

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 3

1993

ЭЛЕМЕНТЫ 3-D ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

УДК 537.226

Э. Г. Косцов
(Новосибирск)

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ ЗАПОМИНАЮЩАЯ СРЕДА НА ОСНОВЕ
ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Рассматриваются особенности проявления продольного электрооптического эффекта в тонких сегнетоэлектрических пленках ниобата бария-стронция ($Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$), получаемых методом ВЧ-распыления. Проведено исследование возможности использования структуры $(In_2O_3 + SnO_2) - Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6 - (In_2O_3 + SnO_2)$ как реверсивной запоминающей среды с оптическим (электрооптическим) считыванием информации, когда состояние элемента среды определяется направлением поляризации в сегнетоэлектрике. Приводятся электрофизические характеристики такой среды. Показано, что указанная структура обладает рядом преимуществ по сравнению с магнитооптической запоминающей средой.

В последние несколько лет наблюдается интенсивная разработка нового поколения микросхем запоминающих устройств (ЗУ), основанных на новых для микроэлектроники физических принципах записи информации и соответственно на новых материалах — сегнетоэлектрических пленках [1—7]. Появлению этого направления ЗУ способствовали, наряду с большим физико-технологическим опытом по созданию ЗУ на базе сегнетоэлектрической керамики, успешная разработка технологии получения высококачественных сегнетоэлектрических пленок, не уступающих по основным характеристикам соответствующим монокристаллам, а также необходимость значительного улучшения основных параметров ЗУ, в первую очередь ЗУ, репрограммируемых электрическим полем (ЭРПЗУ). Среди параметров элементов таких ЗУ, требующих качественного улучшения, можно отметить время цикла запись-стирание информации τ (его необходимо снизить с 10 мс, характерных для современных ЭРПЗУ, до 10 нс), число выполнения таких циклов N , радиационную стойкость, которые требуют увеличения на несколько порядков.

В настоящее время уровень разработки элементов памяти на основе сегнетоэлектрических пленок таков, что можно уверенно утверждать о научной обоснованности и практической реальности поставленных задач (имеется ряд сообщений [8—10] о достижении очень высоких значений указанных параметров при исследовании лабораторных образцов элементов памяти). Ряд фирм уже объявил о подготовке выпуска первых промышленных партий микросхем сегнетоэлектрических ЗУ с очень высокими параметрами (на основе кремниевых интегральных схем), которые, вероятно, появятся в продаже в ближайшее время, сообщается также о подготовке аналогичных микросхем на базе GaAs-кристаллов (см., например, [11]).

Можно отметить, что в ближайшие годы реально использование сегнетоэлектрических пленок в микроэлектронике и при создании новых поколений приемников излучения, устройств оптической обработки информации, датчиков давления, температуры и т. п. [7, 12, 13].

Принцип записи информации в указанных элементах памяти основан на изменении с помощью электрического поля направления поляризации в сегнетоэлектрике, которое сохраняется в течение длительного времени. При этом напряженность электрического поля, при которой осуществляется переключение направления поляризации, в 30—100 раз ниже напряженности поля в репрограммируемых элементах памяти современных ЗУ, например в МНОП-структурах или элементах с плавающим затвором. Этим, в частности, и объясняется высокая циклическая стойкость сегнетоэлектрических элементов.

Считывание информации в таких элементах памяти возможно с использованием одного из следующих физических эффектов, характерных для сегнетоэлектрика:

1. По величине тока, соответствующего одному из состояний элемента, — тока переполаризации. Этот принцип считывания получил в настоящее время наибольшее распространение в силу простоты конструкции элемента (металл—сегнетоэлектрик—металл) и соответственно высокой технологичности его изготовления [1—6]. Однако такому принципу считывания информации свойственны три недостатка: 1) разрушающее считывание, когда после каждого акта считывания информации необходима ее регенерация; 2) относительно высокое напряжение считывания, соизмеримое с напряжением записи (3—10 В), приводящее к деградационным явлениям (начиная с 10^{10} и более циклов записи—стирания); 3) относительно высокая энергия, потребляемая при считывании.

2. Исходя из полевых эффектов, когда напряженность электрического поля, связанная с наличием в сегнетоэлектрике заданного направления поляризации, проявляется через изменение проводимости или величины емкости структуры полупроводник—(диэлектрик)—сегнетоэлектрик—металл. Такой принцип считывания является неразрушающим, допускающим практически неограниченное число обращений к элементу, в силу порогового характера проявления полевого эффекта. Однако он требует существенно более сложной конструкции элемента и более высокого уровня технологии, в первую очередь для поддержания заданных характеристик границы раздела полупроводник—сегнетоэлектрик. Элементы памяти с указанной структурой известны достаточно давно [14—16], но они не получили пока развития как в силу относительно высокого в те годы уровня технологии, так и в силу недостаточности понимания физических эффектов, имеющих место в таких многослойных структурах [17].

