

НОВЫЕ МЕТОДЫ КОММУТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

Рассмотрены методы коммутации оптических информационных каналов, использующие в качестве основного элемента обновляемую голографическую решетку. С этой целью предложено использовать нестационарные голограммы, записанные на триплет-возбужденных молекулах органических соединений. Анализируются возможности лазерного управления выходными параметрами таких голограмм, а также запись решеток на синглетных возбужденных молекулах и эффекты пространственно-временной динамики нестационарных носителей.

Разработка новых опто- и акустоэлектронных систем отнесена в настоящее время к приоритетным направлениям науки и техники. Это связано с той важной ролью, которую играют оптоэлектронные датчики и устройства в системах автоматического управления, коммуникации, а также записи и переработки информации. По мере роста требований к чувствительности и быстродействию систем управления возникает необходимость в создании эффективных средств оптической коммутации широкополосных сигналов. В ряде работ [1-2] предложено эффективное решение проблемы на основе программируемой матрицы голограмм на реверсивном фотоносителе. Для изменения закона соединений использованные голограммы стираются, а на их место записываются новые. В [1] с этой целью использовался фоторефрактивный кристалл LiNbO_3 , сопряженный с пространственным модулятором света на основе жидкокристаллического ферроэлектрика. Пространственно-неоднородное распределение фотогенерированных носителей заряда в кристалле соответствует промодулированному освещению образца (интерференционное поле) и влечет за собой периодические вариации его показателя преломления, вследствие линейного электрооптического эффекта. Таким образом, происходит запись объемной фазовой голограммы на фоторефрактивном носителе LiNbO_3 . Для записи решеток в [1] использовался аргоновый лазер с длиной волны генерируемого излучения $\lambda = 514,5$ нм. Дифракция референтного пучка на решетке приводит к образованию оптического канала связи между устройствами хранения и/или обработки информации. При этом лимитирующим фактором является пространственный модулятор света, характеристики быстродействия которого определяются его полосой частот. Однако, как отмечалось в [2], фоторефрактивные кристаллы не обеспечивают нужной оперативности перепрограммирования и имеют низкую стабильность характеристик.

Для увеличения скорости перепрограммирования в работах А. Л. Микаэляна с сотрудниками предложено использовать динамические голограммы, стираемые считываемым светом и периодически регенерируемые путем повторения записи. При таком подходе не требуется отдельной операции стирания, а параметры обновляемых решеток могут быть изменены или оставаться прежними.

В работе [2] для реализации перепрограммируемой матрицы голограмм в качестве носителя использовался фотосенсибилизированный бактериородопсин в желатине. Был создан действующий макет коммутатора, с матрицей из 20 программируемых голограмм. Для их записи использовался непрерывный He-Ne-лазер, а в качестве дефлекторов лазерных пучков – акустооптические ячейки. Изменением частоты управляющего сигнала одного дефлектора осуществлялось перемещение записываемой голограммы по матрице, а другого – вариация периода решетки. Выполненные авторами оценки потенциальных характеристик голографического коммутатора при использовании двухкоординатных акустооптических дефлекторов дают для емкости устройства величину $10^4 \times 10^4$ каналов. При этом время программирования одной связи не превышает 10 мкс.

Проводимые нами в течение ряда лет исследования кинетических характеристик [3-9] записи и релаксации нестационарных голограмм, регистрируемых в системах триплет-возбужденных фотохромных центров, показали, что в качестве динамического носителя могут быть использованы полимерные пленки, допированные органическими красителями с триплетным фотохромизмом. В этом случае время существования голографической решетки определяется временем жизни триплетного (T) состояния молекул фотохромного вещества. В отличие от схемы А. Л. Микаэляна при использовании нестационарного носителя стадия стирания голограммы не совпадает со стадией считывания, а попросту отсутствует. Разнообразие спектрофотометрических свойств органических

красителей и кинетических характеристик их электронно-возбужденных состояний позволяет сделать остронаправленный выбор пигмента, наиболее подходящего по набору параметров.

