

УДК 681.327.68 : 621.373.826

И. Ш. Штейнберг, Ю. А. Щепеткин

(Новосибирск)

ОСОБЕННОСТИ 3-D ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ
ДВОИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены особенности применения различных объемных регистрирующих сред в системе многослойной оптической записи двоичной информации. Дана оценка влияния линейного поглощения на предельное число слоев. Предложены и проанализированы схемы записи, использующие двухфотонное поглощение.

Метод многослойной записи основан на объемной локализации интерференционной структуры «пита» при записи и гетеродинной фазочувствительной селекции этой структуры при считывании [1]. Способ 3-D оптической записи двоичной информации предъявляет к регистрирующей среде определенные требования. К ним относятся преимущественно фазовый характер модуляции, что связано с работой системы считывания в проходящем свете, и использование пороговых механизмов записи.

Запись, основанная на линейном поглощении. В традиционных системах записи оптической информации (побитовой, голографической) определяющим механизмом взаимодействия излучения с веществом (регистрирующей средой) является линейное однофотонное поглощение. Чувствительность среды определяется поглощенной в слое энергией, которая соизмерима с падающей и составляет $\approx 50\%$. В случае же многослойной записи линейное поглощение затрудняет проведение однородной по глубине записи.

Рассмотрим некоторые особенности поведения регистрирующей среды в устройстве многослойной записи. Пусть имеется толстая регистрирующая среда с общим пропусканием $1/e$, условно разделенная на N слоев толщиной d каждый. Коэффициент линейного поглощения среды K при этом связан с числом слоев $K = 1/(dN)$. Наличие такой связи приводит к необходимости поиска компромисса между чувствительностью слоя и общим числом слоев и, как следствие, к ограничению числа слоев записи. Энергия, поглощенная в слое с номером m , или эффективная чувствительность слоя, выразится следующей формулой:

$$E_m = \frac{I_0 T}{N} e^{-m/N}, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на среду; T — длительность экспозиции.

Видно, что чувствительность слоя падает в $N/e \div N$ раз в зависимости от номера слоя по сравнению с однослойным вариантом. Для $N = 100$ падение составляет 30—100, поэтому большинство известных материалов, кроме фотоэмульсии, оказываются непригодными.

Запись в выбранном слое происходит вследствие разной плотности мощности в слое и вне его. При диаметре пучка в перетяжке ≈ 2 мкм, расстоянии между слоями ≈ 10 мкм влияние фокусировки и интерференционного

усиления в области пересечения пучков приводит к превышению плотности мощности в выбранном слое более чем на порядок по сравнению с соседним. Однако при проведении записи на всей поверхности выбранного слоя общая энергия поглощения в нем и соседних слоях отличается незначительно:

$$E_m/E_{m+1} = e^{-1/N} \approx 1 - 1/N.$$

Следствием этого является увеличение в N раз требований к динамическому диапазону среды Δn . Для достижения дифракционной эффективности 1 %, достаточной для гетеродинного считывания, при толщине слоя 10 мкм щели, представляющие среды с пороговым механизмом записи. Пороговая характеристика может уменьшить требования к динамическому диапазону. Одной из возможных пороговых сред являются фрактальные кластеры металлов [2]. При облучении кластеров короткими импульсами света в области длинноволновой полосы поглощения возникают провалы в спектре поглощения. Выжигание провалов — эффект, нелинейный по плотности энергии импульса света. Минимальная плотность энергии, при которой наблюдается фотомодификация состава, составляет 10^{-2} Дж/см² при наносекундных экспозициях. Такая чувствительность связана с селективным испарением отдельных частей кластера, ответственных за поглощение в области спектрального провала.

Рассмотрим ряд регистрирующих сред, на которых проводились эксперименты по многослойной записи (считыванию) информации.

Галогенидосеребряная фотоэмульсия в настоящее время является единственным материалом, обладающим чувствительностью $\approx 10^{-4} + 10^{-5}$ Дж/см² при наносекундных экспозициях, динамическим диапазоном $\Delta n \approx 0,1$. При толщине эмульсии $\approx 50 + 100$ мкм можно записать информацию в 5—10 слоях. Однако обработка материала уже при таких толщинах является сложной задачей. Для обеспечения равномерного по глубине проявления использовались разбавленные проявители, работающие при низких температурах ($\approx 5^\circ\text{C}$). Полное время обработки составляло ≈ 3 ч. На эмульсии толщиной 50 мкм была проведена запись в трех слоях и достигнута ДЭ = 0,5 % при экспозиции $5 \cdot 10^{-4}$ Дж/см².

