

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И СВЯЗЬ

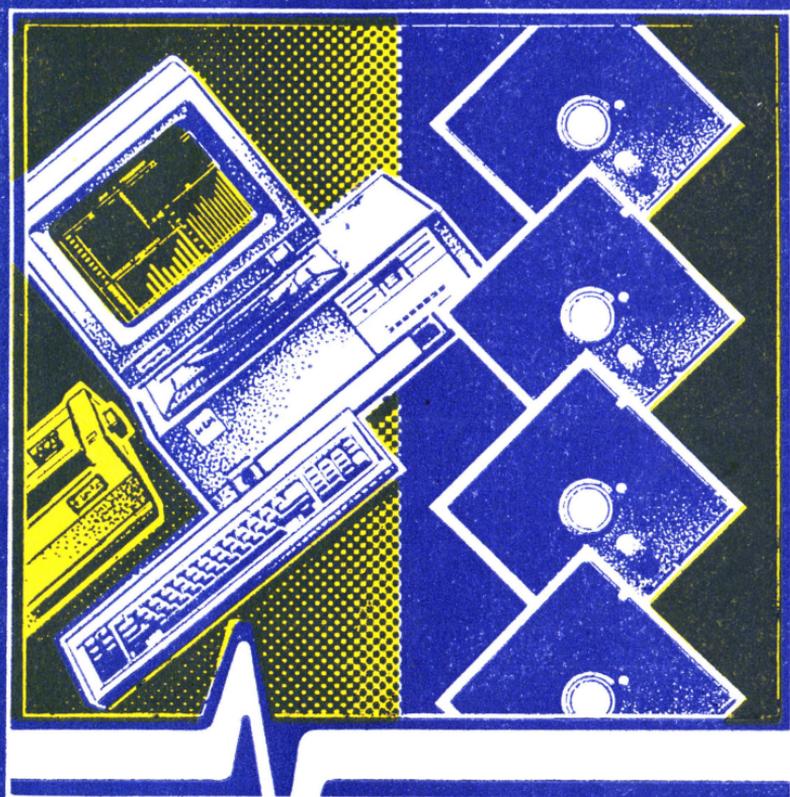
ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ 1989/2



А.А. Ерофеев,  
В.С. Ковалев

*Системы  
машинной  
памяти*

СОВРЕМЕННАЯ  
НЕТРАДИЦИОННАЯ  
ЭЛЕКТРОНИКА



**ЗНАНИЕ**

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И СВЯЗЬ

2/1989

Издается ежемесячно с 1966 г.

А. А. Ерофеев,  
В. С. Ковалев

## СОВРЕМЕННАЯ НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

(Системы  
машинной памяти)



Издательство «Знание» Москва 1989

ББК 32.973  
Е76

Авторы: ЕРОФЕЕВ Анатолий Александрович — доктор технических наук, профессор, декан, заведующий кафедры автоматики и вычислительной техники Ленинградского политехнического института, зам. председателя секции Спецвычислители радиотехнических комплексов Ленинградского отделения научного совета АН СССР по проблеме «Статистическая радиофизика». Автор 120 научных работ, 65 авторских свидетельств, трех монографий; КОВАЛЕВ Виктор Сергеевич — кандидат технических наук, начальник лаборатории. Специализируется в области техники устройств обработки сигналов. Автор около 20 научных работ и 6 изобретений.

Редактор: *Б. М. ВАСИЛЬЕВ*

**Ерофеев А. А., Ковалев В. С.**  
Е76 Современная нетрадиционная электроника (Системы машинной памяти). — М.: Знание, 1989. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Радиоэлектроника и связь»; № 2).

15 к.

Хорошо известны по многочисленным публикациям традиционные магнитные и полупроводниковые системы памяти. В этой брошюре основное внимание уделено менее известным, но достаточно интересным во всех отношениях системам ЗУ на акустоэлектронных и ПЭС-структурах, пьезоэлементах и др.

Материал брошюры будет полезен как инженерам-разработчикам, так и всем, интересующимся развитием запоминающих устройств и их применением.

2302030000

ББК 32.973

ISBN 5—07—000439—5

© Издательство «Знание», 1989 г.

## Введение

Широкое применение средств электроники и вычислительной техники стимулирует проведение глубоких фундаментальных и прикладных исследований по созданию различных классов запоминающих устройств (ЗУ). Разнообразие классов ЗУ объясняется невозможностью создания на базе единой технологии одного общего ЗУ большой емкости, которое одновременно обладало бы достаточно высоким быстродействием, приемлемыми стоимостью, надежностью и габаритными размерами.

В настоящее время создана многоуровневая иерархическая структура запоминающих устройств.

Вместе с тем полезно рассмотреть возможности повышения степени интеграции и создания гипотетических СБИС с меньшими топологическими размерами. В принципе это возможно при использовании вместо оптической литографии рентгено-, электронно-, протонолитографии или туннельных микроскопов. При дальнейшем уменьшении размеров (менее 0,01 мкм) происходит качественное изменение характера физических процессов. Транзистор в таких СБИС функционирует уже не как диффузионный прибор, а как аналог электровакуумной лампы с баллистическим переносом электронов через базу или канал транзистора.

С точки зрения быстродействия оптимальным пределом диффузионного транзистора считается объем структуры примерно в 1 мкм<sup>3</sup> при минимально возможном на уровне 10<sup>-3</sup> мкм<sup>3</sup>. Предел плотности интеграции транзисторов в настоящее время для двумерных СБИС оценивают на уровне 10<sup>8</sup> см<sup>-2</sup>; для трехмерных СБИС (многослойные структуры) 10<sup>9</sup>—10<sup>10</sup> см<sup>-3</sup>. Реальные пределы плотности интеграции ЗУ примерно на порядок ниже;

у поверхностных типов ЗУ  $10^7$  бит/см<sup>2</sup>, у объемных СБИС  $\leq 10^8 - 10^9$  бит/см<sup>3</sup>. Информационный поток данных в ЗУ может обрабатываться со скоростью  $\geq 10^8$  бит/с с учетом системной организации вычислительного процесса.

Субмикронная область с линейными размерами менее 0,1—0,05 мкм для классических структур СБИС рассматривается сегодня как область фундаментальных технологического и физического барьеров. Технологического в том смысле, что оптическая литография уже не обеспечивает необходимых пределов разрешения, а физического — что при размерах менее примерно 0,01—0,005 мкм на первый план выступают квантовомеханические туннельные явления. Структуры с туннельно-тонкими слоями (порядка 2—3 нм), например типа металл — диэлектрик — металл, потенциально позволяют кодировать информацию атомами. Однако при этом встает вопрос создания новой технологии и живучести таких структур из-за высокой плотности тока, сильных электрических полей, высоких температур и других факторов, способствующих их деградации.

В настоящее время освоены или осваиваются полупроводниковые ОЗУ и ПЗУ с емкостью в корпусе до 1 Мбит. Даже если расчет вести на использование микросхем ЗУ емкостью в 1 Мбит, то для создания полностью полупроводниковой машинной памяти больших ЭВМ (типа супер-ЭВМ) должно потребоваться нереальное их количество — около  $10^6 - 10^3$  корпусов. Таким образом, современный уровень создания полупроводниковых ЗУ не позволяет полностью обеспечить однородную машинную память. Поэтому сегодня и в ближайшем будущем в качестве внешней памяти будет доминировать магнитная память. Однако переход от приборов диффузионного типа к баллистическим и далее к туннельным создаст реальные перспективы в решении этой проблемы в будущем. Так, при реализации в корпусе плотности интеграции на уровне  $10^{13}$  или  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> вся машинная память супер-ЭВМ будет размещаться в 1—2 корпусах квантовых интегральных микросхем. При этом скорость обработки данных будет составлять до  $10^{12}$  оп/с. Появление первых микросхем такого типа ожидается в ближайшие 10 лет.

Приведенная выше краткая характеристика магнитных и полупроводниковых ЗУ важна для правильной

оценки состояния и перспектив прогрессивных нетрадиционных устройств памяти, базирующихся на использовании элементов и устройств функциональной электроники (ФЭ).

Основными направлениями развития функциональной электроники являются акусто-, пьезо- и магнитоэлектроника, акусто- и магнитооптика, интегральная оптика и оптоэлектроника, криоэлектроника, биотроника, хемотроника, приборы с зарядовой связью. Характеристики существующих типов запоминающих устройств в координатах емкость памяти — время выборки представлены на рис. 1 вместе с характеристиками ЗУ на принципах схмотехнической электроники.

## Запоминающие устройства на приборах с зарядовой связью

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) являются одним из вариантов МДП-технологии, тем не менее они занимают особое место среди устройств микроэлектроники.

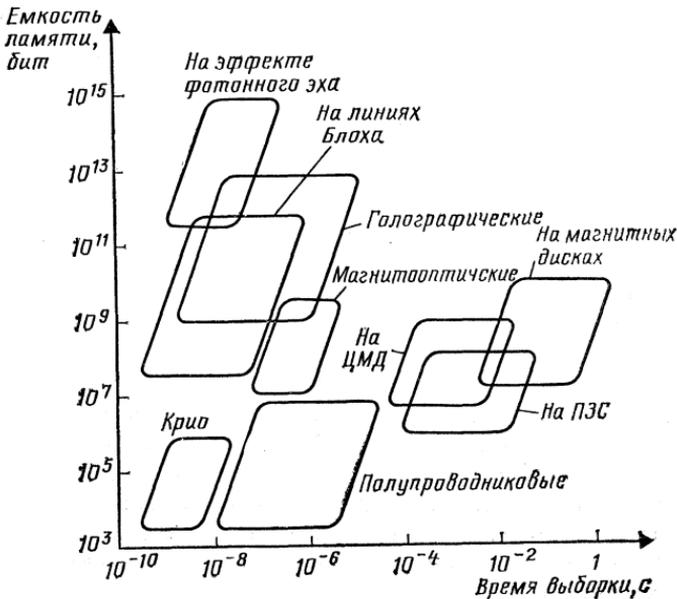


Рис. 1. Области распределения типов ЗУ

Основная причина выделения ПЗС в общей иерархии микроэлектронных приборов в том, что по принципу действия их относят к изделиям функциональной электроники. ПЗС представляют собой устройство с МДП-структурой без переходов, внешняя информация в котором (электрические или оптические сигналы) преобразуется в зарядовые пакеты. Континуальной средой в ПЗС является приповерхностный слой полупроводника, на который нанесены статические неоднородности, имеющие периодический характер, — управляющие электроды. При подаче на них соответствующих напряжений (тактовых импульсов) в слое полупроводника образуются потенциальные ямы, или «карманы», — динамические неоднородности. Через специальные устройства ввода-вывода, создаваемые в кристалле технологическими методами (статические неоднородности), потенциальные ямы могут быть заполнены динамическими неоднородностями в виде пакета зарядов. Факт наличия или отсутствия заряда в потенциальной яме несет информацию в дискретной форме, а величина заряда — в аналоговой. Таким образом, информация в ПЗС представляется в виде зарядовых пакетов, возбуждаемых в приповерхностном слое полупроводника. Зарядовыми пакетами легко управлять: их можно перемещать по поверхности, делить, складывать, преобразовывать и т. п.

Минимальная тактовая частота определяется диапазоном 0,1—1 кГц, а максимальная — для рассмотренных ПЗС с поверхностным каналом переноса — достигает 5—10 МГц. ЗУ на ПЗС потребляют мощность только в режиме передачи заряда (5—10 мкВт), в режиме хранения информации энергетические затраты практически равны нулю.

Существуют ПЗС и с объемным каналом переноса, в котором зарядовые пакеты передвигаются на некотором удалении от поверхности раздела. Тактовая частота таких ПЗС достигает 100 МГц. Недостатком ПЗС с объемным каналом переноса является меньшая управляющая способность из-за удаления зарядового пакета от тактовых электродов. К настоящему времени продемонстрированы лабораторные макеты ПЗС с верхней тактовой частотой до 1 ГГц.

Использование в ПЗС динамических неоднородностей (зарядовых пакетов) для выполнения основных функций обработки и хранения информации определяет

их следующие принципиальные достоинства: топологическая простота; одинаковость и регулярность размещения элементов, приводящие к наивысшей для СБИС степени интеграции; возможность оперирования с аналоговой и цифровой информацией и реализации многоуровневой логики; сочетание функций хранения и обработки информации по мере ее направленного распространения; возможность параллельного ввода больших массивов информации как электрическим, так и фотоэлектрическим способом, в том числе и соответствующих двумерным изображениям; совместимость с приборами, использующими иную «физику» явлений и возможность создания физически неоднородных континуальных сред, например, ПЗС с жидкокристаллическими элементами или ПЗС с элементами на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Рассмотрим примеры разработанных к настоящему времени ЗУ на ПЗС.

**Специализированные ЗУ на ПЗС.** Последовательный характер обращения информации в ЗУ на ПЗС определяет их меньшее быстродействие, чем у ЗУ с произвольной выборкой (ЗУПВ). Однако потребляемая мощность ЗУ на ПЗС ниже при более высокой степени интеграции элементов на кристалле.

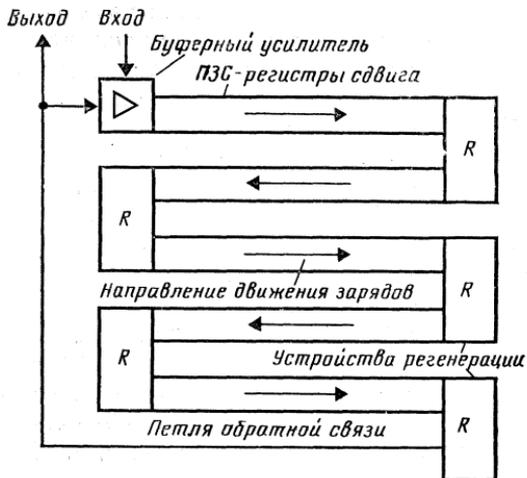


Рис. 2. Функциональная схема ЗУ с серпантинно-петлевой организацией

Существующие серийные ЗУ на ПЗС с последовательной выборкой по способу организации памяти можно разбить на три класса: ЗУ с серпантинно-петлевой (СП) организацией; ЗУ с последовательно-параллельно-последовательной организацией (ППП); ЗУ с произвольной выборкой и строчной адресацией (ПВСА).

**Архитектура СП ЗУ** показана на рис. 2. Она представляет собой цепь последовательно соединенных ПЗС-регистров сдвига, управляемых синхронно общими тактовыми импульсами и замкнутыми в кольцо посредством петли обратной связи. Между регистрами предусмотрены устройства регенерации. Информация на входе и выходе имеет одну и ту же частоту, равную тактовой частоте управления. Число элементов регистра между регенераторами выбирается исходя из эффективности передачи заряда и минимальной тактовой частоты, используемой в режиме холостого хода. Максимальное время выборки из памяти определяется общим числом элементов в цепи и максимальной тактовой частотой.

Основным достоинством такой организации является схемотехническая простота. Однако необходимость большого числа передач заряда и относительно высокая потребляемая мощность из-за одновременного тактирования всех регистров практически ограничивают емкость ЗУ величиной 512 бит. Кроме того, серпантинно-петлевая организация в принципе не обеспечивает высокой плотности упаковки элементов из-за встречного направ-

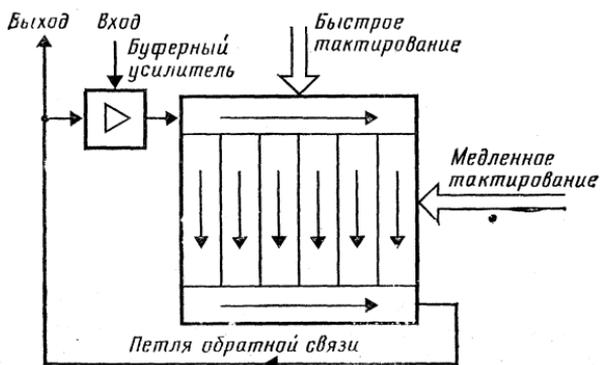


Рис. 3. Функциональная схема ЗУ с последовательно-параллельно-последовательной организацией

ления движения заряда в соседних регистрах и необходимости включения большого числа схем регенерации, увеличивающих площадь кристалла примерно на 25%.

**Архитектура ППП ЗУ** показана на рис. 3. Информация вводится в верхний последовательный регистр сдвига, заполняет его и в параллельной форме сдвигается в первую строку матрицы параллельных регистров, а затем продвигается к нижнему последовательному регистру сдвига, откуда в последовательной форме поступает на выход ППП ЗУ. Передача информации в параллельной форме по внутренней матрице позволяет значительно уменьшить количество передач при обращении того же объема информации, что и в последовательных ЗУ с серпантинно-петлевой организацией. Потребляемая в режиме обращения мощность также снижается, поскольку в матрице информация передается с низкой тактовой частотой. Недостатком такой организации является усложнение управления, поскольку необходимы две системы тактовых импульсов: одна — для высокоскоростных входного и выходного регистров, вторая — для низкоскоростных параллельных регистров матрицы.

ППП-организация потенциально позволяет создать ЗУ с очень высокой плотностью упаковки элементов, площадь которых ограничивается лишь шириной каналов переноса.

**Архитектура ЗУ с ПВСА.** В ЗУ на ПЗС с произвольной выборкой и строчной адресацией тактовые импульсы подаются только на одну выбранную строку, а остальные строки остаются в исходном состоянии. При этом устраняется основной недостаток рассмотренных выше архитектур ЗУ на ПЗС, связанный с большой емкостной нагрузкой на тактовые генераторы, когда управляющие тактовые импульсы одновременно воздействуют на все ПЗС-регистры ЗУ. При этом устраняется и главное следствие этого недостатка — ограниченное быстроедействие ЗУ на ПЗС.

Организация ЗУ с ПВСА подобна организации ЗУ с произвольной выборкой — ЗУПВ, за исключением того, что произвольная выборка осуществляется не с каждого двоичного регистра (бита), а с каждого ПЗС-регистра сдвига (строки).

