

достигается стандартизация выходных параметров информации, записанной в различных ячейках матрицы.

В процессе экспериментальных исследований была записана фурье-голограмма бинарного транспаранта емкостью  $10^4$  бит на пространственной частоте 300—600 лин/мм. Толщина ФТП-материала составляла 1,5 мкм. Дифракционная эффективность голограмм во всех элементах матрицы устанавливалась на уровне 5% выбором порога компаратора. Длительности проявления и стирания автоматически ограничивались устройством управления и составляли 2—4 и 3—6 мс соответственно (см. рис. 3, 4).

Разработанное нами устройство управления с обратными связями позволяет использовать ФТП-матрицы в качестве реверсивного носителя в голографическом полупостоянном ЗУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., Мир, 1973, с. 335.
2. Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические вычислительные машины. Л., Машиностроение, 1977, с. 138—147.
3. Кувшинский Н. Г., Баженов М. Ю., Соколов Н. П. Голографическая регистрация на термопластических средах.— В кн.: Материалы VII Всесоюз. школы по голографии. Л., ЛИЯФ, 1975.

*Поступила в редакцию 3 января 1979 г.*

УДК 681.327.66

**В. В. КИТОВИЧ, С. О. САМУЦЕВИЧ, В. Т. САХАРОВ,  
В. Г. СТРАХОВ, Г. П. ФЕРЧЕВ**  
(Москва)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МНОП-СТРУКТУР В РЕЖИМЕ РАБОТЫ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ЗУ

В работе [1] показана перспективность использования многослойной структуры металл — нитрид кремния — двуокись кремния — кремний (МНОП) в качестве среды для реверсивной оптической записи информации.

При использовании в оптоэлектронном оперативном запоминающем устройстве (ОЭ ОЗУ) [2] матричных МНОП-структур с большим количеством ячеек памяти важно определить области допустимых разбросов параметров электрических и световых импульсов в режимах записи, стирания и считывания, в пределах которых обеспечивается работоспособность ЗУ.

В данной статье рассмотрены результаты исследования процессов записи, стирания и считывания информации под действием света в матричных МНОП-структурах (чипах) в режимах, характерных для оптоэлектронного ЗУ с побитовой записью информации, определены области работоспособности таких структур и приведен анализ цепи считывания для оценки величины выходного сигнала.

Информация в МНОП-структуре хранится в виде потенциального рельефа на границе диэлектрических слоев. Зонная диаграмма МНОП-структуры, изготовленной на подложке из кремния электронной проводимости, и характерные величины толщин диэлектрических слоев показаны на рис. 1.

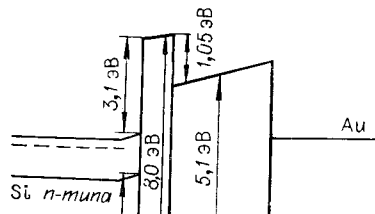


Рис. 1. Зонная диаграмма МНОП-структуры и характерные величины толщин диэлектриков.

Проиллюстрируем процессы записи, стирания и считывания информации с такой структуры с помощью зонных диаграмм.

В режиме записи информации к структуре прикладывается импульс напряжения отрицательной (относительно кремниевый заряд) (ОПЗ). Если одновременно с импульсом напряжения структуру осветить импульсом света с длиной волны, соответствующей области собствен-

ного поглощения кремния, то в результате разделения в ОПЗ созданных светом электронно-дырочных пар и формирования на границе раздела кремний — двуокись кремния инверсного слоя дырок, экранирующего объем полупроводника от внешнего поля, происходит уменьшение толщины ОПЗ и увеличение падения напряжения на слое диэлектрика. Когда падение напряжения на слое диэлектрика превышает некоторую пороговую величину, то в результате туннелирования части дырок из инверсного слоя в валентную зону нитрида кремния и их последующего захвата объемными ловушками нитрида кремния в нем накапливается положительный заряд. Если одновременно с импульсом напряжения структура не освещается, то падение напряжения на слое диэлектрика остается меньше пороговой величины и ловушки не перезаряжаются. Таким образом, накопление в слое нитрида кремния положительного заряда под действием импульсов напряжения отрицательной полярности происходит только при одновременном освещении структуры светом. На этом основано оптическое управление переключением МНОП-структуры.

