянного магнитного поля $H=0-6,4$ кА/м, направленного вдоль длинной оси структуры, позволяет изменять коэффициент трансформации устройства в пределах $K=U_2/U_1=0-15$. При оптимальном сопротивлении нагрузки $R_L \approx 20$ кОм коэффициент передачи мощности трансформатора достигал $P_{\text{вых.}}/P_{\text{вх.}} \approx 40\%$.

Диапазон выходных напряжений трансформатора составляет $U_2=0-100$ В (рис. 2г). К настоящему времени разработано и опробовано множество конструкций МЭ-трансформаторов, в том числе понижающие трансформаторы на основе обратного МЭ-эффекта с управляемым коэффициентом трансформации $K=0-10^{-3}$. Разработаны конструкции МЭ-трансформаторов с безкатушечной системой возбуждения в монолитном исполнении, для изготовления которых можно использовать стандартные методы планарных технологий.

Устройства преобразования частоты

Разработаны принципы создания устройств преобразования частоты радиосигналов, использующих нелинейные МЭ-эффекты в мультиферроидных гетероструктурах. Нелинейность МЭ-эффектов возникает из-за нелинейной зависимости магнитострикции ФМ-слоя от магнитного поля H [11] и приводит к генерации гармоник, комбинационных частот и субгармоник на частотах возбуждающего поля [12]. Конструкция МЭ удвоителя частоты схематически показана на рис. 3а [13]. Он содержит планарную гетероструктуру FeBSiC-PZT, помещенную внутрь возбуждающей электромагнитной катушки и намагниченную вдоль оси управляющим постоянным полем H . Входное напряжение $U_{\text{вх.}}$ с частотой f подают на возбуждающую катушку, а напряжение $U_{\text{вых.}}$ с удвоенной частотой $2f$

снимают с электродов PZT-слоя. На рис. 3б показан спектр частот выходного сигнала, содержащий как основную, так и вторую гармонику. Как видно из рис. 3в, амплитуда второй гармоники U_2 максимальна в отсутствие управляющего поля и уменьшается до нуля при увеличении поля до 500 А/м. Устройство может работать как в широкой полосе частот $f \sim 10^2-10^5$ Гц, так и в резонансном режиме на частоте акустического резонанса структуры. В широкополосном режиме эффективность преобразователя $\eta=U_2/U_{\text{вх.}}$ составляет единицы процентов, а в резонансном режиме, при совпадении частоты входного сигнала с частотой акустического резонанса структуры, может достигать десятков процентов.

При возбуждении структуры двумя магнитными полями с разными частотами f_1 и f_2 нелинейность приводит к генерации напряжений с суммарной и разностной частотами $f_0=f_1 \pm f_2$. Если эта частота совпадает с частотой акустического резонанса структуры, то выходное напряжение одновременно усиливается в $Q \sim 10^2-10^3$ раз (Q – добротность). Таким образом, гетероструктура может выполнять роль смесителя магнитных полей, эффективностью которого можно управлять с помощью внешнего магнитного поля.

Резонансный МЭ-эффект смешения частот лежит в основе принципа действия широкополосного анализатора спектра магнитных полей [14], блок-схема которого схематически показана на рис. 4а, а внешний вид – на рис. 4б. МЭ-смеситель помещают в исследуемое магнитное поле и подают на катушку напряжение с гетеродина с частотой f_1 . При сканировании частоты гетеродина и выполнении условий синхронизма определяются амплитуда и частота составляющих спектра магнитного поля. На рис. 4в в качестве примера показан измеренный спектр частот импульсного блока питания. Амплитуда сигнала на выходе спектроанализатора линейно зависит от амплитуды компоненты измеряемого поля. Диапазон рабочих частот анализатора определяется акустическими

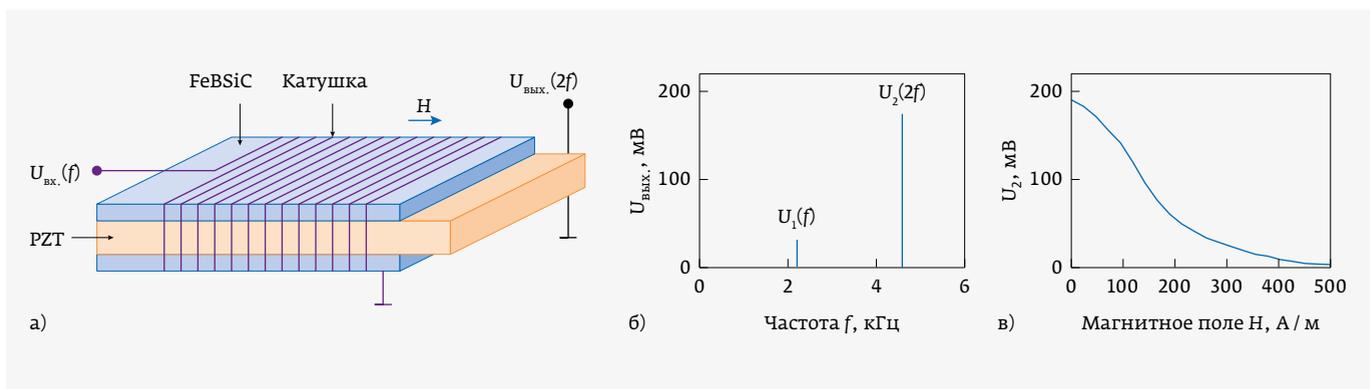


Рис. 3. МЭ удвоитель частоты, использующий нелинейный МЭ-эффект в структуре FeBSiC-PZT: а – конструкция; б – спектр частот напряжения на выходе; в – зависимость амплитуды 2-й гармоники U_2 от управляющего магнитного поля H

Н А Н О В О Й В Ы С О Т Е

Организаторы

The background features a blue gradient with a stylized globe in the center. A red star is at the top left, with a white trail leading to a white paper airplane. Below it, a blue and red trail leads to another white paper airplane. The text "МАКС 2021" is prominently displayed in the lower half.

