

случаях к повышению температуры СП перехода: в результате этих двух термообработок  $T_k$  СП=95 К. Сдвиг  $T_k$  СП к 95 К происходит и в том случае, если образец длительно ( $\sim 1.5$  ч) отжигается в области 150—160 К, а затем закаливается до 77 К. Повторные эксперименты по закалке керамики от указанных стрелками трех областей температур приводят к качественно тем же результатам: понижению  $T_k$  СП при закалке в области 115—125 К и повышению  $T_k$  СП при закалке в областях  $\sim 90$  и  $\sim 150$  К, однако количественные изменения в  $T_k$  СП уже существенно меньше (порядка 1—3°); все вариации  $T_k$  СП при повторных экспериментах лежат в пределах 92—95 К. Это состояние керамики в течение дальнейших исследований является неизменным.

На основании этих экспериментов можно сделать два предположения. 1. После синтеза исходная керамика  $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  находится, видимо, в метастабильном состоянии, имеющем пониженную  $T_k$  СП=87 К. Переход в устойчивое состояние с характерной для данной керамики в фазе орто-1 величиной  $T_k$  СП=92 К достигается отжигами и закалками в указанных выше областях температур. 2. Релаксация системы к устойчивому состоянию с  $T_k$  СП=92 К связана, по всей видимости, с определенными структурными изменениями при 90 и 150 К, происходящими достаточно медленно: в противном случае при скоростях закалки, достигаемых в эксперименте (40 град/мин), мы вряд ли могли бы наблюдать сдвиги  $T_k$  СП.

Авторы благодарны Н. С. Сидорову за синтез иттриевой керамики, М. Д. Нерсисяну за синтез европиевой керамики, А. М. Кокотину за нанесение контактов из индия.

#### Список литературы

- [1] *Kini A. M., Geiser U., Kao H.-C. I., Carlson K. D. et al. // Inorganic Chem. 1987. Vol. 26. N 12. P. 1834—1836.*
- [2] *Гусаковская И. Г., Пирумова С. И., Ованесян Н. С. Препринт ОИХВ АН СССР. № 7-14517. Черноголовка, 1988.*
- [3] *Bhargava R. N., Herko S. P., Osborne W. N. // Amer. Phys. Soc. 1987. Vol. 59. N 13. P. 1468.*
- [4] *Toulouse J., Wang X. M., Hong D. J. L. // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 38. N 10. P. 7077—7079.*
- [5] *Asano H., Yokoyama Y., Nishino M. et al. // Modern Phys. Lett. B. 1988. Vol. 2. N 2. P. 583—588.*
- [6] *Iqbal Z., Reidinger F., Bose A. et al. // Nature. 1988. Vol. 331. P. 328.*

Отделение института  
химической физики АН СССР  
Черноголовка

Поступило в Редакцию  
7 июля 1988 г.  
В окончательной редакции  
1 декабря 1988 г.

### ОПТИЧЕСКАЯ РЕВЕРСИВНАЯ ПОБИТОВАЯ ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ НА ПЛЕНКАХ $\text{VO}_2$

Д. З. Гарбузов, С. В. Зайцев, В. Б. Пташник, И. С. Тарасов, Ф. А. Чудновский

Оптическая запись изображений и цифровой информации с высокой плотностью размещения, оптические способы обработки информации в последнее время получили широкое развитие благодаря созданию новых малогабаритных источников излучения и оптических регистрирующих материалов [1]. Разнообразие параметров излучающих лазеров, с одной стороны, и физических свойств фоторегистрирующих сред, с другой стороны, сделало актуальной задачей объединение излучателя и среды в систему.

В настоящей работе анализируются возможности системы, излучатель которой представляет собой полупроводниковый гетеролазер, в качестве регистрирующей среды выступает пленка из диоксида ванадия. Физический процесс, положенный в основу записи, — явление фазового перехода полупроводник—металл в пленке  $\text{VO}_2$  при температуре  $\sim 65^\circ\text{C}$ . Индуцированный теплом сфокусированного луча лазера фазовый переход меняет физические характеристики пленки, в частности коэффициент отражения  $R$ . Благодаря наличию гистерезиса в зависимости  $R$  от температуры записанная информация может удерживаться неогра-

ниченно долгое время. Важное свойство среды — реверсивность, т. е. возможность стирания и последующей перезаписи информации (не менее  $10^8$  циклов).

Макет установки для оптической записи информации состоял из трех функциональных узлов: лазера 1, оптической фокусирующей системы 2, регистрирующей среды 3. Остановимся подробнее на каждом из узлов.

