

И. А. Малевич, А. В. Поляков, С. И. Чубаров, В. Л. Козлов

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Оптические системы обработки информации и оптические вычислительные комплексы привлекли широкое внимание исследователей в связи с необходимостью записи и обработки больших массивов оптической информации, в том числе для задач освоения космоса и мирового океана. Проведенные до настоящего времени исследования и разработки заложили физические основы анализа быстропротекающих оптических процессов наносекундного и субнаносекундного диапазонов в реальном масштабе времени, а оптико-физические эксперименты подтвердили принципиальную возможность и перспективность применения упомянутых систем для высокоскоростной обработки реализаций нестационарных оптических полей.

Одним из перспективных направлений в области обработки оптической информации является использование волоконно-оптических динамических запоминающих устройств на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы (ОЭРС), состоящей из трех основных компонентов: модулируемого источника света, волоконно-оптической структуры и фотодетектора, замкнутых в кольцо. Достоинством оптоэлектронных динамических запоминающих устройств (ОДЗУ) на основе ОЭРС служит то, что запись информационного потока в них осуществляется в реальном масштабе времени, а хранение данных в цифровой и аналоговой форме возможно в течение времени, необходимого для их последующей обработки. В настоящее время предложен ряд моделей оптических вычислителей на основе ОЭРС, разработанных и исследованных в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, в Калифорнийском университете (США), Токийском университете, Институте электроники НАН Беларуси. Данные работы заложили фундаментальные основы теории и практики оптической обработки больших массивов информации в реальном масштабе времени.

Проведенные на основе существующей оптоэлектронной элементной базы оценки показали, что ОДЗУ могут оперировать потоками информации со скоростями 1 Гбит/с и более, время хранения может достигать нескольких часов. При практической реализации подобных систем установлено, что одна из основных причин ограничения информационных характеристик ОДЗУ – разрушение информационного потока, обусловленное температурными и флуктуационными эффектами в контуре при динамическом способе хранения информации. В этой связи чрезвычайно

важным становится изучение влияния температурных и флуктуационных эффектов (в особенности их совместное взаимодействие) на рециркуляционный процесс в ОЭРС.

В связи с быстрым развитием автоматизированных систем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам в таких областях, как промышленность, энергетика, медицина, телекоммуникации стремительно растет потребность в разработке быстродействующих информационно-измерительных и диагностических систем. Одно из перспективных направлений в данной области – разработка прецизионных многофункциональных частотных волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе ОЭРС. При использовании ВОД наибольшее значение имеют следующие достоинства волоконных световодов (ВС): безындукционность, взрывобезопасность, высокая электронизоляционная прочность, большая коррозионная стойкость, особенно к химическим растворителям, маслам, воде. Достаточно полезны и такие свойства ВС как эластичность, малые габариты и масса.

Исследованию закономерностей влияния температурных и флуктуационных эффектов на отношение сигнал/шум в оптоэлектронном контуре, определяющее информационные характеристики системы, посвящена работа [1]. Проанализированы основные источники температурных и флуктуационных эффектов в ОЭРС. На основе единого подхода систематизированы математические способы описания различных источников шумов в контуре, что дает возможность проводить исследования зависимости отношения сигнал/шум от температуры и режимов работы элементов контура для различных конфигураций ОЭРС.

При использовании относительно коротких (длиной до нескольких километров) ВС: во-первых, возможно при наличии лавинного фотодиода (ЛФД) отказаться от применения усилителя на выходе фотоприемника, исключая тем самым один из основных источников шумов; во-вторых, помимо шумов приемной части возникает необходимость учитывать шумы, вносимые инжекционным лазером (ИЛ). Разработана математическая модель, позволяющая с учетом температурной зависимости амплитудных флуктуаций мощности излучения ИЛ и дробового шума ЛФД, а также теплового шума нагрузочного сопротивления и эффектов межимпульсных помех оптических сигналов в ВС находить оптимальные режимы работы элементов контура и осуществлять выбор рабочего диапазона температур по критерию максимального отношения сигнал/шум ξ :