МАКС 2021

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКИЙ
САЛОН**

Устроитель



WWW.AVIASALON.COM • 20-25 ИЮЛЯ • ЖУКОВСКИЙ

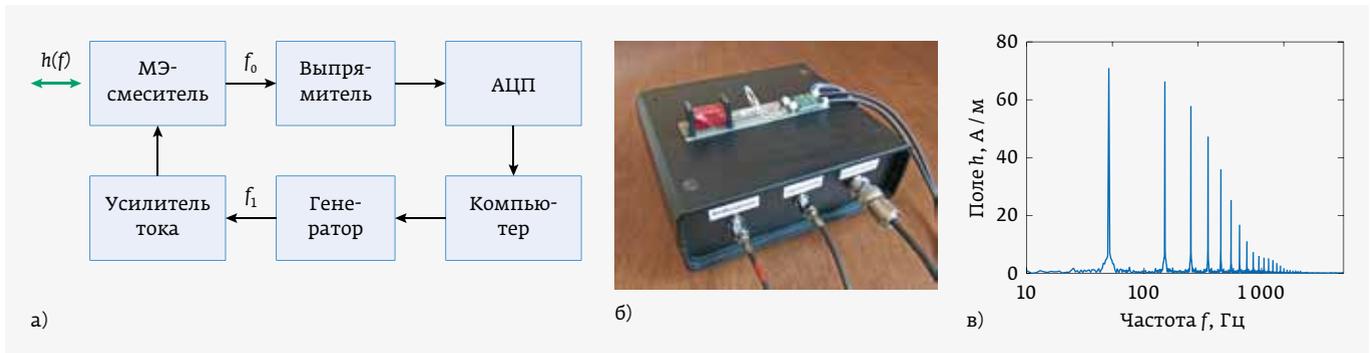


Рис. 4. МЭ анализатор спектра, использующий эффект смешения частот: а – блок-схема; б – внешний вид; в – измененный спектр магнитных полей импульсного блока питания компьютера

характеристиками структуры и может составлять десятки герц – единицы мегагерц, разрешение по частоте – десятки герц, чувствительность – до 1 В/Э.

Магнитоэлектрические генераторы

Разработана серия активных МЭ-элементов [15, 16], содержащих резонатор на основе гетероструктуры, помещенный в электромагнитную катушку и включенный в цепь обратной связи широкополосного усилителя. В качестве примера на рис. 5а изображена блок-схема активного порогового датчика постоянных магнитных полей. При значениях полей в интервале $H_1 < H < H_2$ выполняется условие самовозбуждения и схема генерирует напряжение на резонансной частоте (рис. 5б). Подбирая элементы схемы, можно регулировать нижний и верхний пороги срабатывания устройств. На рис. 5в изображена зависимость порогов срабатывания от значения задающего резистора R. Активные МЭ-элементы могут быть использованы

в качестве бесконтактных датчиков в системах доступа, контроля близости и др.

Магнитоэлектрические датчики магнитных полей

Наиболее востребованной к настоящему времени областью применений МЭ-эффектов в мультиферроидных гетероструктурах является создание высокочувствительных датчиков постоянных и переменных магнитных полей [17]. МЭ-датчик осуществляет прямое преобразование магнитного поля в электрическое напряжение и является пассивным элементом, что делает его конкурентом датчиков магнитных полей других типов, таких как холловские, магниторезистивные и др. Любая МЭ-гетероструктура, помещенная в магнитное поле смещения $H \sim 0,1-4$ кА/м, является простейшим датчиком переменных полей. Амплитуда генерируемого PZT-слоем напряжения вследствие МЭ-эффекта пропорциональна

