

ЛИТЕРАТУРА

1. Коломиец Б. Т., Любин В. М., Шило В. П. Фотостимулированные изменения прорастворимости халькогенидных стекол.— Физика и химия стекла, 1978, т. 4, № 3.
2. Клямин А. Н., Цукерман В. Г. Особенности селективного травления напыленных пленок сульфида мышьяка.— Автометрия, 1979, № 2.
3. Короткевич М. Н., Камарзин А. А. Способ получения халькогенидных стекол. (Автор. свид-во № 460255.)— БИ, 1975, № 6.
4. Strom U., Martin T. P. Photo-Induced Changes in the Infrared Vibrational Spectrum of Evaporated As_2S_3 .— Solid State Comm., 1979, vol. 29, N 7.
5. Solin S. A., Papatheodorou G. N. Irreversible Thermostructural Transformation in Amorphous As_2S_3 Films: a Light Scattering Study.— Phys. Rev. B, 1977, vol. 15, N 4.
6. Hemanish R. J., Connell G. A. N., Hayes T. M., Street R. A. Thermally Induced Effects in Evaporated Chalcogenide Films: I. Structure.— Phys. Rev. B, 1978, vol. 18, N 12.
7. Kastner M., Adler D., Fritzsche H. Valence — Aternational Model for Localized Gap States in Zone-Pair Semiconductors.— Phys. Rev. Lett., 1976, vol. 37, N 22.

Поступила в редакцию 27 мая 1980 г.

УДК 681.327

В. Я. БУТРОВ, А. С. ИГНАТЬЕВ, В. В. КАПАЕВ,
В. Г. МОКЕРОВ, А. Г. ПЕТРОВА

(Москва)

РЕВЕРСИВНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ДВУОКСИ ВАНАДИЯ

Голографические характеристики регистрирующей среды на основе пленок двуокиси ванадия исследованы в работах [1—5].

Запись информации в двуокиси ванадия обеспечивается за счет резкого изменения оптических свойств материала при фазовом переходе металл — диэлектрик (температура перехода $\sim 67^\circ\text{C}$), а ее хранение — за счет температурного гистерезиса. Этот материал характеризуется высокой разрешающей способностью (до 2000 л/мм), возможностью считывания информации без разрушения, длительного хранения информации, приемлемой дифракционной эффективностью голограмм ($\sim 1\%$) и большим числом циклов перезаписи ($>10^8$) [1, 4].

Цель данной работы — разработка и исследование характеристик накопителя информации большой емкости на основе пленок двуокиси ванадия для записи, длительного хранения, считывания и выборочного стирания голограмм.

Предлагается накопитель информации, представляющий собой матрицу, состоящую из 32×32 ячейки, собранную из 16 линеек. Каждая линейка включает 64 элемента памяти, расположенных в 2 ряда (32×2). На рис. 1, а—в представлены топология и структура исследуемых линеек. Каждая ячейка представляет собой сэндвич из нанесенных на подложку из кварца (1) пленок регистрирующей среды VO_2 (2), изолирующего окисла SiO_2 (3) и прозрачных резистивных нагревателей SnO_2 (4) с контактами (5). Тонкий металлический слой (6) введен для увеличения дифракционной эффективности голограмм при считывании за счет интерференционных эффектов [4].

Режим хранения ($T_{\text{хр}}$ соответствует области внутри петли гистерезиса) в описанной структуре достигается за счет джоулева тепла, выделяемого в резистивном нагревателе (4) при пропускании через него

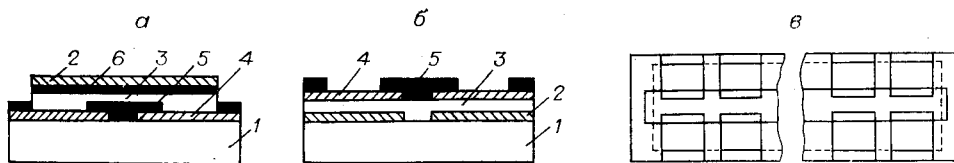


Рис. 1. Структура линейки накопителя информации, работающего на отражение (а) и пропускание (б); в — топология линейки.

