

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА (ОКОНЧАНИЕ)

(Окончание. Начало см. в № 3(21) 2002 г., с. 59-62, № 4(22) 2002 г., с. 76-80)

Милинкис Б.М., кандидат технических наук, доцент
Щука А.А., доктор технических наук, профессор (Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет))

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАГНИТО- ЭЛЕКТРОНИКА

Функциональная магнитоэлектроника представляет собой направление в функциональной электронике, в котором магнитоэлектронные эффекты и явления в континуальных магнитоупорядоченных средах используются для создания приборов и устройств обработки и хранения информации.

Магнитное упорядочение заключается в существовании определенной закономерности расположения элементарных магнитных моментов атомов, ионов, электронов. Простейшие типы магнитного упорядочивания наблюдаются в ферри- и ферромагнетиках.

В континуальных магнитоупорядоченных средах можно возбудить несколько видов физических носителей информации динамических неоднородностей: цилиндрические магнитные домены (ЦМД), вертикальные блоховские линии (ВБЛ), объемные и поверхностные магнитостатические волны.

В магнитоупорядоченных средах можно возбудить динамические неоднородности в виде магнонов, представляющих квант колебаний спиновых волн, магнитные вихри (флюксоны) и др.

В качестве динамических неоднородностей в последнее время успешно применяются цилиндрические магнитные домены (ЦМД), представляющие собой изолированные, однородно намагниченные подвижные области в ферро- или ферримангнетиках. ЦМД имеют форму круговых цилиндров и направление намагниченности, противоположное направлению намагниченности магнетика.

ЦМД возникают при определенных условиях в тонких монокристаллических, предварительно намагниченных пленках ферритов, обладающих сильной одноосной перпендикулярной анизотропией.

Феррит имеет формулу: $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me - двухвалентный металл, например: Mg, Ni, Ca, Cu, Zn.

ЦМД как носитель информационного сигнала обладает следующими уникальными свойствами:

- неограниченно долго сохраняется в системе до, во время, и после взаимодействия;
- свободно перемещается в двух измерениях;
- сохраняется при отключении питания;
- управляемо зарождается или коллапсирует;
- реплицируется, делясь на две части и восстанавливая первоначальную форму и размер;
- визуально и электрически регистрируется;
- дипольно взаимодействует с другими соответствующими ЦМД.

Наиболее широкое применение ЦМД нашли в устройствах памяти, позволяющих получить высокую плотность записи информации, малую потребляемую мощность, высокое быстродействие ($\sim 10^7$ с), низкую стоимость. Отсутствие движущихся носителей позволяет ЗУ на ЦМД использовать в бортовых системах.

Повышение плотности записи информации в устройствах на ЦМД-доменах может быть достигнуто за счет уменьшения диаметра домена. На доменах диаметром ~ 1 мкм созданы ЗУ с плотностью записи $\sim 10^8$ бит/см². Разрабатываются устройства с субмикронными размерами доменов.

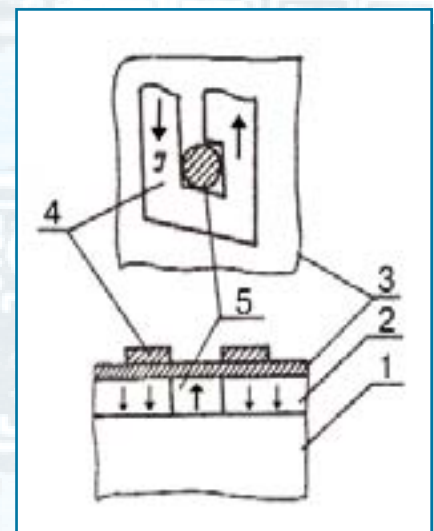


Рис. 1. Генерация доменов с помощью петли тока: 1 - подложка ГГГ; 2 - эпитаксиальная ферритовая пленка; 3 - изолирующая пленка; 4 - аппликация; 5 - ЦМД

Генерация и управление ЦМД осуществляется с помощью структур из пленки пермаллоя (Ni:Fe). Данные структуры принято называть аппликациями. Для генерации доменов используется аппликация в виде петли, по которой протекает ток (рис. 1).

