

а дисперсия измеренных значений скоростей частиц  $v_i$ , как следует из (11),

$$D_v = (\gamma^2 v_M^2 / 12) (1 + 3\eta^2). \quad (13)$$

Значения логарифма относительной дисперсии как функции координаты  $\eta$  представлены на рис. 2 для нескольких относительных размеров измерительного объема анемометра. Она минимальна в центре канала и в 4 раза больше вблизи поверхности. Подставляя (12) и (13) в (1) и (3), получим выражение, описывающее спектр градиентного шума для рассматриваемого случая.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yeh Y., Cummins H. Z. Localized Fluid Flow Measurements with a He-Ne-Laser Spectrometer. — Appl. Phys. Lett., 1964, vol. 4, N 10.
2. Василенко Ю. Г. и др. Лазерные доплеровские измерители скорости. Новосибирск: Наука, 1975.
3. Соболев В. С., Шмойлов Н. Ф. Погрешности осреднения профилей скорости лазерным доплеровским измерителем скорости. — В кн.: Методы лазерной доплеровской анемометрии в гидроаэродинамике: [Материалы Междунар. школы-семинара]. — Минск: изд. Ин-та теплообмена им. А. В. Лыкова АН БССР, 1978.
4. Журавель Ф. А. и др. Эволюция спектра при переходе к турбулентности в течении Куэтта. — Препринт № 103. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1979.
5. Харкевич А. А. Линейные и нелинейные системы. М.: Наука, 1973, с. 208.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: ФМЛ, 1962.

*Поступила в редакцию 9 октября 1979 г.;  
окончательный вариант — 24 июня 1980 г.*

УДК 535.241.13 : 537.228

**А. В. ТРУБЕЦКОЙ**  
(Новосибирск)

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ТРАНСПАРАНТОВ ТИПА ПРОМ НА ОСНОВЕ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$

Основные характеристики оптически управляемых транспарантов (ОУТ) типа ПРОМ на основе кристаллов силиката висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ) изучены в работах [1—3]. Однако до сих пор отсутствуют исследования быстрогодействия ОУТ ПРОМ, тесно связанные с особенностями импульсной записи в таких устройствах.

В данной статье на основе измерения энергетических и временных характеристик импульсной оптической записи получены результаты, дающие представление о кинетике формирования оптической записи в ОУТ на основе  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  и особенностях записи коротких световых импульсов. Рассмотрена остаточная фотопроводимость в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  после облучения импульсом возбуждающего света, ограничивающая число циклов «запись — стирание» в ОУТ за единицу времени.

**1. Процесс формирования оптической записи.** Исследование характеристик процесса формирования оптической записи в ОУТ проведено с помощью экспериментальной установки, схема которой показана на рис. 1. Запись осуществлялась импульсом света мощного аргонового лазера 1, формируемым с помощью акустооптического модулятора 2. Модулятор управлялся от высокочастотного генератора 15, на который посту-

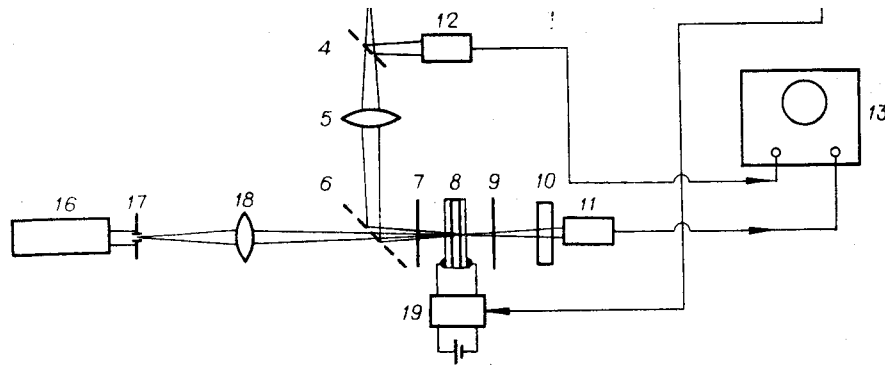


Рис. 1.

