

УДК 681.327.68

В. В. Демехин

(Донецк, Украина)

## ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ЗУ

Предложен способ повышения плотности записи двоичной информации на носителе оптической памяти (НОП), позволяющий запоминать в каждом элементе сигналограммы несколько бит информации. НОП представляет собой два диэлектрических слоя и две (одну) резистивные пленки, параметры которых соотносятся между собой так, чтобы в спектре поглощения периодически возникали провалы. Считывание информации производится на  $N$  частотах либо на одной частоте, но при дискретных значениях показателей преломления регистрирующей среды. В отличие от известных носителей «многоцветной памяти» предлагаемый НОП не требует охлаждения до гелиевых температур.

В работах [1, 2] предложен метод многослойной «побитовой» оптической записи, основанный на селекции объемной зоны регистрации, гетеродинном считывании и фазовом кодировании информации. Он позволяет превысить дифракционный предел плотности записи информации, достигнутый традиционными оптическими запоминающими устройствами (ЗУ), в  $N$  раз ( $N \sim 10$ ). Проблемы этого метода связаны с необходимостью поиска компромисса между чувствительностью слоя и числом слоев, однородностью записи в объеме и неразрушающим считыванием.

Основная проблема метода [3, 4] — использование провалов в спектре поглощения для «многоцветной» памяти — обусловлена необходимостью применения криогенной температуры.

В данной работе предложен метод «вертикальной» записи/считывания информации для оптических запоминающих устройств, позволяющий запоминать в каждом элементе сигналограммы (ЭС)  $N$  бит. Механизм запоминания основан на образовании провалов в спектре отражения лазерного излучения каждого ЭС — носителя оптической памяти (НОП) — и использует известные [5, 6] отражательные свойства структуры (рис. 1), а также свойства резонатора сгущать резонансные линии с ростом частоты колебаний и толщины диэлектрического слоя резонатора (см., например, [7]). На рис. 1 0 — хорошо отражающая (например, металлическая) подложка; 1, 3 — тонкие прозрачные диэлектрические слои; 2, 4 — тонкие электропроводящие пленки; 5 — свободное пространство.

Соотношение между длинами волн, толщинами диэлектрических слоев  $d$ , толщинами пленок, показателями преломления слоев  $n$  и удельными электропроводностями пленок таково, что квадрат модуля коэффициента отражения света представляет собой периодическую функцию фазы  $\beta$ . Фазовую модуляцию по  $n$  или ( $i$ )  $d$  выполняет лазер в соответствии с записываемой информацией. Считывание осуществляется на  $N$  длинах волн, когда каждому каналу информации соответствует своя длина волны  $\lambda$ .

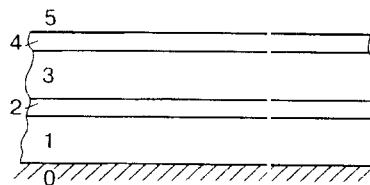


Рис. 1

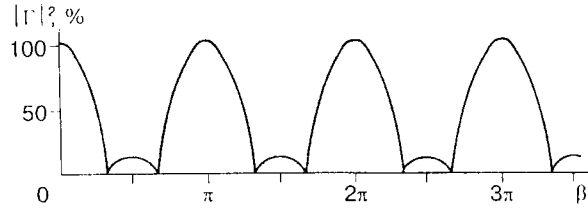


Рис. 2

Зависимость квадрата модуля коэффициента отражения  $|\Gamma|^2$  света от фазы  $\beta$  представлена на рис. 2 [5, 6], где  $\beta = Kn_1d_1 = Kn_3d_3$ ;  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\lambda$  — длина волны считывающего луча;  $d_1, d_3$  — толщины диэлектрических слоев 1, 3;  $n_1, n_3$  — их показатели преломления.

Каждый ЭС предлагаемого НОП имеет структуру (см. рис. 1), коэффициент отражения которой изображен на рис. 2. Отметим, что без пленки 4, которая необходима при использовании модуляции по  $d$ , зависимость  $|\Gamma|^2$  от  $\beta$  будет иметь тот же вид [6], и в дальнейшем будем полагать, что каждый ЭС состоит из двух диэлектрических слоев, разделенных электропроводящей пленкой.

В традиционной бинарной записи ( $N = 1$ ) используются два типа ЭС, отличающиеся толщиной  $d$  рабочего слоя или величиной показателя преломления  $n$ , при этом фазы имеют два значения: одно соответствует «0», другое — «1». Если структура НОП аналогична изображенной на рис. 1, то в результате модуляции фазы 1-го и 3-го слоев принимают значения  $\beta_1$ , а для второго типа ЭС фазы 1-го и 3-го слоев равны  $\beta_2$ .