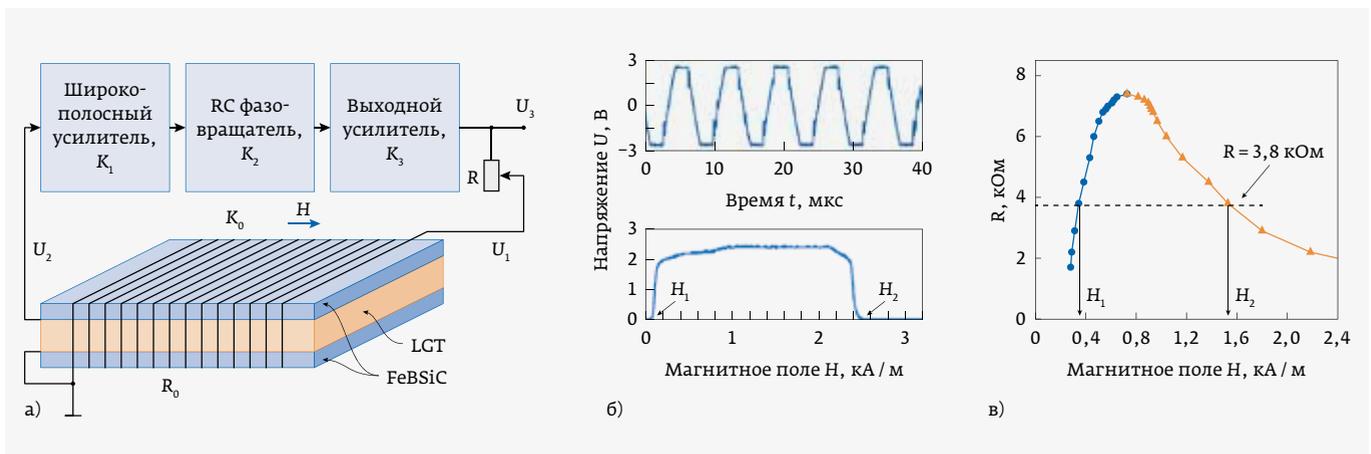
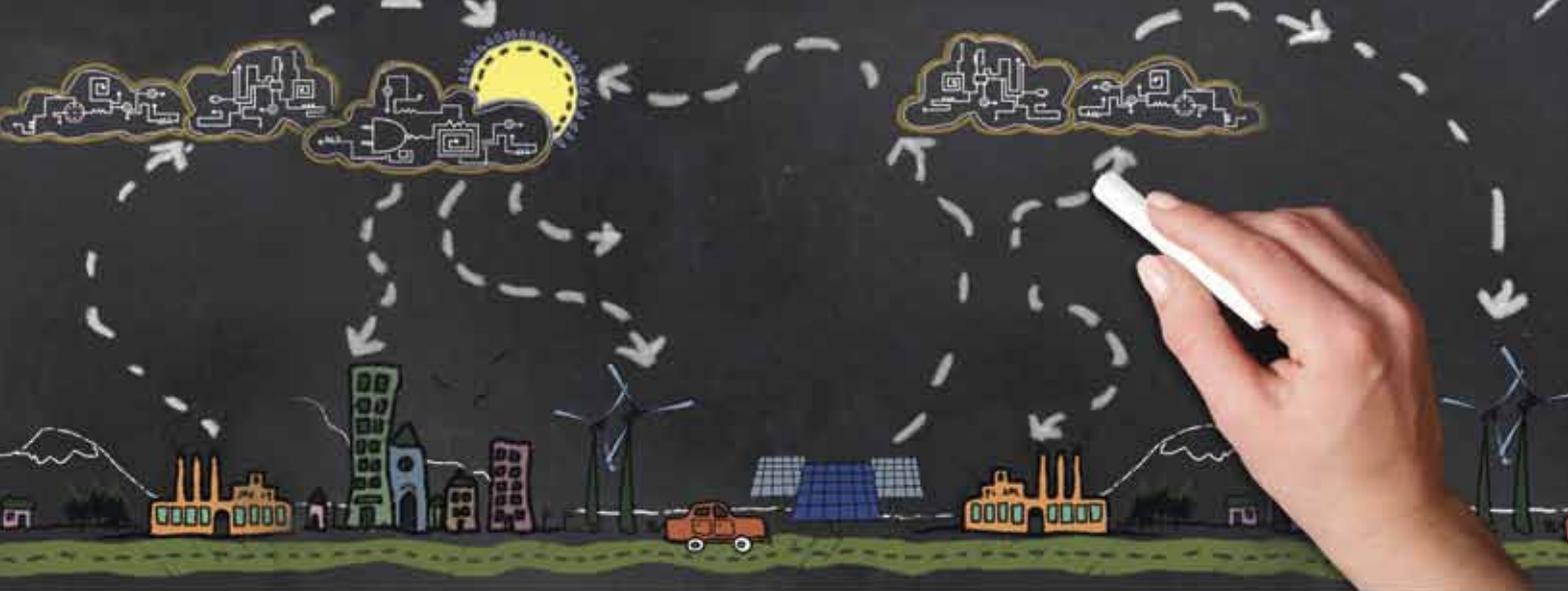


Рис. 5. Активный МЭ-элемент (пороговый датчик постоянных магнитных полей), содержащий акустический резонатор на основе структуры «FeBSiC – лангитат (LGT)», включенный в цепь обратной связи усилителя: а – блок-схема; б – форма генерируемого напряжения и зависимость его амплитуды от поля H; в – зависимость области рабочих полей H_1-H_2 от управляющего сопротивления R



Проектируйте по-новому

Упрощенная платформа разработки Curiosity

В состав экономичной платформы разработки Curiosity Nano входят оценочные комплекты с 32-разрядными микроконтроллерами PIC и SAM на базе ядра Arm Cortex, позволяющие легко анализировать разные архитектуры при проектировании 32-разрядной встраиваемой системы. Используйте универсальную платформу разработки и настраивайте МК в соответствии с нуждами конкретного приложения. Оценочные комплекты Curiosity Nano на основе 32-разрядных МК масштабируются с помощью базовых плат Curiosity Nano Base for Click и применяются для проектирования в единой среде, начиная с предварительного анализа и заканчивая рабочим прототипом.

Встроенные функции отладки и программирования устраняют необходимость в услугах стороннего программиста, сокращая стоимость разработки.

Ключевые особенности

- повышение производительности за счет перехода с 8- или 16-разрядных МК на 32-разрядные
- сокращение стоимости начального анализа устройства
- полная поддержка встроенного программирования и отладки
- расширение возможностей проектирования системы с помощью плат Click.

Фреймворк MPLAB Harmony Integrated Software Development от Microchip предлагает ряд примеров, спецификацию материалов (BOM), пользовательский код и указания по применению, облегчающие начало работы над проектом и сокращающие время вывода продукции на рынок.



microchip.com/curiositynano



© 2021 Microchip Technology Inc. Все права защищены.
00000018A, Microchip Technology Inc.
Microchip Technology Inc. 32910 University Ave., Chandler, AZ 85226, USA
Microchip Technology Inc. 32910 University Ave., Chandler, AZ 85226, USA
Microchip Technology Inc. 32910 University Ave., Chandler, AZ 85226, USA

амплитуде переменного поля h . Датчик для измерения постоянных полей дополнительно содержит возбуждающую катушку, создающую, для повышения чувствительности, возбуждающее магнитное поле $h(f_0)$ на частоте резонанса структуры. Амплитуда сигнала с такого датчика пропорциональна полю H .

Реализован МЭ аналог fluxgate магнетометра на гетероструктуре «FeBSiC – пьезоволоконный композит (ПВК)» размерами 10 × 40 мм. Устройство МЭ-магнетометра схематически изображено на рис. 6а, а его полевая и частотные характеристики – на рис. 6б и 6в соответственно [18]. Магнетометр позволяет измерять постоянные поля напряженностью от $H \sim 1$ А/м до единиц кА/м и переменные поля с частотами до 1 кГц, в зависимости от частоты f_0 модулирующего магнитного поля. Чувствительность МЭ-магнетометра составляла $S = U/H = 20$ В/(А/м).