В работах [3-9] исследовались эффекты нелинейности при записи и распаде голографических решеток для различных уровней интенсивности излучения (эффекты насыщения и взаимодействия фотохромных центров), а также в условиях случайно-неоднородного размещения молекул пигмента в матрице. Было проведено детальное изучение кинетики релаксации наведенных Т-решеток в ходе парной аннигиляции Т-центров. Был обнаружен эффект скачкообразного уменьшения населенности триплетных состояний фотохромного вещества при воздействии на систему мощным импульсом рубинового лазера. Применительно к нестационарной триплетной голограмме это приводит к резкому снижению ее дифракционной эффективности, что может рассматриваться как оптическое стирание голограммы. Таким образом, нестационарные – «самостирающиеся» – решетки допускают в случае необходимости управление временными рабочими параметрами на основе внешнего светового воздействия на систему.

Закон релаксации плотности триплетных центров n_T , определяющих распределенные характеристики пропускания амплитудной решетки, имеет вид:

$$n_T(x, t) = n_0 [1 + \cos(Kx) \exp(-K^2 D t)] \exp(-t / \tau_T). \quad (1)$$

В этом выражении n_0 – концентрация возбужденных молекул в области максимума освещенности; $K = 2\pi / \Lambda$ – пространственная частота решетки с периодом Λ ; D – коэффициент диффузии триплетных центров в матрице; τ_T – время жизни триплетного возбуждения. Формула (1) не учитывает взаимодействия Т-центров между собой, которое может оказаться существенным при высокой плотности возбуждений. В отсутствие миграции фотохромных молекул, а также при подавленных процессах межцентровой передачи энергии электронного возбуждения (полная локализация) коэффициент диффузии D равен нулю. Тогда кинетика спада дифракционной эффективности голограммы становится моноэкспоненциальной и определяется лишь собственным временем жизни Т-центров τ_T . Если требуется ускоренное самостирание транспаранта с фиксированным временем жизни τ_T фотохромного компонента, для этой цели можно использовать жидкофазный маловязкий носитель с требуемой величиной коэффициента диффузии D фотоактивных молекул.

Для разработки быстродействующего коммутатора информационных каналов предлагается использовать следующую систему перепрограммируемых голограмм на динамическом носителе. В качестве матрицы выбирается полимерная среда в виде пленки необходимой толщины. Планируется использовать как кислородонепроницаемые макромолекулярные системы (типа поливинилового спирта), так и насыщенные молекулами O_2 полимеры (типа поливинилбутираля). В последнем случае, поддерживая в оптической ячейке необходимое давление воздуха, можно изменить время жизни Т-состояний фотохрома (красители ксантенового (эозин, эритрозин) или метиленового ряда) от 10^3 мкс до 1 мкс. Запись голограммы может быть осуществлена излучением IAG:Nd³⁺-лазера на удвоенной частоте генерируемого излучения ($\lambda = 532$ нм), либо излучением He-Ne-лазера с акустооптическим модулятором. Дифрагировавший на решетке луч, с помощью которого передается информация на входной канал, может генерироваться полупроводниковым лазером или другим подходящим излучателем. Запись голограммы с одним пространственным периодом Λ_1 и перезапись ее с другим периодом Λ_2 позволяет направлять дифрагированный на решетке луч в тот или иной канал сопряженного устройства (соответственно углы отклонения α_1 и α_2). Перезапись голограммы может осуществляться либо по окончании естественного распада со временем τ_T , либо после предварительного оптического стирания лазерным излучением (скачкообразное уменьшение дифракционной эффективности). С этой целью решетка подвергается облучению импульсом рубинового лазера, который индуцирует процессы триплет-триплетного поглощения энергии излучения фотохромными центрами с необратимым опустошением населенности n_T активных молекул.

