

При достаточно слабом облучении кристалла фотоиндуцированный ток линейно зависит от интенсивности падающего света. Эта зависимость имеет вид

$$j_{\Phi} = C_{\alpha}(q) I_{\alpha}(q), \quad (22)$$

и, следовательно, сформулированное выше утверждение выполняется. Можно также утверждать, что смена знака происходит при таких частотах падающего света, когда энергия электрона, попавшего в зону проводимости, порядка тепловой энергии  $T$ . Действительно, поскольку фотоиндуцированный ток является суммой токов, обусловленных процессами фотоионизации и фоторекомбинации, то с учетом формулы (21) энергия  $T$  является характерной энергией, при которой ток ионизации равен току рекомбинации по величине и противоположен по знаку.

5. Фотоиндуцированные токи в сегнетоэлектриках создают в разомкнутом кристалле электрическое поле. Эффект оптического повреждения, связанный с этим полем, обладает рядом особенностей.

Величина максимального поля  $E_{\max}$ , появляющегося в кристалле, определяется условием равенства нулю полного тока, т. е. фотоиндуцированный ток должен компенсироваться дрейфовым током  $j_d$ :

$$j_{\Phi} = -j_d = -\sigma_{\Phi} E_{\max}, \quad E_{\max} = j_{\Phi} / \sigma_{\Phi}.$$

Для небольших интенсивностей света фотоиндуцированный ток  $j_{\Phi}$  и фотопроводимость  $\sigma_{\Phi}$  линейно зависят от интенсивности света, следовательно, насыщенная величина эффекта оптического повреждения не должна зависеть от интенсивности. Для переходов примесь — зона (11) при  $\kappa_0 = 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  получим для  $\sigma_{\Phi} (\Omega \text{ см})^{-1} = 10^{-14} I [\text{Вт/см}^2] E_{\max} \approx 3 \cdot 10^4 [\text{В/см}]$ .

При очень небольших интенсивностях света фотоиндуцированный ток и фотопроводимость перестают зависеть от интенсивности. Величина максимального поля  $E_{\max}$ , следовательно, также не зависит от интенсивности.

В случае промежуточных интенсивностей зависимость  $E_{\max}(I)$  определяется спецификой модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., «Наука», 1963.
2. A. G. Chynoweth. Surface space-charge layer in barium titanate.—“Phys. Rev.”, 1956, vol. 102, p. 705.
3. A. M. Glassett al. High-voltage bulk photovoltaic effect and the photorefractive process in  $\text{LiNbO}_3$ .—“Appl. Phys. Lett.”, 1974, vol. 25, p. 233.

Поступила в редакцию 20 марта 1976 г.

УДК 621.38, 836.112.15

Э. Г. КОСЦОВ, А. И. МИШИН

(Новосибирск)

#### ФОТОЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

1. В современной оптоэлектронике основной логический элемент — оптрон [1—3], использующий двойное преобразование энергии: фотоэлектрическое (свет — электрический сигнал) и противоположное ему —

электролюминесценцию (электрический сигнал — свет). Необходимость двойного преобразования энергии обуславливает низкую добротность оптронов, а противоречивость требования острой направленности излучения и компактности источника света затрудняет микроминиатюризацию, спектральные же характеристики источников света и фотопроводников должны быть согласованы. Слабым звеном оптронов являются также управляемые источники света, количество которых в вычислительном устройстве соизмеримо с числом логических элементов.

Элементы, основанные на использовании модуляции внешнего светового потока и однократного преобразования энергии (световой сигнал — электрический сигнал), описаны в работах [4, 5]. Однако отсутствие методики проектирования и расчета элементов, а также системы в целом приводит к недостаточно корректному рассмотрению возможности использования указанных элементов в области вычислительной техники. В частности (см., например, [6, 7]), предлагается выполнение поэлементных операций осуществлять с использованием структуры фотопроводник — электрооптический материал, при этом, остается в стороне специфика построения функционально-полного набора логических элементов, отражающая волновую природу света.

2. Рассмотрим логические устройства, основанные на использовании модуляции светового потока с помощью также светового потока, в которых осуществляется только одно преобразование энергии: световой сигнал — электрический сигнал, а источник света общий для многих элементов устройства.