Пусть ЭС, соответствующие  $\beta_1$ , слабо отражают свет и означают двоичные «0», а ЭС, соответствующие  $\beta_2$ , сильно отражают свет и означают «1». В дальнейшем будем полагать, что если значения  $|\Gamma|^2$  лежат в пределах  $0 \leq |\Gamma|^2 \leq 10\%$ , то это соответствует двоичному «0», а интервал  $25 \leq |\Gamma|^2 \leq 100\%$  — двоичной «1».

Чтобы записать два бита в одном ЭС ( $N = 2$ ), необходимы четыре типа ЭС с  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ , соответствующие четырем возможным состояниям двоичных знаков: 0/0; 0/1; 1/1; 1/0.

Верхним цифрам соответствуют знаки двоичной информации, считываемые на длине волны  $\lambda_1$ , а нижним — на  $\lambda_2$ . Особенностью структуры (см. рис. 1) является то, что при изменении  $\beta$  в пределах, не изменяющих состояние двоичной информации на  $\lambda_1$ , состояние информации на  $\lambda_2$  может измениться на противоположное и даже неоднократно. Необходимо только, чтобы  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  отстояли друг от друга на достаточно большом расстоянии.

Для расчета  $|\Gamma|^2$  воспользуемся методом входных проводимостей [5]:

$$|\Gamma|^2 = \left| \frac{Y^{(3)} - 1}{Y^{(3)} + 1} \right|^2, \quad (1)$$

$$Y^{(3)} = \frac{Y^{(2)} + in_3 \operatorname{tg}(Kd_3n_3)}{1 + i \frac{Y^{(2)}}{n_3} \operatorname{tg}(Kd_3n_3)}, \quad (2)$$

$$Y^{(2)} = Y_s + \frac{1}{\left(\frac{i}{n_1}\right) \operatorname{tg}(Kd_1n_1)}, \quad (3)$$

где  $Y^{(3)}$  — входная проводимость слоя 3;  $Y^{(2)}$  — входная проводимость слоя 2;  $Y_s = Z_5 \sigma_2 d_2$ ;  $Z_5$  — импеданс свободного пространства;  $\sigma_2$  — удельная электропроводимость пленки 2;  $d_2$  — ее толщина.

Из (1) следует, что  $|\Gamma|^2 = 0$  при  $Y^{(3)} = 1$ . Тогда

$$\operatorname{tg}^2 \beta = \operatorname{tg}^2 \alpha \beta = \frac{n_1 n_3}{n_3^2 - Y_s}, \quad (4)$$

$$Y_s = 1 + \frac{n_1}{n_3}. \quad (5)$$

Здесь  $\alpha = \beta_{\max} / \beta_{\min}$ , где  $\beta_{\max}$  и  $\beta_{\min}$  соответствуют большему и меньшему значениям  $\beta$  слабоотражающей зоны (см. рис. 2), для которых  $|\Gamma|^2 = 0$ .

При  $d_1 = d_3$  и  $n_1 = n_3 = 1,5$  из соотношений (3), (4) получим:  $Y_s = 2$ ;  $\beta = 0,398\pi$ ;  $\alpha = 1,51$ .

В точках  $\beta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}$  и т. д. найдем  $Y^{(3)} = 1,125$ , т. е.  $|\Gamma|^2 = 0,35\%$ . (Это точки, лежащие посредине слабоотражающих зон.) При  $\beta = \frac{\pi}{4}$  получим  $|\Gamma|^2 = 9,4\%$ , а при  $\beta = 0,2\pi$  — коэффициент  $|\Gamma|^2 = 25\%$ .

Значения коэффициентов отражения от ЭС, имеющих фазы, кратные  $\pi$  или отличающиеся от них на величину  $\pm 0,2\pi$ , лежат в интервале  $25 \leq |\Gamma|^2 \leq 100\%$ . Значения коэффициентов отражения от ЭС, имеющих фазы, кратные  $\frac{\pi}{2}$  или отличающиеся от них на  $\pm 0,25\pi$ , лежат в интервале  $0 \leq |\Gamma|^2 \leq 10\%$ . Первые соответствуют при считывании двоичным единицам, вторые — двоичным нулям.

При записи двух битов в одном ЭС ( $N = 2$ ) четырем вариантам наложения двух массивов двоичной информации  $\begin{array}{c|c|c|c} 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 1 \end{array}$  на длине волны считывания  $\lambda_1$  соответствуют четыре значения фазы:  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ . При считывании на длине волны  $\lambda_2$  они принимают значения  $\beta_1^1, \beta_2^1, \beta_3^1, \beta_4^1$ .