Кроме записи голограмм на основе триплетного фотохромизма возможна динамическая запись тепловых фазовых решеток. Как уже отмечалось, фоторефрактивный эффект, т. е. зависимость показателя преломления среды от интенсивности света, положен в основу регистрации фазовых голограмм. Неоднородный локальный разогрев участков матрицы, связанный с модуляцией освещенности в интерференционной картине, приводит к соответствующей пространственной модуляции показателя преломления носителя. В таком случае механизм оптической регистрации является более универсальным, и он может быть реализован в матрицах различного физико-химического состава. Скорость ре-

лаксации тепловой решетки определяется коэффициентом температуропроводности a^2 матрицы, который может значительно различаться для разных систем. Закон распада фазовой тепловой решетки будет определяться кинетикой релаксации температурного поля $T(x, t)$, сформированного в матрице в результате импульсного освещения ее интерференционным потоком:

$$T(x, t) = T_0 \left[1 + \cos(Kx) \exp(-K^2 a^2 t) \right]. \quad (2)$$

Для периода $\Lambda \sim 20$ мкм получаем для времени температурной релаксации значение $\tau \sim \Lambda^2 / a^2 \sim 1$ мс, при $a^2 \sim 10^{-3} \text{ см}^2 / \text{с}$. Тот же порядок величины имеет время релаксации амплитудной решетки на триплет-возбужденных центрах. Дифракционная эффективность тепловой фазовой решетки определяется производной показателя преломления полимера по температуре dn / dT . Типичные значения этой величины для полимеров составляют $10^{-5} - 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.

При записи динамической голограммы в регистрирующей среде отсутствуют процессы, носящие необратимый характер. В этом смысле нестационарная решетка коммутатора, выполняющая функцию дефлектора луча, аналогична зарядовым структурам, возникающим в элементах «обычной» электроники, – после отключения устройства структуры разрушаются и система приходит в равновесное состояние.

Для реализации циклов «запись – самопроизвольное стирание» с периодом наносекундной длительности возможно использование синглет-возбужденных (S) состояний фотохромных центров. При этом считывание концентрационных решеток, образованных из S_1 – центров, производится на частоте из полосы синглет-синглетного поглощения хромофора: $S_0 \rightarrow S_1$ или $S_1 \rightarrow S_n$. Интенсивность лазерного излучения, используемого для такой записи, должна быть порядка интенсивности насыщения – в целях сравнимости по величине населенностей $n(S_1)$ и $n(S_0)$. Формирование решетки из возбужденных S-центров и ее релаксация происходят в специфических условиях динамики пространственного распределения населенностей трехуровневых систем при некогерентном насыщении поглощения [10]. Протяженный профиль активированных молекул возникает при фотовозбуждении оптически толстых слоев даже при статистически однородном размещении фотохромных примесных центров. При интенсивной накачке имеет место «просветление» образца, связанное с некогерентным насыщением линии поглощения. Решение уравнений Жира – Комбо, описывающих абсорбцию двухуровневых

атомов, обобщенных на случай наличия в системе дополнительного метастабильного уровня (Т-уровня), приводит к нетривиальной динамике пространственного распределения населенностей $n(S_1)$: с течением времени происходит перемещение максимума $n(S_1)$ вглубь образца [10].

Пространственно-временное распределение молекул в Т-состоянии «отслеживает» пространственно-временную динамику $n(S_1)$ в масштабе времен релаксации S_1 -состояний. Отмеченные особенности проявятся при записи наносекундных синглетных решеток и будут определять характеристики дифрагированного луча в качестве информационного канала.

При записи динамической голограммы в дисперсной среде с триплетными (Т) фотохромными центрами происходит подавление флуктуаций чисел заполнения микрополостей матрицы и, тем самым, амплитудного пропускания динамической решетки, если Т-возбуждения в порах активно аннигилируют [8-9]. При статическом самотушении возбужденных молекул величина эффекта может достигать 70%, в то время как средняя концентрация фотохромных центров в системе уменьшается лишь на 40%. В случае миграционно-ускоренной реакции аннигиляции подавление концентрационных флуктуаций становится еще более значительным. Эффект сжатия флуктуаций может быть усилен извне при воздействии на систему дополнительным световым импульсом, инициирующим аннигиляцию Т-центров. В перспективе данное явление может использоваться как регулирующий фактор выходных параметров динамических голограмм.