пали сигналы от двухканального генератора импульсов 14. С помощью диафрагмы 3 выделялся однородный по интенсивности участок записывающего пучка. Изображение диафрагмы 3 с помощью объектива 5 и светоделителя 6 переносилось в плоскость ОУТ 8. Часть энергии записывающего света отводилась светоделителем 4 на фотоумножитель 12. Считывающий луч He-Ne-лазера 16 ( $\lambda = 0,63$  мкм), ограниченный диафрагмой 17 и спроецированный объективом 18 в плоскость ОУТ, совмещался с изображением диафрагмы 3. ОУТ размещен между скрещенными поляризаторами 7, 9. Питание на ОУТ подавалось от высоковольтного источника с помощью ключа 19. Изменение интенсивности считывающего и записывающего лучей регистрировалось фотоумножителями 11, 12 и отображалось на двухлучевом запоминающем осциллографе 13. Фильтр 10 поглощал записывающий свет и пропускал считывающий пучок. В экспериментах применялся ОУТ ПРОМ симметричного типа на основе  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  [3]. Толщина пластины  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$   $\sim 0,5$  мм, толщина слоев диэлектрика  $\sim 3$  мкм, электрическое сопротивление прозрачных электродов  $\sim 200$  Ом/квadrat.

Методика измерения энергетико-временных характеристик процесса формирования записи заключалась в следующем. После включения напряжения на ОУТ с помощью акустооптического модулятора формировался импульс записывающего света с коротким передним фронтом ( $\sim 1$  мкс) и длительностью, значительно превышающей время формирования записи в ОУТ. На экране осциллографа одновременно наблюдались передний фронт импульса записывающего света и процесс спада интенсивности считывающего пучка света вследствие оптической записи. Время переходного процесса формирования записи  $t_{\phi}$  определялось по уровню спада в  $e$  раз сигнала считывания. Изменяя интенсивность записывающего света  $J$ , можно было менять время формирования записи  $t_{\phi}$ . Для различных  $t_{\phi}$  находилась энергия записывающего света  $E_{\phi}$ , расходуемая за время процесса формирования. Очевидно, что  $E_{\phi} = Jt_{\phi}$ .

Построены зависимости энергии  $E_{\phi}$ , требуемой для формирования записи, от времени формирования  $t_{\phi}$  для записывающего света трех длин волн ( $\lambda = 514,5$ ; 488 и 457,9 нм). Эти зависимости показаны на рис. 2, где по горизонтальной оси обозначено время формирования в логарифмическом масштабе, а по вертикальной — энергия формирования в обычном масштабе. Кривая 1 соответствует  $\lambda = 514,5$ , 2 — 488, 3 — 457,9 нм. Из кривых на рис. 2 видно, что энергия  $E_{\phi}$  снижается с уменьшением длины