$$\xi = \frac{[I_{\Phi}(\theta)M]^2}{2e \left(I_{\Phi}(\theta) + I_T(\theta) \left[\frac{\Delta E(\theta)(\theta - \theta_n)}{ak\theta\theta_n} \right] \right) M^2 FB_f + N_L I_{\Phi}^2 M^2 B_f + 4k\theta B_f / R_n},$$

$$I_{\Phi}(\theta) = \gamma\lambda(1-r)(1 - \exp(-k_p(\theta)L_n))P_{fd}(\theta), \quad (1)$$

$$F(M) = M \left\{ 1 - (1 - k_i) \left[(M-1)/M \right]^2 \right\},$$

где $\gamma = e/hc$; e – заряд электрона; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; I_{Φ} – начальный фототок; M – коэффициент лавинного умножения ЛФД; $I_T(\theta_n)$ – темновой ток ЛФД при начальной температуре θ_n ; $F(M)$ – шум-фактор, определяемый по формуле Макинтайера при условии, что лавина инициируется носителями одного типа; N_L – относительная спектральная плотность флуктуаций интенсивности ИЛ; k – постоянная Больцмана; θ – температура; B_f – граничная полоса частот системы; R_n – величина нагрузочного сопротивления ЛФД; λ – длина волны падающего на ЛФД излучения; r – коэффициент отражения поверхности ЛФД; $k_p(\theta)$ – коэффициент поглощения Ge; L_n – ширина области пространственного заряда; $P_{fd}(\theta)$ – мощность принимаемого ЛФД излучения; a – постоянный коэффициент; k_i – отношение коэффициентов ионизации электронов и дырок ($k_i = 0.8$ для Ge); $\Delta E(\theta)$ – ширина запрещенной зоны германия.

При постоянном напряжении смещения ЛФД $U = \text{const}$ зависимость отношения сигнал/шум от температуры имеет максимум (рис. 1), обусловленный тем, что мощности сигнала и различных источников шумов на входе блока регенерации с увеличением температуры будут изменять-

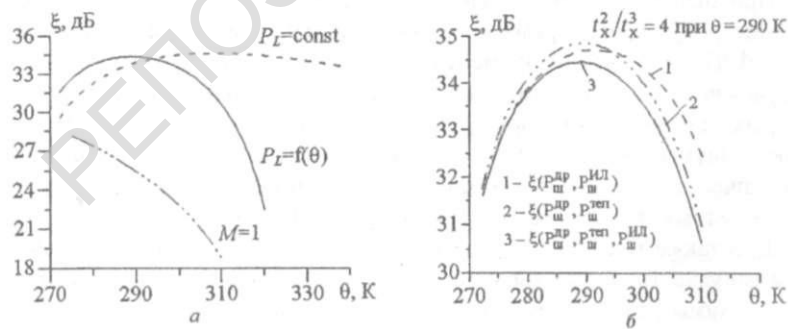


Рис. 1. Зависимость изменения ξ от температуры с учетом температурной зависимости мощности излучения ИЛ (а), а также при различных комбинациях шумовых источников (б) при $P_L = 2.5$ мВт, $L = 2$ км

ся по-разному. Поскольку начальный фототок ЛФД во многом определяется мощностью излучения ИЛ, учет влияния теплового режима работы ИЛ на изменение мощности излучения показал, что значение оптимальной рабочей температуры, соответствующей максимальному значению отношения сигнал/шум, заметно сдвигается в сторону более низких температур по сравнению с вариантом, когда мощность излучения ИЛ остается постоянной. Для исследуемого варианта ОЭРС использование ЛФД приводит к увеличению отношения сигнал/шум в области комнатных температур приблизительно на 10 дБ по сравнению с фотоприемниками без внутреннего усиления (рис. 1 а).

Из анализа температурной зависимости относительной спектральной плотности флуктуаций интенсивности излучения (ОСПФИ) инжекционного лазера следует, что для того, чтобы не допустить резкого увеличения ОСПФИ, необходимо, чтобы температура активной области лазерного кристалла не превышала 310 К (рис. 2). Проведенные расчеты распределения температуры по слоям лазерного кристалла с использованием нестационарной тепловой модели ИЛ показали, что для многомодового полоскового лазера, установленного на медный теплоотвод, данное условие выполняется при токах накачки до $1.5I_n$ (I_n – пороговый ток), что обеспечивает выходную мощность излучения не менее 2.5 мВт. Увеличение тока инжекции ИЛ приводит не только к возрастанию отношения сигнал/шум, но и к смещению максимума ξ в область более высоких температур.