Выбор строки, к которой происходит обращение, осуществляется с помощью адресного дешифратора. Для

всех строк требуется одна общая входная и одна общая выходная шины, что упрощает компоновку схем обслуживания. Все строки независимы, и передача информации в каждой из них может быть остановлена на любом разряде, что позволяет перевести адресацию с одной строки на другую без предустановки первой строки в исходное состояние. В произвольный момент времени тактовое напряжение подается только на выбранную строку, при этом обеспечивается одновременно периодическое восстановление, рециркуляция, а также запись и считывание информации. Таким образом, помимо повышения быстродействия достигается снижение потребляемой мощности, поскольку основная ее часть приходится на циклы регенерации информации в безадресных строках.

Основным недостатком ЗУ с ПВСА-организацией по сравнению с первыми двумя является более высокая чувствительность к действию локальных неоднородностей темного тока, поскольку большую часть времени информация в ПЗС-регистрах остается неподвижной. Это цена, которую приходится платить за малое время выборки и потребляемую мощность.

Малое время выборки и низкая потребляемая мощность позволяют считать перспективным ЗУ с ПВСА при создании больших сдвиговых регистров, буферной памяти, ЗУ с квазипроизвольной блочной выборкой, со специальной организацией.

В качестве примера ЗУ со специальной организацией, когда производится не только запись, но и обработка информации, можно привести архитектуру, в которой запись информации производится последовательно по строкам ЗУ, а считывание осуществляется последовательно по столбцам. Подобная организация ЗУ требуется, например, в радиолокации, когда номер ячейки памяти в строке характеризует дальность, а номер строки — азимут того элементарного объема пространства, с которого были приняты эхо-сигналы.

**Многоуровневые ЗУ на ПЗС.** Выпускаемые промышленностью ЗУ на ПЗС работают с двухуровневым сигналом. Однако аналоговая сущность ПЗС, работающих с дискретизированным аналоговым сигналом, и относительно низкий уровень собственных шумов делают ЗУ на ПЗС привлекательными для хранения и передачи многоуровневых сигналов с использованием многознач-

ной логики. Известно, что для уменьшения количества и объема межсоединений в СБИС необходимо увеличить информационное содержание сигналов, передаваемых по каждому соединению. Первый подход, состоящий во временном мультиплексировании, в основном применяется на уровне межкристальных соединений. Второй подход, состоящий в мультиплексировании логических уровней, можно использовать во внутренних межсоединениях.

Основной проблемой при разработке многоуровневых ЗУ на ПЗС является создание эффективных устройств считывания и регенерации сигналов. Обычно регенератор многоуровневого сигнала представляет собой комбинацию АЦП и ЦАП. Распознавание уровней сигналов в блоке АЦП может быть выполнено последовательным или параллельным сравнением многоуровневого сигнала с опорными сигналами с помощью стробируемых триггеров.

ЗУ на ПЗС с многоуровневой логикой и емкостью 128 К было изготовлено фирмой Mitsubishi Electric Co. При этом выяснилось, что технологические разбросы и допуски на напряжение питания оказывают весьма сильное влияние на характеристики входных и выходных интерфейсов ЗУ схем записи и считывания. Для уменьшения ошибок из-за рассогласования параметров фирма ИВМ предложила преобразователь в схеме записи использовать также и при считывании информации. Входной преобразователь имеет емкостную связь с электродом от общей потенциальной ямы, используемой как для генерации, так и для детектирования зарядовых пакетов. Для записи информации преобразователь просто вводит соответствующее количество заряда в эту потенциальную яму, из которой заряд затем сдвигается в регистр. При считывании информации в предварительно опустошенную яму из регистра вводится зарядовый пакет, а затем через преобразователь производится пошаговое заполнение ямы зарядом. Часть заряда, превысившая край потенциальной ямы, запускает триггер, который и указывает величину считываемого заряда.

Рециркуляционный сдвиговый регистр в ЗУ фирмы ИВМ выполнен в виде ППП-кольцевой структуры так, чтобы вход и выход ЗУ находились рядом. Наряду с более высоким быстродействием и меньшим числом элементов управления были практически исключены все

эффекты, связанные с погрешностями геометрических размеров.

Следует отметить, что хранение в каждом элементе памяти двух бит информации с использованием четырехуровневого сигнала удваивает емкость ЗУ, в то время как хранение трех бит при восьмиуровневом кодировании увеличивает плотность записи информации всего на 50%. Вопрос о том, какое число уровней сигнала свыше четырех можно использовать в ЗУ на ПЗС, является спорным, если только не будут разработаны более чувствительные компараторы сигнала, чем обычные триггеры.

**Постоянные и репрограммируемые ЗУ на ПЗС (ПЗУ и РПЗУ).** В рассмотренных ЗУ на ПЗС информация непрерывно циркулирует по накопительным регистрам. В ПЗУ и РПЗУ снижены требования, обусловленные переносом и воспроизведением зарядов. Для примера рассмотрим некоторые конструкции таких ЗУ.

Постоянное запоминающее устройство на ПЗС состоит из накопителя с однократно записанной информацией и системой вывода на ПЗС-регистрах. Наибольшие на сегодняшний день возможности по записи информации обеспечиваются двумя способами: изменением площади электродов МНОП-конденсаторов или встроенным в диэлектрик зарядом.

В первом случае конденсаторы постоянной памяти непосредственно связаны с регистром вывода. Для считывания информации на выбранные конденсаторы подается напряжение и в них накапливается заряд, пропорциональный площади электрода. Затем напряжение подается на соответствующие электроды выходного регистра. Происходит перенос параллельного кода в регистр, который тактируется и передает информацию последовательно к выходному усилителю.

Во втором случае элементы хранения информации совмещены с электродами переноса. Записанные в подэлектродный диэлектрик заряды обуславливают различное пороговое напряжение у электродов и одновременно различную управляющую способность. При подаче напряжения на электроды под ними образуются потенциальные ямы соответствующей глубины — так называемый потенциальный рельеф. По заполнении потенциальных ям зарядами (за счет естественной термогенерации или искусственных «опрашивающих» зарядов) потен-

циальный рельеф отображается в зарядовый, который и считывается. Такие ЗУ обеспечивают емкость хранения  $10^6$ — $10^7$  бит/кристалл с темпом выдачи информации 1—10 МГц.

Если переделать конструкцию элемента хранения так, чтобы можно было изменять величину заряда в диэлектрике, появится возможность создания на основе ПЗС репрограммируемых ПЗУ. Как и в РПЗУ на МДП-транзисторах, здесь имеются две реальные возможности: диэлектрик с захватом заряда и диэлектрик со встроенным плавающим затвором.

Изготовленные по такой топологии РПЗУ имели емкость памяти 128 Кбит с плотностью записи информации  $5 \cdot 10^5$  бит/см<sup>2</sup>, минимальном топологическом размере ПЗС 5 мкм и площадью МНОП-конденсаторов  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup>.

ЗУ на ПЗС с произвольной выборкой по считыванию позволяет считывать информацию из произвольной ячейки матрицы памяти на ПЗС. Перспективным вариантом построения элемента памяти такого ЗУ является объединение ПЗС-элемента с каналным транзистором. При этом осуществляется так называемое токовое считыва-

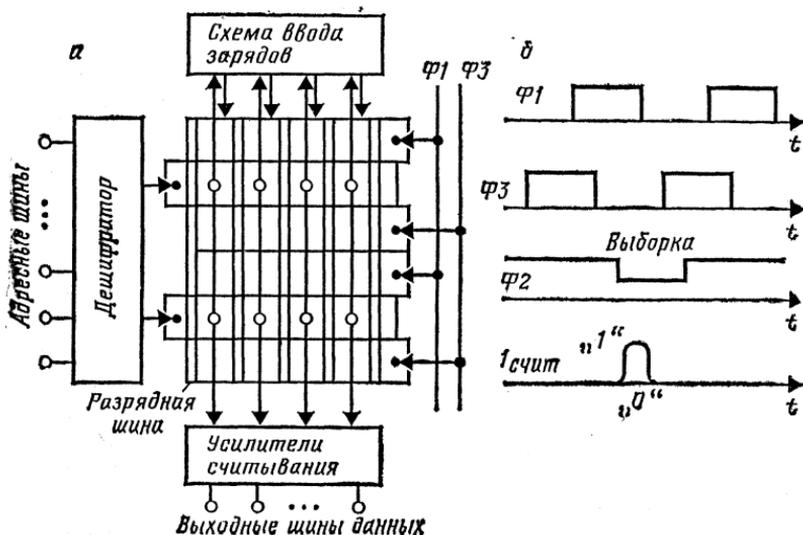


Рис. 4. Структурная схема ЗУ на ПЗС с произвольной выборкой по считыванию (а) и временная диаграмма его работы (б)

ние, когда заряд памяти модулирует протекающий в элементе памяти ток. Ориентация канала транзистора по отношению к каналу ПЗС произвольная (вертикальная или горизонтальная); часть областей, входящих в обе структуры, может быть общей. Структурная схема с токовым считыванием приведена на рис. 4,а. Накопитель представляет собой трехфазную матрицу ПЗС, все элементы второй фазы содержат транзисторы с вертикальным каналом. Стоки транзисторов каждого столбца объединены разрядной шиной, подсоединенной с одной стороны к усилителю считывания, а с другой — к схеме ввода заряда. Electroды второй фазы связаны с выходами адресного дешифратора. В режиме хранения на них поддерживается постоянное напряжение, равное половине тактового. Для считывания информации напряжение на выбранном электроде второй фазы снижается примерно в 2 раза (рис. 4,б), так что при наличии заряда в элементе памяти канал отпирается и в соответствующей разрядной шине возникает ток, который регистрируется.

Для реализации ЗУ с произвольной выборкой по записи необходимо в каждом элементе матрицы памяти на ПЗС иметь управляемый источник заряда. Использование для этой цели *p-n*-перехода приведет к тому, что ЗУ превратится в БИС МДП-технологии, сходную с современными динамическими МОП ЗУ. Для того чтобы остаться в пределах ПЗС-технологии, необходимо искать другие решения. Одно из них состоит в введении в состав каждого элемента матрицы памяти двух ячеек памяти: местоположение зарядового пакета в одной из двух ячеек определяет логическое состояние элемента памяти. Периодическая регенерация в отличие от динамических МДП ЗУ заключается во временном сливании зарядов ячеек (полезного и термогенерированного) в одну потенциальную яму, удерживающую только определенный заряд, с дальнейшим возвращением этого восстановленного заряда на место информационного.

На основе рассмотренного элемента памяти возможно создание матричного многофункционального ЗУ на ПЗС, которое позволяет обращаться как к отдельному элементу памяти, так и к массиву элементов. При одновременной выборке через многоадресный дешифратор (рис. 5) нескольких элементов матрицы по шинам считывания выполняется функция «проводное И», а в са-

них элементах производится одна и та же операция. Для организации взаимодействия между различными разрядами чисел можно использовать сдвиг шин считывания по отношению к шинам записи. Подобные многофункциональные ЗУ на ПЗС наиболее подходят для систем с поразрядной обработкой данных.

Вариант ассоциативного ЗУ на ПЗС, состоящего из устройства ассоциативного поиска с адресной шиной считывания и адресуемого накопителя на основе обычных элементов с разрядной шиной считывания, представлен на рис. 6. Все совпадения кодов в устройстве ассоциативного поиска фиксируются в специальном регистре, связанном с адресными формирователями накопителя, которые по сигналам управления завершают цикл ассоциативной выборки.

Все рассмотренные ЗУ на ПЗС благодаря простоте конструкции, высокой плотности элементов, низкой по-

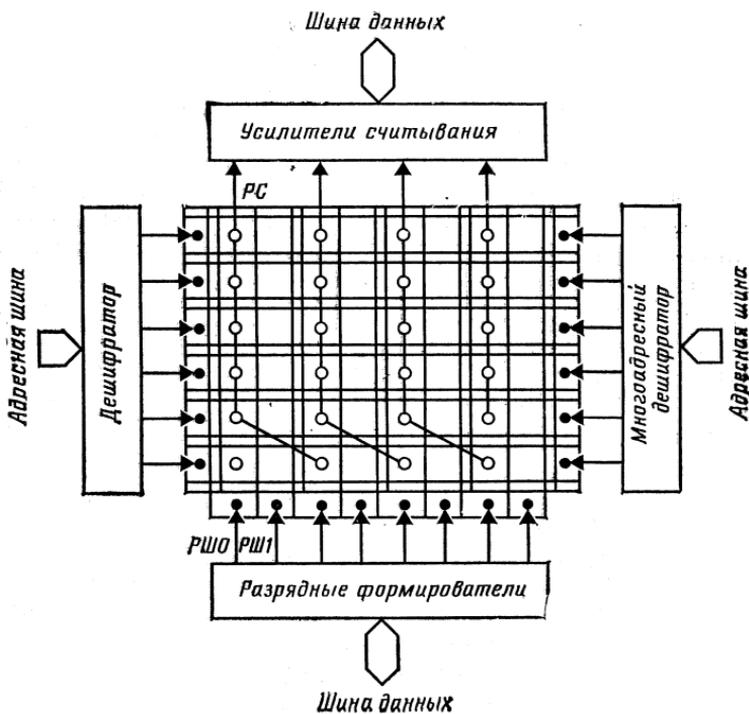


Рис. 5. Структурная схема многофункционального ЗУ на ПЗС

требуемой мощности, по-видимому, найдут широкое применение в системах хранения и обработки больших массивов информации среднего быстродействия (10—100 нс).

ЗУ на ПЗС перспективны в качестве внешних ЗУ мини- и микро-ЭВМ, а также буферных устройств, включаемых между «медленной» внешней памятью сверхбольшой емкости и быстродействующими оперативными ЗУ. Благодаря высокой скорости передачи последовательных данных ПЗС идеально подходят для системы регенерации изображения на цифровых дисплеях, используемых в терминалах ЭВМ и видеоиграх.

Необходимо отметить, что интегральные ЗУПВ, технология которых является более зрелой, имеют довольно низкую удельную стоимость (стоимость, отнесенную к объему памяти). Поэтому с точки зрения конкурентоспособности ЗУ на ПЗС должны быть примерно в 4 раза дешевле ЗУПВ. Однако в тех применениях, где требуется ЗУ с последовательной выборкой, ЗУ на ПЗС

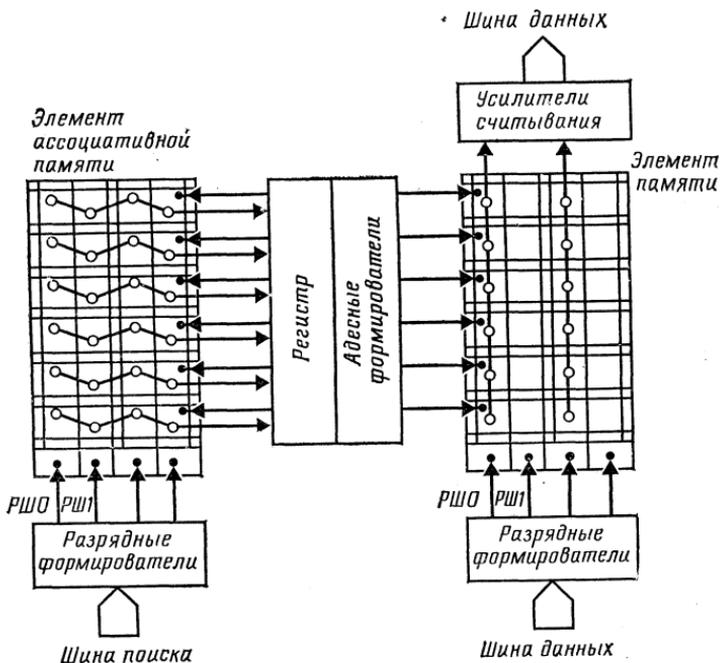


Рис. 6. Структурная схема ассоциативного ЗУ на ПЗС

конкурентоспособны с ЗУПВ даже при одинаковой стоимости.

## Акустоэлектронные запоминающие устройства

Акустоэлектронные запоминающие устройства (АЗУ) являются многофункциональными устройствами и предназначены как для запоминания сигналов, так и для корреляционной и фильтрационной обработки. АЗУ относятся к типу нелинейных акустоэлектронных устройств и в большинстве случаев реализуются на основе нелинейных взаимодействий поверхностных акустических волн (ПАВ) высокой частоты (1 МГц — 10 ГГц) с носителями тока в твердых телах (в слоистых структурах пьезоэлектрик — полупроводник). В АЗУ последовательно осуществляются с помощью ПАВ операции записи, хранения информации и ее считывания, причем время памяти, в зависимости от механизма записи, может достигать 1000 часов.

По принципу действия АЗУ относятся к устройствам функциональной электроники, носителями информации в которых являются динамические неоднородности в виде зарядов объемных или поверхностных ловушек полупроводников (зарядовые пакеты, формируемые с помощью электронного пучка и заряда диодов). При распространении ПАВ образуются динамические неоднородности в виде смещения атомов в однородной кристаллической решетке и связанных с этим соответствующих электрических полей. При нелинейном взаимодействии электрических полей, вызванных ПАВ, с носителями тока в полупроводнике в приповерхностном слое полупроводника происходит модуляция плотности заряда ловушек. Образующийся заряд представляет собой динамическую неоднородность, которая может сохраняться достаточно долгое время даже при комнатных температурах.

АЗУ обладают многими преимуществами, свойственными акустоэлектронным приборам на ПАВ: простотой конструкции, высокой стабильностью характеристик, малым потреблением мощности, большой полосой рабочих частот. Относительно небольшая скорость распространения ПАВ по сравнению с электромагнитными волнами

обеспечивает возможность компрессии сигнала (до  $10^5$  раз) на пути распространения; это позволяет создавать миниатюрные устройства. АЗУ значительно превосходят традиционные линии задержки на ПАВ по времени хранения информации и способны вместить большой объем информации.

