(19) Евразийское патентное ведомство

(11) 038296 (13) B1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.08.05

(21) Номер заявки
201991410

(22) Дата подачи заявки
2017.12.06

(51) Int. Cl. *G11C 11/16* (2006.01)

(54) ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМАЯ ПАМЯТЬ

(31) **1621485.0**
(32) **2016.12.16**
(33) **GB**
(43) **2019.12.30**
(86) **PCT/GB2017/053674**
(87) **WO 2018/109441 2018.06.21**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
АйП2АйПО ИННОВЕЙШЕНЗ ЛИМИТЕД (GB)

(72) Изобретатель:
Земен Ян (CZ), Михай Андрей Пол, Зоу Бин, Болдрин Дэвид, Дончев Евгений (GB)

(74) Представитель:
Хмара М.В., Липатова И.И., Новоселова С.В., Осипов К.В., Пантелеев А.С., Ильмер Е.Г. (RU)

(56) US-B1-6387476
LUKASHEV P. ET AL.: "Theory of the piezomagnetic effect in Mn-based antiperovskites", PHYSICAL REVIEW B (CONDENSED MATTER AND MATERIALS PHYSICS), vol. 78, no. 18, 1 November 2008 (2008-11-01), XP002777973, AMERICAN PHYSICAL SOCIETY BY AIP USA ISSN: 1098-0121, DOI:10.1103/PHYSREVB.78.184414 the whole document
US-A1-2010259846

(57) Изобретение относится к ячейке энергонезависимой памяти, содержащей слой хранения, состоящий из ферромагнитного или ферроэлектрического материала, выполненный с возможностью записи в него данных в виде направления магнитной или электрической поляризации, пьезомагнитный слой, состоящий из антиперовскитного пьезомагнитного материала, выборочно имеющего первый тип воздействия на слой хранения и второй тип воздействия на слой хранения в зависимости от магнитного состояния и деформации в пьезомагнитном слое; и вызывающий деформацию слой для создания деформации в пьезомагнитном слое для переключения, тем самым, с первого типа воздействия на второй тип воздействия.

038296 B1

038296 B1

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение относится к ячейке энергонезависимой памяти (NVM, от англ. Non-Volatile Memory) и к способу записи данных и считывания данных из ячейки энергонезависимой памяти.

Уровень техники

Настоящее изобретение направлено на то, чтобы устранить разрыв между высокопроизводительной, энергозависимой, дорогостоящей оперативной памятью (RAM, от англ. Random Access Memory) компьютера и недорогими энергонезависимыми устройствами хранения данных с низкими эксплуатационными характеристиками, такими как накопители на жестких дисках (HDD, от англ. Hard Disk Drive). Новейшие технологии в области NVM, разработанные в попытке восполнить такой разрыв, известны как "память класса хранилища" (SCM, от англ. Storage Class Memory).

С точки зрения повышения производительности хранения данных основным кандидатом является флэш-память типа NAND, которая представляет собой доминирующую технологию в области твердотельных накопителей (SSD, от англ. Solid State Drive) и является на данный момент слишком дорогой для замены накопителей HDD, при этом ее низкая износостойкость, производительность и энергоэффективность препятствуют ее применению в качестве RAM. Усовершенствованная технология HDD, например технология магнитной записи с нагревом носителя (HAMR, от англ. Heat Assisted Magnetic Recording), также имеет низкую производительность. Среди технологий в области энергонезависимой памяти, находящихся в стадии разработки, главными конкурентами являются RAM с переносом спинового момента (STT-RAM; страдает от ограниченной масштабируемости, требует относительно высоких плотностей тока для обеспечения переключения между состояниями), ферроэлектрическая RAM (FRAM; использует считывание с разрушением информации и имеет пониженную износостойкость), память на основе фазового перехода (PCM, от англ. Phase-Change Memory; имеет низкую износостойкость, энергоэффективность и основывается на применении дорогостоящих, токсичных материалов), резистивная RAM (RRAM; использует считывание с разрушением информации, при этом пассивные массивы памяти страдают из-за проблемы с паразитным каналом) и многоячеистые устройства, основанные на этих принципах.

Существующие ячейки NVM имеют один или более из следующих недостатков: они требуют наличия транзистора для считывания и/или записи данных, они требуют наличия более двух электродов для считывания и записи данных, они не пригодны к складированию и поэтому не могут быть сформированы в виде трехмерных массивов, а также они имеют низкую плотность упаковки в двух измерениях.

Раскрытие изобретения

В настоящем изобретении предложена ячейка энергонезависимой памяти, содержащая слой хранения, состоящий из ферромагнитного материала, в который могут быть записаны данные в виде направления намагниченности; пьезомагнитный слой, состоящий из антиперовскитного пьезомагнитного материала, выборочно имеющего первый тип воздействия на слой хранения и второй тип воздействия на слой хранения в зависимости от деформации в пьезомагнитном слое; вызывающий деформацию слой для создания деформации в пьезомагнитном слое для переключения, тем самым, с первого типа воздействия на второй тип воздействия.

Таким образом, в настоящем изобретении использовано изменение свойств антиперовскитных пьезомагнитных материалов с выборочным регулированием деформации для изменения силы взаимодействия между слоем хранения и пьезомагнитным слоем. Два типа воздействия обеспечивают возможность записи в ячейку памяти. Намагниченность в слое хранения влияет на магнитное состояние в пьезомагнитном слое. Магнитное состояние в пьезомагнитном слое влияет на упругие свойства пьезомагнитного слоя из-за его сильной магнитоупругой связи. Пьезомагнитный слой образует верхнюю пластину плоского конденсатора, причем измерение его емкости используется для считывания магнитного состояния слоя хранения (эффект магнитоемкости) с использованием только двух электродов.

В одном из вариантов осуществления первый тип воздействия заключается в том, что результирующая намагниченность пьезомагнитного слоя является достаточно высокой для преодоления коэрцитивного поля в слое хранения и для выравнивания намагниченности слоя хранения с намагниченностью пьезомагнитного слоя через биполярную связь, а второй тип воздействия заключается в том, что любое магнитное поле в слое хранения из-за намагниченности пьезомагнитного слоя меньше коэрцитивного поля слоя хранения. Таким образом, при втором типе воздействия намагниченность слоя хранения не меняет направление.

Следовательно, для записи информации к пьезоэлектрическому слою прикладывают напряжение, которое вызывает деформацию в пьезомагнитном слое для изменения его намагниченности. Изменение намагниченности пьезомагнитного слоя влияет на изменение направления намагниченности слоя хранения из-за биполярной связи между слоем хранения и пьезомагнитным слоем. После изменения направления намагниченности слоя хранения деформация в вызывающем деформацию (пьезоэлектрическом) слое снижается до небольшого значения (например, ненулевого значения) из-за небольшого рассогласования параметров решетки между пьезомагнитным слоем и вызывающим деформацию слоем или из-за ферроэлектрической поляризации вызывающего деформацию слоя, так что намагниченность в пьезомагнитном слое снижается до такого уровня, при котором любое магнитное поле в слое хранения будет меньше ко-

эрцитивного поля слоя хранения. В результате, направление намагниченности в слое хранения остается неизменным после удаления деформации с пьезомагнитного слоя (после снятия напряжения с пьезоэлектрического слоя).

Преимущество такой компоновки состоит в том, что те же самые электроды, что используются для записи в слой хранения, могут применяться для считывания из слоя хранения.

В одном из вариантов осуществления ячейка энергонезависимой памяти содержит немагнитный слой между слоем хранения и пьезомагнитным слоем для предотвращения обменного смещения между слоем хранения и пьезомагнитным слоем. Если между слоем хранения и пьезомагнитным слоем существует обменное смещение, при удалении деформации, созданной в пьезомагнитном слое для записи в слой хранения, направление намагниченности в слое хранения также изменится. Таким образом, введение немагнитного слоя между слоем хранения и пьезомагнитным слоем обеспечивает возможность снятия напряжения с ячейки NVM без потери данных, хранящихся в слое хранения.

В одном из вариантов осуществления антиперовскитный пьезомагнитный материал имеет температуру Нееля (T_H), превышающую 350 К при деформации ±30%, предпочтительно ±10%, наиболее предпочтительно ±1. Это значит, что антиперовскитный пьезомагнитный материал будет сохранять свои пьезомагнитные свойства при обычных рабочих температурах ячейки энергонезависимой памяти и не будет требовать наличия, например, каких-либо специальных охлаждающих установок для обеспечения того, что материал не нагреется выше температуры Нееля и, вследствие этого, не превратится в парамагнетик.

В одном из вариантов осуществления антиперовскитный пьезомагнитный материал представляет собой материал на основе Mn_3SnN (например, $Mn_{3-x}A_xSn_{1-y}B_yN_{1-z}$, где A и B представляют собой один или более элементов, выбранных из списка, включающего в себя Ag, Al, Au, Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Ir, Ni, Pd, Pt, Rh, Sb, Si, Sn, Zn). Mn_3SnN представляет собой материал, который, как было обнаружено, имеет температуру Нееля, равную примерно 475 К, а также значительное изменение в наведенной намагниченности при небольшом изменении деформации, и может, таким образом, обеспечивать высокую степень надежности.

В одном из вариантов осуществления первый тип воздействия заключается в том, что пьезомагнитный слой находится в парамагнитном состоянии, и между слоем хранения и пьезомагнитным слоем отсутствует какое-либо взаимодействие с обменным смещением, что позволяет менять направление намагниченности слоя хранения посредством внешнего магнитного поля, а второй тип воздействия заключается во взаимодействии с обменным смещением, при котором пьезомагнитный материал находится в антиферромагнитном состоянии так, что направление намагниченности слоя хранения оказывается закрепленным посредством пьезомагнитного слоя. Внешнее магнитное поле может представлять собой переключаемое поле, наложенное глобально ко всему массиву или локально к каждому биту, или постоянное поперечное поле, вызывающее прецессионное переключение намагниченности. В данном варианте осуществления к ячейке энергонезависимой памяти применяется вновь обнаруженное свойство антиперовскитных пьезомагнитных материалов, заключающееся в том, что они демонстрируют изменение температуры Нееля вместе с деформацией. Это позволяет, в случае когда антиперовскитный пьезомагнитный материал является парамагнетиком, менять направление намагниченности слоя хранения. Далее, деформация, наложенная на пьезомагнитный материал, сбрасывается, возвращая антиперовскитный пьезомагнитный материал в антиферромагнитное состояние, при котором он закрепляет направление намагниченности слоя хранения за счет взаимодействия с обменным смещением. В результате, направление намагниченности в слое хранения сохраняется даже в случае, когда к ячейке памяти не прикладывается напряжение. Таким образом, такая ячейка памяти является энергонезависимой, обладает высокой степенью устойчивости к тепловым флуктуациям или внешним магнитным полям и не требует высокого уровня энергопотребления.

