

СРЕДЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

УДК 548.0:537.226.33:681.325:621.378

ДЖ. КОБАЯСИ, Ю. УЕЗУ

(Токио, Япония)

ОПТИЧЕСКАЯ ПАМЯТЬ, ПРИНЦИПЫ ЗАПИСИ И ИСПОЛЪЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

(Обзор)

I. Введение. Прошло около десяти лет, с тех пор как пристальное внимание специалистов было обращено на проблему оптической памяти. Это внимание объясняется возросшими требованиями, которые предъявляют к системам памяти быстро развивающиеся вычислительные машины большой мощности. В течение этих лет были разработаны различные принципы оптической записи информации и предложено достаточно большое количество материалов, в принципе пригодных для использования в качестве регистрирующих сред. Следует сказать, однако, что на сегодняшний день не существует систем оптической памяти, способных успешно заменить существующие устройства памяти большой емкости (хотя бы по экономическим соображениям). Сейчас для того чтобы успешно двигаться дальше, необходимо тщательно рассмотреть настоящее состояние разработок в области оптической памяти. В этой работе мы попытались сделать обзор основных принципов оптической записи информации, используемых в настоящее время для построения систем оптической памяти, и дать краткий перечень характеристик важнейших материалов, применяемых в качестве регистрирующих сред для оптической записи информации.

Основные требования к регистрирующим средам, которые могли бы быть успешно использованы для построения систем оптической памяти, можно кратко сформулировать следующим образом:

а) Материал должен быть физически и химически стабильным в течение длительного времени под действием обычных температур и влажности. Более того, специфические физические или химические изменения, ответственные за память, должны происходить быстро и не проявлять усталостных явлений при бесконечном количестве циклов.

б) Энергия, требуемая для записи, должна быть мала. Это требование тем важнее, чем больше элементов оптической памяти содержится в системе, и особенно усиливается в случае голографической записи информации по сравнению с битовой, поскольку в первом случае одновременно записывается целая страница информации на голограмму с площадью порядка $1,0 \text{ мм}^2$, а не единичный бит с площадью $1,0 \text{ мкм}^2$. Средой с незначительным потреблением энергии являются фотографические пленки, которые тем не менее не пригодны для использования в системах оптической памяти с перезаписью информации. Термомагнитные материалы, разработка которых в настоящее время доведена до стадии практического применения в системах оптической

памяти, являются весьма энергоемкой средой. Фотосегнетоэлектрики, на которых сейчас в наибольшей степени сконцентрированы усилия исследователей, занимают в настоящее время положение, промежуточное между фотоматериалами и термомагнитными средами.

в) Среды для записи оптической информации должны быть высокоразрешающими. Разрешение регистрирующих сред тесно связано с размерами зерен среды. Для достижения высокой плотности записи среда должна быть беззернистой или иметь размер зерен, меньший, чем размер бита записываемой информации.

II. Принципы оптической записи информации. Существующие методы оптической записи информации можно разделить на две категории: методы постоянной (без перезаписи) и реверсивной (с возможностью стирания и перезаписи информации) записи.

Лучшие материалы для постоянной записи — высокоразрешающие фотоматериалы. Разрешение имеющихся в продаже фотоматериалов достигает 2000 лин/мм, а их чувствительность * — 10^{-5} — 10^{-4} Дж/см².

Реверсивную запись можно осуществить двумя различными физическими методами: методом термической и фотоиндуцированной записи.

1. Методы термической записи. Эти методы используются для записи информации на магнитных материалах [1] путем нагрева среды лазерным лучом. Яркий пример такого метода — использование термомагнитного эффекта в ферро- или ферримагнетиках. Энергия светового луча применяется для нагрева участка среды, на котором производится запись бита информации, до температуры, при которой нагретый участок перемагничивается. Для считывания в этом случае используется магнитооптический эффект (эффект Фарадея)**.

Другой важной группой материалов, которые можно использовать для термической записи, являются некоторые полупроводники. Для записи информации может быть использован переход из аморфного в кристаллическое состояние халькогенида $\text{Te}_{81}\text{Ge}_{15}\text{Sb}_2\text{S}_2$ [2] благодаря тому, что края оптического поглощения аморфной и кристаллической фаз среды различны. При считывании на пропускание коэффициент контрастности может быть достаточно велик. Полупроводники этого класса имеют сравнительно низкую чувствительность порядка $0,05 \div 1,0$ Дж/см² и, кроме того, в них наблюдаются усталостные явления.

В полупроводнике VO_2 , который при нагревании переходит в металлическое состояние, изменяется коэффициент пропускания или отражения [3]. Этот эффект также может быть использован для оптической записи, однако он имеет значительный тепловой гистерезис, что препятствует его практическому использованию.

В некоторых отмеченных выше случаях количество записываемой информации ограничивается мощностью используемого лазера, а в других, например при использовании магнитооптического эффекта, трудно достичь высокого разрешения.

2. Методы фотоиндуцированной записи. В этих методах для записи информации используются эффекты изменения оптических свойств материалов, вызванные взаимодействием фотонов со средой. Поскольку в этом случае энергия светового луча не переходит в тепло, ограничения методов термической записи в большинстве своем снимаются. Таким образом, при применении этих методов можно в принципе ожидать существенных преимуществ по сравнению с методами термической записи. Материалами для оптической памяти, применение которых основано на этих методах, являются: фотохромные материалы, сегнетоэлектрические — фотопроводящие среды (СФ среды), материалы с фо-

* Энергия, требуемая для записи бита информации, отнесенная к его площади.