3. По величине пьезоэлектрического тока, направление которого зависит от направления поляризации в сегнетоэлектрической пленке. Тонкопленочные элементы памяти, базирующиеся на таком принципе считывания информации, являются реальными [18, 19], они также отличаются возможностью сохранения информации при ее считывании (нагрев элемента может не превышать 1—10 °С). Для получения достаточно малых времен считывания (менее 1 мкс) сегнетоэлектрическая пленка должна иметь толщину менее 0,3 мкм. Кроме того, в конструкцию элемента памяти необходимо ввести нагревающий элемент.

4. По величине пьезоэлектрического тока, который также зависит от направления поляризации в образце. Элементы памяти с таким принципом считывания созданы на основе сегнетокерамических пластин [20] (создание их на основе тонких сегнетоэлектрических пленок пока неизвестно).

5. Исходя из проявлений электрооптического эффекта. Величина электрооптического сигнала зависит от распределения поляризации $P(x)$ в объеме сегнетоэлектрика, при этом изменение во времени $P(x)$ отражается на изменении интенсивности светового потока, проходящего через образец $I(t)$. Такие элементы памяти на базе керамических пластин рассматривались ранее (см., например, [21]).

Целью настоящей работы является исследование электрооптического эффекта (эффекта Пожкельса) в тонких сегнетоэлектрических пленках ниобата бария-стронция (НБС) $Ba_xSr_{1-x}Nb_2O_6$ и особенностей использования его при считывании информации в устройствах памяти, создаваемых на основе элек-

трооптических пленок. Выбор указанного сегнетоэлектрического материала обусловлен тем, что, наряду с высоким электрооптическим коэффициентом (r), НБС обладает и другими достоинствами:

1. Высокая температура плавления, допускающая возможность проведения технологических процессов, характерных для технологии изготовления современных СБИС.

2. Малые значения пьезоэлектрических потерь, что важно в случае воздействия на образец импульсных нагрузок.

3. Стабильность параметров образцов во времени (образцы пленок НБС, полученные более 15 лет назад, сохраняют свои первоначальные параметры).

4. Большая величина диэлектрической проницаемости, обеспечивающая более эффективное согласование по величине емкости элементов с малой площадью электродов (создаваемых в структуре оптических СБИС) и межэлементных соединений, усилительных каскадов.

Объектом исследования служили тонкопленочные структуры ($\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$)—пленка НБС—($\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2$), получаемые методом ВЧ-распыления на сапфировых подложках. Электрооптическая пленка обладала совершенной текстурой с направлением оси C нормально к поверхности подложки (поверхности электрода). Толщина электрооптической пленки 2—4 мкм, прозрачных электродов 0,1—0,2 мкм (их поверхностное сопротивление 20—100 Ом/см² при коэффициенте пропускания 95—98 % в диапазоне длин волн 0,4—0,65 мкм). Особенностью синтеза электрооптического слоя являлось то, что он осуществлялся в кислородной атмосфере (при давлении 10^{-1} — 10^{-2} торр) по так называемому механизму конечной ориентации роста [22].

Движущей силой конденсации пленки при этом механизме является конкурирующий рост кристаллитов с различной ориентацией осей. В отличие от других механизмов роста пленок, когда ориентирующее действие оказывает только кристаллическая структура подложки, в данном случае создаются такие условия за счет бомбардировки поверхности синтезируемой пленки ионами плазмы и вторичными электронами, когда имеет место не только наращивание пленки, но и одновременное ее реиспарение (сублимация), при этом для различно ориентированных кристаллитов оно осуществляется с разной скоростью (эта скорость может отличаться в 10—50 раз). В конечном итоге на различных поверхностях кристаллитов в единицу времени конденсируется различное число молекул, что и определяет преимущественный рост кристаллитов только с одной из ориентаций кристаллографических осей. Естественно, что указанный механизм возможен только тогда, когда скорости роста и реиспарения соизмеримы. Метод ВЧ-распыления и обеспечивает определенное соотношение между скоростью поставки материала в зону конденсации пленки и регулируемой скоростью его удаления.

Можно отметить, что детальное исследование различных сторон процесса получения сегнетоэлектрических пленок методом ВЧ-распыления, включая анализ особенностей протекания плазмохимических реакций и влияния их на качество образцов, проведено в работах Ростовской школы по сегнетоэлектрическим пленкам [23, 24].

Сравнительный анализ различных современных способов получения многокомпонентных сегнетоэлектрических пленок толщиной 2—5 мкм (золь-гель технология [25], химическое осаждение из паров [26], ВЧ-распыление) дает возможность полагать, что в настоящее время предпочтение можно отдать методу ВЧ-распыления; с его помощью получены высококачественные пленки ряда наиболее известных сегнетоэлектриков. Такой вывод следует из совокупности следующих особенностей этого метода по сравнению с другими методиками.

1. Возможность получения высококачественных текстурированных сегнетоэлектрических пленок на поверхности электродов, не обладающих ориентирующим влиянием на кристаллизацию пленки. Это особенно важно при создании многослойных структур на базе сегнетоэлектрических пленок.