Проведенные исследования зависимости отношения сигнал/шум от температуры при различных режимах работы ЛФД показали, что при комнатных температурах и выше наиболее эффективным является режим

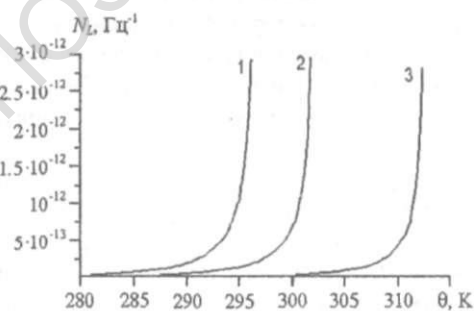


Рис. 2. Зависимость ОСПФИ инжекционного лазера от температуры при различных токах инжекции: 1 – $I = 1.05I_n$; 2 – $I = 1.1I_n$; 3 – $I = 1.2I_n$.

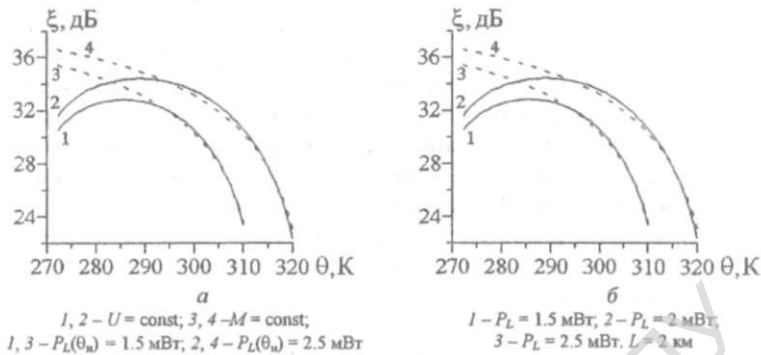


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум ξ в контуре ОЭРС от температуры θ (а) и коэффициента лавинного умножения ЛФД M (б) при различных режимах работы ЛФД и мощностях излучения ИЛ

работы при постоянном напряжении смещения (рис. 3 а). При температурах ниже комнатной для достижения наибольшего отношения сигнал/шум в контуре необходимо применять режим детектирования ЛФД с постоянным коэффициентом лавинного умножения. Отношение сигнал/шум может быть увеличено за счет увеличения коэффициента лавинного умножения M до тех пор, пока растущий пропорционально M^{2+x} (x – коэффициент избыточного шума, для Ge-ЛФД $x = 0.8-1$) дробовый шум не станет преобладать над другими видами шумов. При комнатной температуре для анализируемой системы оптимальный коэффициент лавинного умножения для германиевого ЛФД лежит в пределах 8–12 и практически не зависит от мощности излучения ИЛ (рис. 3 б).

Основными характеристиками динамического запоминающего устройства на основе ОЭРС являются информационная емкость, определяемая величиной тактового временного интервала между импульсами T , и время хранения информации при заданной вероятности ошибки, определяемое вероятностью ошибки на каждом цикле рециркуляции и зависящее от отношения сигнал/шум в контуре. Мощность излучения ИЛ, попадающая в течение тактового интервала на приемную площадку ЛФД и определяющая величину начального фототока ЛФД, обусловлена, с одной стороны, потерями мощности излучения при распространении по ВС и на стыковочных элементах, а с другой, для близко расположенных импульсов в информационной последовательности, эффектами межсимвольных помех. Получено аналитическое выражение [2], описывающее уменьшение оптической мощности информационных сигналов P_{fdi} в течение тактового интервала из-за межсимвольных помех:

$$P_{fd} = P_{fd} 10^{-0.1|aB_s \sigma \exp(bB_s \sigma)|}, \quad (2)$$

где σ – среднеквадратическая длительность импульса на выходе ВС; B_s – скорость поступления информационного потока; параметры аппроксимации $a = 2$, $b = 4.5$ – для гауссовой формы импульсов и $a = 4$, $b = 1$ – для экспоненциальной. Данное уменьшение мощности сигнала определяется соотношением среднеквадратической длительности импульса на выходе ВС и величины временных тактовых интервалов.

