

На правах рукописи

Салахутдинов Виктор Камильевич

**Исследование и разработка оптического коммутатора на
основе матрицы динамически перепрограммируемых
голограмм**

Специальность 01.04.05 - «Оптика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007 год

Работа выполнена в Научно исследовательском институте системных исследований РАН

Научный руководитель: академик А.Л. Микаэлян

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор С.В. Карпеев,
Институт систем обработки изображений РАН;

кандидат физико-математических наук В.И. Никонов,
Самарский государственный университет.

Ведущая организация:

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

Защита состоится 26 октября 2007 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.215.01 в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета

Автореферат разослан 20 сентября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор

Шахов В.Г

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

В современных условиях само понятие технического прогресса неразрывно связано со стремительным развитием телекоммуникационных и информационных технологий. Считается, что уже сегодня, за счет применения технологий спектрального уплотнения, магистральные транспортные сети способны обеспечить пропускную способность, достаточную для обеспечения трафика практически любых сетевых приложений. В частности, принципиально новых сетевых решений, служб и сегментов информационных услуг и технологий на базе мультимедийных приложений реального времени. Считается, что социально-экономические последствия реализации таких служб и услуг на глобальном уровне могут оказаться сравнимыми с эффектом от появления всемирной паутины WWW. Тем не менее, указанные услуги практически не реализованы в требуемом объеме ни в одной стране.

Проблема в том, что реализация указанных служб и услуг требует не просто многократного увеличения пропускной способности существующих коммутируемых абонентских линий, но также предоставления по ним доступа с высоким «гарантированным уровнем качества».

Наиболее сложным сегментом этой проблемы является так называемая «проблема последней мили», экономически эффективное решение которой требует коммутации десятков тысяч высокоскоростных абонентских линий только на районном уровне.

Признано, что наиболее перспективным путем решения этой проблемы является применение методов и средств оптической коммутации каналов, разработка которых отнесена последними решениями международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (ССИТТ) к числу важнейших задач.

Цель работы

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование физических принципов и эффектов, на базе которых может быть реализована независимая и неблокируемая оптическая коммутация большого числа высокоскоростных каналов передачи информации.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработан новый метод оптической коммутации, основанный на применении в качестве переключающих элементов динамических, периодически регенерируемых микроголограмм.
2. Разработана и исследована элементная база для реализации нового метода. Показано, что для регистрации коммутирующих голограмм может быть применен динамический фотоноситель на основе бактериородопсина.

3. Разработана архитектура оптического коммутатора, реализующая новый метод и обеспечивающая возможность создание оптического коммутатора с требуемыми параметрами.
4. Разработан, реализован и исследован макет оптического коммутатора с указанной архитектурой.
5. На базе полученных экспериментальных данных показано, что разработанный метод и средства открывают возможность реализации неблокируемой оптической коммутации порядка 10 тыс. каналов с суммарной производительностью порядка 10 Тбит/с.

Научная новизна

1. Предложен метод пространственной коммутации оптических каналов, основанный на перепрограммировании матрицы регенерируемых динамических голограмм.
2. На примере бактериородопсина исследованы условия импульсной записи голограмм на динамический фотоноситель и непрерывного их считывания. Показано, что путем периодической импульсной регенерации записи дифракционную эффективность голограммы на динамическом фотоносителе можно поддерживать на постоянном уровне.
3. Показано, что фоточувствительность и дифракционная эффективность носителя на основе бактериородопсина зависит от скорости записи.
4. Показано, что динамика фотостимулированного изменения показателя преломления бактериородопсина совпадает с динамикой его интермедиаты M_{412} .

Практическая значимость

Полученные в диссертационной работе результаты представляют интерес для разработки высокоскоростных сетей передачи данных и систем перепрограммируемых оптических связей.

Самостоятельный практический интерес представляют:

- результаты по улучшению оптического качества динамических фотоносителей на основе бактериородопсина.
- новый метод регистрации и регенерации динамических голограмм.
- новый метод увеличения разрешающей способности системы оптической адресации.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на Всесоюзной конференции "Проблемы Оптической памяти" (г. Ереван, Армения, 1990), Всесоюзной конференции "Оптическая коммутация и сети связи" г.Суздаль, 1990, Int. Conf. "Optical Memory and Neurel Networks", Zvenigorod, Russia, 1991, Int. Conf. Current Developments in Optical Design and Optical Engineering II, San

Diego, Calif. USA, 1992., Int. Conf. Optical Applied Science and Eng., San Diego, Calif. USA, 1992, Int. Meeting Photonic Switching PS'92", Minsk, Belarussia, 1992, Int. Conf. HOLOGRAPHIC SYSTEMS, COMPONENTS and APPLICATIONS, Neuchatel, Switzerland, 1993, Int. Conf. on Optical Information Processing, St. Petersburg, Russia, 1993, Int. Simp. Optics Q'uebec'93, Q'uebec, Can., 1993, Int. Symp. OPTOELECTRONICS for INFORMATION and MICROWAVE SYSTEMS, Las Angeles, Calif., USA, 1994, Int. Conf. "OM&NN'94", Moscow, Russia, 1994), Int. Symp. "Materials and Instrument Design, San Diego, Calif. USA, 1995, и опубликованы в 23 работах.