При подаче импульса тока возникает электромагнитное поле, превосходящее значение рабочего поля и имеющее противоположный знак. Под аппликацией пленка локально перемагничивается и образуется домен. Петля имеет размер, соизмеримый с доменом.

По своей природе ЦМД имеет магнитное поле, которое, взаимодействуя с внешним полем, создает силы, перемещающие домен в направлении минимальной интенсивности внешнего поля. Другими словами,

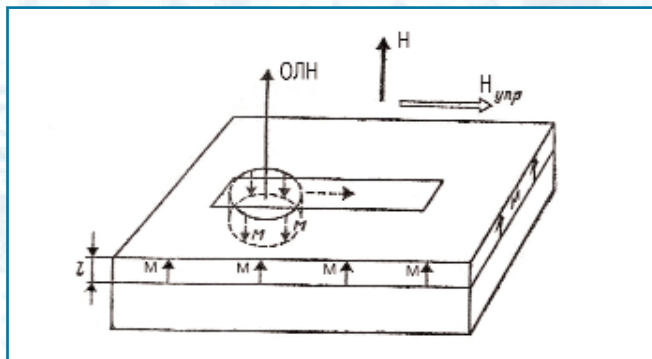


Рис. 2. Возникновение ЦМД и его взаимодействие с аппликацией

Домен перемещается в таком направлении, в котором его энергия будет минимальной (рис. 2), где ОЛН - ось легкого намагничивания.

Доменопередвигающая структура (ДПС) состоит из периодически повторяющихся аппликаций из пермаллоя. На рис. 3 показана одна из форм элемента ДПС.

Намагничивание аппликаций осуществляется внешним вращающимся магнитным полем. Выбирая форму аппликаций, их топологию, направление управляющего поля можно добиться поступательного движения ЦМД по любому, предварительно заданному, направлению. Управляющее поле создается двумя ортогональными катушками со смещенными на 90° по фазе токами.

Считывание информации сводится к выявлению динамических неоднородностей, несущих логические "0" (нет домена) и "1" (есть домен) и осуществляется в устройстве, называемом детектором. В серийных ЗУ на ЦМД применяют магниторезистивные детекторы, которые отличаются высокой надежностью, хорошей термостабильностью, широким частотным диапазоном, простотой

реализации. Сигнал с детектора усиливается микросхемой.

Конструкция ЗУ на ЦМД приведена на рис. 4. На сапфировой (Al₂O₃) подложке наносится феррит-гранатовая пленка, в которой могут образовываться домены. С помощью фотолитографии формируются токовые шины (Al), пермаллоевые (Ni:Fe) доменопередвигающие структуры. ЧИП защищен пленкой нитрида кремния (Si₃N₄).

Два постоянных магнита (3) создают в феррит-гранатовой пленке рабочее поле смещения. Две ортогональные катушки (2, 4) со смещенными на 90° по фазе токами создают управляющее поле, вращающееся по часовой стрелке в плоскости ЧИПа (1). Собранный конструкцией монтируется в корпусе (5) типа DIP с экраном от внешнего магнитного поля.

Перспективными устройствами для обработки сигналов в гигагерцевом диапазоне являются линии задержки (ЛЗ) на магнитостатических волнах (МСВ).

Линия задержки может быть использована в качестве трансверсального фильтра. Известно, что требуемую характеристику фильтра полу-

чают путем суммирования и взвешивания выходных сигналов с ряда слабосвязанных отводов. С их помощью снимают сигналы, распространяющиеся в линии задержки. Для приборов на магнитостатических поверхностных волнах волну легко ветвить в любых точках тракта распространения.

Конструктивно ЛЗ на МСВ реализуется на многослойной структуре, состоящей из сапфировой (Al₂O₃) подложки, тонкого слоя континуальной среды из железиттриевого граната (ЖИГ) и галлий гадолиниевого граната (ГГГ) (рис. 5).

На входной микрополосковый преобразователь поступает сигнал, который возбуждает МСВ, несущие с задержкой информацию на выходной микрополосковый преобразователь.