Логические элементы, основанные на управлении интенсивностью света, пропускаемого модулятором света, с помощью электрических полей, величина которых определяется, в свою очередь, интенсивностью входных световых потоков, поступающих на фотоэлектрический преобразователь, будем называть фотоэлектрооптическими логическими элементами (ФЛЭ). Термин «фотоэлектрооптический» отражает факт управления электрооптическими свойствами элемента с помощью световых лучей.

На рис. 1, а—в представлены фотоэлектрооптические логические элементы, где МС — модулятор света; ФП — фотоэлектрический преобразователь;  $Z$  — нагрузочный импеданс (для потенциальных схем — резистор, для динамических —  $C$  или  $L$ ); пунктирными линиями обозначены оптические входы и выходы.

Элемент, изображенный на рис. 1, а, предназначен для выполнения функций логической схемы ИЛИ — НЕ или ИЛИ; элемент, изображенный на рис. 1, б, — для выполнения функции «логическая равнозначность» или «сумма по mod 2», а дополняющая схема, приведенная на рис. 1, в, может выполнять функции как инвертора, так и повторителя (полюсы 1, 2 предназначены для подключения к источнику питания; 3 — электрический вход элемента).

Отметим, что наиболее высокими техническими показателями обладают (как и в случае полупроводниковых элементов) схемы с динамической логикой и дополняющие схемы.

3. Принцип работы ФЛЭ рассмотрим на примере динамического регистра сдвига, построенного на базе элемента, изображенного на рис. 1, а. Принципиальная схема сдвигового регистра приведена на рис. 2. На рис. 3, а, г изображены

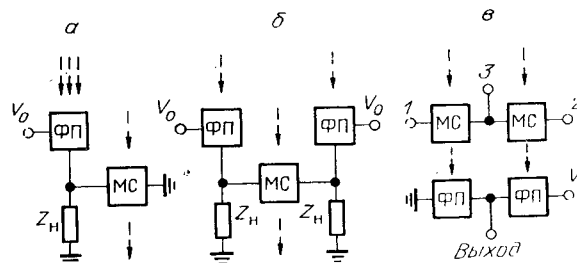


Рис. 1.

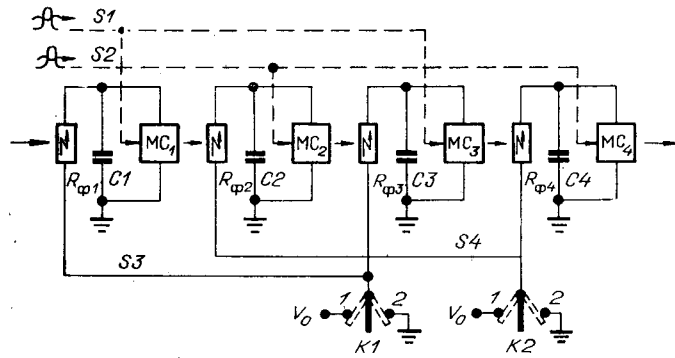


Рис. 2.

световые управляющие импульсы на шинах  $S1$ ,  $S2$  и электрические импульсы на шинах  $S4$  и  $S3$  соответственно.

Регистр работает следующим образом.

Такт 1. Заряд емкостей  $C1$ ,  $C3$  до значения  $V_0$ . Процесс заряда определяется параметрами фотоэлектрических преобразователей и при использовании фотодиодов осуществляется переключением ключа  $K1$  в положение 1 (см. рис. 3, а, д).

Такт 2. Считывание информации с емкостей  $C2$ ,  $C4$  световым импульсом в оптической «шине»  $S2$ , ключ  $K1$  находится в положении 2.

Такт 3. Заряд емкостей  $C2$ ,  $C4$  переключением ключа  $K2$  в положение 1.

Такт 4. Считывание информации с емкостей  $C1$ ,  $C3$  путем подачи светового сигнала в «шину»  $S1$ , ключ  $K2$  находится в положении 2.

В результате выполнения пп. 1—4 производится сдвиг информации на один разряд.