Положения, выносимые на защиту

1. Динамически регенерируемая голограмма в бактериородопсине может быть использована в качестве многопозиционного оптического пространственного переключателя.
2. При записи на бактериородопсин светом с длиной волны более 550 нм чувствительность и динамический диапазон фотоносителя зависит от времени записи.
3. В динамическом фотохромном голографическом носителе существует режим импульсной записи и регенерации голограммы, при котором дифракционная эффективность непрерывно считываемой голограммы не зависит от времени релаксации записи в носителе и сохраняет во времени практически постоянное значение.
4. Запись голограммы на метастабильную форму бактериородопсина позволяет более чем в два раза увеличить скорость регистрации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержание диссертации изложено на 121 странице машинописного текста и иллюстрировано 76 рисунками. Список литературы включает 104. наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, перечислены основные полученные результаты с указанием их практической значимости.

Первая глава посвящена разработке концепции оптической коммутации большого числа высокоскоростных каналов.

Разделы 1.1-1.2 являются обзорными и посвящены анализу методов и средств оптической коммутации каналов. Кратко рассмотрены различные архитектурные решения и элементная база для их реализации. Сформулированы общие требования к перспективной системе оптической

коммутации, согласно которым она должна иметь абонентскую емкость $N \times M$, где N – число входных каналов коммутатора, M – число выходных каналов, сравнимую с емкостью существующих телефонных станций ($\sim 10^4 \times 10^4$). При этом пропускная способность по каждому коммутируемому каналу должна составлять порядка 0.2-1 Гбит/с, что соответствует общей производительности ~ 10 Тбит/с.

Получены количественные оценки, согласно которым решение поставленных задач принципиально не может базироваться на методах временной коммутации (OTDM) ввиду нереализуемости ее средств управления. К числу бесперспективных также отнесены все решения, требующие прокладки миллионов внутрисистемных волоконнооптических или световодных линий связи, т.е. решения на базе интегральной оптики, связанных световодах, 2D и 3D фотонных кристаллах, светоиндуцированном резонансном поглощении и т.п.

В качестве наиболее перспективной выделена 3D-архитектура пространственного коммутатора каналов.

В этом случае свет каждого из N входных каналов проецируется в виде узкого пучка на отдельный многопозиционный пространственный оптический переключатель. Под действием управляющего сигнала пространственный оптический переключатель отклоняет световой пучок входного канала в требуемый выходной канал. Таким образом, применением матрицы из N переключателей с разрешающей способностью в M независимых положений обеспечивается независимая и неблокируемая коммутация $N \times M$.

При этом отмечается, что существующие технологии не позволяют известными методами и средствами реализовать на базе указанной архитектуры систему с требуемыми характеристиками, в частности, матрицу оптических переключателей с необходимым количеством элементов и требуемым разрешением.

В разделе 1.3 предложен новый метод решения этой задачи. Суть этого метода состоит в использовании многопозиционных оптических переключателей в виде динамических перепрограммируемых голограмм с временем хранения записи, много меньшим требуемого времени соединения между коммутируемыми каналами. При этом непрерывность и произвольную продолжительность соединения предлагается достигнуть периодической, многократной перезаписью (регенерацией) динамической голограммы, а разрыв соединения реализовать за счет самопроизвольного стирания голограммы при прекращении регенерации. В этом случае требуемая емкость коммутатора достигается последовательной записью и регенерацией на одном носителе матрицы из N независимых динамических голограмм.

В качестве основного достоинства предложенного метода отмечается возможность применения в качестве среды для записи динамических

коммутирующих голограмм реально существующих фотохромных материалов с практически неограниченной реверсивностью.

Вторая глава посвящена исследованиям принципов оптической коммутации с помощью матрицы динамических голограмм. С этой целью в самом общем виде описаны оптические свойства фотохромной среды при записи и считывании. Показано, что основной вклад в оптическую запись на динамическом фотохромном материале представляет собой пространственное распределение стабильной и метастабильной формы. При этом считывание сопровождается ускоренным стиранием записи, протекает с достаточно сложной динамикой, которая может включать, в частности, самосогласованные процессы.

В 2.1 отмечается, что из всего многообразия динамических фотохромных материалов особо перспективными представляются фотохромные органические среды биологического происхождения, такие как хлорофилл-белковые и ретиналь-белковые комплексы, в обратимых фотоиндуцированных изменениях оптических характеристик которых свет выполняет роль спускового механизма, а все существенные изменения оптических характеристик (спектра поглощения, показателя преломления, оптической активности и т.д.) происходят в результате последующих темновых конформационных изменений структуры молекулы. За счет этого фотохромы биологического происхождения имеют принципиально более высокую фоточувствительность ко всем параметрам светового излучения, включая поляризацию, большую реверсивность и величину фазовой компоненты записи. Кроме того, ряд биологических фотохромов, например бактериородопсин, имеет большое число светоиндуцированных переходов между интермедиатами, которые сильно отличаются по времени жизни и спектру поглощения. За счет этого, выбором того или иного перехода в качестве рабочего, можно гибко изменять временной масштаб элементарных информационных процессов, а одновременное использование нескольких рабочих переходов дает дополнительные степени свободы для управления процессами записи-считывания голограмм.