** Или эффект Керра. (Прим. ред.)

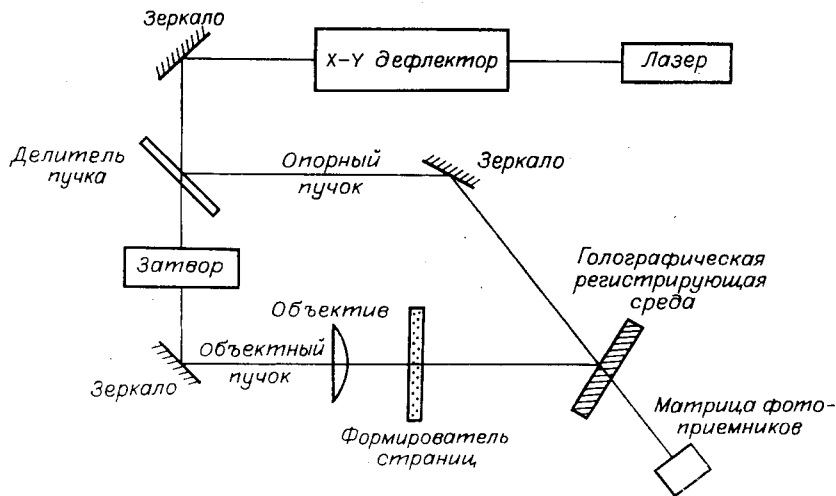


Рис. 1. Схема голографического ЗУ. (Входная информация проецируется на голограмму с помощью формирователя страниц (управляемого транспаранта.)

тонаведенным изменением показателя преломления и среды, являющиеся комбинацией термопластика и фотопроводника (фототермопластики).

2.1. Фотохромные материалы. Фотохромные материалы изменяют свой спектр поглощения при облучении светом определенной длины волны, что влечет за собой сильное изменение поглощения считывающего света с другой длиной волны. Стирание наведенного изменения поглощения может быть осуществлено облучением материала светом с длиной волны, большей, чем у записывающего света, или нагреванием. Типичные примеры таких материалов: щелочно-галоидные кристаллы [4], SrTiO_3 , легированный Fe—Mo или Ni—Mo [5], флюорит кальция [6], различные стекла [7] и некоторые органические материалы [8]. Фотохромные материалы привлекательны как регистрирующие среды для записи объемных голограмм благодаря их потенциальному преимуществу в достижимом разрешении, однако они проигрывают в чувствительности и дифракционной эффективности, что является типичным для поглощающих материалов. В некоторых фотохромных материалах наблюдаются усталостные явления и малая термическая стабильность. Для записи оптической информации могут быть использованы M центры в щелочно-галоидных кристаллах [9], если будут найдены пути устранения усталостных явлений и тепловой деградации записанной информации.

2.2. СФ среды. Информация может быть записана за счет переключения спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках. Для считывания используется электрооптический эффект (неразрушающее считывание) или разряд накопленного электрического заряда (считывание с разрушением).

Как правило, СФ среда состоит из двух слоев (фотопроводящего и сегнетоэлектрического), помещенных между двумя прозрачными электродами. В освещенных местах изменяется проводимость фотопроводящего слоя, к соответствующим точкам сегнетоэлектрического слоя прикладывается напряжение и происходит переключение поляризации сегнетоэлектрика.

Такая среда необходима для создания формирователей страниц — управляемых транспарантов, которые используются для формирования записываемого массива информации при голографической записи, как это показано на рис. 1.

$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ — широко известный кристалл, используемый в СФ системах [10]. Принцип считывания в системах с такими кристаллами основан на изменении пропускания при прохождении света через два кристалла с различно ориентированными антипараллельными доменами.

$\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ может быть использован для тех же целей [11]. Механизм памяти в нем основан на 90° -ном повороте индикатрис антипараллельных доменов (рис. 2).

В основе методов модуляции интенсивности света различными доменами в $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ и $\text{Gd}(\text{MoO}_4)_3$ лежит метод [12], который был предложен для визуализации антипараллельных доменов в BaTiO_3 . Этот метод равно применим для всех сегнетоэлектриков, входящих в класс C_{2v}^* . Особенно многообещающими являются кристаллы боратов, поскольку чистый сдвиг X_{12} группы боратов, как правило, намного меньше, чем у $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ ($X_{12}=1,5'$ в Fe-I-борате [13] и $5'$ в $\text{Cd}_2(\text{MoO}_4)_3$ [14]). Частые поломки пластины из $\text{Cd}_2(\text{MoO}_4)_3$ при переполаризации случаются главным образом из-за большого пьезокоэффициента.

Прозрачная керамика ЦТСЛ также может служить материалом для построения формирователей страниц на основе СФ композиций [15]. Эта керамика может быть изготовлена с варьируемыми в широких пределах свойствами, однако ее чувствительность и разрешение неудовлетворительны (10^2 Дж/см² и ~ 800 лин/мм соответственно).

2.3. Материалы, обладающие эффектом оптического повреждения (ОП). При освещении некоторых сегнетоэлектриков мощным лазерным излучением показатель преломления в освещенной области несколько изменяется [16]. Этот эффект наблюдается в ЦТСЛ [17], LiNbO_3 [18], LiTaO_3 [16], $(\text{Ba}, \text{Na})\text{Nb}_2\text{O}_6$ [19], $(\text{Sr}, \text{Ba})\text{Nb}_2\text{O}_6$ [20] и в BaTiO_3 [21]. Использование эффекта ОП для записи объемных голограмм может обеспечить наиболее простые способы хранения и обработки информации при сверхвысокой емкости. Характеристики основных материалов, обладающих эффектом ОП, приведены в таблице.