Регистр сдвига, выход которого соединен со входом, представляет собой модель бесконечной цепочки логических элементов. Незатухающее распространение сигналов по подобной цепочке возможно только в том случае, когда существует три действительных корня системы уравнений [8]:

$$\left. \begin{aligned} F_{\text{пр}}(x, y, \mathbf{p}) &= 0; \\ F_{\text{обр}}(x, y, \mathbf{p}) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $F_{\text{пр}}$  и  $F_{\text{обр}}$  — взаимно-обратные функции, характеризующие способность логического элемента сохранять дискретность уровней сигнала.  $F_{\text{пр}}$  (характеристика переключения) описывает изменение величины

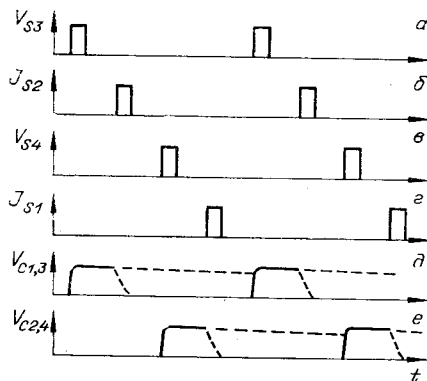


Рис. 3.

выходного сигнала  $y$  в зависимости от входного  $x$ . Аргументами функций  $F_{\text{пр}}$  и  $F_{\text{обр}}$ , кроме значений сигналов на входе и выходе, являются амплитуда напряжения питания, длительность такта, длительность считывающего импульса, а также параметры, определяющие функционирование МС и ФП (совокупность указанных параметров в выражении (1) отражена вектором  $\mathbf{p}$ ). Вид функций  $F_{\text{пр}}$  определяется как типом МС, так и ФП.

Пусть интенсивность светового потока на выходе МС описывается некоторой функцией  $I = f(V_{\text{вх}}, \kappa, t)$

(где  $V_{вх}$  — напряжение на электродах МС  $i$ -го разряда регистра сдвига;  $\kappa$  — совокупность параметров, определяющих работоспособность МС), а сопротивление ФП — функцией  $R = \varphi(I, V_{вых}, \gamma, t)$  (где  $V_{вых}$  — напряжение на электродах МС  $(i+1)$ -го разряда регистра;  $t$  — текущее время с момента заряда соответствующей емкости;  $\gamma$  — совокупность параметров, характеризующих функционирование ФП). Тогда система уравнений (1) может быть записана в виде

$$\varphi\{f(V_{вх}, \kappa, t), V_{вых}, \gamma, t\} C_1(dV_{вых}/dt) + V_{вых} = 0; \quad (2a)$$

$$\varphi\{f(V_{вых}, \kappa, t), V_{вх}, \gamma, t\} C_2(dV_{вх}/dt) + V_{вх} = 0. \quad (2б)$$

Уравнение (2a) описывает изменение напряжения на емкостях с нечетными номерами, а уравнение (2б) — с четными. Время  $t$  изменяется в интервале  $(t_1-t_2)$ , где  $t_1$  — момент окончания заряда нечетных (четных) емкостей, а  $t_2$  — момент окончания импульса считывания информации с нечетных (четных) емкостей.

Аналогично могут быть получены выражения для  $F_{пр}$  и  $F_{обр}$ , когда сигналы входа и выхода выражены через интенсивности световых потоков.

В том случае, когда ток, протекающий через ФП, не зависит от прикладываемого напряжения (т. е. ФП работает в режиме генератора тока) и его проводимость определяется интенсивностью светового потока, система уравнений (2) в безразмерной форме имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} a - e^{-\tau} + G(1 - e^{-\tau})f(bq) &= 0; \\ q - e^{-\tau} + G(1 - e^{-\tau})f(ba) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $a = V_{вых}/V_c$ ;  $q = V_{вх}/V_c$ ;  $b = V_c/V_m$ ;  $\tau = t_n/RC$ ;  $G = \Delta I R S / b V_m$ ,  $t_n$  — длительность считывающего светового импульса,  $V_c = V_0 [e^{-\tau_1} - G_1(1 - e^{-\tau_1})]$  — напряжение на конденсаторе к моменту поступления импульса считывания,  $V_0$  — напряжение на конденсаторе в момент окончания заряда,  $V_m$  — напряжение на электродах МС, обеспечивающее максимальное пропускание света,  $\Delta I$  — приращение светового потока на входе МС,  $S$  — чувствительность ФП,  $R$  — сопротивление ФП, определяемое интенсивностью светового фона  $I_{\phi_1}$  в течение времени считывания ( $R \approx (V_c R_T) / (V_c + I_{\phi_1} R_T S)$ ),  $R_T$  — темновое сопротивление ФП,  $\tau_1 = (t_2 - t_1 - t_n) / R_T C$ ,  $G_1 = I_{\phi_2} R_T S / b V_m$ ,  $I_{\phi_2}$  — световой фон в интервале времени  $t_2 - t_1 - t_n$ .