На основе полученных в [1] результатов по достижению максимального отношения сигнал/шум от температуры с учетом температурозависимых параметров ИЛ и ЛФД, а также учитывая наличие межсимвольных помех, проведены оценки предельных информационных характеристик системы динамического хранения информации [2]. Полученные результаты показали перспективность использования ОДЗУ в качестве буферной памяти для высокоскоростной записи и хранения цифровой информации в многоканальных системах мониторинга окружающей среды.

Для выявления закономерностей влияния на процесс рециркуляции изменений температуры и таких параметров ОЭРС как ток накачки и пороговый ток ИЛ, коэффициент лавинного умножения ЛФД, величина порога срабатывания блока регенерации, оптическая длина ВС, получено выражение [3], описывающее частоту рециркуляции f в ОЭРС с учетом задержек распространения информационного сигнала во всех элементах контура:

$$f = \left\{ T_3 + \frac{U_n \tau_\phi}{[I_n - (I_n(\theta, q) - I_0)] \eta_n \eta_{\text{фп}} R_n KM(\theta)} + \tau_s(\theta) \ln \frac{I_n}{I_n - (I_n(\theta, q) - I_0)} + (R_n + R_n) C_\phi + h_d / v_d + N_k k_i M(\theta) h_n / h_{\text{нас}} + \frac{L(\theta) n_0(\theta)}{c} \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где T_3 – задержка распространения сигнала в электронной части контура; I_n – амплитуда импульса тока накачки; I_0 – постоянное смещение ИЛ; R_n – последовательное сопротивление ЛФД; C_ϕ – емкость фотодиода; N_k – коэффициент, изменяющийся от 1/3 до 2 при изменении k_i от 1 до 10^{-3} ; h_d – ширина диффузионного слоя; v_d – скорость диффузии; h_n – ширина слоя лавинного умножения; $v_{\text{нас}}$ – дрейфовая скорость насыщения, L – геометрическая длина ВС; n_0 – коэффициент преломления на оси волокна.

Из анализа зависимостей изменения f от флуктуаций параметров системы следует, что использование ЛФД по сравнению с фотоприемниками без внутреннего усиления позволяет повысить стабильность частоты

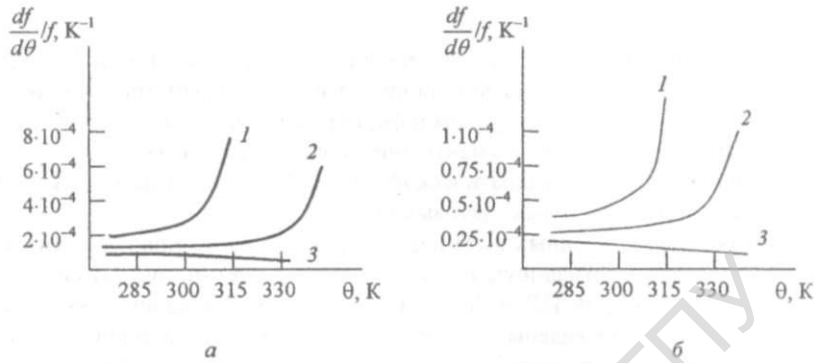


Рис. 4. Температурные зависимости относительной нестабильности частоты рециркуляции в ОЭС при длине ВС 50 (а) и 500 м (б). Величина тока инжекции: 1 - $1.3 I_n$, 2 - $1.6 I_n$, 3 - $2 I_n$

рециркуляции примерно в два раза. При этом основной вклад в изменение частоты рециркуляции вносят нестабильности задержки генерации стимулированного излучения ИЛ относительно импульса тока накачки и времени срабатывания блока регенерации. Влияние данных эффектов на изменение частоты рециркуляции увеличивается с уменьшением длины ВС. Установлено также, что при превышениях тока инжекции над пороговым током $I > 1.5 I_n$ для ОЭС на основе ИЛ на AlGaAs в диапазоне температур 280–350 К наблюдается anomalous возрастание температурной стабильности частоты рециркуляции с ростом температуры (рис. 4), связанное с тем, что в доминирующем в данном случае факторе, определяющем стабильность частоты рециркуляции (задержке генерации в лазере), уменьшение спонтанного времени жизни неравновесных носителей тока преобладает над увеличением задержки, связанной с ростом порогового тока.