Первоначально АЗУ разрабатывались прежде всего как средство хранения аналоговых и цифровых сигналов, позднее стало очевидно, что наиболее целесообразно совместить в АЗУ функцию памяти с функцией обработки поступающих сигналов. Стремительное развитие АЗУ в последнее время обусловлено прежде всего именно перспективностью их применения в устройствах обработки сложных радиосигналов.

Рассмотрим методы записи и считывания информации с возможностью корреляционной обработки, а также особенности конструкций и характеристики двух основных типов АЗУ: с памятью на многослойных структурах и с памятью на диодных матрицах.

**Запись и считывание сигналов в АЗУ.** Существует ряд способов записи и считывания информации, которые можно разделить на две группы: импульсные и параметрические. В реальных устройствах, в зависимости от алгоритма обработки, могут применяться комбинации способов записи — считывания. Рассмотрим работу АЗУ слоистой структуры пьезоэлектрик — полупроводник (рис. 7).

АЗУ имеет три сигнальных вывода: два акустических входа/выхода 1, 3 и параметрический вход/выход 2. На выводах могут присутствовать следующие высокочастотные (ВЧ) сигналы: входной сигнал  $S(t)$  (здесь и далее



Рис. 7. Акустоэлектронное ЗУ на основе слоистой структуры пьезоэлектрик — полупроводник

будем иметь дело с комплексными амплитудами); сигнал записи  $W(t)$ ; сигнал считывания  $R(t)$  и выходной сигнал  $U(t)$ . Ограничим рассмотрение способов записи и считывания теми, при которых в элементарном акте взаимодействия участвуют только три волны, что характерно для большинства практических устройств.

При импульсном методе записи на вход 1 АЗУ подается ВЧ сигнал  $S(t)$ , который преобразуется в ПАВ. Распространяясь вдоль устройства, ПАВ сопровождается поперечным электрическим полем, которое приводит к локальным изменениям плотности заряда в приповерхностном слое полупроводника. В некоторый момент времени на вывод 2 подается сигнал записи  $W(t)$  той же частоты. Тогда вследствие нелинейного взаимодействия двух сигналов возникает электрический ток разностной (нулевой) частоты, вызывающий заряд поверхностных ловушек полупроводника или матрицы диодов, причем вид функции распределения заряда  $Q(z)$  соответствует функции корреляции входного и записываемого сигналов.

Параметрические методы записи основаны на процессах нелинейного взаимодействия волн. При этом сигналы одинаковой частоты  $S(t)$  и  $W(t)$  подаются на акустические входы 1 и 3 устройства, где они преобразуются во встречные ПАВ. После окончания процесса записи распределение заряда в приповерхностном слое полупроводника  $Q(z)$  будет соответствовать функции взаимной корреляции входных сигналов. Процесс интегрирования может быть весьма длительным, что дает возможность выполнить корреляционную обработку сигналов, пространственная протяженность которых значительно превышает размер области взаимодействия под параметрическим электродом.

Для считывания сигнала, записанного в виде распределения зарядов в приповерхностном слое полупроводника, могут быть применены те же методы, что и при записи. При импульсном считывании на параметрический электрод 2 подается сигнал считывания  $R(t)$ , который взаимодействует с зарядом памяти  $Q(z)$ , изменяя структуру локальных деформаций в пьезоэлектрике. В результате взаимодействия возбуждаются две ПАВ, одна из которых распространяется к выводу 1, а другая — к противоположному выводу 3. После преобразования ПАВ в радиосигналы на выводе 1 будет зарегистриро-

ван сигнал корреляции  $V_1(t)$ , а на выводе 3 — сигнал свертки  $V_2(t)$  записанного и считывающего сигналов. Таким образом, при импульсном считывании может быть осуществлена корреляционная обработка сигналов. Если необходимо получить на выходе копию записанного сигнала, на параметрический вывод 2 подается короткий ВЧ импульс, ширина полосы которого не уже полосы записанного сигнала. В результате на выводе 1 регистрируется требуемая копия, а на выводе 3 — ее временная инверсия.

Параметрическое считывание основано на нелинейном смешивании в полупроводнике электрических полей статического заряда памяти  $Q(z)$  с ВЧ полем считывающей ПАВ. При подаче считывающего сигнала  $R(t)$  на акустический вход 1 на параметрическом выводе 2 будет зарегистрирована функция корреляции записанного и считывающего сигналов, а при возбуждении ПАВ с акустического входа 3 — интеграл свертки этих же сигналов.

Для трехволновых взаимодействий, при которых осуществляется функция простой памяти, можно провести аналогию с процессами записи и считывания в голографических ЗУ. Функцию опорной волны в АЗУ выполняет ВЧ сигнал на параметрическом электроде или встречная ПАВ соответственно при импульсном или параметрических методах. В записанном сигнале, как и в голографических ЗУ, сохраняется информация об ампли-

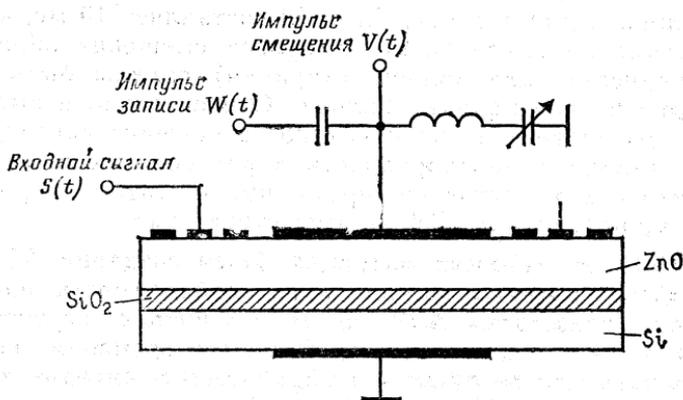


Рис. 8. Акустоэлектронное ЗУ на многослойной структуре

тудном и фазовом распределениях входного сигнала, которые восстанавливаются при считывании.

**АЗУ на многослойных структурах.** Многослойные структуры имеют повышенную степень интеграции. В настоящее время наибольшее распространение получили структуры (рис. 8), в которых подложкой служит кремний или арсенид галлия, а на подложку нанесен тонкий слой окиси цинка. Промежуточный слой окиси служит защитным покрытием для объема Si и границы раздела Si—SiO<sub>2</sub> в технологическом процессе.

Запись можно производить импульсным или параметрическим способом. Первоначально производят запись входного сигнала в виде статического распределения заряда на поверхностных ловушках полупроводника. При этом в случае необходимости можно стереть записанный сигнал и заменить его новым, т. е. скорость обращения информации на этом этапе достаточно высокая при небольшом времени памяти. Согласно оценкам в случае кремния наибольшее время памяти при комнатной температуре составляет 1—10 мс, а минимальное время записи — 10<sup>-9</sup> с. Для GaAs время памяти может достигать 50—500 мс. На втором этапе записи к АЗУ прикладывается импульс  $V$  отрицательного напряжения, который приводит к переносу статического заряда из ловушек полупроводника на более глубокие энергетические уровни ZnO. Время памяти информации в этом режиме достигает 10 и более часов.

Оптимальная длительность записывающего импульса смещения для структур Zn—Si составляет 10 мс, а при считывании длительность импульса смещения обратной полярности (для полного стирания) должна быть примерно на два порядка больше. Относительно невысокое быстродействие, а также низкое отношение сигнал/шум на выходе и неоднородность характеристик вдоль поверхности в настоящее время препятствуют широкому распространению АЗУ на этих структурах.

**АЗУ на диодных матрицах.** Идея создания АЗУ на диодных матрицах возникла из необходимости преодоления недостатка АЗУ на многослойных структурах, связанного с относительно большим временем заряда ловушек, что не позволяет обрабатывать сигналы с шириной полосы 100 МГц и более. Применение вместо полупроводника матриц на диодах Шотки, обладающих

временем восстановления при прямом смещении  $0,1—1,0$  нс, позволяет записывать в АЗУ сигналы с полосой до нескольких сот мегагерц.

Структура АЗУ на основе диодной матрицы представлена на рис. 9. В АЗУ при распространении ПАВ возникает электрическое поле, которое приводит к локальным изменениям заряда на поверхности кремния. При нулевом или обратном смещении диодов Шоттки время их восстановления составляет  $1—100$  мс, и они не успевают реагировать на ВЧ сигналы с частотой  $100$  МГц и более. Поэтому весь модулируемый заряд находится в объеме кремния под матрицей. Толщина слоя модулированного заряда составляет обычно менее  $1$  мкм.

При приложении импульса смещения к электроду подложки для смещения диодов в прямом направлении время восстановления становится достаточно малым и диоды успевают реагировать на ВЧ-поле. Силовые линии электрического поля замыкаются на контактах диодов, которые заряжаются пропорционально локальной напряженности поля. Большая часть зарядов остается и после окончания импульса смещения. Полный заряд матрицы складывается из однородного и меняющегося по поверхности зарядов, обусловленных соответственно импульсом смещения и полем ПАВ.

Сигнал, записанный в виде распределения заряда, может быть считан в любой момент в течение времени памяти АЗУ одним из двух рассмотренных выше спосо-

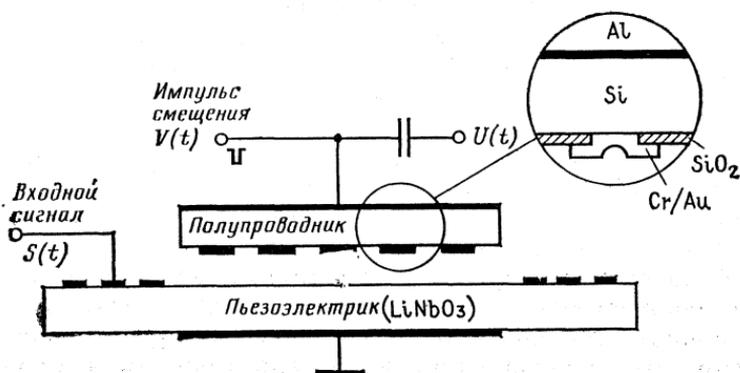


Рис. 9. Акустоэлектронное ЗУ на основе диодной матрицы

бов. При этом, как и в случае полупроводников, записанная информация может считываться параметрическим образом многократно ( $\sim$  до  $10^5$  раз).

Основные физические и технологические ограничения, свойственные АЗУ на диодных матрицах, сводятся к следующему. Наибольшая рабочая частота, следовательно, и наибольшая полоса частот ограничиваются: технологическими возможностями изготовления встречно-штыревых преобразователей (ВШП); акустическими потерями, возрастающими пропорционально квадрату рабочей частоты; минимально достижимым периодом матрицы в направлении распространения ПАВ.

Использование в качестве пьезоэлектрика (звукпровода) ниобата лития ограничивает рабочую частоту величиной порядка 350 МГц при достигнутом в настоящее время пространственном периоде матрицы на диодах Шотки 3,8 мкм. Это определяет верхнюю границу полосы частот на уровне 100 МГц.

Современный уровень технологии позволяет реализовать АЗУ на основе структуры  $\text{LiNbO}_3$  — матрица диодов Шотки со следующими характеристиками:

скорость ввода/вывода информации, бит/с	. . . . .	$10^8$
длительность выборки, мкс	. . . . .	200
емкость памяти, Кбит	. . . . .	100
плотность информации, бит/см <sup>2</sup>	. . . . .	$4 \cdot 10^5$
время хранения информации, с	. . . . .	0,1

Динамический диапазон такого АЗУ, ограниченный в основном уровнем перекрестных помех, составляет примерно 18 дБ, что вполне достаточно для запоминания кодированных по фазе цифровых сигналов.

Существенно, что каждый бит запоминается одновременно тысячами диодов (аналогия с голографическими ЗУ). Поэтому наличие даже сравнительно большого числа случайно расположенных дефектных диодов не сказывается на надежности ЗУ в отличие, например, от ЗУ на ПЗС, в которых выход из строя одного МОП-транзистора делает неработоспособным все ЗУ. Необходимо также подчеркнуть то важное обстоятельство, что АЗУ позволяют наряду с операциями запись/считывание одновременно осуществлять корреляционно-фильтрационные функции обработки сигналов, обеспечивая в целом повышенную надежность, адаптивность и технологичность.

## Пьезоэлектронные запоминающие устройства

В основе работы пьезоэлектронных ЗУ лежит взаимосвязь явлений электромагнитного поля в пьезоэлектрической области и акустических колебаний (связанные акусто-электромагнитные колебания), преобразование электрического сигнала в упругие волны механической деформации (поле  $E$  возбуждает акустическую волну) и обратное преобразование информации в электрический сигнал. В активной пьезоэлектрической однородной или неоднородной (с использованием свойств других материалов) вычислительной среде (ПВС) в качестве динамических носителей информации выступают акустическая волна и механические деформации, передающие и распространяющие информацию в среде. Пьезоэлектронные ЗУ могут работать в нерезонансном и резонансном режимах и строятся на основе элементов типа пьезотрансформаторов, как преобразователей информации с акустическим каналом информации. При этом в общем случае можно использовать объемные бегущие и стоячие акустические волны и ПАВ, взаимодействие которых в объеме ПВС (линейное и нелинейное) создает на выходах ПВС преобразованные сигналы в аналоговой форме. Возбуждаемые в объеме ПВС волны однозначно связаны с сигналами на входах среды.

На основе ПВС реализован класс различных репрограммируемых ЗУ, в том числе с линейной и матричной выборкой, многоуровневых с  $N$  дискретными уровнями (с организацией многозначной логики), с координатно-временным способом записи и считывания информации и др.

Первые ЗУ на основе пьезокерамики (ПК) — диодно-емкостные ЗУ с ПК-конденсаторами — формировали знак заряда, который определял значение записанной информации «0» или «1». Считывание информации (стирающее) проводилось по амплитудному признаку. В силу ряда недостатков такие ЗУ не нашли практического применения.

ЗУ с применением нестирающего считывания информации с использованием обратного и прямого пьезоэффектов более перспективны, считывание информации в них осуществляется по фазовому признаку. Символам

«0» или «1» соответствует разность фаз считываемого сигнала в  $180^\circ$ , которая определяется направлением поляризации  $\pm P_r$  в секции памяти ЗУ.

Созданные к настоящему времени пьезокерамические матрицы (ПКМ) с импульсным или резонансным считыванием представляют собой конкурентоспособные конструкции. Из-за малой информационной емкости (4, 8, 16, 32 бит) они получили в основном спецприменение. Такие ЗУ надежно работают в интервале температур  $-80 \dots +200^\circ\text{C}$ , выдерживают сильные ударные нагрузки (до величины, эквивалентной 30 тыс. g), отличаются высокой радиационной стойкостью (по интегральной плотности потока нейтронов до  $10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>) и характеризуются отсутствием влияния на их работу сильных магнитных полей. Считывание информации осуществляется без ее разрушения; параллельное считывание разрядов слова устойчиво при тактовой частоте до 1 МГц; хранение информации без потребления энергии обеспечивается в течение 15 лет и более. Уровень сигналов на выходе ПКМ соответствует 10—200 мВ при импульсном и 1—20 В при резонансном считывании. ПКМ менее чувствительны к шумовым наводкам, чем другие типы ЗУ.

В настоящее время разработчики заняты наращиванием информационной емкости и микроминиатюризацией ПКМ. Изготовление ПКМ в виде интегральных матричных структур с емкостью 1 Кбит и более имеет решающее значение и в смысле улучшения параметров записи информации.

К недостаткам использования пленочных матриц необходимо отнести влияние подложки, зависимость от технологии, нестабильность свойств пленок и подверженность деформациям (например, при охлаждении).

ПКМ допускают  $\geq 10^6$ — $10^9$  циклов перезаписи при практически неограниченном числе циклов неразрушающего считывания (до  $\sim 10^{15}$ ); при числе циклов перезаписи  $10^5$ — $10^6$  допустимо снижение  $U_{сч}$  до 60—70%. Минимальная длительность импульса записи определяется временем зарождения доменов и движением доменных стенок в пьезокерамике; время реполяризации составляет порядка 50 мкс—20 мс (частота перезаписи 50 Гц—20 кГц).

В репрограммируемой матрице ПЗУ на интегральной микросхеме 307РВ1 перезапись информации производит-

ся напряжением  $U_3 = \pm 275$  В; считывание — импульсами  $U_B$  амплитудой 10 В, длительностью 1 мкс, частотой следования не более 20 кГц (рис. 10,а). Полярность первого (информационного) полупериода считанного сигнала амплитудой  $\pm 80$  мВ противоположна полярности импульса записи; длительность его составляет от 0,4 до 1,1 мкс. Схемотехническими приемами частоту следования импульсов считывания можно увеличить до  $\leq 2$  МГц. Существуют разработки интегральных ПКМ (рис. 10,б) на 256 бит ( $32 \times 8$ ;  $16 \times 16$ ), 512 бит ( $32 \times 16$ ) и на 1024 бит ( $32 \times 32$ ;  $64 \times 16$ ) с пониженным  $U_3$  (20—48 В) и повышенной частотой считывания (до 0,5—2 МГц).

Значение коэффициента прямоугольности петли диэлектрического гистерезиса  $K_{пр} = P_r / P_s$  некоторых типов пьезокерамики достигает 0,85—0,95. В отличие от ферромагнитных материалов в ПК-элементах отсутствует абсолютный порог переключения. Это порождает возможность переключения воздействием циклов слабых полей и может быть использовано для реализации в ПКМ принципа амплитудного многоуровневого («аналогового») хранения информации с использованием многозначной логики.