Раздел 2.1.1. посвящен анализу возможности использования бактериородопсина в качестве среды для записи коммутирующих голограмм. С этой целью исследована динамика взаимосвязанного изменения светового поля в условиях неразделимости во времени процессов экспонирования, формирования пространственно-временной структуры записи и ее разрушающего считывания. Использован метод связанных волн, обобщенный на случай переменной составляющей диэлектрической проницаемости ($\tilde{\epsilon}$)

вида:
$$\tilde{\epsilon}(x, y) = 2^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} [\epsilon_n^+(x) \exp(in\vec{K}\vec{r}) + \epsilon_n^-(x) \exp(-in\vec{K}\vec{r})].$$
 Где: $\epsilon = \sum_i C_i \epsilon_i$, C_i

- доля i -той формы в общем количестве структурных единиц, так что $\sum C_i = 1$, ε_i - диэлектрическая проницаемость i -формы. Показано, что в случае фазового синхронизма выражение для дифракционной эффективности

ξ динамической голограммы имеет вид: $\xi = \frac{\omega^4 |\varepsilon_m|^2 L^2}{16c^4 k_{I\bar{x}} k_{d\bar{x}}}$. Индексы «П» и «d»

соответствуют падающей и дифрагированной волнам, \bar{K} - волновые векторы волн, L толщина среды, c и ω - скорость и угловая частота световой волны. При этом динамика диэлектрической проницаемости описывается линейными кинетическими уравнениями для C_i вида $\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\sum_j S_{ij} C_j$.

На рис. 1а представлено изменение во времени приведенной дифракционной эффективности (ξ/ξ_{\max}) для первой гармоники записи ($m=1$), при разных значениях параметра $v = p\bar{I}\tau$ (\bar{I} - интенсивность записывающих волн, τ - характерное время темновой релаксации М-формы, p - фоточувствительность) и при 100% контрасте регистрируемой интерференционной картины

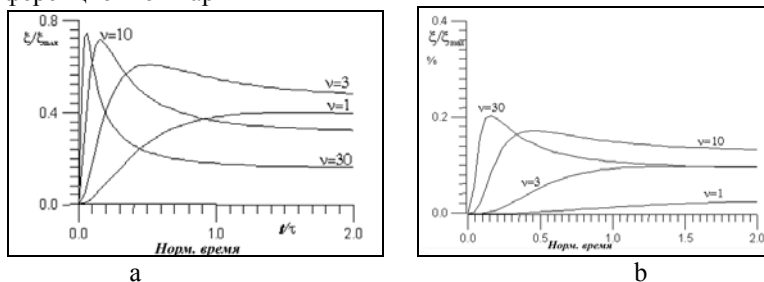


Рис. 1

На рис. 1b представлены те же кривые, но для $m=2$. Видно, что дифракционная эффективность голограммы нелинейно зависит от энергии считывания. При этом при $v = p\bar{I}\tau \gg 1$ преобладает процесс релаксации, а $v \approx 1$ - соответствует практически линейному режиму записи.

Показано, что даже при 100% контрасте регистрируемой интерференционной картины, в случае $pI\tau \ll 1$ преобладает процесс фотоиндуцированного перехода из стабильной (Br_{570}) в метастабильную (M_{412}) форму бактериородопсина, в результате которого за время порядка нескольких $\tau_a = S_a^{-1}$, в среде возникает режим насыщения. Что также приводит к росту нелинейности записи и быстрому снижению дифракционной эффективности.

Таким образом, для получения дифракционной эффективности в представляющем практический интерес случае $v \gg 1$, когда время записи

голограммы существенно меньше времени хранения информации, в качестве рабочих состояний следует использовать спектрально разнесенные интермедиаты $\mathbf{Br}_{570} \leftrightarrow \mathbf{M}_{412}$, а экспозицию записи выбирать в зависимости от интенсивности считывающего света. Причем, как видно из характера зависимостей на рис.3а, б, довольно точно.

Также показано, что уменьшение контраста регистрируемой интерференционной картины приводит к снижению дифракционной эффективности существенно большему, чем уменьшение переменной составляющей записи.

Раздел 2.2. посвящен исследованию возможности применения динамической голограммы в качестве пространственного оптического переключателя. С этой целью исследована динамика дифракционной эффективности при импульсной записи и непрерывном считывании. Показано, что с учетом оптических потерь в носителе, дифракционная эффективность описывается выражением вида:

$$\xi = \frac{i\omega^2 e^{-(k_{Tx}^* + k_{Dx}^*)L}}{4c^2 k_{Dx}} \int_0^L dx \varepsilon_m^+(x) \hat{E}_{II}(x) \exp(i \int_0^x [k_{Tx}(x') - k_{Dx}(x') + mK_x(x')] dx')$$

где L – толщина фотохромного носителя. Видно, что затухание света эквивалентно уменьшению эффективной толщины голограммы и приводит к уменьшению дифракционной эффективности. Кроме того, благодаря затуханию $\bar{\varepsilon}$ меняется по толщине, что нарушает условие синхронизма и также приводит к снижению дифракционной эффективности. А в случае несимметричной геометрии записи, дифракционная эффективность дополнительно уменьшается вследствие изменения по толщине контраста регистрируемой интерференционной картины.