Для исследования совместного влияния изменения температуры активной области и эффекта накопления заряда от предшествующих импульсов тока накачки в ИЛ на динамику изменения временных интервалов между импульсами в процессе рециркуляции разработана математическая модель процесса динамического хранения информации в оптоэлектронном контуре [4, 5]. Временной интервал $T_{j,j+1}^N$ между j и $j+1$ импульсами на N -м цикле рециркуляции в этом случае определяется временным интервалом на предыдущем цикле рециркуляции, а также вели-

чинами задержек распространения j и $j+1$ импульсов. Задержка для каждого импульса в информационной последовательности зависит от таких параметров ИЛ, как пороговый ток и спонтанное время жизни неравновесных носителей тока. При этом, если в процессе нагрева активной области ИЛ величина порогового тока увеличивается, что приводит к увеличению задержки распространения импульса, то эффект накопления остаточного заряда, наоборот, стремится ее уменьшить. Изменение температуры активной области ИЛ в процессе рециркуляции находилось путем решения нестационарного уравнения теплопроводности для многослойного лазерного кристалла.

Исследовалось два случая.

1. Величина начальных временных интервалов значительно больше спонтанного времени жизни неравновесных носителей тока. При этом основное влияние на деформацию временных интервалов между импульсами в процессе рециркуляции оказывает изменение температуры активной области ИЛ. Показано, что величина деформации равных в начальный момент времени интервалов различна и наибольшей деформации подвергается первый временной интервал. В результате, на первых циклах рециркуляции наблюдается нерегулярная деформация импульсной последовательности, обусловленная сложным характером взаимодействия импульсов как в самой последовательности, так и между соседними циклами.

2. В случае циркуляции близко расположенных импульсов в контуре ОДЗУ ($T_{j,j+1} < (5-7) \tau_s$) на первых циклах рециркуляции преобладают динамические эффекты, приводящие к уменьшению временных интервалов. В дальнейшем, по мере роста температуры кристалла, начинают преобладать температурные эффекты, которые могут приводить как к увеличению, так и к уменьшению временных интервалов между импульсами в зависимости от их начального соотношения и длины ВС (рис. 5).

Проведенные расчеты показали, что в исследуемом ОДЗУ без использования дополнительных мер по стабилизации параметров элементов контура хранение временных интервалов длительностью не более нескольких десятков наносекунд с точностью не хуже 3 % возможно примерно в течение 10^3 циклов рециркуляции, после чего информация разрушается. На основе полученных результатов была разработана методика оценки предельных информационных характеристик ОДЗУ при хранении цифровой информации. Данная методика [6] основана на нахождении режимов работы элементов контура, обеспечивающих максимальное отношение сигнал/шум от температуры с учетом влияния на величину межсимвольных помех в ВС температурных и динамических эффектов в

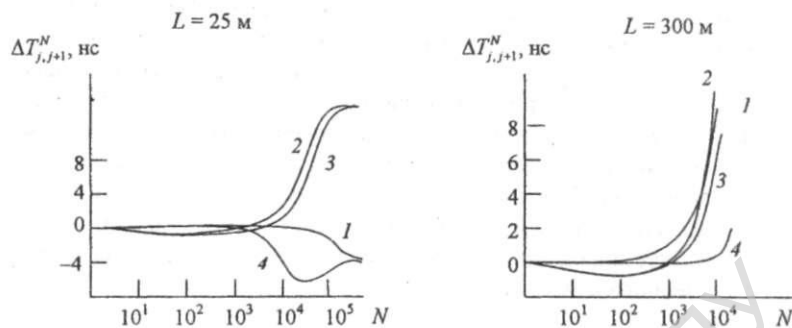


Рис. 5. Изменения величины временных интервалов $\Delta T_{j,j+1}^N$ относительно начальных значений $T_{j,j+1}^H$ в зависимости от номера цикла рециркуляции N :

$$1 - T_{1-2}^N, 2 - T_{2-3}^N, 3 - T_{3-4}^N, 4 - \Delta T_{4-5}^N, T_{1-2}^H = 30 \text{ нс}, T_{2-3}^H = 15 \text{ нс}, T_{3-4}^H = 15 \text{ нс}, T_{3-4}^H = 30 \text{ нс}$$

ИЛ, поскольку, как было показано, временные интервалы между информационными импульсами T , а следовательно и величина межсимвольных помех, от цикла к циклу изменяются сложным образом и зависят от многих параметров.