Увеличение толщины эмульсии приводит к резкому увеличению времени обработки и усложняет проведение равномерного полива. Поэтому толщина ≈ 100 мкм, по-видимому, является предельной.

Преодоление ряда принципиальных недостатков однородной фотоэмульсии может быть достигнуто путем создания светочувствительных систем с пористой структурой и жестким каркасом [3].

Среда представляет собой пористое стекло толщиной до 1 мм, внутри которого проведен синтез зерен галоидного серебра. Вследствие капиллярной структуры среды время обработки сокращается. Структура каркаса накладывает некоторые ограничения на размер светочувствительных зерен. В [3] получены зерна диаметром $\approx 15—20$ нм. Это приводит к получению образцов с высокой прозрачностью, но одновременно и к падению светочувствительности (0,1 Дж/см² при ДЭ ≈ 96 % и $d = 2$ мм). Модуляция показателя преломления $\Delta n \approx 5 \cdot 10^{-5}$, и на толщине 10 мкм ДЭ составляет всего 10^{-3} %, что в 1000 раз меньше требуемой.

Фотополимеры. Существенным преимуществом фотополимеров является отсутствие процесса «мокрой» обработки, самофиксация при записи, возмож-

ность значительного ($10 \div 60$ раз) светового усиления. В работе использовались образцы фотополимеров, разработанных в НИОХ СО РАН. Запись в фотополимере происходит вследствие большей скорости полимеризации мономера в максимумах интерференционной картины. В процессе освещения, а также после его окончания осуществляется диффузия мономера из мест с меньшей освещенностью, где его больше, в места с большей освещенностью, где вследствие полимеризации его концентрация уменьшается. Процесс диффузии приводит к росту дифракционной эффективности голограмм и к ее самофиксации. Значительный рост ДЭ и чувствительности происходит при световом усилении. При этом образец сначала освещают двумя интерферирующими пучками с экспозицией, значительно меньшей, чем требуется для получения максимальной ДЭ. Затем при освещении однородным пучком ДЭ значительно возрастает. Возможное объяснение этого эффекта приведено в [4]. Чувствительность материала в этом случае достигает 10^{-3} Дж/см². В установке многослойной записи такое усиление происходит при считывании бегущей решеткой и органично вписывается в процесс записи-считывания.

Фотополимер оказался удобным материалом, позволяющим производить считывание сразу после записи. Проведенные эксперименты показали ряд особенностей фотополимера в устройстве многослойной записи. Плотность мощности в области регистрации достигает 10^5 Вт/см², что значительно превышает уровень оптимальной плотности мощности $1 \div 100$ мВт/см² при записи на фотополимере. Вследствие этого ухудшается чувствительность и нарушается действие закона взаимозаместимости. Чувствительность при экспонировании последовательностью коротких (≈ 5 нс) импульсов света составляет 5 Дж/см² (ДЭ = 1 %, $d = 7$ мкм).

Второй особенностью является зависимость коэффициента поглощения среды от экспозиции. До экспозиции среда имеет высокую оптическую плотность и просветляется в процессе экспозиции. С одной стороны, этот процесс работает на самофиксацию, с другой — затрудняет экспонирование глубоких слоев. На фотополимере толщиной $80 \div 100$ мкм была проведена запись в семи слоях [1].

Т а б л и ц а 1

Регистрирующая среда	Постэкспозиционная обработка	Неразрушающее считывание	$\Delta l_{\text{пред}}$	Чувствительность одного слоя, Дж/см ² /%	Общая толщина, мкм
Галогенидо-серебряная фотоэмульсия	Проявление, фиксирование, отбеливание	+	0,1	$10^{-3}/1$	50—70
«Фокар-С»	То же	+	0,1	$10^{-1}/10^{-3}$	1000
Фотополимер (НИОХ СО РАН)	Световое усиление	+	10^{-2}	5/1	100
Халькогенидное стекло Ag_2S_3 $t_{\text{зап}} = 180^\circ\text{C}$	—	+*	10^{-2}	1000(1)/1**	500—1000
Ag_2S_5 $t_{\text{зап}} = 60^\circ\text{C}$	Термическое усиление	+*	10^{-2}	250(0,25)/1**	500—1000
Ниобат лития, легированный железом	—	—	$5 \cdot 10^{-3}$	300(1)/1**	500—1000

* При комнатной температуре.