Для увеличения чувствительности МЭ-датчиков в области низких частот (1–100 Гц) используют методику переноса частоты вверх, где магнитные шумы компонентов структуры и шумы электронных схем значительно падают, что позволяет на 2–3 порядка повысить чувствительность датчиков [19]. Разработанные к настоящему времени МЭ-датчики переменных и постоянных магнитных полей позволяют детектировать постоянные поля до рекордно малых величин $\sim 10^{-3}$ А/м и переменные поля до величин $\sim 10^{-6}$ А/м. Важно отметить, что все МЭ-датчики работают при комнатных температурах, в отличие от сверхпроводящих интерферометров, что значительно расширяет области их применений.

Перспективным направлением применений низкочастотных МЭ-датчиков является их использование в медицине для регистрации магнитокардиограмм и магнитоэнцефалограмм [20]. Возможность получения трехмерных распределений магнитных полей живых объектов, как ожидается, позволит существенно повысить информативность диагностики.

Реализована портативная система связи диапазона низких частот (3–30 кГц) на базе двух МЭ-антенн [21].

Передающая и приемная антенны представляли собой МЭ-гетероструктуры FeBSiC-ПВК размерами 40 × 2 мм, возбуждаемые на частоте акустического резонанса 24 кГц, что позволило примерно на три порядка уменьшить их размеры по сравнению с обычными антеннами. В ближней зоне диаграммы направленности антенн соответствовали диаграммам магнитных диполей. При мощности излучения передающей антенны 400 мВт и уровне шума приемной антенны 260 фТл/Гц^{1/2} система обеспечивала связь на расстоянии до 120 м. Расчеты показали, что с увеличением мощности передающей антенны и чувствительности приемной антенны рабочая дальность может быть увеличена до ~ 10 км, что позволит использовать систему для подземной и подводной связи.

Электрически управляемые сверхвысокочастотные устройства

Обратный МЭ-эффект в композитных гетероструктурах использован для создания электрически управляемых устройств обработки СВЧ-сигналов [22]. На рис. 7а схематически изображен резонатор, содержащий тонкую пленку железиттриевого граната $Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG) толщиной ~ 10 мкм, выращенную методом жидкофазной эпитаксии на подложке из галлийгадолиниевого граната (GGG) и наклеенную на пьезоэлектрическую PZT-подложку. При приложении внешнего магнитного поля H в пленке YIG с помощью микрополоскового преобразователя возбуждают ферромагнитный резонанс (ФМР) на частоте $f = \gamma H$ ($\gamma \approx 35$ МГц/(А/м)) (добротность резонатора $Q \sim 10^3$), который формирует линию поглощения резонатора. Частота ФМР перестраивается в диапазоне 2–10 ГГц при изменении управляющего магнитного поля H . Кроме того, частота резонатора перестраивается электрическим полем E . При приложении управляющего напряжения U , PZT-подложка деформируется, растягивает YIG-пленку, что приводит к генерации эффективного поля магнитной анизотропии. В результате частотная характеристика резонатора смещается вверх

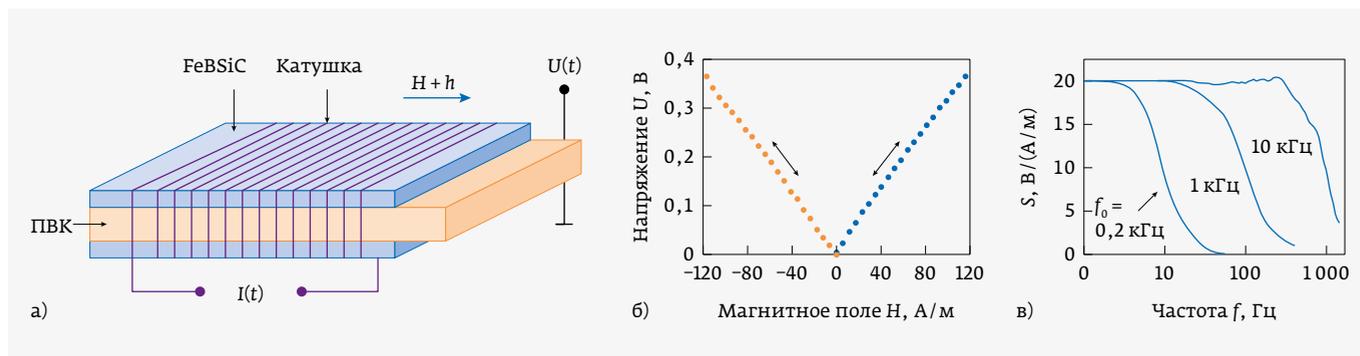


Рис. 6. МЭ-аналог fluxgate магнетометра: а – конструкция; б – полевая характеристика; в – частотная характеристика

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-
МОРСКОЙ
САЛОН



INTERNATIONAL
MARITIME
DEFENCE
SHOW

Организатор:



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ

При участии:



Министерство
обороны



Министерство
иностраных
дел



Федеральная служба
по военно-техническому
сотрудничеству



Администрация
Санкт-Петербурга



РОСОБОРОНЭКСПОРТ

Устроитель:



ООО «Морской Салон»

www.navalshow.ru

IMDS
2021

23-27 июня

РОССИЯ

Санкт-Петербург

“Через сотрудничество – к миру и прогрессу!”

или вниз по частоте (рис. 7б, в). В тонкопленочных структурах с ФМ-слоем из FeGaV-PZT-PN достигнута перестройка частоты в диапазоне 1,5–8 ГГц электрическим полем 8 кВ/см [23]. В линии задержки на спиновых волнах в структуре YIG-PZT, содержащей входной и выходной

микрополосковые преобразователи (рис. 7г), реализованы управляемый электрическим полем сдвиг фазы и изменение времени задержки выходного сигнала. Сдвиг фазы достигал $\pm 90^\circ$, а изменение задержки – до 50% при управляющих полях $E = 8$ кВ/см (рис. 7д, е).