Экспериментальные исследования влияния режимов работы элементов рециркуляционного контура на стабильность частоты рециркуляции приводились с использованием разработанного макета ОЭРС с периодической регенерацией импульсной последовательности [7, 8], в котором в качестве источника излучения использовался многомодовый ДГС-ИЛ AlGaAs/GaAs, генерирующий на длине волны 0.82 мкм оптические импульсы длительностью 3 нс на полувысоте и фронтом 2 нс. Линия задержки представляла собой отрезки многомодовых градиентных ВС различной длины. В качестве фотоприемника использовался германиевый лавинный фотодиод ЛФД-2А. Относительная долговременная нестабильность частоты рециркуляции ОЭРС составляла $1.5 \cdot 10^{-6}$ при времени измерения 1 с и времени наблюдения 30 мин для длины ВС 500 м (рис. 6 а). Данная величина нестабильности оставалась практически постоянной в диапазоне порогов устройства регенерации от 30 % до 80 % амплитуды циркулирующих импульсов, поскольку в этом интервале фронты импульсов близки к линейным (рис. 6 б). Такая же закономерность наблюдалась и при расчетах [3]. С уменьшением длины ВС стабильность частоты рециркуляции нелинейно уменьшалась (рис. 6 а), что

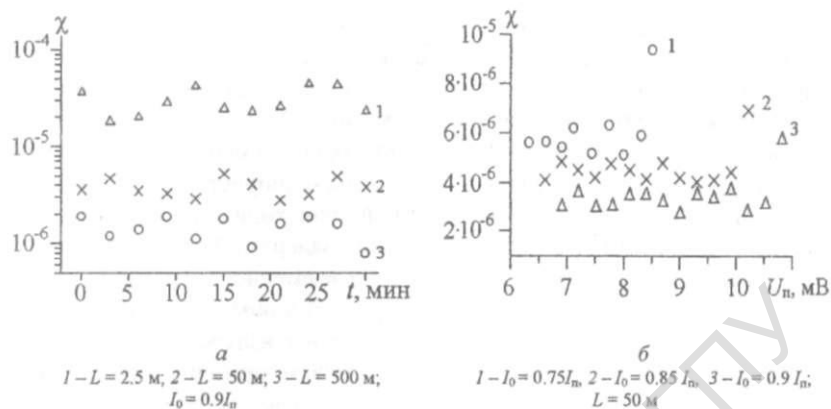


Рис. 6. Экспериментальные значения относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции χ в зависимости от времени наблюдения t (а) и величины порога срабатывания U_n блока регенерации (б) при различных значениях постоянного смещения ИЛ и длины ВС

связано с увеличением числа актов преобразования информационных сигналов "ток-свет-ток" в единицу времени, усилением влияния параметров ИЛ и ЛФД на процесс рециркуляции и, как следствие, различной скоростью накопления ошибок. Установлено также, что флуктуации времени распространения импульса по оптоэлектронному контуру в течение первого цикла рециркуляции при периодическом запуске системы подчиняются гауссовому закону распределения. Показано, что при постоянной амплитуде импульсов тока накачки ИЛ и обеспечении коэффициента лавинного умножения ЛФД в пределах $M \approx 10-12$ система обладает наименьшими флуктуациями, которые уменьшаются при увеличении мощности излучения ИЛ, что соответствует результатам теоретических исследований. Сравнение полученных экспериментальных данных с проведенными теоретическими расчетами, учитывающими различные источники шумов, показали, что при условии поддержания питающих напряжений с точностью не хуже 0.1 % стабильность частоты рециркуляции можно повысить в 2.5 раза.