2. Отсутствие необходимости последующей обработки получаемых образцов, например, путем термического отжига, которые сразу имеют необходимые сегнетоэлектрические характеристики.

3. Совместимость этой технологии с совокупностью технологических операций по созданию интегральных схем, отсутствие «мокрых» и других вспомогательных технологических процессов.

4. Возможность введения в химический состав многокомпонентных пленок широкого набора различных модификаторов, способных изменять определенным образом электрофизические характеристики образцов.

Исследование электрооптического сигнала (индуцированного полем двулучепреломления Δn) в указанных структурах осуществлялось с помощью модифицированной ранее описанной поляризационно-оптической методики [27] (рис. 1). Пучок света от лазера 1, отраженный от поворотного зеркала 2, проходит через вращатель плоскости поляризации 3, поляризатор 4 и поступает на фокусирующую линзу 5 и далее на исследуемую тонкопленочную структуру 6. Вращатель поляризации и поляризатор служат для создания линейно-поляризованного света, плоскость поляризации которого составляет оптимальный угол с плоскостью падения Θ . Линза 5 фокусирует лазерный пучок в заданную область образца (на поверхность одного из внешних прозрачных электродов). Под действием приложенного к образцу электрического поля E (постоянного или импульсного) проходящий через структуру свет становится эллиптически поляризованным, при этом в случае линейного электрооптического эффекта его эллиптичность γ пропорциональна индуцированному полем двулучепреломлению Δn ($\Delta n \approx rE$, под величиной r в общем случае нужно понимать некоторое эффективное значение $r_{\text{эф}}$ в зависимости от соотношения угла направления распространения света относительно кристаллографических осей образца, угла Θ и направления электрического поля). Эллиптически поляризованный свет проходит через компенсатор 7, на выходе которого свет линейно поляризован с плоскостью поляризации, повернутой относительно начальной поляризации на некоторый угол $\varphi \approx \gamma \approx \Delta n$, и поступает далее на анализатор 8. Регистрация модулированного излучения проводилась фотоприемником 9, в качестве которого использовался фотодиод в режиме короткого замыкания с преобразователем ток—напряжение (с применением операционного усилителя) либо ФЭУ с быстродействующей схемой преобразования ток—напряжение, нагруженной на входное сопротивление осциллографа, — 50 Ом. Величина Θ находилась в пределах 45° — 50° так же, как и угол между оптической осью образца (осью C) и направлением колебаний в поляризаторе.

Можно отметить, что выбор величины Θ определяется углом наклона ξ к оси C относительно плоскости подложки. Технологические возможности метода ВЧ-распыления позволяют варьировать величину этого угла и получать, в частности, значение ξ , близкое к 45° , что допускает осуществление модуляции светового потока, ортогонального к плоскости подложки.

Интенсивность света I , прошедшего через указанную структуру, следующим образом зависит от подаваемого напряжения V :

$$I = I_0 \sin^2(\beta_0 + \delta), \quad \delta = (2\pi d/\lambda)\Delta n,$$

где I_0 — интенсивность света на входе структуры, β_0 — угол отстройки анализатора от положения максимального гашения, который выбирался исходя из условий, обеспечива-

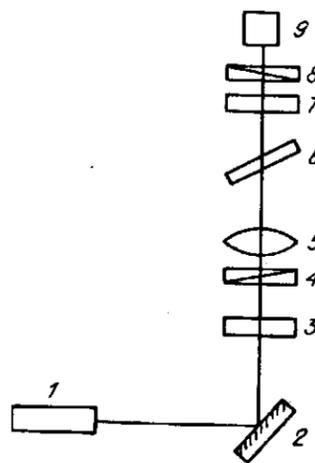


Рис. 1. Блок-схема установки для исследования электрооптических пленок

ющих оптимальное соотношение сигнал/шум, λ — длина световой волны, d — толщина электрооптической пленки, $\Delta n = \pi n_0^3 r V / \lambda$, n_0 — показатель преломления для обыкновенной волны, r — электрооптический коэффициент.

Качество сегнетоэлектрического слоя характеризуется следующими параметрами: величиной поляризации насыщения P_s , определяемой исходя из петли диэлектрического гистерезиса, $10\text{--}20$ мкКл/см²; диэлектрической проницаемостью ϵ , на частоте 1 кГц ϵ более 1500—2500; пьезоэлектрическим коэффициентом $3\text{--}6 \cdot 10^{-8}$ Кл/см²К [28].

Основные закономерности проявления электрооптического эффекта в указанных структурах при воздействии на них импульсов напряжения следующие [29, 30]:

1. Зависимость I_i от амплитуды импульсов напряжения V характеризуется наличием начального участка, на котором $I_i \approx V^2$ (до выхода величины поляризации P до насыщения), переходящего, начиная со значения $V_{кр}$, в участок линейной зависимости I_i от V (рис. 2), величина электрооптического коэффициента при этом лежит в диапазоне $5\text{--}15 \cdot 10^{-9}$ см/В, глубина модуляции 80—90%, эффективность модуляции, определяемая выбором рабочей точки, например величиной β , находится в пределах $10^{-1}\text{--}10^{-3}$.

