

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ НА ОСНОВЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$

*Е. И. Леонов, С. Э. Хабаров, А. А. Липовский, В. М. Абуцев*

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований фотоиндуцированного оптического поглощения в оптических волноводах из  $\text{Bi}_{22}\text{TiO}_{24}$ , выращенных на подложках  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  методом жидкостной эпитаксии. Интерпретация полученных экспериментальных данных проведена на основе двухуровневой модели процессов перезарядки глубоких примесных центров.

### Введение

Благодаря удачному сочетанию таких физических свойств, как значительный электро- и акустооптический эффекты, фотопроводимость, оптическая активность, пьезоэлектрические монокристаллы типа  $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$  ( $M=\text{Si, Ge, Ti}$ ) находят широкое применение в опто- и акустоэлектронных устройствах [1, 2].

В последнее время возрос интерес к исследованию в силленитах фотоиндуцированного поглощения (ФИП) — изменения оптического поглощения при засветке оптическим излучением различных длин волн в области «плеча» оптического поглощения [3–5]. В частности, исследовалось ФИП в нелегированных монокристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$ , а также в кристаллах, состав которых отличается от стехиометрического [3]. Измерения проводились преимущественно при  $T=80$  К, так как при этой температуре ФИП проявлялось наиболее ярко. Исследование ФИП при комнатной температуре в специально легированных  $\text{Mn}$  и  $\text{Cr}$  монокристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  [4–5] показало, что легирование ведет к возрастанию индуцированного поглощения.

Создание тонкопленочных интегрально-оптических структур на основе монокристаллов типа силленита [2, 6, 7] позволяет расширить возможности исследования процессов, происходящих в тонких (3–50 мкм) монокристаллических слоях  $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$ , обладающих волноводными свойствами. При этом использование волноводного распространения света дает возможность существенно расширить не только диапазон изменения плотности мощности распространяющегося в оптическом волноводе (ОВ) излучения, но и обеспечить при облучении образцов нормально поверхности монокристаллической пленки однородность засветки в широком спектральном диапазоне. Исследование ФИП в  $\text{Bi}_{12}\text{MO}_{20}$  ОВ представляет также и практический интерес для разработки и изготовления интегрально-оптических модуляторов типа «свет—свет» и других оптоэлектронных устройств.

### 1. Описание процесса ФИП в монокристаллах типа силленита на основе двухуровневой модели

Рассмотрим простую двухуровневую модель процесса перезарядки глубоких примесных центров (рис. 1, а), расположенных в запрещенной зоне энергетических уровней монокристаллов типа силленита [1, 8, 9].

Решение системы кинетических уравнений, описывающих процесс заполнения электронами уровня II (при выполнении закона взаимозаменяемости), получено в работе [10]

$$N = \frac{k_1 \gamma (M_1 + M_2) - \sqrt{k_1^2 \gamma^2 (M_1 + M_2)^2 - 4k_1 \gamma M_1 M_2 (k_1 \gamma - k_2)}}{2(k_1 \gamma - k_2)}, \quad (1)$$

где  $\gamma = \beta/\alpha$ .

Рассматривая выражение (1) при двух предельных случаях  $k_1 \gamma \gg k_2$  и  $k_1 \gamma \ll k_2$  и учитывая, что для монокристаллов типа силленита [1]  $M_1 \gg M_2$ , можно получить следующие соотношения:

$$N \simeq M_2 \left[ 1 - \left( \frac{k_2}{\gamma k_1} \right)^2 \right], \quad k_1 \gamma \gg k_2, \quad (2)$$

$$N \simeq \sqrt{M_1 M_2 \frac{\gamma k_1}{k_2}}, \quad k_1 \gamma \ll k_2. \quad (3)$$

Коэффициент фотоиндуцированного поглощения излучения с энергией квантов, соответствующей уровню  $II$ , определяется выражением

$$\Delta \alpha_{\text{пнд}} = \sigma N, \quad (4)$$

где  $\sigma$  — сечение оптического поглощения отдельным центром.