## Лазер

В качестве источника излучения использовался выращенный InGaAs/InP гетеролазер ( $\lambda=1.3$  мкм) раздельного ограничения [2]. Зонная диаграмма лазера приведена на рис. 1, а. Лазер был смонтирован на медном теплоотводе, термостатированном с помощью элемента Пельтье. Конструктивные особенности выращенного лазера (схематически показанного на рис. 1, б) обеспечивают большой срок службы [3], высокую степень когерентности ( $\sim 80\%$ ) при ширине активной области  $W=12$  мкм. Для увеличения дифференциальной эффективности и мощности излучения на одно зеркало лазера наносилось диэлектрическое покрытие

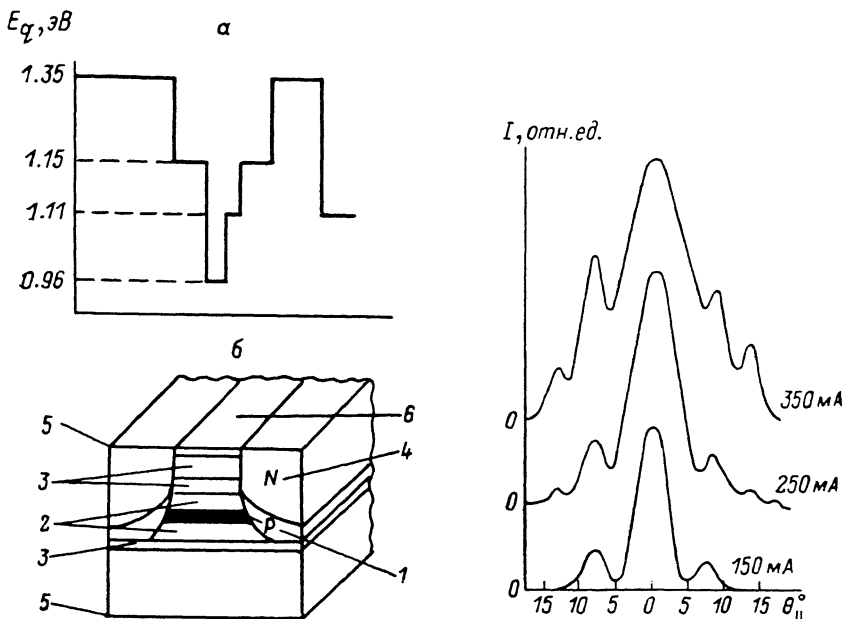


Рис. 1. Зонная диаграмма (а) и конструкция (б) выращенного полоскового гетеролазера. б: 1 — активная область, n-InGaAsP; 2 — полноводный слой, N-InGaAsP; 3 — эмиттер, P-InP, N-InP; 4 — область выращивания InP; 5 — контакт AuZn и AuTe, N-InP подложка; 6 — полосковый контакт.

Рис. 2. Диаграмма направленности излучения гетеролазера в плоскости p-n перехода для различных значений тока.

Ширина активной области  $W=12$  мкм.

(SiO<sub>2</sub>/Si). Дифференциальная эффективность лазера составляла 70 % на одно зеркало, а максимальная мощность излучения — 250 мВт. Диаграмма направленности излучения лазера в плоскости, параллельной p-n-переходу, приведена на рис. 2. Некоторое расширение диаграммы направленности с увеличением тока тем не менее позволяло сохранить высокий процент ввода излучения в оптическую фокусирующую систему. В плоскости, перпендикулярной p-n-переходу, расходимость излучения не зависит от тока и составляет 35°. Высокая степень когерентности излучения преимущественно в одной пространственной моде при большой плотности энергии на выходном зеркале резонатора обеспечила оптимальные характеристики преобразования излучения оптической фокусирующей системой. Коэффициент ввода в фокусирующую систему составил 50 %.

## Оптическая фокусирующая система

Оптическая фокусирующая система представляла собой градиентную стержневую линзу («градан» или «селфок») в комбинации с микрополусферой, отшлифованной на торце градана.

Градан [4, 5] представляет собой сплошной цилиндр с плоскими торцами, показатель преломления которого меняется от радиуса  $r$  по параболическому закону

$$n^2(r) = n_0^2(1 - g^2r^2), \quad (1)$$

где  $n_0$  — показатель преломления на оси цилиндра,  $g = \left(\frac{1}{R_0}\right) \sqrt{2\Delta n/n_0}$  — постоянная,  $\Delta n = n_0 - n(R_0)$ ,  $R_0$  — радиус цилиндра.