Величина задержки сигнала зависит от направления приложенного поля: при направлении поля по оси Z задержка сигнала возрастает с частотой (рис. 5б), при приложении поля вдоль оси X - задержка убывает с частотой, и, наконец, при направлении магнитного поля вдоль оси Y, генерируются МСВ, аналогичные ПАВ.

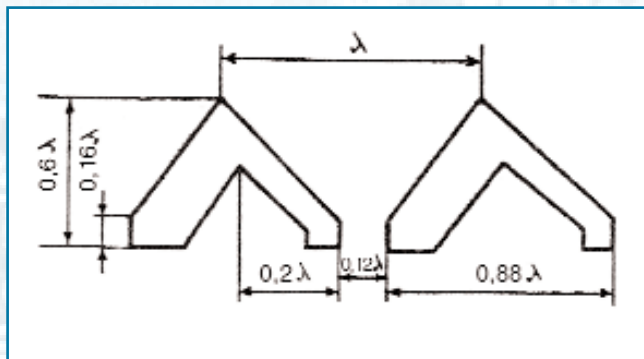


Рис. 3. Элементы ДПС $\lambda=4,6 d_{\text{НОМ}}$
 $d_{\text{НОМ}}$ - номинальный диаметр домена

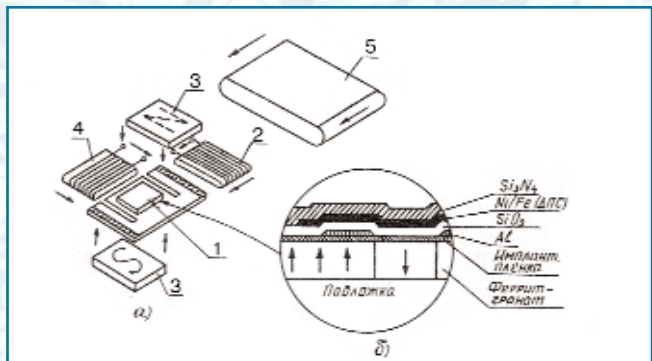


Рис. 4. Конструкция: а) микросборки ЗУ на ЦМД; б) отдельного ЧИПа

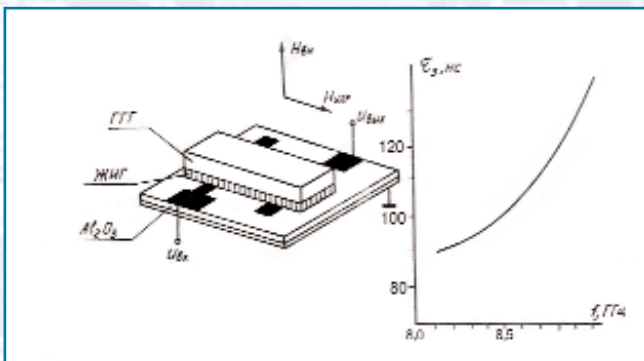


Рис. 5. Линия задержки на МСВ (а) и ее характеристика (б)

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Развитие функциональной оптоэлектроники связано с успехами в области квантовой электроники, полупроводниковой электроники, физики твердого тела, оптики. Приборы и устройства оптоэлектроники работают в диапазоне длин волн от 0,2 до 20 мкм, обычно используется диапазон от 0,4 до 1,6 мкм.

Динамические неоднородности оптической природы - носители информации - фотоны, обладают свойствами как волны (эффекты интерференции), так и частицы (квантовые взаимодействия). Фотоны электрически нейтральны, что позволяет осуществить передачу одновременно многих независимых сигналов по одному каналу без переходных помех. Высокая частота оптических волн (например, при длине волны $\lambda = 1 \mu\text{м}$, частота $\nu = 300 \cdot 10^{12}$ Гц), что обеспечивает широкую полосу модуляции, в 10^5 раз более широкую, чем в радиодиапазоне.

Оптический сигнал обладает большим числом степеней свободы (длина волны, интенсивность, фаза, поляризация) которые могут быть использованы для передачи и обработки информации. Кроме того, оптический луч является двумерным, что позволяет управлять направлением его распространения.