Рядом авторов были предприняты попытки объяснения эффекта ОП.

Чен [22] предположил, что до облучения светом в материале существуют ловушки двух типов. Ловушки первого типа первоначально заполнены и нейтральны. Эти ловушки могут отдавать электроны при

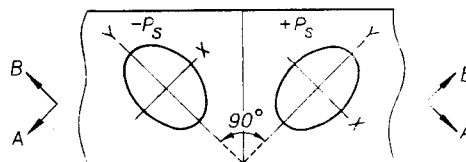


Рис. 2. Ориентация индикатрис антипараллельных доменов в кристаллах $\text{Cd}_2(\text{MoO}_4)_3$.

Характеристики материалов, обладающих эффектом ОП

Материал	Чувствительность, нДж/мкм ²	Разрешение, лин/мм	Литература
LiNbO_3 : 0,002% Fe	0,01	5000	[42]
LiNbO_3 : 1,5% Fe	0,5	5000	[44]
LiNbO_3 : Fe-Mn	10	5000	[45]
KNbO_3	10	1000	[48]
$(\text{Sr}, \text{Ba})\text{Nb}_2\text{O}_6$	12	5000	[20]
$(\text{Ba}, \text{Na})\text{Nb}_2\text{O}_6$	100	1000	[19]
BaTiO_3 : Fe	2,5	1000	[21]
ЦТСЛ	1000	800	[17]

* Класс *тт2*. (Прим. ред.)

фотовозбуждении. Ловушки второго типа первоначально опустошены и могут захватывать электроны. Чен также предположил существование внутреннего электрического поля, направленного к отрицательному полюсу спонтанной поляризации образца. Фотовозбужденные электроны, в свою очередь, вызывают изменение показателя преломления. Амодей [24] рассмотрел возможность смещения фотоиндуцированных электронов путем термической диффузии. В работе [25] причина возникновения внутреннего электрического поля, существование которого было интуитивно предположено Ченом, отнесена за счет объемного фотовольтаического эффекта. Обзор совокупности экспериментальных фактов позволяет утверждать, что модель Чена в совокупности с объемным фотовольтаическим эффектом феноменологически объясняет эффект ОП, однако детальный анализ эффекта еще не завершен. Существенный шаг в разработке теории ОП был сделан в работе [26], где в рассмотрение включены упругие и оптические искажения, соответствующие мягкой фононной моде — важные эффекты, которыми пренебрегали авторы предыдущих теорий. В работе [27] рассмотрена комбинация эффекта ОП и фотовольтаического эффекта на основе эффекта Яна — Теллера.

Информация, записанная в кристалле с помощью ОП, может быть стерта одновременно во всем объеме материала путем освещения его светом той же длины волны или нагреванием. Легкость стирания представляет собой большое неудобство при считывании информации. Считывающий пучок света с той же длиной волны, что и записывающий, тоже вызывает фототок, и показатель преломления в процессе считывания изменяется так же, как и при записи. Другими словами, считывание вызывает деградацию записи, и в конце концов информация утрачивается. Предохранение записанных голограмм от разрушения может быть осуществлено несколькими способами. Для статической фиксации голограмм эффективны методы тепловой фиксации [28] и фиксации электрическим полем [29], а для применения в системах динамической оперативной памяти — методы селективного стирания [30] и многофотонные процессы [31]. Краткое описание этих методов приведено здесь и частично в следующих частях настоящей работы.

а) Тепловая фиксация. Кристалл LiNbO_3 нагревается до 100°C в течение 30 мин в процессе и по окончании записи голограммы [28]. После создания ионного рельефа электронный заряд в кристалле стирается мощной засветкой, но при этом распределение ионного заряда сохраняется. С помощью этого метода время релаксации процесса разрушения увеличивается на несколько порядков по сравнению с нефиксированными голограммами при одинаковой интенсивности считывающего лазерного луча.

б) Фиксация электрическим полем. Высокая подвижность ионов позволяет записанный электронный рельеф преобразовать в стабильное ионное распределение путем приложения внешнего электрического поля, несколько меньшего, чем коэрцитивное [29]. Последующая одно-

родная засветка кристалла возбуждает захваченные электроны, оставляя при этом нескомпенсированным ионное распределение. Стирание в этом случае можно осуществить, приложив электрическое поле, большее, чем микроскопическое коэрцитивное.

Кратко перечислим характерные черты записи голограмм в кристаллах сегнетоэлектриков, обладающих эффектом ОП. Сегнетоэлектрические кристаллы имеют следующие преимущества: высокое разрешение; возможность записи голограмм в объеме; стабильная статическая фиксация голограмм нагреванием или электрическим полем; высокая информационная емкость, достигаемая с помощью многофотонного поглощения и селективного стирания. Недостатком этих кристаллов является относительно низкая чувствительность. Этот недостаток можно частично компенсировать, увеличивая мощность используемых лазеров.