В разделе 2.2.1 рассматривается динамика дифракционной эффективности в случае непрерывного считывания периодически регенерируемой динамической голограммы светом постоянной интенсивности при условии, $T \gg \tau$, где T- период регенерации, τ - время записи. Представлены результаты моделирования распределения интермедиаты \mathbf{M}_{412} в зависимости от уровня постоянной составляющей (контраста) записи A_0 и интенсивности считывающего света. Показано, что в стационарном режиме контраст записи существенно нелинейно зависит от контраста регистрируемой световой картины. Также показано, что скорость фотоиндуцированного стирания записи прямо пропорциональна интенсивности считывающего света. При этом увеличение интенсивности считывающего света приводит не только к уменьшению глубины модуляции записи, но и к росту ее нелинейности, а динамика дифракционной эффективности голограммы в установившемся режиме описывается выражением:

$$\xi(t) \equiv \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(M(0, t) + M(\pi/2, t) \right) \right\} \left[\exp \left\{ -M(\pi/2, t) \right\} - \exp \left\{ -M(0, t) \right\} \right].$$

На рис. 2 представлены результаты расчета динамики дифракционной эффективности при периодической перезаписи голограммы (регенерации) последовательностью световых импульсов со скважностью $(T/\tau)=100$. и различной величиной контраста.

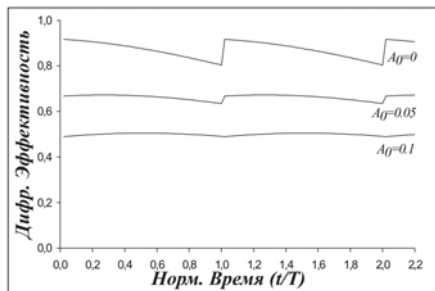


Рис. 2.

В разделе 2.3 описана технология изготовления образцов фотоносителя на основе бактериородопсина. Экспериментально показано, что разработанная технология позволяет уменьшить размеры фоточувствительных центров готового носителя до среднего размера около 0.1 мкм.

В разделе 2.3.1. представлены результаты исследования оптических характеристик образцов фотоносителя. Показано, что разработанная технология позволяет почти в три раза улучшить оптическое качество, в два раза снизить неравномерность чувствительности по апертуре носителя и приблизительно на 10 дБ уменьшить уровень малоуглового рассеяния.

Раздел 2.3.2. посвящен исследованиям временной стабильности голографических характеристик и фотореверсивности. С этой целью экспериментальный образец фотоносителя экспонировался через полосовой ($\Delta\lambda_{0.5}=0.38-0.85$ мкм) светофильтр источником света с цветовой температурой 6200 К⁰ в течение 5 месяцев (~3 10³ часов). Освещенность в плоскости образца более 10 Вт/см². Измерения оптических и голографических характеристик, проведенные по истечении этого срока показали, что характеристики образца за время эксперимента практически не изменилась. При этом расчетная фотореверсивность составила более 10¹⁰ фотоиндуцированных циклов перехода $V_{r570} \leftrightarrow M_{412}$.

В разделе 2.4. представлены выводы.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям возможности применения фотоносителя на основе бактериородопсина в качестве среды регистрации коммутирующих голограмм. Описана методика измерений.

На рис. 3 представлены результаты измерения зависимости дифракционной эффективности голограммы от средней мощности пучков записи при

Видно, что уменьшение контраста записи (A_0) приводит не только к уменьшению дифракционной эффективности голограммы, но и к стабилизации ее величины.

Также видно, что при определенных параметрах записи дифракционная эффективность периодически перезаписываемой с высокой скважностью голограммы может оставаться практически постоянной.

различной мощности считывающего пучка (а) и изменения во времени дифракционной эффективности при считывании после окончания записи (б). Видно, что в практически интересном для коммутации гигабитных сигналов случае (при мощности считывающего светового сигнала около 1мВт) голографическая чувствительность носителя составляет около 10^{-2} Вт/см², дифракционная эффективность составляет около 2%, а время самопроизвольного стирания (релаксации) голограммы - около 1 с.

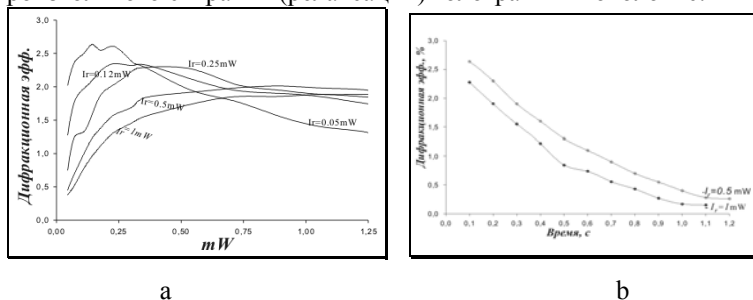


Рис. 3

Также видно, что полученные экспериментальные зависимости подтверждают выводы численного моделирования (рис.2).

Другой исследованной характеристикой являлась угловая селективность дифракционной эффективности. Дело в том, что в рамках 3D-архитектуры угол падения светового пучка входного канала на коммутирующую голограмму всегда постоянен, в то время, как угол отклоненного голограммой светового пучка меняется в зависимости от требуемого выходного канала. Поэтому крайне важно, чтобы дифракционная эффективность коммутирующей голограммы имела низкую угловую селективность.

Показано, что при постоянном угле падения на голограмму световой пучок может быть отклонен в угловом диапазоне более 10° с неравномерностью дифракционной эффективности менее 3дБ.