** Падающая энергия; в скобках — поглощенная в одном слое.

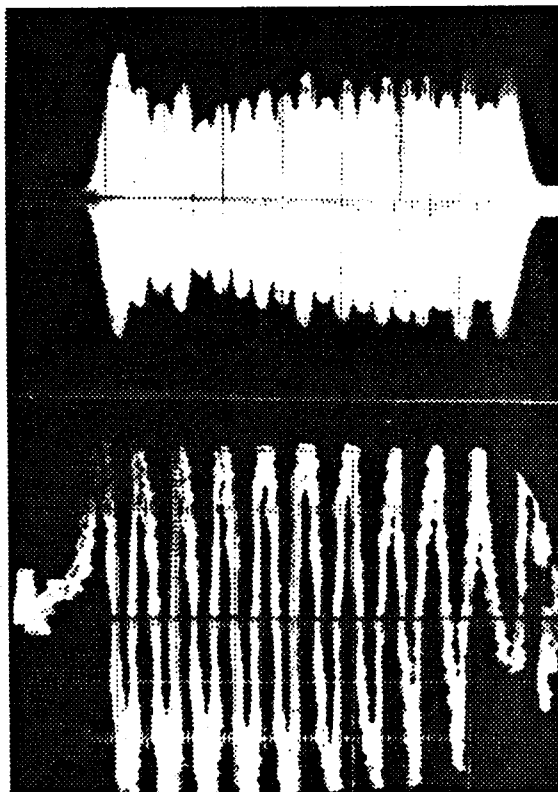


Рис. 1

Минимальная длительность экспонирования при $DЭ \approx 0,1\%$ составляла 10^{-2} с при общем числе световых импульсов ≈ 300 . Задача регистрации одного бита за $1 + 10$ импульсов и время ≤ 1 мкс на фотополимере пока не решена, хотя, как показали наши эксперименты, существуют возможности улучшения его характеристик. Например, путем вариации состава и введения добавок чувствительность фотополимера была повышена в несколько раз.

В табл. 1 приведены некоторые характеристики ряда регистрирующих сред, существенные для работы в устройстве многослойной записи.

В качестве иллюстрации возможностей системы многослойной записи на рис. 1 приведена зависимость амплитуды и фазы сигнала при записи 20 слоев в ниобате лития.

