РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 250 518** (13) **C1**

(51) МПК[7] **G 11 C 11/22**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: **2003119443/09, 27.11.2001**

(24) Дата начала действия патента: **27.11.2001**

(30) Приоритет: **27.11.2000 (пп.1-23) NO 20006002**

(45) Опубликовано: **20.04.2005 Бюл. № 11**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **JP 6275062 A, 30.09.1994. RU 2127005 C1, 27.02.1999. US 5666305 A, 09.09.1997. JP 5129622 A, 25.05.1993. US 5592409 A, 07.01.1997. RU 2121174 C1, 27.10.1998.**

(85) Дата перевода заявки PCT на национальную фазу: **27.06.2003**

(86) Заявка PCT:
NO 01/00472 (27.11.2001)

(87) Публикация PCT:
WO 02/43070 (30.05.2002)

Адрес для переписки:
191186, Санкт-Петербург, а/я 230, "АРС-ПАТЕНТ", пат.пов. В.М.Рыбакову

(72) Автор(ы):
НОРДАЛ Пер-Эрик (NO)

(73) Патентообладатель(ли):
ТИН ФИЛМ ЭЛЕКТРОНИКС АСА (NO)

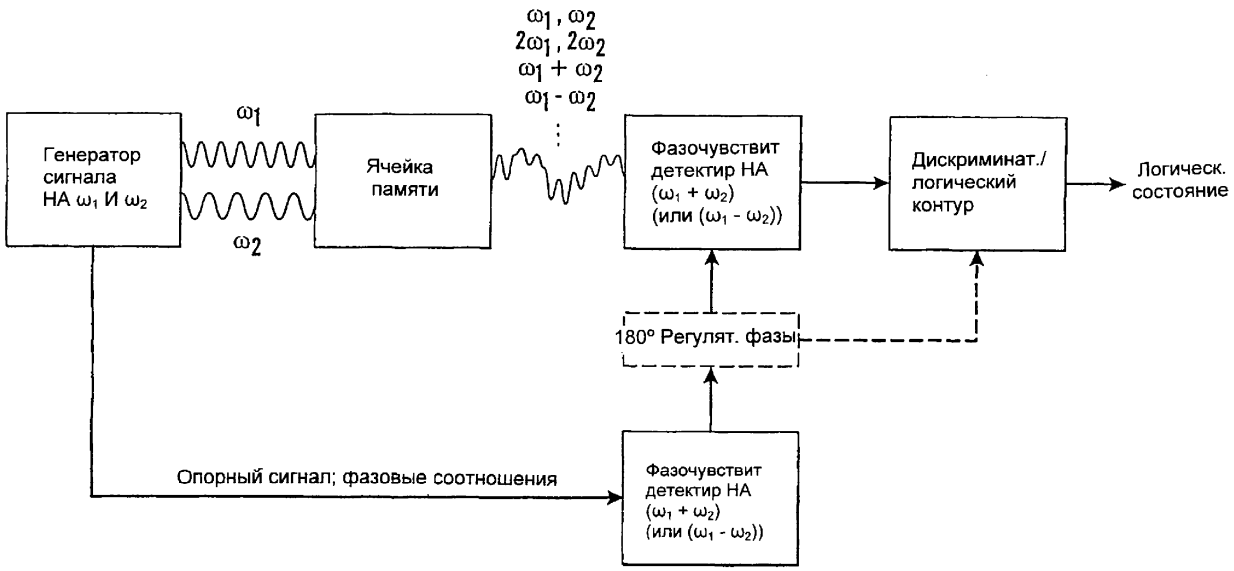
(54) СПОСОБ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ДАННОГО СПОСОБА

(57) Реферат:

Изобретение относится к способу определения логического состояния ячейки памяти в запоминающем устройстве, к устройствам для сопоставления фаз, к неразрушающему считыванию содержимого ячеек памяти, содержащих поляризуемый материал. Техническим результатом является повышение надежности считывания данных из запоминающих устройств, содержащих ячейки с электрически поляризуемой средой, возможность разработки общих процедур и устройств для осуществления бездеструктивного считывания данных. Первое устройство для сопоставления фаз содержит генератор сигнала для подачи двух или более считывающих сигналов с заданными фазами на ячейку памяти, фазочувствительный детектор, источник опорного сигнала, дискриминаторно/логический контур. Второе устройство для сопоставления фаз содержит генератор сигнала для подачи первого периодического считывающего сигнала, наложенного на второй периодически считывающий сигнал меньшей частоты, фазочувствительный детектор/дискриминатор. Способ описывает работу указанных устройств. 3 н. и 20 з.п. ф-лы, 15 ил.

RU 2250518 C1

RU 2250518 C1



ФИГ. 6

RU 2250518 C1

RU 2250518 C1

RUSSIAN FEDERATION

(19) **RU** (11) **2 250 518** (13) **C1**

(51) Int. Cl.[7] **G 11 C 11/22**

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21), (22) Application: **2003119443/09, 27.11.2001**

(24) Effective date for property rights: **27.11.2001**

(30) Priority: **27.11.2000 (cl.1-23) NO 20006002**

(45) Date of publication: **20.04.2005 Bull. 11**

(85) Commencement of national phase: **27.06.2003**

(86) PCT application:
NO 01/00472 (27.11.2001)

(87) PCT publication:
WO 02/43070 (30.05.2002)

Mail address:
191186, Sankt-Peterburg, a/ja 230, "ARS-PATENT", pat.pov. V.M.Rybakovu

(72) Inventor(s):
NORDAL Per-Ehrik (NO)

(73) Proprietor(s):
TIN FILM EhLEKTRONIKS ASA (NO)

(54) METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE DATA READING AND DEVICE FOR REALIZATION OF SAID METHOD

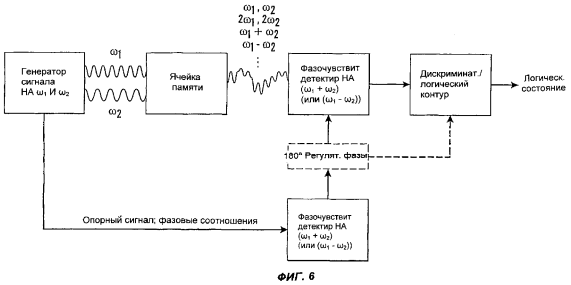
(57) Abstract:

FIELD: memory devices.

SUBSTANCE: first device for comparing phases has signal generator for feeding two or more reading signals with given phases to memory cell, phase-sensitive detector, support signal source, discrimination/logic contour. Second device for comparing phases has signal generator for feeding first periodical signal, applied to second periodically reading signal of lesser frequency, phase-sensitive detector/discriminator. Method describes operation of said devices.

EFFECT: higher reliability.

3 cl, 15 dwg



ФИГ. 6

RU 2250518 C1

RU 2250518 C1

Область техники, к которой относится изобретение

Настоящее изобретение относится к способу определения логического состояния ячейки памяти в запоминающем устройстве. Указанная ячейка хранит данные в форме состояния электрической поляризации конденсатора, содержащего поляризуемый материал. Данный материал способен сохранять неисчезающую электрическую поляризацию в отсутствие внешнего напряжения, прилагаемого к конденсатору, и генерировать ток в качестве отклика на приложенное напряжение. Данный токовый отклик содержит линейный и нелинейный компоненты. Изобретение относится также к первому и второму устройствам для сопоставления фаз при осуществлении способа по настоящему изобретению.

Более конкретно, настоящее изобретение относится к неразрушающему считыванию содержимого ячеек памяти, содержащих поляризуемый материал, обладающий гистерезисом, предпочтительно такой, как известные из уровня техники электретный или ферроэлектрический материалы.

Уровень техники

В последние годы было продемонстрировано хранение данных в электрически поляризуемой среде, состоящей из тонких пленок керамических или полимерных ферроэлектрических материалов. Главное достоинство таких материалов состоит в том, что они сохраняют свою поляризацию без постоянной подачи к ним электрической энергии, т.е. хранение данных является энергонезависимым.

Были созданы запоминающие устройства (устройства хранения данных), принадлежащие двум основным классам, в которых логическое состояние в индивидуальной ячейке памяти представляется направлением вектора поляризации тонкой ферроэлектрической пленки в этой ячейке. В обоих случаях данные записываются в ячейку за счет поляризации пленки в желаемом направлении путем приложения соответственно ориентированного электрического поля, более интенсивного, чем коэрцитивное поле в ферроэлектрике. Однако архитектура устройств имеет фундаментальные различия.

В устройствах, принадлежащих к первому классу, каждая ячейка памяти имеет в своем составе, по меньшей мере, один транзистор. В целом архитектура памяти подобного вида соответствует типу активной матрицы. Ее главным достоинством по сравнению с традиционными устройствами типа SRAM и DRAM является энергонезависимость логического состояния, сохраняемого в ферроэлектрике.

Большой подкласс подобных ферроэлектрических запоминающих устройств, обычно обозначаемых как FeRAM или FRAM (авторские права на этот термин принадлежат фирме Symetrix Corp.), подробно описан в технической и патентной литературе и в настоящее время серийно выпускается рядом фирм в различных странах мира. В своей простейшей форме (архитектура 1T-1C) каждая ячейка памяти FeRAM содержит единственный транзистор и конденсатор, как это показано на фиг.1. Конденсатор содержит ферроэлектрик, который может быть поляризован в одном направлении, соответствующем логическому "0", или в другом направлении, соответствующем логической "1". Запись в данную ячейку памяти, т.е. придание заданного направления поляризации ее ферроэлектрическому конденсатору, производится подачей соответствующих напряжений на управляющую линию (числовую шину), линию данных (разрядную шину) и передающую линию (driveline), обслуживающие данную ячейку. Считывание производится путем отключения линии данных от источника питания и подачи положительного напряжения на передающую линию, тогда как управляющая линия находится под напряжением заданного уровня. В зависимости от направления поляризации в конденсаторе, т.е. от того, хранит ли данная ячейка памяти логический "0" или логическую "1", заряд, переносимый в описываемом процессе к зарядной линии, будет либо значительным, либо малым. Таким образом, логическое состояние ячейки может быть определено путем регистрации значения данного заряда. Поскольку операция считывания является деструктивной, для того чтобы избежать перманентной потери сохранявшейся информации, необходимо затем произвести повторную запись данных.

На различные варианты концепции FeRAM было выдано большое количество патентов,

в том числе патенты США №№5539279, 5530668, 5541872, 5550770, 5572459, 5600587, 5883828. В данных патентах рассматриваются как различные архитектуры, так и материалы; отмечаются также сложные проблемы, которые задерживают практическое использование ферроэлектрических запоминающих устройств с момента их концептуальной разработки несколько десятилетий назад. Так, деструктивный характер считывания в известных запоминающих устройствах способствует развитию усталости в используемых ферроэлектрических материалах, что ограничивает их срок службы и, как следствие, пригодность для широкого класса применений.

В результате интенсивных разработок удалось усовершенствовать и модифицировать некоторые материалы (например, PZT и SBT) таким образом, чтобы они могли выдерживать большое количество циклов переключения (от 10^{10} до 10^{14}), приемлемое для наиболее ответственных применений, и обладали достаточной устойчивостью к помехам. Однако эти оптимизированные материалы требуют отжига при высоких температурах, чувствительны к воздействию водорода и к другим факторам. Как правило, они создают дорогостоящие и сложные проблемы в отношении их использования в крупномасштабном производстве, основанном на хорошо отработанной технологии для устройств на основе кремния. Кроме того, поскольку они требуют термической обработки, эти материалы непригодны для последующего интегрирования в электронные устройства на основе полимеров. Некоторые патенты отражают усилия обойти проблемы дрейфа и допусков на изготовление за счет применения более сложных архитектур. Такие архитектуры могут включать ячейки памяти, содержащие два ферроэлектрических конденсатора и два транзистора (конструкции 2C-2T) для того, чтобы использовать опорные ячейки и контура, а также более сложные импульсные протоколы. В этой связи можно отметить, что все выпускаемые в настоящее время ферроэлектрические запоминающие устройства используют архитектуру 2C-2T. Это связано с тем, что используемые материалы под нагрузкой еще не обладают достаточной стабильностью в отношении времени, температуры и количества циклов подачи напряжения (D.Hadnagy. "Making ferroelectric memories", The Industrial Physicist, pp. 26-28 (December 1999)).

В другом подклассе устройств, использующих один или более транзисторов в каждой ячейке памяти, сопротивление между стоком и истоком транзистора, имеющегося в ячейке, непосредственно или косвенно управляется состоянием поляризации ферроэлектрического конденсатора в той же ячейке. Идея, лежащая в основе такого подхода, не нова (см., например, Noriyoshi Yamauchi. "A metal-insulator-semiconductor (MIS) device using a ferroelectric polymer-thin film in the gate insulator", Jap. J. Appl. Phys., 25, pp. 590-594 (1986); Jun Yu et al. "Formation and characteristics of $Pb(Zr,Ti)O_3$ buffer layer", Appl. Phys. Lett. 70, pp. 490-492 (1997); Si-Bei Xiong and Shigeki Sakai. "Memory properties of $SrBi_2Ta_2O_9$ thin films prepared on SiO_2/Si substrates", Appl. Phys. Lett. 70, pp. 1613-1615 (1999)). В патенте США №5592409 описана энергонезависимая память на базе ферроэлектрической пленки, которая поляризуется в одном или в другом направлении, что соответствует логическим "0" или "1". Поляризованный ферроэлектрик создает смещение на затворе полевого транзистора, обеспечивая тем самым управление током этого транзистора. Очевидное достоинство этого варианта управления состоит в возможности считывания логического состояния ячейки памяти бездеструктивно, т.е. без инвертирования состояния поляризации ферроэлектрического конденсатора.

Схожая концепция описана в патенте США №5070385. Она основана на использовании полупроводникового материала, находящегося в плотном контакте с ферроэлектриком. В этом случае сопротивление полупроводникового материала зависит от состояния поляризации в ферроэлектрике. К сожалению, для всех вышеупомянутых концепций остаются нерешенными очень серьезные проблемы материального и технологического характера (см., например, D.Hadnagy. "Making ferroelectric memories", The Industrial Physicist, pp. 26-28 (December 1999)). Поэтому их промышленное освоение в обозримом будущем представляется сомнительным.