В одном из вариантов осуществления пьезомагнитный материал имеет температуру Нееля, которая варьируется в зависимости от деформации, причем температура Нееля проходит значение 293 К, если деформация варьируется от +30 до -30%, предпочтительно от +10 до -10%, наиболее предпочтительно от +1 до -1%. Это означает, что устройство может работать при обычных температурах окружающей среды, при этом необходимость в нагревании или охлаждении (например, в HAMR) для корректного функционирования ячейки NVM отсутствует.

В одном из вариантов осуществления антиперовскитный пьезомагнитный материал представляет собой материал на основе Mn_3GaN или Mn_3NiN, например, $Mn_{3-x}A_xGa_{1-y}B_yN_{1-z}$, или $Mn_{3-x}A_xNi_{1-y}B_yN_{1-z}$, где A и B представляют собой один или более элементов, выбранных из списка, включающего в себя Ag, Al, Au, Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Ir, Ni, Pd, Pt, Rh, Sb, Si, Sn, Zn. Было обнаружено, что некоторые из этих материалов демонстрируют изменение температуры Нееля, которая варьируется в зависимости от деформации, причем температура Нееля переходит значение 293 К, если деформация варьируется от +1 до -1%, а также демонстрируют значительное изменение температуры Нееля в указанном диапазоне деформации, тем самым, обеспечивая возможность более простого управления процессом записи в слой хранения.

В одном из вариантов осуществления ячейка энергонезависимой памяти содержит по меньшей мере один дополнительный электрод, расположенный рядом со слоем хранения для наведения глобального

или локального зависящего от времени магнитного поля для изменения направления намагниченности слоя хранения. В одном из вариантов осуществления дополнительный слой имеет постоянную намагниченность, перпендикулярную к намагниченности слоя хранения, для обеспечения прецессионного переключения намагниченности слоя хранения, когда она открепляется на половину периода прецессии. Этот дополнительный механизм является предпочтительном в варианте осуществления, в котором пьезомагнитный материал становится парамагнетиком во время процедуры записи для открепления слоя хранения. Единственный источник прикладываемого магнитного поля может быть использован для записи данных во множество ячеек памяти.

В предпочтительном варианте осуществления вызывающий деформацию слой представляет собой пьезоэлектрический слой. Благодаря этому возможно быстрое переключение между различными скоростями деформации и высокая износостойкость.

В одном из вариантов осуществления вызывающий деформацию слой представляет собой перовскитный материал. Данный признак является преимущественным, поскольку в этом случае возможно уменьшение рассогласования параметров решетки между вызывающим деформацию слоем и пьезомагнитным слоем. При сниженном рассогласовании параметров решетки в пьезомагнитном слое может возникать как деформация растяжения, так и деформация сжатия за счет вызывающего деформацию слоя, при этом любая остаточная деформация в пьезомагнитном слое уменьшается, если вызывающий деформацию слой не задействуется (то есть в связи с рассогласованием параметров решетки). Этот признак является преимущественным, поскольку он повышает механическую устойчивость и износостойкость ячейки памяти.

В одном из вариантов осуществления рассогласование параметров решетки между слоем хранения и пьезомагнитным слоем и/или между пьезомагнитным слоем и вызывающим деформацию слоем меньше 1%. Это повышает износостойкость устройства и в случае низкого рассогласования между пьезомагнитным слоем и вызывающим деформацию слоем позволяет вызывать в пьезомагнитном слое как деформацию растяжения, так и деформацию сжатия и, тем самым, обеспечивает возможность выполнения операций записи в первом типе варианта осуществления. В случае когда ячейка энергонезависимой памяти является частью двух- или трехмерного массива ячеек памяти, небольшое рассогласование параметров решетки обеспечивает возможность построения больших массивов, которые в противном случае будут иметь неприемлемые уровни деформации.

В одном из вариантов осуществления слой хранения представляет собой перовскитный слой. Данный признак является преимущественным, поскольку рассогласование параметров решетки между смежными перовскитными и антиперовскитными слоями обеспечивает незначительное рассогласование параметров решетки между слоями с вытекающими из этого преимуществами, упомянутыми выше.

В одном из вариантов осуществления ячейка энергонезависимой памяти дополнительно содержит первый электрод, соединенный со слоем хранения на стороне, противоположной пьезомагнитному слою; и второй электрод, соединенный с вызывающим деформацию слоем на стороне, противоположной пьезомагнитному слою. В результате, энергонезависимая память может быть считана и записана с помощью только этих двух электродов и без необходимости наличия транзистора в каждой ячейке массива. Таким образом, ячейка NVM является легко адресуемой. В двухмерном массиве к отдельным ячейкам памяти могут обращаться первый и второй электроды, совместно используемые другими ячейками массива.

В одном из вариантов осуществления предусмотрен двух- или трехмерный массив ячеек памяти, содержащий множество ячеек энергонезависимой памяти согласно настоящему изобретению. Ячейки памяти согласно настоящему изобретению идеально подходят для внедрения в двух- или трехмерный массив, поскольку, особенно при построении с низким рассогласованием параметров решетки между слоями, напряжения не возникают, так как большее количество ячеек памяти формируются смежно друг с другом как в боковом, так и в вертикальном направлении. Размер каждой ячейки памяти является небольшим, при этом необходимость наличия только двух электродов для выполнения функций считывания и записи означает возможность получения высокой плотности памяти.

В одном из вариантов осуществления предусмотрен способ записи данных и считывания данных из ячейки энергонезависимой памяти, содержащей слой хранения и антиперовскитный пьезомагнитный слой, причем способ содержит этапы, на которых наводят поляризацию в первом или втором направлении в слое хранения для записи, тем самым, данных в ячейку памяти, причем поляризация слоя хранения в первом направлении вызывает первое магнитное состояние в антиперовскитном пьезомагнитном слое, а поляризация слоя хранения во втором направлении вызывает второе магнитное состояние в антиперовскитном пьезомагнитном слое, и измеряют магнитоемкость ячейки памяти, причем магнитоемкость антиперовскитного пьезомагнитного слоя в первом магнитном состоянии отличается от его магнитоемкости во втором магнитном состоянии, что обеспечивает возможность считывания данных, хранящихся в слое хранения.

Таким образом, информация, хранящаяся в слое хранения, может быть считана с использованием только двух электродов и без необходимости наличия транзистора и без перезаписи данных, хранящихся в памяти. Это невозможно обеспечить без антиперовскитного пьезомагнитного слоя, поскольку емкость общего ферроэлектрического конденсатора симметрична относительно ориентации его электрической

поляризации. То есть магнитоемкость бита памяти при измерении в полностью компенсированном антиферромагнитном состоянии или парамагнитном состоянии антиперовскитного пьезомагнитного слоя является такой же независимо от направления ферроэлектрической поляризации. И наоборот, для слабого антиферромагнитного состояния антиперовскитного пьезомагнитного слоя магнитоемкость варьируется в зависимости от ориентации ферроэлектрической поляризации, которая влияет на размер намагниченности в пьезомагнитном слое. Это связано с фрустрированным магнетизмом антиперовскитного пьезомагнитного материала, усиливающим так называемую магнитоупругую связь.

В одном из вариантов осуществления измерение предусматривает приложение переменного напряжения к слою хранения и антиперовскитному слою и определение реактивного сопротивления и соответственно магнитоемкости ячейки памяти. В одном из вариантов осуществления измерение предусматривает определение сдвига в резонансной частоте ячейки памяти.

В одном из вариантов осуществления слой хранения состоит из ферромагнитного материала, а поляризация представляет собой магнитную поляризацию, то есть намагниченность.

В одном из вариантов осуществления наведение осуществляют путем наведения намагниченности в антиперовскитном пьезомагнитном слое, достаточно сильной для выравнивания магнитной поляризации слоя хранения с намагниченностью антиперовскитного пьезомагнитного слоя через биполярную связь. Таким образом, антиперовскитный пьезомагнитный материал имеет две функции, которые обеспечивают возможность считывания ячейки памяти, а также возможность ее использования в операции записи для наведения поляризации в слое хранения. Это значит, что только два электрода необходимы для осуществления и функции считывания, и функции записи и это без необходимости наличия транзистора, который потребляет электроэнергию и занимает место.

В одном из вариантов осуществления энергонезависимая память дополнительно содержит вызывающий деформацию слой, при этом наведение намагниченности в антиперовскитном пьезомагнитном слое обеспечивается путем создания деформации в антиперовскитном пьезомагнитном слое с использованием вызывающего деформацию слоя. Таким образом, за счет приложения разности потенциалов к вызывающему деформацию слою (который может представлять собой пьезоэлектрический материал) в антиперовскитном пьезомагнитном слое может быть создана деформация. Деформация в антиперовскитном пьезомагнитном слое приводит к созданию магнитной спиновой поляризации в антиперовскитном пьезомагнитном слое. Таким образом, магнитная спиновая поляризация в антиперовскитном пьезомагнитном слое наводит намагниченность в слое хранения, например, за счет биполярной связи.

В одном из вариантов осуществления наведение предусматривает наведение намагниченности в слое хранения с использованием электрода намагниченности. Такой электрод намагниченности может быть использован для наведения поляризации в первом или втором направлении в слое хранения множества ячеек энергонезависимой памяти.

В одном из вариантов осуществления наведение дополнительно предусматривает создание деформации в антиперовскитном пьезомагнитном слое для преобразования, тем самым, антиперовскитного пьезомагнитного слоя в парамагнетик. В данном варианте осуществления антиперовскитный пьезомагнитный слой используется в качестве переключателя для обеспечения возможности записи в слой хранения или недопущения записи в слой хранения. Таким образом, в сочетании с внешне приложенным магнитным полем может быть получена система считывания и записи данных в ячейку энергонезависимой памяти.