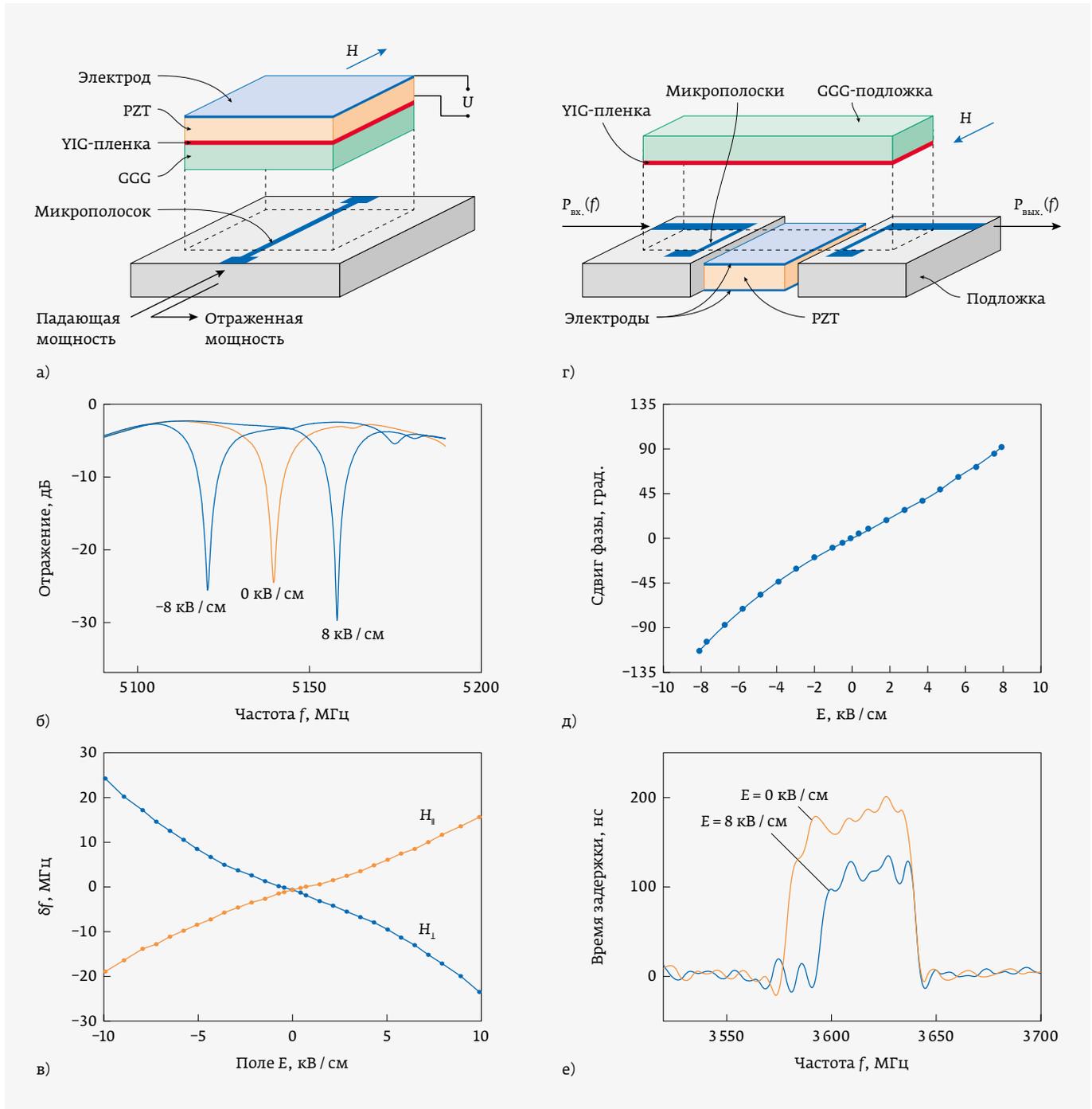


Рис. 7. СВЧ-резонатор и линия задержки на основе мультиферроидной гетероструктуры «пленка YIG – PZT»: а – конструкция резонатора; б – перестройка частоты ФМР электрическим полем E ; в – зависимость сдвига резонансной частоты δf от поля E ; г – конструкция линии задержки на спиновых волнах; д – зависимость сдвига фазы выходного сигнала от поля E ; е – влияние электрического поля E на время задержки СВЧ-сигнала

Магнитоэлектрические элементы памяти

Возможность переключать намагниченность мультiferроидных гетероструктур с помощью электрического поля позволяет использовать их для создания МЭ элементов памяти [24]. Наиболее простой вариант представляет собой магнитоэлектрическую ячейку на пьезоэлектрической подложке (рис. 8а), содержащую «жесткий» и «мягкий» ферромагнитные слои, сопротивление которой изменяется при инверсии ориентации намагниченности «мягкого» слоя. Прикладывая управляющее напряжение U к пьезослою, за счет обратного МЭ-эффекта можно изменить ориентацию намагниченности M «мягкого» слоя и сопротивление R ячейки. Такой метод переключения, как показали оценки, может оказаться примерно на три порядка менее энергозатратным, чем традиционный метод переключения ячейки с помощью инжектирования тока. Существование в мультiferроидной структуре слоев с магнитным и электрическим порядком может быть использовано для создания МЭ элементов памяти нового типа – с 4-мя устойчивыми состояниями, соответствующими разным ориентациям векторов M и P в слоях структуры (рис. 8б) [25]. Реализован действующий МЭ элемент памяти на основе многослойной пленочной структуры $10 \times (\text{TbCo}_2 / \text{FeCo})$, нанесенной на пьезоэлектрическую PMN-PT подложку (рис. 8в) [26]. Структуру напыляли во внешнем магнитном поле, что привело к существованию двух устойчивых ориентаций намагниченности «0» и «1», повернутых друг относительно друга на 90° . При деформации структуры под действием напряжения U , приложенного к пьезослою, происходит обратимое переключение ориентации вектора намагниченности. Считывание записанной информации осуществляют либо магнитооптическим методом, либо по импульсам генерируемого структурой МЭ-напряжения.