Применительно к обоим рассмотренным подклассам необходимость в одном или более

транзисторах в каждой ячейке представляет серьезный недостаток с точки зрения сложности и снижения плотности записи данных.

В устройствах, относящихся ко второму классу и представляющих особый интерес в контексте изобретения, ячейки памяти используются в пассивной матричной архитектуре, в соответствии с которой два набора взаимно ортогональных электродов формируют наборы конденсатороподобных структур в зонах скрещивания электродов. Как это показано на фиг.2, каждая ячейка памяти может быть сформирована очень просто, с использованием полосковых электродов, которые, скрещиваясь, образуют зону взаимного наложения типа сэндвича на основе поляризуемого материала, заключенного между плоскостями электродов. Возможны также и альтернативные конденсаторные структуры, в которых электрические поля, взаимодействующие с поляризуемым материалом, имеют главные компоненты, направленные параллельно подложке, а не перпендикулярно ей. Подобные "поперечные" архитектуры далее рассматриваться не будут, поскольку конкретный выбор архитектуры ячейки в контексте настоящего изобретения не имеет большого значения.

В соответствии с уровнем техники считывание данных из отдельных ячеек памяти производится путем приложения к материалу каждой интересующей ячейки электрического поля, достаточного для того, чтобы преодолеть эффект гистерезиса и ориентировать электрическую поляризацию в ячейке в направлении электрического поля. Если материал уже был поляризован в этом направлении до приложения к нему поля, никакого инвертирования поляризации не происходит и через ячейку протекает только небольшой кратковременный ток. Однако, если материал был поляризован в противоположном направлении, имеет место инвертирование поляризации, что приводит к протеканию значительно большего кратковременного тока. Таким образом, логическое состояние, т.е. направление электрической поляризации в индивидуальной ячейке памяти, определяется путем приложения к ней электрического поля, напряженность которого достаточна для того, чтобы преодолеть коэрцитивное поле в ферроэлектрике, и детектирования результирующего тока.

По сравнению с устройствами на основе активной матрицы пассивные матричные устройства могут быть изготовлены с намного более высокой плотностью ячеек памяти; при этом сама матричная память является менее сложной. Однако известный процесс считывания из такой матрицы является деструктивным, т.е. приводящим к потере содержимого в ячейке, из которой производится считывание. Как следствие, данные, которые должны быть считаны, необходимо вновь записать в запоминающее устройство, если желательно продолжить сохранение данных. Более серьезным последствием переключения поляризации является усталость, т.е. постепенная потеря способности к переключению поляризации. Как правило, это явление сопровождается необходимостью приложения к ячейке более высокого напряжения для того, чтобы произошло инвертирование поляризации. Усталость ограничивает количество циклов считывания, которое может выдержать конкретная ячейка памяти. Тем самым ограничивается и диапазон применений. Кроме того, усталость приводит к замедлению отклика и к более высоким требованиям к устройству в отношении напряжения. Происходящее при этом постепенное изменение рабочих характеристик для индивидуальной ячейки памяти в конкретном устройстве не может быть предсказано априорно. Поэтому проектирование и эксплуатация должны вестись в расчете на "худший случай", что приводит к неоптимальным режимам.

Предпринимались попытки найти решения, позволяющие производить бездеструктивное считывание из памяти на основе ферроэлектрика при сохранении простой архитектуры ячейки памяти. Так, Бреннан (C.J.Brennan) в патентах США №№5343421; 5309390; 5262983; 5245568; 5151877 и 5140548 описывает ферроэлектрические конденсаторные ячейки и ассоциированные с ними элементарные модули считывания для устройств хранения данных. Путем зондирования емкости с помощью слабых сигналов при одновременном приложении к ферроэлектрику умеренных полей смещения, т.е. полей, которые не приводят к созданию на ячейке памяти во время считывания пиковых

напряжений, превосходящих коэрцитивное поле в ферроэлектрике, производится определение направления спонтанной поляризации в конденсаторе и, как следствие, логического состояния ячейки памяти. Однако для практического применения способов и устройств, описанных в перечисленных патентах, необходимо выполнение весьма специфичных условий, приводящих к явлениям, связанным с накоплением на электродах пространственного заряда. Эти явления непосредственно зависят от материалов, используемых в электродах, а также от примыкающего к ним ферроэлектрика. Считывание данных связано с оценкой пространственного заряда, которая может быть получена в шкале времени, совместимой с указанным накоплением заряда. Кроме того, в перечисленных патентах не объяснено, каким образом следует осуществлять распределение во времени и корреляцию малого сигнала и напряжений смещения относительно друг друга, что имеет первостепенное значение для применения в реальных условиях.

В указанном выше патенте США №5140548 описано устройство, которое не требует подачи напряжения смещения от внешнего источника, формируя внутреннее смещение на основе контактной разности потенциалов между электродами, охватывающими ферроэлектрическое ядро. Это решение, хотя и элегантное в принципе, страдает серьезными недостатками в случае его использования в реальных устройствах. Так, приходится жертвовать предсказуемостью и управляемостью, которые могут быть достигнуты благодаря внешнему источнику смещения, путем перехода к фиксированному смещению, которое явным образом зависит от чистоты используемых материалов и условий их обработки, а также от рабочей температуры. Униполярный и постоянный характер смещения, формируемого как внутреннее, приводит к импринту в ферроэлектрике, хорошо известному и весьма нежелательному явлению в ферроэлектрических запоминающих устройствах. Наконец, фиксированное смещение не представляет большой ценности при использовании корреляционных стратегий, приводимых в данном описании.

Японские патентные публикации JP-A-06275062 и JP-A-05129622 описывают бездеструктивное считывание в пассивном матричном ферроэлектрическом запоминающем устройстве. Состояние поляризации индивидуальной ячейки памяти определяется путем регистрации фазы второй гармоники токового отклика ячейки памяти, возбуждаемой малым периодическим сигналом напряжения. Кроме того, публикация JP-A-06275062 описывает применение напряжения смещения для задания положения рабочей точки на кривой гистерезиса вблизи точки максимальной кривизны для одного из логических состояний, усиливая тем самым амплитуду второй гармоники.

Патент США №5666305 описывает бездеструктивное считывание в пассивной матричной ферроэлектрической памяти путем подачи импульсов возмущающего напряжения на уровне, лежащем существенно ниже коэрцитивного напряжения.

В патенте США №3132326 раскрыто бездеструктивное считывание из ферроэлектрической ячейки памяти, производимое аналогичным образом, с использованием импульсов напряжения, меньших, чем коэрцитивное напряжение, для зондирования токового отклика ячейки памяти.

Патент США №5262982 описывает использование положительного униполярного импульса с одновременным детектированием токового отклика с целью определения среднего наклона кривой гистерезиса справа от оси поляризации с последующей подачей отрицательного униполярного импульса, аналогичным образом зондирующего кривую гистерезиса. После этого определяется разность между результатами, полученными при подаче каждого импульса.

Последние пять названных патентных документов имеют общим то, что все они реализуют бездеструктивное считывание путем подачи считывающего или зондирующего импульса с напряжением, которое существенно меньше, чем коэрцитивное напряжение, а затем основывают определение логического состояния на некотором параметре токового отклика. В одном случае для детектирования используется вторая гармоника отклика. В

целом рассмотренным способам присущи внутренние слабости, касающиеся обеспечения надежного определения логического состояния ячейки памяти, во многом потому, что использование единственного считывающего сигнала не позволит применить более мощный корреляционный метод. Данный метод становится просто обязательным, когда бездеструктивное считывание должно производиться в режиме слабых сигналов.

Наконец, с целью обеспечения более надежного бездеструктивного считывания из ферроэлектрической памяти с пассивной матричной адресацией в патенте США №5530667 предлагается запоминающее устройство с ферроэлектрическим запоминающим материалом, обладающим кривой гистерезиса с нелинейными участками в двух зонах крутого нарастания. Бездеструктивное считывание производится с использованием зондирующего сигнала, не превышающего коэрцитивного напряжения, с подачей этого сигнала в те зоны кривой гистерезиса, которые обнаруживают детектируемую разность емкостной характеристики между двумя реализованными логическими состояниями.

Таким образом, в общем случае и особенно применительно к производству экономически перспективных ферроэлектрических запоминающих устройств с пассивной матричной адресацией существует настоятельная потребность в устройствах и способах, позволяющих производить бездеструктивное считывание из ячеек памяти, которые выполнены в форме конденсаторов с электрически поляризуемым материалом, обладающим гистерезисом, и не содержат активных элементов типа транзисторов. С учетом того, что бездеструктивное считывание из ферроэлектрической памяти с пассивной матричной адресацией должно производиться с помощью считывающих сигналов с напряжением, существенно меньшим коэрцитивного напряжения, и, как правило, в режиме слабых сигналов существует также потребность в более надежных способах бездеструктивного считывания, чем известные способы, в том числе рассмотренные выше.

Сущность изобретения

Таким образом, основная задача, на решение которой направлено настоящее изобретение, состоит в том, чтобы разработать концептуальную основу бездеструктивного считывания данных из запоминающих устройств, содержащих ячейки с электрически поляризуемой средой, особенно с ферроэлектриком.

Другой задачей, решенной изобретением, является обеспечение возможности считывания данных без увеличения усталости и износа, которые сопровождают традиционные методы считывания путем переключения поляризации и которые ограничивают срок службы запоминающих устройств, основанных на ферроэлектриках. Еще одна задача заключается в том, чтобы избавиться от присущей деструктивному считыванию необходимости восстановления содержимого ячеек, из которых производилось считывание. Тем самым будет достигнуто упрощение протокола считывания и используемой аппаратуры.

Дальнейшей задачей, поставленной перед изобретением, является повышение надежности процесса считывания путем использования более одного критерия распознавания для определения логического состояния конкретной ячейки памяти.

Наконец, задачей, решаемой изобретением, является также разработка общих процедур и устройств для осуществления бездеструктивного считывания данных.

Решение перечисленных задач, а также реализация дополнительных свойств и достоинств обеспечено созданием способа по настоящему изобретению. Данный способ характеризуется выполнением следующих операций:

приложение к конденсатору первого изменяющегося во времени напряжения, соответствующего режиму слабых сигналов, амплитуду и/или длительность которого выбирают меньшими, чем это требуется для создания значительных постоянных изменений состояния поляризации конденсатора,

приложение к конденсатору второго изменяющегося во времени напряжения, которое складывается с первым изменяющимся во времени напряжением, причем амплитуду и/или длительность суммы первого и второго напряжений, изменяющихся во времени, выбирают меньшими, чем это требуется для создания значительных постоянных изменений

состояния поляризации конденсатора,

регистрация, по меньшей мере, одной характеристики токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов, имеющей линейную или нелинейную зависимость от первого и/или второго приложенного напряжения, изменяющегося во времени,

проведение корреляционного анализа, основанного на использовании коррелирующих опорных сигналов, сформированных на основе как первого, так и второго изменяющихся во времени напряжений, приложенных к конденсатору,

определение логического состояния путем получения количественной оценки результата указанного корреляционного анализа и

приписывание определенному логическому состоянию логического значения в соответствии с заданным протоколом.

При осуществлении способа по изобретению представляется предпочтительным проводить корреляционный анализ в два этапа. Первый этап предусматривает регистрацию временной корреляции между указанным напряжением, соответствующим режиму слабых сигналов, и, по меньшей мере, одной указанной характеристикой токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов. Эта регистрация проводится для определения значения (значений), по меньшей мере, одного параметра, который характеризует, по меньшей мере, одну указанную характеристику токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов. Второй этап корреляционного анализа предусматривает регистрацию корреляции между указанным, по меньшей мере, одним параметром и значением, знаком и/или фазой второго приложенного напряжения, изменяющегося во времени.

Представляется также предпочтительным в качестве альтернативы проводить корреляционный анализ за один этап, при выполнении которого устанавливают корреляцию между, по меньшей мере, одной указанной характеристикой токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов, и опорным сигналом, сформированным на основе как первого, так и второго изменяющихся во времени напряжений.

Желательно также, чтобы второе изменяющееся во времени напряжение, приложенное к конденсатору, было квазистатическим напряжением произвольной полярности, которое переключают в пределах набора положительных и/или отрицательных значений.

Альтернативно второе изменяющееся во времени напряжение, приложенное к конденсатору, может иметь низкую частоту или медленно изменяющееся значение, например являться синусоидальным напряжением.

В соответствии с одним из предпочтительных вариантов способа в качестве первого изменяющегося во времени напряжения, соответствующего режиму слабых сигналов, выбирают периодическое напряжение с основной компонентой ряда Фурье, имеющей частоту ω. При этом регистрируют фазу компоненты токового отклика на частоте второй гармоники. В данном варианте первый этап корреляционного анализа выполняют с использованием фазы опорного сигнала, сформированного из первого приложенного к конденсатору изменяющегося во времени, предпочтительно синусоидального напряжения, соответствующего режиму слабых сигналов.

В соответствии с другим предпочтительным вариантом способа в качестве изменяющихся во времени напряжений выбирают два периодически изменяющихся сигнала с основными компонентами ряда Фурье, имеющими частоты ω_1 и ω_2. Согласно данному варианту регистрируют фазы компонент токового отклика на суммарной и разностной частотах $\omega_1+\omega_2$ и $\omega_1-\omega_2$ и сопоставляют указанные фазы с опорной фазой. При этом опорную фазу получают из указанных изменяющихся во времени напряжений, приложенных к конденсатору, тогда как указанные компоненты периодически изменяющихся сигналов предпочтительно представляют собой синусоидальные напряжения.

Кроме того, в данном варианте представляется предпочтительным регистрировать фазы

двух или более нелинейных компонент токового отклика на частотах $2\omega_1$, и/или $2\omega_2$, и/или $\omega_1+\omega_2$, и/или $\omega_1-\omega_2$. Затем эти фазы сопоставляют с опорной фазой, полученной из тех же изменяющихся во времени напряжений, приложенных к конденсатору. Альтернативно можно сопоставлять эти фазы с опорной фазой, полученной от опорной ячейки с известным логическим состоянием, к которой приложены такие же напряжения.