2.4. Фототермопластики. Среда состоит из слоя термопластика в контакте со слоем фотопроводника, лежащих на прозрачном электроде, который, в свою очередь, наносится на подходящую подложку [32]. Слой термопластика равномерно заряжается по поверхности с помощью устройства коронного разряда. Оптическое изображение проецируется на такую структуру и вызывает изменение проводимости фотопроводящего слоя, пропорциональное интенсивности падающего света. Таким образом, распределение интенсивности света в изображении преобразуется в распределение заряда на поверхности термопластика. При нагревании термопластика до температуры, несколько большей, чем температура стеклования, электростатические силы деформируют поверхность термопластического слоя таким образом, что созданный пространственный рельеф соответствует первоначальному оптическому изображению. Фототермопластики имеют достаточно высокую чувствительность порядка 10^{-5} Дж/см², но цикл записи в них может занимать несколько секунд благодаря времени, требуемому на заряд, разогрев и фиксацию (остывание) термопластического слоя. Таким образом, как среды для оптической памяти фототермопластики уступают сегнетоэлектрическим кристаллам*.

III. Материалы, используемые для оптической памяти. При описании характеристик материалов, используемых при записи информации на основе эффекта ОП и фотохромного эффекта, особое внимание обращалось на последние достижения в этой области.

1. Сегнетокерамика ЦТСЛ. В оптической памяти могут быть использованы эффект индуцированного рассеяния в керамике ЦТСЛ-7 (7/65/35) [33, 34] и квадратичный электрооптический эффект в ЦТСЛ-9 (9/65/35) [35], где (X/Y/Z) обозначает соотношение Zr и Ti (Y/Z), а X — атомный процент Pb, замещенного La.

На возможность использования эффекта индуцированного рассеяния в крупнозернистой керамике ЦТСЛ-7 впервые указали Смит и Ленд в работе [33]. Полученный авторами коэффициент контрастности — отношение коэффициентов пропускания электрически поляризованного и деполаризованного состояний — достигал величины более 900. Такой режим работы сегнетокерамики удобен для применения в формирователях страниц, поскольку в этом случае не требуются поляризаторы и быстродействие ее достаточно велико. Недавно в работах [36 и 37] была детально исследована скорость переключения в этой керамике. На рис. 3 приведена петля гистерезиса при оптическом переключении для слабо изменяющегося поля, H и \bar{H} — максимальные точки пропускания T , соответствующие состояниям, когда керамика поляризована положительно и отрицательно. В состоянии L керамика пере-

* Здесь следует также отметить меньшее разрешение по сравнению с сегнетоэлектрическими кристаллами и наличие в некоторых случаях усталостных явлений. (Прим. ред.)

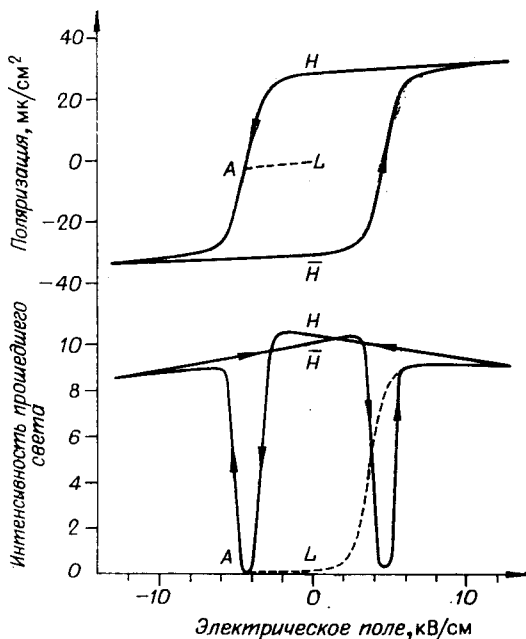


Рис. 3. Характеристики оптического пропускания и сегнетоэлектрического гистерезиса ЦТСЛ-7 в медленно меняющемся электрическом поле.

Точки H и \bar{H} соответствуют поляризованной керамике до максимальных положительного и отрицательного значений поляризации соответственно. В состоянии L керамика переходит из состояния A при снятии электрического поля.

мике можно воспроизводить полутоновые изображения.

Основные свойства керамики ЦТСЛ-9 рассматривались в работах [36, 38]. Было обнаружено, что эта керамика обладает удовлетворительным быстродействием, имеет высокий коэффициент контрастности при относительно низком прикладываемом напряжении и большое время жизни (вплоть до 10^{11} циклов).

Известно, что эффект ОП наблюдается как в ЦТСЛ-7, так и в ЦТСЛ-9. В работе [39] приведены результаты тщательно проделанных оптических измерений ОП керамики ЦТСЛ-9 и показано, что этот эффект определяется только фотопроводимостью, а внутренняя фотопроводимость существует благодаря гетеровалентному замещению La^{3+} на Pb^{2+} и определяет среднюю длину дрейфа фотовозбужденных носителей, равную 0,8 мкм.

Эксперименты с ЦТСЛ-10, описанные в [40], подтвердили наблюдения авторов предыдущей работы и привели к выводу, что ОП возникает как результат перераспределения локальных зарядов под действием неоднородного освещения и электрического поля.