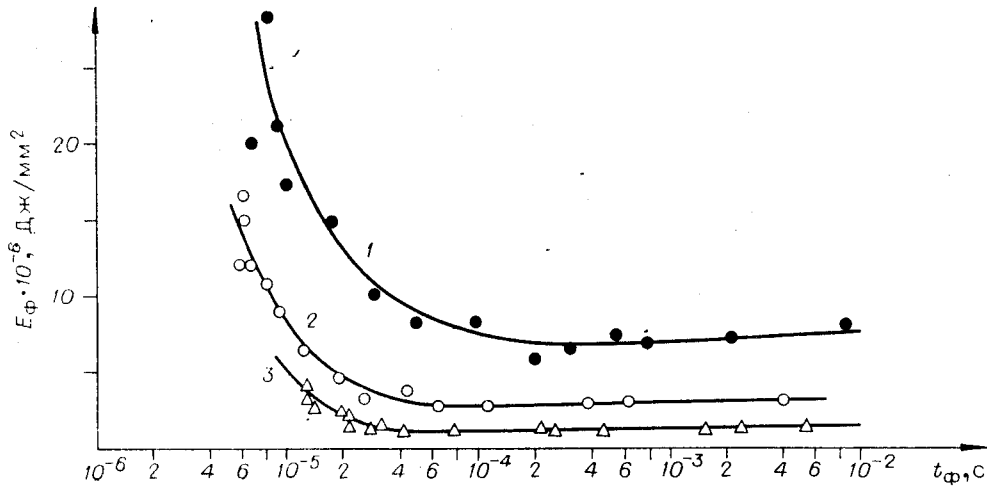


Рис. 2.

волны записывающего света. В диапазоне  $t_\phi$  от  $10^{-2}$  до  $2-4 \cdot 10^{-5}$  с  $E_\phi$  остается приблизительно постоянной для всех длин волн света, а для  $t_\phi \leq 2-4 \cdot 10^{-5}$  с возрастает. Минимальное время формирования записи  $\sim 6-10$  мкс.

В экспериментах размер экспонируемой площади в плоскости ОУТ равнялся  $0,45 \times 45$  мм<sup>2</sup>. Кривые на рис. 2 получены при двух значениях электрического напряжения на электродах ОУТ — 400 и 900 В. Результаты в обоих случаях совпадали.

Рассмотрим характер связи между энергетико-временными характеристиками процесса формирования записи и параметрами фотопроводимости кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Известно, что в  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  фотопроводимость обусловлена электронами [4]. Предположим, что при освещении световым импульсом с коротким передним фронтом концентрация электронов нарастает по простому экспоненциальному закону с характерным временем  $\tau_e$ . В этом случае можно воспользоваться выражением для спада потенциала на кристалле ОУТ от времени экспозиции в виде

$$U/U_0 = \exp\{-e\mu k J \tau_e / (Cd^2)\}[t - \tau_e(1 - \exp - t/\tau_e)]\}, \quad (1)$$

полученным в [5]. В (1)  $U_0$  — начальное напряжение на кристалле;  $e$  — заряд электрона;  $\mu$  — подвижность электронов;  $J$  — интенсивность записывающего света;  $d$  — толщина пластины кристалла;  $\tau_e$  — время жизни электронов, эквивалентное в нашем случае времени нарастания концентрации электронов;  $t$  — время экспозиции;  $k = \eta/h\nu$  ( $\eta$  — квантовая эффективность,  $h\nu$  — энергия кванта экспонирующего света), а  $C = C_k + C_d/2$  ( $C_k$  — емкость пластины кристалла,  $C_d$  — емкость слоя диэлектрика).

Интенсивность считываемого света  $J_c$  на выходе анализатора изменяется в соответствии с выражением  $J_c = J_0 \sin^2[\pi U / (2U_{\lambda/2})]$ , где  $J_0$  — входная интенсивность,  $U_{\lambda/2} = 3,9$  кВ — полуволновое напряжение для  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Для напряжений на кристалле, малых по сравнению с  $U_{\lambda/2}$ , имеем  $J_c \approx J_0[\pi U / (2U_{\lambda/2})]^2$ . Тогда время формирования записи, определенное по уровню спада интенсивности считываемого света в  $e$  раз, можно найти из уравнения

$$(U/U_0)^2 = e^{-1}. \quad (2)$$

Подставляя в (2) значение  $U/U_0$  из (1), получим, что

$$2e\mu k J \tau_e / (Cd^2)[t_\phi - \tau_e(1 - \exp - t_\phi/\tau_e)] = 1, \quad (3)$$

где  $t_\phi$  — время формирования записи. Выражение (3) запишем в виде

$$E_\phi = A[1 - (\tau_e/t_\phi)(1 - \exp - t_\phi/\tau_e)]^{-1}. \quad (4)$$

Здесь  $E_\phi = Jt_\phi$  — энергия света, требуемая для формирования записи, а  $A = Cd^2/(2\epsilon\mu k\tau_e)$ .