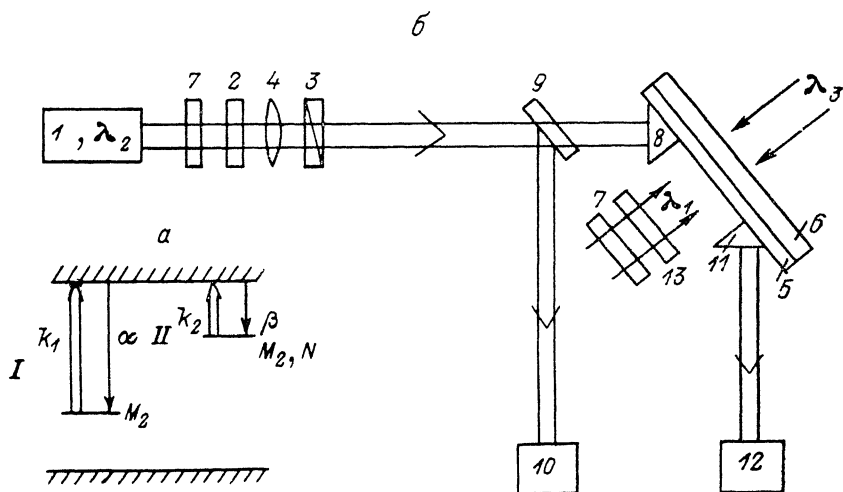


Рис. 1. Двухуровневая энергетическая модель процесса перезарядки глубоких примесных центров (а) и структурная схема установки для экспериментального исследования ФИП (б).

а:  $M_1$ ,  $M_2$  — концентрации уровней  $I$ ,  $II$ ;  $N$  — концентрация электронов на уровне  $II$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  — вероятности захвата свободного электрона уровнями  $I$ ,  $II$ ;  $k_1$ ,  $k_2$  — вероятности возбуждения электрона в зону проводимости с соответствующих уровней.

Пренебрегая вероятностью термического возбуждения электрона с глубоких примесных уровней  $I$  и  $II$  по сравнению с вероятностью оптического возбуждения, можно записать

$$k_1 = S_1 I_1, \quad k_2 = S_2 I_2, \quad (5)$$

где  $S_1$ ,  $S_2$  — сечения фотоионизации уровней  $I$  и  $II$ . Подставляя выражения (4), (5) в (2), (3) и учитывая, что для  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$   $S_1 \simeq S_2$  [11], получаем

$$\Delta \alpha_{\text{пнд}} \simeq \sigma M_2 \left[ 1 - \left( \frac{I_2}{\gamma I_1} \right)^2 \right], \quad I_1 \gg I_2, \quad (6)$$

$$\Delta \alpha_{\text{пнд}} \simeq \sigma \sqrt{M_1 M_2 \frac{\gamma I_1}{I_2}}, \quad I_1 \ll I_2. \quad (7)$$

При возбуждении оптических волноводов с помощью призмных элементов связи величина интенсивности излучения на выходе из структуры определяется выражением

$$I_{\text{вых}} = I_0 B_1 B_2 e^{-\alpha_n z} e^{-\beta_0 z}, \quad (8)$$

где  $\beta_0$  — составляющая затухания, обусловленная потерями при рассеянии на поверхностях раздела, для простоты в дальнейшем примем  $\beta_0 = 0$ ;  $\alpha_n$  — со-

ставлиющая, обусловленная потерями на поглощение;  $B_2$ ,  $B_1$  — коэффициенты эффективности ввода—вывода призмненными элементами связи;  $z_0$  — расстояние между оптическими контактами призм ввода—вывода;  $I_0$  — интенсивность излучения на входе в структуру.

Разделяя поглощение на собственное поглощение  $\alpha_0$  и индуцированное поглощение с коэффициентом  $\Delta\alpha_{\text{инд}}$ , можно получить

$$\Delta\alpha_{\text{инд}} = \frac{1}{d} \ln \frac{I_{\text{вых}0}}{I_{\text{вых}}}, \quad (9)$$

где  $I_{\text{вых}0}$  — значение интенсивности излучения на выходе из ОВ без засветки, а  $I_{\text{вых}}$  — с засветкой.

Учитывая соотношения (6)—(9) и предполагая, что засветка осуществляется посередине пути распространения излучения в ОВ, а диаметр пятна засветки  $d \ll z_0$ , получим систему уравнений, дающую связь между интенсивностью излучения на выходе из ОВ и величинами  $I_1$ ,  $I_2$

$$\Delta\alpha_{\text{инд}} \simeq \sigma \sqrt{M_1 M_2 \frac{\gamma I_1}{I_2}}, \quad I_1 \ll I_2, \quad (10a)$$

$$\Delta\alpha_{\text{инд}} \simeq \sigma M_2 \left[ 1 - \left( \frac{I_2}{\gamma I_1} \right)^2 \right], \quad I_1 \gg I_2, \quad (10b)$$

$$\Delta\alpha_{\text{инд}} = \frac{1}{d} \ln \frac{I_{\text{вых}0}}{I_{\text{вых}}} \quad (10в)$$

$$I_{\text{вых}} \simeq I_2 B_2 e^{-\frac{\alpha_0 z_0}{2}}. \quad (10г)$$

Полученные соотношения позволяют анализировать ход зависимостей ФИП от интенсивностей засветки и распространяющегося излучения в предельных случаях и проводить их сравнение с экспериментальными зависимостями.