Выравнивание текущей концентрации возбужденных фотохромных центров в микрополости важно по той причине, что даже если характерный радиус области их локализации в поре значительно меньше периода Λ интерференционной картины, созданной при записи голограммы, на стадии восстановления изображения будут возникать шумы. Их появление связано с флуктуациями чисел заполнения микропор оптически активными молекулами.

Вывод

Используемые для записи голограмм реверсивные фотоносители в виде фототермопластов, фоторефрактивных кристаллов и других подобных систем не обеспечивают нужной оперативности перепрограммирования и имеют низкую стабильность характеристик во времени [2]. При разработке оптического коммутатора информационных ка-

налов перспективным является использование фотохромизма триплет-возбужденных молекул органических соединений для записи *нестационарных амплитудных голограмм, а также фазовых голограмм* на основе фототермических решеток. Такой подход обеспечивает самопроизвольный рас-

пад решетки (без оптического стирания) за время от $1 \sum 10^3$ мкс, а обеднение населенности T-состояний в результате воздействия на систему лазерным импульсом в полосе T-T-поглощения пигмента позволит осуществить оптическое стирание триплетной голограммы за время $\tau \approx 10$ нс.

Список использованной литературы:

1. *Maniloff E. S., Johnson K. M.* Dynamic holographic interconnects using static holograms // *Optical Engineering*. 1990. V. 29. #3. P. 225-229.
2. *Микаэлян А. Л., Никанорова Е. А., Салахутдинов В. К.* Динамика дифракционной эффективности периодически регенерируемых голограмм в бактериородопсине // *Квантовая электроника*. 1994. Т. 21. №8. С. 781-784.
3. *Kucherenko M. G., Ketsle G. A., Ketsle E. G.* Application holography to measuring static annihilation of excited centers // *Proc. SPIE Nonlinear Spectroscopy and Ultrafast Phenomena*. Eds.: V. V. Shuvalov, A. M. Zheltikov. 1996, V. 2797, P. 63-68.
4. *Kucherenko M. G.* Relaxation of holographic record in the system with annihilating centers // *Proc. SPIE Holographic and Diffractive Techniques*. Ed.: G. J. Dausmann. 1996, V. 2951, P. 80-90.
5. *Kucherenko M. G.* Relaxation of holographic record in the system with annihilating centers // *Applications in Photonic Technology 2*. Plenum Publishing Corpor. 1997. P. 157-165.
6. *Kucherenko M. G.* Holographic recording in the system with annihilating centers. Relaxation & suppression of the transmission fluctuations of transient gratings // in *Optical Recording Mechanisms and Media*. Ed.: Andrey L. Mikaelian, *Proc. SPIE Optical Information Science and Technology (OIST'97)*. 1998, V. 3347, P. 302-313.
7. *Кучеренко М. Г., Кецле Г. А.* Дифракция света на решетке из аннигилирующих возбужденных центров // *Опт. и спектр*. 1998, Т. 85, №2, С. 265-272.
8. *Кучеренко М. Г.* Подавление флуктуаций пропускания динамических решеток при аннигиляции возбужденных фотохромных центров // *Опт. и спектр*. 1998, Т. 85, №1, С. 130-136.
9. *Кучеренко М. Г.* Голографическая запись в системе аннигилирующих центров. Релаксация и подавление флуктуаций пропускания динамических решеток // *Журнал научной и прикладной фотографии*. М.: Наука. 1998. – Т. 43. – №5. – С. 66-78.
10. *Кучеренко М. Г.* Динамика пространственного распределения возбужденных трехуровневых центров при некогерентном насыщении поглощения. Тез. докл. Международ. конфер. «Оптика полупроводников». Ульяновск, УГУ, 1998, 2 с.