В одном из вариантов осуществления ячейка энергонезависимой памяти дополнительно содержит вызывающий деформацию слой, при этом создание деформации реализуется посредством вызывающего деформацию слоя. Таким образом, за счет приложения разности потенциалов к вызывающему деформацию слою (который может представлять собой пьезоэлектрический материал) в антиперовскитном пьезомагнитном слое может быть создана деформация. Данный эффект может быть использован для преобразования антиперовскитного пьезомагнитного слоя из антиферромагнитного материала в парамагнитный материал. Такой переключатель имеет быстрое время реакции и продолжительный срок действия и может быть использован для закрепления и открепления поляризации в слое хранения.

В одном из вариантов осуществления слой хранения состоит из ферроэлектрического материала, а поляризация представляет собой электрическую поляризацию. В данном варианте осуществления ячейка энергонезависимой памяти содержит первый электрод, соединенный с антиперовскитным пьезомагнитным слоем на стороне, противоположной слою хранения, и второй электрод, соединенный со слоем хранения на стороне, противоположной антиперовскитному пьезомагнитному слою, причем наведение предусматривает приложение разности потенциалов к первому и второму электродам, а измерение предусматривает измерение магнитоемкости между первым и вторым электродами. Такое устройство является очень простым и компактным и может функционировать внутри массива без транзисторов.

Краткое описание чертежей

Далее исключительно в качестве примера раскрыты различные варианты осуществления настоящего изобретения со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых изображено следующее.

на фиг. 1 схематично показана решетка и магнитная структура антиперовскитного пьезомагнитного материала;

на фиг. 2 показан график деформации вдоль оси x в зависимости от наведенной результирующей намагниченности вдоль оси y для выбора различных антиперовскитных пьезомагнитных материалов;

на фиг. 3 представлен график деформации вдоль оси x в зависимости от температуры Нееля (температура Нееля при нулевой деформации) в Кельвинах вдоль оси y для выбора различных антиперовскитных пьезомагнитных материалов;

на фиг. 4 представлен график экспериментально определенных результатов для Mn_3NiN - температура Нееля и намагниченности насыщения на оси y в зависимости от деформации вокруг оси c на оси x с намагниченностью насыщения на основе M-H петель при 100 K;

на фиг. 5 представлен график, иллюстрирующий эффект магнитоемкости гетероструктуры $Mn_3GaN/Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3/SrRuO_3$ на подложке $(LaAlO_3)_{0,3}(Sr_2TaAlO_6)$ при комнатной температуре;

на фиг. 6 в поперечном сечении показана структурная схема ячейки энергонезависимой магнитной памяти согласно первому варианту осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 7 в поперечном сечении показана структурная схема ячейки энергонезависимой магнитной памяти согласно второму варианту осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 8 в поперечном сечении показана структурная схема ячейки энергонезависимой электрической памяти согласно третьему варианту осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 9 в аксонометрии схематично показан двухмерный массив магнитной памяти согласно одному из вариантов осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 10 пояснен процесс записи в двухмерный массив памяти согласно первому варианту осуществления (который также применим в отношении двухмерного массива памяти согласно третьему варианту осуществления);

на фиг. 11 пояснен процесс записи в двухмерный массив согласно второму варианту осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 12 пояснен процесс считывания из двухмерного массива памяти согласно всем трем вариантам осуществления настоящего изобретения;

на фиг. 13 в аксонометрии схематично показан трехмерный массив магнитной памяти согласно одному из вариантов осуществления настоящего изобретения.

В настоящем изобретении используются свойства антиперовскитов на основе марганца (Mn). Известно, что эти материалы демонстрируют пьезомагнитный эффект. Пьезомагнитный эффект состоит в изменении намагниченности в результате приложения напряжения, проявляющегося в слабом антиферромагнитном состоянии антиперовскитов на основе марганца (Mn).

На фиг. 1a показана структура антиперовскита на основе марганца (Mn) в недеформированном состоянии, при котором отсутствует результирующая намагниченность. На фиг. 1b показан случай, при котором прикладывается деформация растяжения, при этом имеется наведенная результирующая намагниченность, встречно параллельная к направлению [110], а на фиг. 1c показан случай, при котором создается деформация сжатия, которая вызывает результирующую намагниченность, параллельную направлению [110]. Как показано на чертежах, при приложении деформации растяжения или сжатия наводится результирующая магнитная спиновая поляризация (то есть намагниченность). Направление магнитной спиновой поляризации является противоположным для деформации растяжения и деформации сжатия.

На фиг. 2 показан график двуосной деформации решетки в процентах вдоль оси x и наведенной намагниченности вдоль оси y. На фиг. 2 изменение наведенной намагниченности отражено на графике для четырех различных типов антиперовскитного материала на основе марганца (Mn). Как можно видеть, наибольшее изменение в магнитном поле с деформацией происходит для Mn_3SnN, причем следующим самым чувствительным материалом является Mn_3NiN, за которым следуют Mn_3InN и далее Mn_3GaN. Также показана температура Нееля при нулевом проценте деформации, экспериментально наблюдаемой для объемной формы этих материалов. Выше температуры Нееля материалы становятся парамагнетиками, а не антиферромагнетиками, и поэтому эффект изменения магнитной спиновой поляризации вместе с созданной деформацией не наблюдается. Результаты, показанные на фиг. 2, представляют собой результаты моделирования, которые были подтверждены экспериментально для Mn_3NiN (см. фиг. 4, на которой показана температура Нееля и намагниченность насыщения по оси y в зависимости от деформации вокруг оси c вдоль оси x с намагниченностью насыщения на основе петель M-H при 100 K).

Авторами настоящего изобретения было обнаружено, что температура Нееля антиперовскитов на основе марганца (Mn) существенно меняется с созданной деформацией. Чувствительность температуры Нееля к созданной деформации показана на фиг. 3, где деформация отражена на графике вдоль оси x, а отклонение температуры Нееля от ее значения при нулевой деформации в Кельвинах - вдоль оси y для трех различных антиперовскитов на основе марганца (Mn). Результаты, представленные на фиг. 3, основаны на теоретических вычислениях, которые, как известно, завышают температуру Нееля (с использованием приближения среднего поля KKR-DLM (квантовый механический код, разработанный, главным образом, профессором Дж. Б. Стаунтон (J.B. Staunton) в Уорикском университете)). Хотя значения температуры в Кельвинах не отражают то, что обнаружено экспериментально, вариации температуры Нееля указывают на то, что наблюдается экспериментально. Как можно видеть, и Mn_3NiN, и Mn_3GaN имеют температуру Нееля, примерно равную температуре окружающей среды (при нулевом проценте деформа-

ции температура Нееля равна 240 К (как видно на фиг. 4) и 300 К соответственно, как определено экспериментально). Изменение деформации антиперовскита на основе марганца (Mn) может быть использовано для изменения свойств антиперовскита на основе марганца (Mn) с пьезомагнитного (ниже температуры Нееля) на парамагнитное (выше температуры Нееля). Результаты зависимости температуры Нееля и наведенной намагниченности от деформации в Mn_3NiN были подтверждены экспериментально (фиг. 4).

На фиг. 5 показан измеренный эффект магнитоемкости гетероструктуры $Mn_3GaN/Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3/SrRuO_3$ на подложке $(LaAlO_3)_{0,3}(Sr_2TaAlO_6)_{0,7}$ при комнатной температуре. Эффект магнитоемкости более 1400% под воздействием магнитного поля в 7Т был получен путем приложения смещения постоянным током 1,5 В между нижним электродом ($SrRuO_3$) и верхним электродом из золота (Au). Изменение емкости $Ba_{0,75}Sr_{0,25}TiO_3$ происходит в результате поверхностной деформации, вызванной (обратным) пьезомагнитным эффектом слоя из Mn_3GaN под действием магнитного поля. Следует отметить, что эффект магнитоемкости намного меньше при смещении постоянным током в 0 В по сравнению с эффектом магнитоемкости при смещении постоянным током в 1,5 В. Большая магнитоемкость усиливает механизм считывания.

Авторами настоящего изобретения были разработаны ячейки NVM на основе проиллюстрированного на фиг. 1-5 понимания свойств антиперовскитов на основе марганца (Mn).

В первом и втором вариантах осуществления ячейка энергонезависимой памяти использует свойства антиперовскитного пьезомагнитного материала на основе марганца (Mn), проиллюстрированного на фиг. 2-5. На фиг. 6 и 7 в поперечном сечении показана структурная схема ячеек энергонезависимой магнитной памяти согласно первому и второму вариантам осуществления настоящего изобретения. Ячейки NVM содержат слой 10 хранения, в который записываются данные. Слой 10 хранения может состоять из ферромагнитного материала. При этом данные записываются в виде направления намагниченности.

Также предусмотрен пьезомагнитный слой 20. Пьезомагнитный слой 20 состоит из антиперовскитного пьезомагнитного материала, предпочтительно антиперовскитного пьезомагнитного материала на основе марганца (Mn). В зависимости от деформации в пьезомагнитном слое 20 пьезомагнитный слой 20 выборочно имеет первый тип воздействия на слой 10 хранения (например, под действием деформации сжатия или растяжения) и второй тип воздействия на слой 10 хранения (например, под действием низкой или в отсутствие деформации растяжения или деформации сжатия).

Вызывающий деформацию слой 30 предусмотрен для создания деформации в пьезомагнитном слое 20 и переключения, тем самым, с первого типа воздействия на второй тип воздействия.

Первый электрод 50 предусмотрен на стороне слоя 10 хранения, противоположной пьезомагнитному слою 20. Второй электрод 60 предусмотрен на стороне вызывающего деформацию слоя 30, противоположной пьезомагнитному слою 20. Слои 20, 30 и 60 образуют плоский конденсатор, который демонстрирует эффект магнитоемкости, используемый для считывания сохраненной информации без разрушения с помощью лишь электрических средств (как раскрыто ниже).