Пассивные континуальные среды представляют собой каналы передачи оптического сигнала - например, оптические стекла, кварц, полимеры и т.п. К активным средам относятся со-

единения, обеспечивающие генерацию излучения: GaAs, InGa, GaP, GaAlAs и др. В детекторах оптических сигналов используют fotocувствительные соединения, например, CdSe, InAs, PbS и т.д. Для модуляции и отклонения оптического излучения используются электрооптические материалы (KN_2PO_4 , LiNbO_3 , LiTaO_3), акустооптические материалы (TeO_2 , SiO_2 ...), магнитооптические материалы (EuO , MnBi , TmFeO_3 ...). К запоминающим средам можно отнести фотографические и фотохромные материалы, магнитооптические материалы, термооптические материалы, халькогенидные стекла и т.д.

ОПТРОНЫ

Оптоэлектронный процессор представляет собой совокупность оптических и оптоэлектронных элементов, выполняющий операции в соответствии с заданной функцией и алгоритмом обработки информации.

Традиционный оптрон (оптопара) соответствует предложенной модели процессора функциональной электроники. Действительно, генератором динамических неоднородностей в виде фотонов служит светоизлучающий диод. Континуальной средой служит либо воздушный промежуток между диодом и фотоприемником, либо световод. Управление можно осуществлять путем подачи соответствующего электрического импульса на светодиод и/или изменением геометрии световода. В качестве детектора динамических неоднородностей можно использовать различные фотоприемники.

Достоинства этих приборов базируются на принципе использования электрически нейтральных фотонов для переноса информации. Основные из них следующие:

- возможность обеспечения идеальной электрической развязки между входом и выходом;
- возможность реализации бесконтактного управления электронными объектами;
- однонаправленность распространения информации по оптическому каналу, отсутствие обратной реакции приемника на излучатель;

- широкая частотная полоса пропускания, отсутствие ограничения со стороны низких частот, вплоть до постоянной составляющей;
- невосприимчивость к воздействию электромагнитных полей, что исключает взаимные помехи;
- физическая и конструкторско-технологическая совместимость с другими полупроводниковыми и микроэлектронными приборами;
- малые габариты и масса.

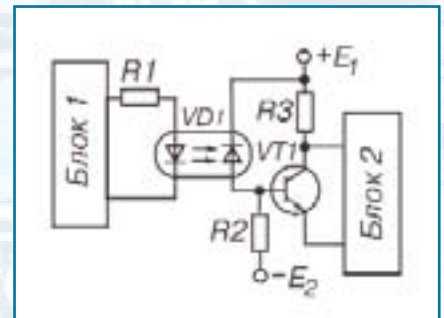


Рис. 7. Схема межблочной гальванической развязки

Оптроны применяются для связи блоков аппаратуры, между которыми имеется значительная разность

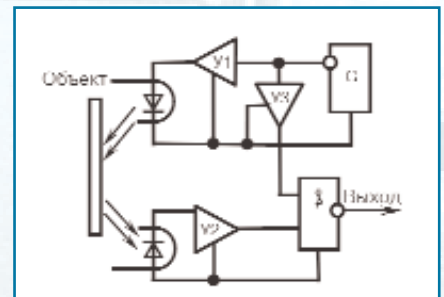


Рис. 8. Оптоэлектронный датчик

потенциалов. Оптрон с изоляцией из клея или лака выдерживает напряжение 100 - 500 В, с воздушным зазором 1 - 5 кВ, с оптическим волокном 50 - 150 кВ и более.