При сечении светового пучка коммутируемого канала (d) около 1мм полученный диапазон сканирования соответствует более чем $N=200$ разрешаемым по двойному критерию Рэлея направлениям. Что указывает на возможность реализации поля коммутации более чем $4 \cdot 10^4$ каналов.

В разделе 3.1. представлены результаты исследования фазовых характеристик фотоносителя. Разработан скоростной метод измерения динамики фотостимулированного изменения показателя преломления.

На рис.4а представлена зависимость фотостимулированного изменения показателя преломления от интенсивности экспонирующего света, а на рис.4б - соответствующая зависимость величины поглощения на $\lambda=0.63$ мкм.

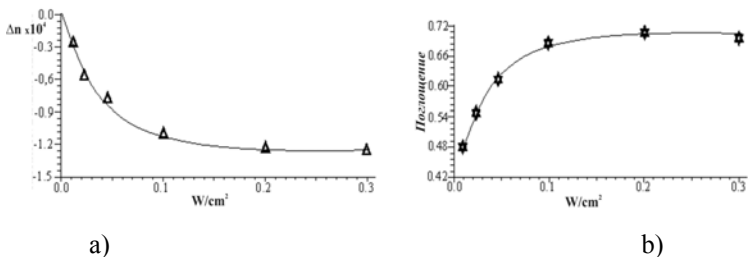


Рис. 4.

Видно, что величина фотостимулированного изменения показателя преломления пропорциональна коэффициенту поглощения образца и составляет порядка 10^{-3} .

Кроме того, показано, что величина фотостимулированного изменения показателя преломления растет с увеличением влажности образца. Это может быть объяснено снижением вязкости матрицы и, как следствие, ростом подвижности.

В разделе 3.2. представлены результаты исследования динамики фотостимулированного изменения показателя преломления. Исследования проводились на длине волны He-Cd лазера ($\lambda=0.44\mu\text{м}$), при экспонировании световыми импульсами второй гармоники АИГ лазера ($\lambda=0.53\mu\text{м}$) с регулируемой оптическим затвором длительностью $1-10^4$ мкс. Средняя плотность мощности измерительного светового пучка в плоскости образца составляла менее $1\text{ мВт}/\text{см}^2$. Экспериментально показано, что определяющий вклад в фотостимулированное изменение показателя преломления обусловлен темновым механизмом формирования метастабильного интермедиата M_{412} .

На рис.5 представлена осциллограмма фотостимулированного коротким ($\tau=5\text{ мкс}$) импульсом света изменения оптического поглощения на $\lambda=0.44\mu\text{м}$ (верхняя кривая) и показателя преломления (нижняя).



Видно, что динамика фотостимулированного изменения показателя преломления совпадает с динамикой изменения оптической плотности в области поглощения интермедиата M_{412} бактериородопсина.

Рис. 5

В разделе 3.3. представлены результаты экспериментального исследования механизма фотостимулированного изменения показателя преломления.

Показано, что фотостимулированное изменение показателя преломления при одновременном экспонирование светом с $\lambda=0.63\text{мк}$ и $\lambda=0.44\text{мк}$ меньше, чем при экспонирование только светом с $\lambda=0.63\text{мк}$.

В разделе 3.4. представлены результаты исследования влияния короткоживущих интермедиатов на динамические характеристики носителя. Показано, что при скоростной записи динамика формирования фотостимулированных интермедиатов описывается системой кинетических уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{dK}{dt} = p_b I_w B - (p_k I_w + \alpha_k) K \\ \frac{dM}{dt} = (p_k I_w + \alpha_{km}) K - (p_m I_r + \alpha_m) M \\ B + K + M = 1 \end{cases}$$

Здесь **B, K, M** - величины, пропорциональные концентрации интермедиатов **Br₅₇₀**, **KI** и **M₄₁₂**, соответственно; **I_w** - интенсивность света в области чувствительности **Br₅₇₀** и, **KI** интермедиатов;

I_r - интенсивность света в области чувствительности интермедиата **M₄₁₂** ;

p_b, **p_k**, **p_m**, - фоточувствительность **Br₅₇₀**, **KI** и **M₄₁₂**, интермедиатов, соответственно; **α_k**, **α_{km}**, **α_m**, - коэффициенты темновой релаксации из **KI** в **Br₅₇₀**, из **KI** в **M₄₁₂** и из **M₄₁₂** в **Br₅₇₀**, соответственно.

Ее решение с начальными условиями **K(t=0)=K(0)**, **M(t=0)=M(0)** имеет

вид:
$$M(t) = C_1 \exp(-s_1 t) + C_2 \exp(-s_2 t) + \frac{p_b I_w \beta_{km}}{(p_b I_w \beta_{km} + \beta_k \beta_m + p_k I_w \beta_m)},$$

где
$$\beta_k = p_k I_w + \alpha_k, \quad \beta_{km} = p_k I_w + \alpha_{km}, \quad \beta_m = p_m I_r + \alpha_m,$$

$$C_1 = \frac{(s_2 + \beta_m)M(0)}{s_2 - s_1} - \frac{\beta_{km}K(0)}{s_2 - s_1} - \frac{p_b I_w \beta_{km} s_2}{(p_b I_w \beta_{km} + \beta_k \beta_m + p_k I_w \beta_m)(s_2 - s_1)},$$

$$s_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(p_b I_w + \beta_k + \beta_m) \mp \sqrt{(p_b I_w + \beta_k + \beta_m)^2 - 4(p_b I_w \beta_{km} + \beta_k \beta_m + p_k I_w \beta_m)} \right]$$

$$C_2 = \frac{\beta_{km}K(0)}{s_2 - s_1} - \frac{(s_1 + \beta_m)M(0)}{s_2 - s_1} + \frac{p_b I_w \beta_{km} s_1}{(p_b I_w \beta_{km} + \beta_k \beta_m + p_k I_w \beta_m)(s_2 - s_1)}$$