Рассмотрим следующие случаи.

1. Время  $\tau_e$  не зависит от интенсивности света  $J$ . Тогда для  $t_\phi \gg \tau_e$  из (4) получаем  $E_\phi \approx A = \text{const}$ , для  $t_\phi \ll \tau_e$  —  $E_\phi \rightarrow \infty$ . Это означает, что инерционность отклика фотопроводимости может приводить к резкому возрастанию  $E_\phi$  при малых временах  $t_\phi$ .

2. Всегда выполняется  $t_\phi \gg \tau_e$ , а время  $\tau_e$  уменьшается с увеличением интенсивности света, выше некоторой интенсивности  $J_n$ . Это равносильно тому, что фототок нелинейно зависит от интенсивности записывающего света при  $J > J_n$ . В данном случае также  $E_\phi \approx \text{const}$  для  $J < J_n$  и увеличивается для  $J > J_n$  вследствие увеличения параметра  $A$  в (4).

Отсюда следует, что особенности фотопроводимости кристалла могут оказывать существенное влияние на вид энергетико-временных характеристик процесса формирования записи. Однако для детального объяснения экспериментальных характеристик рис. 2 необходимы дальнейшие исследования.

**2. Запись коротких световых импульсов.** В [4] показано наличие в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  ловушек электронов, обуславливающих остаточную фотопроводимость вплоть до времени  $\sim 10$  мс после облучения возбуждающим светом. Влияние ловушек может привести к тому, что процесс оптической записи в ОУТ будет происходить после выключения записывающего света. В связи с этим целесообразно исследовать запись коротких световых импульсов в таком режиме, когда считывание записи проводится через некоторый промежуток времени задержки после окончания светового импульса.

Измерены энергетико-временные характеристики записи коротких световых импульсов в ОУТ ПРОМ. На ОУТ подавалось электрическое напряжение и осуществлялась экспозиция световым импульсом длительностью  $t_n$ . Результат записи оценивался по интенсивности считывающего света через промежуток времени задержки  $t_0 = 20$  мс после окончания светового импульса. Изменяя интенсивность записывающего света  $J$  либо длительность импульса  $t_n$ , можно было добиться того, чтобы уровень интенсивности считывающего света, измеренный с задержкой 20 мс, упал в  $e$  раз по сравнению с первоначальным значением до записи. При этом находилась энергия светового импульса  $E_n$ , требуемая для записи  $E_n = Jt_n$ . По результатам экспериментов построены зависимости энергии  $E_n$  от длительности светового импульса  $t_n$ . Эти зависимости показаны на рис. 3 для записывающего света трех длин волн:  $\lambda = 514,5$ , (линия 1), 488 (2), 457,9 нм (3). По сравнению с кривыми на рис. 2 увеличение энергии при малых временах  $t_n$  не наблюдается. Энергия остается приблизительно постоянной для всех времен  $t_n$  в диапазоне от  $10^{-2}$  до  $2 \cdot 10^{-6}$  с. Величина  $E_n$  примерно в 4 раза меньше энергии  $E_\phi$  для того участка кривых на рис. 2. Более низкие значения  $E_n$  свидетельствуют о том, что фоточувствительность ОУТ выше при считывании с задержкой, чем при непосредственном считывании. Увеличение фоточувствительности можно связать с наличием в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  ловушек носителей заряда. Если число носителей, захваченных ловушками, больше числа свободных носителей в течение действия светового импульса, то основной вклад в запись вносят носители, освобожденные с ловушек вследствие тепловой генерации в зону проводимости за промежуток времени задержки считывания  $t_0$ . Очевидно, что фоточувствительность повышается за счет дополнительных носителей, освобождаемых с ловушек. При сравнении кривых на рис. 2 и 3 необходимо учитывать, что при

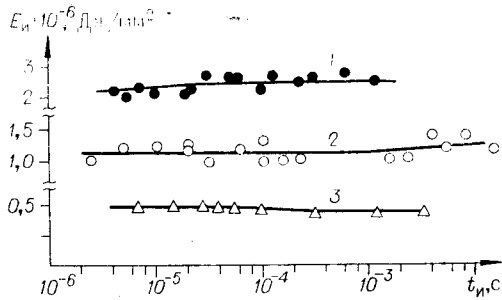


Рис. 3.