2. При приложении к образцу постоянного напряжения смещения $V_{см}$ возможно наблюдение двух характерных форм электрооптического сигнала: когда полярности $V_{см}$ и импульса напряжения совпадают, то изменение $I_i(t)$ полностью определяется формой $V(t)$, когда же эти полярности противоположны, то форма $I_i(t)$, определяемая процессами переключения направления поляризации в объеме образца, может в первые моменты времени сильно отличаться от формы $V(t)$. Установлено, что время переключения поляризации $t_{пер}$ экспоненциально зависит от напряженности поля E : $1/t_{пер} = 1/t^0 \exp(E/E_0)$ (t^0 и E_0 — константы), а длительность процесса лимитируется длительностью процесса зародышеобразования, которое начинается у поверхности электрода, находящегося под положительным потенциалом [31].

Из изложенного следует, что для исключения изменения электрооптического сигнала во времени непосредственно после подачи на образец прямоугольного импульса напряжения к нему необходимо прикладывать постоянное напряжение смещения (для исследованных образцов — в пределах 5—7 В). Постоянное смещение, кроме того, приводит к монодоменизации образца и, следовательно, к увеличению электрооптического коэффициента (до 3—10 раз) в зависимости от качества сегнетоэлектрической пленки.

Экспериментальные исследования показали, что в указанных структурах импульсный электрооптический сигнал практически не зависит от интенсивности модулируемого светового потока, вплоть до интенсивности 10 Вт/см², в том числе при освещении образца светом с длиной волны $\lambda = 0,34$ мкм (из области собственной проводимости сегнетоэлектрика). Этот факт дает основания полагать, что работоспособность ЗУ на основе принципов электрооптической модуляции света будет сохраняться и при предельных (по уровню освещенности и величине теплоотвода) режимах.

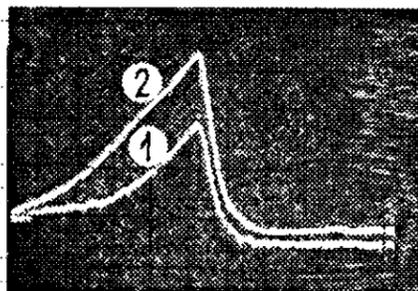


Рис. 2. Зависимость величины электрооптического сигнала от прикладываемого к образцу напряжения (кривая 1); кривая 2 — к образцу приложено дополнительное постоянное смещение 10 В, совпадающее по полярности с пилообразным напряжением:

$V(t)$ линейно возрастает во времени; длительность импульса 0,5 мс, его амплитуда 20 В

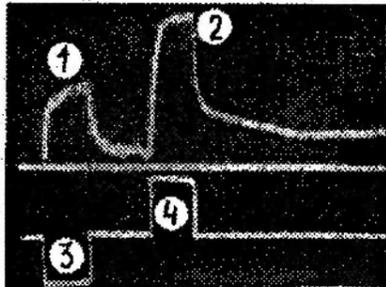


Рис. 3. Осциллограммы, характеризующие униполярность электрооптического сигнала. Длительность импульсов напряжения 30 мкс, $V = 10$ В, 1, 2 — электрооптический сигнал, 3, 4 — импульс напряжения. Протяженность переднего фронта электрооптического сигнала определяется постоянной времени заряда образца (его площадь в данном случае 1 мм^2 и емкость порядка $2 \cdot 10^{-8} \text{ ф}$)

3. Несмотря на идентичность материала электродов, в исследованных структурах наблюдается асимметрия в поведении I_r относительно полярности импульсов напряжения (амплитуда I_r больше тогда, когда внешний электрод находится под отрицательным потенциалом).

Установлено, что асимметрия связана как с ростовыми факторами, характеризующими процесс синтеза электрооптического слоя, так и с возникающими в нем внутренними механическими напряжениями, достигающими значения, как показывают оценки, 10^8 Н/м^2 и более (из-за различия коэффициентов термического расширения материалов сегнетоэлектрика и подложки). Кроме того, наблюдается различная протяженность участка $I_r \approx V^2$, а также протяженность «хвоста» электрооптического сигнала после завершения воздействия на образец импульса напряжения (рис. 3). Указанный долговременный спад электрооптического сигнала не проявляется, когда полярность импульса напряжения соответствует меньшей амплитуде I_r . Описанный эффект, связанный с частичным распадом созданного во время действия импульса напряжения распределения поляризации в объеме сегнетоэлектрической пленки, указывает на то, что это распределение неоднородно по толщине пленки, распадаясь быстрее у поверхности отрицательного электрода. Можно отметить, что аналогичный вывод следует и из наблюдений импульсных пьезоэлектрических токов, индуцированных короткими импульсами лазерного излучения наносекундной длительности, когда было установлено, что после нагрева образца до температур, превышающих температуру фазового перехода, с последующим охлаждением в короткозамкнутом состоянии направление пьезотока и его амплитуда, соответствующая поляризации в узкой приэлектродной области, всегда возвращались в состояния, характерные для свежизготовленного образца [31].