2. $LiNbO_3$. Как было отмечено выше, серьезным недостатком запоминающих

ходит из состояния A при уменьшении поля до 0. Согласно [37], между временем переключения и величиной приложенного поля E_z имеет место следующее соотношение:

$$1/t_s \propto \exp(-\alpha/E_z), \quad (1)$$

где поле активации α было оценено величиной порядка 68 кВ/см. При поле $E_z = 10$ кВ/см t_s менее 10 мкс. Были проведены измерения коэффициента контрастности керамики ЦТСЛ в зависимости от амплитуды импульсов переключающего поля при различных их длительностях (рис. 4). При уменьшении длительности импульсов кривые зависимости коэффициента контрастности от амплитуды импульса становятся более пологими из-за увеличения количества не полностью переключающихся доменов. Это явление представляет интерес с точки зрения использования сегнетокерамики при создании дисплеев, так как в этом режиме на кера-

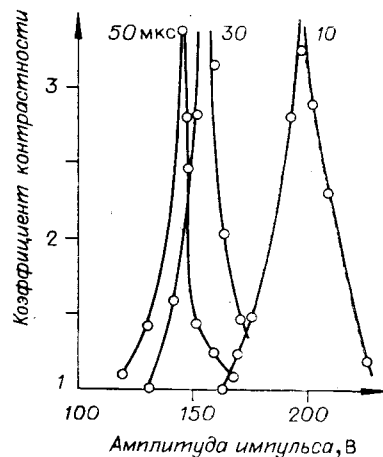


Рис. 4. Зависимость коэффициента контрастности ЦТСЛ-7 от амплитуды импульсов поля при разной длительности.

сред, работающих на эффекте ОП, является их низкая чувствительность. Легирование кристаллов LiNbO_3 ионами переходных металлов коренным образом улучшает их чувствительность и делает возможным применение таких кристаллов для записи объемных голограмм при умеренной мощности используемых лазеров [41].

Если эффект ОП проявляется как результат сильной анизотропии переноса заряда фотозлектронами, индуцированными объемным фотovoltaическим эффектом, то резонно предположить, что процессы записи и стирания описываются транспортными уравнениями для переноса заряда [42, 43]. В этом случае время релаксации процесса записи T_0 должно быть мало, если чувствительность велика. В работе [42] изучалось время релаксации процессов записи и стирания в предположении, что оба процесса симметричны. В этой работе сделан вывод, что T_0 должно быть пропорционально N_e/N_f , где N_e и N_f — концентрации опустошенных и заполненных ловушек соответственно, и следовательно, отношению концентраций Fe^{3+} и Fe^{2+} . Исследования проводились на обладающих высокой чувствительностью образцах LiNbO_3 , легированных 0,02%-ным Fe и отожженных в течение 48 ч при температуре 485°C с применением порошка Li_2CO_3 . Было достигнуто увеличение чувствительности в 38 раз по сравнению с образцами, легированными 0,1%-ным Fe и не легированными. Благодаря такому увеличению чувствительности этот материал вполне может быть использован для создания устройств оптической памяти с перезаписью информации.

Время цикла в экспериментальных системах оптической памяти, использующих такие кристаллы, составляет ~ 60 мс при достаточно высоком отношении сигнал/шум. Разумеется, это слишком много для практического использования таких систем, но представляется возможным улучшить этот параметр на два порядка [44].

Существуют два хорошо разработанных метода увеличения информационной емкости — метод селективного стирания [31] и многофотонные процессы [30], которые в первую очередь применимы к устройствам, использующим LiNbO_3 .

а) Метод селективного стирания. При записи объемных голограмм страницы информации могут быть наложены друг на друга в одном и том же участке запоминающей среды путем небольшого изменения угла падения записывающего пучка*. Этот угол должен выходить за пределы диапазона угловой селективности предыдущей голограммы и определяется углом Брэгга. Стирание записанных таким способом голограмм производится, как правило, во всем объеме среды одновременно для всех голограмм, что ведет к ограничению применимости этого метода записи информации.

Возможность выборочного стирания отдельных записанных в объеме голограмм и битов информации за счет асимметрии цикла запись — стирание была показана в [45] для LiNbO_3 , легированного 0,01%-ным Fe. В работе [46] описан метод стирания при подаче на голограмму того же объектного пучка, что и при записи, и сдвиге опорного пучка по фазе на π . Энергия в процессе стирания остается той же самой, что и при записи. Если изменения показателя преломления в объеме описываются уравнением

$$n(x, y, z) = n_0 + \delta n_0 \cos[Kx + \Phi(x, y, z)], \quad (2)$$

где K — пространственная частота; n_0 — объемное изменение показателя преломления, вызванное постоянной составляющей голографической решетки; δn_0 — контраст полос голографической решетки, то фотонаведенное изменение показателя преломления в процессе стирания вы-

* Опорного или объектного. (Прим. ред.)

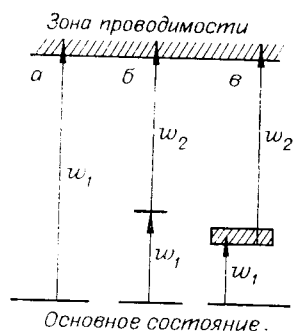


Рис. 5. Различные процессы фотоионизации:

a — однофотонное поглощение;
б — двухфотонное поглощение;
в — двухфотонное двухступенчатое поглощение через реальный промежуточный уровень.

развится следующим образом:

$$n'(x, y, z) = n_0 - \delta n_0 \cos [Kx + \Phi(x, y, z)]. \quad (3)$$

Очевидно, что рост постоянной составляющей n_0 при повторении операции стирания ограничивает применимость этого метода. Однако это ограничение в принципе может быть устранено, если кристалл коротко замкнут. В работе [46] была показана возможность селективного стирания в LiNbO_3 , но эффект фотоиндуцированного рассеяния ограничил число голограмм в объеме и число циклов записи — стирание до 10.

Идеальным материалом для селективного стирания должен быть материал с достаточной асимметрией циклов записи и стирания. Согласно [43], асимметрия может быть выражена следующим образом:

$$S_w/S_e \propto k_0/k_1 \Delta n, \quad (4)$$

где S_w — фоточувствительность* в процессе записи и S_e — в процессе стирания, k_0 — анизотропная фотовольтаическая константа, а k_1 — изменение k_0 под действием единичного поля. Другими словами, метод селективного стирания должен быть наиболее эффективен в кристаллах, имеющих большое отношение k_0/k_1 и малое фотоиндуцированное рассеяние.