Согласно еще одному предпочтительному варианту осуществления способа по изобретению регистрация, по меньшей мере, одной характеристики токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов, предусматривает регистрацию, при двух или более значениях второго изменяющегося во времени напряжения, отношения значения токового отклика, генерируемого в режиме слабых сигналов, на первое изменяющееся во времени напряжение, к значению указанного первого изменяющегося во времени напряжения. Полученное таким образом отношение соответствует наклону кривой гистерезиса.

При этом считается предпочтительным выбрать второе изменяющееся во времени напряжение в виде низкочастотного или медленно изменяющегося напряжения смещения. При этом данное напряжение изменяется в пределах заданного интервала положительных и/или отрицательных значений. В частности, второе изменяющееся во времени напряжение можно выбрать изменяющимся периодически между положительным и отрицательным значениями. В альтернативном варианте это второе изменяющееся во времени напряжение можно выбрать в виде плавно изменяющегося напряжения, перекрывающего интервал напряжений между двумя положительными значениями, или двумя отрицательными значениями, или между положительным и отрицательным значениями. В данном случае второе изменяющееся во времени напряжение может быть синусоидальным и периодически изменяться с частотой, меньшей частоты первого изменяющегося во времени напряжения.

Кроме того, при осуществлении способа по изобретению желательно, чтобы заданный протокол приписывал одно из двух возможных логических состояний в зависимости от полученной количественной оценки.

Решение вышеперечисленных задач и реализация дополнительных свойств и преимуществ обеспечивается также использованием устройства для сопоставления фаз при осуществлении способа по настоящему изобретению. Это устройство характеризуется тем, что содержит:

генератор сигнала для подачи двух или более считывающих сигналов с заданными фазами на ячейку памяти, подключаемую к генератору и формирующую при подаче считывающих сигналов сигнал отклика, имеющий две или более нелинейные токовые компоненты;

фазочувствительный детектор, подключаемый к ячейке памяти и выполненный с возможностью осуществления фазочувствительного детектирования, по меньшей мере, двух фаз в сигнале отклика от ячейки памяти;

источник опорного сигнала, связанный с указанным генератором сигнала и выполненный с возможностью генерирования, на основе суммы и разности фаз входных считывающих сигналов, опорных фазовых сигналов, подаваемых на связанный с ним фазочувствительный детектор для детектирования и коррелирования указанных компонент отклика, а также для проведения сопоставления между фазовыми опорными сигналами и, по меньшей мере, одной детектированной и коррелированной компонентой отклика, и,

по меньшей мере, один дискриминаторно/логический контур, связанный с фазочувствительным детектором для приема его выходного сигнала, выполненный с возможностью определения логического состояния ячейки памяти.

Представляется предпочтительным, чтобы с выходом источника опорного сигнала был связан регулятор фазы, обеспечивающий получение сдвинутого по фазе сигнала с фазой $\omega+\pi$ и подающий указанный сигнал на фазочувствительный детектор и, при необходимости, в дискриминаторно/логический контур.

Наконец, решение вышеперечисленных задач и реализация дополнительных свойств и

преимуществ может быть обеспечено также использованием другого устройства для сопоставления фаз при осуществлении способа по настоящему изобретению. Это альтернативное устройство характеризуется тем, что содержит:

генератор сигнала для подачи первого периодического считывающего сигнала, наложенного на второй периодический считывающий сигнал меньшей частоты, чем первый считывающий сигнал, на ячейку памяти, подключаемую к генератору и формирующую сигнал отклика с частотой, равной двукратной частоте первого считывающего сигнала; и

фазочувствительный детектор/дискриминатор, подключаемый к ячейке памяти для получения от нее сигнала и выполненный с возможностью получения от генератора сигнала опорных фазовых сигналов в форме первого и второго считывающих сигналов, а также коррелирования фазы сигнала отклика с фазой одного или обоих опорных фазовых сигналов, причем

фазочувствительный детектор/дискриминатор выполнен с возможностью определения логического состояния ячейки памяти по значению и/или фазе скоррелированного по фазе сигнала отклика.

Перечень чертежей

Вышеперечисленные задачи, а также дополнительные свойства и преимущества изобретения станут более понятны из нижеследующего подробного описания предпочтительных вариантов изобретения, которое должно рассматриваться совместно с прилагаемыми чертежами.

На фиг.1 представлен пример известной ферроэлектрической ячейки памяти с архитектурой 1T-1C, содержащей, как это было описано выше, один транзистор и один ферроэлектрический конденсатор.

Фиг.2 иллюстрирует матричную структуру с пассивной адресацией, в которой ячейки памяти сформированы в зонах наложения скрещивающихся электродов в форме ортогональной решетки, как это уже было описано выше.

На фиг.3a представлена в общем виде кривая гистерезиса для запоминающего вещества ферроэлектрического типа с выделением некоторых существенных особенностей.

На фиг.3b высокочастотный поляризационный отклик в режиме слабого сигнала представлен как функция предыстории и приложенного напряжения смещения.

На фиг.4a-4d приведены примеры считывания путем детектирования локального наклона кривой, т.е. поляризационного отклика как функции напряжения для ячейки памяти, которая возбуждается в соответствии с изобретением представленным сигналом в виде напряжения.

Фиг.5a иллюстрирует принцип считывания путем детектирования второй гармоники в соответствии с настоящим изобретением.

На фиг.5b представлена блок-схема известного устройства для считывания путем детектирования второй гармоники.

На фиг.6 представлена блок-схема устройства по изобретению, используемого для считывания путем параметрического смешения.

Фиг.7a иллюстрирует принцип считывания, предусматривающий усиление отклика второй гармоники с помощью периодически изменяемых напряжений смещения.

На фиг.7b представлена блок-схема варианта устройства по фиг.5b, используемого для считывания при усилении отклика второй гармоники согласно изобретению.

Фиг.8a иллюстрирует принцип считывания при периодическом модулировании отклика в виде второй гармоники посредством низкочастотного напряжения смещения согласно изобретению.

На фиг.8b представлена блок-схема варианта устройства по фиг.5b, используемого для считывания при периодическом модулировании отклика в виде второй гармоники согласно изобретению.

Сведения, подтверждающие возможность осуществления изобретения

Как было описано выше, известные способы считывания логического состояния,

хранящегося в виде направления поляризации в ферроэлектрическом конденсаторе ячейки памяти, в типичном случае используют один из двух подходов. Первый из них состоит в применении в каждой ячейке памяти микроконтура; в этом случае направление поляризации в конденсаторе ячейки памяти (т.е. ее логическое состояние) определяет смещение на затворе транзистора и, следовательно, ток к считывающему усилителю, связанному с данной ячейкой. Второй подход состоит в приложении к ферроэлектрическому конденсатору напряжения, уровень которого достаточен для того, чтобы произвести инвертирование поляризации в конденсаторе. В зависимости от того, является ли это направление параллельным или антипараллельным приложенному напряжению, поляризация останется неизменной или ее направление изменится на противоположное. Хотя первый подход обеспечивает бездеструктивное считывание, как было показано при анализе уровня техники, с ним связаны серьезные проблемы в отношении как материалов, так и обработки данных. Группа способов, принадлежащих второму подходу, соответствует деструктивному считыванию и требует переключения поляризации, что неизбежно создает проблемы усталости, а также приводит к потере данных.

Как будет описано далее со ссылками на общие характеристики отклика в части электрической поляризации для материалов, обладающих свойством остаточной поляризации, особенно ферроэлектриков, существуют альтернативные способы считывания, которые являются бездеструктивными, простыми в осуществлении и совместимыми со схемами как активной, так и пассивной матричной адресации. Однако физические процессы, связанные с подобным считыванием, являются многочисленными и сложными. Поэтому конкретную схему считывания нужно подбирать для материалов, архитектур и временных шкал, представляющих интерес в каждой конкретной ситуации.

В соответствии с настоящим изобретением логическое состояние, т.е. направление поляризации в данной ячейке запоминающего устройства, определяется путем регистрации нелинейного отклика в виде изменения электрического импеданса указанной ячейки памяти при подаче изменяющегося во времени напряжения. При этом уровень напряжения выбирается существенно меньшим, чем тот, который необходим для инвертирования поляризации в данной ячейке. Как будет показано далее, данный нелинейный отклик может соответствовать импедансу, зависящему от напряжения в области малых сигналов, причем значение данного импеданса будет скоррелировано с напряжением смещения, что позволяет определить логическое состояние ячейки. Альтернативно нелинейность приводит к отклику с частотным спектром, отличным от аналогичного спектра для возбуждающего напряжения. При этом фаза и/или уровень компонент указанного нелинейного отклика будут различными в зависимости от логического состояния ячейки.

В контексте настоящего изобретения важно проводить разграничение между поляризационным откликом, обусловленным взаимодействием с диполями, которые ответственны за остаточную поляризацию, и откликом, формируемым квазисвязанными подвижными зарядами, которые накапливаются в качестве реакции на поляризацию, задаваемую указанными диполями и полем, налагаемым посредством электродов. Это обстоятельство оказывает влияние на частоты и импульсные протоколы считывания, которые могут быть использованы в каждом конкретном случае, а также на возможные ограничения, которые могут иметь место в отношении выбора материалов для электродов.

Применительно к первому случаю на фиг.3а представлена типичная петля гистерезиса, которая иллюстрирует отклик предварительно поляризованной среды на приложение внешнего напряжения к электродам конденсатороподобной структуры. Подаваемое напряжение в этом случае периодически изменяется между двумя экстремальными значениями с положительной и отрицательной полярностями, как это можно видеть на чертеже. Эти изменения напряжения в интервале от +V до -V соответствуют изменению поляризации при ее переключении между положительным и отрицательными уровнями насыщения, т.е. в интервале P*. Через Vc+Vc - обозначены положительное и

отрицательное значения коэрцитивного напряжения, соответствующие точкам пересечения кривой гистерезиса оси абсцисс. Точки "0" и "1" соответствуют положительному и отрицательному значениям остаточной поляризации P_R, соответствующим двум устойчивым состояниям ферроэлектрического полимера.

Через $\hat{P}$ обозначено изменение поляризации после ее переключения из состояния "1" в состояние "0", т.е. при изменении напряжения от значения +V до 0.

Как видно из фиг.3а, взаимосвязь между напряжением и поляризацией является сложной, поскольку локальная поляризация P как функция от приложенного напряжения V в данной точке кривой зависит от предыстории в отношении поляризации/напряжения. Кроме того, локальная поляризация является нелинейной как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровнях. На локальной зависимости поляризации от напряжения имеются различия, зависящие от логического состояния, т.е. от того, соответствовало ли предшествующее состояние логическому "0" или логической "1". Эти различия могут быть использованы для создания средств бездеструктивного считывания логического состояния.

Отмеченные различия проявляются в форме поляризационного отклика на слабые сигналы, которые зависят от положения на кривой. При этом поляризационный отклик на слабый сигнал может содержать как линейные, так и нелинейные компоненты отклика по отношению к прикладываемому возбуждающему напряжению, соответствующему области слабых сигналов. Соответственно, комплексный импеданс для слабого сигнала, детектируемый в ячейке, выполненной в форме конденсатора, содержащего материал с характеристиками, показанными на фиг.3а, может анализироваться в корреляции с напряжением, приложенным к конденсатору. Анализ имеет целью определение логического состояния ячейки памяти.

Следует отметить, что частоты приложенных напряжений, соответствующих смещению и слабому зондирующему сигналу, должны выбираться достаточно низкими для того, чтобы поляризация, обусловленная диполями, могла следовать за их изменениями. В зависимости от используемого материала, температуры и других факторов максимальная допустимая частота может варьироваться в широких пределах (от сотен Гц до ГГц). При этом неорганические керамические ионные ферроэлектрики обладают быстрым откликом, тогда как полимерные ферроэлектрики, основанные на выстраивании молекул, реагируют существенно медленнее.

Далее будет рассмотрен второй случай, когда поляризационный отклик обусловлен квазисвязанными или подвижными зарядами, которые аккумулируются под влиянием внутренних полей в материале. Анализ научной литературы показывает, что базовые явления асимметрии, зависящей от поляризации, а именно зависимость от смещения и нелинейный отклик являются, видимо, общими свойствами всех ферроэлектрических материалов, помещенных в конденсатороподобные структуры, представляющие интерес в контексте настоящего изобретения. Хотя во многих случаях уровень поляризационного отклика резко уменьшается, приведенное утверждение применимо даже в области частот, далеко превосходящих частоты, за которыми может следовать поляризация в ферроэлектрике. Следовательно, данные явления нецелесообразно объяснять в терминах кривой гистерезиса, представленной на фиг.3а.

В соответствии с настоящим изобретением логическое состояние, т.е. направление и/или уровень остаточной поляризации, определяют, используя нелинейности, присущие поляризационному отклику материала, к которому приложено электрическое поле. Далее будут описаны два различных базовых подхода.

В соответствии с первым из них материал подвергают воздействию зондирующего напряжения, соответствующего уровню слабых сигналов, наложенного на напряжение смещения, и на той же частоте, что и частота зондирующего напряжения, определяют поляризационный отклик как функцию напряжения смещения. Кривая поляризационного отклика в режиме слабого сигнала приведена в общем виде на фиг.3b. Когда отклик регистрируется на той же частоте, что и вызывающее его напряжение, этот отклик просто соответствует емкости, зависящей от напряжения смещения и связанной с

поляризационным состоянием материала. Важно понять, что при одинаковости качественного поведения, существует фундаментальное различие между физическими механизмами, приводящими к подобным кривым за счет взаимодействия с накопленными квазисвязанными или подвижными зарядами, с одной стороны, и с кривыми, получаемыми при зондировании кривой гистерезиса слабыми сигналами, с другой стороны.

С учетом сходства некоторых схем считывания, которые будут описаны далее, описание предпочтительных вариантов, основанных на принципах, которые иллюстрируются фиг.4a-4d, будет дано в терминах локального отклика на слабые сигналы в различных частях кривой гистерезиса. Это позволит добиться легкого интуитивного понимания принципов, реализуемых изобретением. Следует, однако, понимать, что техническое описание устройства считывания и протоколов подачи напряжения применимо также ко всем случаям, когда производится зондирование квазисвязанных и/или подвижных зарядов. Последний случай будет охватывать не только частотные диапазоны, в которых может иметь место полное или частичное инвертирование поляризации (подтверждаемое кривыми гистерезиса), но также и высокочастотные диапазоны, где переключение доменов не может следовать за частотой.