Можно отметить также, что асимметрия распределения поляризации в объеме образца проявляется и в асимметрии относительно полярности прикладываемого к образцу напряжения, петли диэлектрического гистерезиса $P(E)$ и вольт-фарадных характеристик $\epsilon(E)$.

Кроме того, дополнительно можно отметить, что роль механических напряжений в проявлении электрооптики в указанных структурах существенна (небольшой изгиб подложки, вызванный давлением на ее поверхность вблизи внешнего электрода иглы с усилием 1—3 кг, может привести к уменьшению амплитуды электрооптического сигнала в несколько раз).

4. Наблюдается гистерезис величины I_r , наиболее выраженный в области $V < V_{кр}$, соответствующий петле диэлектрического гистерезиса и гистерезиса пьезоэлектрического сигнала.

Рис. 4, а характеризует гистерезис в поведении электрооптического сигнала при воздействии на образец пилообразного импульса напряжения с практически линейным задним фронтом для случая, когда величина $\bar{\rho}$ находится в пределах $85\text{--}87^\circ$. Рис. 4, б описывает соответствующее осциллограмме изменение I_r .

Анализ указанных закономерностей показывает, что они достаточно однозначно истолковываются в рамках особенностей перераспределения поляризации в объеме сегнетоэлектрической пленки с учетом ростовой униполярности этого распределения у поверхности одного из электродов и возможности существования в объеме образца структуры встречных доменов.

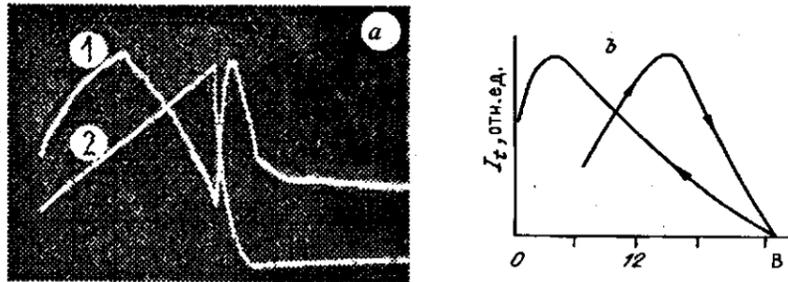


Рис. 4. Гистерезис электрооптического сигнала в тонкопленочной структуре $(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ —НБС— $(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$:
 а — осциллограмма, 1 — электрооптический сигнал, 2 — импульс напряжения; б — соответствующее осциллограмме поведение электрооптического сигнала. Толщина пленки НБС 3,5 мкм. Протяженность переднего фронта пилообразного импульса напряжения 1 мс, заднего — 0,1 мс, $V = 24$ В.

В структурах $(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ —НБС— $(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$ обнаружен эффект долговременной памяти, заключающийся в чувствительности как амплитуды, так и формы импульсов электрооптического сигнала к предыстории воздействия на сегнетоэлектрическую пленку импульсов напряжения.

Осциллограммы рис. 5, а—д характеризуют процесс изменения электрооптического сигнала (кривая 2) в момент действия на вышеуказанную структуру (находящуюся в одном из двух устойчивых состояний) импульса напряжения (кривая 4), при последовательном увеличении прикладываемого к образцу в предшествующий момент времени амплитуды импульса напряжения противоположной полярности (кривая 3). Кривая 1 характеризует электрооптический сигнал, проявляющийся при воздействии на образец импульса напряжения 3. Это воздействие можно рассматривать как запись (стирание) информации, поскольку новое индуцированное полем значение