б) Многофотонное поглощение. Как правило, объемные голограммы восстанавливаются светом той же длины, что и при записи. Такое, как это было отмечено выше, считывание вызывает разрушение записанной информации. В этом случае фотоионизация и переход электронов с основного донорного уровня в зону проводимости происходят в результате поглощения одного фотона (рис. 5, *a*). Однако фотоионизация может происходить при одновременном поглощении двух фотонов с разной частотой, например, ω_1 и ω_2 (см. рис. 5, *б*). Ни один из фотонов не может перевести электрон в зону проводимости, для этого достаточно только энергии двух фотонов вместе — $h(\omega_1 + \omega_2)$. Реальная многофотонная схема возбуждения приведена на рис. 5, *в*, где показаны возбужденные состояния между основным донорным уровнем и зоной проводимости. Фотоны с частотой ω_1 используются для заселения возбужденных состояний, а на второй ступени процесса фотоны с частотой ω_2 ионизируют возбужденные доноры.

Если голограмма возникает в кристалле при интерференции объектного и опорного пучков света с частотой ω_2 , то она не может быть записана в кристалле до тех пор, пока кристалл не будет облучен светом с частотой ω_1 , и в то же время записанная голограмма может быть восстановлена светом с частотой ω_2 без разрушения информации, поскольку свет с такой частотой не может возбудить свободные электроны. Оптическое стирание в этом случае возможно, разумеется, только при одновременном действии света обеих частот.

Возможность такого типа записи в LiNbO_3 , где фотоэлектроны получались в результате межзонных двухфотонных переходов, а резуль-

* Фоточувствительность S есть отношение изменения показателя преломления к плотности энергии экспозиции в начальной стадии облучения. S относится к чувствительности S' следующим образом: $S = \Delta n / \kappa S'$, где κ — коэффициент поглощения. (Прим. авт.)

тирующие токи приводили к изменению показателя преломления, как и при однофотонном процессе, была показана в работе [30]. Чувствительность нелегированного LiNbO_3 при двухфотонном процессе составила $5 \cdot 10^{10}$ Дж/см³, что несколько выше, чем у $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}^{2+}$ при линейном эффекте ОП.

3. KNbO_3 . Этот кристалл KNbO_3 обладает достаточно высокими электрооптическими коэффициентами [47]. Изменение показателя преломления в нелегированном KNbO_3 под действием засветки намного

4. LiTaO_3 . Было обнаружено [16, 18, 49], что эффект ОП в LiTaO_3 меньше, чем в LiNbO_3 . Легирование увеличивает чувствительность этих кристаллов и делает ее сравнимой с легированным LiNbO_3 , однако при циклировании наблюдаются усталостные явления. В [50] приведена зависимость чувствительности к записи от концентрации некоторых примесей и обнаружено, что предварительная поляризация и присутствие кислородных вакансий сильно влияют на эффект ОП в этих кристаллах.

5. $\text{KTa}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_3$ (КТН). Кристалл при комнатной температуре является кубическим. Эффект ОП проявляется только в скрещенных полях. При многофотонном поглощении [30] фоточувствительность достигает величины 10^7 Дж/см³, что в $5 \cdot 10^3$ раз выше, чем в LiNbO_3 . Таким образом, КТН примечателен как материал, имеющий наивысшую чувствительность среди всех известных сегнетоэлектрических и фотохромных материалов, но время хранения у него слишком мало.

6. $\text{Sr}_x\text{Ba}_{x-1}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (HSB). В работе [51] показана возможность электрической фиксации записи в этих кристаллах. Чувствительность к записи увеличивалась приблизительно в 100 раз (5 Дж/см²) при приложении поля. Практическому же применению этих кристаллов препятствуют трудности выращивания больших кристаллов, свободных от оптических и механических дефектов. Для устранения этих дефектов следует в процессе роста кристалла тщательно соблюдать необходимое соотношение компонент шихты. Для структуры $(\text{Sr}_x\text{Ba}_{x-1})_{1-y}(\text{Nb}_2\text{O}_6)_y$ было определено следующее соотношение компонент: $x=0,62$, $y=0,4993$ — и успешно выращены большие кристаллы (при тщательном контроле температуры и краевых дислокаций) [52].

7. $\text{V}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{V}_{12}\text{GeO}_{20}$ (силикат и германат висмута). Силикат и германат висмута имеют экстремально высокую чувствительность при записи объемных голограмм, достигающую $3 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² [53]. Эти кристаллы дают высокое качество восстановленных изображений при достаточно больших размерах образцов. Дифракционная эффективность существенно растет при приложении электрического поля и достигает 25% при внешнем поле $E_a=9$ кВ/см. Авторы работы [53] утверждают, что кристаллы германата и силиката висмута являются лучшими из существующих материалов для построения систем с реверсивной памятью объемного типа.

8. NaF . Для записи информации в этих кристаллах используются фотохромные свойства M центров. M центры состоят из пар F центров, ориентированных вдоль оси (011). M центры имеют две ярко выраженные полосы поглощения — M_1 (в более длинноволновом участке спектра) и M_2 . Они могут быть перестроены в направлении поляризации падающего света только при освещении светом с длиной волны, лежащей в полосе M_2 [54]. Таким образом, имеется возможность записи информации светом, поляризованным в направлении (0 $\bar{1}1$) в полосе M_2 ,

и считывание светом, поляризованным в направлении (011) в полосе поглощения M_1 без разрушения записанной информации.