В режиме стирания информации к структуре прикладывается импульс напряжения положительной полярности, амплитуда которого больше пороговой. При этом поверхность кремния обогащена основными носителями, и все приложенное напряжение падает на слое диэлектрика. В результате туннелирования электронов с поверхности кремния в зону проводимости нитрида кремния и их последующего захвата ловушками нитрида кремния в его объеме накапливается отрицательный заряд. Процесс стирания происходит независимо от освещения, т. е. оптическое управление стиранием записанной информации в данной структуре отсутствует.

Считывание записанной информации с МНОП-структур предпочтительнее проводить по фототоку [3]. К структуре прикладывается импульс напряжения отрицательной полярности с амплитудой в несколько вольт, и ячейка, с которой считывается информация, освещается импульсом света. Если заряд в диэлектрике отсутствует или накоплен отрицательный заряд, то, как и в режиме записи, в приповерхностном слое кремния под действием электрического импульса образуется неравновесная ОПЗ. Разделение в ОПЗ генерируемых светом электронно-дырочных пар приводит к появлению во внешней цепи структуры импульса фототока, амплитуда которого пропорциональна интенсивности падающего света. Если же в диэлектрике накоплен достаточно большой положительный заряд, фототок во внешней цепи структуры отсутствует.

Таким образом, в зависимости от знака и величины накопленного в диэлектрике заряда, т. е. в зависимости от того, записана информация в

ячейке или нет, во внешней цепи будет или не будет протекать фототок. Наличие или отсутствие импульса фототока во внешней цепи структуры при считывании можно интерпретировать как логический «0» или «1».

Для достижения высокой плотности хранения информации необходимо обеспечить локализацию заряда в слое диэлектрика только в тех местах, куда попадает сфокусированный луч света. Локализация заряда достигается образованием для неосновных носителей разделенных барьером потенциальных ям, препятствующих растеканию заряда вне области воздействия света. Образование потенциальных ям достигается вариацией толщины диэлектрического слоя.

Для получения максимальной емкости памяти оптоэлектронного ЗУ на одном кристалле МНОП-структуры стремятся разместить возможно большое количество ячеек памяти. Однако при этом возможна запись «ложной» информации в соседние ячейки (из-за недостаточной глубины потенциальных барьеров между ячейками) или считывание «ложной» информации из соседних ячеек (из-за засветки последних краями светового пятна и фоновым светом). Кроме того, вследствие существующих в реальном ЗУ разбросов амплитуды и длительности электрических и световых импульсов, а также из-за того, что характеристики отдельных ячеек, даже изготовленных в одном технологическом цикле, несколько различаются, возникает необходимость оценки разброса характеристик отдельных узлов ЗУ, включая необходимость разработки программы и аппаратуры для контроля этих характеристик.

Если рассматривать ОЭ ОЗУ как иерархическую систему [4], состоящую из оптического ЗУ и полупроводникового буфера, то в нем возможны следующие чередования тактов: стирание, запись, считывание; только считывание. Последний режим имеет место в тех случаях, когда из буфера удаляется страница информации, к которой за все время хранения ее в буфере не было обращений с записью. Если оптическая запоминающая среда допускает считывание без разрушения информации, то эта страница может быть удалена из буфера без возвращения в оптическое ЗУ. При выборе режимов проверки чипов будем исходить из того, что в ОЭ ОЗУ амплитуды электрических импульсов напряжения стирания  $U_{ст}$ , записи  $U_з$  и считывания  $U_{сч}$  и интенсивности световых импульсов записи  $I_з$ , считывания  $I_{сч}$  могут изменяться в определенных пределах:

$$U_{ст\ min} < U_{ст} < U_{ст\ max};$$

$$U_{з\ min} < U_з < U_{з\ max};$$

$$U_{сч\ min} < U_{сч} < U_{сч\ max};$$

$$I_{з\ min} < I_з < I_{з\ max};$$

$$I_{сч\ min} < I_{сч} < I_{сч\ max}.$$

Наиболее сложным режимом стирания (или записи нулей) является режим, при котором стирание «1», ранее записанной в «форсированном» режиме, проводится в условиях пониженного напряжения. Для этого во все ячейки чипа записывается «1» при  $U_{з\ max}$ ,  $I_{з\ max}$ , а стирание проводится при  $U_{ст\ min}$ .

Поскольку стирание эквивалентно записи «0», рассмотрим режим записи «1». Наиболее сложным будет режим, когда запись предшествует «форсированное» стирание, при котором  $U_{ст} = U_{ст\ max}$ , а запись «1» ведется при напряжении  $U_{з\ min}$  и интенсивности света  $I_{з\ min}$ . В режиме записи может происходить так называемый «засев», когда при записи «1» в одну из ячеек записывается «1» и в соседнюю ячейку, где хранится «0». На «засев» среда проверяется по следующей программе: стирание при  $U_{ст\ max}$ ; последовательная запись в ячейках чипа кода 1, 0, 1, 0, 1, ..., 0 при  $U_{з\ max}$ ,  $I_{з\ max}$ ; считывание при  $U_{сч\ ном}$ ,  $I_{сч\ ном}$ ; проведение тех же операций при записи инверсного кода 0, 1, 0, 1, ..., 0, 1. Проверка

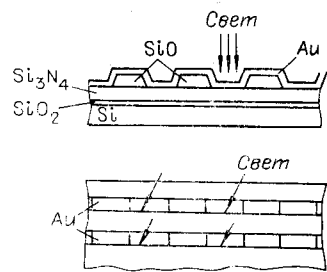


Рис. 2. Схема выполнения экспериментальных матричных МНОП-структур.

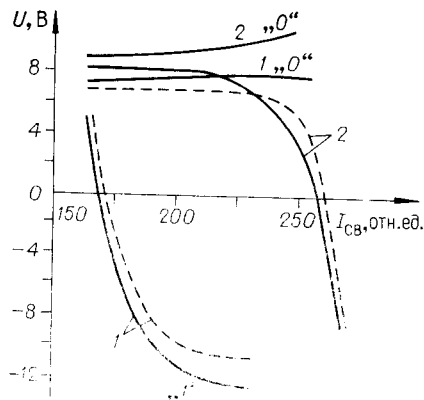


Рис. 3. Зависимость потенциала плоских зон от интенсивности света при записи информации.

на «засев» является также проверкой среды на хранение «0» при многократном воздействии «разрушающих» электрических импульсов записи «1». Испытание среды в режиме считывания проводится по следующей программе: стирание при  $U_{ст\ max}$ ; запись кода 1, 0, 1, 0, ..., 1, 0 при  $U_{з\ min}$  и  $I_{з\ min}$ ; считывание при  $U_{сч\ max}$ ,  $I_{сч\ max}$  (проверка на возможность появления лишних «1»); считывание при  $U_{сч\ min}$ ,  $I_{сч\ min}$  (проверка на возможность появления лишних «0»); проведение аналогичной проверки при записи инверсного кода (0, 1, 0, 1, 0, ..., 0, 1).

Исследуемые образцы матричных МНОП-структур представляли собой линейки из 64 ячеек размером  $50 \times 150$  мкм с шагом 100 мкм. Контакт на кремниевую подложку МНОП-структуры был нанесен напылением алюминия в вакууме. Верхний металлический электрод полупрозрачен, изготовлен путем напыления золота в вакууме с коэффициентом пропускания  $\sim 50\%$ . Схема матричных МНОП-структур показана на рис. 2.