В этой связи можно отметить, что схемы считывания, предложенные Бреннаном в вышеупомянутых патентах США, полностью основываются на взаимодействии с аккумулированными пространственными зарядами в соответствии со специфичной моделью, согласно которой зондируемые пространственные заряды располагаются вблизи каждого электрода при наличии между ними нейтральной зоны. При этом относительные размеры нейтральной зоны и зон нахождения пространственных зарядов определяют воспринимаемую емкость. Это ставит схемы, предложенные Бреннаном, вне области той части приводимого анализа, который основан на кривых гистерезиса. Кроме того, они игнорируют другие многочисленные физические явления, ведущие к характеристикам отклика на слабый сигнал, подобным качественному представлению, приведенному на фиг.3b.

В соответствии со вторым подходом материал действует, как параметрический смеситель, зависящий от поляризационного состояния, причем его выходной отклик, в дополнение к частотам, присутствующим в слабом возбуждающем напряжении, содержит новые частотные компоненты. Таким образом, воздействие на поляризацию с заданной частотой вызывает поляризационный отклик и, следовательно, детектируемый ток, который, в дополнение к основной частоте, содержит также ее гармоники. Если напряжение возбуждения содержит несколько частотных компонент, отклик может содержать, кроме того, компоненты, соответствующие сумме и разности этих частот, со специфичными фазовыми соотношениями, которые могут быть однозначным образом привязаны к состоянию остаточной поляризации среды.

В этом случае также описание приводимых ниже примеров дается со ссылкой на кривые гистерезиса, что обеспечивает простой, интуитивный поход к пониманию принципов, лежащих в основе изобретения. Однако, как уже указывалось ранее, те же самые общие принципы считывания и соответствующие устройства будут применимы и в высокочастотных диапазонах, в которых переключение поляризации, выражающееся в кривых гистерезиса, не может следовать за частотой, будучи привязано к квазисвязанным или к подвижным пространственным зарядам.

Некоторые предпочтительные варианты изобретения описаны далее в форме примеров 3, 4 и 5. Они представляют собой общие классы возможных реализаций, обладающие общим признаком: возбуждение ячейки памяти слабым сигналом для того, чтобы вызвать, как следствие нелинейности и асимметрии, обусловленной предысторией, поляризационный отклик, зависящий от логического состояния. Для того чтобы упростить обсуждение, будет приниматься, что поляризационный отклик на приложение небольшого напряжения, изменяющегося во времени, будет следовать в прямом и обратном направлении вдоль части кривой, показанной на фиг.3a. Это допущение игнорирует эффекты частичного переключения и усталости, которые приводят к постепенному

уменьшению уровня поляризации, а также к тому, что поляризационный отклик на малый сигнал сам по себе проявляет гистерезис.

Перед тем, как будут описаны упомянутые предпочтительные варианты, будут подробно обсуждены два примера, дающие общее представление о принципах, лежащих в основе настоящего изобретения, и поясняющие эти принципы.

Пример 1. Различия применительно к поляризационному отклику в режиме слабого сигнала

Наклон кривой гистерезиса, т.е. линейный поляризационный отклик в режиме слабого сигнала есть первая производная dP/dV указанной кривой, зависящая от напряжения и от предыстории. Представленная на фиг.3а типовая кривая имеет идентичный наклон для двух логических состояний "0" и "1", и измерение наклона в этих точках не выявит логического состояния. Накладывая определенное напряжение V и зондируя характеристику наклона в окрестностях точек "1" и "0", можно определить логическое состояние. Введем следующие обозначения:

Наклон в окрестностях "0" при напряжении V смещения: $Наклон_{"0"}(V)$;

наклон в окрестностях "1" при напряжении V смещения: $Наклон_{"1"}(V)$.

Из фиг.3 следует:

$Наклон_{"0"}(+\triangle V) < Наклон_{"1"}(+\triangle V)$;

$Наклон_{"0"}(-\triangle V) > Накпон_{"1"}(-\triangle V)$.

Таким образом, логическое состояние интересующей ячейки может быть считано путем приложения напряжения смещения известной величины и полярности и регистрации наклона кривой гистерезиса, по меньшей мере, в двух точках этой кривой. Эта операция может быть выполнена различными путями.

(а) Путем регистрации угла наклона при двух или более дискретных значениях напряжения смещения, как это показано на фиг.4а, и сопоставления разности углов наклона с пороговым значением.

(б) Путем отслеживания значения поляризационного отклика в режиме слабых сигналов при подаче зондирующего напряжения, представляющего собой напряжение, изменяющееся в режиме медленной периодической развертки, на которое наложено малое периодическое изменение напряжения с более высокой частотой, как это показано на фиг.4b.

(в) Путем регистрации дифференциальной поляризации между выбранными дискретными точками на кривой гистерезиса. Соответствующий пример приведен на фиг.4с.

Для логического состояния "0" имеем:

$|P(+\triangle V)-P(0)| < |P(0)-P(-\triangle V)|$,

тогда как для логического состояния "1":

$|P(+\triangle V)-P(0)| > |P(0)-P(-\triangle V)|$.

(г) Путем регистрации асимметрии размахов поляризации (от максимума к минимуму, среднеквадратического значения и т. д.) при приложении напряжений развертки положительной и отрицательной полярности. Пример, иллюстрирующий две отдельные развертки, показан на фиг.4d. Однако асимметрия может быть обнаружена и другими методами, очевидными для специалиста в области электроники.

Пример 2. Детектирование отклика на синусоидальное входное напряжение на частоте гармоник

Нижеследующее простое рассмотрение может быть полезным для интуитивного понимания основной идеи.

Возвращаясь к фиг.3а, желательно установить, в каком логическом состоянии - "0" или "1" - находится запоминающий материал в интересующей ячейке памяти. Два эти логические состояния характеризуются различными значениями кривизны в точках, в которых кривая гистерезиса пересекает ось V=0. Используя разложение второго порядка, можно написать:

(1) $P("0")=P_0+\alpha V-\beta V^2$;

(2) $P("1")=-P_0+\alpha V+\beta V^2$

Далее примем, что ячейка возбуждается синусоидальным напряжением с амплитудой, намного меньшей, чем та, которая требуется для переключения полярности ячейки (см. фиг.5a). В этом случае:

(3) $V(t)=V_0\cos(\omega t)$.

Тогда поляризационный отклик можно представить, как:

(4) $P("0")=P_0+\alpha V_0\cos(\omega t)-\beta V_0^2\cos^2(\omega t)$

$=(P_0-0,5\beta V_0^2)+\alpha V_0\cos(\omega t)+0,5\beta V_0^2\cos(2\omega t+\pi)$ и

(5) $P("1")=-P_0+\alpha V_0\cos(\omega t)+\beta V_0^2\cos^2(\omega t)$

$=-(P_0-0,5\beta V_0^2)+\alpha V_0\cos(\omega t)+0,5\beta V_0^2\cos(2\omega t)$.

Таким образом, поляризационный отклик ячейки памяти на частоте второй гармоники зависит от того, в каком состоянии ("0" или "1") находится ячейка. Более конкретно, отклики для двух указанных состояний на частоте второй гармоники находятся в противофазе (т.е. взаимно смещены по фазе на 180°). Используя соответствующий метод детектирования, например когерентное усреднение (синхронное детектирование), различие между этими откликами можно выразить количественно, например в виде положительной или отрицательной полярности детектированного сигнала.

Известное устройство для детектирования поляризационного отклика на частоте второй гармоники представлено на фиг.5b в виде упрощенной блок-схемы. На фиг.5b показано, что генератор сигнала подает синусоидальное напряжение с частотой ω на ячейку памяти, сигнал от которой, содержащий гармонические составляющие, поступает на фазочувствительный детектор. В предпочтительных вариантах осуществления фазочувствительный детектор может рассматриваться как сочетание фазочувствительного детектора и дискриминатора. Генератор сигнала одновременно генерирует входной опорный фазовый сигнал, поступающий к источнику опорного сигнала, который подает опорный сигнал с частотой, соответствующей удвоенной частоте ω считываемого сигнала, на фазочувствительный детектор. Выходное напряжение от фазочувствительного детектора будет зависеть от логического состояния ячейки памяти. В результате действительное логическое состояние будет соответствовать простому количественному параметру, т.е. полярности детектируемого сигнала.

Как нетрудно убедиться и как хорошо известно специалистам в области анализа сигналов, нелинейности более высокого порядка в поляризационном отклике ячейки памяти в общем случае будут приводить к появлению в детектируемом сигнале более высоких гармоник. Применяя базовые принципы, описанные выше, и учитывая конкретные характеристики отклика анализируемой ячейки памяти, подобные компоненты сигнала также могут быть выделены из суммарного сигнала для того, чтобы получить информацию о направлении поляризации и, следовательно, о логическом состоянии ячейки. Таким образом, рассмотренный пример, относящийся к детектированию второй гармоники, не должен рассматриваться, как не позволяющий производить детектирование гармоник выше, чем вторая при определении логического состояния интересующей ячейки.

Как уже упоминалось, далее будут описаны несколько предпочтительных вариантов осуществления, которые ни в каком отношении не должны рассматриваться как ограничивающие действительный объем изобретения.

Пример 3. Детектирование суммарной и разностной частот в отклике на подачу двух взаимно налагающихся входных напряжений

Аналогично рассмотрению предыдущего Примера может быть проведен простой анализ для случая, когда возбуждение ячейки памяти может быть представлено суммой двух синусоидальных напряжений на двух различных частотах ω_1 и ω_2. В этом случае имеем:

(6) $V(t)=V_1\cos(\omega_1 t)+V_2\cos_2(\omega_2 t)$,

причем поляризационный отклик приобретает вид:

(7) $P("0")=[P_0-0,5\beta V_1^2+V_2^2)]+\alpha[V_1\cos(\omega_1 t)+V_2\cos(\omega_2 t)]$

$+0,5\beta[V_1^2\cos(2\omega_1 t+\pi)+V_2^2\cos(2\omega_2 t+\pi)+2V_1V_2\cos((\omega_1+\omega_2)t+\pi)+\cos((\omega_1-\omega_2)t+\pi)]$

и

(8) $P("1")=-[P_0-0,5\beta(V_1^2+V_2^2)]+\alpha[V_1\cos(\omega_1 t)+V_2\cos(\omega_2 t)]$

$+0,5\beta[V_1^2\cos(2\omega_1 t)+V_2^2\cos(2\omega_2 t)$

$+2V_1V_2\cos((\omega_1+\omega_2)t)+\cos((\omega_1-\omega_2)t)]$.

Можно видеть, что данные выражения сводятся к выражениям (4) и (5) при $V_1=V_2=V_0/2$ и $\omega_1=\omega_2=\omega$.

В дополнение к линейным, зависящим от времени откликам на частотах ω_1 и ω_2 а также откликам на частотах $2\omega_1$ и $2\omega_2$ второй гармоники, в рассматриваемом случае в отклике появляются также компоненты на суммарной и разностной частотах ($\omega_1+\omega_2$) и ($\omega_1-\omega_2$), как это видно на фиг.6. Аналогично ситуации, рассмотренной в предыдущем параграфе, эти компоненты, соответствующие логическим состояниям "0" и "1", находятся в противофазе относительно друг друга. Тем самым обеспечивается альтернативный вариант бездеструктивного считывания данных. При этом имеется возможность выбирать значения ω_1 и ω_2 таким образом, чтобы частота, на которой проводится детектирование, т.е. ($\omega_1+\omega_2$) или ($\omega_1-\omega_2$), находилась в удобном для измерений диапазоне, например в таком, где спектральная плотность шумов является низкой, и/или в таком, где частота оптимальна для построения контура приема и обработки сигнала. Возможно также осуществлять дискриминацию тех гармоник возбуждающего напряжения, которые проникают в контур детектирования посредством механизмов, не связанных с интересующим поляризационным откликом (например, в связи с нелинейностью в драйверных или детекторных контурах).

Устройство по настоящему изобретению, предназначенное для детектирования на частотах, соответствующих сумме и разности частот ω_1 и ω_2 входных синусоидальных напряжений, представлено в виде блок-схемы на фиг.6. В этом устройстве генератор сигнала формирует сигналы с частотами ω_1 и ω_2 и подает их на ячейку памяти. Отклик ячейки памяти поступает на фазочувствительный детектор, который производит детектирование соответственно на суммарной частоте $\omega_1+\omega_2$ или на разностной частоте $\omega_1-\omega_2$. Источник опорного сигнала связан с генератором сигнала для того, чтобы получать от него опорный фазовый сигнал и подавать опорные сигналы на суммарной и разностной частотах на фазочувствительный детектор. При этом выход фазочувствительного детектора связан с дискриминаторно/логическим контуром, предназначенным для проведения необходимого сопоставления фаз для того, чтобы определить действительное логическое состояние ячейки памяти. В качестве варианта между источником опорного сигнала и фазочувствительным детектором может быть включен регулятор фазы, обеспечивающий подачу на фазочувствительный детектор и, возможно, в дискриминаторно/логический контур опорного сигнала, сдвинутого по фазе на π относительно исходного фазового сигнала.

Поскольку логическое состояние ячейки проявляется в фазовом отклике одновременно на нескольких различных частотах (а именно $2\omega_1$, $2\omega_2$, $\omega_1+\omega_2$ и $\omega_1-\omega_2$), коррелирование результатов фазового детектирования может быть проведено на двух или более частотах для того, чтобы повысить надежность и/или скорость каждой операции считывания.

Пример 4. Детектирование нелинейного отклика в случае, когда входные напряжения имеют низкочастотное смещение.

Почти универсальным свойством нелинейных откликов в веществе является сильная зависимость от амплитуды возбуждения. Как уже упоминалось ранее, в рамках настоящего изобретения необходимо выбрать возбуждение, которое является достаточно сильным для того, чтобы позволить быстрое и надежное детектирование нелинейного отклика, и в то же время быть достаточно слабым для того, чтобы поляризация в запоминающем материале не ослабла и не испытала инвертирования.

Альтернативная стратегия повышения уровня детектируемых сигналов состоит в

смещении рабочей точки в такую область на кривой гистерезиса, в которой эта кривая проявляет сильную нелинейную зависимость между поляризационным откликом и приложенным напряжением. Данная стратегия может быть проиллюстрирована фиг.3a и 7a.