При этом изменение во времени концентрации **KI** описывается выражением:

$$KI(t) = \frac{C_1(s_1 + \beta_m)}{\beta_{km}} \exp(s_1 t) + \frac{C_2(s_2 + \beta_m)}{\beta_{km}} \exp(s_2 t) + \frac{p_b I_w \beta_m}{(p_b I_w \beta_{km} + \beta_k \beta_m + p_k I_w \beta_m)}$$

Расчетами, проведенными при параметрах, характерных для скорости записи близкой к времени жизни **KI** ($p_b \approx p_m$, $\alpha_k \approx 10\alpha_{km}$, $\alpha_{km} \approx 10^4 \alpha_m$), показано, что с уменьшение времени записи динамический диапазон и чувствительность носителя экспоненциально падают.

На рис. 6 а, б представлены результаты расчетов динамики интермедиатов **Br₅₇₀**, **KI** и **M₄₁₂** при постоянной экспозиции ($I_w \tau = const.$), начальных условиях **B(t=0)=1**, **K(t=0)=0**, **M(t=0)=0** и различном времени экспонирования.

Видно, что уменьшение времени записи увеличивает фотостимулированное перераспределение между основным состоянием и короткоживущим интермедиадом, что приводит к заметному снижению динамического диапазона и чувствительности носителя.

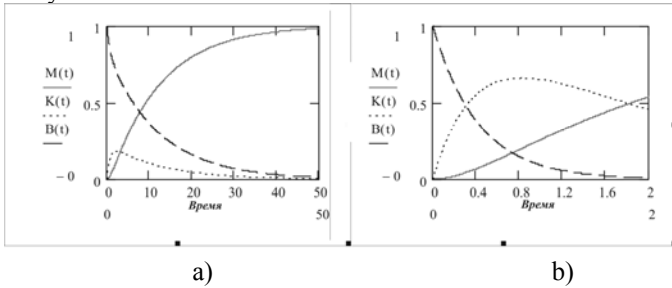


Рис. 6

В разделе 3.5. исследованы требования к динамическим характеристикам носителя. Структурная схема предлагаемого оптического коммутатора представлена на рис.7.

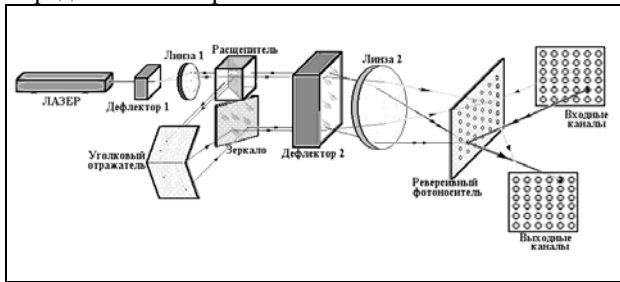


Рис. 7. Структурная схема коммутатора на основе матрицы динамических голограмм

Он состоит из матрицы излучателей входных каналов, матрицы приемников выходных каналов, динамического фотоносителя, программирующего устройства из лазера записи голограмм, первого дефлектора, обеспечивающего выбор выходного канала, трансформирующей линзы 1, светоделителя, оборачивающей системы из углового отражателя и зеркала, второго дефлектора, обеспечивающего выбор входного канала и коллективной линзы 2, которая сводит световые пучки записи на фотоносителе в одно пятно.

Для записи очередной голограммы первым дефлектором лазерный пучок отклоняется на угол, пропорциональный ее пространственной частоте. Первой линзой угловое отклонение пучка трансформируется в параллельное оптической оси пространственное смещение. После светоделителя половина интенсивности светового пучка поступает на вход второго дефлектора.

Вторая половина пучка отклоняется светоделителем и направляется на вход второго дефлектора зеркалом после прохождения через уголкового отражатель. В результате на вход второго дефлектора поступают два параллельных пучка, расстояние между которыми определяется величиной отклонения пучка первым дефлектором. Второй дефлектор отклоняет оба пучка на одинаковый угол, а линза 2 сводит световые пучки на динамическом фотоносителе в пятно записи. При этом местоположение пятна записи на носителе задается вторым дефлектором, а заданный первым дефлектором угол, под которым сходятся на носителе оба пучка, определяет пространственную частоту регистрируемой фотоносителем голограммы. В результате, в месте проекции светового пучка коммутируемого входного канала на носителе регистрируется голограмма с пространственной частотой, обеспечивающей отклонение светового пучка входного канала в нужный выходной канал.

Таким образом, при периоде регенерации T и числе коммутируемых каналов N , динамический фотоноситель должен обеспечивать возможность записи одиночной голограммы за время τ_w , определяемое условием $\tau_w \leq TN^{-1}$.

Учитывая, что для исследованных образцов носителя период регенерации T регистрируемой на Br_{570} форму голограммы составил порядка 10^{-1} с, а скорость записи ограничена величиной порядка 10^5 с, число одновременно коммутируемых каналов не может превышать $5 \cdot 10^3$.