Измерение диапазона работоспособности матричной МНОП-структуры проводилось методом измерения изгиба зон Si в приповерхностной области. Величина изгиба зон зависит от заряда ловушек в диэлектрическом слое и от потенциала металлического электрода. Контроль величины и направления изгиба зон можно осуществить методом фотоэлектрического считывания (в данном случае использовалось считывание по фототоку), измеряя напряжение на металлическом электроде, при котором изгиб зон полупроводника становится равным нулю (потенциал плоских зон), что соответствует нулевому сигналу фототока.

Методика измерения предусматривала запись «1» или «0» при различных значениях  $U_z$  или  $U_{ст}$  и  $I_z$  в одну из ячеек МНОП-структуры и считывание сигнала фототока. Затем на структуру подавалось постоянное смещение, величину и знак которого можно изменять. По напряжению смещения, при котором сигнал фототока становился равным нулю, определялся потенциал плоских зон полупроводника, при этом

$$U_{пз} = U_{см} + U_{сч}.$$

Затем измерялся потенциал плоских зон в соседних ячейках матричной МНОП-структуры для определения степени записи ложной информации.

На рис. 3 показана зависимость потенциала плоских зон полупроводника для исследуемой ячейки (кривые 1) и соседних с ней ячеек (кривые 2) от интенсивности света при переключении зарядового состояния структуры импульсами напряжения с минимальной (штриховые линии) и максимальной (сплошные линии) амплитудами. Минимальное напряжение записи и стирания определяется толщиной слоя диэлектрика. Как показано в работе [5], напряженность поля в слое диэлектрика,

соответствующая началу переключения заряда ловушек;  $-E_d \sim 8 \times 10^6$  В/см. При толщине слоев двуоксида кремния  $\sim 2$  нм и нитрида кремния  $\sim 70$  нм минимальное напряжение переключения равно  $\sim 58$  В.

За минимальные напряжения записи и стирания принимались напряжения, обеспечивающие переключение (при минимальной интенсивности света) всех ячеек памяти, в которых предварительно была стерта или записана информация, при максимально допустимых напряжениях и интенсивности света. Максимальное напряжение переключения ячеек памяти выбиралось таким, чтобы обеспечивалась требуемая долговечность структуры. Для исследованных образцов матричных МНОП-структур напряжение записи и стирания равнялось 60 В, максимальное — 66 В.

Диапазон изменения потенциала плоских зон, ограниченный на рис. 3 кривыми 1 и 2 для минимального напряжения переключения исследуемой и соседних с ней ячеек памяти, определяет область работоспособности исследуемой ячейки памяти.

Область работоспособности матричной МНОП-структуры существенно сужается из-за неоднородности параметров ячеек в матрице. Проведенные измерения показали, что для исследованных матричных МНОП-структур уверенная запись информации без воздействия на соседние ячейки памяти осуществляется при изменении интенсивности света на  $\pm 40\%$  от оптимального значения, выбранного в центре области работоспособности. Чувствительность МНОП-структур в режиме записи, соответствующая оптимальной интенсивности света ( $\lambda = 0,63$  мкм), составила  $2 \cdot 10^{-7}$  Дж/мм<sup>2</sup>. При считывании чувствительность  $\sim 10^{-7}$  Дж/мм<sup>2</sup>. Замена золотого полупрозрачного электрода с коэффициентом пропускания 50% более прозрачным электродом позволит увеличить чувствительность МНОП-структур.

Для исследований МНОП-структур было разработано устройство, блок-схема которого показана на рис. 4. Электроника управления служит для организации программ испытания и контроля сред в режимах стирания, записи и считывания информации. Блок-схема устройства управления показана на рис. 5.