При выводе уравнений (3) предполагалось, что время релаксации ФП значительно меньше, чем величина  $\tau$ .

На рис. 4 в качестве примера представлены характеристики переключения ФЛЭ, работающего в режиме инвертора, полученные при различных параметрах  $\tau$ ,  $b$ ,  $V_c$  для случая, когда интенсивность светового потока  $I = f(bq)$  на выходе МС описывается выражением  $I = I_0 \sin^2[(\pi/2)(V_c/V_m)]$ .

Решение системы уравнений (3) дает возможность определить значения сигналов «0», «1» и пороговое значение  $q_{п}$ . Эти значения и являются корнями системы (4), они легко определяются графически как точки пересечения кривых  $F_{пр}$  и  $F_{обр}$ . Значения сигналов «0» и «1» зависят от величины светового фона.

Минимальное значение управляющего напряжения  $V_{0min}$  может быть найдено при совмест-

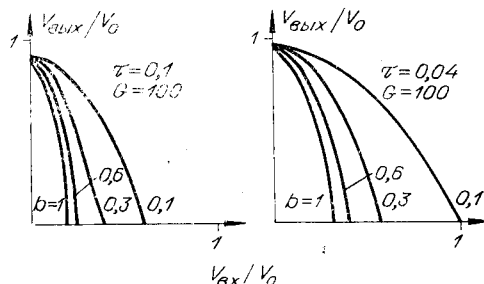


Рис. 4.

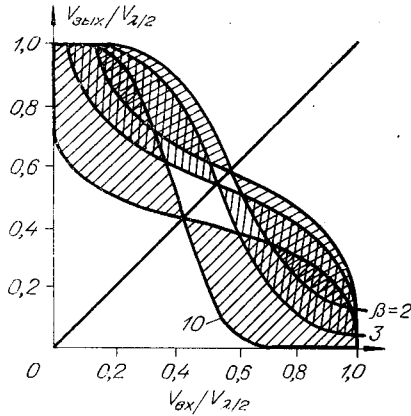


Рис. 5.

ном решении системы уравнений (1) и уравнения  $F'_{пра}F'_{обрq} = F'_{прq}F'_{обра}$ , (4) которое определяет условие касания кривых  $F_{пр}$  и  $F_{обр}$  [9].

Если характер изменения проводимости ФП таков, что сопротивление его обратно пропорционально освещенности (например,  $R = \alpha R_T / I$ ) и не зависит от приложенного напряжения, то  $F_{пр}$  для инвертора имеет следующий вид:

$$a - e^{-(\psi + \beta f(bq))} = 0,$$

где  $V_c = V_0 e^{-\frac{t_2 - t_1 - t_H}{R_T C}} (R_T' - \text{сопротивление ФП с учетом светового фона})$ ,

$$\psi = \frac{I_{\Phi} t_H}{\alpha R_T' C}, \quad \beta = \frac{I_0 t_H}{\alpha R_T' C}.$$

В уравнении (6) световой фон в течение времени считывания отражен непосредственно в функции  $f(bq)$ . Характеристики переключения элемента при использовании в нем МС с квадратичным электрооптическим эффектом ( $I = I_{\Phi} + I_0 \sin^2[(\pi/2)b^2 q^2]$ ) представлены на рис. 5. Выражение для  $V_{0min}$  (электрооптический эффект линейный) имеет вид:

$$V_{0min} = \frac{\sqrt{2e}}{\pi \sqrt{\beta}} V_m e^{\frac{t_2 - t_1 - t_H}{R_T' C}}. \quad (6)$$

Экспериментальное исследование ФЛЭ было осуществлено на регистре сдвига с использованием в МС электрооптических кристаллов. Анализ экспериментальных характеристик элемента показал их соответствие с расчетными.

Пример выполнения конструкции ФЛЭ (элемента двумерного регистра сдвига) показан на рис. 6, где 1 — электрооптический слой, 2 — 4 — прозрачные электроды, 5 — фотопроводник.

На рис. 7 представлено устройство отображения визуальной информации, состоящее из ряда одномерных регистров сдвига (см. рис. 2), расположенных в строках решетки. Управление сдвигом информации осуществляется с помощью световых потоков  $S1, S2$  и управляющих шин  $S3, S4$ . Оптическое считывание информации обеспечено за счет

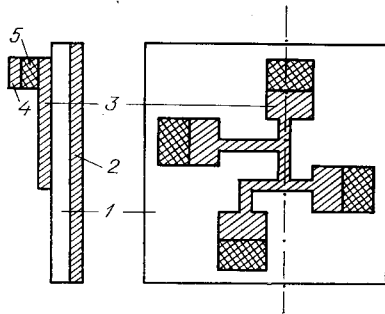


Рис. 6.