Предположим, например, что ячейка находится в логическом состоянии "1" и что для зондирования отклика на частоте второй гармоники приложено небольшое синусоидально изменяющееся поле с частотой ω. Однако теперь имеется также медленно изменяющееся, т.е. низкочастотное напряжение смещения. Это напряжение может быть выбрано так, чтобы заданным образом расположить рабочую точку на кривой гистерезиса:

(9) $V(t)=V_{offset}+V_0\cos(\omega t)$.

Для простоты примем, что вторая гармоника прямо пропорциональна положительной или отрицательной кривизне кривой гистерезиса в рабочей точке. При рассмотрении кривой 3a видно, что для ячейки в логическом состоянии "1" сигнал второй гармоники будет возрастать по мере того, как V_{offset} возрастает от 0, приближаясь к $V_c/3$ (на практике максимально допустимое напряжение в памяти с пассивной матричной адресацией должно составлять $V_c/3$, для того чтобы избежать возмущающего воздействия на другие ячейки матрицы). Для ячейки в логическом состоянии "0" сигнал второй гармоники находится в противофазе по отношению к сигналу для состояния "1". При этом при возрастании V_{offset} от 0 этот сигнал будет оставаться малым.

Наоборот, если V_{offset} является отрицательным, результат меняется на зеркальный по отношению к описанному. По мере того, как напряжение смещения принимает большие по абсолютной величине отрицательные значения, сигнал, соответствующий второй гармонике, остается слабым, если ячейка находится в логическом состоянии "1", и возрастает для ячейки в логическом состоянии "0".

Таким образом, в дополнение к возможному росту сигнала второй гармоники подача напряжения смещения вызывает дополнительное явление, которое может быть использовано для обнаружения логического состояния ячейки, как это показано на фиг.7a. Амплитуда сигнала, соответствующего второй гармонике, от ячейки в логическом состоянии "1" увеличивается при приложении напряжения смещения положительной полярности и остается малой при отрицательных значениях напряжения смещения. Когда ячейка находится в состоянии "0", сигнал возрастает при подаче напряжения смещения отрицательной полярности и остается малым в случае положительной полярности. Среди нескольких протоколов подачи возбуждающего напряжения, которые могут быть использованы для считывания данных на основе описанной асимметрии, предпочтительный вариант включает в себя последовательность измерений с подачей различных медленно изменяющихся (низкочастотных) напряжений смещения. В качестве примера можно указать простой случай проведения двух измерений амплитуды и фазы второй гармоники. Одно из них проводится при $+V_{offset}$ и одно при $-V_{offset}$. Если ячейка находится в логическом состоянии "1", это проявится в значительном сигнале второй гармоники, который скоррелирован по фазе с опорным сигналом в случае $+V_{offset}$. Случаю $-V_{offset}$ соответствует меньший синфазный сигнал второй гармоники. Если же ячейка находится в логическом состоянии "0", то в случае $+V_{offset}$ сигнал, соответствующий второй гармонике, будет малым и находящимся в противофазе с опорным сигналом, а в случае $-V_{offset}$ - значительным, но опять-таки в противофазе.

Для осуществления нелинейного детектирования отклика согласно изобретению при использовании медленно изменяющегося (низкочастотного) сигнала смещения, может быть использован вариант устройства, представленного на фиг.5b. Этот вариант выполнения устройства в целом соответствует блок-схеме, приведенной на фиг.7b. Генератор сигнала подает периодический, например синусоидальный, считывающий сигнал, наложенный на напряжение смещения в виде медленно изменяющегося периодического напряжения смещения или альтернативно в виде низкочастотного напряжения смещения. Ячейка памяти вырабатывает сигнал-отклик, содержащий компоненту с частотой 2ω, который подается на вход комбинированного фазочувствительного детектора/дискриминатора для

определения логического состояния ячейки памяти. Комбинированный фазочувствительный детектор/дискриминатор связан также с генератором сигнала, от которого поступает опорный сигнал, например, в виде синусоидального напряжения с частотой ω, наложенный, как это показано на чертеже, на напряжение смещения.

Пример 5. Частотное детектирование отклика с использованием напряжения смещения и синусоидального напряжения с существенно различными частотами и амплитудами.

Еще один предпочтительный вариант осуществления изобретения, использующий асимметрию зависимости отклика на частоте второй гармоники от смещения, предусматривает подачу плавно изменяющегося напряжения смещения, т.е. синусоидального напряжения смещения с частотой Ω, которая существенно меньше, чем частота ω напряжения, которое возбуждает вторую гармонику (см. фиг.8a, b). В этом случае

(10) $V(t)=V_{OFFSET}\cos(\Omega t)+V_0\cos(\omega t)$.

Рассматриваемый пример соответствует особому случаю уже рассмотренного возбуждения на двух частотах. Однако теперь $\Omega<<\omega$, а $V_{offset}>>V_0$. Поскольку коэффициент β нелинейного отклика в выражениях (1) и (2) зависит от напряжения смещения, можно представить существующую в неявном виде временную зависимость, как

(11) $\beta=\beta(V_{OFFSET}\cos(\Omega t))$,

т.е. в приближении первого порядка отклик, соответствующий второй гармонике, промодулирован с частотой Ω. Зависимость β от напряжения смещения определяется используемым материалом, при этом поведение поляризационного отклика на частоте 2ω во времени может оказаться весьма сложным. Однако кривой гистерезиса, имеющей общую форму типа показанной на фиг.3a, будет соответствовать отклик на частоте второй гармоники, который промодулирован по амплитуде. Для логического состояния "1" данный отклик имеет максимум в момент t_p, когда напряжение смещения достигает своего пикового значения при положительной полярности. Для логического состояния "0" максимум отклика на частоте второй гармоники совпадает по времени с пиком отрицательной полярности напряжения смещения, т.е. моменту $t_p+\pi/\Omega$. И в данном случае сигналы, соответствующие второй гармонике, находятся в противофазе. Используя данные проведенного анализа, специалист в области электроники сможет спроектировать электронную аппаратуру, которая будет в состоянии определять, в каком логическом состоянии ("0" или"1") находится интересующая ячейка.

В случае детектирования отклика с использованием напряжения смещения и синусоидального напряжения, как это описано в предыдущем примере, может быть использован вариант устройства, представленного на фиг.7b. Блок-схема этого варианта представлена на фиг.8b. Она включает в себя генератор сигнала, подающий на ячейку памяти синусоидальное напряжение с частотой ω, наложенное на медленно изменяющееся синусоидальное напряжение смещения с малой частотой Ω. Компонента отклика с частотой 2ω подается от ячейки на фазочувствительный детектор/дискриминатор для определения логического состояния ячейки памяти. Генератор сигнала выдает также фазовый опорный сигнал с частотой 2ω для регистрации сигналов в противофазе относительно сигнала второй гармоники, а также сигнал смещения с частотой Ω для регистрации уровня сигнала отклика.

Поскольку описанная концепция для считывания данных не вызывает инвертирования поляризации в запоминающей среде, она обладает существенными преимуществами, основные из которых приводятся ниже:

- Поскольку считывание является бездеструктивным, не требуется никакого цикла обратной записи, благодаря чему достигаются быстродействие и простота запоминающего устройства.

Во всех известных запоминающих средах, имеющих практическое значение, усталость зависит от количества инвертирований поляризации, которые произошли в материале. Устранение необходимости в переключении поляризации в процессе считывания данных означает драматическое увеличение срока службы запоминающих устройств практически

всех типов, поскольку операции считывания, как правило, выполняются намного более часто, чем операции записи.

- В случае детектирования на суммарной частоте или на частоте гармоники дискриминация между логическими состояниями "0" и "1" может быть реализована в терминах качественных критериев, например в виде определения полярности напряжения, вместо того, чтобы проводить детектирование аналогового порогового напряжения на непрерывной ("серой") шкале. Это может привести к упрощению контуров, расположенных на выходе декодирования, в которых принимается решение касательно логического состояния.

- Наконец, использование двух напряжений смещения с соответственно подобранными частотами, амплитудами и длительностями позволит применить схемы детектирования, основанные на корреляционных методах, что резко повысит возможности определения логического состояния ячейки памяти при бездеструктивном считывании с использованием только откликов в режиме малых сигналов.

Формула изобретения

1. Способ определения логического состояния ячейки памяти запоминающего устройства, хранящей данные в форме состояния электрической поляризации конденсатора, который содержит поляризуемый материал, способный сохранять неисчезающую электрическую поляризацию в отсутствие внешнего напряжения, прилагаемого к конденсатору и генерировать ток в качестве отклика на приложенное напряжение, причем токовый отклик содержит линейный и нелинейный компоненты, отличающийся тем, что предусматривает выполнение следующих операций: приложение к конденсатору первого изменяющегося во времени напряжения, соответствующего режиму слабых сигналов, амплитуду и/или длительность которого выбирают меньшими, чем это требуется для создания значительных постоянных изменений состояния поляризации конденсатора; приложение к конденсатору второго изменяющегося во времени напряжения, которое складывается с первым изменяющимся во времени напряжением, причем амплитуду и/или длительность суммы первого и второго напряжений, изменяющихся во времени, выбирают меньшими, чем это требуется для создания значительных постоянных изменений состояния поляризации конденсатора; регистрация, по меньшей мере, одной характеристики токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов, имеющей линейную или нелинейную зависимость от первого и/или второго приложенного напряжения, изменяющегося во времени, проведение корреляционного анализа, основанного на использовании коррелирующих опорных сигналов, сформированных на основе как первого, так и второго изменяющихся во времени напряжений, приложенных к конденсатору; определение логического состояния путем получения количественной оценки результата указанного корреляционного анализа и приписывание определенному логическому состоянию логического значения в соответствии с заданным протоколом.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что корреляционный анализ проводят в два этапа, первый из которых предусматривает регистрацию временной корреляции между указанным напряжением, соответствующим режиму слабых сигналов, и, по меньшей мере, одной указанной характеристикой токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов, для определения значения (значений), по меньшей мере, одного параметра, который характеризует, по меньшей мере, одну указанную характеристику токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов, тогда как второй этап корреляционного анализа предусматривает регистрацию корреляции между указанным, по меньшей мере, одним параметром и значением, знаком и/или фазой второго приложенного напряжения, изменяющегося во времени.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что корреляционный анализ проводят за один этап, при выполнении которого устанавливают корреляцию между, по меньшей мере, одной указанной характеристикой токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме

слабых сигналов, и опорным сигналом, сформированным на основе как первого, так и второго изменяющихся во времени напряжений.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение, приложенное к конденсатору, является квазистатическим напряжением произвольной полярности.

5. Способ по п.4, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение, приложенное к конденсатору, переключают между набором положительных и/или отрицательных значений.

6. Способ по п.1, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение, приложенное к конденсатору, имеет низкую частоту или медленно изменяющееся значение.

7. Способ по п.6, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение, приложенное к конденсатору, представляет собой синусоидальное напряжение.

8. Способ по п.2, отличающийся тем, что в качестве первого изменяющегося во времени напряжения, соответствующего режиму слабых сигналов, выбирают периодическое напряжение с основной компонентой ряда Фурье, имеющей частоту ω, регистрируют фазу компоненты токового отклика на частоте второй гармоники и выполняют первый этап корреляционного анализа с использованием фазы опорного сигнала, сформированного из первого приложенного к конденсатору изменяющегося во времени напряжения, соответствующего режиму слабых сигналов.

9. Способ по п.8, отличающийся тем, что первое изменяющееся во времени напряжение, соответствующее режиму слабых сигналов, представляет собой синусоидальное напряжение.

10. Способ по п.1, отличающийся тем, что в качестве указанных изменяющихся во времени напряжений выбирают два периодически изменяющихся сигнала с основными компонентами ряда Фурье, имеющими частоты ω_1 и ω_2, регистрируют фазы компонент токового отклика на суммарной и разностной частотах $\omega_1+\omega_2$ и $\omega_1-\omega_2$ и сопоставляют указанные фазы с опорной фазой, полученной из указанных изменяющихся во времени напряжений, приложенных к конденсатору.

11. Способ по п.10, отличающийся тем, что указанные компоненты периодически изменяющихся сигналов представляют собой синусоидальные напряжения.

12. Способ по п.10, отличающийся тем, что регистрируют фазы двух или более нелинейных компонент токового отклика на частотах $2\omega_1$, и/или $2\omega_2$, и/или $\omega_1+\omega_2$, и/или $\omega_1-\omega_2$ и сопоставляют указанные фазы с опорной фазой, полученной из тех же изменяющихся во времени напряжений, приложенных к конденсатору.

13. Способ по п.10, отличающийся тем, что регистрируют фазы двух или более нелинейных компонент токового отклика на частотах $2\omega_1$, и/или $2\omega_2$, и/или $\omega_1+\omega_2$, и/или $\omega_1-\omega_2$ и сопоставляют указанные фазы с опорной фазой, полученной от опорной ячейки с известным логическим состоянием, к которой приложены такие же напряжения.

14. Способ по п.1, отличающийся тем, что регистрация, по меньшей мере, одной характеристики токового отклика конденсатора, генерируемого в режиме слабых сигналов, предусматривает регистрацию при двух или более значениях второго изменяющегося во времени напряжения отношения значения токового отклика, генерируемого в режиме слабых сигналов, на первое изменяющееся во времени напряжение к значению указанного первого изменяющегося во времени напряжения, причем указанное отношение соответствует наклону кривой гистерезиса.

15. Способ по п.14, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение выбирают в виде низкочастотного или медленно изменяющегося напряжения смещения, которое изменяется в пределах заданного интервала положительных и/или отрицательных значений.

16. Способ по п.15, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение выбирают в виде напряжения, изменяющегося периодически между положительным и отрицательным значениями.

17. Способ по п.14, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение выбирают в виде плавно изменяющегося напряжения, перекрывающего интервал напряжений между двумя положительными значениями, или двумя отрицательными значениями, или между положительным и отрицательным значениями.

18. Способ по п.17, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение выбирают в виде напряжения, периодически изменяющегося с частотой, меньшей частоты первого изменяющегося во времени напряжения.