«Аналоговая» запись в ПКМ, в частности в 307РВ1, позволяет обеспечить до 20 уровней  $\pm \Delta P_{r1}$  в диапазоне  $\pm P_r$  при разрешающей способности ЦАП не хуже

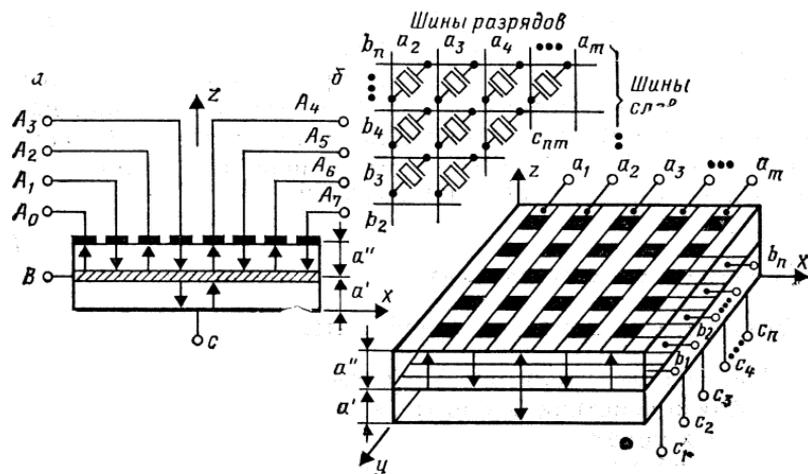


Рис. 10. Структура пьезоэлектронных ЗУ (ПКМ)

80 мВ и  $U_B \leq 5$  В. Это позволяет на порядок и более увеличить объем памяти. Однако при этом высока вероятность ошибки, отмечается нестабильность и ограниченность хранения во времени записанной информации. Алгоритмы амплитудного считывания информации при «аналоговой» записи информации оказываются сложными. Поэтому более предпочтительным в ПКМ оказывается фазовое считывание, при котором отношение сигнал/помеха выше, так как запись информации производится с использованием полного гистерезисного цикла.

Электрически репрограммируемые ЗУ на базе ПКМ реализуются с внутренней (встроенной) системой записи. Количество блоков накопителя определяется организацией двоичного слова адреса. Структурные особенности и техническую реализацию ЗУ и модулей памяти определяют в основном способы записи и считывания информации в ПКМ. Применение репрограммируемых ЗУ на базе ПКМ целесообразно в системах, не требующих высокого быстродействия, для отработки алгоритмов управления, отладки программ ЭВМ. Они эффективны в микропроцессорных системах, где часто требуются разнообразные наборы команд для выполнения конкретных задач в особых и переменных эксплуатационных условиях, что позволяет быстро производить смену программ или их изменение (допустима смена информации, инверсия информации).

В последние годы разработаны ЗУ с использованием сегнетоэлектрических пленок (толщиной 75 нм) на основе нитрата калия  $KNO_3$ , которые характеризуются временем переключения  $\leq 20-30$  нс (до 0,2 нс) при напряжении 6,3 В. Запоминающая ячейка в таких ЗУ составляет 4—25 мкм<sup>2</sup>, а в целом степень интеграции ЗУ весьма высока (до  $10^8-10^{10}$  бит/см<sup>2</sup>).

## Магнитоэлектронные запоминающие устройства

Магнитоэлектронные ЗУ используют эффект памяти при взаимодействии магнитных и электронных явлений в твердых телах.

Запоминающие устройства на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД) являются наиболее развитыми с точки зрения технологии и объема производства не

только среди магнитоэлектронных ЗУ, но и среди всех систем памяти на основе устройств функциональной электроники. Носителями информации в них являются динамические неоднородности — домены, представляющие собой отличающиеся направлением намагниченности цилиндрические области в тонкой ферритовой пленке.

В настоящее время среди областей применения ЗУ на ЦМД можно выделить персональные ЭВМ, переносные интеллектуальные терминалы, системы дальней связи и передачи информации, устройства ЧПУ станками, промышленными роботами, банковские терминалы, медицинское оборудование и др. По оценке специалистов, с 1987 г. начался новый этап развития ЗУ на ЦМД. Его завершение планируется к середине 90-х гг. изготовлением ЦМД-модуля емкостью 256 Мбит. Такие модули, выпускаемые с помощью обычной фотолитографии (что в принципе вполне реально, учитывая современный уровень развития этой технологии), уже могут конкурировать по удельной стоимости с накопителями на «винчестерских» дисках.

**ЗУ на вертикальных блоховских линиях ВБЛ.** В последнее время ряд фирм США, ФРГ и Японии приступили к исследованиям, направленным на создание ЗУ, базирующихся на ЦМД-технологии, но намного превосходящих прежние разработки по информационной плотности. Носителем информации в этих устройствах является значительно меньший, чем домен, микрообъект — вертикальная блоховская линия (ВБЛ), а точнее — пара отрицательных ВБЛ. Они располагаются в стенке магнитного домена, которая отделяет домен от окружающего магнитного материала (рис. 11). В качестве носителя ВБЛ удобно выбрать растянутый ЦМД или полосовой домен — страйп. Устойчивому состоянию страйпа, используемого в качестве накопительного регистра, соответствуют две отрицательные ВБЛ на концах страйпа (показаны знаком «минус», рис. 12,а).

Считывание ВБЛ происходит при подаче импульса тока на пару проводников, сближающих концы страйпа. При этом происходит отделение (репликация) ЦМД, который переводится в регистр вывода и детектируется обычным путем (рис. 12,б). На конце страйпа сохраняется отрицательная ВБЛ; при отсутствии на конце страйпа ВБЛ отделения ЦМД не происходит.

Операция записи ВБЛ (см. рис. 12) происходит в

несколько этапов. Вначале ВБЛ, находящуюся в вершине страйпа (а), переводят в положение (е). Прилагая к вершине страйпа импульс поля смещения, получают пару ВБЛ противоположных знаков (е). Затем положительную ВБЛ переводят в вершину страйпа (д), отделяют ЦМД (е), подлежащий уничтожению, и в результате получают отрицательную ВБЛ в вершине страйпа. Сравнение (е) с (а) показывает, что в накопительном регистре произошла запись пары устойчивых отрицательных ВБЛ. Наличие пары отрицательных ВБЛ соответствует логической «1», а ее отсутствие — логическому «0».

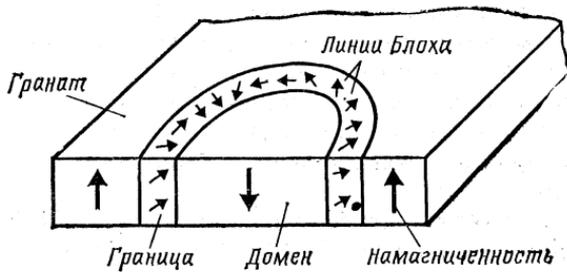


Рис. 11. Структура доменной границы ЦМД

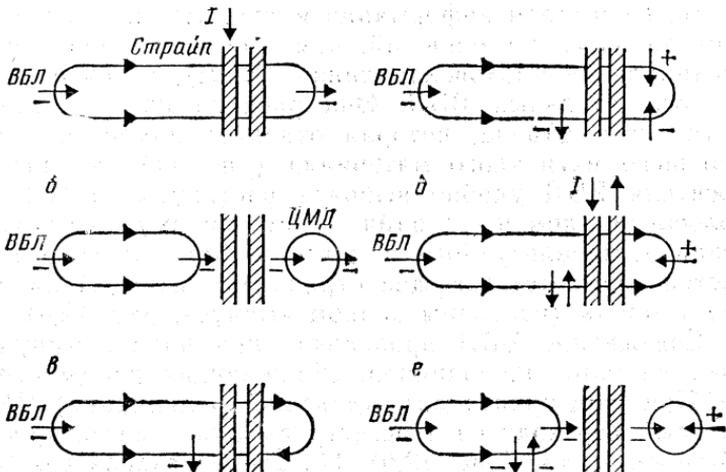


Рис. 12. Последовательность считывания и записи в накопительный регистр ЗУ на ВБЛ

Плотно упакованная система страйпов вместе с регистрами ввода/вывода (порты записи и считывания), выполненными на токовых доменно-продвигающих схемах, образует последовательно-параллельно-последовательную структуру. Поскольку минимальный размер страйпа составляет  $\sim 0,5$  мкм, а линейный размер пары ВБЛ — около  $0,1$  мкм, площадь ячейки накопительной структуры составляет всего  $0,05$  мкм<sup>2</sup>. Тем самым потенциально обеспечивается значительно более высоко-

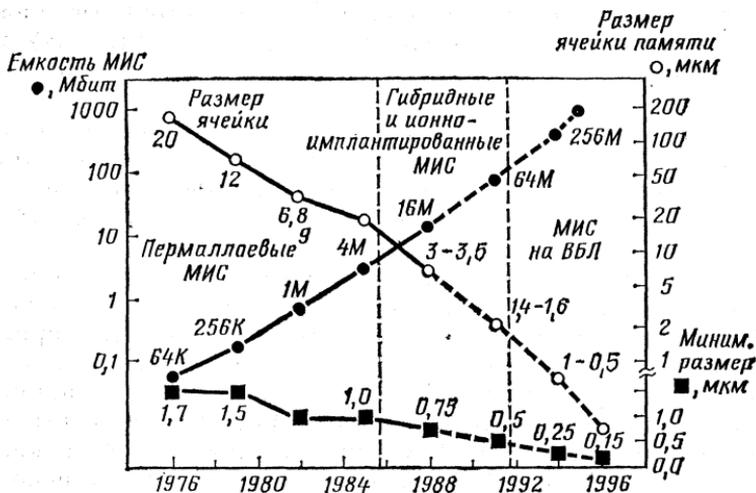


Рис. 13. Динамика развития ЗУ на ЦМД и ВБЛ.

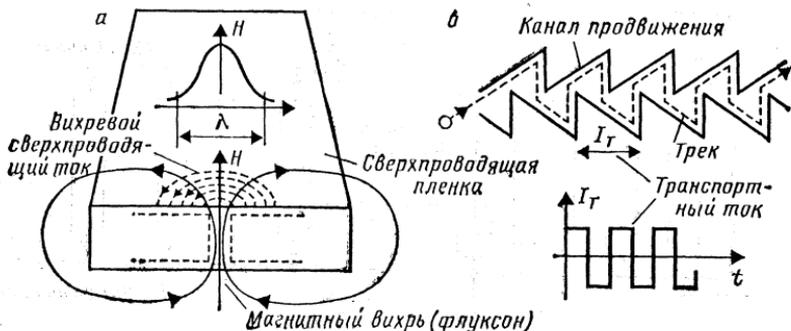


Рис. 14. Процесс формирования (а) и перемещения (б) флюксона в сверхпроводящей пленке

кая плотность записи по сравнению с накопителями на магнитных и магнитооптических дисках — до  $1,6 \cdot 10^9$  бит/см<sup>2</sup> при времени выборки порядка 100 мс.

Составленная по материалам конференции «Intermag-87» динамика развития запоминающих устройств на ЦМД и ВБЛ по таким важнейшим параметрам, как информационная емкость, размеры ячейки памяти и минимальный размер структуры, представлена на рис. 13.

Среди запоминающих устройств функциональной электроники, использующих магнитоэлектронные явления, следует выделить также ЗУ на флюксонах, ЗУ на магнитоэлектронных волнах и ЗУ, использующие эхо-процессы.

**ЗУ на флюксонах.** Флюксоны — это квазичастицы, представляющие собой кольцевые незатухающие токи или вихри, возникающие в распределенной сверхпроводящей туннельной структуре и обладающие собственным магнитным моментом, который квантуется. На рис. 14 показан процесс формирования флюксона в сверхпроводящей пленке под действием тока смещения с неоднородным распределением. За счет тока, приложенного к переходу, создается сила, действующая на флюксон, причем направление силы зависит от направления приложенного тока (рис. 14, б). Возможность управления движением флюксона, а также малость кванта вихря ( $2 \cdot 10^{-15}$  Вб) потенциально позволяют использовать флюксоны в качестве носителей информации в ЗУ большой емкости — до  $10^8$ — $10^{10}$  бит. ЗУ на флюксо-

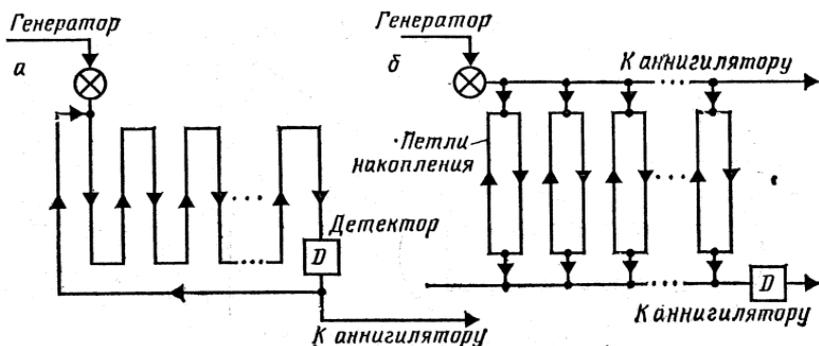


Рис. 15. ЗУ на флюксонах на основе сдвигового регистра с серпантинной организацией (а) и на структуре с мажор-минорной организацией (б)

нах может представлять собой сдвиговый регистр (рис. 15,а) или структуру с так называемой мажор-минорной организацией (рис. 15,б). Плотность записи в таких ЗУ может достигать  $2 \cdot 10^8$  бит/см<sup>2</sup>, а скорость считывания информации может приближаться к  $10^9$  бит/с. Буферная или внешняя память, созданная на основе флюксонных ЗУ, совместима с криогенным процессором и более предпочтительна по сравнению со схемотехническими ЗУ на джозефсоновских переходах.

**ЗУ на магнитоэлектронных волнах (МЭВ).** Спин-волновые (СВ) устройства основаны на волновом процессе ориентации спиновых магнитных моментов электронов, ответственных за ферромагнитные свойства вещества. Функционально СВ устройства равноценны устройствам на ПАВ с той разницей, что частотный диапазон работы СВ устройств значительно выше: 1—20 ГГц. Обычно СВ устройство представляет собой находящуюся в статическом магнитном поле тонкую ферритовую пленку, нанесенную на неферромагнитную подложку. СВЧ магнитное поле вызывает колебание спинов, ориентация которых задана внешним полем, в результате чего происходит возбуждение спиновых волн. В ЗУ на спиновых волнах используется нелинейность намагниченности феррита по отношению к СВЧ магнитному полю, связанному с СВ, аналогично тому, как в акустоэлектронных ЗУ память реализуется на основе нелинейных эффектов в пьезодиэлектрике.

**ЗУ, использующие эхо-процессоры.** В магнитоэлектронных устройствах на основе эффекта спинового эха (СЭ) носителями динамических неоднородностей являются слабозаимодействующие магнитные ядра вещества. Поэтому в отличие от других устройств функциональной электроники, динамические неоднородности имеют фиксированное положение в объеме устройства и не могут перемещаться в пространстве.

Наиболее перспективными для создания миниатюрных спиновых эхо-устройств являются магнитоупорядоченные среды в виде многослойных пакетированных тонких пленок, для которых не требуется использование внешних магнитов или криостатов. Такие ферромагнитные среды имеют доменную структуру. Градиент магнитного поля внутри доменной границы выполняет роль статической неоднородности и определяет различные

частоты ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для ядер внутри доменной границы.

Образование динамических неоднородностей происходит при возбуждении ядер внешним сигналом в виде переменного магнитного поля. Согласно физике ЯМР каждое ядро реагирует на спектральную компоненту входного сигнала, равную собственной частоте прецессии, которая, в свою очередь, определяется значением локального постоянного магнитного поля и магнитным моментом ядра. Диапазон собственных частот прецессий, определяемый величиной градиента магнитного поля, образует полосу пропускания спинового устройства. Частоты ЯМР для ферромагнитных сред на ядрах  $\text{Fe}^{57}$ ,  $\text{Co}^{59}$ ,  $\text{Ni}^{61}$  в различных соединениях расположены в диапазоне  $10^6$ — $10^9$  Гц, а ширина линии ЯМР, определяющая полосу устройства, лежит в интервале  $10^3$ — $2 \cdot 10^7$  Гц. Время жизни динамических неоднородностей определяется так называемым временем продольной релаксации — временем затухания возбуждения спиновой системы ядер из-за их взаимодействия с кристаллической решеткой вещества.

Чем больше уровень спектральной компоненты входного сигнала, тем больше угол прецессии спиновой системы. Таким образом, спектральная плотность воздействующих сигналов отображается в пространственное распределение энергии спиновых систем ансамбля ядер. Поскольку при этом каждая спектральная компонента навязывает соответствующей спиновой системе еще и свою фазу прецессии, появляется возможность записи не только энергетического, но и фазового спектра сигнала. Время памяти в магнитоупорядоченных средах определяется временем так называемой поперечной релаксации — временем потери фазовой памяти из-за энергетического обмена со спиновыми системами соседних ядер. Величина времени памяти обычно в несколько раз меньше времени жизни динамических неоднородностей и находится в интервале  $10^{-2}$ — $10^{-6}$  с. Это определяет возможность записи в спиновые эхо-устройства сигналов с длительностью до нескольких миллисекунд и с базой в несколько тысяч.

Считывание информации, записанной в спиновой системе, достигается воздействием управляющих сигналов, создающих условия для собирания максимумов спектральных составляющих в некоторый момент времени

после считывающего воздействия. Так возникает спиновое эхо. По числу управляющих сигналов различают двух- и трехимпульсные методы формирования спинового эха, из которых наиболее перспективным считается последний.

Для практического внедрения спиновых устройств необходимо прежде всего решить вопросы подавления паразитных эхо-сигналов (которые здесь не рассматривались), а также увеличить полезное рабочее время в полном цикле запись — считывание.

## Магнитооптические запоминающие устройства

Магнитооптические ЗУ совмещают в себе основные достоинства оптических носителей информации (большая плотность записи, малое время доступа, отсутствие механических контактов с носителем, высокая надежность) и магнитных (реверсивность). Имеющиеся результаты в области исследования свойств информационных магнитооптических (МО) сред позволяют рассчитывать на плотность записи до  $10^8$  бит/см<sup>2</sup> при практически неограниченном числе циклов перезаписи информации.