Автономные магнитоэлектрические источники питания

МЭ-эффект в гетероструктурах приводит к генерации электрического напряжения под действием переменного магнитного поля, поэтому такие структуры можно использовать в качестве источника энергии, преобразующего энергию магнитного поля в постоянное напряжение [27, 28]. На рис. 9а изображена одна из конструкций МЭ-преобразователя, а на рис. 9б – блок-схема простейшего источника, построенного на его основе. Источник питания содержит собственно МЭ-преобразователь, выпрямитель напряжения и накопитель энергии в виде конденсатора или батареи. На рис. 9в показана типичная зависимость выходного напряжения и выходной мощности, генерируемых МЭ источником питания в магнитном поле с амплитудой 80 A/m с частотой 10 кГц , от сопротивления нагрузки R . Амплитуда напряжения достигает единиц вольт, а выходная мощность – единицы-сотни мкВт, что вполне достаточно для питания современных электронных схем. Преимуществом автономных источников питания является практически неограниченный срок службы, экологичность, малые размеры и вес. Автономные маломощные источники питания могут найти широкое применение в элементах распределенных сетей, осуществляющих сбор и обработку информации, системах контроля и обеспечения доступа и т. д.

Остановимся на материалах и технологиях, применяемых в настоящее время для изготовления МЭ-устройств электроники и информатики на основе мультiferроидных гетероструктур. Наиболее важным параметром, определяющим эффективность преобразования полей в мультiferроидных гетероструктурах, является коэффициент МЭ-взаимодействия. Величина коэффициента пропорциональна магнитострикции λ ФМ-слоя

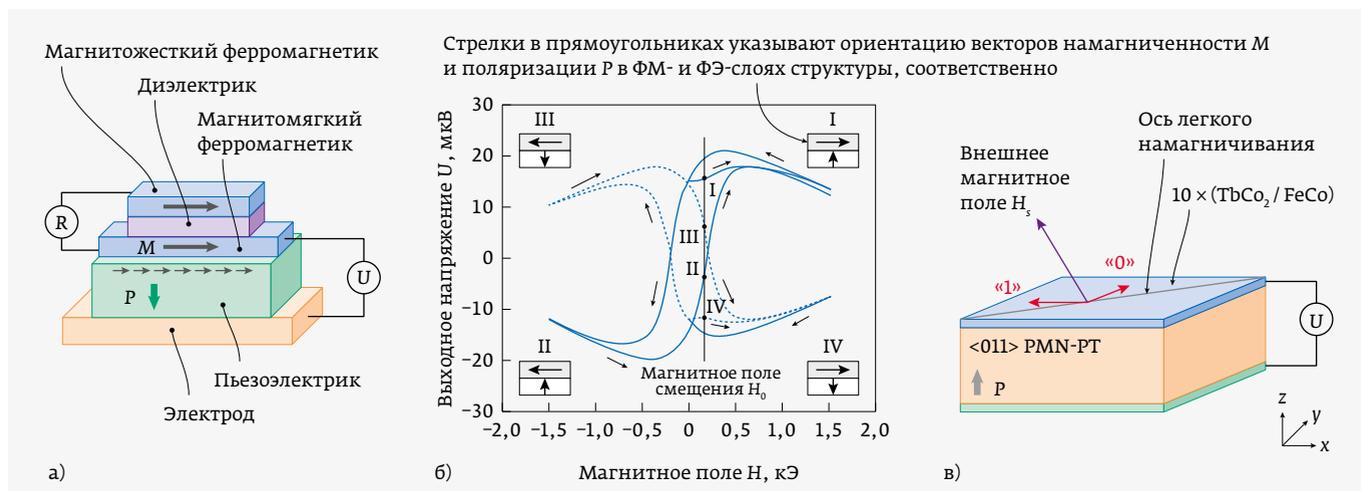


Рис. 8. МЭ ячейка памяти с двумя магнитоэлектрическими слоями (а); МЭ ячейка памяти с 4-мя состояниями (б); МЭ элемент памяти на основе структуры $10 \times (\text{TbCo}_2 / \text{FeCo})$ -PMN-PT (в)

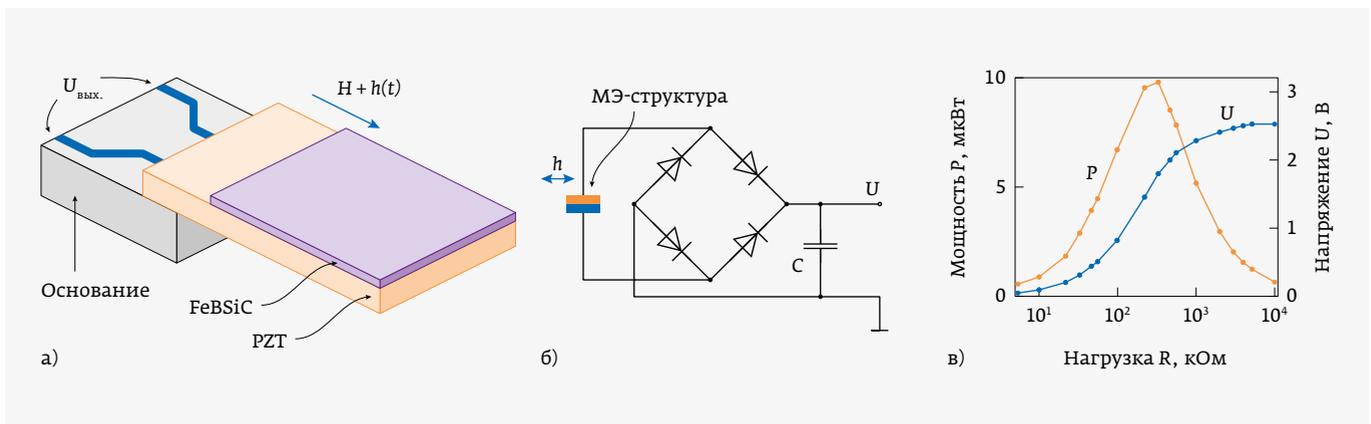


Рис. 9. Автономный МЭ источник питания: а – конструкция МЭ-преобразователя; б – блок-схема источника питания, построенного на основе данного преобразователя; в – зависимость генерируемых напряжения U и мощности P от сопротивления нагрузки R