## 2. Изготовление образцов и методика эксперимента

В качестве оптических волноводов в экспериментах использовались гетероэпитаксиальные пленки  $\text{V}_{12}\text{TiO}_{20}$ , выращенные на подложках  $\text{V}_{12}\text{SiO}_{20}$ , технология получения которых была рассмотрена ранее [12]. Легирование эпитаксиального слоя атомами железа осуществлялось введением добавок окисла  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.01 вес. %) в шихту.

При проведении экспериментов исследовались характеристики планарных оптических волноводов и фотоиндуцированное изменение интенсивности проходящего через оптический волновод излучения.

Измерение модового состава ОВ проводилось по стандартной методике [13] при использовании призмненных элементов связи, точность определения значений эффективного показателя преломления  $n_{\text{эф}}$  составляла  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ . Толщина ОВ определялась с точностью  $\pm 0.5$  мкм на основе обработки результатов измерения  $n_{\text{эф}}$ . Измерение собственного оптического затухания  $\alpha_0$  в ОВ было проведено фотометрированием трека оптического излучения, распространяющегося в ОВ. Отобранные образцы обладали приемлемым оптическим качеством ( $\alpha_0 = 3-5$  дБ/см). Исследование образцов с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-УМ-1 [6] показало высокую монокристалличность сформированных пленок.

Для проведения экспериментов по фотоиндуцированному поглощению была собрана установка (рис. 1, б). Световой пучок от источника когерентного излучения 1 ( $\lambda_2 = 633$  нм) проходил через четвертьволновую пластину 2, поляризатор 3, в результате чего формировалась световая волна заданной поляризации. Объектив 4 был установлен для повышения эффективности призмненного ввода излучения в ОВ и увеличения плотности мощности излучения, распространяющегося в объеме волновода 5, сформированного на подложке 6. При исследовании кинетики процессов использовались механические затворы 7, позволявшие формировать глубину фронта импульса оптического излучения вплоть до  $10^{-4}$  с. Регистрация интенсивности излучения  $I_0$ , поступающего на элемент

ввода 8, проводилась с помощью полупрозрачного зеркала 9 и фотоприемника 10. Призмные элементы ввода—вывода 8, 11 были изготовлены из фосфида галлия. Интенсивность излучения, выходящего из ОВ, регистрировалась фотоприемником 12. Облучение оптического волновода 5 осуществлялось перпендикулярно поверхности волновода на различных длинах волн  $\lambda_1$  с помощью стандартного осветителя ОВС-1 и фильтров 13. При измерениях в различных диапазонах интенсивностей засветки и излучения, распространяющегося в ОВ, перед каждым измерением проводилась предварительная засветка образца на длине волны  $\lambda_3=600-850$  нм, эквивалентная термическому прогрева [1].

### 3. Экспериментальные результаты

При проведении экспериментов по исследованию ФИП определялись область, спектральной чувствительности, временные зависимости, а также зависимости нормированной интенсивности излучения на выходе из ОВ от интенсивностей засветки и излучения в оптическом волноводе. На рис. 2 представлена спектральная зависимость глубины модуляции  $\eta' = 1 - I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$  ( $I_{\text{вых}}$  — интенсивность излучения на выходе из ОВ при отсутствии засветки). В области  $\lambda_1 \approx$

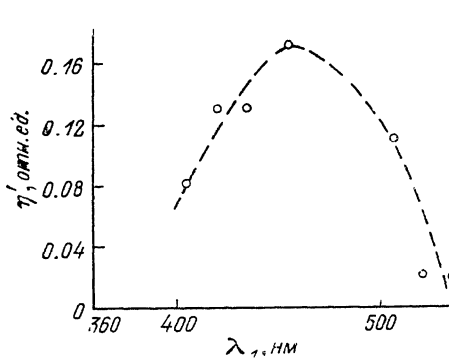


Рис. 2.