Как показано [6], такая среда способна передавать изображение, лучи распространяются в градане по синусоидальным траекториям с расстояниями между перетяжками светового потока  $L = \pi/g$ . Таким образом, если выбрать градан длиной  $L$ , объект (излучающее окно лазера) расположить на верхнем торце градана, то на нижнем торце получится действительное, перевернутое изображение в масштабе 1 : 1 (в действительности длина градана берется несколько меньше  $L$ , так чтобы изображение было сформировано в воздухе, за нижним торцом). Для того чтобы получить уменьшенное изображение объекта, на нижнем торце градана дополнительно вышлифовывалась полусферическая линза радиуса  $a$ . Расчет показывает, что полученная оптическая система (градан+линза) передает объект в масштабе

$$K = \frac{H}{h} = \cos gx + \frac{1}{gF_2} \sin gx, \quad (2)$$

где  $K$  — масштаб изображения,  $H$  — размер объекта,  $h$  — размер изображения,  $F_2$  — фокусное расстояние полусферической поверхности,  $1/F_2 = (n_0 - 1)(1/a)$ ,  $x$  — расстояние от пло-

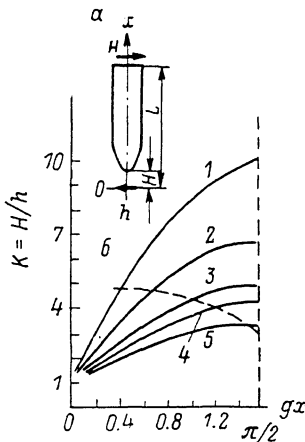


Рис. 3. Схематическое изображение фокусирующей системы (градан+линза) (а) и зависимость масштаба изображения  $K = H/h$  от расстояния  $x$  и фокусного расстояния линзы  $F_2$  (в безразмерных координатах  $gx$  и  $gF_2$ ) для пяти значений  $gF_2$  (б).

1 — 0.10, 2 — 0.20, 3 — 0.25, 4 — 0.30, 5 — 0.35. Точки пересечения семейства кривых со штриховой кривой дают значения  $gx_{opt}$  при соответствующем масштабе  $K$ .

скости  $x=0$  до полусферы (рис. 3, а). Анализ формулы (2) показывает, что масштаб  $K$  увеличивается с уменьшением фокусного расстояния линзы  $F_2$  и с возрастанием  $x$  от 0 до  $L/2$  (рис. 3, б). Существует предел уменьшения  $F_2$ , обусловленный возможностями механической системы по поддержанию необходимой глубины фокусировки в определенных пределах. Величина  $x$  также имеет предел, так как при заданном  $F_2$  (и, следовательно,  $a$ ) при некотором  $x_{opt}$ , определенном из условия  $\sin gx_{opt} = a/R_0$  площадь полусферической линзы не перехватывает всего светового потока. Таким образом, при фиксированном  $F_2$  существует расстояние  $x_{opt}$ , обеспечивающее максимальный масштаб сокращения изображения. На рис. 3, б показана штриховой кривой зависимость  $x_{opt}$  от фокусного расстояния  $F_2$ . Для реально осуществимых значений  $F_2$  масштаб сокращения изображения равен примерно 4—5. Это означает, что изображение окна лазера (объекта) размером  $12 \times 0.5$  мкм приближается к дифракционному пределу порядка длины волны. Как известно, минимальный размер фокального пятна  $d_0$  определяется дифракционной расходимостью лазерного луча  $a = 1.22 \lambda/D$  и фокусным расстоянием оптической системы  $F$ :  $d_0 = Fa = 1.22 \lambda F/D$ . Здесь  $\lambda$  — длина волны света (в нашем случае 1.3 мкм),  $D$  — диаметр зрачка фокусирующей системы (диаметр градана  $2R_0 = 1.5$  мм). Таким образом, изображение должно представлять собой центральный максимум указанного диаметра (круг Эйри), окруженный максимумами низших порядков. В рассмотренной системе на регистрирующей среде фиксировалось лишь изображение центрального максимума, которое представляло собой круглое пятно диаметром 1.5—2 мкм. Формированию пятна подобных размеров способствовали два обстоятельства: высокая когерентность излучающей поверхности лазера, обеспечивающая образование резкого центрального максимума, и пороговый по энергии характер фазового перехода на пленке  $VO_2$ , приводящий к образованию максимумов низших порядков.