За счет приложения напряжения к первому и второму электродам 50, 60, в вызывающем деформацию слое 30 может быть создана деформация. Деформация, вызванная разностью потенциалов через первый и второй электроды 50, 60 в вызывающем деформацию слое 30, передается в пьезомагнитный слой 20. Как показано на фиг. 2-5, создание деформации в пьезомагнитном слое 20 меняет свойство пьезомагнитного слоя 20 с точки зрения его намагниченности и/или с точки зрения его температуры Нееля. Изменение свойства пьезомагнитного слоя 20 воздействует (например, первый тип воздействия) на слой 10 хранения, причем данное воздействие отличается от воздействия (например, второго типа воздействия), зависящего от деформации в пьезомагнитном слое 20.

В одном из вариантов осуществления пьезомагнитный слой 20 выращивается так, что ориентация (001) выравнивается перпендикулярно к плоскости вызывающего деформацию слоя 30 и слоя 10 хранения. Это обеспечивает хороший эпитаксиальный рост, формирование магнитной структуры, показанной на фиг. 1, высокую механическую устойчивость, небольшое рассогласование параметров решетки с ферромагнитным слоем 30 и максимальное изменение свойства (намагниченности в первом варианте осуществления или температуры Нееля во втором варианте осуществления) для заданной деформации в плоскости.

Вызывающий деформацию слой 30 может представлять собой пьезоэлектрический материал, например ферроэлектрический материал. В одном из вариантов осуществления вызывающий деформацию слой 30 имеет перовскитную или антиперовскитную структуру. Например, вызывающий деформацию слой может представлять собой $(Ba/Sr)TiO_3$ материал. Наличие перовскитной структуры может быть преимущественным, поскольку она позволяет получить явно выраженную границу раздела и сильную упругую связь между вызывающим деформацию слоем 30 и пьезомагнитным слоем 20. Чистая граница раздела кристаллической структуры приводит к длительному сроку службы ячейки энергонезависимой памяти и значительной передаче деформации, созданной в вызывающем деформацию слое 30, в пьезомагнитный слой 20. В частности, в случае с первым вариантом осуществления небольшое рассогласование параметров решетки между вызывающим деформацию слоем 30 и пьезомагнитным слоем 20 является желательным. Это связано с тем, что, если между первым и вторым электродами 50, 60 не прикладывается разность потенциалов, желательно, чтобы в пьезомагнитном слое 20 отсутствовала какая-либо

деформация или имелась очень небольшая деформация. Если разность потенциалов не приложена, имеется нулевая намагниченность (или небольшая намагниченность, наведенная посредством спонтанной электрической поляризации смежного ферроэлектрического вызывающего деформацию слоя, или остаточная деформация, возникающая в результате рассогласования параметров решетки между вызывающим деформацию слоем 30 и пьезомагнитным слоем 20) пьезомагнитного слоя 20, причем желательно иметь как можно более низкую намагниченность в пьезомагнитном слое 20 в первом варианте осуществления настоящего изобретения, если между первым и вторым электродами 50, 60 не прикладывается разность потенциалов. Любое рассогласование между вызывающим деформацию слоем 30 и пьезомагнитным слоем 20 может привести к деформации в пьезомагнитном слое 20, когда нулевая разность потенциалов прикладывается между первым и вторым электродами 50, 60. До тех пор пока в пьезомагнитном слое 20 при нулевой разности потенциалов между первым и вторым электродами 50, 60 имеется какая-либо намагниченность, в слое 10 хранения допустимо наличие магнитного поля, которое меньше коэрцитивного поля слоя 10 хранения.

Постоянная решетки вызывающего деформацию слоя 30 и пьезомагнитного слоя 20 (и между другими слоями) может быть отрегулирована путем изменения условий роста и состава (как раскрыто ниже). Благодаря этому можно отрегулировать рассогласование параметров решетки между различными слоями. Желательно, чтобы рассогласование параметров решетки между слоем 10 хранения и пьезомагнитным слоем 20 и/или между пьезомагнитным слоем 20 и вызывающим деформацию слоем 30 и/или между первым или вторым электродом 50/60 и его смежным слоем было менее 1%, более предпочтительно менее 0,5%. Это не только приводит к получению устройства с продолжительным сроком службы и к другим желательным свойствам, раскрытым в других разделах настоящего описания, но также означает, что возможно построение двух- или даже трехмерного массива ячеек памяти, проходящего в боковом и вертикальном направлениях, который имеет высокую степень устойчивости.

Далее, со ссылкой на фиг. 6 подробно описано функционирование первого варианта осуществления настоящего изобретения. Вариант осуществления с фиг. 6 использует принцип, проиллюстрированный на фиг. 2. То есть для записи данных в слой 10 хранения, между первым и вторым электродами 50, 60 прикладывают разность потенциалов в конкретном направлении для сжатия или расширения вызывающего деформацию слоя 30 и, тем самым, создания деформации сжатия или растяжения в пьезомагнитном слое 20. После создания деформации в пьезомагнитном слое 20 в пьезомагнитном слое 20 возникает намагниченность в направлении, зависящем от того, является ли деформация растягивающей или сжимающей. За счет биполярной связи между пьезомагнитным слоем 20 и слоем 20 хранения спонтанная намагниченность слоя 10 хранения переключится в соответствии с направлением намагниченности пьезомагнитного слоя 20 при первом типе воздействия. В результате, направление намагниченности в слое 10 хранения может меняться путем приложения положительной или отрицательной разности потенциалов между первым и вторым электродами 50, 60.

После снятия разности потенциалов между первым и вторым электродами 50, 60, вызывающий деформацию слой 30 возвращается в свою исходную форму, и деформация в пьезомагнитном слое 20 также возвращается к своему исходному уровню (близкому к нулю, в частности, если имеется небольшое рассогласование параметров решетки между пьезомагнитным слоем 20 и вызывающим деформацию слоем 30). В результате, в пьезомагнитном слое не остается намагниченности после снятия разности потенциалов между первым и вторым электродами 50, 60.

С пренебрежительно малой намагниченностью в пьезомагнитном слое 20, и если допустить, что между пьезомагнитным слоем 20 и слоем 10 хранения отсутствует эффект обменного смещения, намагниченность слоя 10 хранения остается фиксированной благодаря магнитной анизотропии (коэрцитивное поле) ферромагнитного слоя хранения (при условии отсутствия внешнего магнитного поля), и это является вторым типом воздействия.

В одном из вариантов осуществления для предотвращения обменного смещения между пьезомагнитным слоем 20 и слоем 10 хранения (металлический) немагнитный слой 15 может быть предусмотрен между слоем 10 хранения и пьезомагнитным слоем 20. Немагнитный слой 15 может быть относительно тонким (порядка нескольких нанометров). Для такого тонкого слоя постоянная решетки материала будет совпадать с постоянной решетки для смежных слоев (пьезомагнитного слоя 20 и слоя 10 хранения) так, что в присутствии немагнитного слоя 15 деформация не будет возникать. Немагнитный слой 15 препятствует обменному смещению между слоем 10 хранения и пьезомагнитным слоем 20. Предотвращение обменного смещения между этими двумя слоями означает, что при снятии намагниченности в пьезомагнитном слое 20 намагниченность в слое 10 хранения не меняется.

Даже если в пьезомагнитном слое 20 остается небольшая намагниченность после снятия разности потенциалов между первым и вторым электродами 50, 60, при условии что магнитное поле, действующее на слой 10 хранения и возникающее в результате намагниченности слоя 20, меньше коэрцитивного поля слоя 10 хранения, намагниченность слоя 10 хранения не меняется. Таким образом, в первом варианте осуществления настоящего изобретения используется магнитная анизотропия (комбинация магнитокристаллической анизотропии и анизотропии форм) ферромагнитного материала слоя 10 хранения. Боковые размеры каждого бита памяти меньше типовых размеров магнитных доменов, благодаря чему допускает-

ся, что слой 10 хранения находится в единственном состоянии домена, при котором коэрцитивные поля определяются посредством магнитной анизотропии.

Для изменения данных (направления намагниченности), хранящихся в слое 10 хранения, между первым и вторым электродами 50, 60 прикладывается разность потенциалов, противоположная по направлению ранее приложенной разности потенциалов. Это приводит к созданию противоположной деформации относительно деформации растяжения или сжатия в вызывающем деформацию слое 30 и, тем самым, в пьезомагнитном слое 20, в результате чего развивается противоположная по направлению намагниченность. Таким образом, за счет биполярной связи происходит изменение направления намагниченности в слое 10 хранения.

В первом варианте осуществления предпочтительный антиперовскитный пьезомагнитный материал представляет собой Mn_3SnN или материал на основе Mn_3SnN, поскольку, как показано на фиг. 2, данный материал демонстрирует наибольшее изменение наведенного магнитного поля с изменением деформации. Материал может быть оптимизирован для того, чтобы иметь желаемый параметр решетки и пьезомагнитные свойства за счет изменения его химического состава, например $Mn_{3-x}A_xSn_{1-y}B_yN_{1-z}$, где A и B представляют собой один или более элементов, выбранных из списка, включающего в себя Ag, Al, Au, Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Ir, Ni, Pd, Pt, Rh, Sb, Si, Sn, Zn. Он также может быть получен из другого антиперовскита, отличного от Mn_3SnN. В целом он может представлять собой любой материал с пьезомагнитизмом при комнатной температуре и подходящим рассогласованием параметров решетки с другими слоями.

В одном из вариантов осуществления пьезомагнитный слой 20 контактирует с поверхностью вызывающего деформацию слоя 30. В одном из вариантов осуществления немагнитный слой 15 контактирует с пьезомагнитным слоем 20. В одном из вариантов осуществления слой 10 хранения контактирует с немагнитным слоем 15. В одном из вариантов осуществления первый электрод 15 контактирует со слоем 10 хранения. В одном из вариантов осуществления второй электрод 60 контактирует с вызывающим деформацию слоем 30.