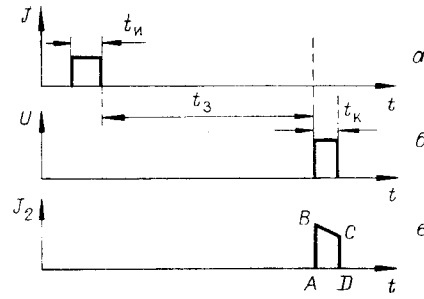


Рис. 4.

$t_n = t_\phi$  интенсивность записывающего света для рис. 3 в 4 раза меньше, чем для рис. 2, поэтому если фототок нелинейно зависит от интенсивности света, то на кривых рис. 3 эта нелинейность может не проявляться. Постоянство энергии  $E_n$  на рис. 3 от времени  $t_n$  означает, что для всех времен  $t_n$  число носителей, освобождаемых с ловушек за время  $t_0$ , примерно постоянно.

Таким образом, в режиме записи коротких световых импульсов при считывании с задержкой особенности записи определяются влиянием ловушек. В этом режиме наблюдается увеличение фоточувствительности ОУТ, а энергия записи не зависит от длительности светового импульса.

**3. Остаточная фотопроводимость.** Остаточная фотопроводимость в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ , вызванная в результате освобождения носителей, захваченных ловушками, может ограничивать цикличность работы ОУТ вследствие влияния предыдущего цикла записи на последующий. Поэтому необходимо измерить остаточную фотопроводимость для различных времен задержки после окончания записывающего светового импульса.

В установке, показанной на рис. 1, образец ОУТ ПРОМ облучался коротким импульсом записывающего света. Напряжение на ОУТ подавалось через время задержки  $t_3$  после окончания светового импульса, и одновременно на осциллографе наблюдалось изменение интенсивности считываемого света. На рис. 4 представлены диаграммы следования импульсов записывающего света (см. рис. 4, а), импульсов напряжения на ОУТ (см. рис. 4, б) и сигнала считывания (см. рис. 4, в). В эксперименте оказалось, что интенсивность считываемого света максимальна в первый момент после включения напряжения, а затем она начинает уменьшаться вследствие процесса записи. Если световой импульс до включения напряжения отсутствует, то процесс записи не наблюдается и интенсивность считываемого света постоянна в течение импульса напряжения. Очевидно, что причиной записи после выключения возбуждающего света является остаточная фотопроводимость, вызванная освобождением носителей, захваченных ловушками. Если импульс напряжения на ОУТ достаточно короткий, то можно считать, что концентрация остаточных носителей остается постоянной в течение импульса напряжения. В этом случае для  $U \ll U_{\lambda/2}$  интенсивность считываемого света в течение действия импульса напряжения спадает по экспоненте  $J_2 = J_1 \exp -t/\tau_c$ , где  $J_1$  — первоначальная интенсивность считываемого света,  $J_2$  — интенсивность считываемого света через время  $t$  после включения напряжения, а  $\tau_c$  — параметр затухания экспоненты. Величина  $\tau_c$  несет информацию об остаточной концентрации носителей в образе в соответствии с выражением  $\tau_c = \alpha/n_0$  ( $n_0$  — остаточная концентрация носителей тока,  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности). Для малого спада интенсивности считываемого света  $\tau_c \approx t_n/(1 - CD/AB)$ . Здесь  $CD/AB$  — отношение величин отрезков  $CD$  и  $AB$  на осциллограмме импульса считываемого света (см. рис. 4, в),  $t_n$  — длительность импульса напряжения. Время формирования записи  $t_\phi$ ,