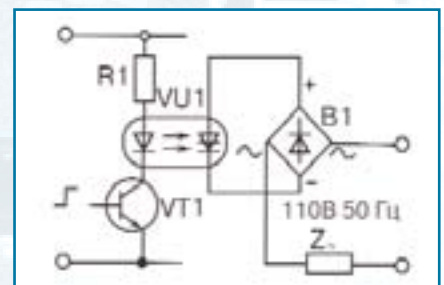


Рис. 9. Схема коммутации нагрузки переменного тока

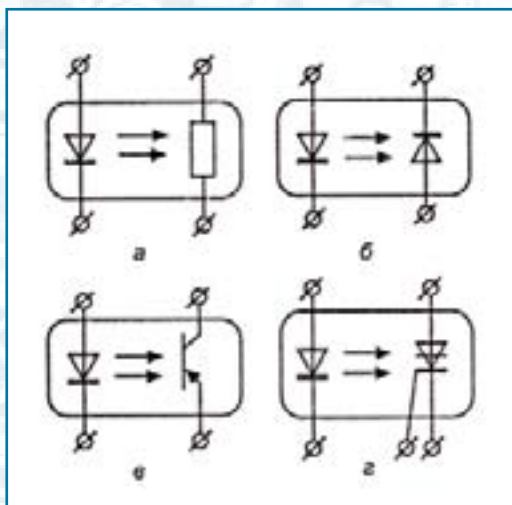


Рис. 6. Схемы элементарных оптронов: а - резисторный; б - диодный; в - транзисторный; г - тиристорный

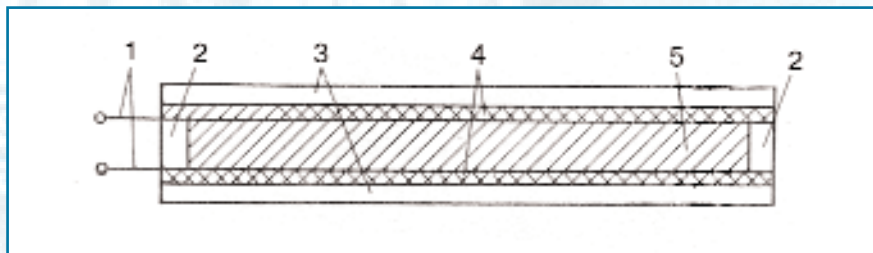


Рис. 10. Конструкция ЖКИ

Возможность изменения оптического канала при различных внешних воздействиях на него позволяет создать целую серию датчиков: влажности, загазованности, наличия жидкости в объеме, скорости перемещения и др.

На рис. 6 показаны схемы элементарных оптронов. Транзисторный оптрон обеспечивает усиление в линейном и ключевом режимах, а тиристорный перспективен для коммутации высоковольтных цепей.

Специальные виды оптронов позволяют устранять "паразитные" связи по цепям питания (рис. 7), могут использоваться в устройствах автоматического контроля и счета объектов, обнаружения дефектов и отказов и др. (рис. 8), они заменяют реле, переключатели, трансформаторы (рис. 9).

**ПРИБОРЫ
НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют промежуточную фазу (или мезофазу) между изотропной жидкостью и твердым кристаллом. Подобно обычной жидкости, они обладают текучестью и способностью принимать форму сосуда. С другой стороны, ЖК обладают и свойствами кристаллов - анизотропией, например, оптической поляризуемостью под действием внешних факторов: электрических и магнитных полей, температуры, механических деформаций и др.

Реакция ЖК на эти воздействия проявляется в изменении их оптических свойств, в связи с чем жидкие кристаллы могут применяться в приборах модуляции светового излучения и отображения информации.

Анизотропия свойств жидкого кристалла объясняется особенностью строения молекул. Для них характерна вытянутая, палочкообраз-

ная форма. Различают три группы мезофазы, и, соответственно, три вида ЖК: нематический, смектический, холестерический.

Нематические жидкие кристаллы (НЖК) имеют ориентацию длинных осей молекул в одном направлении при хаотичном расположении центров тяжести молекул. Смектические жидкие кристаллы (СЖК)



Рис. 11. Цветной многофункциональный индикатор МФИ-55

характерны тем, что в них молекулы расположены параллельно своим длинным осям и образуют слои одинаковой толщины, близкой к длине молекул (1...3 мкм). В холестерических ЖК (ХЖК) молекулы расположены также в слоях, но направление их ориентации монотонно изменяется от слоя к слою.

Жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ). В выпускаемых промышленностью ЖКИ используются электрооптические эффекты динамического рассеивания и "твист-эффект".

В индикаторах, использующих динамическое рассеивание света, при наложении электрического поля $5 \cdot 10^3 - 10^4$ В/см прозрачный НЖК мутнеет, на однородном фоне появляется рисунок, яркость которого в 10 - 40 раз превышает яркость фона.