Импульсы стирания, записи и считывания поступают от генераторов типа Г5-15. Схема построена таким образом, что на структуру подаются непрерывно считывающие импульсы от соответствующего генератора. Выходные сигналы наблюдаются на экране осциллографа. Режим стирания и записи осуществляется в зависимости от положения тумблера Т<sub>1</sub> «стирание — запись» нажатием кнопки. При этом на структуру подается один импульс от генератора стирания или записи. Длительность светового импульса в режиме записи определяется длительностью импульса задающего генератора, а его амплитуда регулируется путем

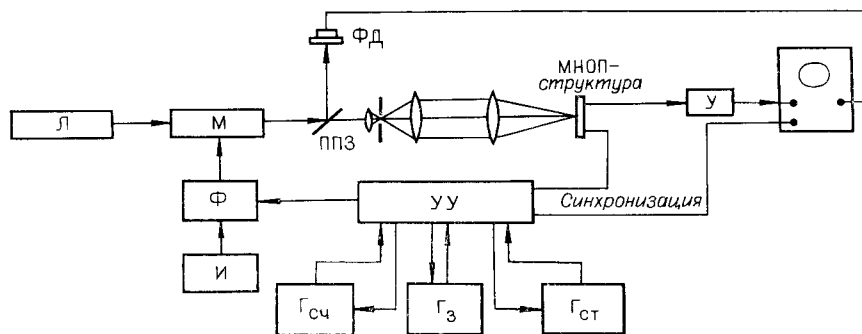


Рис. 4. Блок-схема измерительной установки:

ППЗ — полупрозрачное зеркало, Л — лазер, ФД — фотодетектор, У — усилитель, УУ — устройство управления, И — источник высокого напряжения, Г — генератор, Ф — формирователь, М — модулятор.

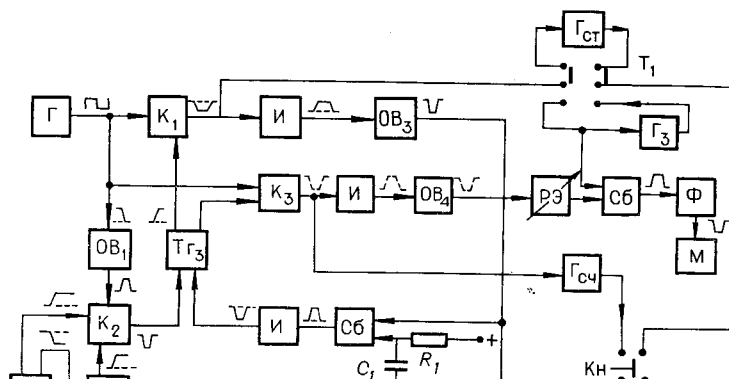


Рис. 5. Блок-схема устройства управления:  
Тг — триггер, Кн — кнопка, ОВ — одновибратор, И — схема «И», Сб — сборка, Т — тумблер, К — ключ, РЭ — регулирующий элемент.

изменения амплитуды управляющего напряжения на электрооптическом модуляторе.

В режиме считывания длительность светового импульса составляет 1—3 мкс и задается одновибратором ОВ<sub>4</sub>. Для регулировки амплитуды светового импульса предусмотрен отдельный регулировочный элемент. Для измерения потенциала плоских зон и выбора режима считывания сигнала к структуре через сопротивление подключается источник постоянного смещения величиной от 0 до 15 В. Полярность напряжения изменяется тумблером Т<sub>2</sub>.

При считывании по фототоку постоянная времени зарядки структуры  $\tau_{зар} = (R_{ген} + R_{н})C_{н}$  выбирается намного меньше длительности электрического и светового импульсов. Импульс света подается с задержкой, достаточной для окончания переходных процессов, вызванных импульсом напряжения. В результате разделения электронно-дырочных пар, созданных светом в области пространственного заряда, во внешней цепи структуры протекает ток

$$i = K_0 \Phi_0 (1 - e^{-\alpha w / l} - \alpha L_d),$$

где  $K_0$  — коэффициент, учитывающий пропускание света электродами и квантовый выход в полупроводнике;  $\Phi_0$  — плотность светового потока;  $\alpha$  — коэффициент поглощения света в полупроводнике, а  $L_d$  — диффузионная длина.