В работе [55] проделаны количественные измерения характеристического NaF. Представляет интерес тот факт, что количество переориентированных M центров приблизительно пропорционально экспозиции и, следовательно, имеется возможность записи не только бинарной информации, но и полутонных фотографических изображений.

IV. Замечания. Большая часть материалов для оптической памяти является оксидными октаэдрическими сегнетоэлектриками, легированными ионами переходных металлов: BaTiO_3 , LiNbO_3 , KNbO_3 , LiTaO_3 , HCB , КТN и т. д. Их называют обычно фотосегнетоэлектриками. Для объяснения эффекта ОП, обнаруженного в этих материалах, был привлечен механизм перехода электрона с донорного уровня в зону. Следует, однако, заметить, что законность такого объяснения ограничена областью феноменологических наблюдений. Для улучшения оптических свойств этих кристаллов и поиска новых материалов представляется необходимым точно идентифицировать фоточувствительные центры и исчерпывающе изучить микроскопический механизм эффекта. Полагают, что явление фотопроводимости, наблюдаемое в фотосегнетоэлектриках, тесно связано с природой сегнетоэлектричества и, как считает Фридкин [27], такое изучение должно сыграть большую роль в понимании этой природы.

В настоящее время оптические явления, используемые для объяснения механизма памяти, ограничены электрооптическим эффектом, фотохромным эффектом и эффектом ОП. Шварц [56] отмечает, что эффект ОП можно рассматривать как частный случай фотохромного эффекта, когда под действием излучения изменяется комплексный показатель преломления $\tilde{n} = n - ik$. Важно отметить, что в некоторых случаях для оптической памяти имеют значение только симметричные части тензора $2nd$ ранга (тензор поляризуемости). Исследования, проводимые в области применения для оптической памяти частей тензора, которые определяют оптическую активность, представляются недостаточно интенсивными. Простейшим применением гирооптических сегнетоэлектриков были бы формирователи страниц, построенные на использовании эффекта изменения знака оптического вращения, сопровождаемого поворотом поляризации на 180° . Такой эффект был обнаружен в $5\text{PO} \cdot 3\text{GeO}_2$ [57], но слишком большое время переключения препятствовало его практическому применению [58].

В основном исследователи избегают изучения оптической активности кристаллов из-за экспериментальных трудностей наблюдения оптического вращения. Долгое время считались невыполнимыми измерения оптической активности вдоль направлений, отличных от направлений оптической оси кристалла. Однако недавно в работах [59, 60] были предложены новые методы наблюдения оптической активности во внеосевых направлениях. Нам кажется, что изучение оптической активности с точки зрения применения ее в системах оптической памяти представляет собой новую интересную область исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen D., Zook J. D.—“Proc. IEEE”, 1975, vol. 63, p. 1207; Chen D.—“Appl. Opt.”, 1974, vol. 13, p. 767.
2. Neale R. G., Aseltine J. A.—“IEEE Trans. Electron Devices”, 1973, vol. ED-20, p. 195; Ovshinsky S. R., Klose P.—“J. Non-Crystalline Solids”, 1972, vol. 8—10, p. 892; Von Gutfeld R. J., Chandhari P.—“J. Appl. Phys.”, 1972, vol. 43, p. 4688.
3. Smith A. W.—“Appl. Phys. Lett.”, 1973, vol. 23, p. 437.
4. Megle G. K.—“Appl. Opt.”, 1966, vol. 5, p. 945.
5. Faughman B. W., Kiss Z. J.—“IEEE J. Quantum Electron.”, 1969, vol. QE-5, p. 17.
6. Bosomworth D. R., Gerritsen H. J.—“Appl. Opt.”, 1968, vol. 7, p. 95.