Одним из основных физических явлений, используемых для записи и стирания информации в МО средах, является термомагнитный эффект. Микроучасток среды с помощью луча полупроводникового лазера нагревают выше критической температуры (близкой к температуре Кюри или температуре компенсации). Затем нагретый микроучасток остывает в присутствии внешнего поля, направление которого противоположно исходному направлению намагниченности МО среды. Вследствие нагрева коэрцитивная сила микроучастка среды падает в 10—50 раз, и происходит его перемагничивание. Обычно внешнее поле не обязательно поддерживать до того момента, когда температура остывающего микроучастка достигнет комнатной. Достаточно, чтобы оно действовало, пока температура не сравняется с так называемой температурой блокирования, на несколько градусов меньшей температуры, соответствующей равенству коэрцитивной силы и напряженности внешнего поля.

Записанная цифровая информация может быть пред-

ставлена в виде последовательности перемагниченных микроучастков среды (доменов) с типичным диаметром 1 мкм. Стирание информации достигается повторным нагревом микроучастка в поле обратного направления. Такой метод относится к неразрушающим, что позволяет производить операции записи — стирания практически неограниченное число раз.

Для считывания записанной информации используются линейные МО эффекты: вращение плоскости поляризации линейно-поляризованного света, которое происходит при отражении (эффект Керра) или прохождении (эффект Фарадея) через намагниченную среду. Обычно угол поворота, направление которого зависит от направления намагниченности, не превышает  $0,25\text{—}2,5^\circ$ . Для того чтобы при считывании практически не повышалась температура запоминающей среды и не происходило стирания информации, интенсивность считывающего света должна быть достаточно малой по сравнению с интенсивностью записывающего.

Обычно магнитооптические ЗУ конструктивно выполняются в виде магнитооптических дисков. Простейшая конструкция двухстороннего диска с использованием при считывании эффекта Керра представлена на рис. 16. МО диски такого типа диаметром 300 мм и емкостью 1 Гбайт выпустила фирма Sony в 1985 г.

Толщина рабочего слоя в МО дисках с использованием при считывании эффекта Фарадея не должна превышать  $\sim 0,02$  мкм, иначе потери интенсивности лазерного излучения будут недопустимо велики. Поскольку воспроизведение информации ведется в проходящем свете, МО диски такого типа могут быть только односторонними.

МО диски более сложной конструкции позволяют получить более высокое отношение сигнал/шум. Одна из таких конструкций разработана фирмой Хегох в 1982 г. и представляет собой МО диск с четырехслойной структурой (рис. 17). Падающий световой луч считывающего лазера поляризован в плоскости рисунка, т. е. вектор  $E$  параллелен оси  $X$ . Отраженный луч с  $X$ -поляризацией можно рассматривать как сумму двух лучей, исходящих от МО пленки и от отражающего слоя. Компонента, появляющаяся в результате эффекта Керра, поляризована в направлении оси  $Y$ . Использование промежуточного слоя между МО пленкой и отражающим

слоем, толщина которого составляет четверть длины волны считывающего лазера, позволило получить угол вращения Керра  $1-2^\circ$ , что значительно больше, чем в других системах. Полный выигрыш в отношении сигнал/шум для четырехслойной структуры достигает 8,5 дБ.

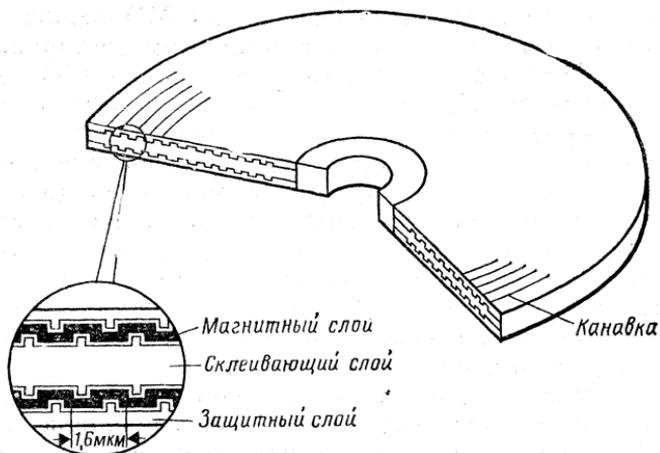


Рис. 16. Структура двухстороннего магнитооптического диска

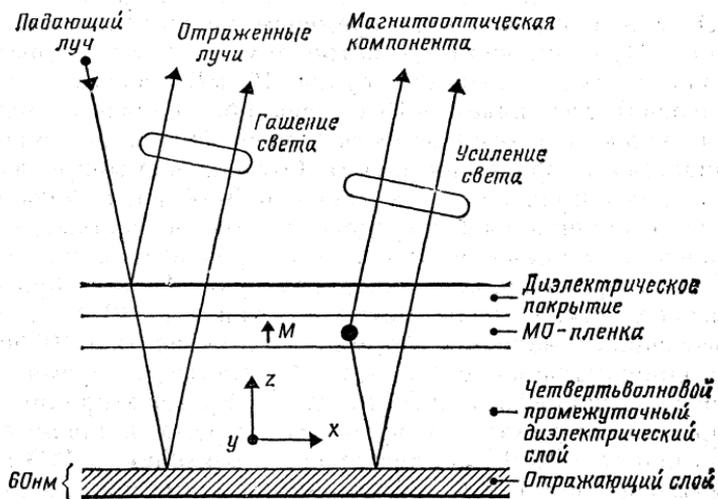


Рис. 17. Структура четырехслойного диска

Среда для термомагнитной записи должна обладать высокой энергетической чувствительностью, высокой разрешающей способностью, реверсивностью, малым временем цикла запись/стирание. Основными материалами для создания МО пленок в настоящее время являются двойные ( $RMe$ ) и тройные ( $RRMe$  или  $RMeMe$ ) сплавы, где  $R = Tb, Gd, Dy$ , а  $Me = Fe, Co$ . Эти сплавы имеют два свойства, интересные для МО записи. Во-первых, их можно получать в аморфном состоянии напылением или осаждением, так что создание МО дисков с размерами до 350 мм не относится к серьезной проблеме. Второе свойство таких сплавов состоит в том, что они являются ферромагнитными. Хотя для них характерен очень малый радиус атомного упорядочения в отличие от обычных ферромагнетиков, можно говорить о наличии двух атомных подсистем, связанных обменным взаимодействием. При этом намагниченность  $Me$  оказывается направленной противоположно намагниченности  $R$ ; они по-разному зависят от температуры и становятся равными в точке компенсации.

Рассмотрим типичные характеристики для аморфной пленки  $TbFe$  — перспективной информационной среды для МО дисков. Сведений по ограничению числа циклов записи/считывания нет; считается, что их возможное значение превышает  $10^6$ — $10^7$ . Быстродействие систем МО записи определяется временем на цикл запись/стирание. При типичном диаметре домена 1 мкм и интенсивности записывающего пучка 10 мВт время записи (нагрева) составляет  $\sim 10$  нс, чем обеспечивается высокая скорость и компактность записи (точка не «размазывается» от вращения диска). Охлаждение микроучастков среды происходит за время в 3—4 раза большее, однако влияния на быстродействие оно не окажет, если запись в смежные микроучастки производить при следующих прохождениях лазерного луча. Таким образом, быстродействие среды может составлять  $10^{-8}$  с, что обеспечивает запись информации со скоростью  $10^8$  бит/с (в одноканальных системах). В настоящее время достигнута скорость записи  $10^7$  бит/с. Время стирания информации оценивается временем перемagnetивания и составляет  $\sim 10^{-9}$  с. Разрешающая способность МО среды определяется, с одной стороны, минимально возможным размером домена (10—50 нм), а с другой — ограничивается минимальными размерами пятна, близкого

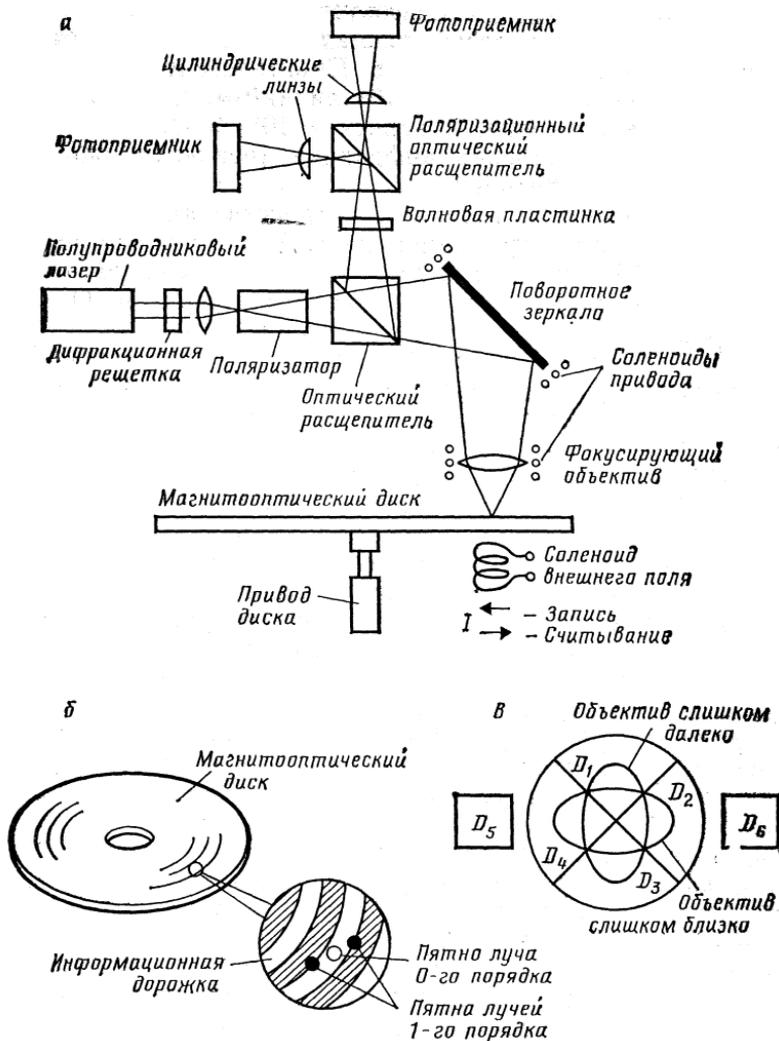


Рис. 18. Структурная схема системы памяти на МО диске (а), геометрия пятен лазерных лучей на поверхности диска (б) и фотодиоды автотрекинга и автофокусировки (в)

к длине волны излучения  $\lambda$ , сфокусированного лазерного луча. Теоретически разрешающая способность может составлять  $(1 \div 5) \cdot 10^4$  линий/мм. Практические результаты хуже — не более  $(1 \div 2) \cdot 10^3$  линий/мм, и к сожалению, получить плотность записи  $\sim 10^{11}$  бит/см<sup>2</sup> пока невозможно из-за явлений дифракции (реальная плотность не более  $10^8$  бит/см<sup>2</sup>).

Структурная схема типичного устройства для записи и воспроизведения информации на МО диске представлена на рис. 18. Луч лазера проходит через поляризатор и оптический расщепитель на поворотное зеркало. Отраженный от зеркала световой пучок фокусируется объективом на поверхности МО диска. Соленоид, создающий внешнее поле, питается импульсным током, причем полярности импульсов тока при записи и стирании противоположны. Считывание информации основывается на эффекте Керра. Поляризатор преобразует воспроизводящий луч лазера в линейно поляризованный. Отраженный от диска луч вновь проходит через объектив, отражается от зеркала, и часть луча отклоняется расщепителем. Пройдя через волновую пластину, отклоненный луч разделяется в поляризационном расщепителе на два луча. Вследствие полярного эффекта Керра плоскость поляризации отраженного от МО диска луча оказывается повернутой на  $0,25$ — $0,5^\circ$ . Если ось поляризатора установлена под углом  $45^\circ$  к оси поляризационного расщепителя, то, вычитая сигналы фотоприемников, можно получить информационный сигнал без фонового шума.

Дифракционная решетка и линза, установленные между лазером и поляризатором, формируют три луча: основной — нулевого порядка и два вспомогательных — первого. Информационный луч нулевого порядка используют при записи (модулируют) и считывании, причем при считывании, чтобы не было искажения записанного массива меток, интенсивность луча уменьшают. Два вспомогательных дифрагированных боковых луча первого порядка используются для слежения за дорожкой записи, как показано на рис. 18,б. Смещение боковых лучей таково, что они лишь частично отражаются от дорожки записи. Попадая на фотодиоды  $D_5$  и  $D_6$  (рис. 18,в), отраженные от диска боковые лучи создают разностный сигнал, управляющий положением поворотного зеркала. Иногда вместо перемещения зеркала

используют радиальное перемещение фокусирующего объектива.

Фокусирующий объектив (рис. 18,а) расположен на подвижном соленоиде и перемещается в поле постоянного магнита перпендикулярно поверхности МО диска. Фотоприемники, воспринимающие отраженное от диска излучение, разделены на четыре квадранта (см. рис. 18,б); перед фотоприемниками установлены цилиндрические линзы. В случае точной фокусировки световое пятно на фотоприемниках имеет форму круга. При нарушении фокусировки пятно превращается в эллипс, геометрия которого определяется направлением смещения объектива (рис. 18,в). Сумма выходных сигналов со всех квадрантов ( $D_1 + D_2 + D_3 + D_4$ ) представляет собой информационный сигнал. Разность сигналов ( $D_1 + D_3$ ) и ( $D_2 + D_4$ ) используется для автоматического поддержания точной фокусировки.

В настоящее время созданы экспериментальные образцы как МО дисков, так и дисковых проигрывателей; достигнутая плотность записи близка к значению, которое определяет коммерческую целесообразность их использования. Так, фирма Hitachi создала систему, аналогичную представленной на рис. 18. Входящий в систему компактный МО диск (диаметром 120 мм) с основой из эпоксидной смолы имеет двухстороннюю структуру с магнитным слоем TbFeCo (см. рис. 16). Общая емкость памяти составляет 0,55 Гбайт, что в 500 раз превышает емкость обычного (133,4 мм) гибкого диска. Для обеспечения малого времени доступа (~100 мс) головка для записи/считывания конструктивно разделена на две части: движущуюся и стационарную. Движущаяся часть головки с целью уменьшения массы содержит только поворотное зеркало, объективную линзу для фокусировки луча на МО диск и небольшой соленоид для подачи магнитного поля, требуемого при записи. Все остальные компоненты содержатся в стационарной части головки. В системе использован блок привода на основе высокочувствительной оптической системы детектирования. Это позволило получить отношение сигнал/шум ~57 дБ при частоте 0,9 МГц и тем самым поддерживать низкую частоту ошибок при работе МО диска в режиме хранения закодированных данных. Конструкция дискового привода дает возможность записывать и

стирать данные секторами, а также проигрывать оптические диски одноразовой записи.

Основные направления дальнейших разработок в области МО дисков и систем связаны с повышением ёмкости дисков за счет увеличения плотности записи, повышением отношения сигнал/шум, особенно при высоких скоростях записи/считывания, и созданием систем, обеспечивающих скорости передачи данных более 20 МГц.

Максимальная плотность записи, достигнутая к настоящему времени, составляет 25 Мбит/см<sup>2</sup>, что в 500—1000 раз больше, чем в магнитных дисках. Такая плотность записи соответствует диаметру домена записываемого бита ~1 мкм при примерно таком же расстоянии между соседними битами и дорожками. Плотность записи пропорциональна  $1/\lambda^2$ , поэтому дальнейшее ее повышение связывается с применением коротковолновых лазеров ультрафиолетового диапазона, способных обеспечить разрешение 0,1 мкм. Однако на этом пути есть свои трудности: чем меньше  $\lambda$ , тем меньше интенсивность излучения лазеров и резко возрастает поглощение излучения; возможно увеличение времени выборки и снижение надежности считывания. Повышение плотности до ~20% может быть достигнуто и без уменьшения длины волны излучения лазера за счет соответствующего уменьшения шага дорожки. Дополнительная оптимизация способов кодирования, например применение «спектральной» записи, может в принципе привести к дальнейшему увеличению плотности записи на 1—3 порядка.

Относительно невысокое отношение сигнал/шум (57 дБ в 1984 г.) обуславливается довольно низким уровнем сигнала, а также прохождением света через систему поляризатор — анализатор. По мнению специалистов фирмы KDD, за счет совершенствования конструкции оптических головок и информационной среды отношение сигнал/шум можно улучшать ежегодно примерно на 5 дБ. Однако уже сейчас достигнутые характеристики позволяют использовать МО диски для записи подвижных изображений при использовании специальных многорожечных дисковых систем. Кроме того, применение схем коррекции позволяет снизить вероятность появления ошибки до  $10^{-12}$ .

Максимальное значение скорости передачи данных

составляет примерно 20 Мбит/с при отношении сигнал/шум порядка 50 дБ. Дальнейшее повышение скорости передачи данных связывается прежде всего с применением многодорожечных дисковых систем. С этой целью разработаны интегральные линейки (и матрицы) индивидуально управляемых полупроводниковых лазеров, расположенных столь близко друг к другу, что их излучение можно сфокусировать на носителе одним общим объективом. Использование линеек лазеров позволяет повысить скорость передачи данных более чем до 20 Мбайт/с. Еще более высокой скоростью передачи данных будет обладать разрабатываемый накопитель с 24 МО дисками диаметром 356 мм и общей информационной емкостью 125 Гбайт. Информация будет считываться параллельно с 12 поверхностей, причем для каждого диска предусмотрена линейка из девяти полупроводниковых лазеров. Центральный лазер используется для автотрекинга и обнаружения сигналов идентификации на служебной дорожке. Остальные восемь лазеров — по четыре справа и слева от ведущей дорожки — служат для записи информации.