В одном из вариантов осуществления слой 10 хранения представляет собой перовскитный или антиперовскитный материал, например Co_3FeN. Вызывающий деформацию слой 30 может быть сформирован на электроде, который сам выполнен на подложке, например подложке из MgO, $SrTiO_3$, $Nb:SrTiO_3$ или Si. В одном из вариантов осуществления, подложка имеет параметры решетки, которые совпадают с параметрами решетки электрода и вызывающего деформацию слоя 30. В одном из вариантов осуществления подложка (например, $Nb:SrTiO_3$ или легированный Si), на которой возможно наращивание слоев, может быть использована в качестве электрода, при этом отпадает необходимость в отдельном электроде.

Первый электрод 50 может быть изготовлен из металла или проводящего перовскита, такого как $Nb:SrTiO_3$ или $SrRuO_3$. Второй электрод 60 может быть изготовлен из $Nb:SrTiO_3$ или $SrRuO_3$.

Для считывания данных, хранящихся в слое 10 хранения, используется эффект магнитоемкости. Еще одно свойство антиперовскитных пьезомагнитных материалов состоит в том, что их жесткость меняется под действием магнитного поля, присутствующего в них, благодаря магнитоупругой связи. Наличие намагниченности в слое 10 хранения приводит к созданию магнитного поля в пьезомагнитном слое 20 даже при нулевой деформации. Магнитное поле в пьезомагнитном слое 20 приводит к изменению упругости пьезомагнитного слоя 20 по сравнению со случаем, если магнитное поле в пьезомагнитном слое 20 отсутствует. Изменение упругости пьезомагнитного слоя 20 может быть измерено в виде изменения магнитоемкости конденсатора, образованного слоями 20, 30 и 60. Изменение магнитоемкости является асимметричным, а это значит, что измеренная емкость отличается для двух противоположных ориентаций намагниченности в слое 10 хранения. Таким образом, измеряя магнитоемкость конденсатора, образованного слоями 20, 30 и 60, можно определить направление намагниченности в слое 10 хранения. В результате, за счет измерения магнитоемкости между первым и вторым электродами 50, 60 можно определить направление намагниченности в слое 10 хранения.

Один из способов измерения магнитоемкости между первым и вторым электродами 50, 60 предусматривает приложение переменного напряжения между первым и вторым электродами 50, 60 и измерение реакции (реактивного сопротивления). Это будет дополнительно пояснено далее со ссылкой на фиг. 10.

Таким образом, имея только два электрода, можно осуществить как запись на слой 10 хранения, так и считывание со слоя 10 хранения без необходимости наличия транзистора и без необходимости наличия третьего или большего количества электродов. Этот признак является целесообразным, поскольку в этом случае возможны конструкции с двух- или трехмерной памятью, содержащие множество ячеек энергонезависимой памяти согласно настоящему изобретению, которые являются особо компактными и имеют простую конструкцию.

Далее, со ссылкой на фиг. 7 раскрыт второй вариант осуществления настоящего изобретения. Второй вариант осуществления аналогичен первому варианту осуществления, за исключением следующих признаков.

Второй вариант осуществления основывается на поведении пьезомагнитного слоя 20, проиллюст-

рированном на фиг. 3-5. То есть свойство пьезомагнитного слоя 20 меняется с антиферромагнитного поведения (второй тип воздействия) на парамагнитное поведение (первый тип воздействия) путем создания в нем деформации (и изменения, тем самым, температуры Нееля до значения ниже температуры, которую имеет пьезомагнитный слой 20). Во втором варианте осуществления немагнитный слой 15, присутствующий в первом варианте осуществления, исключен из структуры. В результате, между слоем 10 хранения и пьезомагнитным слоем 20 существует обменное смещение, когда пьезомагнитный слой является антиферромагнитным (например, когда между первым и вторым электродами 50, 60 не прикладывается разность потенциалов).

Когда между первым и вторым электродами 50, 60 прикладывается разность потенциалов, деформация, созданная вызывающим деформацию слоем 30, в пьезомагнитном слое 20 способствует снижению температуры Нееля пьезомагнитного слоя 20 так, что антиперовскитный пьезомагнитный слой 20 становится парамагнетиком. Когда пьезомагнитный слой 20 является парамагнетиком, между пьезомагнитным слоем 20 и слоем 10 хранения не существует обменного смещения. Однако, когда пьезомагнитный слой 20 является антиферромагнитным (например, после исчезновения разности потенциалов), между пьезомагнитным слоем 20 и слоем 10 хранения имеется обменное смещение. Если между пьезомагнитным слоем 20 и слоем 10 хранения существует обменное смещение, направление намагниченности слоя 10 хранения фиксируется, даже если имеется магнитное поле, которое сильнее коэрцитивного поля. Слой 20 может зафиксировать намагниченность слоя 10 по меньшей мере в двух различных направлениях, в зависимости от магнитного состояния слоя 10, имеющегося в случае, когда слой 20 становится антиферромагнитным.

Таким образом, во втором варианте осуществления между первым и вторым слоями 50, 60 прикладывается разность потенциалов для создания деформации в пьезомагнитном слое 20 (через вызывающий деформацию слой 20) для изменения свойств пьезомагнитного слоя 20 между слабым антиферромагнетиком и парамагнетиком. Когда пьезомагнитный слой 20 является парамагнетиком, можно поменять направление намагниченности в слое 10 хранения. Это можно обеспечить, например, с помощью внешнего магнитного поля. Для этого может быть, например, предусмотрен по меньшей мере один дополнительный электрод 70, индуцирующий магнитное поле, или перпендикулярно намагниченный слой 70. Отдельные дополнительные электроды 70 могут действовать глобально в отношении двух или более ячеек памяти или локально в отношении единственной ячейки памяти. Альтернативно, может быть введен дополнительный слой с постоянной намагниченностью, перпендикулярной к намагниченности слоя 10 хранения, для обеспечения прецессионного переключения намагниченности слоя 10 хранения, когда она становится незакрепленной в течение половины ее периода прецессии. Этот дополнительный механизм является предпочтительным в варианте, когда пьезомагнитный материал 20 становится парамагнетиком во время процедуры записи для открепления слоя 10 хранения. Благодаря наведению магнитного поля в слое 10 хранения с использованием электрода 70 направление намагниченности слоя 10 хранения может быть изменено. После изменения направления намагниченности в слое 10 хранения для записи, таким образом, данных в слой 10 хранения разность потенциалов между первым и вторым электродами 50, 60 снимается. В результате, температура Нееля пьезомагнитного слоя 20 становится выше температуры окружающей среды так, что пьезомагнитный слой действует как антиферромагнетик. Когда пьезомагнитный слой 20 действует как антиферромагнетик, направление намагниченности (в данном случае магнитная спиновая поляризация) слоя 10 хранения фиксируется благодаря взаимодействию с обменным смещением между пьезомагнитным слоем 20 и слоем 10 хранения. Таким образом, даже если электрод 70 намагниченности используется для записи информации в смежную ячейку энергонезависимой памяти и магнитное поле проходит в слой 10 хранения рассматриваемой ячейки памяти, направление намагниченности слоя 10 хранения рассматриваемой ячейки памяти меняться не будет.

Во втором варианте осуществления данные считываются из ячейки энергонезависимой памяти так же, как и в первом варианте осуществления с использованием эффекта магнитоемкости. Однако в данном случае направление намагниченности в слое хранения меняется на обратное в результате приложения деформации ниже T_H к слою 20, причем после изменения направления в слое 10 хранения, прикладывают быстрый импульс деформации для преобразования пьезомагнитного слоя 20 в парамагнетик и, тем самым, переустанавливают направление закрепления без изменения нового направления намагниченности слоя 10 хранения.

Во втором варианте осуществления наиболее предпочтительным антиперовскитным пьезомагнитным материалом является Mn_3GaN или Mn_3NiN или материалы на основе Mn_3GaN и Mn_3NiN, такие как $Mn_{3-x}A_xSn_{1-y}B_yN_{1-z}$ или $Mn_{3-x}A_xNi_{1-y}ByN_{1-z}$,. где A и B представляют собой один или более элементов, выбранных из списка, включающего в себя Ag, Al, Au, Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Ir, Ni, Pd, Pt, Rh, Sb, Si, Sn, Zn, так как данные материалы имеют температуру Нееля при нулевой деформации, приблизительно равную температуре окружающей среды и температуре, при которой функционирует память. Предпочтительно пьезомагнитный материал имеет температуру Нееля, которая меняется в зависимости от деформации, причем температура Нееля переходит через значение 293 К, если деформация варьируется от +30 до 30%, предпочтительно +10 до -10%, наиболее предпочтительно от +1 до -1%. В случае применения такого материала необязательно нагревать или охлаждать ячейку энергонезависимой памяти, поскольку из-

менение температуры Нееля может быть обеспечено при температуре окружающей среды.

Далее, со ссылкой на фиг. 8 описан третий вариант осуществления настоящего изобретения. Третий вариант осуществления аналогичен первому и второму вариантам осуществления, за исключением следующих признаков. В третьем варианте осуществления ячейка энергонезависимой памяти содержит точно такие же слои, что и ячейка согласно второму варианту осуществления, за исключением слоев 10 и 70, которые являются необязательными. Взамен информация сохраняется в ферроэлектрическом слое 30.

В третьем варианте осуществления слой хранения представляет собой ферроэлектрический слой 30 (как и в первом и втором вариантах осуществления, однако дополнительное пьезоэлектрическое свойство уже не требуется), в который записываются данные в виде направления электрической поляризации. Данные могут быть записаны в ячейку энергонезависимой памяти путем приложения разности потенциалов между первым и вторым электродами 50, 60. Благодаря этому возможно переключение электрической поляризации в ферроэлектрическом слое 30 в зависимости от полярности приложенной разности потенциалов. Электрическая поляризация будет оставаться даже после снятия разности потенциалов между первым и вторым электродами 50, 60 благодаря электрическому гистерезису ферроэлектрического материала.

Электрическая поляризация в ферроэлектрическом слое 30 наводит магнитный момент в пьезомагнитном слое 20. Магнитный момент приводит к изменению магнитоемкости конденсатора, образованного слоями 20, 30 и 60, которая может быть измерена таким же способом, что и в первом и втором вариантах осуществления. Как и в первом и втором вариантах осуществления, определенная магнитоемкость может соотноситься с направлением поляризации (электрической в случае третьего варианта осуществления). В результате, возможно считывание данных, хранящихся в слое 30 хранения.