В разделе 3.6. исследована возможность записи динамических голограмм на метастабильную форму M_{412} . Показано, что одним из обязательных условий эффективной записи на метастабильную форму является ненулевая начальная концентрация M_{412} , которая может быть реализована за счет подсветки носителя светом с длиной волны фоточувствительности Br_{570} . Показано, что максимального динамического диапазона запись достигает при постоянной подсветке, удовлетворяющей условию $S_a + p_b I + \tau^{-1} = 1$. В этом случае динамика записи описывается выражением:

$$C_b(t) = \frac{p_a}{p_b + p_a} [1 - \exp\{-(p_a + p_b)I_b(x, y)t\}],$$

из которого видно, что в случае оптимального уровня подсветки, дифракционная эффективность голограммы на M_{412} менее чувствительна к интенсивности считывающего света, а ее динамика идентична динамике голограммы на Br_{570} .

В разделе 3.7. представлены результаты экспериментального исследования возможности скоростной записи на метастабильную форму M_{412} . Запись голограммы осуществлялась путем экспонирования перешедшего в M_{412} носителя световым импульсом лазера записи с длиной волны в области фоточувствительности M_{412} . Экспериментально показано, что при записи на метастабильную форму M_{412} . время записи более 0.5 мкс не оказывает видимого влияния на чувствительность, дифракционную эффективность и

динамический диапазон материала.

Для исследования возможности регенерации дифракционной эффективности голограммы, регистрируемой на M_{412} , запись производилась световыми импульсами длительностью $\tau_w=2\text{мкс}$ с различным периодом следования (T).

Показано, что при периоде следования порядка 100 мS величина дифракционной эффективности практически постоянна. Также показано, что при записи на метастабильный интермедиат M_{412} параметр $T\tau_w$ превышает 10^5 , что указывает на возможность использования бактериородопсина для одновременной коммутации как минимум 10^5 независимых каналов. При этом дифракционная эффективность периодически регенерируемой голограммы на M_{412} составляет более 1%.

В разделах 3.8-3.9 исследованы условия, при которых в результате скоростной записи быстрый нагрев и обусловленное им изменение показателя преломления материала может приводить к регистрации в фотоносителе паразитной фазовой голограммы с эффективностью, сравнимой с эффективностью основной записи. Показано, что величина дифракционной эффективности тепловой голограммы в пленке носителя толщиной 40 μm может достигать $\sim 1\%$, а расчетное время релаксации составляет порядка 10 μs . В разделе 3.10. представлены выводы.

В Четвертой главе изложены результаты исследования методов и средств записи и регенерации большого числа динамических голограмм. Описан макет оптического коммутатора и представлены результаты исследования его характеристик.

В разделе 4.1. рассмотрена возможность применения для записи и регенерации акустооптических дефлекторов. Показано, что с помощью системы записи на их основе возможна регистрация и регенерация порядка 10^4 коммутирующих голограмм.

В разделе 4.2-4.3. исследована возможность увеличения поля коммутации. С этой целью предложен способ увеличения разрешающей способности, который позволяет реализовать дефлектор с разрешающей способностью, превышающей дифракционный предел в $N \approx \theta^0 / \varphi^0$ независимых положений, где θ^0 - угловой диапазон сканирования дефлектора, φ^0 – расходимость управляемого светового пучка. Увеличение разрешающей способности достигается за счет автофокусировки управляемого света с помощью динамической линзы.

Показано, что увеличение разрешающей способности такой систему (К) можно оценить как $K \approx 4\Delta\Phi^0 / \pi$, где $\Delta\Phi^0$ – светоиндуцированное в нелинейном элементе изменение фазы светового пучка. Также показано, что скорость формирования динамической линзы может быть увеличена, а ее аберрации уменьшены в случае применения фотохромного красителя,

оптические потери которого обратимо уменьшаются при экспонировании.

В разделах 4.4.-4.5. представлены результаты исследования макета системы произвольного сканирования с повышенным разрешением В качестве нелинейного элемента использовалась капиллярная кювета в виде двух стеклянных пластин с зазором 50мкм, заполненным растворенным в CCl_4 фотохромным краун-содержащим красителем SS-35. Экспериментально показано, что энергия формирования тепловой динамической линзы составляет менее $5 \cdot 10^{-6}$ Дж. При этом разрешающая способность увеличивается более чем 10 раз.

В разделе 4.6. представлены результаты исследования макета оптического коммутатора на основе матрицы динамических голограмм. Продемонстрирована возможность произвольной, неблокируемой оптической коммутации между 20 входными и 20 выходными каналами с оптическими потерями около 20dB.. Средняя интенсивность скоммутированного сигнала составляет более 7 мкВт, что указывает на возможность организации между каждым входным и выходным каналом передачи цифрового сигнала со скоростью более 1 Гбит/с.