В индикаторах на основе "твист-эффекта" при приложении электрического поля меняется прозрачность системы, состоящей из плоской стеклянной ячейки, заполненной НЖК и помещенной между скрещенными поляроидами. На слабо окрашенном фоне появляется черный рисунок.

Конструктивно (рис. 10) все типы ЖКИ состоят из тонкого (6 - 25 мкм) слоя ЖК вещества (5) между двумя стеклянными пластинками (3), одна из которых прозрачна. На внутренних поверхностях пластин нанесены прозрачные электроды (4) (из окиси олова) необходимой конфигурации, к которым присоединены выводы (1). Герметичная полимерная прокладка (2) ограничивает объем и зазор между пластинками.

У ЖКИ, работающих в проходящем свете, оба электрода прозрачны. Такие ЖКИ можно использовать для пространственной модуляции света, в качестве электрически управляемых диафрагм, затворов и др.

Для оснащения вновь разрабатываемых и модернизируемых летательных аппаратов промышленностью освоен ряд индикаторов для кабины летчика.

На рис. 11 показан многофункциональный индикатор типа МФИ-55. Индикатор отображает информацию, выдаваемую бортовыми системами и датчиками в виде цветной

Основные технические характеристики индикатора МФИ-55:	
Тип экрана	цветная ЖК-панель
Размер экрана, мм.	127x127
Количество цветных точек	480x480
Контраст изображения	80:1
Рабочий диапазон температур, °С.	от -55 до +85
Масса, кг.	не более 5

знакографической информации, а также в телевизионном режиме в условиях повышенной внешней освещенности.

МФИ содержит в своем составе графический процессор и 20 многофункциональных кнопок управления, расположенных вокруг экрана.

Управляемый оптический транспарант. Управляемые транспаранты могут быть реализованы на ЖК, если использовать структуру типа "сэндвич", в которую наряду со слоем жидкого кристалла входит слой фотополупроводника. Принцип записи изображения очень прост. В отсутствие подсветки фотополупроводника его проводимость очень мала, поэтому практически вся разность потенциалов, поданная на электроды оптической ячейки, падает на слой фотополупроводника. При этом состоянии ЖК-слоя соответствует отсутствию напряжения на нем. При подсветке фотополупроводника его проводимость резко возрастает. В результате практически все напряжение падает на ЖК-слое, и его оптические характеристики изменяются соответственно величине поданного напряжения. Такие пространственно временные модуляторы света могут выполнять ряд функций, связанных с преобразованием, хранением и обработкой оптических сигналов. Модуляторы света могут выделять контур проектируемого на него изображения и визуализировать его движение, а также могут использоваться как усилители яркости и преобразователи длины волны света и др.

ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА АКУСТООПТИКИ

В приборах и устройствах акустооптики используется взаимодействие двух типов динамических неоднородностей: акустической и оптической природы. При этом происходит дальнейшая интеграция функций на основе интеграции эффектов и, соответственно, расширение функциональных возможностей акустооптических приборов (АОП).

В основе работы АОП - дефлектора лежит явление дифракции луча света на фазовой решетке, т.е. отклонение луча от прямолинейного направления. Акустическая волна создает в континуальной среде упругие волны, что вызывает периодическое изменение коэффициента преломле-

ния среды - фазовую решетку. Изменяя характеристики фазовой решетки, можно переключать направление распространения луча, а, следовательно, и модулировать луч как по частоте, так и по интенсивности. Источником излучения во многих применениях АОП служит лазер.

Акустооптический дефлектор (рис. 12) состоит из подложки (1) (LiNbO₃). Путем имплантации Ti в подложке сформирован волновод (2). Призматические элементы (3) служат для ввода/вывода излучения. Возбуждения акустической волны в волноводе осуществляется с помощью встречно-штыревого преобразователя (ВШП) (4). Для формирования фазовой решетки 5 служит отражатель 6.

Акустические дефлекторы широко используются при обработке информации, так как имеют заданное число разрешимых фиксированных позиций (от 10 до 125) и диапазон частот до 1,5 ГГц.

Аналогично устройству акустооптического модулятора, который позволяет управлять интенсивностью, фазой, частотой и поляризацией световой волны с частотами в сотни МГц.