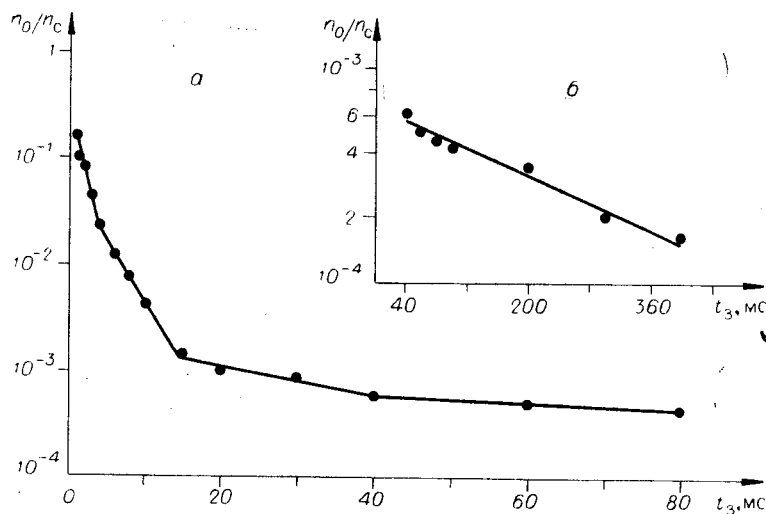


Рис. 5.

измеренное, как описывалось выше, при одновременной подаче импульсов напряжения и записывающего света на ОУТ, несет информацию о некоторой стационарной концентрации носителей тока в образце в соответствии с выражением  $t_{\phi} = \alpha/n_c$ , где  $n_c$  — стационарная концентрация носителей тока в течение действия импульса возбуждающего света. Тогда величина  $t_{\phi}/\tau_c = n_0/n_c$  дает представление об относительной величине спада концентрации носителей после выключения возбуждения.

Экспериментально измерены значения  $\tau_c$  для времени задержки  $t_3$  от 1 до 400 мс при фиксированной длительности и энергии импульса записывающего света:  $t_{\text{и}} = 200$  мкс,  $E_{\text{и}} = 18$  мкДж/мм<sup>2</sup> ( $\lambda = 488$  нм). Измерено также время  $t_{\phi}$  для данного импульса записывающего света, которое оказалось равным  $40 \cdot 10^{-8}$  с. По результатам экспериментов построена зависимость  $n_0/n_c$  от времени  $t_3$ , показанная на рис. 5, а, б. Величина  $n_0/n_c$  отложена на рис. 5 по вертикали в логарифмическом масштабе, а  $t_3$  — по горизонтали в обычном масштабе. На кривых рис. 5 выделяются близкие к линейным участки, которые, по-видимому, связаны с различными типами ловушек в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Квазилинейный участок в диапазоне времени 40—400 мс (см. рис. 5, б) имеет наклон, соответствующий времени спада концентрации носителей в  $e$  раз,  $\sim 270$  мс. Как видно из рис. 5, по истечении времени  $\sim 20$  мс после окончания импульса возбуждающего света концентрация носителей падает примерно на три порядка и далее спадает медленно с характерным временем спада  $\sim 270$  мс. Измерения остаточной фотопроводимости подтверждают вывод, сделанный в п. 2, о наличии в  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  ловушек и их влиянии на процесс записи коротких световых импульсов.