При считывании напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_{н}$  зависит от отношения площади освещенного участка к площади всего электрода. Средняя величина фототока при освещении любой ячейки структуры

$$i_{\Phi} = dU_{пов. пот} C_d / t = K \Phi_0,$$

где  $dU_{пов. пот}$  — изменение поверхностного потенциала на освещенной ячейке;  $C_d$  — емкость диэлектрика ячейки;  $t$  — длительность светового импульса.

Величина фототока с одной ячейки составляет 10 мкА, что требует применения усилителя считывания, удовлетворяющего специфическим условиям работы ЗУ. В описываемой установке предварительное усиление сигнала фототока в измерительной установке проводилось с использованием операционного усилителя (микросхема IУТ401Б с двумя поле-

выми транзисторами на входе). Применение операционного усилителя с отрицательной обратной связью позволяет получить достаточно низкое входное сопротивление усилителя, необходимое для уменьшения постоянной времени цепи перезарядки структуры, и достаточную величину усиления для наблюдения сигнала фототока на экране осциллографа усилителя.

Для узловых точек  $p$  и  $q$  имеем

$$i_{\Phi} + i_1 = i_3 + i_4 + i_5. \quad (1)$$

Так как на входе усилителя применены полевые транзисторы, то входным током усилителя в данном случае можно пренебречь и принять  $i_5 = 0$ ,  $i_3 = U_{\text{ВЫХ}}/R_o$ ,  $i_4 = U_o \omega_o C_o$ ,  $U_o = U_{\text{ВЫХ}}/K_o$ ,  $i_2 = i_3 + i_4$ . Уравнение (1) примет следующий вид:

$$i_{\Phi} + U_1/R_i = U_{\text{ВЫХ}}/R_o + U_{\text{ВЫХ}}j\omega_o C_o/K_o. \quad (2)$$

Для усилителя справедливо выполнение равенства

$$(U_1 - U_{\text{ВЫХ}}/K_o)j\omega_o C_o = i_{\Phi} + U_1/R_i. \quad (3)$$

Подставляя  $U_1$  из (3) в (2), получим

$$U_{\text{ВЫХ}}(j\omega) = i_{\text{ВХ}}(j\omega) K_o \frac{1 + \frac{1}{j\omega C_o R_i - 1}}{j\omega C_o \frac{1}{R_o} + \frac{j\omega C_{\text{Д}}}{j\omega C_{\text{Д}} - 1}},$$

где  $R_o' = R_o/K_o$ ,  $K_o$  — коэффициент усилителя без обратной связи. Заменяв  $j\omega \rightarrow p$  и осуществив преобразование Лапласа, найдем реакцию схемы на ступенчатое изменение входного тока:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -i_{\Phi} \frac{R_o C_{\text{Д}}}{C_{\text{Д}} + \frac{R_o'}{R_i} C_o} \left( e^{-t/R_o' C_o} - e^{-t/R_i C_{\text{Д}}} \right). \quad (4)$$

Знак «—» означает, что усилитель инвертирует сигнал.

Из выражения (4) следует, что переходная характеристика содержит две экспоненты с постоянными времени:  $\tau_{\text{н}} = R_i C_{\text{Д}}$ , определяющая передний фронт импульса, и  $\tau_{\text{с}} = R_o' C_o$ , т. е.

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = i_m R_o (e^{-t/\tau_{\text{с}}} - e^{-t/\tau_{\text{н}}}),$$

где  $i_m = -i_{\Phi} \frac{C_{\text{Д}}}{C_{\text{Д}} + C_o \frac{R_o'}{R_i}}$ .