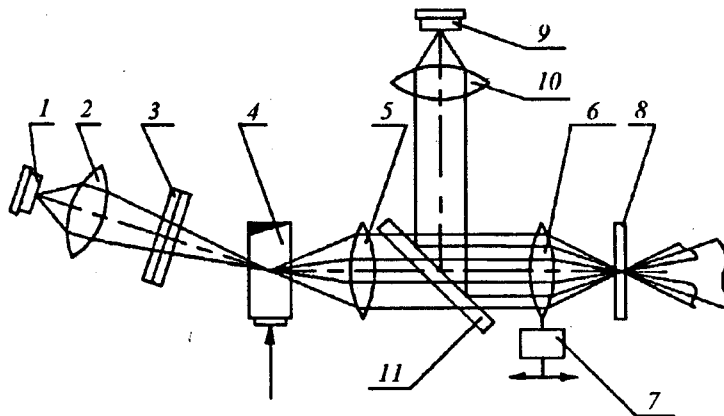


Рис. 2

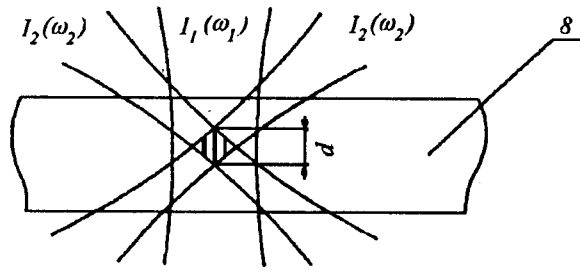


Рис. 3

Двухфотонная запись. Одним из возможных вариантов преодоления компромисса между чувствительностью слоя и общим числом слоев является использование двухфотонного поглощения. Возможная схема записи представлена на рис. 2. Луч света полупроводникового лазера 1 фокусируется с помощью объективов 2 и 3 в акустооптический модулятор 4. Световые пучки, полученные в результате дифракции, с помощью телескопической системы 5, 6 совмещаются в адресуемом слое объемной регистрирующей среды 8. Перемещающая зону пересечения световых пучков по глубине с помощью устройства 7, записывают информацию в других слоях. Дополнительный записывающий пучок $I_1(\omega_1)$ формируют с помощью полупроводникового лазера 9, объектива 10 и дихроичного зеркала 11. Сфокусированный дополнительный пучок совмещают с областью пересечения основных записывающих пучков $I_2(\omega_2)$ (рис. 3). Частоты ω_1 и ω_2 выбирают лежащими в области прозрачности регистрирующей среды, тогда как одновременное поглощение двух фотонов на частоте $\omega_{21} = \omega_1 + \omega_2$ приводит к фотоиндуцированному изменению. Схема энергетических уровней среды приведена на рис. 4, а. Два когерентных записывающих пучка $I_2(\omega_2)$ формируют в области пересечения интерференционную решетку, но так как ω_2 лежит в области прозрачности среды, то фотоиндуцированного изменения не происходит. В присутствии мощного пучка $I_1(\omega_1)$ возможно одновременное поглощение двух фотонов, по одному из записывающего и дополнительного пучков. Коэффициент поглощения излучения записывающих пучков $K_1(\omega_2)$ в случае выполнения условия $I_1(\omega_1) \gg I_2(\omega_2)$ определяется выражением [5]

$$K_1(\omega_2) \approx \omega_2 \gamma I_1(\omega_1), \quad (2)$$

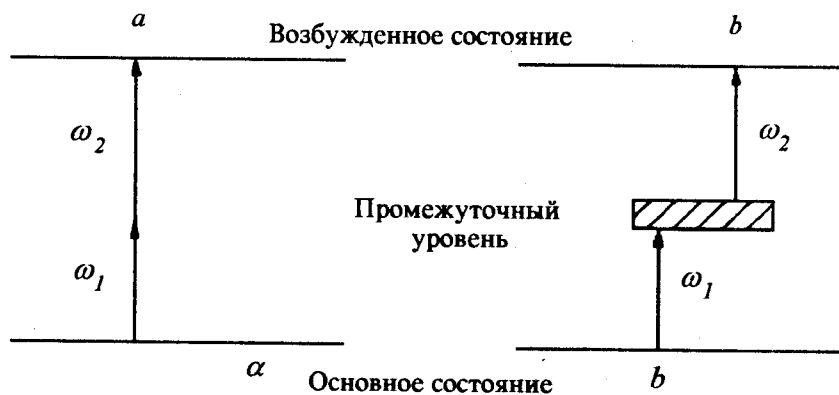


Рис. 4

где γ — коэффициенты двухфотонного поглощения.

Из (2) видно, что коэффициент поглощения записывающих пучков зависит от интенсивности дополнительного пучка и может быть установлен соответствующим выбором этой интенсивности. Таким образом, коэффициент поглощения излучения уже не связан с общим числом слоев и возможно проведение однородной записи во всем объеме. Вне области пересечения пучки распространяются без поглощения. Неразрушающее считывание производится при отключенном пучке $I_1(\omega_1)$.

В принципе, если записывающие пучки достаточно мощные и в среде возможно поглощение на частоте $\omega_{21} = \omega_1 + \omega_2 = 2\omega_2$, то можно отказаться от дополнительного пучка. Запись также будет происходить в область пересечения пучков, где плотность мощности на порядок выше, чем в соседних слоях.

Считывание в этом случае можно производить при пониженной интенсивности считывающих пучков, пользуясь квадратичной зависимостью поглощенного света от интенсивности.

Таким образом, использование двухфотонного поглощения позволяет решить основные проблемы многослойной записи: однородную запись в объеме и неразрушающее считывание на длине волны записи. Однако коэффициент двухфотонного поглощения в большинстве сред мал и начинает играть роль при плотности мощности $\approx 10^7 + 10^8$ Вт/см².

Впервые двухфотонная запись голограмм была осуществлена на ниобате и танталате лития [6—8]. Запись проводилась мощными импульсами второй гармоники Nd-лазера. Интенсивность достигала 100—500 МВт/см². Кроме того, для записи голограммы площадью $1 + 10$ мм² требуется энергия ≈ 1 Дж. В устройстве многослойной записи площадь голограммы $\approx 2—3$ мкм² и требования на энергию и мощность лазера резко снижаются.

Так, для достижения интенсивности в зоне записи 100 МВт/см² требуется лазерный импульс мощностью 5 Вт.