В заключении кратко сформулированы основные выводы диссертационной работы. В частности, что:

- Задача коммутации большого числа высокоскоростных каналов может быть решена с помощью оптического коммутатора на основе матрицы динамически перепрограммируемых голограмм.
- Применение для регистрации динамических коммутирующих голограмм фотоносителя на основе бактериородопсина открывает возможность реализации оптического коммутатора емкостью более $10^4 \times 10^4$ каналов с пропускной способностью по каждому каналу порядка 1 Гбит/с.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Yu.N. Perepelitsyn, V.K. Salakhutdinov. Application of Photoinduced Dynamic Lens for Enhancing the Resolution of an Optical Addressing System.// Saratov Fall Meeting, Proc.SPIE – 2005. Vol. 6164, 5-18
2. Anatoly Fonarev, A.L.Mikaelian, B.V.Kryzhanovsky, V.K.Salakhutdinov. Dynamic properties of bacteriorhodopsin excited by ultrashort light pulse // Optics Letters – 2000. Vol.25, No 15, pp.1080-1082
3. A.L.Mikaelian, B.V.Kryzhanovsky, V.K.Salakhutdinov, A.Fonarev. Holographic Recording in Bacteriorhodopsin by Short Light Pulses // Optical Memory&Neural Network – 1999. Vol. 8, №4, pp. 614-622.
4. V.K.Salakhutdinov, G.A.Matevosov, The Diffraction Efficiency of BR Holograms Under Thermal Exposure // Proc SPIE – 1997. Vol.3347, pp.61-65.
5. V.K.Salakhutdinov, G.A.Matevosov, and Yu.V.Konstantinov. Bacteriorhodopsin as a Fast Recording Medium // Proc. SPIE - 1997, vol.3347, pp.20-26.
6. V.K.Salakhutdinov, and G.A.Matevosov. Dynamics of Hologram Recording in the Metastable State of Bacteriorhodopsin- // OM&NN – 1997. vol.6, N2, pp.119-124,

7. V.K.Salakhutdinov and G.A.Matevosov. Use of the Dynamic Lens for Enhancing the Resolution of an Optical Addressing System" // in Proc.SPIE – 1995. Vol. 2527, pp. 268-274.
8. A.L.Mikaelian, V.K.Salakhutdinov, G.A.Matevosov. Optical addressing system resolution enhancement by using the photoinduced dynamic lens // OM&NN - 1995.Vol.4, N4, pp. 36-45.
9. A.L. Mikaelian, V.K. Salakhutdinov, G.A. Matevosov, "Dynamic Optical Elements for Memories and Neural Networks // in Proc.SPIE – 1995. OM&NN Vol. 2529, pp.58-66,
10. G.A. Matevosov, A.L. Mikaelian, V.K. Salakhutdinov. Nonlinear Properties of a Crown-bearing Dye:Optical Addressing System on Its Basis // OM&NN Probl.'94. Proc. SPIE - 1994. vol. 2144, F-17.
11. G.A.Matevosov and V.K.Salakhutdinov. Phase Characteristics of Bacteriorhodopsin-Based Photocarriersin the Gelatin Matrix // OM&NN Probl.'94 Proc. SPIE -1994. vol. 2144, F-26.
12. A.L.Mikaelian, V.K.Salakhutdinov. High-speed multichannel optical switching // in Proc. SPIE – 1994. vol. 2146, 3-16
13. А.Л.Микаэлян, Е.А.Никанорова, В.К.Салахутдинов. Динамика дифракционной эффективности периодически регенерируемых голограмм в бактериородопсине // Квантовая электроника - 1994. т.21, No 8, с.781-784.
14. A.L.Mikaelian, V.K. Salakhutdinov. High-speed channel switching using dynamic bacteriorhodopsin-based hologram matrix // Opt.Eng. bul - 1993. No1, pp.23-25,
15. A.L.Mikaelian, V.K.Salakhutdinov. Using of dynamic holograms for information channel switching// Optical Memory & Neurel Networks. – 1992. vol.1, No.4, pp.315-324.
16. A.L.Mikaelian, V.K.Salakhutdinov. Reprogrammable interconnects based on overrecordable holograms // Int. Simp. "Optics Quebec'93", in Proc. SPIE – 1993. vol.2042, pp. 2042-32.
17. V.K.Salakhutdinov, A.L.Mikaelian. Holographic interconnects using bacteriorhodopsin material // Current Developments in Optical Disign and Optical Engineering II, in Proc. SPIE – 1992. vol.1752 , p.1752-37.
18. A.L.Mikaelian, V.K.Salakhutdinov. High-capacity optical spatial switch based on reversible holograms // Opt. Eng. - 1992, vol.31, No 4, pp.758-763.
19. В.Б.Котов, А.Л. Микаэлян, В.К. Салахутдинов, В.А. Шамшин. Оптоэлектронный коммутатор гигабитных информационных потоков // Радиотехника – 1990. No.12, с.72-76.
20. В.К. Салахутдинов, Б.С. Киселев, "Оптимизация ширины пьезопреобразователя акустооптических устройств", Радиотехника -1984 No.6, с.51-54.
21. Акустооптическое устройство обработки сигналов: А. С. СССР No.298329: МПК G02F 1/33 ,G02F 1/28; В.К. Салахутдинов, Т.М. Третьяков,
22. В.К. Салахутдинов, Б.С. Киселев, В.Б.Котов. Особенности использования фоточувствительных материалов типа биохром в качестве реверсивной голографической среды // Препринт НС «Кибернетика» АН СССР - 1991 Москва.
23. Способ коммутации оптических каналов и устройство коммутации оптических каналов: Патент РФ № 2024904: МПК G03H 1/04, G02F 1/33, H04L 12/50: А.Л. Микаэлян, В.К. Салахутдинов