7. Friesen A. A., Walken J. L.—“Appl. Opt.”, 1970, vol. 9, p. 201.
8. Lo D. S.—“Appl. Opt.”, 1974, vol. 13, p. 861.
9. Schneider L., Marrone M., Kabler M. N.—“Appl. Opt.”, 1970, vol. 9, p. 1163.
10. Cummins S. E., Luke T. E.—“Ferroelectrics”, 1972, vol. 3, p. 125.
11. Kumada A.—“Ferroelectrics”, 1972, vol. 3, p. 115.
12. Kobayashi J., Yamada N., Nakamura T.—“Phys. Rev. Lett.”, 1963, vol. 11, p. 508.
13. Kobayashi J., Mizutani I., Schmid H., Schachner H.—“Phys. Rev.”, 1970, vol. B1, p. 3801.
14. Kobayashi J., Sato Y., Nakamura T.—“Phys. Status Solidi (a)”, 1972, vol. 14, p. 259.
15. Land C. E., Thacher P. D., Haertling G. H.—“Appl. Solid State Sci.”, N. Y., Academic Press, 1974, vol. 4, p. 137; Haertling G. H.—“J. Amer. Cer. Soc.”, 1971, vol. 54, p. 303; Haertling G. H., Land C. E.—“Ferroelectrics”, 1972, vol. 3, p. 269; Haertling G. H., McCampbell C. B.—“Proc. IEEE”, 1972, vol. 60, p. 450.
16. Ashkin A., Boyd G. D., Dziedzic J. M., Smith R. G., Ballman A. A., Levinstein J. J., Nassau K.—“Appl. Phys. Lett.”, 1966, vol. 9, p. 72.
17. Micheron F., Rouchon J. M., Vergnolle M.—“Appl. Phys. Lett.”, 1974, vol. 24, p. 605.
18. Chen F. S., LaMacchia J. T., Frazer D. B.—“Appl. Phys. Lett.”, 1968, vol. 13, p. 223.
19. Amodei J. J., Staebler D. L., Stephens A. W.—“Appl. Phys. Lett.”, 1971, vol. 18, p. 507.
20. Thaxter J. B.—“Appl. Phys. Lett.”, 1969, vol. 15, p. 210.
21. Townsend R. L., LaMacchia J. T.—“J. Appl. Phys.”, 1970, vol. 41, p. 5188.
22. Chen F. S.—“J. Appl. Phys.”, 1969, vol. 40, p. 3389.
23. Johnston W. D.—“J. Appl. Phys.”, 1970, vol. 41, p. 3279.
24. Amodei J. J.—“RCA Rev.”, 1971, vol. 32, p. 185.
25. Glass A. M., Von der Linde D., Negran T. J.—“Appl. Phys. Lett.”, 1974, vol. 25, p. 233.
26. Levanyuk A. P., Osipov V. V.—“Fiz. Tverd. Tela”, 1975, vol. 17, p. 3539.
27. Fridkin V. M., Popov B. N., Verkhonshaya K. A.—“Izv. Akad. Nauk USSR. Ser. Fiz.”, 1977, vol. 41 (to be published).
28. Staebler D. L., Amodei J. J.—“Ferroelectrics”, 1972, vol. 3, p. 107.
29. Micheron F., Bismuth G.—“Appl. Phys. Lett.”, 1972, vol. 20, p. 79.
30. Huignard J. P., Herriau J. P., Micheron F.—“Appl. Phys. Lett.”, 1975, vol. 26, p. 256.
31. Von der Linde D., Glass A. M.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 10, p. 5.
32. Colburn W. S., Tompkins E. N.—“Appl. Opt.”, 1974, vol. 13, p. 2934.
33. Smith W. D., Land C. E.—“Appl. Phys. Lett.”, 1972, vol. 20, p. 169.
34. Maldonado J. R., Fraser D. B.—“Proc. IEEE”, 1973, vol. 61, p. 975.
35. Haertling G. H., Land C. E.—“J. Amer. Ceram. Soc.”, 1971, vol. 54, p. 1.
36. Wolfram G.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 10, p. 39.
37. Wu S. Y., Takei W. J., Francombe M. H.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 10, p. 43.
38. Laguna G. R.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 10, p. 35.
39. Micheron F., Mayeux Ch., Hermosin A., Nicoles J.—“J. Amer. Ceram. Soc.”, 1974, vol. 57, p. 306; Rouchon J. M., Vergnolle M., Micheron F.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 11, p. 389.
40. Krumin A. E., Klotinsh E. E., Dimza V. I., Il'in U. J., Sternberg A. R., Fritsberg V. J.—“Izv. Akad. Nauk USSR. Ser. Fiz.”, 1977, vol. 41 (to be published).
41. Phillips W., Amodei J. J., Staebler D. L.—“RCA Rev.”, 1972, vol. 33, p. 94.
42. Alphonse G. A., Phillips W.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 11, p. 397.
43. Kurz H.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 13, p. 291.
44. Stewart W. C., Mezrich R. S., Cosentino L. S., Nagle E. M., Wendt F. S., Lohman R. D.—“RCA Rev.”, 1973, vol. 34, p. 3—45.
45. Staebler D. L., Phillips W.—“Appl. Opt.”, 1974, vol. 13, p. 789.
46. Huignard J. P., Herriau J. P., Micheron F.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 11, p. 393.
47. Fluchiger U., Ared H.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 13, p. 505.
48. Günter P., Fluchiger U., Huignard J. P., Micheron F.—“Ferroelectrics”, 1976, vol. 13, p. 297.
49. Spinhirne J. M., Estle T. L.—“Appl. Phys. Lett.”, 1974, vol. 25, p. 38.
50. Tsuya H.—“J. Appl. Phys.”, 1975, vol. 46, p. 4323.
51. Micheron F., Bismuth G.—“Appl. Phys. Lett.”, 1973, vol. 23, p. 71.
52. Furuhashi Y.—“Izv. Akad. Nauk USSR. Ser. Fiz.”, 1977, vol. 41 (to be published).
53. Huignard J., Micheron F.—“Appl. Phys. Lett.”, 1976, vol. 29, p. 591.
54. Schneider I., Lehmann M., Becker R.—“Appl. Phys. Lett.”, 1974, vol. 25, p. 77.
55. Yazaki T., Imai T., Kishi Y.—“Izv. Akad. Nauk USSR. Ser. Fiz.”, 1977, vol. 41 (to be published).
56. Shvartz K. K.—“Izv. Akad. Nauk USSR. Ser. Fiz.”, 1977, vol. 41 (to be published).
57. Iwasaki H., Sugii K.—“Appl. Phys. Lett.”, 1971, vol. 19, p. 92.
58. Iwasaki H., Sugii K., Niizeki N., Toyoda H.—“Ferroelectrics”, 1972, vol. 3, p. 157.
59. Konstantinova A. F., Ivanov N. R., Grechushikov B. N.—“Soviet Phys.-Gryst.”, 1969, vol. 14, p. 222.
60. Kobayashi J., Takahashi T., Hosokawa T., Uesu Y.—“J. Appl. Phys.” (to be published).

Поступила в редакцию 7 июня 1977 г.