структуры и отношению пьезомодуля к диэлектрической проницаемости d/ϵ ФЭ-слоя структуры. Поэтому ФМ-слои делают из коммерчески доступных материалов с высокой магнитострикцией, таких как металлы Ni и Co, сплавы на основе железа FeCo и FeGa и редкоземельные сплавы типа Terfenol-D. ФЭ-слои изготавливают из пьезокерамик типа PZT и PMN-PT, монокристаллов лангата, AlN и LiNbO₃, пьезополимеров типа PVDF. Технологии изготовления всех перечисленных материалов хорошо известны и применяются в промышленности. Технологии формирования гетероструктур зависят от толщин слоев и должны обеспечивать передачу деформаций через границу раздела. При толщинах слоев ~0,1–1 мм слои структур склеивают цианоакриловым клеем или соединяют методом низкотемпературной пайки, при толщинах слоев ~2–50 мкм используют метод электролитического осаждения металлов, при толщинах слоев менее ~1 мкм применяют методы магнетронного напыления, лазерного напыления, осаждения из газовой фазы и др. Изолирующие слои в гетероструктурах получают путем осаждения диэлектрических пленок, например SiO₂ и др. Для формирования топологии активных элементов и электродов с размерами единицы-десятки микрометров в плоскости структуры можно использовать методы жидкостной и лазерной безмасочной литографии. Таким образом, изготовление мультиферроидных гетероструктур и МЭ-устройств на их основе не представляет особых сложностей для современных технологий.

В заключение можно отметить, что проведенные за последние годы исследования привели к созданию нового поколения устройств, использующих МЭ-эффекты в мультиферроидных гетероструктурах. Уникальным свойством

таких устройств является возможность управления их параметрами с помощью внешних магнитных и электрических полей. Набор МЭ-устройств включает управляемые индукторы, трансформаторы напряжения, преобразователи частоты, высокочувствительные датчики магнитных полей, управляемые сверхвысокочастотные устройства, новые элементы памяти, автономные источники энергии. По своим характеристикам разработанные устройства приближаются к существующим и при дальнейшем улучшении характеристик могут найти широкое применение в современной электронике и информационной технике.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 17-12-01435-П.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Harlow J. H.** Electric power transformer engineering; 3d ed., CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2017. <https://doi.org/10.1201/b12110>
2. **Carazo A. V.** Piezoelectric Transformers: An Historical Review // Actuators. 2016. V. 5. PP. 1–22. <https://doi.org/10.3390/act5020012>
3. **Chu Z., PourhosseiniAsl M., Dong S.** Review of multi-layered magnetolectric composite materials and devices applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. P. 243001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aac29b>
4. **Tu C., Chu Z.-Q., Spetzler B. et al.** Mechanical-resonance-enhanced thin-film magnetolectric heterostructures for magnetometers, mechanical antennas, tunable RF inductors, and filters // Materials. 2019. V. 12. P. 2259.
5. **Nan C.-W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G.** Multiferroic magnetolectric composites: Historical perspective, status and future directions // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 031101. <https://doi.org/10.1063/1.2836410>

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



Минцифры
России



СВЯЗЬ

«Информационные и коммуникационные
технологии»

15–18 июня 2021

33-я международная
ВЫСТАВКА

Организатор



При поддержке:

- Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ
 - Комитета Государственной Думы ФС РФ по образованию и науке
- Под патронатом ТПП РФ