Считывание и запись битов памяти в N-рядном квадратном массиве с перекрестной геометрией могут быть реализованы без разрушения и в отсутствие транзистора на каждом бите после выполнения тех же этапов, что и в первом и втором вариантах осуществления, как раскрыто далее со ссылкой на фиг. 9-12.

Все варианты осуществления настоящего изобретения сопротивляются усталости конструкции и могут быть в десятки раз лучше в этом отношении, чем типовая флэш-память. Первый и второй варианты осуществления обладают даже большим сопротивлением к усталости конструкции по сравнению с третьим вариантом осуществления.

В третьем варианте осуществления ферроэлектрический слой 30 может контактировать с пьезомагнитным слоем 20. В одном из вариантов осуществления ферроэлектрический слой 30 выполнен из перовскитного ферроэлектрического материала (например, $PbTiO_3$, $SrTiO_3$, $BaTiO_3$, $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, $Ba(Zr_xTi_{1-x})TiO_3$). Пьезомагнитный слой 20 может быть изготовлен из любого антиперовскитного материала на основе марганца (Mn), например Mn_3SnN, Mn_3GaN или Mn_3NiN или материалов на основе Mn_3SnN, Mn_3GaN или Mn_3NiN, раскрытых выше.

Ячейки энергонезависимой памяти согласно настоящему изобретению имеют преимущество, состоящее в простом их внедрении в двух- или трехмерные массивы.

На фиг. 9 в аксонометрии схематично показан двухмерный массив ячеек магнитной памяти согласно настоящему изобретению. Как можно видеть, множество ячеек энергонезависимой памяти согласно первому или второму варианту осуществления расположены в виде двухмерного массива. Первый и второй электроды 50, 60 выполнены в форме полос. Множество первых и вторых электродов проходит в ортогональных направлениях, причем каждый электрод соединен с множеством ячеек памяти, проходящих вдоль длины электрода 50, 60. Такими образом, каждая ячейка памяти адресуется индивидуально путем приложения разности потенциалов между электродами 50, проходящими в первом направлении, и вторыми электродами 60, проходящими в ортогональном направлении, как раскрыто выше для каждого варианта осуществления (на фиг. 10 и 11 подробно показана разность потенциалов, прикладываемая в первом и третьем вариантах осуществления и втором варианте осуществления соответственно). Благодаря этому может быть собрана плотноупакованная двухмерная энергонезависимая память, в которой отдельные ячейки памяти адресуются индивидуально и в которой отсутствует необходимость в транзисторах для считывания или записи данных в отдельные ячейки памяти.

Как объяснено выше, в первом варианте осуществления намагниченность слоя 10 хранения остается заблокированной коэрцитивным полем, параллельным (состояние 1) или встречно параллельным (состояние 0) относительно небольшой намагниченности пьезомагнитного слоя 20. Каждое состояние выравнивания приводит к другому магнитному состоянию пьезомагнитного слоя 20 и, тем самым, к другим упругим свойствам, которые могут быть обнаружены путем измерения магнитоемкости. Такой механизм записи обеспечивает возможность адресации индивидуальных битов, встроенных в N-рядный квадратный массив, в котором каждый бит соединен с одним из N верхних проводов и с одним из N нижних проводов. Верхний и нижний наборы проводов перпендикулярны друг другу (перекрестная геометрия), как раскрыто на фиг. 9. На фиг. 10 показано, как записать состояние бита памяти ячейки памяти согласно первому варианту осуществления (такие же принципы применимы в отношении третьего варианта осуществления, но с другой слоистой структурой). Электрические потенциалы постоянного тока $V_{верх}$ и V_3 прикладываются к верхним и нижним проводам, контактирующим с представляющей интерес ячейкой

памяти соответственно. Меньший потенциал постоянного тока (например, $V_{верх}/3$) прикладывается к остальным верхним проводам, при этом, например, $2\times V_{верх}/3$ прикладывается к остальным нижним проводам. Это приводит к большому напряжению ($V_{верх}$, где $V_3=0$ и представляет собой напряжение земли) в представляющем интерес бите памяти, которое создает деформацию в пьезомагнитном слое 20, которая, в свою очередь, наводит намагниченность, достаточно большую для преодоления коэрцитивного поля слоя 10 хранения, и переключает его намагниченность. Все другие отдельные ячейки памяти массива подвергаются воздействию напряжения, которое составляет только третью часть ($2\times V_{верх}/3-V_{верх}/3=V_{верх}/3$) переключающего напряжения ($V_{верх}$), так что их состояние не меняется (напряжение ниже порогового значения, заданного посредством коэрцитивного поля).

Для считывания информации, как показано на фиг. 12, небольшое напряжение переменного тока прикладывается к пластинам конденсатора (пьезомагнитному слою 20 и нижнему контактному слою 60), которое не является достаточно большим для создания деформации, способной менять магнитное состояние слоя 10 хранения, но также позволяет измерить реактивное сопротивление и, таким образом, емкость бита памяти. Емкость зависит от относительной электрической проницаемости и размеров изоляционного вызывающего деформацию слоя 30, которая, в свою очередь, зависит от упругих свойств пьезомагнитного слоя 20, зависящих от ориентации намагниченности в слое 10 хранения (или 30 в сценарии 3). Этот механизм считывания обеспечивает возможность адресации индивидуальных битов, интегрированных в N-рядный квадратный массив, раскрытый выше. Для считывания бита массива напряжение переменного тока прикладывается к верхним и нижним проводам, контактирующим с релевантным битом памяти, а напряжение переменного тока с противоположной фазой прикладывается ко всем проводам, не контактирующим с релевантным битом памяти. Таким образом, в любой момент времени напряжение в любом бите, соединенном с теми же самыми проводами, что и релевантный бит памяти, равняется нулю, а напряжение в любом другом бите имеет такой же размер, но противоположную полярность, что и напряжение в представляющем интерес бите памяти. Таким образом, емкость представляющего интерес бита памяти может быть считана без воздействия на него сигнала от других битов, соединенных с теми же самыми проводами, и без воздействия на состояние памяти любого бита (считывание без разрушения).

Альтернативно, разница магнитоемкости между двумя магнитными состояниями пьезомагнитного слоя может быть определена в виде смещения резонансной частоты контура, где единственная ячейка памяти представляет собой конденсатор, а индуктор представляет собой блок управления, внешний относительно массива памяти.

Для записи состояния конкретного бита памяти согласно второму варианту осуществления в N-рядном квадратном массиве с перекрестной геометрией, раскрытой выше, электрические потенциалы постоянного тока $V_{верх}$ и V_3 прикладываются к верхним и нижним проводам, контактирующим с конкретным битом памяти соответственно, как показано на фиг. 11. Противоположное напряжение прикладывается ко всем проводам, не контактирующим с конкретным битом памяти ($V_{верх}$ к нижним проводам и V_3 к верхним проводам). Это приводит к большому напряжению ($V_{верх}$ - V_3) в конкретном бите памяти, которое вызывает деформацию в пьезомагнитном слое 20, преобразующую данный слой в парамагнетик, вследствие чего конкретный бит памяти может быть записан посредством внешнего магнитного поля (не показанного на фиг. 11). Все другие биты памяти массива подвергаются воздействию нулевого напряжения или такого же напряжения с противоположной полярностью ($V_3-V_{верх}$), в результате чего температура Нееля становится даже выше температуры окружающей среды, а намагниченность их слоя хранения фиксируется.

Считывание в N-рядном квадратном массиве согласно второму варианту осуществления происходит так же, как и в первом и третьем вариантах осуществления, как раскрыто со ссылкой на фиг. 12.

В третьем варианте осуществления считывание реализуется путем приложения напряжения постоянного тока, как и в случае первого варианта осуществления. Однако в этом случае напряжение должно быть достаточно большим, чтобы изменять ферроэлектрическую поляризацию выбранного бита между первым и вторым направлениями в ферроэлектрическом слое 30 для записи, тем самым, данных в ячейку памяти, причем ферроэлектрическая поляризация ферроэлектрического слоя 30 в первом направлении вызывает первое магнитное состояние в антиперовскитном пьезомагнитном слое 20, а ферроэлектрическая поляризация ферроэлектрического слоя 30 во втором направлении вызывает второе магнитное состояние в антиперовскитном пьезомагнитном слое 20; напряжение, прикладываемое к остальным битам, является недостаточным для переключения их электрической поляризации; напряжение затем снимается, что не влияет на ферроэлектрическую поляризацию. Способ считывания содержит этапы, на которых напряжение переменного тока прикладывают к двухмерному массиву памяти, как в первом типе согласно варианту осуществления, проиллюстрированному на фиг. 12, для измерения магнитоемкости выбранной ячейки памяти, причем напряжение, прикладываемое в любой момент времени к остальным ячейкам, соединенным с теми же самыми проводами, равняется нулю. Магнитоемкость выбранного бита памяти в первом магнитном состоянии отличается от магнитоемкости во втором магнитном состоянии пьезомагнитного слоя, благодаря чему возможно считывание данных, хранящихся в слое хранения.

Для всех вариантов осуществления из-за небольшого рассогласования параметров решетки между отдельными слоями можно построить трехмерный массив памяти с использованием похожих принципов, при которых электроды между слоями памяти используются для адресации ячеек памяти с обеих сторон этого электрода. Для обеспечения возможности получения электродов, проходящих в направлении x-y, ширина слоев в направлениях x и y уменьшается с высотой. Такая память показана схематично на фиг. 13.

Также возможны другие компоновки двух- и трехмерных массивов, подпадающие под объем защиты настоящего изобретения.

Множество слоев данного устройства могут быть изготовлены с использованием любого способа осаждения тонкой пленки, оптимизированного для требуемых слоев. Например, возможно использование импульсного лазерного осаждения (PLD, от англ. Pulsed Laser Deposition). Далее приведены примерные условия выращивания для каждой тонкой пленки.

Этап 1. Выбор и очистка подложки.