Акустооптические процессоры эффективно используются в задачах параллельной обработки информации в реальном масштабе времени. Такие процессоры позволяют обрабатывать сигналы с частотой до 2 ГГц при ширине полосы 0,5 - 1,0 ГГц.

Отличительной особенностью АОП является их многофункциональность, что позволяет применять их для решения самых разнообразных задач современной радиоэлектроники, в число которых входят: согласование и фильтрация сигналов, корреляционный и спектральный анализ, демодуляция и т.п. Они отличаются большим динамическим диапазоном, универсальностью, небольшими габаритами и массой, малой стоимостью.

ОПТИЧЕСКАЯ ЦИФРОВАЯ ПАМЯТЬ

Развитие информационных технологий требует применения адекватных методов записи и хранения информации. Среди различных из-

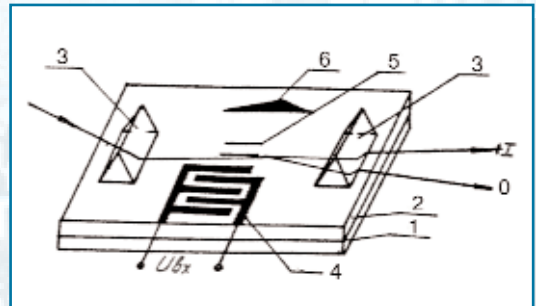


Рис. 12. Акустооптический дефлектор

вестных типов запоминающих устройств весьма перспективными являются оптические ЗУ. С появлением оптических дисков получены рекордные показатели по емкости па-

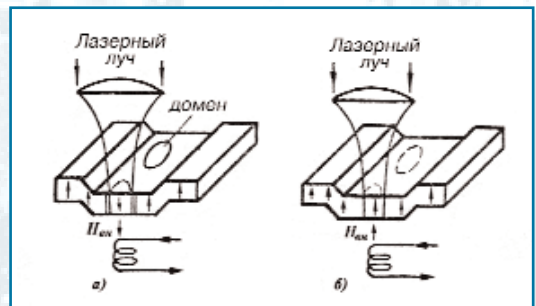


Рис. 13. Запись (а) и стирание (б) в ЗУ на оптическом диске

мяти и скорости выборки. Различают оптические ЗУ (диски) однократной и многократной записи.

Однократная запись информации. Этот принцип позволяет осуществить однократную запись и многократные считывания информации. Для этого на нижней стороне очень плоской стеклянной пластины наносится слой теллура. Две круглые стеклянные пластины юстируются относительно друг друга таким образом, что слой теллура защищен снаружи стеклянными пластинами.

На слоях теллура, находящихся на внутренних сторонах пластин, записывается информация. Пластины снабжены спиральной дорожкой (спиральной канавкой глубиной примерно $\lambda/4$), которая служит для юстировки считывающего или записывающего луча. При записи одного бита информации в слое теллура импульсно повышается мощность полупроводникового лазера за время 50 нс до 12 мВт, при этом в слое возникает отверстие диаметром примерно 1 мкм. Запись и считывание осуществляются с помощью од-

ного устройства, причем при считывании мощность полупроводникового лазера уменьшается до 1 мВт.

С помощью таких методов записи и считывания достигаются емкости запоминающего устройства (диаметр диска 30 см) 10^{10} бит информации (передняя и задняя сторона); свободно выбираемый временной интервал доступа составляет 150 мс.

При считывании микроскопических маленьких структур используются эффекты дифракции и интерференции света.

Области применения:

- запоминающее устройство для хранения банка данных с частым доступом;
- запоминающее устройство для хранения архивных данных с отсроченным доступом;
- внешнее дополнительное запоминающее устройство со свободно выбираемой адресацией в ЭВМ;
- видеодиски для обучения;
- видеодиски для библиотек и архивов;
- запоминающие диски для управления и канцелярского дела;
- аудиодиски с высококачественным воспроизведением звука.