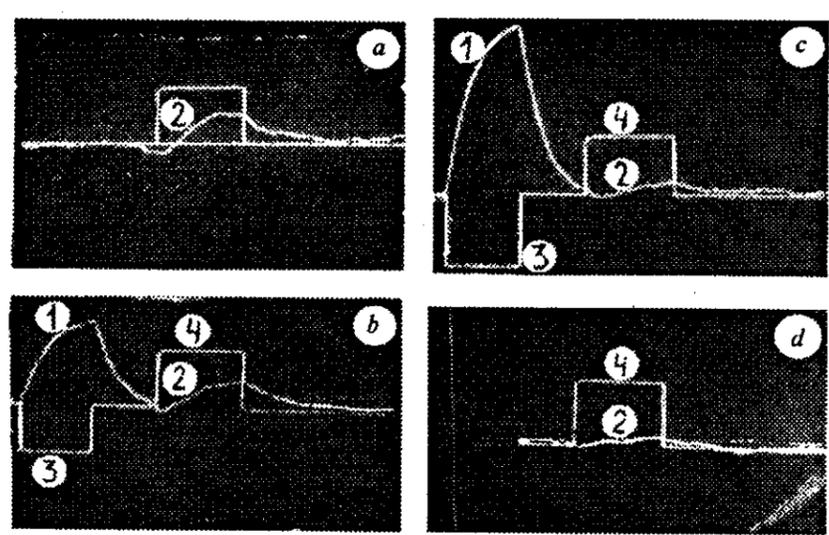


Рис. 5. Осциллограммы, характеризующие процесс стирания информации в электрооптической среде:
 а — исходный сигнал (2) (уровень логической «1», $V = 12$ В, его длительность 50 мкс); б — электрооптический сигнал (2) после воздействия на образец импульса противоположной полярности с амплитудой 12 В; в — электрооптический сигнал (1), соответствующий стирающему импульсу (3); д — конечное значение электрооптического сигнала (2) (уровень логического «0», амплитуда стирающего импульса — 16 В).

электрооптического сигнала сохраняется в течение длительного времени. Можно отметить, что для фиксирования нового состояния образца необходимо, чтобы длительность импульса записи превышала некоторое значение τ_k . В частности, при амплитуде импульса записи 12 В величина τ_k должна быть больше 10 мкс, в противном случае значение электрооптического сигнала возвратится в исходное состояние за счет проявления так называемого i^* -эффекта [31, 32] и униполярности образца. Этот эффект дает возможность осуществлять неоднократное считывание информации без ее разрушения.

Возвращение образца в исходное состояние возможно либо за счет прикладывания к нему импульса напряжения с амплитудой, превосходящей амплитуду импульса записи, либо за счет его нагревания до температуры, превышающей температуру Кюри (T_K), и последующего охлаждения в короткозамкнутом состоянии. При этом как электрооптический сигнал, так и интенсивность проходящего через структуру света в отсутствие электрического поля различны для случаев термической и электрической деполяризации образца.

Таким образом, указанная структура может использоваться как запоминающая оптическая реверсивная среда, которая по сравнению со средой на магнитооптических пленках [33] имеет более высокую эффективность: угол поворота плоскости поляризации света φ при считывании информации достигает 5—6° при 12—15 В прикладываемого к образцу напряжения (в магнитооптических пленках этот угол лежит в пределах 0,5° [34]). Когда считывание происходит в отсутствие поля, амплитуда сигнала, характеризующего состояние записи информации в образце, на порядок меньше. В последнем случае считывание информации является неразрушающим вне зависимости от длительности импульса считывания. Кроме того, запись (стирание) информации путем нагрева локального участка образца, например воздействием на него светового потока (экспериментально оно осуществлялось с помощью CO₂-лазера), может происходить при более низкой (по сравнению с магнитооптической средой) температуре образца, порядка 100 °С, с возможностью снижения ее до 15—30 °С за счет модификации состава сегнетоэлектрика редкоземельными элементами [35].

Преимущество такой электрооптической запоминающей среды заключается в том, что стирание информации возможно с помощью не магнитного (как в магнитооптических средах), а электрического поля за более короткое время, но в этом случае для обеспечения локальности стирания информации конструкция среды (система внешних электродов с малыми геометрическими размерами) должна быть более сложной либо необходимо введение в структуру дополнительного высокоомного фоточувствительного слоя. Темновое сопротивление последнего должно быть таково, чтобы в незасвеченных областях структуры напряжение практически полностью распределялось на пленке фотопроводника и при подаче импульса напряжения в незасвеченных областях сегнетоэлектрика не успевал переполаризовываться. При освещении такого образца возникает пространственное распределение поляризации сегнетоэлектрика и соответствующее ему пространственное распределение электрооптического отклика. Стирание информации производится путем засветки всей поверхности фотопроводника в момент подачи на образец импульса напряжения с полярностью, противоположной записываемому импульсу. Подобные структуры, созданные на базе электрооптических монокристаллов и керамики (толщиной 50—100 мкм), обладающих продольным электрооптическим эффектом, и тонких фотопроводящих пленок, известны достаточно давно [21], проведено их исследование при создании устройств памяти с высоким разрешением, в том числе при голографических режимах записи [36] с многократной перезаписью. Однако указанные структуры управляются импульсами напряжения с амплитудой не менее 100—200 В и в силу большого эффективного сопротивления сегнетоэлектрика Z_{eff} имеют достаточно большое время перезаписи τ_n (не менее 3—10 мс).