В качестве подложки может быть использована любая подходящая оксидная подложка (например, MgO, $SrTiO_3$, $Nb:SrTiO_3$, $(LaAlO_3)_{0,3}(Sr_2TaAlO_6)_{0,7}$) или Si. Перед выращиванием подложку очищают с помощью стандартной процедуры очистки растворителем. Стандартная процедура очистки растворителем может представлять собой трехминутную процедуру очистки в ультразвуковой ванне с ацетоном, далее изопропанолом и, наконец, дистиллированной водой с просушкой потоком N_2 после каждого этапа с растворителем. В одном варианте осуществления подложка может стать нижним электродом 60.

Этап 2. Многослойное наращивание (PLD и магнетронное распыление).

Осаждение тонких пленок осуществляется с помощью PLD с использованием эксимерного лазера на фтористом криптоне (KrF) (λ=248 нм). Стехиометрические однофазные мишени $SrRuO_3$, $Nb:SrTiO_3$, $BaTiO_3$, $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, $BaZr_xTi_{1-x}O_3$, Mn_3SnN и Mn_3GaN соответственно подвергаются абляции посредством лазера с плавностью 0,8 Дж/см^2 при 10 Гц.

Слой 1. Второй электрод 60 - тонкая пленка из $SrRuO_3$ толщиной 100 нм выращивается при 700-780°C под действием парциального давления O_2 в 50-300 мТорр. После осаждения выращенную пленку затем на месте ("in-situ") подвергают постотжигу в течение 20 мин при температуре выращивания под действием парциального давления O_2 в 600 Торр. Далее, образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин под действием парциального давления O_2 в 600 Торр.

Или тонкая пленка из $Nb:SrTiO_3$ толщиной 100 нм, выращенная при температуре 700°C под действием парциального давления O_2 от 0 до 60 мТорр. После выращивания, образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин под действием парциального давления O_2 в 600 Торр.

Слой 2. Пьезоэлектрический материал вызывающего деформацию слоя 30 - тонкая пленка из $BaTiO_3$ ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ или $BaZr_xTi_{1-x}O_3$) толщиной 100 нм выращивается при температуре 750-800°C под действием парциального давления O_2 в 150-300 Торр. После выращивания образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин под действием парциального давления O_2 в 600 Торр.

Слой 3. Пьезомагнитный слой 20 из Mn_3XN, где X - это любой подходящий элемент, например тонкая пленка из Mn_3SnN толщиной 100 нм выращивается при температуре 300-550°C под действием парциального давления N_2 в 0-12 мТорр. После выращивания образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин под действием парциального давления N_2 в 0-12 мТорр.

Или пленка из Mn_3GaN толщиной 100 нм, выращенная при температуре 300-550°C под действием парциального давления N_2 в 0-12 мТорр. После выращивания образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин под действием парциального давления N_2 в 0-12 мТорр.

Разделительный слой (только для варианта осуществления № 1). Перовскитный парамагнетик немагнитного слоя 15 - тонкая пленка из платины (Pt) толщиной 1~2 нм наращивается на образец (состоящий из подложки, слоев 60, 30 и 20) посредством магнетронного распыления. Образец нагревают до 800°C в сверхглубоком вакууме и отжигают в течение 1 ч. Платиновая тонкая пленка осаждается при мощности постоянного тока 100 Вт. После наращивания образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин в условиях вакуума.

Слой 4. Ферромагнитный материал слоя 10 хранения - тонкая пленка из Co_3FeN толщиной 20-50 нм выращивается при температуре 300-500°C посредством RF магнетронного распыления из Co_3Fe мишени в атмосфере смеси газов $Ar+N_2$ под давлением 5-20 мТорр, в которой объемная концентрация газа N_2 находится в диапазоне 5-15%. После выращивания образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин.

Слой 5. Первый электрод 50 - металл толщиной 100 нм (например, Pt, Au) или проводящая перовскитная тонкая пленка (например, $SrRuO_3$, $Nb:SrTiO_3$).

Платиновая (Pt) тонкая пленка толщиной 100 нм выращивается посредством DC магнетронного распыления. Образец нагревают до 800°C в сверхглубоком вакууме и отжигают в течение 1 ч. Осаждение платиновой (Pt) тонкой пленки происходит при мощности постоянного тока 100 Вт. После выращивания образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин в условиях вакуума.

Или тонкая пленка из $SrRuO_3$ толщиной 100 нм выращивается при 700-780°C под действием парциального давления O_2 в 50-300 мТорр. После осаждения выращенную пленку затем на месте ("in-situ")

подвергают постотжигу в течение 20 мин при температуре выращивания под действием парциального давления O_2 в 600 Торр. Далее, образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин под действием парциального давления O_2 в 600 Торр.

Или тонкая пленка из $Nb:SrTiO_3$ толщиной 100 нм, выращенная при температуре 700°C под действием парциального давления O_2 от 0 до 60 мТорр. После выращивания образец охлаждают до комнатной температуры со скоростью 10°C/мин под действием парциального давления O_2 в 600 Торр.

Этап 3. Фотолитография.

Стандартный процесс фотолитографии осуществляется для наложения рисунка массива. Для двухмерных устройств все слои могут быть осаждены, после чего на них может быть нанесен рисунок. Для трехмерных складываемых устройств рисунок на каждый слой ячейки памяти должен быть нанесен до осаждения следующего слоя.

Этап 4. Травление.

На данном этапе осуществляют стандартный процесс аргоново-ионного травления для удаления материала и переноса рисунка с фотолитографии на образец или применяют любую другую подходящую технологию химического или физического травления.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Ячейка энергонезависимой памяти, содержащая

слой хранения, состоящий из ферромагнитного материала, выполненный с возможностью записи в него данных в виде направления намагниченности, пьезомагнитный слой, состоящий из антиперовскитного пьезомагнитного материала, выборочно имеющего первый тип воздействия на слой хранения и второй тип воздействия на слой хранения в зависимости от деформации в пьезомагнитном слое; и

вызывающий деформацию слой для создания деформации в пьезомагнитном слое и переключения, тем самым, с первого типа воздействия на второй тип воздействия.

2. Ячейка энергонезависимой памяти по п.1, отличающаяся тем, что первый тип воздействия заключается в том, что результирующая намагниченность пьезомагнитного слоя является достаточно сильной для преодоления коэрцитивного поля в слое хранения и для выравнивания намагниченности слоя хранения с намагниченностью пьезомагнитного слоя через биполярную связь, а второй тип воздействия заключается в том, что любое магнитное поле в слое хранения из-за намагниченности пьезомагнитного слоя меньше коэрцитивного поля слоя хранения.

3. Ячейка энергонезависимой памяти по п.1 или 2, отличающаяся тем, что она дополнительно содержит немагнитный слой между слоем хранения и пьезомагнитным слоем для предотвращения обменного смещения между слоем хранения и пьезомагнитным слоем.

4. Ячейка энергонезависимой памяти по любому из пп.1-3, отличающаяся тем, что антиперовскитный материал имеет температуру Нееля, превышающую 350 К при деформации ±30%, предпочтительно ±10%, наиболее предпочтительно ±1%.

5. Ячейка энергонезависимой памяти по любому из пп.1-4, отличающаяся тем, что антиперовскитный пьезомагнитный материал представляет собой Mn_3SnN или основанный на Mn_3SnN материал, такой как $Mn_{3-x}A_xSn_{1-y}B_yN_{1-z}$, где A и B представляют собой один или более элементов, выбранных из списка, включающего в себя Ag, Al, Au, Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Ir, Ni, Pd, Pt, Rh, Sb, Si, Sn, Zn.

6. Ячейка энергонезависимой памяти по п.1, отличающаяся тем, что первый тип воздействия заключается в том, что пьезомагнитный слой находится в парамагнитном состоянии, а между слоем хранения и пьезомагнитным слоем отсутствует какое-либо взаимодействие с обменным смещением, что позволяет менять направление намагниченности слоя хранения посредством внешнего магнитного поля, а второй тип воздействия заключается во взаимодействии с обменным смещением, при котором пьезомагнитный материал находится в антиферромагнитном состоянии, а направление намагниченности слоя хранения закреплено посредством пьезомагнитного слоя.

7. Ячейка энергонезависимой памяти по п.6, отличающаяся тем, что антиперовскитный пьезомагнитный материал имеет температуру Нееля, которая варьируется в зависимости от деформации, причем температура Нееля переходит значение 293 К, когда деформация варьируется от +30 до -30%, предпочтительно от +10 до -10%, наиболее предпочтительно от +1 до -1%.

8. Ячейка энергонезависимой памяти по п.6 или 7, отличающаяся тем, что антиперовскитный пьезомагнитный материал представляет собой Mn_3GaN или Mn_3NiN или основанный на Mn_3GaN или Mn_3NiN материал, например $Mn_{3-x}A_xGa_{1-y}B_yN_{1-z}$ или $Mn_{3-x}A_xN_{1-y}B_yN_{1-z}$, где A и B представляют собой один или более элементов, выбранных из списка, включающего в себя Ag, Al, Au, Co, Cu, Fe, Ga, Ge, In, Ir, Ni, Pd, Pt, Rh, Sb, Si, Sn, Zn.

9. Ячейка энергонезависимой памяти по любому из пп.6-8, отличающаяся тем, что она дополнительно содержит по меньшей мере один дополнительный электрод для наведения магнитного поля, расположенный рядом со слоем хранения для изменения направления намагниченности слоя хранения.

10. Ячейка энергонезависимой памяти по любому из пп.1-9, отличающаяся тем, что вызывающий деформацию слой представляет собой пьезоэлектрический слой и/или перовскитный материал.

11. Ячейка энергонезависимой памяти по любому из пп.1-10, отличающаяся тем, что рассогласование параметров решетки между слоем хранения и пьезомагнитным слоем и/или между пьезомагнитным слоем и вызывающим деформацию слоем меньше 1%.

12. Ячейка энергонезависимой памяти по любому из пп.1-11, отличающаяся тем, что ферромагнитный слой имеет перовскитную или антиперовскитную структуру.

13. Ячейка энергонезависимой памяти по любому из пп.1-12, отличающаяся тем, что она дополнительно содержит первый электрод, соединенный со слоем хранения на стороне, противоположной пьезомагнитному слою.

14. Ячейка энергонезависимой памяти по любому из пп.1-13, отличающаяся тем, что она дополнительно содержит второй электрод, соединенный с вызывающим деформацию слоем на стороне, противоположной пьезомагнитному слою.