При циклической работе ОУТ ПРОМ остаточная фотопроводимость обуславливает влияние предыдущего кадра записи — стирания данных на последующий. Для исключения этого влияния необходимо вводить между отдельными кадрами время задержки, в течение которого спадает остаточная фотопроводимость. Как видно из рис. 5, фотопроводимость в исследованном образце спадает за времена порядка сотен миллисекунд. Необходимо учитывать, что остаточный фототок накапливается в ОУТ в течение длительности всего кадра, поэтому даже при малом остаточном фототоке может наблюдаться уменьшение интенсивности считываемого света в конце кадра. Например, экспериментально наблюдалось влияние остаточной фотопроводимости даже при временах задержки  $t_3 = 1$  с для

длительности кадра  $t_k = 0,3$  с. Вследствие этого для исключения влияния остаточной фотопроводимости необходимо уменьшать длительность кадра записи и считывания данных и увеличивать интервал между кадрами. В эксперименте получено, что при длительности кадра  $t_k = 100$  мс интервал времени между кадрами  $t_3$  должен быть не менее 400 мс, а при  $t_k = 30$  мс  $t_3 = 110$  мс. В этом эксперименте считался допустимым спад интенсивности считываемого света в конце кадра на 20%, а запись и стирание осуществлялись световыми импульсами длительностью  $\sim 200$  мкс. Легко рассчитать, что при  $t_k = 100$  мс и  $t_3 = 400$  мс имеем цикличность работы ОУТ ПРОМ, равную 2 цикл/с, а при  $t_k = 30$  мс и  $t_3 = 110$  мс — 7 цикл/с.

Таким образом, в  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  наблюдается долговременная остаточная фотопроводимость, которая накладывает ограничения на длительность кадра записи — считывания данных в ОУТ, временной интервал между кадрами и в конечном счете на количество циклов «запись — стирание» в единицу времени.

4. **Заключение.** Предложенная методика экспериментального исследования энергетико-временных характеристик ОУТ ПРОМ позволяет изучать особенности импульсной оптической записи, определяющие быстроедействие ОУТ. Для ОУТ на основе  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  установлено:

1. Энергия света, требуемая для записи, возрастает при временах формирования записи, меньших 20—30 мкс. Минимальное время формирования записи, полученное в эксперименте, составляет 6—10 мкс.

2. В режиме записи коротких световых импульсов и считывания с задержкой наблюдается увеличение фоточувствительности ОУТ, а энергия записи не зависит от длительности светового импульса.

3. Максимальная длительность кадра записи — считывания данных в ОУТ и минимальный интервал времени задержки между кадрами ограничены вследствие остаточной фотопроводимости в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . В исследованном образце наблюдается долговременная остаточная фотопроводимость со временем спада  $\sim 270$  мс.

Особенности импульсной оптической записи данных в ОУТ во многом определяются процессами фотопроводимости кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . В частности, большую роль играет захват носителей тока ловушками, приводящий к долговременной остаточной фотопроводимости после выключения записывающего света. Для увеличения частоты смены кадров в ОУТ целесообразно применять кристаллы с малой концентрацией ловушек.

Автор выражает благодарность П. Е. Твердохлебу за внимание к работе, а также М. П. Петрову и А. В. Хоменко за предоставление образцов ОУТ ПРОМ для исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lipson S. G., Nisenson P. Imaging Characteristics of the Itek "PROM".— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 9.
2. Sprague R. A. Effect of Bulk Carriers on "PROM" Sensitivity.— J. Appl. Phys., 1975, vol. 46, N 4.
3. Хоменко А. В., Ковалев Н. Н., Петров М. П. Оптическая запись информации в «ПРОМ»-структуре на основе  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .— Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, вып. 23.
4. Hou S. L., Lauer R. B., Aldrich R. E. Transport Processes of Photoinduced Carriers in  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .— J. Appl. Phys., 1973, vol. 44, N 6.
5. Hou S. L., Oliver D. S. Pochels Readout Optical Memory Using  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .— Appl. Phys. Lett., 1974, vol. 18, N 8.
6. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. М.: ИЛ, 1962.

Поступила в редакцию 10 сентября 1979 г.;  
окончательный вариант — 26 июня 1980 г.