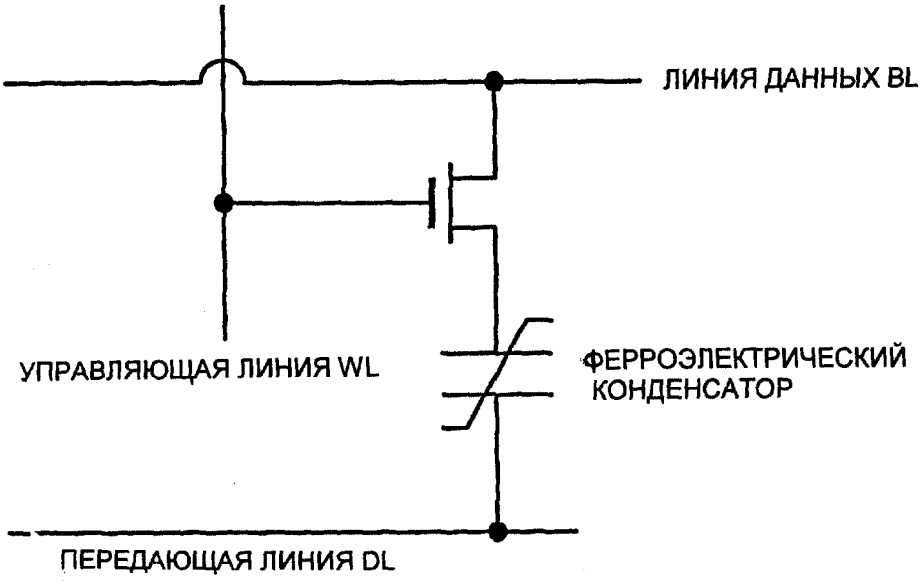
19. Способ по п.17, отличающийся тем, что второе изменяющееся во времени напряжение выбирают в виде синусоидального напряжения.

20. Способ по п.1, отличающийся тем, что заданный протокол приписывает одно из двух возможных логических состояний в зависимости от полученной количественной оценки.

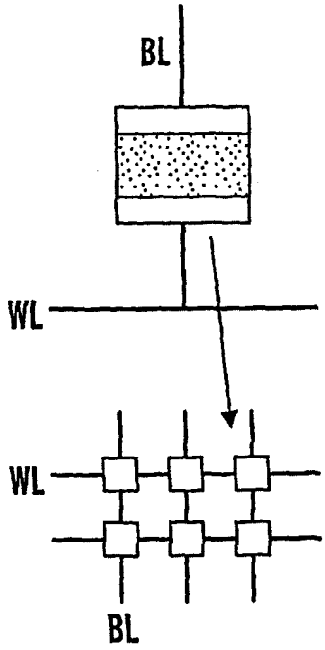
21. Устройство для сопоставления фаз при осуществлении способа, заявленного в п.1, отличающееся тем, что содержит генератор сигнала для подачи двух или более считывающих сигналов с заданными фазами на ячейку памяти, подключаемую к генератору и формирующую при подаче считывающих сигналов сигнал отклика, имеющий две или более нелинейные токовые компоненты, фазочувствительный детектор, подключаемый к ячейке памяти и выполненный с возможностью осуществления фазочувствительного детектирования, по меньшей мере, двух фаз в сигнале отклика от ячейки памяти, источник опорного сигнала, связанный с указанным генератором сигнала и выполненный с возможностью генерирования на основе суммы и разности фаз входных считывающих сигналов опорных фазовых сигналов, подаваемых на связанный с ним фазочувствительный детектор для детектирования и коррелирования указанных компонент отклика, а также для проведения сопоставления между фазовыми опорными сигналами и, по меньшей мере, одной детектированной и коррелированной компонентой отклика, и, по меньшей мере, один дискриминаторно/логический контур, связанный с фазочувствительным детектором для приема его выходного сигнала, выполненный с возможностью определения логического состояния ячейки памяти.

22. Устройство по п.21, отличающееся тем, что с выходом источника опорного сигнала связан регулятор фазы, обеспечивающий получение сдвинутого по фазе сигнала с фазой $\omega+\pi$ и подающий указанный сигнал на фазочувствительный детектор и при необходимости в дискриминаторно/логический контур.

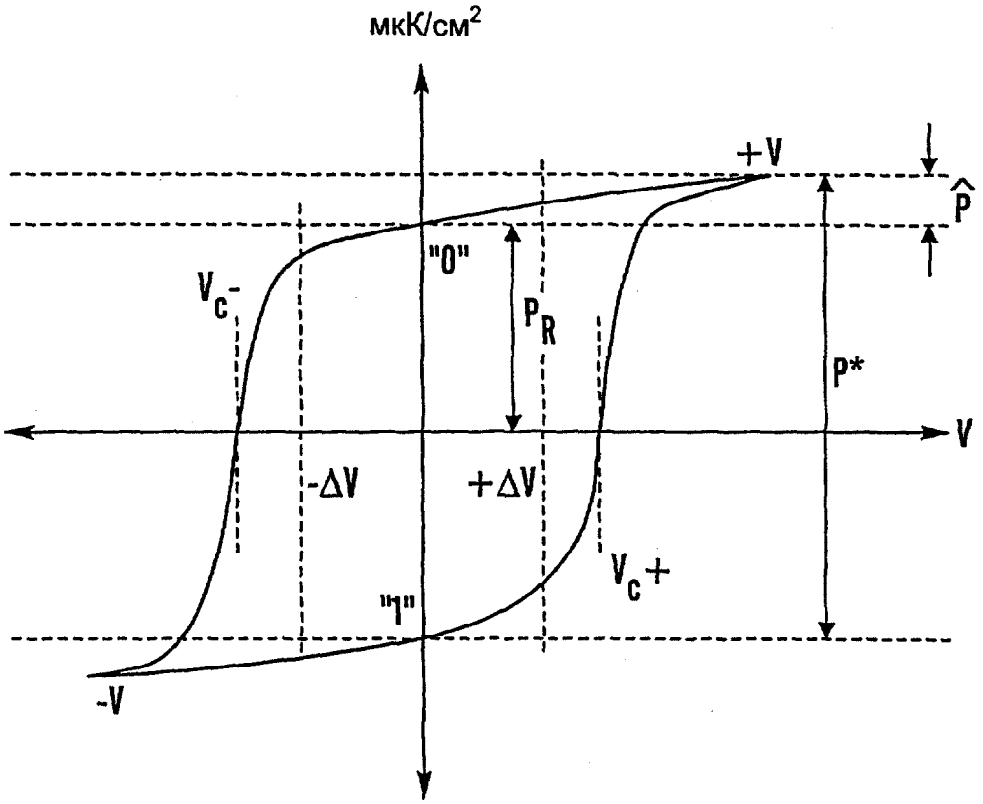
23. Устройство для сопоставления фаз при осуществлении способа, заявленного в п.1, отличающееся тем, что содержит генератор сигнала для подачи первого периодического считывающего сигнала, наложенного на второй периодический считывающий сигнал меньшей частоты, чем первый считывающий сигнал, на ячейку памяти, подключаемую к генератору и формирующую сигнал отклика с частотой, равной двукратной частоте первого периодического считывающего сигнала, и фазочувствительный детектор/дискриминатор, подключаемый к ячейке памяти для получения от нее сигнала и выполненный с возможностью получения от генератора сигнала опорных фазовых сигналов в форме первого и второго считывающих сигналов, а также коррелирования фазы сигнала отклика с фазой одного или обоих опорных фазовых сигналов, причем фазочувствительный детектор/дискриминатор выполнен с возможностью определения логического состояния ячейки памяти по значению и/или фазе скоррелированного по фазе сигнала отклика.