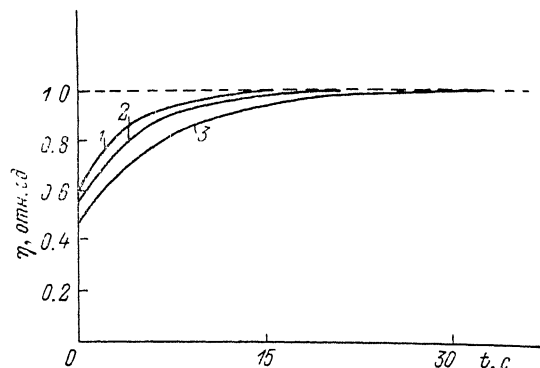


Рис. 3.

$\approx 450$  нм наблюдается максимум, обусловленный наличием в запрещенной зоне энергетического уровня  $I$ , расположенного на расстоянии 2.5—2.9 эВ от дна зоны проводимости [1, 9], и процессом оптической перезарядки глубоких примесных уровней  $I$  и  $II$  (рис. 1, а). На рис. 3 представлены кинетические зависимости нормированной интенсивности  $\eta = I_{\text{пол}}/I_{\text{вых}}$  на выходе из ОВ при выключении засветки ( $\lambda_1=400-480$  нм,  $I_1=1.1$  мВт/см<sup>2</sup>) в момент времени  $t=0$ . Поведение  $\eta(t)$  (кривые 1—3) обусловлено тем, что в момент выключения засветки нарушается динамическое равновесие процесса оптической перезарядки уровней. Уменьшение интенсивности излучения  $I_0$  (кривые 2, 3) на входе в структуру приводит к более длительному процессу установления динамического равновесия, обусловленному второй системой уровней с глубиной залегания 1.8—2.0 эВ ( $\lambda=690-620$  нм).

При проведении экспериментов учитывалась возможность влияния засветки на эффективность ввода излучения в ОВ (за счет изменения эффективных показателей преломления), а также на состояние поляризации светового пучка, распространяющегося в ОВ. Однако подобные эффекты не были обнаружены.

Главное внимание при экспериментальном исследовании ФИП в ОВ  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  было уделено зависимости нормированной интенсивности выходящего излучения от интенсивностей засветки  $I_1$  и излучения, распространяющегося в оптическом волноводе  $I_2$ . На рис. 4 представлены зависимости величины  $\eta$  от интенсивности засветки  $I_1$  при различных значениях интенсивности излучения  $I_0$  на входе в ОВ. Как видно, наблюдается резкое уменьшение интенсивности излучения на выходе из ОВ при начальных значениях  $I_1$ . Так, при  $I_1=0.16$  мВт/см<sup>2</sup> значение  $I_{\text{вых}}$  составляет  $\approx 60\%$  от начального значения (кривая 3). При дальнейшем увеличении  $I_1$  наблюдается заметное насыщение, а при увеличении  $I_0$

(кривые 2, 1) не наблюдается изменения характера кривой  $\eta(t)$ . Видно, что полученные экспериментальные зависимости соответствуют системе уравнений (10). Например, из соотношений (10в) при  $d \rightarrow 0$  и (10а) для  $I_1 \ll I_2$  можно показать, что  $\eta \approx 1 - C_1 \sqrt{I_1 I_2}$  (где  $C_1 - \text{const}$ ), что соответствует ходу экспериментальной кривой  $\eta(I_1)$  при различных значениях  $I_0 \approx C_2 I_2$  (10г). На рис. 5 представлены зависимости нормированной интенсивности волноводной моды  $\eta$  от интенсивности излучения на входе в ОВ при различных значениях  $I_1$  засветки. Видно, что при значениях  $I_0 > 0.1$  наблюдается насыщение кривой  $\eta(I_0)$ , зависящее от величины интенсивности засветки. описываемое выражением  $\eta \approx 1 - C_3 \sqrt{I_2}$  для  $I_1 \ll I_2$ . Для  $I_0 \rightarrow 0$  значения величины  $\eta$  стремятся к различным  $\eta_0$ , что, возможно, обусловлено тепловыми эффектами — повышением вероятности термического выброса электронов с уровней I, II в зону прово-

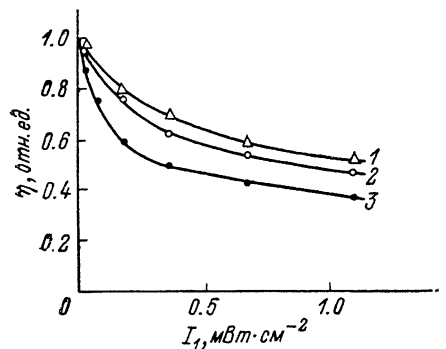


Рис. 4.