Множественная запись информации. Существуют конструкции накопителей на оптических дисках, использующие реверсивную континуальную среду. К таким средам относятся полимерные красители, подверженные фазовым изменениям под действием лазерного излучения. Наиболее перспективными являются среды, в которых динамическая неоднородность в виде магнитного домена формируется лазерным лучом на принципах магнитооптического эффекта.

Запись информации происходит благодаря тому, что маленькие области магнитного слоя нагреваются с помощью сфокусированного лазерного луча (рис. 13а) причем одновременно накладывается внешнее магнитное поле $H_{\text{вн}} \downarrow$, напряженность которого меньше, чем коэрцитивная сила.

В нагретых таким образом при наложенном магнитном поле областях исчезает намагниченность (запись точки Кюри), т.е. появляется динамическая неоднородность в виде магнитного домена. Считывание

осуществляется таким же лазером при уменьшенной мощности, причем плоскость поляризации отраженного от диска света в зависимости от направления намагничивания маленьких областей поворачивается на величину 0.5-8 град (магнитооптический эффект Керра).

Свет, отраженный от маленьких перемангнитенных областей, является эллиптически поляризованным, и, с помощью соответствующей фазовой пластинки, преобразуется в линейно поляризованный. Линейно поляризованный свет разделяется на две составляющие, которые могут регистрироваться отдельно. Оба принятых сигнала подаются на дифференциальный усилитель и усиливаются. Усиленный сигнал прямо пропорционален поляризации эффекту Керра.

Стирание информации производится внешним полем $H_{\text{вн}} \uparrow$ (рис. 13б), также при нагревании импульсом лазерного излучения, а поляризация домена возвращается в исходное состояние. В устройстве для записи используется магнитомягкий материал, например Mn·Cu·Bi с точкой Кюри - 200° С.

Магнитооптическая запись позволяет в настоящее время иметь:

- емкость памяти запоминающего устройства 10^5 бит/см²;
- число циклов (запись, считывание, стирание) 10^6 ;
- свободно выбираемый временной интервал доступа 150 мс;
- применение в качестве оперативной памяти в ЭВМ.

Цифровое оптическое запоминающее устройство позволяет производить неразрушающее считывание накопленной информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье устройства функциональной электроники не охватывают, естественно, все направления создания и применения этих устройств. Так, весьма перспективно использование для этой цели тепловой и криоэлектроники, молекулярной и биоэлектроники, хемоэлектроники, голографии и др. По-видимому, именно функциональная электроника позволит создать принципиально новые технологии в области информационных систем - например, добиться решения проблемы искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко А.Ф. Физические основы функциональной электроники: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. Ун-та, 2000.
2. Щука А.А. Функциональная электроника: Учебник для вузов: - М.: МИРЭА, 1998.
3. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. - М.: Мир, 1987.
4. Гуляев Ю.В. и др. Физические принципы работы устройств на поверхностных акустических волнах для систем связи и обработки информации. : Радиотехника, 2002, №1, с.90-107.
5. Щука А.А. Основы интегральной электроники: Учебное пособие, - М., 1993
6. Щука А.А. Процессоры и ЗУ в функциональной электронике. - М.: ЦНИИ Электроника, 1991
7. Лисовский Ф.В. Физика цилиндрических магнитных доменов. - М.: Сов. Радио, 1979.
8. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. - М.: Радио и связь, 1990.
9. Милинкус Б.М. и др. Устройство для переключения луча света. Авт. Св. СССР №316146, 02.07.1971.
10. Милинкус Б.М. Печатающее устройство. Авт. Св. СССР №462545, 05.11.1974.
11. Милинкус Б.М. Устройство для записи информации. Авт. Св. СССР №462546, 05.11.1974.
12. Милинкус Б.М. Устройство для визуализации акустического поля. Авт. Св. СССР №683341, 11.05.1979.
13. Милинкус Б.М., Тихонов А.В. Устройство для воспроизведения механической фонограммы. Авт. Св. СССР №1176380, 01.05.1985.
14. Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. - М.: Наука, 1986.
15. Речицкий В.И. Акустоэлектронные компоненты. - М.: Радио и связь, 1987.
16. Рандошкин В.В., Червоненкус А.Я. Прикладная магнитооптика. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
17. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника. - М.: Сов. Радио, 1997.