Рассмотрим фазовое кодирование информации лазерным лучом, осуществляющим локальные изменения показателя преломления регистрирующей среды.

При этом коэффициенты отражения принимают значения, соответствующие фазам  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ . Чем большими изменениями  $n$  располагаем, тем больше бит в одном ЭС можно записать. Такие материалы, как ниобат лития и реоксан, имеют  $\Delta n_{\max}$ , равные  $3 \cdot 10^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{-3}$  соответственно, а на материалах, рассмотренных в [2], значения  $\Delta n$  достигают 0,1. При толщинах диэлектрических слоев  $d_1 = d_3 = 10$  мкм,  $\lambda_1 = 0,5$  мкм,  $\lambda_2 = 0,8$  мкм,  $n = 1,5$  и  $\Delta n_{\max} = 6 \cdot 10^{-2}$  вычислим необходимые градации фаз  $\beta_1$ — $\beta_4$  и  $\beta_1^1$ — $\beta_4^1$  (в долях  $\pi$ ):

$$\begin{array}{c|c|c|c} 59,0 & 60,0 & 58,4 & 57,6 \\ \hline 36,9 & 37,5 & 36,5 & 36,0 \end{array}$$

Флуктуации фазы  $\Delta \beta \leq 0,2\pi \div 0,25\pi$  не приводят к изменению состояния двоичной информации. Относительная точность измерения фазы  $\frac{\Delta \beta}{\beta} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 3,3 \cdot 10^{-3}$ . Предположив, что  $\frac{\Delta n}{n} \approx \frac{\Delta d}{d} \approx \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ , получим  $\Delta n = 1,65 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta d = 1,1 \cdot 10^{-2}$  мкм,  $\Delta \lambda = 0,6 \cdot 10^{-3}$  мкм. Это не значит, что разнотолщинность по всей поверхности регистрирующей среды не должна превышать  $\sim 10$  нм или  $\Delta n$  не может быть больше  $10^{-3}$ . Флуктуации  $n$  и  $d$  могут иметь величины, изменяющие  $\beta$  значительно больше  $\pm 0,2\pi$ . Их допустимая величина растет с ростом  $\beta$  и может превышать несколько  $\pi$ . Для

устранения ошибки при записи с такими флуктуациями необходимо изменить величину показателя преломления так, чтобы фаза данного ЭС изменилась на величину  $\Delta\beta \leq \pi$ . Чем больше  $\beta$ , тем меньше  $\Delta n$  для этого требуется. Если под действием лазерного луча изменение  $n$  происходит необратимо, то при записи тех ЭС, где используется весь диапазон изменения  $n$ , необходим предварительный контроль их фазового состояния и этот процесс должен быть автоматизирован, либо при записи следует оставить часть диапазона  $\Delta n$  на устранение ошибки. В рассмотренном примере наиболее вероятное значение фазы до записи равно  $60\pi$  на  $\lambda_1 = 0,5$  мкм. Положим, что случайные отклонения от этого значения достигают  $\pm 0,5\pi$ , и покажем, что соответствующим изменением мощности лазерного излучения можно удовлетворить всем четырем комбинациям наложения двоичных знаков, но при нескольких других  $\beta$ .

Пусть сначала вместо исходных  $60\pi$  в результате флуктуаций имеем  $\beta_{\text{исх}} = 60,5\pi$ . Изменяя показатель преломления в пределах  $\Delta n = 5 \cdot 10^{-2}$ , получим для  $\beta_1 - \beta_4$  и  $\beta_1^1 - \beta_4^1$  (в долях  $\pi$ )

$$\frac{59,0}{36,9} \mid \frac{60,0}{37,5} \mid \frac{58,5}{36,6} \mid \frac{59,4}{37,1}$$

Если же вместо  $60\pi$  оказалось  $\beta_{\text{исх}} = 59,5\pi$ , то, изменяя  $n$  в пределах  $3,5 \cdot 10^{-2}$ , получим

$$\frac{59,0}{36,9} \mid \frac{58,1}{36,3} \mid \frac{58,5}{36,6} \mid \frac{59,4}{37,1}$$

При флуктуациях фазы, равных  $\pm\pi$ , имеем

$$\beta_{\text{исх}} = 61\pi, \quad \Delta n = 4,9 \cdot 10^{-2}, \quad \beta_{\text{исх}} = 59\pi, \quad \Delta n = 3,8 \cdot 10^{-2},$$

$$\frac{59,0}{36,9} \mid \frac{60,0}{37,5} \mid \frac{59,7}{37,3} \mid \frac{59,4}{37,1}$$

$$\frac{59,0}{36,9} \mid \frac{58,1}{36,3} \mid \frac{58,5}{36,6} \mid \frac{57,5}{35,9}$$