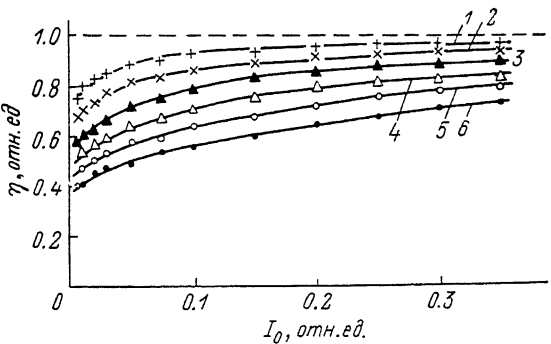


Рис. 5. Экспериментальные зависимости нормированной интенсивности волноводной моды от интенсивности излучения на входе в ОВ.

$I_1$ : 1 — 0.03, 2 — 0.07, 3 — 0.14, 4 — 0.28, 5 — 0.6, 6 — 1.1 мВт/см<sup>2</sup>.

димости. Как показали проведенные эксперименты, полученные зависимости  $\eta(I_1, I_2)$  находятся в соответствии с соотношениями (10) на начальных и конечных участках кривых.

## Выводы

1. Результаты экспериментального исследования фотоиндуцированного поглощения в оптических волноводах  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  на подложках  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  при распространении в ОВ оптического излучения с  $\lambda_2 = 633$  нм при засветке их излучением с  $\lambda_1 = 400 - 550$  нм могут быть интерпретированы на основе простой двухуровневой модели оптической перезарядки глубоких примесных уровней.
2. Использование интегрально-оптической методики экспериментального исследования ФИП в ОВ позволило определить  $\Delta \alpha_{\text{инд}}$  в  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ .
3. Максимальный коэффициент ФИП, наблюдаемый в области длин волн излучения засветки  $\lambda_1 = 400 - 480$  нм, составляет  $\Delta \alpha_{\text{инд}} \approx 1.8 \text{ см}^{-1}$ , максимальная глубина модуляции излучения, распространяющегося в ОВ, 62 % при  $I_1 = 1.1 \text{ мВт/см}^2$ ,  $I_0 = 3 \text{ мВт/см}^2$ .
4. Зависимость величины интенсивности излучения на выходе из оптического волновода от интенсивности на входе может иметь нелинейный характер, зависящий от интенсивности засветки.

В заключение авторы выражают благодарность Ю. В. Шмарцеву за плодотворное обсуждение результатов работы.

## Литература

- [1] Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные оптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л., 1983. 269 с.
- [2] Tada K., Kuhara Y., Tatsumi M., Yamaguchi T. Appl. Opt., 1982, v. 21, N 16, p. 2953—2959.
- [3] Гусев В. А., Детиненко В. А., Соколов А. П. Автометрия, 1983, № 5, с. 34—44.

- [4] *Wardzynski W., Lukaszewicz T., Zmija J.* Opt. Commun., 1979, v. 30, N 2, p. 203—205.
- [5] *Wardzynski W., Slymczak H., Borowiec M. T.* et al. J. Phys. Chem. Sol., 1985, v. 46, N 10, p. 1117—1129.
- [6] *Леонов Е. И., Хабаров С. Э., Вершинин М. С.* и др. ЖТФ, 1985, 55, № 11, с. 2215—2217.
- [7] *Остроуменко А. П., Панченко Т. В., Прудский В. П., Шмалько А. В.* УФЖ, 1983, т. 28, № 2, с. 195—200.
- [8] *Hou S. L., Lauer R. B., Aldrich R. E.* J. Appl. Phys., 1973, v. 44, N 6, p. 2652—2658.
- [9] *Peltier M., Micheron F. J.* Appl. Phys., 1977, v. 48, N9, p. 3683—3690.
- [10] *Фридкин В. М.* Физические основы электрофотографического процесса. М., 1966. 288 с.
- [11] *Кацавец Н. И.* Автореф. канд. дис., Л., 1985. 19 с.
- [12] *Бондарев А. Д., Кацавец Н. И., Кудрик И. Е.* и др. Письма ЖТФ, 1985, т. 11, № 12, с. 713—717.
- [13] Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978. 344 с.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
1 сентября 1987 г.