12+

Реклама



Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

www.sviaz-expo.ru

6. **Srinivasan G., De Vreugd C. P., Laletin V. M., Paddubnaya N., Bichurin M. I., Petrov V. M., Filippov D. A.** Resonant magnetoelectric coupling in trilayers of ferromagnetic alloys and piezoelectric lead zirconate titanate: The influence of bias magnetic field // *Phys. Rev. B*. 2005. V. 71. P. 184423. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.184423>
7. **Lou J., Reed D., Liu M., Sun N. X.** Electrostatically tunable magnetic inductors with large inductance tenability // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 112508. <https://doi.org/10.1063/1.3103273>
8. **Chen H., Wang X., Gao Y. et al.** Integrated tunable magnetoelectric RF inductors // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2020. V. 68. PP. 951–963. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2957472>
9. **Dong S., Li J. F., Viehland D. et al.** A strong magnetoelectric voltage gain effect in a magnetostrictive-piezoelectric composites // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 85. PP. 3524–3536. <https://doi.org/10.1063/1.1786631>
10. **Saveliev D., Chashin D., Fetisov L., Shamonin M., Fetisov Y.** Ceramic-heterostructure-based magnetoelectric voltage transformer with an adjustable transformation ratio // *Materials*. 2020. V. 13. P. 3981. <https://doi.org/10.3390/ma13183981>
11. **Kamentsev K. E., Fetisov Y. K., Srinivasan G.** Low-frequency nonlinear magnetoelectric effects in a ferrite-piezoelectric multilayer // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 142510. <https://doi.org/10.1063/1.2360239>
12. **Burdin D. A., Chashin D. V., Ekonomov N. A., Preobrazhenskii V. L., Gordeev S. N., Fetisov Y. K.** Parametric generation of subharmonics in a composite multiferroic resonator // *Phys. Rev. Applied*. 2020. V. 13. P. 054070. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.054070>
13. **Ma J., Li Z., Lin Y., Nan C. W.** A novel frequency multiplier based on magnetoelectric laminate // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2011. V. 323, PP. 101–103. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.08.039>
14. **Fetisov Y. K., Burdin D. A., Chashin D. V., Ekonomov N. A.** High-sensitivity wideband magnetic field sensor using nonlinear resonance magnetoelectric effect // *IEEE Sensor J.* 2014. V. 14. No. 7. PP. 2252–2256. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2309718>
15. **Fetisov Y. K., Serov N. V., Fetisov L. Y., Makovkin S. A., Viehland D., Srinivasan G.** A magnetoelectric composite based signal generator // *Appl. Phys. Lett.* 2016. V. 108. P. 213502.
16. **Fetisov L. Y., Serov V. N., Chashin D. V., Makovkin S. A., Srinivasan G., Viehland D., Fetisov Y. K.** A Magnetoelectric sensor of threshold DC magnetic fields // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 121. P. 154503. <https://doi.org/10.1063/1.4981533>
17. **Viehland D., Wuttig M., McCord J., Quandt E.** Magnetoelectric magnetic field sensors // *MRS Bulletin*. 2018. V. 43. PP. 834–840. <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.261>
18. **Burdin D., Chashin D., Ekonomov N., Fetisov L., Fetisov Y., Shamonin M.** DC magnetic field sensing based on the nonlinear magnetoelectric effect in magnetic heterostructures // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016. V. 49. P. 375002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/37/375002>
19. **Jahns R., Greve H., Woltermann E., Quandt E., Knochel R.** Sensitivity enhancement of magnetoelectric sensors through frequency conversion // *Sens. and Act. A: Physical*. 2012. V. A 183. PP. 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.05.049>
20. **Reerman J., Durdaut P., Salzer S., Demming T., Piorra A., Quandt E., Frey N., Hoft M., Schmidt G.** Evaluation of magnetoelectric sensor systems for cardiological applications // *Measurement*. 2018. V. 116. PP. 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.09.047>
21. **Dong C., He Y., Li M. et al.** A portable very low frequency (VLF) communication system based on acoustically actuated magnetoelectric antennas // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2020. V. 19. No. 3. PP. 398–402. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2968604>
22. **Srinivasan G., Fetisov Y. K.** Microwave magnetoelectric effects and signal processing devices // *Integrated Ferroelectrics*. 2006. V. 83. PP. 89–98. <https://doi.org/10.1080/10584580600949105>
23. **Lou J., Liu M., Reed D., Ren Y., Sun N. X.** Giant electrical tuning of magnetism in novel multiferroic FeGaB/Lead Zinc Niobate – Lead Titanate (PZN-PT) heterostructures // *Adv. Mater.* 2009. V. 21. PP. 4711–4715. <https://doi.org/10.1002/adma.200901131>
24. **Bibes M., Barthelemy A.** Towards a magnetoelectric memory // *Nature materials*. 2008. V. 7. PP. 425–426. <https://doi.org/10.1038/nmat2189>
25. **Shi Z., Wang C. P., Liu X. J., Nan C. W.** A four-state memory cell based on magnetoelectric composite // *Chinese Science Bul.* 2008. V. 53. No. 14. PP. 2135–2138. <https://doi.org/10.1007/s11434-008-0275-8>
26. **Teircelin N., Dusch Y., Preobrazhenskii V., Pernod P.** Magnetoelectric memory using orthogonal magnetization states and magnetoelastic switching // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. P. 07D726. <https://doi.org/10.1063/1.3559532>
27. **Annapureddy V., Palneedi H., Hwang G-T. et al.** Magnetic energy harvesting with magnetoelectrics: an emerging technology for self powered autonomous systems // *Sustainable Energy & Fuels*. 2017. V. 1. PP. 2039–2052. <https://doi.org/10.1039/C7SE00403F>
28. **Федулов Ф., Фетисов Ю., Чашин Д.** Источники питания, использующие энергию вибраций и переменных магнитных полей. LAP LAMBERT Academic Publishing RU. 2019. 115 с. ISBN: 978-620-0-47910-5.



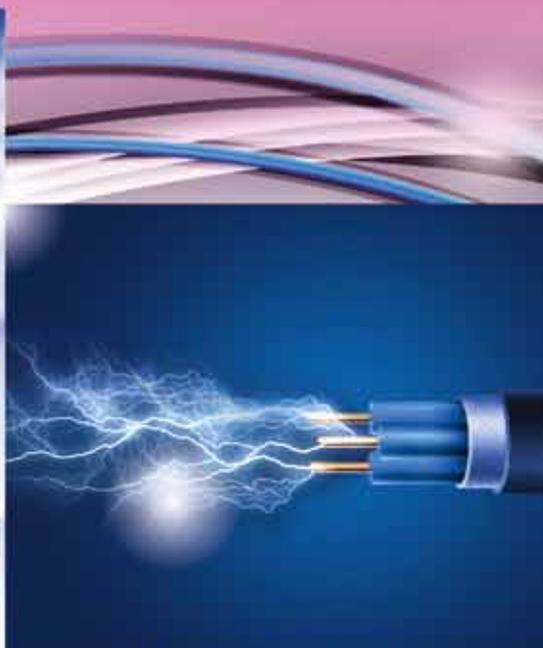
ЭЛЕКТРО

29-я международная выставка
«Электрооборудование. Светотехника.
Автоматизация зданий и сооружений»



7–10 ИЮНЯ 2021

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»
Краснопресненская наб., 14
Павильон №2 (залы 1, 2)
www.elektro-expo.ru



 **ЭКСПОЦЕНТР**

12+



Реклама



**ЭЛЕКТРО
МАРКЕТ**
ВАЖНЫЕ СВЯЗИ
ДЛЯ ВАЖНЫХ ДЕЛ



**ЭЛЕКТРО
TALK**
РАЗГОВОРЫ
С ТОЛКОМ



**ЭЛЕКТРО
SKILLS**
ПРОКАЧАЙ НАВЫКИ
И КОМПЕТЕНЦИИ