тока. Выборочное стирание записываемой информации осуществляется при отключении напряжения питания данной ячейки памяти. Температура пленки VO_2 под этим нагревателем уменьшается, и при достижении температуры $T_{\text{ст}}$, соответствующей окончанию обратного хода на петле гистерезиса, происходит стирание ранее записанной информации.

Размер ячеек памяти h и расстояние между ними l должны быть выбраны такими, чтобы, с одной стороны, обеспечивалась максимальная плотность записи информации и, с другой стороны, отсутствовало взаимное влияние соседних ячеек, т. е. при стирании информации в одной из ячеек содержание соседней ячейки не должно меняться.

Численные значения h и l выбирались на основании расчета температурного поля в устройстве. Поскольку толщина подложки d ($\sim 0,02$ см) значительно больше суммарной толщины остальных слоев структуры (~ 1 мкм), при расчете можно пренебречь изменением температуры по толщине этих слоев и рассматривать температурное поле в однослойном параллелепипеде. Действие нагревателей учитывается путем введения поверхностных (при $z=0$) источников тепла мощностью P_0 . Будем считать, что расположение этих источников по поверхности (вдоль оси y) является периодическим с периодом $H=h+l$. Тем самым пренебрегаем краевыми эффектами на границе накопителя. Распределение температуры $T(y)$ вдоль оси y при $z=0$, получаемое из решения стационарного уравнения теплопроводности в параллелепипеде, имеет следующий вид:

$$T(y) - \Theta = \frac{P_0}{k} \frac{h}{H} d + \frac{2P_0}{\pi^2 k} H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \text{th} \frac{2\pi n d}{H} \sin \frac{\pi n d}{H} \cos \frac{2\pi n y}{H}, \quad (1)$$

где k — коэффициент теплопроводности подложки. Соотношение (1) получено в предположении, что на поверхности $z=d$ поддерживается постоянная температура Θ (условие идеального термостатирования) и температура в плоскости $z=0$ совпадает с температурой пленки VO_2 .

Для исследования взаимного влияния элементов в матрице достаточно сравнить температурные поля при $z=0$ в следующих случаях: а) все нагреватели включены, б) включен каждый второй нагреватель. Распределения температур можно получить из (1), положив в первом случае $H=H_1=h+l$, а во втором — $H=H_2=2h+2l$ и $l'=h+2l$. Величина P_0 в случае «а» выбирается такой, чтобы температура при $y=0$ равнялась температуре хранения информации.

На рис. 2 представлено семейство кривых $T(y)$ для различных h (сплошные кривые соответствуют случаю, когда включены все нагреватели, штриховые кривые — включен каждый второй). При расчете было принято $d=0,02$ см, $T_{\text{хр}} - \Theta = 45^\circ$, $l=0,02$ см. Кривые на рис. 2 позволяют судить о взаимном влиянии элементов в матрице и о размерах площадки, лежащей под нагревателем, на которой можно проводить запись и хранение информации. Если задаться точностью поддержания температуры хранения в 1° , то из рис. 2 следует, что размер площадки, на которой возможно хранение информации для $h=0,1; 0,15; 0,20$ и $0,25$ см, равен соответственно $0,03; 0,08; 0,13$ и $0,18$ см. Таким образом,

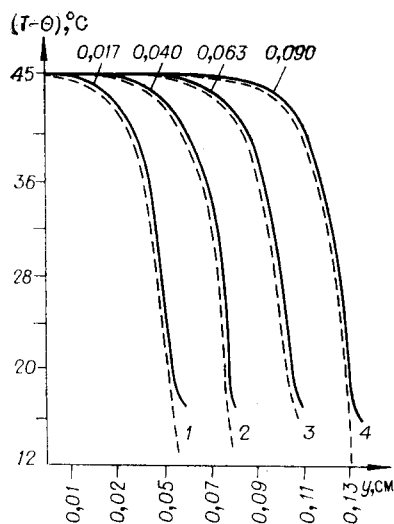


Рис. 2. Распределение температуры по поверхности ячейки памяти для h (см):
1 — 0,1; 2 — 0,15; 3 — 0,20, 4 — 0,25.