В оптических системах динамического хранения аналоговая информация может быть представлена в виде временных интервалов между оптическими импульсами принимающими непрерывный ряд значений. Зарегистрировать и определить с высокой точностью (десятки, сотни пикосекунд) временное положение каждого импульса в реальном масштабе времени практически невозможно, поэтому информация сначала записывается в оперативное оптоэлектронное запоминающее устройство, а за-

тем за определенное число периодов рециркуляции считается. Для решения задачи хранения и считывания оптической информации предлагается использовать полупроводниковый лазер, в котором генерация излучения происходит на двух различных длинах волн. При этом на одной длине волны λ_2 в режиме рециркуляции находятся информационные импульсы, а на другой длине волны λ_1 — импульсы опорной частоты, дающие временную шкалу, относительно которой происходит считывание полезной информации [9]. Разность оптических задержек излучения в световоде Δt на длинах волн λ_1 и λ_2 определяет временное разрешение системы считывания информации, циркулирующей в петле оптоэлектронного запоминающего устройства. При длине волны излучения $\lambda_2 = 1,3$ мкм, $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 5$ нм и длине световода $L = 600$ м временное разрешение системы Δt составляет 0,1 нс. В системе совмещаются режимы хранения, считывания и измерения временного положения информационных импульсов.

Для решения задачи измерения, управления и перестройки длины волны лазерного излучения в качестве дисперсионного элемента использовалась волоконно-оптическая линия задержки. Время распространения оптического излучения в световоде будет зависеть от длины волны излучения. В предлагаемой системе [10] реализуется режим амплитудной модуляции излучения (синусоидальной рециркуляции), при котором период модуляции равен времени оптической задержки излучения в световоде. Измеряя частоту (период) модуляции можно определить показатель преломления световода, а следовательно и длину волны излучения. Диапазон рабочих длин волн $\Delta\lambda$ определяется спектром пропускания волоконно-оптического световода и полосой приемника излучения, и для световода из кварцевого стекла составляет $\Delta\lambda \approx 190 \dots 2500$ нм. Для световода длиной $L = 100$ м крутизна характеристики управления системы в видимой области спектра равняется $df/d\lambda = 230$ Гц/нм. При измерении частоты модуляции с точностью 1 Гц (время измерения 1 с), обеспечивается точность измерения и управления длиной волны лазера приблизительно $5 \cdot 10^{-3}$ нм.

Для минимизации погрешности определения временного положения информационных импульсов в ОДЗУ рециркуляционного типа необходимо применять специальные методы стабилизации длины волны излучения лазера. В системе реализуется режим оптико-электронной рециркуляции одновременно на двух оптических длинах волн [11], что позволяет одновременно измерять две длины волны излучения и управлять каждой длиной волны генерации двухволнового лазера. При этом обес-

печивается высокая точность и широкий диапазон измерений каждой из длин волн.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований послужили основой для создания частотных волоконно-оптических датчиков рециркуляционного типа с оптическим волокном в качестве чувствительного элемента [12]. Особенностью такого датчика является то, что измерение физической величины осуществляется по частоте рециркуляции одиночного импульса, которая регистрируется достаточно просто и с высокой точностью. При этом предусматривается периодическое восстановление информационного сигнала по амплитуде и длительности на каждом цикле рециркуляции минимизируются ряд погрешностей, связанных с флуктуациями частоты рециркуляции в процессе измерения.

Сравнительный анализ различных конструкций и принципов действия ВОД, предназначенных для измерения температуры, показал, что температурные ВОД рециркуляционного типа на основе ОЭРС по своим характеристикам превосходят наиболее распространенные в настоящее время ВОД для измерения температуры, основанные на регистрации изменения интенсивности света, не уступая им при этом в надежности, простоте и стоимости [13]. Установлено, что с помощью ВОД рециркуляционного типа можно контролировать температуру с точностью $0,1-0,01^{\circ}\text{C}$ в зависимости от типа и длины используемого в качестве чувствительного элемента ВС и в перспективе возможно приблизить метрологические характеристики таких ВОД к параметрам наиболее точных фазовых ВОД интерферометрического типа [14]. Разработана методика оценки дисперсионных параметров многомодовых ВС рециркуляционным способом, которая позволяет определять характеристики отрезков ВС длиной начиная с десятков метров с погрешностью не хуже 1–2 % [15].