Использование тонких электрооптических слоев позволит значительно снизить управляющее напряжение, уменьшить τ_n и увеличить пространствен-

ное разрешение. С целью экспериментальной проверки этого положения была создана тонкопленочная структура $(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)\text{—НБС—Bi}_{12}\text{SiO}_{20}\text{—}(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)$. Толщина пленки силиката висмута 1 мкм, она обладает высокой фоточувствительностью и большим динамическим диапазоном [37] и имеет характеристики, удовлетворяющие в первом приближении соотношению $Z_c < Z_{\text{НБС}} < Z_t$, где Z_c и Z_t — световое и темновое сопротивление пленки $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$; $Z_{\text{НБС}}$ — сопротивление сегнетоэлектрической пленки на единицу площади. Было установлено, что в темноте не происходит переключения поляризации в сегнетоэлектрической пленке вплоть до прикладываемого к образцу напряжения $V = 40$ В, при воздействии на структуру лазерного излучения с $\lambda = 0,63$ мкм и интенсивностью 10^{-3} Вт · см⁻² переключение поляризации имеет место, начиная с $V = 10$ В, за время 1 мс. Дальнейшее снижение τ_n ограничивается чувствительностью фотопроводника (необходимо в силу большой диэлектрической проницаемости пленки НБС уменьшение Z_c до значений 10 Ом · см⁻²).

Можно отметить также, что описанная электрооптическая среда стабильна во времени, она не требует нанесения пассивирующих слоев как поверх электрооптической пленки, так и между подложкой и пленкой, как это имеет место при использовании магнитооптического материала из-за явлений его старения и изменения со временем магнитных свойств [33].

Исследованная структура может быть использована в цифровых запоминающих устройствах, когда высокоскоростное считывание информации (за 1—10 нс) в каждом элементе ЗУ осуществляется с помощью светового луча, что позволяет считывать информацию целыми страницами. Такой вариант считывания наиболее целесообразен при построении оптических компьютеров, в которых передача логических сигналов производится по оптическим каналам связи с одновременным обменом информацией между множеством элементов, находящихся на различных плоскостях.

Характеристики цифрового элемента памяти с оптическим принципом считывания аналогичны характеристикам нового поколения элементов памяти на основе сегнетоэлектрических пленок, репрограммируемых электрическим полем, которые имеют число актов запись-стирание информации болсе $10^{12}\text{—}10^{15}$, при времени репрограммирования менее 100 нс и времени хранения информации в течение нескольких лет [1—7]. Однако такие элементы будут отличаться большей толщиной сегнетоэлектрической пленки и большими размерами площади элемента, которая в силу явлений дифракции в условиях проекции решетки модуляторов на решетку фотоприемников и при выполнении законов геометрической оптики не может быть меньше чем $(h\lambda)^{1/2}$, где h — расстояние между окном модулятора и фотоприемником. Реально величина h составляет 50—100 мкм (толщина подложки), и поэтому линейные размеры дискретного элемента памяти с оптическим считыванием информации не могут быть меньше чем 4 мкм (при $\lambda = 0,3$ мкм).

Существенным фактором, способным ограничить тактовые частоты устройства цифровых ЗУ, является высокое значение удельной емкости указанной структуры $C_{\text{уд}}$, обусловленное высокой величиной диэлектрической проницаемости ϵ электрооптического слоя. Снижение значения ϵ приводит к уменьшению величины электрооптического коэффициента в силу выполнения в сегнетоэлектрическом материале правила Миллера [38], связывающего между собой ϵ и r : $r/\epsilon = \text{const}$. При толщине электрооптического слоя, равной 5 мкм, $C_{\text{уд}} = 2,6\text{—}3,5$ фФ/мкм². Отсюда, выбирая величину удельного теплоотвода Q_t (например, 10 Вт/см²) и значение управляющего напряжения, можно оценить минимальную длительность такта τ (при непрерывном циклировании актов запись-стирание информации). Полагая, в частности, $V = 5$ В, имеем $\tau = 2\text{—}3 \cdot 10^{-7}$ с. Дальнейшее уменьшение τ возможно за счет некоторого увеличения Q_t , а также снижения V до 1—1,5 В, например, путем использования принципа многократного прохождения света через образец —