Рассмотрим требования на величину коэффициента двухфотонного поглощения $\beta = \omega\gamma$, обеспечивающего хотя бы 10 % поглощения в слое толщиной 10 мкм. Из (2) следует:

$$K_1 d = \beta I_1(\omega_1) d = 0,1. \quad (3)$$

При использовании полупроводникового лазера ИЛПН-108 максимальная мощность в импульсе длительностью ≈ 5 нс составляет 2 Вт, что обеспечивает плотность мощности $4 \cdot 10^7$ Вт/см².

Отсюда из (3) $\beta = 2,5 \cdot 10^{-6}$ см/Вт. Для примера $\beta(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}) \approx 1,7 \cdot 10^{-6}$ см/Вт [9], $\beta(\text{LiNbO}_3) \approx 5 \cdot 10^{-9}$ см/Вт [6]. Таким образом, для обеспечения даже 10 % поглощения нужно либо повышать плотность мощности, либо искать материалы с большими коэффициентами двухфотонного поглощения.

Снижение требуемой плотности мощности можно достичь, используя двухступенчатое возбуждение через реальный промежуточный уровень (рис. 4, б).

Дополнительный пучок $I_1(\omega_1)$ производит заселение промежуточного уровня и приводит к очувствлению среды на частоте ω_2 . Коэффициент поглощения на частоте ω_2 дается выражением

$$K_2 = N_0 \sigma \sigma^* \tau I_1(\omega_1) / (h\omega_1), \quad (4)$$

где N_0 — концентрация фоточувствительных центров; σ, σ^* — сечения поглощения излучения из основного и возбужденного состояний соответственно; τ — время жизни промежуточного состояния.

Коэффициент поглощения в (4) зависит от произведения τI_1 , и при подборе соответствующих τ интенсивность $I_1(\omega_1)$ может быть значительно понижена.

Способ	Преимущества	Недостатки
Двухфотонная запись двумя пучками $\omega_{21} = 2\omega_2$	Простота схемы	Требование высокой плотности мощности Считывание при пониженном уровне мощности
Двухфотонная запись тремя пучками $\omega_{21} = \omega_1 + \omega_2$	Более широкий набор регистрирующих сред Неразрушающее считывание Высокая плотность мощности только в дополнительном пучке	Требование совмещения пучков микронных размеров от разных источников в области записи
Двухступенчатая запись	Пониженная плотность мощности дополнительного пучка Неразрушающее считывание	Требование совмещения пучков Наличие линейного поглощения дополнительного пучка

Так, в [8] интенсивность была снижена в 50 раз по сравнению с [6] и составила 10 МВт/см² при сравнимой энергетической чувствительности.

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики трех вариантов, использующих двухфотонную запись.

Так же как и в случае записи, основанной на нелинейном поглощении, для повышения чувствительности двухфотонных материалов желательнее использовать механизмы термического, химического и светового усиления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудаков И. Б., Штейнберг И. Ш., Щепеткин Ю. А. Метод многослойной оптической записи информации // Автометрия.—1991.—№ 3.
2. Карпов С. В., Попов А. К., Раутман С. Г. и др. Обнаружение фотомодификации кластеров серебра, селективной по длине волны и поляризации // Письма в ЖЭТФ.—1988.—48, вып. 10.
3. Суханов В. И., Хазова М. В. и др. Объемные фазовые голограммы в светочувствительных системах с капиллярной структурой // Оптическая голография с записью в трехмерных средах.—Л.: Наука, 1989.
4. Dossadin V. I., Kiryushin Yu. I., Pen E. F. et al. Optical amplification in photopolymer material // Techn. Digest: ICO Topical Meeting on Optical Computing.—Minsk, Republic of Belarus, 1992.
5. Шен И. Р. Принципы нелинейной оптики.—М.: Наука, 1989.
6. Linde D. von der, Glass A. M., Rodgers K. F. Multiphoton photorefractive processes for optical storage in LiNbO₃ // Appl. Phys. Lett.—1974.—25, N 3.—P. 155.
7. Linde D. von der, Glass A. M., Rodgers K. F. High-sensitivity optical recording in KTN by two-photon absorption // Appl. Phys. Lett.—1975.—26, N 1.—P. 22.
8. Vormann H., Kratzig E. Two-step excitation in LiTaO₃—Fe for optical data storage // Solid State Communs.—1984.—49, N 9.—P. 843.
9. Бородин М. С., Дмитренко К. А., Резниченко В. Я. Двухфотонное поглощение смешанных кристаллов CdS_xSe_{1-x} на частоте рубинового лазера // ФТТ.—1971.—13, вып. 6.

Поступила в редакцию 5 апреля 1993 г.