## Оптические (оптоэлектронные) запоминающие устройства

Оптические методы и средства хранения информации позволяют достичь значительно более высоких показателей по сравнению с магнитными или полупроводниковыми ЗУ, особенно по таким основным параметрам, как плотность записи информации (до  $10^{12}$  бит/см<sup>2</sup> и более), скорость передачи данных (до 50 Мбит/с в одноканальных устройствах), время доступа к данным (до 1 нс), удельная стоимость (оρίζается  $\sim 5 \cdot 10^{-8}$  цент/бит). Сфера применения этих систем — от быстродействующих оперативных или буферных ЗУ до архивных накопителей. Исследования и разработки в области оптических (оптоэлектронных) ЗУ идут по пути улучшения параметров как систем памяти в целом, так и их отдельных компонентов. Для реализации на практике преимуществ оптических ЗУ необходимо использование новых физических принципов и передовой технологии. Характерный пример такого использования — создание систем памяти на основе магнитооптических устройств функциональ-

ной электроники. Ниже рассмотрены другие примеры перспективных систем: ЗУ на материалах с изменением фазы, ЗУ на эффекте фотонного эха и голографические ЗУ.

**В ЗУ на материалах с изменением фазы** используется эффект изменения кристаллической структуры информационнои среды при температурном воздействии светового или теплового излучения. При этом используются фазовые переходы типа кристаллическое состояние — кристаллическое состояние или аморфное состояние — кристаллическое состояние. Обратимость фазовых переходов в ряде материалов обусловила интерес к созданию реверсивных дисковых ЗУ большой информационной емкости на основе тонких пленок ряда металлических сплавов.

В настоящее время фирмы Hitachi, Sony, Matsushita, Storage Technology, Hewlett—Packard разработали целый ряд сплавов с фазовыми переходами на основе меди, алюминия, серебра, никеля, цинка и других материалов. Такие сплавы при воздействии светового или теплового излучения могут обратимо менять цвет. Так, сплав серебра с цинком (фазовый переход кристалл — кристалл) имеет гексагональную структуру в состоянии, когда пленка серебристого цвета, и упорядоченную кубическую структуру при розовом цвете. Запись информации происходит при нагревании сплава выше 578 К с его последующей закалкой, а стирание (с восстановлением первоначальной структуры) — при нагревании свыше 373 К с последующим медленным охлаждением. Записанные биты информации обнаруживаются путем детектирования изменения цвета. Оба состояния достаточно устойчивы при температуре ниже 373 К и обеспечивают длительное хранение информации.

Примером использования материалов с фазовым переходом типа аморфное состояние — кристаллическое состояние является сплав серебра, алюминия и меди. Запись информации происходит при нагревании сплава выше 823 К, а стирание — при нагревании выше 473 К. В практической системе предполагается использование для нагревания пленки сплава полупроводникового лазера с длиной волны излучения  $\sim 0,8$  мкм и мощностью 20—30 мВт. При записи луч лазера фокусируется в пятно размером порядка 1 мкм. После кратковременного разогрева микрочасть информации среды бы-

стро остывает, поскольку находится в контакте с окружающей средой, обладающей хорошей проводимостью, и происходит закалка. При стирании требуется сравнительно медленное остывание, поэтому луч лазера несколько расфокусируют, чтобы разогреть среду, прилегающую к информационному микроучастку, а длительность импульса излучения (стирания) увеличивают. Аморфные микроучастки обладают отличным по сравнению с кристаллическими микроучастками цветом, что приводит к изменению коэффициента отражения. При считывании распознавание битов осуществляется по разности интенсивности отраженного излучения.

Фирмой Matsushita Electric Industrial Co разработана экспериментальная система Optical Disc Memory Recorder, в которой используются два полупроводниковых лазера: один необходим для стирания информации (длина волны  $\lambda=0,78$  мкм, мощность 10 мВт), второй для записи/считывания ( $\lambda=0,83$  мкм, мощность 8 мВт). Благодаря расщепителю лазерного луча лазер записи/считывания работает почти одновременно со стирающим лазером, из-за чего запись информации может происходить разряд за разрядом (побитно). Возможность побитовой записи — это важная особенность дисковых ЗУ на материалах с изменением фазы. В магнитооптических дисках, например, приходится стирать и записывать всю дорожку.

Другим преимуществом оптических ЗУ на основе материалов с изменением фазы является возможность получения высокого отношения сигнал/шум. Это свойство тесно связано со значительным отличием отражательной способности аморфного и кристаллического состояний носителя. Например, фирмой Philips создана регистрирующая среда на основе сплава теллур — селен — сурьма, позволяющая достичь отношения сигнал/шум около 90 дБ. Однако из-за применения теллура, который очень быстро окисляется в нормальных условиях, весь оптический диск может очень быстро «забыть» всю записанную информацию. Для защиты от коррозии покрывают оптический диск слоем воздухонепроницаемой пластмассы, однако это приводит к потере в отношении сигнал/шум на 10—12 дБ.

**ЗУ на эффекте фотонного эха.** По своей природе эффект фотонного эха напоминает эффект спинового эха. Он возникает в системе атомов, предварительно облу-

ченных двумя когерентными световыми импульсами, и состоит в спонтанном излучении импульса света; временная диаграмма процесса полностью соответствует диаграмме спинового эха. Первый возбуждающий импульс  $W(t)$  приходит на кристалл в направлении некоторой оси  $z$ , а второй  $S(t)$  — спустя время  $\tau$  под небольшим углом  $\varphi$ .

Наличие кубической нелинейности вида  $W^2(t) S^*(t)$  приводит к появлению в отклике системы члена, который описывает эхо-сигнал, распространяющийся под углом  $2\varphi$  к оси  $z$  с задержкой на  $2\tau$ .

Схема записи/считывания аналогична двухимпульсной схеме, используемой в устройствах на основе спинового эха. Такой режим обеспечивает ограниченное время хранения информации без регенерации, определяемое характеристическим временем поперечной релаксации  $T_2$ .

Значительно большее время памяти обеспечивает стимулированное фотонное эхо, которое, аналогично спи-

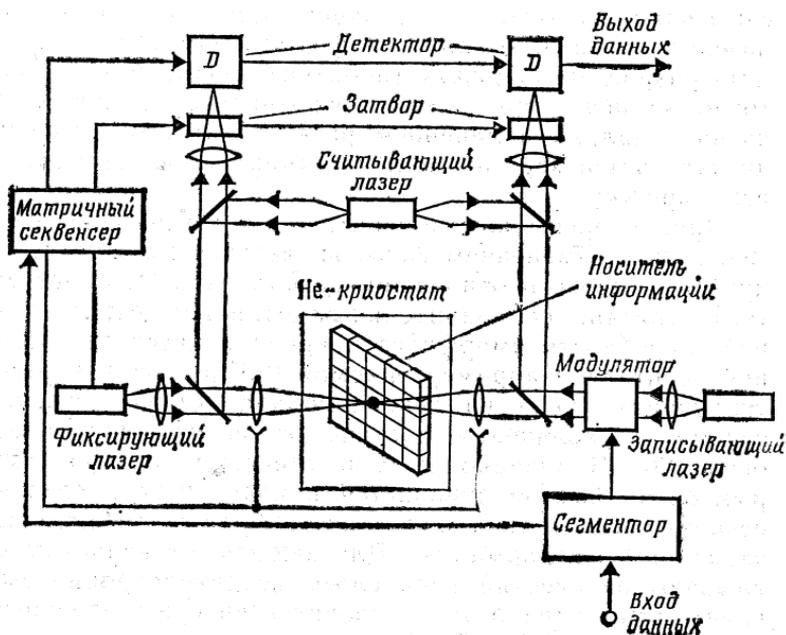


Рис. 19. Структурная схема двухкоординатного ЗУ на эффекте фотонного эха.

новому эху, образуется при воздействии на носитель информации трех импульсов. Эхо-сигнал наблюдается с задержкой  $2\tau + \tau_1$  после первого, записывающего импульса ( $\tau$ ,  $\tau_1$  — интервалы между 1-м и 2-м, 2-м и 3-м импульсами соответственно) в направлении волнового вектора  $k\nu = k_w + k_R - k_s$ , где  $k_s$ ,  $k_R$ ,  $k_w$  и  $k\nu$  — волновые векторы сигнального, записывающего, считывающего и эхо-импульсов.

Размеры области пересечения световых импульсов, т. е. лазерных лучей, могут быть очень малыми и ограничиваются снизу только дифракционным пределом, что создает предпосылки для создания ЗУ сверхбольшой информационной емкости — до  $10^{15}$  бит. Время обращения к этой области, т. е. фактически к ячейке памяти, определяется в основном временем прохождения света через систему и может быть менее 1 нс. Время хранения информации при использовании эффекта стимулированного эха может составлять от микросекунд до десятков минут (без регенерации).

На рис. 19 представлена структурная схема двухкоординатного ЗУ. Ячейки памяти распределены в виде матрицы в тонкой пластине носителя информации. Все три источника (записывающий, фиксирующий и считывающий) световых импульсов адресуются при каждом цикле к одной ячейке памяти. Записывающий импульс содержит информационную (двоичную) последовательность (слово), длительность которой не превышает времени необратимой поперечной релаксации  $T_2$ . Фиксирующий импульс отличается меньшей, чем у записывающего, длительностью и большей интенсивностью. При воздействии этих двух импульсов на ячейку памяти в ней происходит запись информации. Информационная последовательность фиксируется в виде неравновесной населенности однородно-уширенных подуровней в пределах неоднородно-уширенной линии резонансного перехода. Поскольку спектральная ширина подуровня может лежать в пределах 10 кГц, а ширина линии — в пределах 10 ГГц, создается возможность (при выборе соответствующего материала) для записи до  $10^6$  бит в ячейку памяти размером  $\sim 1 \text{ мкм}^3$ .

Приведенный на структурной схеме сегментор служит для преобразования входной информации и управления модулятором. Преобразование информации необходимо для сопряжения характеристик матрицы памяти

и детектора и заключается в обеспечении в записывающем импульсе определенного числа бит, соответствующих значению «1». Такое преобразование достигается либо перекодированием, либо добавлением в начале каждого слова инициирующих кодовых последовательностей длиной 8 бит. Матричный секвенсер обеспечивает адресацию, синхронизацию узлов и контроль функционирования. Обеспечивается прямое или реверсивное считывание данных.

На рис. 20 представлена структурная схема трехкоординатного ЗУПВ, разрабатываемого фирмой Advanced Technology Laboratories. Данное ЗУ должно обеспечить продолжительное хранение информации при емкости памяти  $10^{15}$  бит, объеме ячейки  $\sim 1$  мкм<sup>3</sup>, габаритных размерах  $\sim 10^3$  см<sup>3</sup>, скорости обмена 10 Гбит/с и низкой потребляемой мощности: 160 нДж/бит на цикл записи/считывания.

Запись информации в ЗУ происходит следующим образом. На ячейку памяти подается считывающий импульс, и тем самым стирается содержимое ячейки. Если

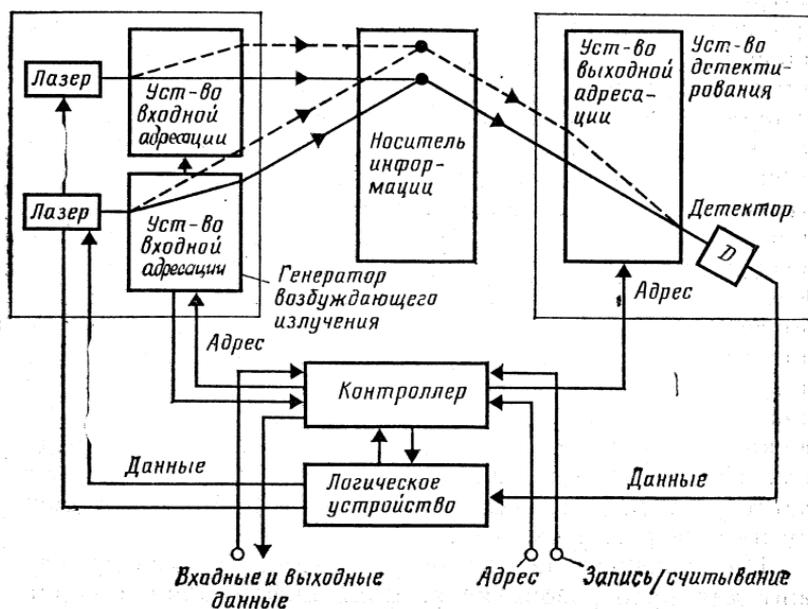


Рис. 20. Структурная схема трехкоординатного ЗУ на эффекте фотонного эха

записываемый бит данных соответствует логическому нулю, записывающих импульсов на ячейку не поступает. Если записываемый бит данных соответствует логической «1», на ячейку воздействуют двумя записывающими импульсами.

Считывающий импульс, обеспечивая считывание информации, вызывает также генерацию сигналов фотонного эха из всех пройденных им ячеек, и все эти сигналы будут присутствовать на входе детектора. Выбор полезных эхо-сигналов путем стробирования во времени производится устройством выходной адресации, которое может быть выполнено на основе акусто- или электрооптического дефлектора. Для реализации неразрушающего считывания производят перезапись считанного бита (если бит соответствует «1») на ячейке памяти.

Режим перезаписи используется также для увеличения времени хранения информации в ЗУ. С этой целью контроллер периодически подает управляющие сигналы в генератор управляющих импульсов и устройства адресации, в результате происходит циклическое сканирование всех ячеек памяти.

## Голографические запоминающие устройства

Среди новых методов решения проблемы памяти ЭВМ особые перспективы открывают голографические оптические методы записи, хранения и считывания информации. Голографические системы памяти (ГЗУ) строятся на основе широкого применения элементов функциональной электроники и в них используется один из основных принципов функциональной электроники: информация о каждом бите данных распределена по всей голограмме, то есть нет четких границ между функциями элемента и системы. При этом достигается большая избыточность записи, гарантирующая высокую помехоустойчивость и надежность хранения информации.

Голографические методы позволяют хранить и восстанавливать информацию, представленную в виде волновых полей, изображений и т. п., а также данные, представленные в виде двоичного кода.

Разработка ГЗУ, регистрирующих сред и элементов систем ориентирована на создание ГЗУ, конкурентоспо-

собных с перспективными системами магнитной записи, для чего необходимо достичь следующих параметров:

плотность записи . . . . .	. . . . .	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$ бит/см <sup>2</sup>
скорость записи по одному каналу . . . . .	. . . . .	$10 - 1000$ Мбит/с
стоимость носителя информации . . . . .	. . . . .	$10^{-7} - 10^{-8}$ цент/бит
длительность хранения информации . . . . .	. . . . .	$10 - 20$ лет

В обычных системах памяти на магнитных лентах и дисках (НМЛ, НМД) используют так называемую побитовую (последовательную) запись. Такие системы имеют целый ряд недостатков. Они требуют высокоточных систем автоматического слежения за фокусировкой и автотрекинга, прецизионной механики, помехоустойчивого кодирования, высокого качества материалов для носителей информации. Скорость одноканальной записи в наиболее быстрых системах традиционной памяти — НМД — не превышает  $10 - 40$  Мбит/с. Быстродействие  $10$  Мбит/с при размере информационного элемента  $\sim 1$  мкм требует для стандартного диска диаметром  $356$  мм скорости вращения  $30$  об/с. Дальнейшее повышение скорости вращения ведет к чрезмерному усложнению устройства. Повышение быстродействия без увеличения скорости перемещения носителя информации достигается при введении развертки поперек движения носителя или путем применения многоканальной записи (как в рассмотренных выше МО системах).

Кроме того, для традиционных, неголографических систем существует взаимосвязь между временем поиска, с одной стороны, и емкостью памяти или стоимостью бита — с другой. Иными словами, быстрый поиск связан с дорогостоящей памятью малой емкости, а память большой емкости определяет возможность медленного поиска и менее дорогостоящая.

Голографические методы являются альтернативой традиционным. Во-первых, по своей природе ГЗУ относятся к многоканальным устройствам. Во-вторых, благодаря высокой надежности голографического метода записи снижаются требования к материалам, используемым в качестве информационной среды. В-третьих, нет жестких требований к точностям изготовления узлов и автоматическим регулировкам систем автотрекинга и автофокусировки. В-четвертых, голографические методы дают возможность преодолеть взаимосвязь между временем поиска, емкостью памяти и стоимостью бита, присущую системам с побитовой записью.

В настоящее время разрабатывается несколько типов голографических систем памяти как оперативного типа с емкостью  $10^8$ — $10^{10}$  бит и временем обращения менее 10 мкс, так и постоянного типа с емкостью  $10^{10}$ — $10^{14}$  бит и временем обращения до 10 мкс. Они различаются в основном по типу носителя (ленточные, дисковые или на фотопластинах), по организации записи (постраничная или построчная), а также по размерности (двумерные или трехмерные системы хранения).