ЛИНИЯ ДАННЫХ BL
УПРАВЛЯЮЩАЯ ЛИНИЯ WL
ФЕРРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР
ПЕРЕДАЮЩАЯ ЛИНИЯ DL

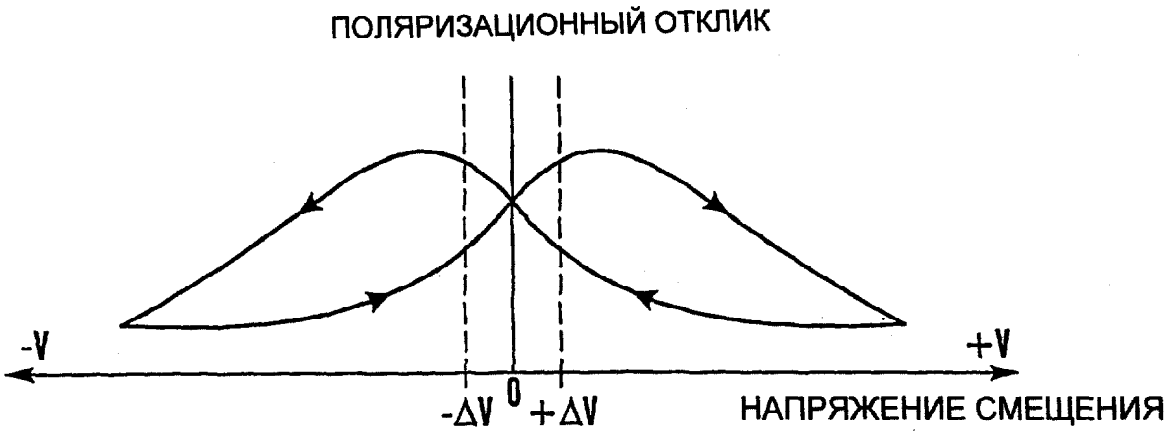
ФИГ. 1


BL
WL
WL
BL

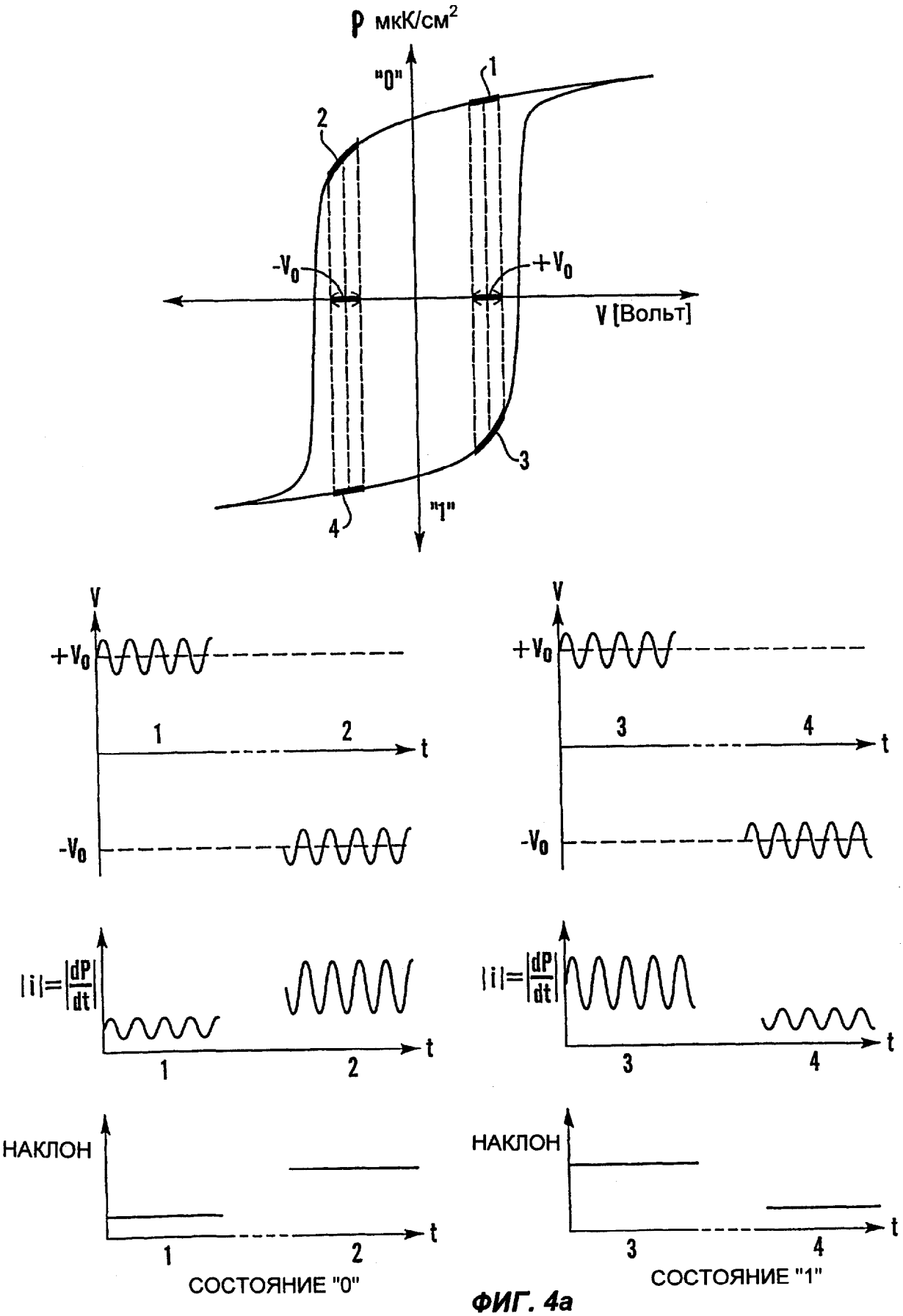
ФИГ. 2


мкК/см2
+V
P̂
"0"
Vc-
PR
P*
V
-ΔV
+ΔV
Vc+
"1"
-V

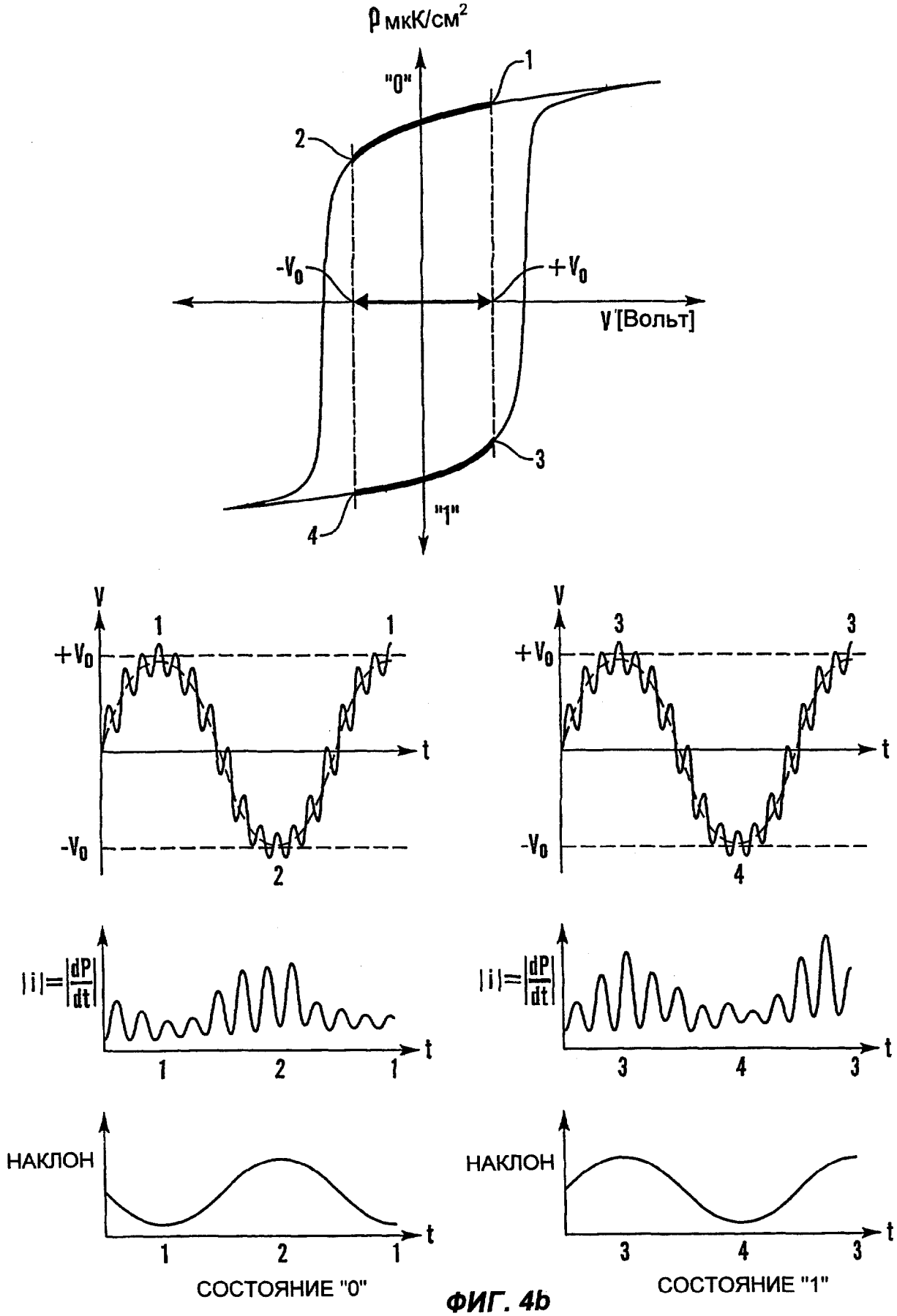
ФИГ. 3a


ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ОТКЛИК
-V
+V
-ΔV
0
+ΔV
НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ

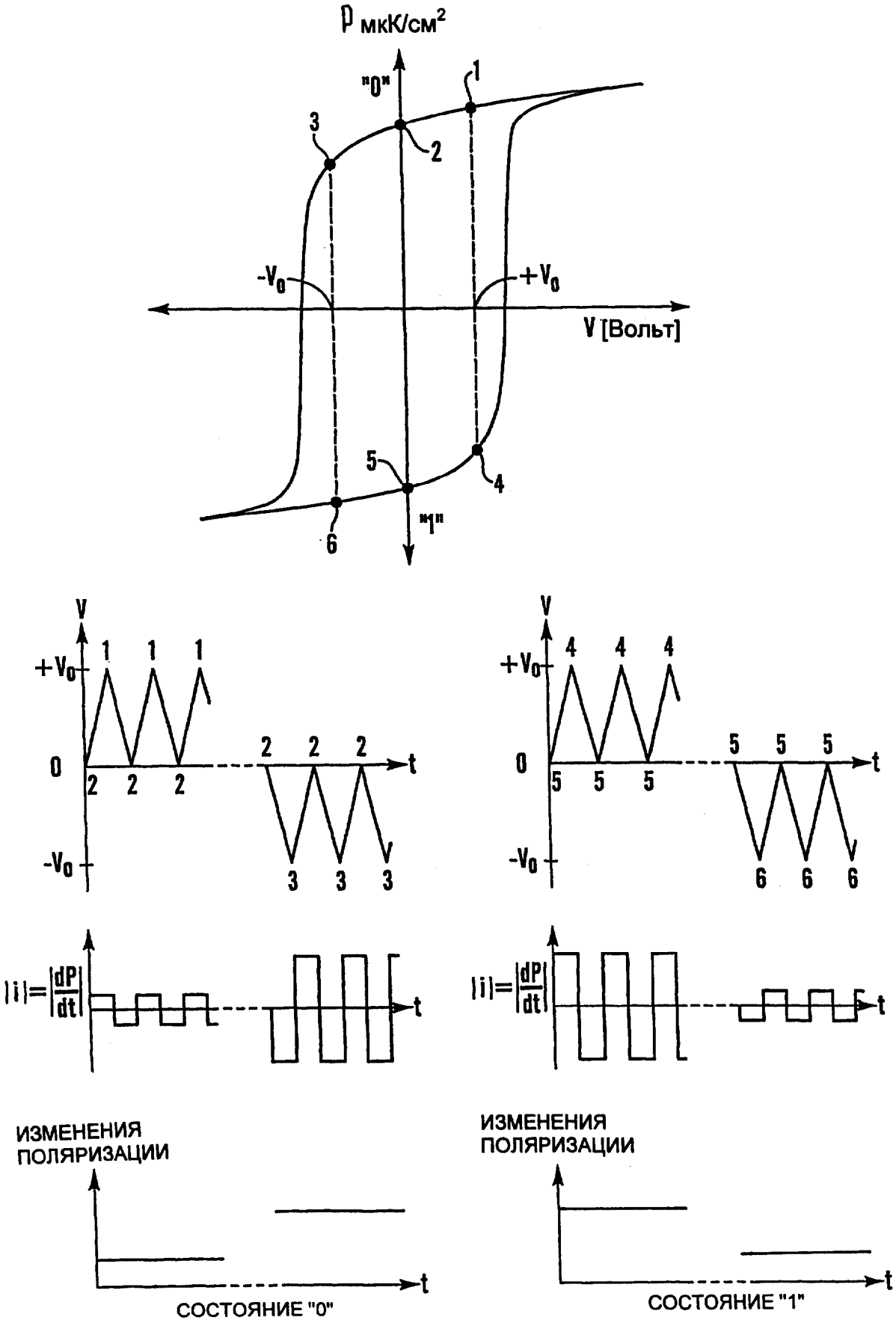
ФИГ. 3b


P мкК/см²
"0"
"1"
1
2
3
4
-V0
+V0
V [Вольт]
V
+V0
-V0
t
|i|=|dP/dt|
НАКЛОН
СОСТОЯНИЕ "0"
СОСТОЯНИЕ "1"

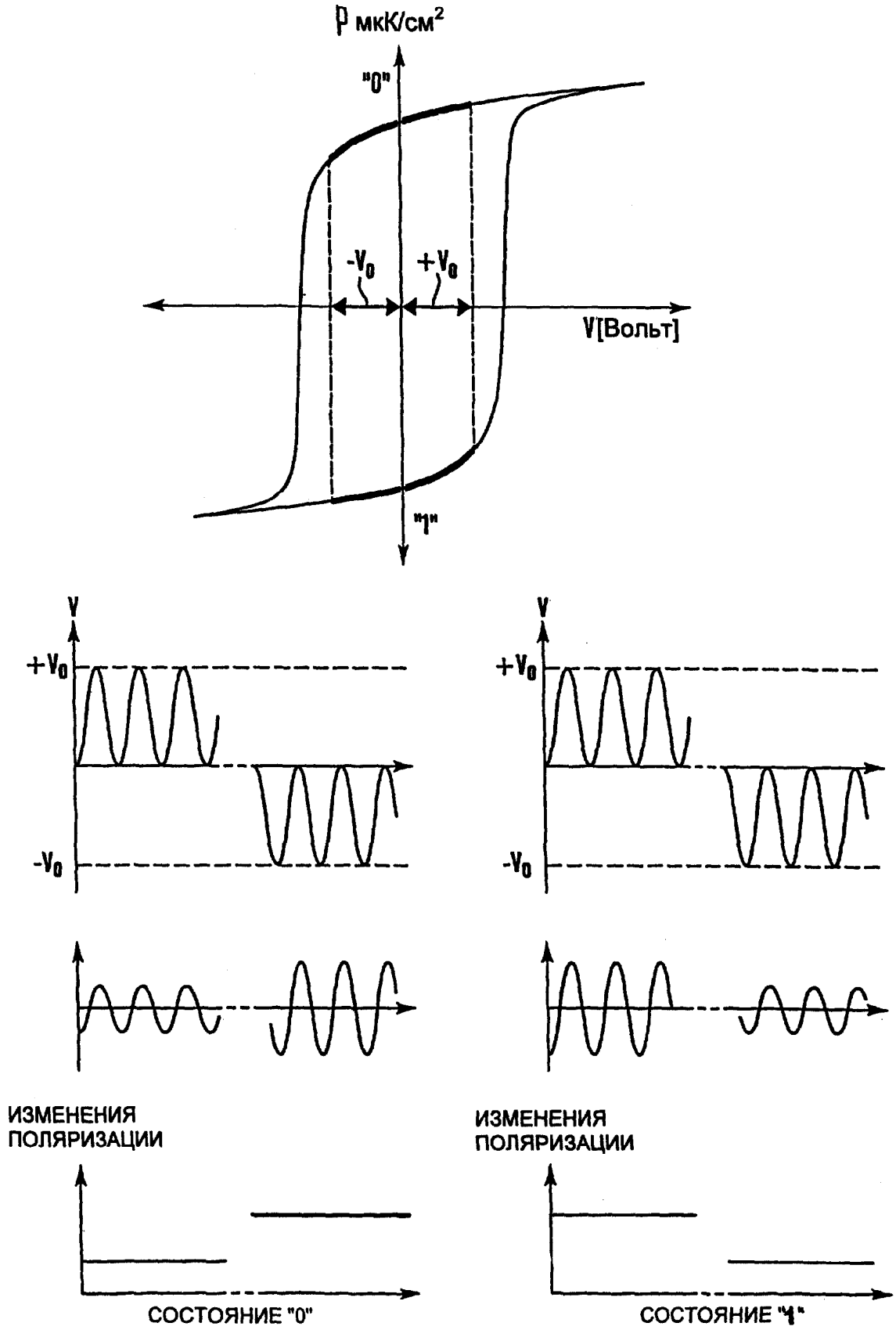
ФИГ. 4а


ρ мкК/см²
"0"
"1"
1
2
3
4
-V0
+V0
V [Вольт]
V
t
|i|=|dP/dt|
НАКЛОН
СОСТОЯНИЕ "0"
СОСТОЯНИЕ "1"

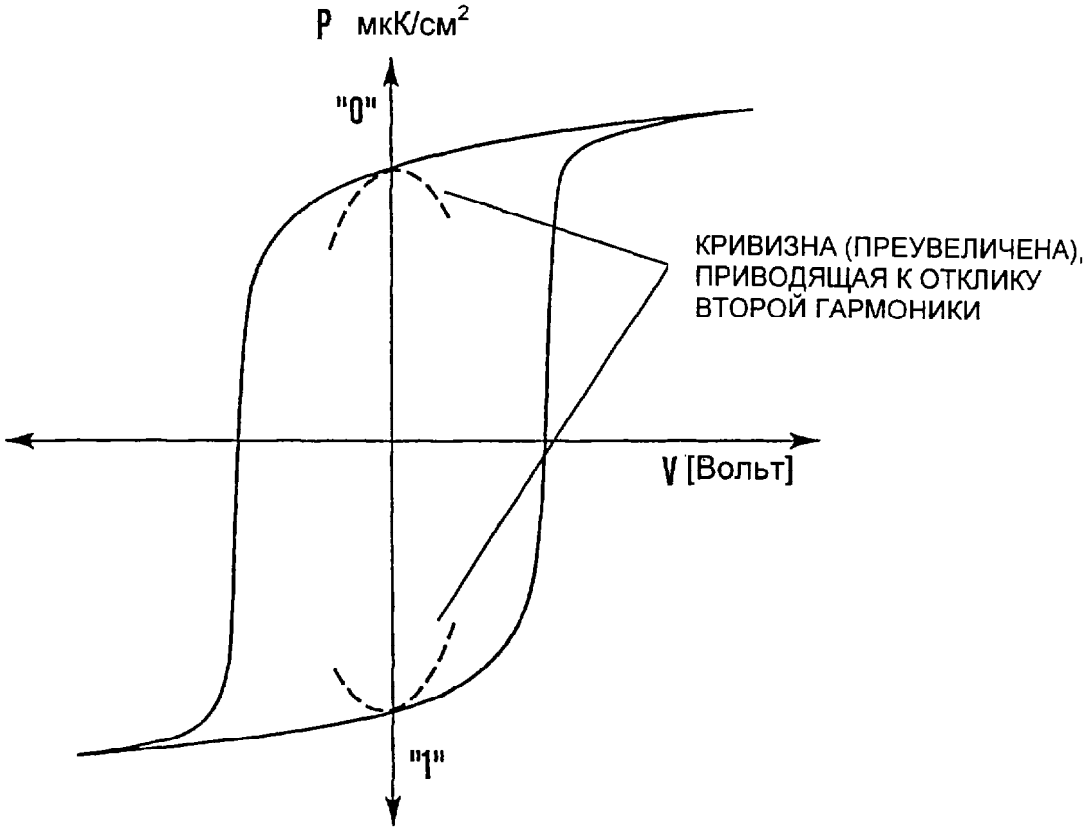
ФИГ. 4b


P мкК/см²
"0"
"1"
1
2
3
4
5
6
-V0
+V0
V [Вольт]
V
t
|i|=|dP/dt|
ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ
СОСТОЯНИЕ "0"
СОСТОЯНИЕ "1"