При  $K_o \rightarrow \infty$  получаем, что  $R_o' \rightarrow 0$ , а  $i_m = -i_{\Phi}$ . В этом случае

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = i_{\Phi} R_o (e^{-t/\tau_{\text{с}}} - e^{-t/\tau_{\text{н}}}). \quad (5)$$

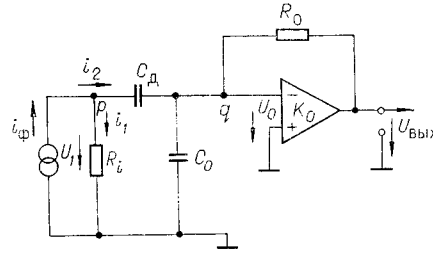


Рис. 6. Эквивалентная схема цепи связи

Можно видеть, что выходное напряжение не зависит от шунтирующего влияния емкости затемненного участка структуры. По амплитуде выходного сигнала можно определить значение фототока элемента и, следовательно, его емкость  $C_d$ .

При значениях  $R_o = 10^4$  Ом,  $K = 20\,000$ ,  $C_o = 10^{-9}$  Ф,  $C_d = 10^{-12}$  Ф,  $R_i = 10^5$  Ом имеем  $R'_o = 0,5$  Ом и  $C_o \frac{R'_o}{R_i} = 5 \cdot 10^{-15}$  Ф  $\ll C_d$ . Ввиду этого вторым из слагаемых в знаменателе выражения (4) можно пренебречь, что приводит нас к формуле (5).

Максимальное значение выходного напряжения усилителя наблюдается в момент времени

$$t_m = R_i C_d \left( 1 + \frac{R_i C_d}{R'_o C_o} \right) \ln \frac{R'_o C_o}{R_i C_d}.$$

Если  $R_i C_d < R'_o C_o$ , то  $t_m \approx R_i C_d$ .

Практически для высокочастотных составляющих сигнала (импульс на выходе имеет треугольную форму) коэффициент усиления усилителя с  $f_{гр} = 20$  МГц падает, и его входное сопротивление увеличивается. Однако в этом случае емкость структуры  $C_o$  шунтирует действие отрицательной обратной связи, корректируя некоторым образом частотную характеристику усилителя. Поэтому наблюдаемый сигнал можно получить практически без искажений.

**Заключение.** Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить работоспособность МНОП-структур с большим количеством ячеек памяти в режимах, характерных для оптоэлектронного ЗУ с побитовой записью информации, и показывают, что даже при очень широких областях работоспособности отдельных ячеек памяти допуски на разброс параметров управляющих электрических и световых импульсов для совокупности ячеек, работающих в условиях взаимовлияния, оказываются достаточно жесткими ( $\pm 40\%$  для интенсивности света и  $\pm 5\%$  для амплитуды напряжения в режиме записи информации). Цепь считывания усилителя позволяет регистрировать выходной сигнал практически без искажений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коробов И. Б., Плотников А. Ф., Попов Ю. И., Селезнев В. И. Реверсивная запись оптической информации на структуре металл — диэлектрик — полупроводник. — Квант. электроника, 1975, т. 2, № 9, с. 2013.
2. Китович В. В., Бородкин В. М., Жалейко В. Б. и др. Проектирование оптоэлектронного оперативного ЗУ. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ, 1977, вып. 5, с. 83—96.
3. Плотников А. Ф., Селезнев В. И., Токарчук Д. Н., Ферчев Т. П. Фотоэлектрическое считывание информации, записанной на МНОП-структуре. — Квант. электроника, 1975, т. 2, № 3, с. 508—512.
4. Китович В. В., Жалейко В. Б. Оценка емкости оптоэлектронного оперативного ЗУ с побитовой записью информации. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ, 1977, вып. 1, с. 10.
5. Плотников А. Ф., Селезнев В. И., Шубин В. Э., Ферчев Г. П. Перераспределение напряжения в структуре металл — нитрид кремния — окись кремния — кремний под действием света. — Квант. электроника, 1974, т. 1, № 8, с. 1885.

*Поступила в редакцию 12 июня 1979 г.*