Обобщенная схема постраничной организацией ГЗУ на фотопластине представлена на рис. 21. В качестве информационной среды используется светочувствительный материал, поверхность которого разделена на  $P \times P$  неперекрывающихся зон. В каждую зону записывается информация в виде фазовых фурье-голограмм. Голограммы этого типа обладают тем достоинством, что они дают воспроизводимое изображение, инвариантное к смещениям вбок от опорного пучка; кроме того, они имеют более высокую информационную емкость по сравнению с поглощательными голограммами. Тонкие (поверхностные) голограммы используются в двумерных системах хранения, в то время как толстые (объемные) — в трехмерных системах. Если в двумерных системах в

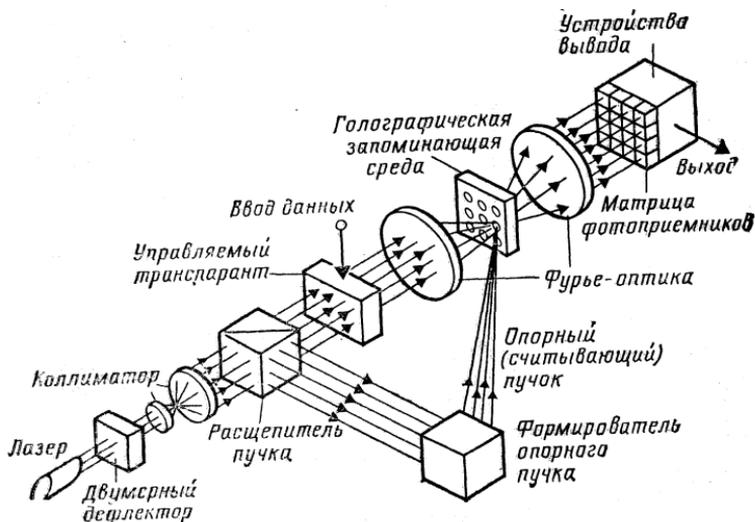


Рис. 21. Обобщенная схема странично-ориентированного ГЗУ.

каждую зону можно записать одну страницу информации размером  $N \times N$ , то при использовании объемных фазовых фурье-голограмм в каждую зону записывают  $M$  страниц информации при  $M$  соответствующих углах опорного (считывающего) пучка. Перемещение предметного и опорного пучков по поверхности запоминающей среды осуществляется с помощью двумерного дефлектора и дефлектора опорного пучка, которые работают синхронно. Управляемый транспарант, называемый часто составителем или устройством набора страниц, осуществляет ввод цифровых электрических сигналов в оптическую систему, преобразуя их в двумерную оптическую матрицу двоичных знаков.

Первая серийная голографическая система памяти такого типа была разработана фирмой ЗМ Company (система Megafetch) в 1974 г. Каждая фотопластина содержит  $1024 \times 1024$  голограммы, при этом общая емкость составляет 50 Мбит при времени произвольной выборки 10 мкс. При практически достижимых параметрах  $N = 100$ ,  $M = 50$  емкость системы памяти на фотопластинах (при двухсторонней записи) может достигать 1 Гбайт.

При записи на движущийся носитель (фотопленку или диск) используют как, постраничную, так и послов-

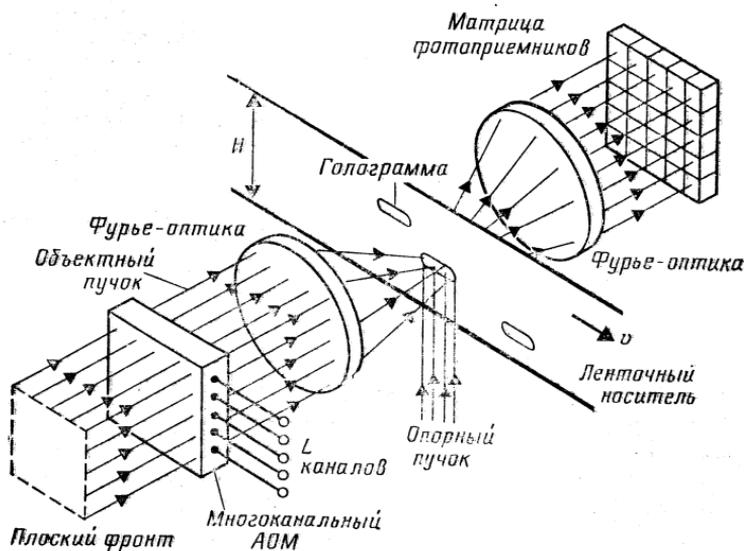


Рис. 22. Упрощенная структурная схема ГЗУ с ленточным носителем

ную запись данных. Оба способа являются сугубо многоканальными, поэтому в отличие от неголографических способов быстроедействие ЗУ обеспечивается при гораздо более низких скоростях носителя. Исчезает требование высокой точности стабилизации, автофокусировки и автотрекинга: например, допустимые отклонения для автотрекинга НМД при плотности записи порядка 1 бит/мкм составляют  $\sim 0,1$  мкм, для голографических дисков допустимая точность может быть на два порядка меньше.

Наивысшую скорость записи ( $\sim 10^9$  бит/с) и наибольший объем регистрируемой информации (до  $10^{12}$  бит) обеспечивают оптические ЗУ с постраничной голографической записью на ленточный носитель. Упрощенная структурная схема такого ЗУ, в котором в качестве управляемого транспаранта (УТ) используется многоканальный акустооптический модулятор (АОМ), представлена на рис. 22. Электрический сигнал, поступающий параллельно (например, пословно) на входы АОМ, преобразуется в набор ультразвуковых пучков, распространяющихся в материале АОМ. В результате матрица входных данных записывается по апертуре АОМ в виде динамической двумерной фазовой дифракционной решетки. Общее число бит в странице входных данных может составить  $L \times B \times T$ , где  $L$  — число каналов АОМ,  $B$  — полоса рабочих частот одного канала АОМ,  $T$  — время памяти. Записывающий импульс лазера переносит двумерную страницу данных на ленточный носитель в виде голограммы. Дефлектор (фурье-оптика) осуществляет сканирование световых пучков поперек носителя. По такой схеме фирмой Haggis (США) было создано ГЗУ со скоростью записи до  $10^9$  бит/с. В качестве УТ использовались два блока 17-канальных АОМ со светозвукопроводом из плотного флинта и пьезоэлектрическим преобразователем из ниобата лития. Скорость преобразования электрического сигнала в оптический в одном канале составляет 29,4 Мбит/с. Таким образом, количество информации в каждом канале составляет 4352 бита. Импульсный аргоновый лазер с синхронизацией мод и акустооптическим устройством вывода излучения обеспечивает длительность импульса 2 нс с частотой повторения 250 кГц. Фотопленка AGFA шириной 35 мм движется со скоростью 4 м/с. Размер одной голограммы составил  $1,16 \times 0,125$  мм<sup>2</sup>.

Развитие ГЗУ с постраничной записью сдерживается необходимостью использования уникальных элементов (многоканальных АОМ, импульсных лазеров, фотоприемных матриц), а также большого числа сложных оптических узлов, требующих периодической юстировки в процессе работы. Определенные трудности возникают при согласовании восстановленного изображения с фотоматрицей, поскольку информативный элемент в канале АОМ сильно сплюснен в направлении движения, особенно при высоких скоростях ввода. Для точного совмещения предметного и опорного пучков на поверхности носителя необходимо использование технически сложных систем дефлекторов с многоэлементным ( $\sim 100$ ) линзовым или гололинзовым растром. Однако для достижения скоростей записи более  $10^9$  бит/с этот метод считается наиболее перспективным, поскольку позволяет наиболее полно реализовать принцип многоканальной голографической записи.

К более простым системам голографической памяти относятся ЗУ с пословной записью данных в виде одномерных голограмм на дисковый носитель. В таких системах можно использовать ряд хорошо отработанных узлов серийных НМД. Структурная схема ГЗУ такого типа представлена на рис. 23. Управляемый транспарант (модулятор) осуществляет ввод электрических сигналов путем изменения интенсивности (или поляризации, фазы) проходящего света. Запись производится в виде линейных (одномерных) фурье-голограмм, ориентированных длинной стороной по радиусу диска; интерференционные полосы располагаются вдоль направления движения носителя. Радиальная ориентация линейных голограмм позволяет устранить противоречие между быстрым действием и ограниченной скоростью носителя.

На один и тот же участок диска целесообразно записывать одновременно несколько сигнальных лучей, тем самым осуществляется параллельная запись нескольких одномерных голограмм. Такая структура требует для записи многоканального линейного модулятора света и многоканального линейного фотоприемника — для считывания. Многоканальные запись и считывание были реализованы в макете дискового ЗУ (СССР), в котором в качестве УТ использовался 17-канальный АОМ на кристалле ниобата лития. Оптический блок записи формирует объектный световой пучок, который при прохожде-

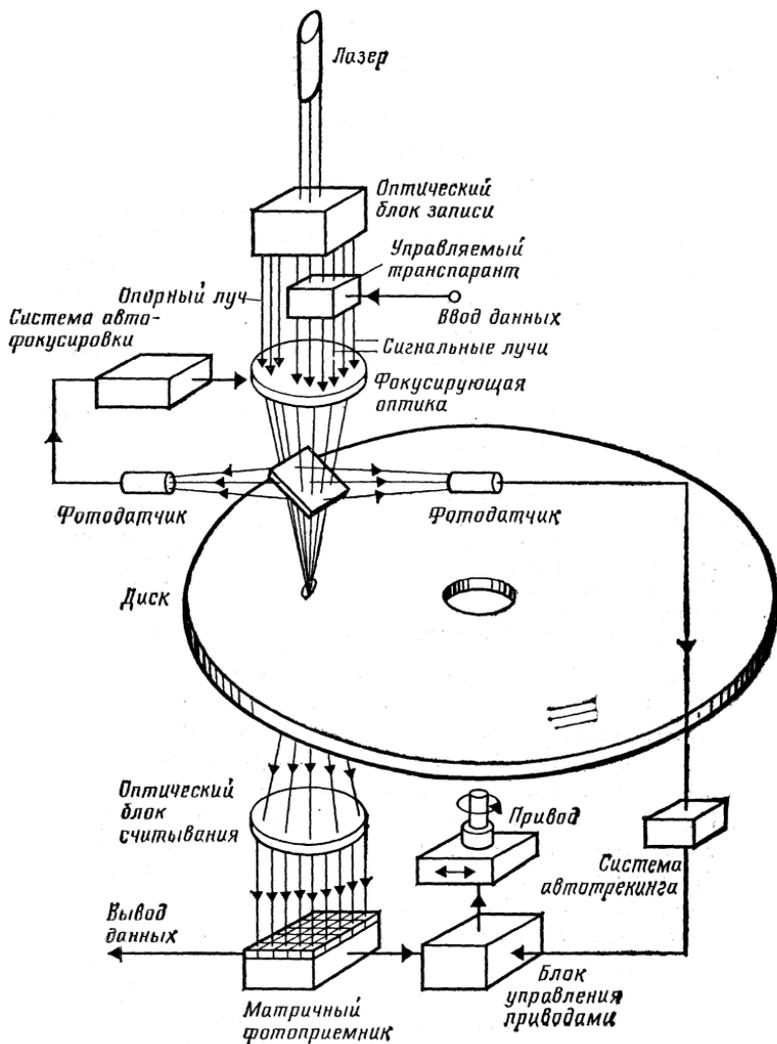


Рис. 23. Структурная схема дискового ГЗУ с пословной записью данных

нии АОМ образует 17 сигнальных лучей, а также опорный луч, параллельный сигнальным и находящийся с ними в одной плоскости. Интенсивность опорного луча примерно в 5 раз меньше сигнального. Расположенная после АОМ фокусирующая оптика представляет собой комбинацию телескопа из цилиндрических линз и объектива «Гелиос-40». Для изготовления диска диаметром 300 мм были использованы голографические фотопластины ПЭ-2. В качестве фотоприемника использовано 16 элементов фотоприемной матрицы МФ-16 в режиме прямого считывания. Проецируемое на строку фотоматрицы изображение имеет вид световых пятен с шагом 250 мкм и диаметром около 60 мкм.

При создании макета были достигнуты следующие основные характеристики:

число каналов записи/считывания . . . . .	.17; 34
ширина голографической дорожки . . . . .	.100—250 мкм
размер голограммы вдоль движения . . . . .	.1,5—3,0 мкм
максимальный шаг дорожек . . . . .	.300 мкм
информационная площадь диска . . . . .	.480 см <sup>2</sup>
объем информации на диске . . . . .	.3—6 Гбайт
плотность записи (для 34 каналов) . . . . .	.10 <sup>7</sup> бит/см <sup>2</sup>

Наиболее серьезный недостаток ГЗУ с пословной организацией записи — неустойчивость к дефокусировке одномерных голограмм по одной из координат. При большой плотности записи, когда ширина голограммы становится соизмеримой с размером одного информационного микроучастка, допустимая дефокусировка уменьшается до такой же величины, что и при побитовой записи. Другой важный вопрос, связанный с повышением быстродействия ГЗУ и упрощением его конструкции, — разработка малогабаритных оптических головок записи/считывания на основе линейной решетки одномодовых импульсных полупроводниковых лазеров. Применение таких лазеров позволит заменить дорогие и габаритные газовые лазеры при одновременном повышении КПД и снижении мощности лазеров, а также убрать из схемы расщепитель пучка и многоканальный АОМ, который пока еще относится к уникальным устройствам. Однако для практического использования необходимо устранить ряд существенных недостатков импульсных полупроводниковых лазеров, из которых основной — это малая длина временной (продольной) когерентности — около 100 мкм. Соответственно требуется выравнивание

оптического пути опорного и сигнального пучков с точностью не хуже 10 мкм. Другая сложная техническая задача — обеспечить среднюю мощность излучения лазера 50—100 мВт, что связано с малым коэффициентом использования света в классических схемах ГЗУ.

Как уже отмечалось, голографические ЗУ используют один из основных принципов функциональной электроники, распределяя информацию о каждом бите данных по всей голограмме. Вместе с тем в ГЗУ широко используются устройства ФЭ в качестве дефлекторов, управляемых транспарантов, информационных сред, фотоприемников и т. д. Уровень технических характеристик этих элементов во многом определяет уровень параметров голографических систем памяти в целом.

Существуют два основных типа дефлекторов: акустооптические и электрооптические. К количественным характеристикам относятся разрешение и время выборки. Разрешение, т. е. полное число разрешимых угловых положений, можно определить как максимальный угол отражения, деленный на угол дифракционного уширения пучка. Оптическая схема типичного двумерного акустооптического дефлектора приведена на рис. 24. Вводимые в одноканальные АОМ сигналы образуют движущуюся ультразвуковую фазовую дифракционную решетку, пе-

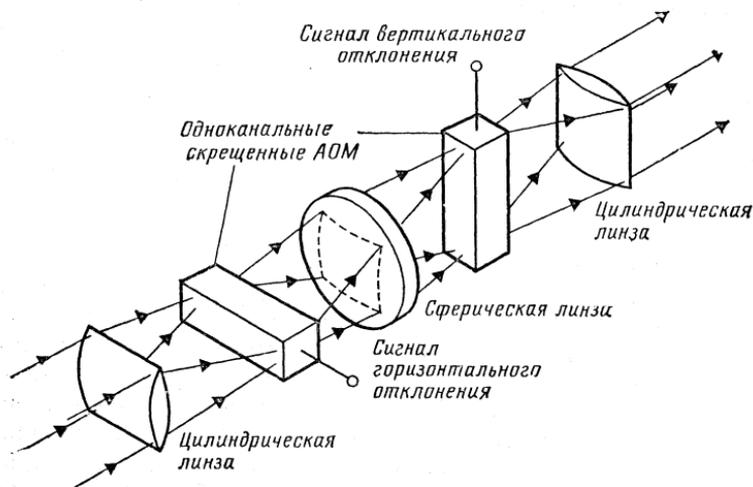


Рис. 24. Оптическая система двумерного акустооптического дефлектора

риод которой соответствует частоте входного сигнала. Время выборки определяется временем прохождения ультразвукового импульса через сечение лазерного пучка. Однако на практике приходится выбирать компромиссное решение между необходимыми временем выборки и дифракционной эффективностью, а также числом разрешимых угловых положений. Для увеличения двух последних параметров необходимо увеличивать протяженность АОМ в направлении распространения ультразвукового импульса. Существует практическая возможность создания двумерных дефлекторов с числом адресуемых направлений порядка  $10^4$  и частотой переключения  $10\text{—}100$  МГц.

Электрооптические дефлекторы обычно используют эффект двулучепреломления, в результате которого пучки света с разной поляризацией при прохождении электрооптического модулятора отклоняются на разные углы. Вращение плоскости поляризации достигается изменением напряжения на модуляторе. Поскольку электрооптические коэффициенты известных материалов очень малы, невозможно прямым способом получить большие углы отклонения при практически приемлемых значениях управляющего электрического поля. Для получения больших углов в таких аналоговых дефлекторах применяют последовательные каскады призм. В другом варианте используют каскадное включение нескольких цифровых дефлекторов, каждый из которых отклоняет пучок света в одном из двух положений. Например, 20-каскадный электрический дефлектор, состоящий из 10 каскадов отклонения по оси  $X$  и 10 каскадов отклонения по оси  $Y$ , создает двумерное поле адресации размером  $1024 \times 1024$  точек. Время случайной выборки составляет при этом 0,8 мкс. Недостатком таких дефлекторов является большое затухание света, проходящего через множество поверхностей преломления.

Создание управляемых транспарантов, применяемых для ввода цифровых электрических сигналов в оптическую систему ГЗУ, основано на множестве различных физических явлений при использовании самых разнообразных материалов. Основные требования, предъявляемые к УТ, состоят в обеспечении высокого разрешения (размер бита менее  $100$  мкм) и большой информационной емкости ( $10^3\text{—}10^6$  бит) при высокой скорости смены страниц ( $1\text{—}10$  мкс) и высокой контрастности (более

100 : 1). Высокая контрастность ослабляет последующие требования к материалу для записи голограмм и к матрице фотодетекторов. В настоящее время известен целый ряд УТ на устройствах ФЭ. Среди них наибольшее распространение получили магнито-, акусто-, электрооптические и жидкокристаллические (ЖК).

ЖК управляемые транспаранты отличаются наибольшим разнообразием. Однако скорости формирования двумерных массивов данных у них находятся в миллисекундном диапазоне.

К более быстродействующим относятся электрооптические УТ на основе ЦТСЛ-керамики — горячепрессованной смеси цирконата-титаната свинца с лантаном. Варьируя состав смеси и технологию ее изготовления, можно создать керамику, обладающую различными эффектами, пригодными для пространственной модуляции света: продольный, поперечный электрооптический эффекты и другие. Эти эффекты — результат ориентации в электрическом поле вектора поляризации сегнетоэлектрических доменов. Примером УТ на основе электрооптической керамики может служить 256-элементный формирователь страниц «Sandia», способный работать со скоростью переключения до  $10^5$  при контрастном отношении 1000 : 1.