### Регистрирующая среда

Регистрирующая среда представляла собой сложную структуру, нанесенную на подложку, содержащую наряду с окислами ванадия ряда Магнели диоксид ванадия с нарушенной стехиометрией [7, 8]. В основе действия данной структуры лежит принцип управляемого

широкополосного интерференционного фильтра, работающего на отражение, т. е. плоскопараллельного резонатора, образованного отражающими поверхностями воздух—оксидная пленка—отражающее зеркало, расстояние между которыми порядка 400—1500 Å. Данная структура обладает бесконечным набором резонансных частот, проявляющихся в виде минимумов (максимумов) в спектре отраженного сигнала при изменении длины падающей волны. Особенности VO<sub>2</sub> слоя, заполняющего объем резонатора, являются наличие фазового перехода полупроводник—металл при температуре ~340 К и связанное с ним изменение показателя преломления и коэффициента отражения (поглощения), приводящего к частотному сдвигу резонансных частот и изменению их ширины и амплитуды (рис. 4). Степень контраста участков пленки, претерпевших фазовый переход, можно оценить величиной  $\eta = (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1)$ , где  $R_1$  и  $R_2$  — коэффициенты отражения для полупроводниковой и

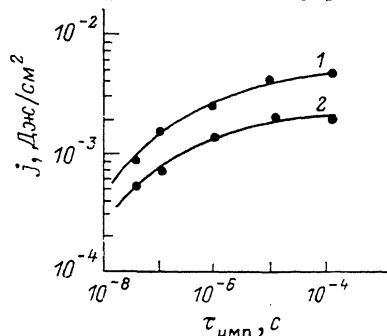
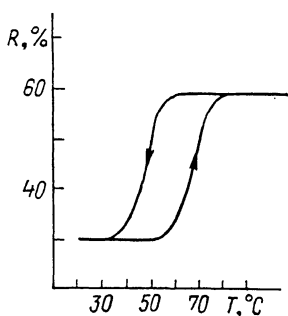


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения  $R$  пленки VO<sub>2</sub> от температуры.

Рис. 5. Зависимость пороговой плотности перехода энергии фазового перехода от продолжительности лазерного импульса

$\lambda$ , мкм: 1 — 1.06, 2 — 0.69.

металлической фаз соответственно. Показатель контрастности  $\eta$  зависит от длины волны света и от технологии изготовления пленки. Стехиометрическая пленка VO<sub>2</sub> имеет  $\eta = 0.16$  ( $\lambda = 0.9$  мкм), окислена по специальной технологии,  $\eta = 0.6$ .

Важная характеристика среды  $j$  — пороговая плотность энергии, вызывающая фазовый переход. Величина  $j$  зависит от длины волны (коэффициент поглощения есть функция  $\lambda$ ) и режима нагрева пленки. Минимальное значение  $j$  принимает в адиабатическом режиме, т. е. выделившееся при поглощении света тепло идет только на нагрев пленки без обмена с окружающей средой (подложкой). Подобный режим осуществляется при длительности лазерного импульса  $\tau_{\text{имп}} < 100$  нс. Зависимость пороговой плотности энергии перехода от продолжительности лазерного импульса представлена на рис. 5.

В заключение отметим основные характеристики регистрирующей среды: физическая основа записи — индуцированный теплом фазовый переход; температурный рабочий интервал 60—70 °С; разрешающая способность 2000 лин/мм; коэффициент контрастности 0.6; реверсивность имеет неограниченное число циклов (не менее  $10^8$ ); минимальная пороговая плотность энергии, вызывающая переход —  $5 \cdot 10^{-4}$  Дж/см.

Авторы выражают благодарность Б. П. Захарчене за постоянный интерес к работе.

#### Список литературы

- [1] *Isailovic J.* Videodisc and Optical Memory. Ptentice Hall: Englewood Cliffs, 1985. 350 p.
- [2] *Алферов Ж. И., Гарбузов Д. З., Давидюк Н. Ю.* и др. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 22. С. 1345—1349.
- [3] *Гарбузов Д. З., Зайцев С. В., Ильинская Н. Д.* и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 9. С. 1822—1824.
- [4] *Микаэлян А. Л.* // Квантовая электрон. 1977. Т. 4. С. 467—468.
- [5] *Ильин В. Г., Карапетян Г. О., Ремизов Н. В.* и др. // Усп. научн. фотографии / Под ред. К. В. Чибисова. М.: Наука, 1985. Т. 23. С. 106—109.
- [6] *Kikuchi K.* // Appl. Opt. 1980. Vol. 19. P. 1076—1080.
- [7] *Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А.* Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
- [8] *Fukuta M., Zembutsu M., Migazawa S.* // Appl. Opt. 1983. Vol. 22. P. 265—267.