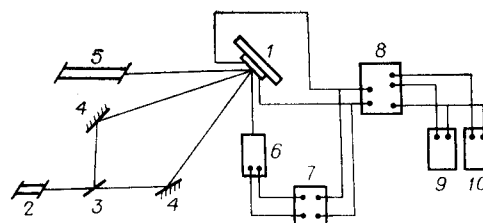


Рис. 3. Блок-схема установки для исследования процессов записи, хранения и считывания информации в накопителе на основе пленок VO_2 .

уже при $h = 0,15$ см полезная площадь под нагревателем примерно равна половине общей площади. Температура под отключенным нагревателем позволяет надежно стирать информацию в любой ячейке для пленок с $T_{\text{хр}} - T_{\text{ст}} > 30^\circ$.

Отметим, что уменьшение взаимного влияния элементов за счет увеличения величины l приводит к уменьшению полезной площади накопителя.

В реальных условиях теплоотвод с поверхности $z = d$ несколько хуже, чем при условиях идеального термостатирования. Поэтому функция $T(y)$ будет более плавной, чем функция, изображенная на рис. 2. Следовательно, полезная площадь под нагревателем, в которой можно хранить информацию, увеличится.

Исходя из изложенного был изготовлен накопитель информации на основе пленок VO_2 с размерами отдельных ячеек памяти $0,15 \times 0,14$ см² и расстоянием между соседними ячейками 0,02 см. В качестве подложки использовался кварц толщиной 0,02 см.

Пленка двуокиси ванадия наносилась методом катодного реактивного распыления. Толщины пленок VO_2 , SnO_2 , SiO_2 и Ni составляли 0,05—0,2; 0,1; 0,6—0,8 и 0,2 мкм соответственно.

Исследование характеристик накопителя проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 3. Накопитель (1) помещался на термостат, температура которого могла варьироваться в широких пределах. Запись информации велась с помощью импульсного лазера ЛТИПЧ-3 (2), имеющего преобразователь частоты $\lambda = 0,53$ мкм. Длительность импульсов записи составляла ~ 20 нс. Оптическая схема, состоящая из светоделителя (3) и зеркал (4), позволяла записывать в ячейках памяти интерференционную картину двух плоских пучков. Считывание информации осуществлялось одним из записывающих пучков или пучком He-Ne-лазера ЛГ-36А (5), который использовался также при исследовании временных характеристик устройства и изучении взаимного влияния ячеек памяти. Отраженный от поверхности пленки двуокиси ванадия световой пучок попадал на фотоумножитель (6), сигнал с которого поступал на вход осциллографа С1-17 (7). Задающие генераторы Г5-53 (9, 10) и схема управления (8) служат для подачи из ячейки памяти напряжения питания. Эти элементы позволяют проводить выборочное стирание информации и подготовку ячейки памяти к следующей записи.

Температура хранения информации в исследуемых пленках VO_2 составляла $T_{\text{хр}} = 65^\circ\text{C}$. При $\Theta = 20^\circ\text{C}$ мощность, выделяемая в резистивном нагревателе и обеспечивающая режим хранения в одной ячейке памяти, равнялась 16 Вт/см². С ростом Θ величина $P_{\text{хр}}$ линейно уменьшается и при $\Theta = 40^\circ$ составляет 9 Вт/см².