Известные магнитооптические материалы, в которых реализуются ЦМД, не отвечают требованиям создания УТ. Во-первых, из-за магнитостатического отталкивания доменов они характеризуются малой плотностью заполнения. Во-вторых, состояние домена в отсутствие переключающих полей неустойчиво. Быстродействующие магнитооптические УТ, матрично адресуемые электрическим напряжением, разработаны на основе ортоферритов и эпитаксиальных феррит-гранатовых структур, содержащих висмут. Необходимое для перемагничивания ячеек магнитооптического материала магнитное поле может быть создано при протекании электрического тока по петле вокруг ячейки (рис. 25). Смена знака вектора намагниченности в ячейке в результате действия эффекта Фарадея эквивалентна открытию или закрытию светового клапана. Примером реализации магнитооптического УТ на основе ортоферрита иттрия может служить формирователь страниц размером  $100 \times 100$  элементов с рабочей апертурой  $2 \times 2$  см, временем переключения  $10^{-8}$  с и оптическим контрастом 350 : 1. Раз-

мер ячейки УТ составил  $150 \times 150$  мкм<sup>2</sup>. Основными недостатками магнитооптических УТ являются невысокое (до 10%) пропускание света, сложность коммутации токовых цепей при токах порядка 1 А и возможность деградации пермаллоевых электродов.

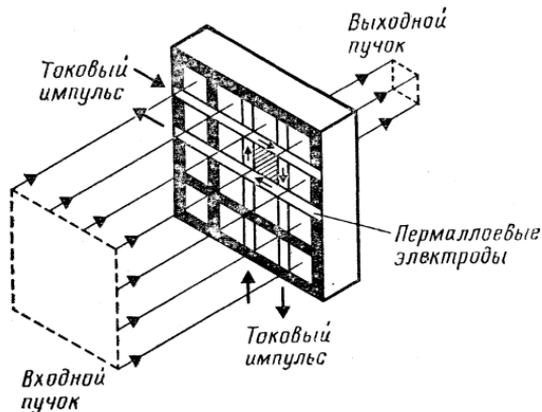


Рис. 25. Светоклапанный элемент магнитооптического управляемого транспаранта

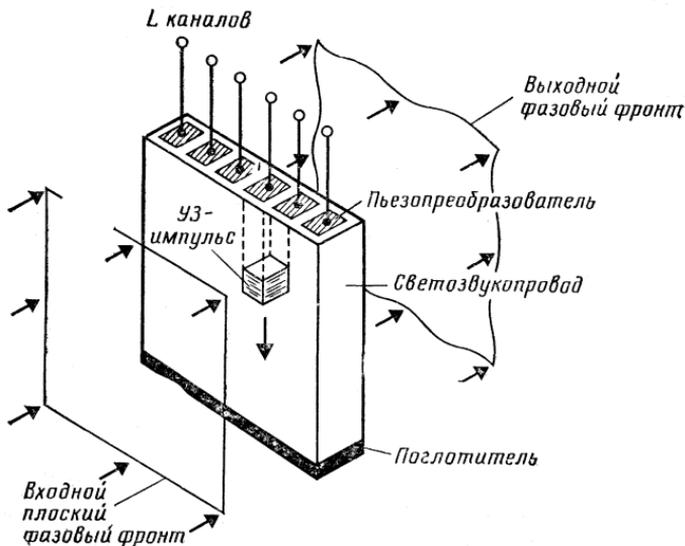


Рис. 26. Акустооптический управляемый транспарант

Акустооптические УТ относятся к наиболее быстродействующим. В них использован эффект дифракции света на решетке, возбуждаемой объемной упругой волной в оптически и акустически прозрачной среде вследствие явления фотоупругости. Для параллельного ввода в оптическую систему двумерного массива данных используются многоканальные АОМ, состоящие из светозвукопровода, пьезоэлектрического преобразователя и поглотителя упругих волн (рис. 26). В качестве светозвукопровода наиболее эффективны ниобат лития, парателлурид, молибдат свинца, которые обеспечивают малое включение/выключение оптического отклика (до  $10^{-9}$  с). В качестве пьезоэлектрических преобразователей наиболее часто используются пластинки ниобата лития (полоса частот 10—800 МГц), тонкие пленки сульфида кадмия, цинка или окиси цинка (полоса 0,5—3,5 ГГц). Со светозвукопроводом они соединяются с помощью дополнительных связующих слоев (золото, медь, индий и др.). 34-канальный АОМ, разработанный фирмой Harris для ГЗУ, схема которого представлена на рис. 22, обеспечил скорость ввода двумерной информации 1 Гбит/с. По существующим оценкам, может быть достигнута скорость ввода  $10^{12}$  бит/с и выше. Такая производительность практически недостижима для других типов УТ, кроме, быть может, магнитооптических. Отметим, что использование акустооптических УТ требует применения лазеров большой мощности, поскольку акустическую картину можно считать неподвижной лишь за время порядка нескольких наносекунд.

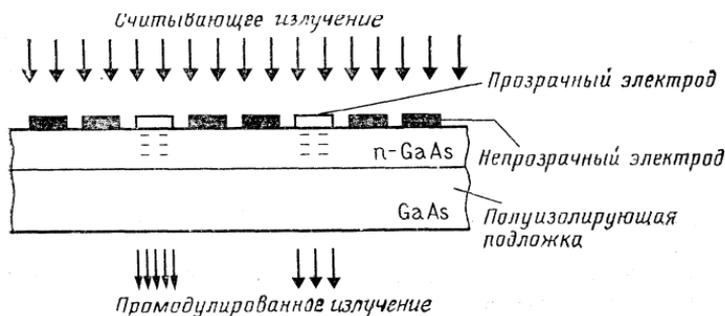


Рис. 27. ПЗС-управляемый прозрачный на основе эффекта Франца — Келдыша

Интересным примером реализации УТ на элементах функциональной электроники является модулятор света на основе эффекта Франца — Келдыша в полупроводниковом слое прибора с зарядовой связью (рис. 27). Эффект обусловлен воздействием управляющего электрического поля на величину поглощения фотонов в слое полупроводника. Структура ПЗС работает по хорошо известной трехфазной схеме, в которой каждый третий электрод является полупрозрачным. Оптический импульс включается в момент прохождения последовательности зарядовых пакетов под всеми полупрозрачными электродами. В отсутствие заряда под полупрозрачным электродом существует электрическое поле, вызывающее сильное поглощение света. Наличие заряда приводит к частичной или полной компенсации электрического поля и как следствие к уменьшению ширины запрещенной зоны полупроводника. Уменьшение поглощения света происходит пропорционально уменьшению амплитуды поля. Матричный УТ можно реализовать при параллельном включении рассмотренных структур. Интересно отметить, что адресация должна осуществляться так же, как в акустооптических УТ.

Диапазон волн модулируемого света лежит в пределах 0,89—0,90 мкм, поэтому наиболее приемлемыми источниками света являются одномодовые полупроводниковые лазеры. Расчет показывает, что для УТ из  $200 \times 200$  элементов фиксирование результата фурье-преобразования с помощью фотоприемной ПЗС-матрицы обеспечит импульсный лазер с длительностью импульса до 1 мс и пиковой мощностью порядка 100 мВт. Перспективность полупроводниковых УТ на ПЗС обусловлена возможностью достижения большого формата входных данных (до  $1000 \times 1000$ ) при динамическом диапазоне до 40 дБ, весьма малых габаритах и хорошем согласовании с фотоприемными матрицами.

## Список использованной литературы

- 1. Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. — Л.: Машиностроение, 1982.
- 2. Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. — Л.: Машиностроение, 1986.
- 3. Ерофеев А. А. Устройства вычислительной техники на

элементах функциональной электроники/Вычислительная техника и ее применение. — Вып. 6. — М.: Знание, 1987.

— 4. Захаров А. Ф., Щука А. А. Информационный анализ устройств памяти/Обзоры по электронной технике. Сер. 3. Микроэлектроника, 1986. — Вып. 3.

— 5. Васенков А. А., Федотов Я. А. Функциональная электроника. Основные направления работ//Электронная промышленность. — 1983. — № 8. — С. 3—5.

— 6. Вендик О. Г. Особенности структуры устройств функциональной электроники. — Там же. — С. 62—65.

7. Федотов Я. А. Твердотельная электроника: 90 лет радио. — М.: Радио и связь, 1985.

8. Хотянов Б. М., Шилин В. А. Запоминающие устройства на приборах с зарядовой связью//Зарубежная электронная техника. — 1976. — № 23—24; 1977. — № 1—2.

9. Косоноки В. Ф., Зэйнинггер К. Х. Применение ПЗС в запоминающих устройствах//Приборы с зарядовой связью/Под ред. М. Хоувза и Д. Моргана/Пер. с англ. — М.: Энергоиздат, 1981.

10. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Основы физики приборов с зарядовой связью. — М.: Наука, 1986.

11. Схемотехника БИС ПЗУ/О. А. Петросян, И. Я. Козырь, Л. А. Коледов, Ю. И. Шетинин. — М.: Радио и связь, 1987.

12. Ракитин В. В. Функциональные устройства на ПЗС//Электронная промышленность. — 1983. — № 8. — С. 29—32.

13. Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации и обработки сигналов: Справочное пособие/Под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. В. Дмитриева. — М.: Радио и связь, 1985.

14. Нелинейные акустоэлектронные устройства и их применение/Под ред. В. С. Бондаренко. — М.: Радио и связь, 1985.

15. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник/Под ред. Н. Н. Евтихиева, Б. Н. Наумова. — М.: Радио и связь, 1987.

16. Козлова Н. Д. Последние достижения в разработках ЗУ на ЦМД. Радиоэлектроника за рубежом//НИИЭИР. — 1983. — Вып. 20. — С. 13—20.

17. Судзуки Г. Достижения в области ЗУ на цилиндрических магнитных доменах//ТИИЭР, 1986, т. 74, № 11, с. 126—134.

18. Разработки систем памяти на ЦМД в Англии: Радиоэлектроника за рубежом//НИИЭИР. — 1984. — Вып. 23. — С. 4—6.

19. Мануэль Т. Запоминающие устройства на базе ЦМД-технологии//Электроника. — 1986. — № 10. — С. 46—49.

20. Ильяшенко Е. И., Юрченко С. Е., Аигина Н. Р. Современное состояние и перспективы развития доменных запоминающих устройств//Зарубежная электронная техника. — 1987. — № 8. — С. 53—72.

21. Барсуков В. С. Эхо-процессоры. — М.: Знание. — Сер. «Радиоэлектроника и связь»; № 3, 1987.

22. СВЧ-устройства на магнитоэлектрических волнах. Радиоэлектроника за рубежом//НИИЭИР. — 1984. — Вып. 25. — С. 9—10.

23. Разработка магнитооптических материалов и устройств. Радиоэлектроника за рубежом//НИИЭИР. — 1984. — Вып. 21. — С. 12—14.

24. Майклджон У. М. Магнитооптическая запись//ТИИЭР, 1986, т. 74, № 11, с. 112—125.

25. Носов Ю. Р. Машинная память (Оптические запоминающие устройства). — М.: Знание, 1987. — Сер. «Радиоэлектроника и связь»; № 5.

26. М а л а ш и н и н И. И., Ч е р н ы ш е в Н. А. Оптические средства хранения информации // Зарубежная электронная техника. — 1987. — № 1. — С. 69—76.

27. Б у р к о в а Л. В., Ф р о л о в Г. И. Аморфные пленки TbFe — новый материал для магнитооптической памяти // Зарубежная электронная техника. — 1987. — № 9. — С. 3—68.

28. Многократная запись информации на магнитооптических дисках // Электроника. — 1987. — № 3. — С. 44—46.

29. Ч е р н ы ш е в Н. А. Запоминающие устройства на эффекте фотонного эха // Зарубежная электронная техника. — 1987. — № 2. — С. 98—106.

30. В о в к Ю. В., Т в е р д о х л е б П. Е., Щ е п е т к и н Ю. А. Методы быстрой оптической записи двоичных данных. Обзор // Автометрия. — 1984. — № 3. — С. 3—12.

31. М и к а э л я н А. Л., В а н и н А. Ф., Г у л а н я н Э. Х., П р о к о п е н к о С. А. Голографический диск — накопитель информации // Квантовая электроника. — 1987. — Т. 14. — № 5. — С. 1074—1085.

32. Г е й л о р д Т. Хранение цифровой информации. — В кн.: Оптическая голография / Пер. с англ. / Под ред. Г. Колфилда. — М.: Мир, 1982. — Т. 12.

33. Пространственные модуляторы света / А. А. Васильев, Д. Касасент, И. Н. Компанец, А. В. Парфенов. — М.: Радио и связь, 1987.

• 34. М о р о з о в В. Н. Оптоэлектронные матричные процессоры. — М.: Радио и связь, 1986.

35. Е р о ф е е в А. А. и др. Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике. — М.: Радио и связь, 1988.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение . . . . .	3
Запоминающие устройства на приборах с зарядовой связью . . . . .	5
Акустоэлектронные запоминающие устройства . . . . .	17
Пьезоэлектронные запоминающие устройства . . . . .	24
Магнитоэлектронные запоминающие устройства . . . . .	27
Магнитооптические запоминающие устройства . . . . .	34
Оптические (оптоэлектронные) запоминающие устройства . . . . .	42
Голографические запоминающие устройства . . . . .	48
Список использованной литературы . . . . .	61

---

### Научно-популярное издание

---

Анатолий Александрович Ерофеев,  
Виктор Сергеевич Ковалев

### СОВРЕМЕННАЯ НЕТРАДИЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА (Системы машинной памяти)

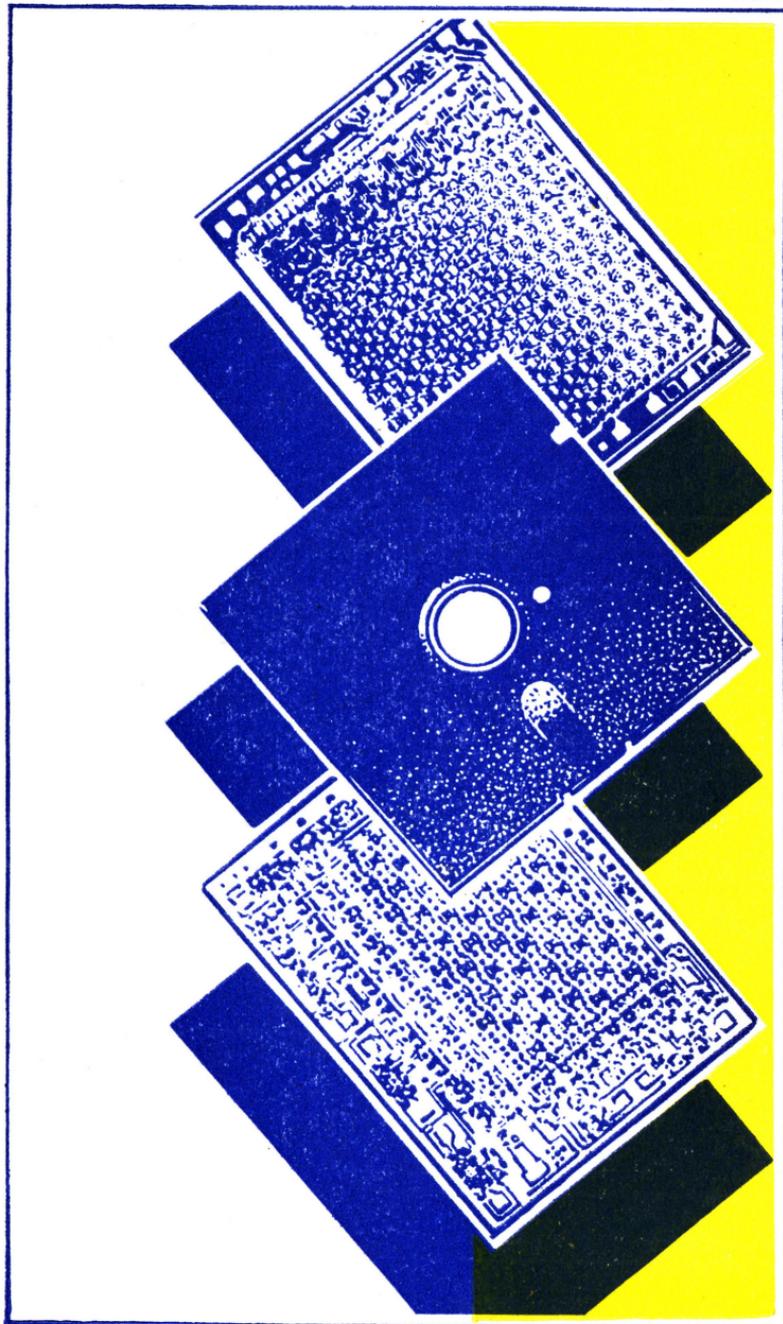
Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*  
Зам. гл. отраслевого редактора *Г. Г. Карвовский*  
Редактор *Б. М. Васильев*  
Мл. редактор *Н. А. Васильева*  
Художники *Л. П. Ромасенко* и *Ю. М. Аратовский*  
Худож. редактор *П. Л. Храмцов*  
Техн. редактор *Н. В. Клецкая*  
Корректор *В. И. Гуляева*

ИБ № 10084

Сдано в набор 11.11.88. Подписано к печати 05.01.89. Т-01313. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отг. 3,57. Уч.-изд. л. 3,39. Тираж 39 764 экз. Заказ 2194. Цена 15 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 894602.  
Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

15 коп.

Индекс 70077



СЕРИЯ **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА  
И СВЯЗЬ**