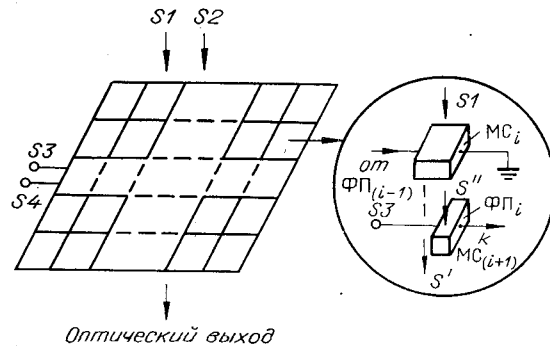


Рис. 7.

разделения светового луча на выходе каждого модулятора света на два потока, один из которых ( $S'$ ) предназначен для вывода информации, а с помощью другого ( $S''$ ) осуществляется сдвиг информации в регистре.

Отметим, что использование электрооптических материалов, обладающих эффектом фотопроводимости, позволяет совместить в одном слое функции МС и ФП.

Энергия  $W$ , требуемая для переключения ФЛЭ (динамических и дополняющих схем), складывается из энергии  $W_\phi$  светового потока, поступающего на вход ФП, и энергии управления МС.

Известно, что чувствительность фотоприемника может составлять 1 Вт с площадью  $10^{-5}$  см<sup>2</sup> (темновой ток прибора равен  $10^{-9}$  А, время срабатывания  $\tau_\phi \approx 10^{-9}$  с, величина емкости  $C_\phi \approx 10^{-12}$  Ф). Изменение тока в 100 раз, необходимое для надежной работы ФЛЭ, достигается при световом потоке  $10^{-7}$  Вт. Для энергии  $W_\phi$  имеем

$$W_\phi = P\tau_\phi \approx 10^{-16} \text{ Дж},$$

а энергию переключения МС можно записать в виде

$$W_m \approx (C_m + C_\phi) V^2 = (\epsilon\epsilon_0 S_m/d + C_\phi) V^2,$$

где  $C_m$  — емкость МС ( $C_m \approx 10^{-13}$  Ф),  $S_m$  — площадь МС ( $S_m \approx 10^{-9}$  м<sup>2</sup>),  $d$  — расстояние между электродами МС ( $d \approx 10^{-5}$  м),  $V$  — напряжение переключения МС (для электростатического модулятора  $V \approx 10$  В). Численный подсчет дает  $W = W_\phi + W_m = 10^{-16} + 10^{-12} \approx 10^{-12}$  Дж, т. е. энергия переключения элемента практически определяется величиной  $W_m$ , а не энергией светового потока, как это допускается в работе [7].

Необходимость использования преобразователей энергии при построении оптических логических схем фактически дает ответ на вопрос о практически достижимых предельных значениях плотности элементов  $N_s$  см<sup>-2</sup>, их быстродействия и потребляемой мощности. Эти предельные значения не могут, естественно, превзойти соответствующие величины, характерные для современной интегральной технологии. Таким образом, преимущества оптических устройств, предназначенных для обработки информации, на наш взгляд, надо искать в большей технологичности и надежности по сравнению с устройствами, выполняющими аналогичные функции. Они обусловлены, в первую очередь, особенностями организации структуры оптической вычислительной системы, значительно сокращающей число связей посредством проводников и заменой их связями через общий для множества элементов диэлектрик, а также число пересечений проводников.

Оценим предельные размеры, плотность размещения логических элементов, длину оптического канала связи, исходя из ограничений, связанных со спецификой распространения светового луча.

Дифракционная картина определяется линейными размерами окна модулятора света, ее можно охарактеризовать волновым параметром  $\psi = (\lambda h)^{1/2}/b_1$ , где  $b_1$  — линейные размеры окна модулятора,  $h$  — расстояние от центра отверстия. Распространение светового луча может быть описано в первом приближении в рамках геометрической оптики, если  $\psi \ll 1$ . При  $\psi \gg 1$  распределение интенсивности света характеризуется сложной диаграммой направленности. Заметное отклонение от законов геометрической оптики наступает при  $\psi \approx 0,3$ .