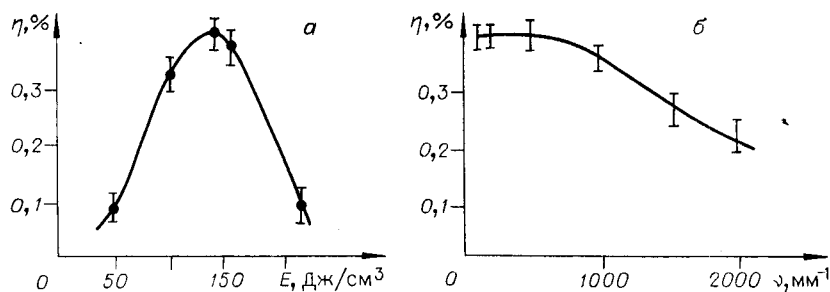


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности от энергии лазерного импульса для $\nu=100 \text{ мм}^{-1}$ (а) и от пространственной частоты для $E=150 \text{ Дж/см}^3$ (б).

Исследование взаимного влияния ячеек памяти в накопителе проводилось следующим образом ($\Theta = 20^\circ\text{C}$). Все ячейки выводились в режим хранения. В одной из них с помощью однократного лазерного импульса записывалась голограмма и измерялась дифракционная эффективность η . Затем напряжение питания остальных ячеек отключалось. Как показали измерения, величина η данной ячейки практически не изменялась. При отключении напряжения питания этой ячейки (при включении остальных) значение η уменьшалось до нуля. Это указывает на отсутствие взаимного влияния ячеек памяти.

Для определения полезной площади ячейки необходимо экспериментально получить распределение температуры вдоль поверхности ячейки $T(x, y)$, находящейся в режиме хранения. Учитывая резкую зависимость коэффициента отражения R пленки VO_2 от температуры в области температуры фазового перехода, распределение $T(x, y)$ можно получить из зависимости $R(x, y)$, которая определяется путем сканирования сфокусированным пучком He-Ne-лазера ячейки и регистрации отраженного сигнала. Для $\Theta = 20^\circ\text{C}$ величина полезной площади ячейки при температуре хранения, равной ($T_{\text{хр}} \pm 1$) $^\circ\text{C}$, составляла $\sim 70\%$ площади ячейки.

Зависимости дифракционной эффективности голограмм η от энергии в импульсе лазера записи E и пространственной частоты записанной голограммы ν при считывании на пропускание на длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$ приведены на рис. 4 а, б. Общий ход зависимости $\eta(E)$ и $\eta(\nu)$ при считывании на отражение полностью аналогичен кривым, изображенным на рис. 4; абсолютное же значение при считывании на отражение зависит от свойств материала под пленкой VO_2 и ее толщины и достигает величины $\sim 1\%$. Отметим, что приведенные результаты хорошо согласуются с теоретическими зависимостями $\eta(E)$ и $\eta(\nu)$, полученными в [2] из расчета температурного поля в среде с учетом фазовых превращений.

Длительность полного цикла работы ячейки памяти $\tau_{\text{ц}}$ равняется сумме времен записи информации $\tau_{\text{з}}$, считывания $\tau_{\text{сч}}$, стирания и подготовки ячейки к последующей записи $\tau_{\text{п}}$. Запись и считывание информации осуществляются с помощью импульсных лазеров с длительностью импульса порядка десятков наносекунд, поэтому длительность полного цикла зависит в основном от времени стирания информации и выведения ячейки в режим хранения.

Время стирания определяется теплофизическими параметрами системы, температурой термостата и разностью температур $T_{\text{хр}} - T_{\text{ст}}$ (т. е. шириной петли гистерезиса пленки двуокиси ванадия). Для исследования процесса стирания информации произвольно выбранная ячейка памяти выводилась в режим хранения информации. Затем в ней с помощью однократного импульса лазера записывалась интерференционная картина двух плоских пучков. Соотношение интенсивностей в пучках

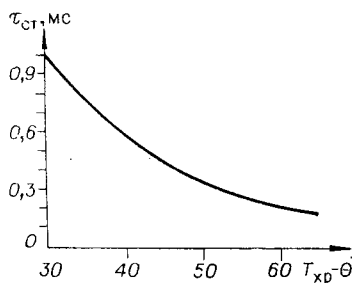


Рис. 5. Зависимость времени стирания информации от разности температур ($T_{хр} - \Theta$), ($T_{хр} - T_{ст} = 7^\circ\text{C}$).