15. Ячейка энергонезависимой памяти по п.13 или 14, отличающаяся тем, что рассогласование параметров решетки между электродом и его смежным слоем составляет 1% или меньше.

16. Энергонезависимая память, содержащая двухмерный массив ячеек памяти по любому из пп.1-15.

17. Энергонезависимая память, содержащая трехмерный массив ячеек памяти по любому из пп.1-15.

18. Способ записи данных и считывания данных из ячейки энергонезависимой памяти по любому из пп.1-15, содержащий этапы, на которых

наводят поляризацию в первом или втором направлении в слое хранения для записи, тем самым, данных в ячейку памяти, причем поляризация слоя хранения в первом направлении вызывает первое магнитное состояние в антиперовскитном пьезомагнитном слое, а поляризация слоя хранения во втором направлении вызывает второе магнитное состояние в антиперовскитном пьезомагнитном слое, и

измеряют магнитоемкость ячейки памяти, причем магнитоемкость антиперовскитного пьезомагнитного слоя в первом магнитном состоянии отличается от его магнитоемкости во втором магнитном состоянии, что обеспечивает возможность считывания данных, хранящихся в слое хранения.

19. Способ по п.18, отличающийся тем, что измерение предусматривает приложение переменного напряжения к слою хранения и антиперовскитному слою и определение реактивного сопротивления и, таким образом, магнитоемкости ячейки памяти.

20. Способ по п.18, отличающийся тем, что измерение предусматривает определение сдвига в резонансной частоте ячейки памяти.

21. Способ по любому из пп.18-20, отличающийся тем, что слой хранения состоит из ферромагнитного материала, а поляризация представляет собой магнитную поляризацию.

22. Способ по п.21, отличающийся тем, что наведение осуществляют путем наведения намагниченности в антиперовскитном пьезомагнитном слое, достаточно сильной для выравнивания магнитной поляризации слоя хранения с намагниченностью антиперовскитного пьезомагнитного слоя через биполярную связь.

23. Способ по п.22, отличающийся тем, что ячейка энергонезависимой памяти дополнительно содержит вызывающий деформацию слой, при этом наведение намагниченности в антиперовскитном пьезомагнитном слое обеспечивают путем создания деформации в антиперовскитном пьезомагнитном слое с использованием вызывающего деформацию слоя.

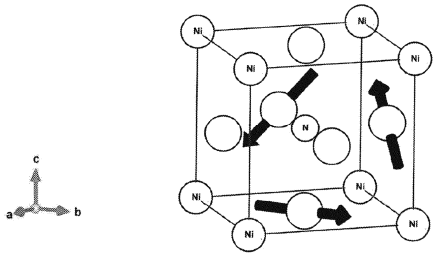
24. Способ по п.21, отличающийся тем, что наведение предусматривает наведение намагниченности в слое хранения с использованием электрода намагниченности.

25. Способ по п.24, отличающийся тем, что наведение дополнительно предусматривает создание деформации в антиперовскитном пьезомагнитном слое для преобразования, тем самым, антиперовскитного пьезомагнитного слоя в парамагнетик.

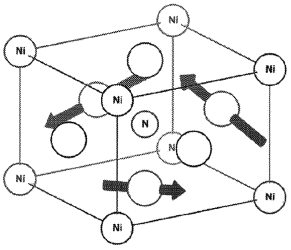
26. Способ по п.25, отличающийся тем, что ячейка энергонезависимой памяти дополнительно содержит вызывающий деформацию слой, при этом создание деформации выполняют посредством вызывающего деформацию слоя.

27. Способ по любому из пп.18-20, отличающийся тем, что слой хранения состоит из ферроэлектрического материала, а поляризация представляет собой электрическую поляризацию.

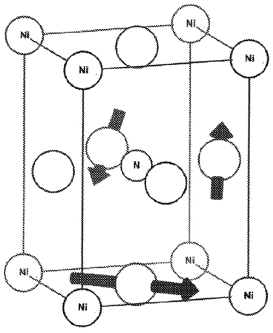
28. Способ по любому из пп.18-20 или 27, отличающийся тем, что ячейка энергонезависимой памяти содержит первый электрод, соединенный с антиперовскитным пьезомагнитным слоем на стороне, противоположной слою хранения, и второй электрод, соединенный со слоем хранения на стороне, противоположной антиперовскитному пьезомагнитному слою, причем наведение предусматривает приложение разности потенциалов к первому и второму электродам, а измерение предусматривает измерение магнитоемкости между первым и вторым электродами.



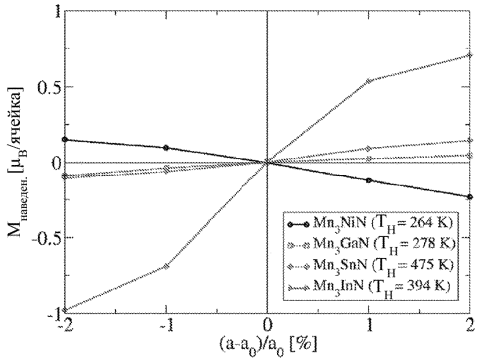
Фиг. 1a



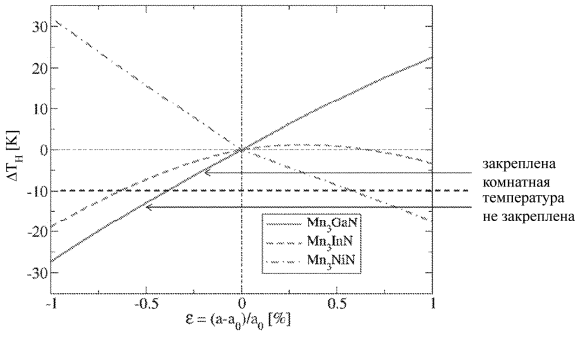
Фиг. 1b



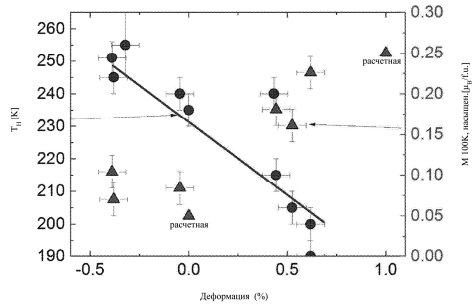
Фиг. 1c



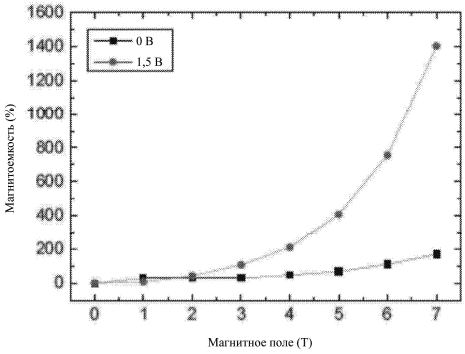
Фиг. 2



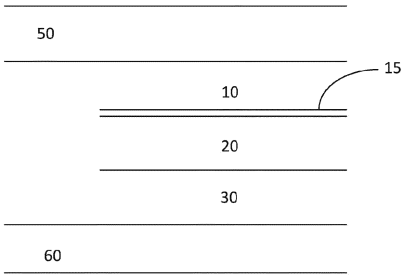
Фиг. 3



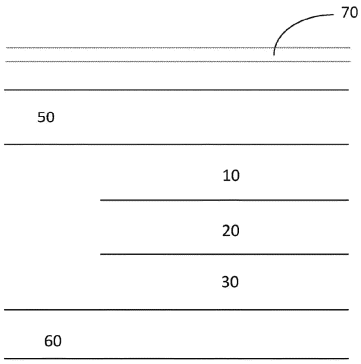
Фиг. 4



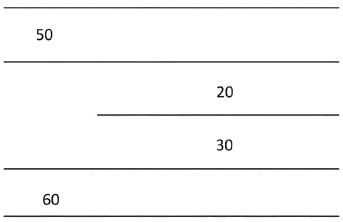
Фиг. 5



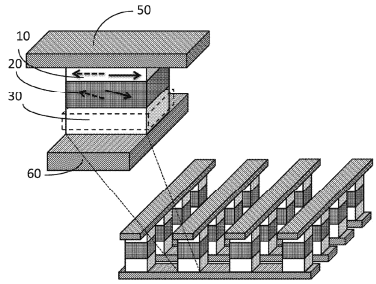
Фиг. 6



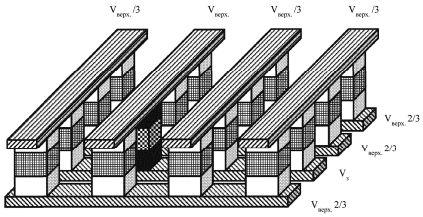
Фиг. 7



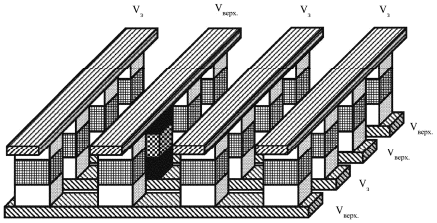
Фиг. 8



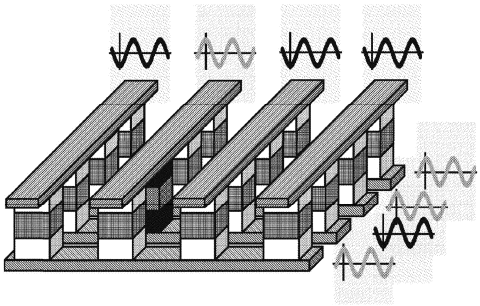
Фиг. 9



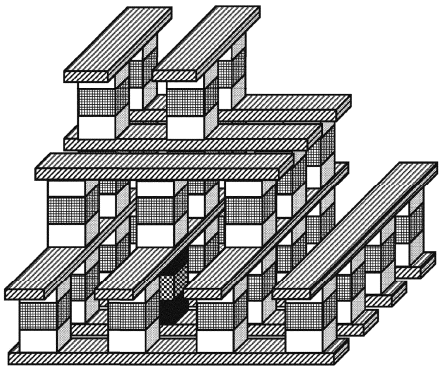
Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12



Фиг. 13