Выберем уровень потерь света за счет дифракции, а также степень неравномерности освещенности на поверхности фотоприемника. Этим значениям будет соответствовать значение  $\psi = \psi_\phi$ , откуда  $b_1 = (\lambda h)^{1/2} \psi_\phi$ . Допустимый уровень светового фона дает возможность определить расстояние  $b_2$  между элементами; его можно выразить через полосы Френеля:  $b_2 = (n\lambda h)^{1/2}$ , где  $n$  — целое число. Отсюда следует, что поверхностная плотность размещения элементов определяется величиной

$h$ , она равна  $\psi_{\Phi}^2/\lambda h (\sqrt{n}\psi_{\Phi} + 1)^2 \text{ см}^{-2}$ , соответственно объемная плотность  $N_V = \psi_{\Phi}^2/\lambda h^2 (\sqrt{n}\psi_{\Phi} + 1)^2 \text{ см}^{-3}$ .

Произведем численную оценку, допуская, что потери света на краях отверстий не должны превосходить 5% (это соответствует, согласно спирали Корню [10], значению  $\psi_{\Phi} \approx 0,3$ ), а влияние соседних элементов уже несущественно, если  $b_2 = 3(\lambda h)^{1/2}$ . Мы не допустим большой ошибки, если минимальное значение  $h$  оценим в 100 мк: эта величина может иметь смысл и как толщина подложки, и как суммарная толщина всех слоев, компонент устройства. Когда  $\lambda = 630 \text{ нм}$ , плотность размещения элементов равна  $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$ , при этом  $b_1 = 27 \text{ мк}$ ,  $b_2 = 24 \text{ мк}$ . С учетом сказанного можно сформулировать основные требования к конструкции устройства, предназначенного для дискретной обработки оптической информации. Эта конструкция должна обеспечивать минимальные расстояния между отдельными плоскостями ( $10^{-3} - 10^{-2} \text{ см}$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Адирович. Оптоэлектроника.— В кн.: Микроэлектроника. М., «Сов. радио», 1967, вып. 1, с. 75—128.
2. С. В. Свечников. Элементы оптоэлектроники. М., «Сов. радио», 1971.
3. Брей. Переключение с помощью света.— «Электроника», 1965, № 22, с. 3—12.
4. C. E. Land, W. D. Smith. Reflectivemode ferroelectric-photoconductor image storage and display devices.— "Appl. Phys. Lett.", 1973, vol. 23, № 2, p. 57—59.
5. Мейтцлер, Мальдональдо. Сегнетоэлектрические устройства отображения с селективным стиранием и записью.— «Электроника», 1971, т. 3, с. 21.
6. Нисенсон, Иваса. Оптическая обработка информации в реальном масштабе времени с использованием пространственного модулятора на  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .— «Зарубеж. радиоэлектроника», 1973, № 12, с. 3.
7. К. К. Свидзинский, В. П. Лаврищев. Проблемы построения оптоэлектронных систем обработки информации.— «Микроэлектроника», 1973, т. II, вып. 1, с. 3—17.
8. Лоу. Физическая реализация цифровых логических схем.— В кн.: Микромошная электроника. М., «Сов. радио», 1967, с. 30—55.
9. Е. И. Беляев, А. И. Мишин, В. Г. Хрущев. Элементы вычислительной и запоминающей среды на МДП-транзисторах.— В кн.: Вычислительные системы. Вып. 33. Новосибирск, «Наука», 1969, с. 115—140.
10. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М., «Наука», 1973.

Поступила в редакцию 7 мая 1974 г.

УДК 621.396.535.8

А. Т. КЛИПКО, П. Е. КОТЛЯР, Е. С. НЕЖЕВЕНКО,  
В. И. ФЕЛЬДБУШ, В. С. ШИБАНОВ

(Новосибирск)

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ МОДУЛЯТОРЫ СВЕТА НА МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$

**Постановка задачи.** Реализация оперативной оптической обработки информации сдерживается в основном из-за отсутствия устройств вывода изображений в когерентно-оптическую систему и управляемых пространственных фильтров. Решение этих задач однозначно связано с проблемой высокочувствительных реверсивных сред для записи оптической информации.

На рис. 1 представлена сводная таблица параметров основных типов регистрирующих сред по данным работы [1]. Рассмотрение области высокочувствительных сред ( $10^{-5} - 10^{-2} \text{ Дж/см}^2$ ) показывает, что