составляло 1:1, пространственная частота — 100 мм^{-1} . Регистрировалась интенсивность света в первом порядке дифракции на длине волны $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$. Изменение этой интенсивности после отключения напряжения питания в данной ячейке отражает изменение температуры пленки VO_2 . При достижении пленкой температуры стирания информации интенсивность дифрагированного света равна нулю, следовательно, время спада сигнала совпадает со временем стирания информации $\tau_{ст}$.

На рис. 5 представлена зависимость $\tau_{ст}$ от температуры термостата, полученная описанным выше способом. Температура хранения $T_{хр} = 65^\circ\text{C}$, температура стирания информации (температура окончания обратного хода на петле гистерезиса) $T_{ст} = 58^\circ\text{C}$. Снижая температуру термостата, как это следует из рис. 5, можно достигнуть для $\tau_{ст}$ величины $\sim 0,1 \text{ мс}$. Дальнейшее уменьшение значения $\tau_{ст}$ возможно при использовании подложек меньшей толщины, но с большим коэффициентом теплопроводности.

Следует иметь в виду, что уменьшение величины $\tau_{ст}$ с уменьшением Θ приводит к увеличению мощности, требуемой для поддержания режима хранения $P_{хр}$. Поэтому величина Θ должна выбираться из компромиссных соображений.

Если подготовку ячейки памяти осуществлять путем подачи напряжения питания, величина которого соответствует режиму хранения, в момент достижения пленкой VO_2 температуры $T_{ст}$, то время τ_n будет значительно превышать время $\tau_{ст}$. Для повышения быстродействия системы подготовка к последующей записи осуществлялась за счет подачи на нагреватель в момент достижения пленкой VO_2 температуры $T_{ст}$ короткого импульса, мощность которого $P \gg P_{хр}$. После окончания этого импульса на нагреватель подается напряжение, соответствующее режиму хранения. Путем варьирования амплитуды и длительности добавочного импульса получено время $\tau_n \approx \tau_{ст} = 0,1 \text{ мс}$.

Накопитель на пленках двуокиси ванадия использован в лабораторном макете ГЗУ, собранном по схеме Хилла [6]. Оптическая схема устройства содержала электромеханический дефлектор, светоделитель, линзовый растр, систему объективов и обеспечивала запись информации на площади $\sim 1,2 \text{ мм}^2$. Считывание голограмм осуществлялось на длинах волн $\lambda = 0,53$ и $0,63 \text{ мкм}$. Как показали результаты исследований, отношение интенсивностей сигнала и шума в восстановленном с голограмм изображении, содержащем 32×32 бит, составляло 4:1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев К. А. и др. Голографическая память на пленках двуокиси ванадия.— ДАН СССР, 1975, т. 222, № 3.
2. Капаев В. В., Тимеров Р. X. Расчет голографических характеристик запоминающей среды на основе пленок двуокиси ванадия.— Автометрия, 1978, № 2.
3. Roach W. R. Holographic Storage in VO_2 .— Appl. Phys. Lett., 1971, vol. 19, N 11.
4. Balberg I., Trockman S. High-Contrast Optical Storage in VO_2 Films.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, N 5.
5. Капаев И. Ф., Малиновский В. К., Рябова Л. А., Сербинов И. А. Оптическая запись информации на пленках VO_2 .— Микроэлектроника, 1975, т. 4, вып. 4.
6. Hill V. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory.— Appl. Opt., 1972, vol. 11, N 1.

Поступила в редакцию 29 января 1978 г.