Для измерения хроматической дисперсии одномодовых оптических волокон предлагается рециркуляционный метод, основанный на оптоэлектронной рециркуляции одновременно на двух оптических длинах волн [15]. В качестве излучателя в системе используется лазерный диод на основе асимметричной квантоворазмерной гетероструктуры, обеспечивающий генерацию зондирующего излучения на двух различных длинах волн. Переключение длины волны генерации с λ_1 на λ_2 происходит при изменении тока инжекции. Разность длин волн генерации $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ для таких лазерных диодов достигает значений 20–70 нм. В системе по значению частоты рециркуляции на различных длинах волн, определяется разность оптических задержек излучения в световоде и, следовательно, разность показателей преломления на этих длинах волн, что позволяет получить информацию о дисперсии данного оптического волокна, а также измерить его длину.

Литература

1. *Коростик К. Н., Малевич И. А., Поляков А. В.* Влияние температуры на параметры оптоэлектронного динамического запоминающего устройства // ДАН Беларуси. 1996. Т. 40, № 4. С. 54–58.
2. *Коростик К. Н., Поляков А. В.* Математическая модель для разработки оптоэлектронных динамических запоминающих устройств с заданными параметрами // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2000. № 3. С. 110–115.
3. *Коростик К. Н., Кузьмин К. Г., Поляков А. В.* Температурная стабильность частоты рециркуляции в замкнутом оптоэлектронном контуре с инжекционным лазером-излучателем // ИФЖ. 1998. Т. 71, № 4. С. 680–684.
4. *Кузьмин К. Г., Поляков А. В.* Моделирование процесса хранения аналоговой информации в волоконно-оптическом запоминающем устройстве рециркуляционного типа // Вестник Белорус. гос. универ. Сер. I. 2000. № 1. С. 29–33.
5. *Коростик К. Н., Кузьмин К. Г., Поляков А. В.* Влияние импульсного нагрева активной области инжекционного лазера на динамику хранения импульсной последовательности в оптоэлектронном рециркуляционном контуре // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 2. С. 93–97.
6. *Поляков А. В.* Влияние температурных и динамических эффектов в полупроводниковом лазере на рециркуляционное хранение информации // Оптический журнал. 2002. Т. 69, № 7. С. 28–32.
7. *Poliakov A. V.* Bit-serial opto-electronic delay-line memory // Electronical Engineering and Electronics: Materials 20th Int. Sc. Symp. of Students and Young Research Workers Vol. II, Zielona Gora: Technical University, 1998. P. 119–122.
8. *Кузьмин К. Г., Поляков А. В.* Исследование стабильности временных параметров волоконно-оптических рециркуляционных систем // Лазерная физика и спектроскопия: Материалы IV Междунар. науч. конф. Ч.2. Гродно: ГрГУ, 1999 г. С. 259–261.
9. Патент РБ №4636 Козлов В. Л., Чубаров С. И. Оптоэлектронное запоминающее устройство рециркуляционного типа. 2002 г.
10. Патент РБ по №4388 Козлов В. Л., Чубаров С. И. Устройство измерения длины волны когерентного оптического излучения. 2001 г.
11. *Kozlov V. L., Chubarov S. I.* Sensor for control and stabilization of laser wavelength // Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE 2000: VI Konferencja Naukowa, Gliwice, Poland: Instytut Automatyki, 2000. P. 383–385.
12. Прецизионный волоконно-оптический датчик на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы / К. Г. Кузьмин, И. А. Малевич, А. В. Поляков, С. И. Чубаров // Измерительная техника. 1999. № 7. С. 32–35.
13. *Поляков А. В.* Рециркуляционный волоконно-оптический датчик температуры // Измерительная техника. 2002. № 4. С. 40–43.
14. *Кузьмин К. Г., Поляков А. В., Чубаров С. И.* Метрологический анализ волоконно-оптических датчиков рециркуляционного типа // Измерительная техника. 2001. № 2. С. 24–27.
15. *Поляков А. В., Чубаров С. И.* Определение дисперсионных характеристик многомодовых оптических волокон рециркуляционным способом // Датчики и системы. 2002. № 3. С. 12–15.