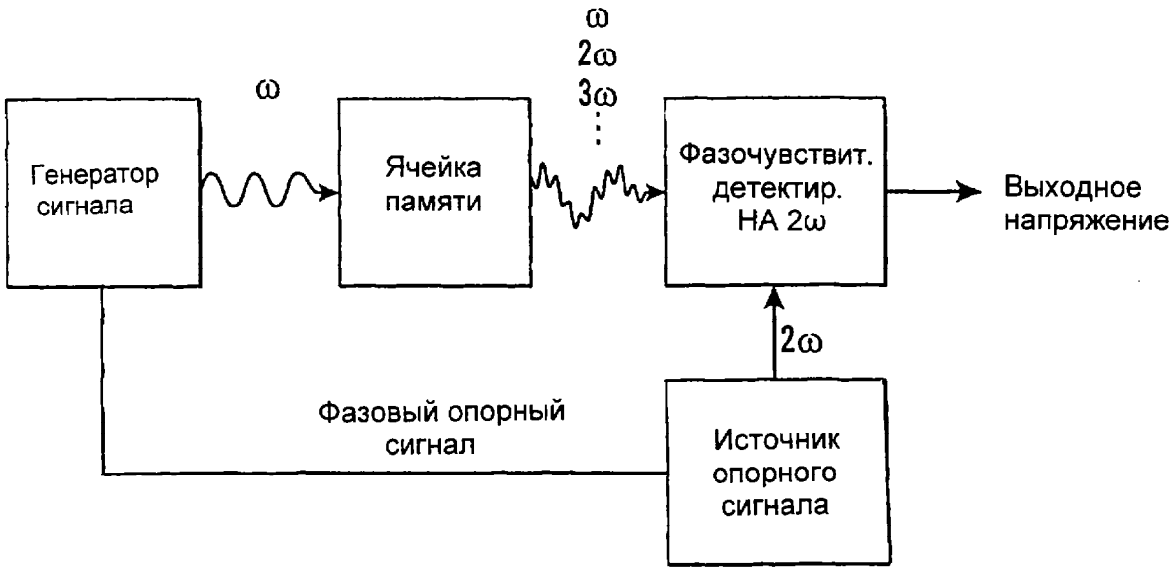
ФИГ.4с


P мкК/см²
"0"
-V0
+V0
V[Вольт]
"1"
V
+V0
-V0
V
+V0
-V0
ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ
ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ
СОСТОЯНИЕ "0"
СОСТОЯНИЕ "1"

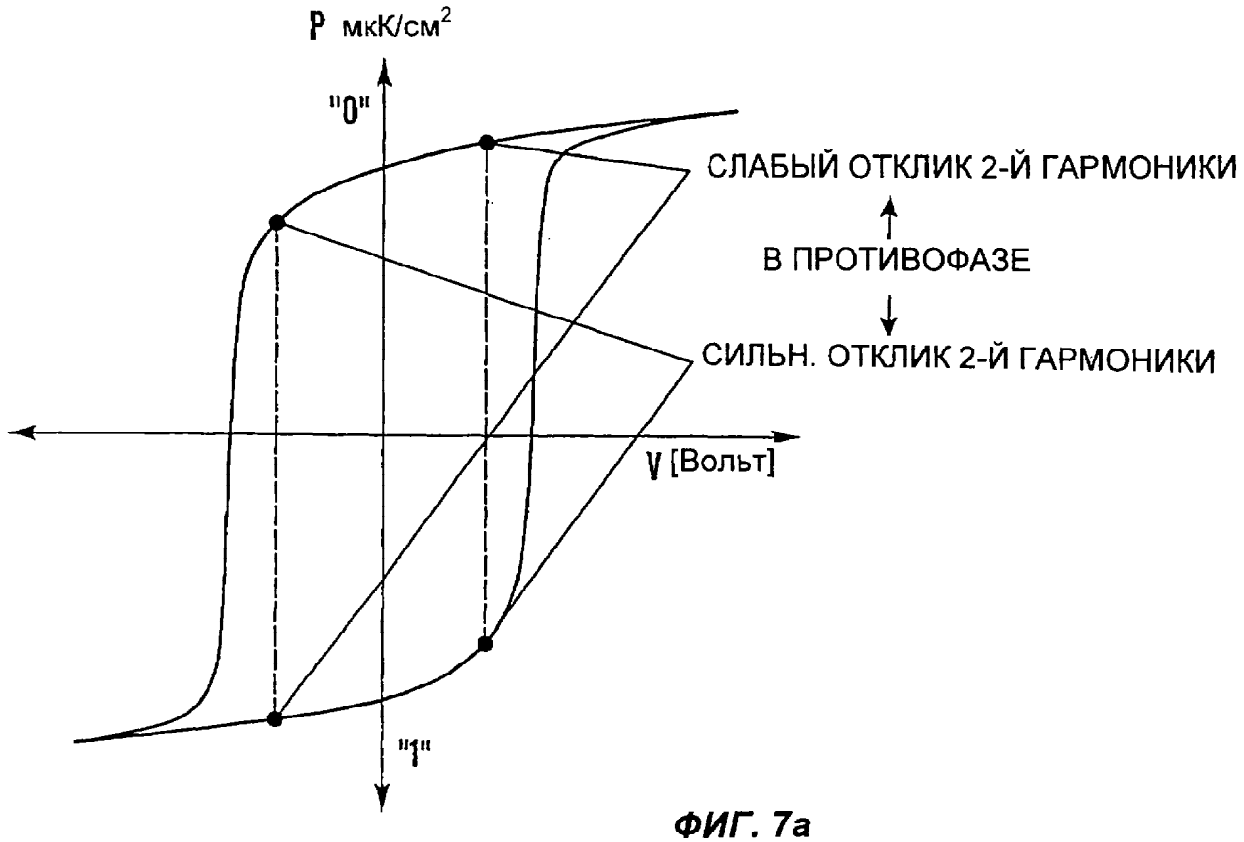
ФИГ. 4d


P мкК/см2
"0"
КРИВИЗНА (ПРЕУВЕЛИЧЕНА), ПРИВОДЯЩАЯ К ОТКЛИКУ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ
V [Вольт]
"1"

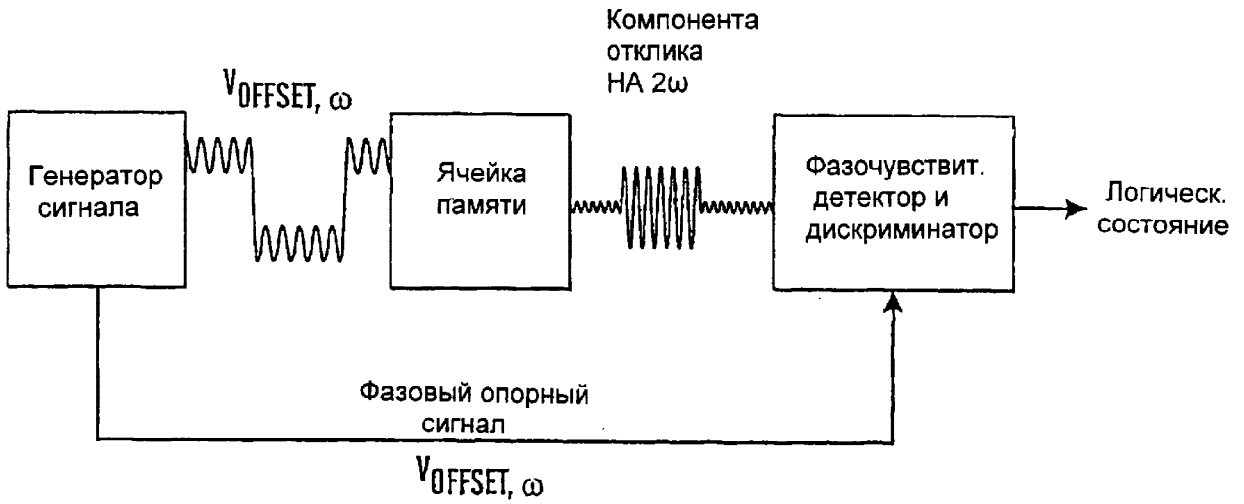
ФИГ. 5a


ω
2ω
3ω
ω
Генератор сигнала
Ячейка памяти
Фазочувствит. детектир. НА 2ω
Выходное напряжение
2ω
Фазовый опорный сигнал
Источник опорного сигнала

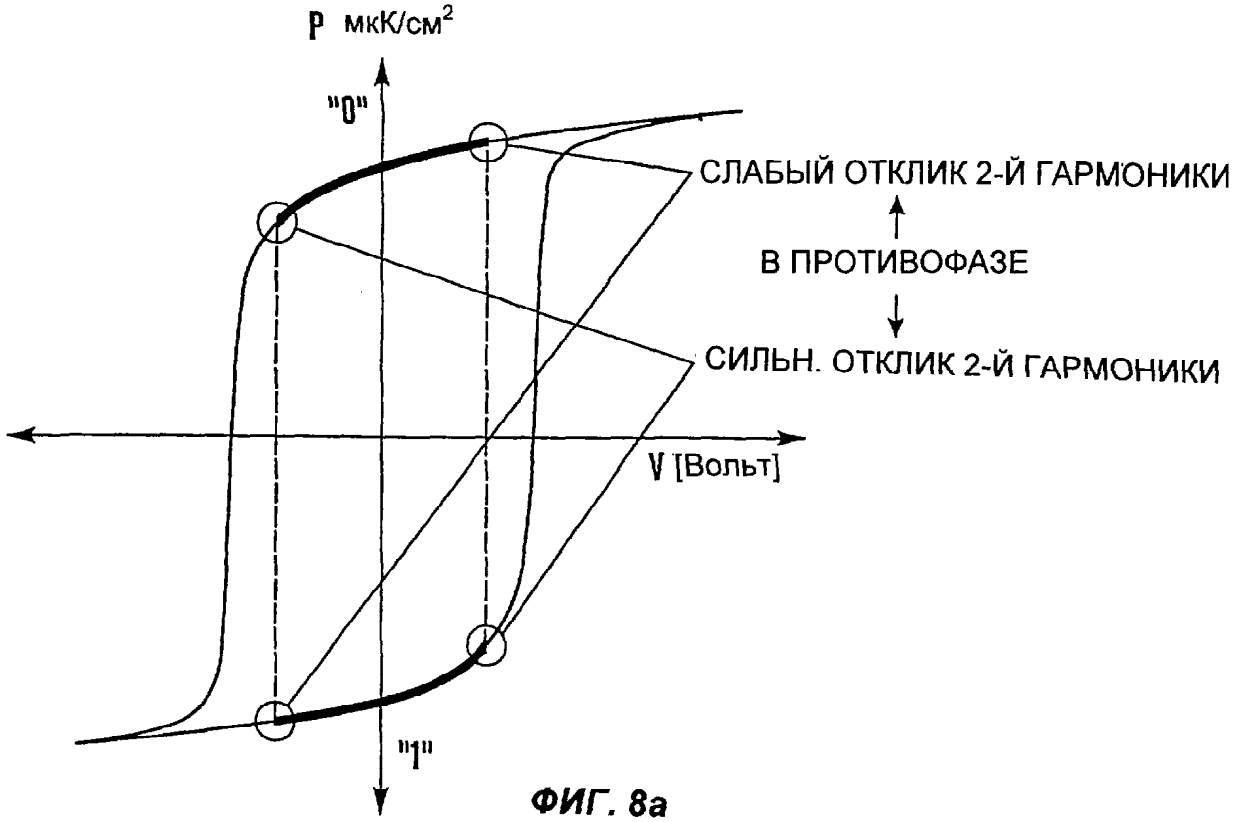
ФИГ. 5b


P мкК/см2
"0"
СЛАБЫЙ ОТКЛИК 2-Й ГАРМОНИКИ
В ПРОТИВОФАЗЕ
СИЛЬН. ОТКЛИК 2-Й ГАРМОНИКИ
V [Вольт]
"1"

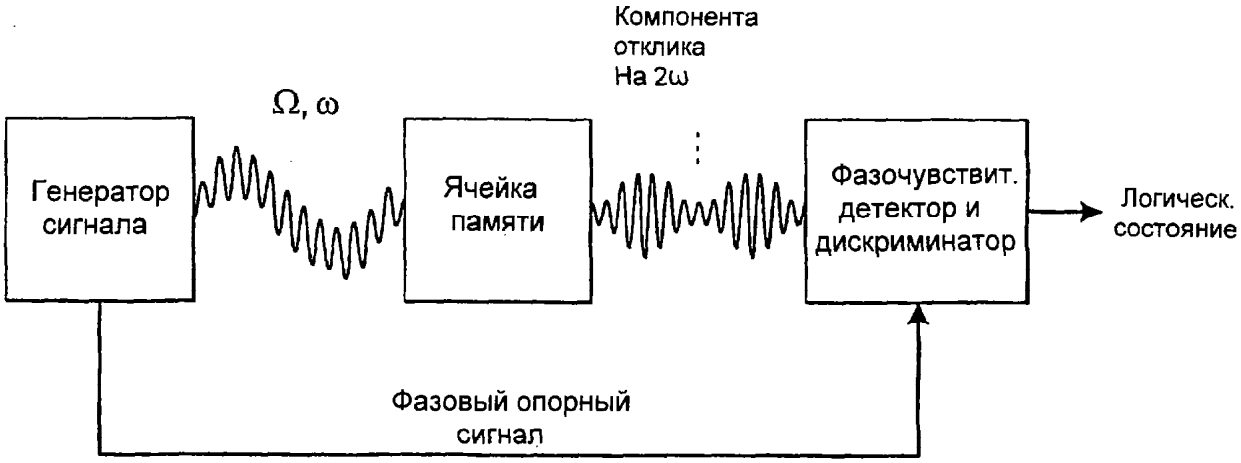
ФИГ. 7a


Компонента
отклика
НА 2ω
VOFFSET, ω
Генератор
сигнала
Ячейка
памяти
Фазочувствит.
детектор и
дискриминатор
Логическ.
состояние
Фазовый опорный
сигнал
VOFFSET, ω

ФИГ. 7b



ФИГ. 8a



А) НА 2ω:регистр. противофазы

Б) на ω: регистр. Значения

ФИГ. 8b