принципа интерферометрии, создания на базе электрооптической пленки интерферометра типа Фабри — Перо [39].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scott J. F., Godfrey R. B., Araujo C. A. et al. Device characteristics of ferroelectric ceramic KNO_3 thin-film raw memories // Proc. of the Sixth Internat. Symp. on Applications of Ferroelectrics.—Bethlehem, 1986.—P. 569.
2. Dimmler K., Parris M., Butler D. et al. Switching kinetics in KNO_3 ferroelectric thin-film memories // J. Appl. Phys.—1987.—61, N 12.—P. 5467.
3. Godfrey R. B., Scott J. F., Meadows H. B. et al. Analysis of electrical switching in sub-micron KNO_3 thin-films // Ferroelectrics Lett.—1986.—5.—P. 167.
4. Scott J. F., Kammerdiner L., Parris M. et al. Switching kinetics of lead zirconate titanate submicron thin-film memories // J. Appl. Phys.—1988.—64, N 2.—P. 787.
5. Вебер С. Сегнетоэлектрические конденсаторы — изобретение фирмы Ramtron // Электроника.—1989.—62, № 5.
6. Аиверсен У. Р. ЗУПВ фирмы Krysalis с запоминающим элементом из сегнетоэлектрика // Электроника.—1988.—61, № 5.
7. Kostsov E. G., Malinovsky V. K. Large-scale use of ferroelectrics in microelectronics is reality // Ferroelectrics.—1989.—94.—P. 457.
8. Коул Б. С. Новое семейство энергонезависимых логических ИС и ЗУ на базе сегнетоэлектрических материалов // Электроника.—1989.—№ 15.
9. Гош Д. Мнение фирмы Интерметалл: Будущее — за сегнетоэлектрическим ЗУПВ // Электроника.—1989.—62, № 5.
10. Application Note. Non-volatile ferroelectronics // Microprocessors and Microsystems.—1989.—13, N 4.—P. 291.
11. Geldeman W. A., Wu S. Y., Sanchez L. E. et al. PZT thin-films for GaAs ferroelectric RAM applications // IEEE 7th Internat. Symp. on Applications of Ferroelectrics.—Urbana, 1990.—P. 258.
12. Scott J. A., Faz De Arujo C. A., McMillan L. D. Integrated ferroelectrics // Condensed Matter News.—1992.—1, N 3.—P. 16.
13. Swartz S. L., Wood V. E. Ferroelectric thin-films // Ibid.—N 5.—P. 4.
14. Wu S.-Y. A new ferroelectric memory device, metal—ferroelectric—semiconductor transistor // IEEE Trans. Electron Dev.—1974.—ED-21, N 8.—P. 499.
15. Wu S.-Y. Memory retention and switching behaviour of metal—ferroelectric—semiconductor transistor // Ferroelectrics.—1976.—2, N 3.—P. 379.
16. Sugibuchi K., Kurogi Y., Endo N. Ferroelectric field-effect memory device using $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ film // J. Appl. Phys.—1975.—46, N 7.—P. 2877.
17. Baginsky I. L., Erkov V. G., Kostsov E. G., Likhachev A. A. Injection amplification effect in the metal—ferroelectric—insulator—semiconductors thin-film structure // Thin Solid Films.—1991.—202.—P. 191.
18. Baginsky I. L., Kostsov E. G., Sterelykhina L. N. Electronic device based on niobate barium—strontium thin film // IEEE 7th Internat. Symp. on Applications of Ferroelectrics.—Urbana, 1990.—P. 302.
19. Новик В. К., Гаврилова Н. Д., Фельдман Н. Б. Пьезоэлектрические преобразователи.—М.: Сов. радио, 1979.
20. Джагуров Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике.—Л.: Машиностроение, 1986.
21. Burfoot J. C., Taylor G. W. Polar dielectrics and their applications.—London a. o.: Macmillan, 1979.
22. Bauer E. Growth of oriented films on amorphous surfaces // Single-Crystal Films.—Oxford, London: Pergamon Press, 1964.—P. 58.
23. Дулкивич В. П., Фесенко Е. Г. Физика сегнетоэлектрических пленок.—Ростов-на-Дону: РГУ, 1979.
24. Марголин А. М., Захарченко И. Н., Еремкин В. В. и др. Формирование текстуры в тонких пленках сложных окислов, получаемых методом катодного распыления // Изв. вузов. Физика.—1983.—25, № 6.
25. Yi G., Wu Z., Sayer M. // J. Appl. Phys.—1988.—64, N 5.—P. 2117.
26. Blocher J. M. // Deposition Technologies for Films and Coating / Ed. Bunshah. (New Publication).—N. Y.: Park Ridge, 1982.—P. 335.
27. Antzigin V. D., Kostsov E. G., Malinovsky V. K., Sterelyukhina L. N. Electrooptics of thin ferroelectric films // Ferroelectrics.—1981 (GB)—38, N 1—4.—P. 761.

28. Косцов Э. Г. Тонкопленочные пьезоэлектрические приемники излучения // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы.—1989.—№ 10.
29. Antzigin V. D., Egorov V. M., Kostsov E. G. et al. Ferroelectric properties of thin strontium barium niobate films // *Ferroelectrics*.—1985.—63.—P. 35.
30. Анцыгин В. Д., Косцов Э. Г., Стерелюхина Л. Н. Импульсная электрооптическая модуляция света в тонких сегнетоэлектрических пленках // *Автоматрия*.—1983.—№ 5.
31. Antzigin V. D., Kostsov E. G., Sokolov A. A. Pyroelectricity in ferroelectric thin films // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya)*.—1986.—N 2.—P. 28.
32. Taylor G. W. Utilisation of the t^* partial switching properties of ferroelectrics in memory
37. Камышлов В. Ф., Косцов Э. Г., Покровский Л. Д. Фотоэлектрические свойства пленок силиката висмута // *Автоматрия*.—1980.—№ 1.
38. Lines M. E., Glass A. M. *Principles and Application of Ferroelectrics and Related Materials*.—Oxford: Clarendon Press, 1977.—P. 735.
39. Gordon E. I., Righen I. D. The Fabri—Perot electrooptical modulator // *Bell Syst. Techn. J.*—1963.—42, N 1.—P. 155.

Поступила в редакцию 4 февраля 1993 г.