При  $\Delta n \sim 5 \cdot 10^{-3}$  для получения устойчивой к флуктуациям  $n$  и  $d$  записи требуются  $\beta \sim 1000\pi$ . Это приводит к толщинам  $\sim 100$  мкм, что при поперечных размерах ЭС  $\sim 1$  мкм делает запись невозможной. Однако отметим, что увеличение поперечного размера ЭС приводит к значительному расширению диапазона используемых длин волн. Важно, чтобы выигрыш от уменьшения числа бит на единицу площади компенсировался выигрышем в величине  $N$ . Так, уже при  $N = 3$  и увеличении  $d_{\text{min}}$  в 1,5 раза имеем выигрыш в плотности записи 1,33. Увеличение поперечного размера ЭС, а значит, и толщины диэлектрического слоя  $d$  при  $N > 4$  неизбежно.

Таким образом, ошибки, связанные со случайными колебаниями по  $n$  и  $d$ , могут быть устранены. Для этого необходимо автоматизировать процесс зондирования фазы очередного ЭС перед записью.

Следует отметить, что в реальных регистрирующих средах, кроме изменения фазы, происходит поглощение и рассеяние света. Эти потери приводят к уменьшению амплитуды осцилляций  $|\Gamma|^2$  с уменьшением  $\lambda$  и с ростом  $d$ , а следовательно, и к ограничению диапазона используемых волн. Расчеты показывают, что указанные потери не должны превышать 0,1 дБ/см.

При записи в одном ЭС  $N$  бит число градаций фазы равно  $2^N$ . Для  $N = 3$  имеем восемь комбинаций:

$$\begin{array}{cccccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

В случае  $\lambda_1 = 0,40$  мкм,  $\lambda_2 = 0,56$  мкм,  $\lambda_3 = 0,84$  мкм,  $n = 1,5$ ,  $d = 7,6$  мкм,  $\Delta n_{\max} = 5 \cdot 10^{-2}$  получим соответствующие комбинации фаз:

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 57,1 | 55,9 | 55,1 | 57,0 | 55,6 | 56,6 | 56,3 | 55,7 |
| 40,8 | 39,9 | 39,4 | 40,7 | 39,7 | 40,4 | 40,2 | 39,8 |
| 27,2 | 26,6 | 26,3 | 27,1 | 26,5 | 26,9 | 26,8 | 26,5 |

Отметим, по-видимому, пока лишь теоретическую возможность считывания  $N$  бит информации с одного ЭС на одной длине волны. Для этого необходим НОП из материала, который может скачком изменять свой показатель преломления примерно в тех же пропорциях, что и для длин волн считывания в приведенных выше примерах.

Для записи  $N$  бит в одном ЭС можно использовать структуру (см. рис. 1), осциллирующая зависимость  $|\Gamma|^2$  от  $\beta$  (см. рис. 2) которой получена экспериментально в широком диапазоне электромагнитных волн, включая свет [5, 6]. Преимуществом такой регистрирующей среды является наличие всего двух прозрачных диэлектрических слоев. Увеличение  $N$ , повышение устойчивости к шумам, уменьшение толщины, а следовательно, оптических потерь в значительной степени связано с диапазоном управления локальными изменениями фазы, в частности  $\Delta l$ . Поглощение света в диэлектрических слоях приводит к ограничению амплитуды осцилляций  $|\Gamma|^2$ . Существенным фактором для реализации «вертикальной» записи является возможность вести запись даже при относительно больших флуктуациях  $n$  и  $d$ , так как вследствие периодичности  $|\Gamma|^2$  для устранения ошибок не требуется больших изменений  $\beta$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудаков И. Б., Штейнберг И. Ш., Щепеткин Ю. А. Метод многослойной оптической записи информации // Автометрия. 1991. № 3. С. 76.
2. Штейнберг И. Ш., Щепеткин Ю. А. Особенности 3-D оптической записи двоичной информации // Автометрия. 1993. № 3. С. 89.
3. Ребанс К. К., Ребане К. К. Фотовыжигание спектральных провалов // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1992. 56, № 5. С. 203.
4. Носов Ю. Р. Машинная память. М.: Знание, 1987.
5. Алимин Б. Ф., Торгованов В. А. Методы расчета поглотителей электромагнитных волн // Зарубеж. радиоэлектрон. 1976. № 3. С. 44.
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. С. 42.

Поступила в редакцию 16 августа 1995 г.