

採 択 番 号 : 18101

課 題 名 : 光信号の低コスト受信・モニタリングのための小型光位同期回路の研究開発

副 題 : 光電子集積技術を活用した光位同期回路の小型化とシステム検証

(1) 研究開発の目的

現在の光通信ネットワークとしては、インターネットを流れる情報トラフィックが年率40%程度の増加率で伸び続けている。従来は光の強度変調を信号として伝送する光強度伝送方式が採用されていたが、昨今の大容量コンテンツの配信などを目的としたブロードバンドアクセスの普及により、光ファイバ通信システムの更なる超高速・大容量信号伝送能力の増大が要求された。その要求に答える形で、現在では光の位相情報を信号として伝送するデジタルコヒーレント光通信が普及し始めている。

デジタルコヒーレント光通信においては、送信側では前述した様に光を位相変調することによって信号を伝送している。一方、受信側では受信機内に内蔵された連続波局部発振光 (Local Oscillator: LO) と信号光とを干渉させることによって光位相情報を光電界複素振幅として検出して信号光の復調を行っている。この際、信号光およびLO光においては、検出原理上、信号光とLO光の位相差がそれぞれの光位相雑音によってランダムに変化するために雑音あるいは検出誤差がランダムに発生する。この位相雑音を除去するために、信号ビットレートよりもさらに高速なデジタルシグナルプロセッサ (DSP) を用いて信号成分の検出、雑音及び位相誤差の補正を行い、信号伝送を行っている。

一方で、デジタルコヒーレント光通信の信号品質の計測、モニタリングのためには、測定器側にもデジタルコヒーレント受信機と同様な構成が必要となる。具体的には50GSa/s以上の超高速A/Dコンバータ、超高速・超大容量DSPなど計測器に対する負荷は過大となり、現状では高額な測定器においても間欠的な計測しかできないのが実情である。

このような現状の下、計測技術と言う観点では、研究計画書(課題181)に上げられているとおりデジタルコヒーレント光通信において所要計算量の少ない光波形情報のリアルタイムな検出を実現する光計測技術の開発、およびリアルタイムに光伝送信号解析を行えるモニタリングシステムの開発が課題である。そのためには低消費電力、集積・小型なデジタル光位同期技術の開発および光伝送信号等のリアルタイムモニタリング機能の動作検証が必要である。このような技術が完成した暁には、デジタルコヒーレント光通信の光信号品質を常時、容易にモニタリングすることが可能となり、光ネットワークの安全運用に貢献できるものと思われる。

研究者らは、情報通信研究機構の委託研究事業、課題番号154「デジタル位相光制御による低消費電力高速コヒーレント伝送技術の研究開発」の開発を平成23年～平成25年の3年間にわたり行ってきた。ここでは超高安定LO光源、デジタル光位同期回路を開発し、LO光を長時間にわたって高安定に信号光に光同期させることを実現した。その結果、デジタルコヒーレント光通信受信機に搭載されているような超高速A/D、DSPを用いずに光測定器として簡便にデジタルコヒーレント信号光の信号処理、簡易的な計測に成功した。しかしながら課題としては下記の点がある。

- LO光が波長固定であったため、信号光の波長ドリフトに対する追従が難しく、ロックインレンジの拡大が必要

- ・光位相同期回路のロッキングレンジがあまり広くない

LO 光は超高安定性が必要であったため、吸収セルを用いて絶対光周波数を基準にして安定化を行った。しかしながら、信号光は必ずしもこのように高安定ではなく、信号光自身の光周波数がドリフトしていき、これに対応することが困難であった。光位相同期回路のロッキングレンジは、主に市販の光学部品、電気部品を用いたためにそれらの性能、特性に支配される。具体的には、光位相同期回路の核となる光 VCO (Voltage Controlled Oscillator) の周波数可変範囲が狭く、入力信号光の波長 (周波数) ドリフトに対して十分なロッキングレンジを確保出来ていない。その結果、信号光の波長ドリフトがロッキングレンジを外れてしまい、計測器あるいはモニターとして必要な雑多な環境での常時観測性を満たすほどの長時間安定性を得ることができなかった。

本研究では、これらの解決策としてシリコンフォトニクス (SiPh) などの光電子集積技術を用いた小型光位相同期回路技術の開発を実施する。LO 光源としては狭線幅、高安定であることはもちろんのこと、光通信の帯域内であらゆるチャネルに対応できるような波長可変光源とし、さらに光位相同期回路のロック時でも信号光のドリフトに追従するトラッキング機能を持つ。光位相同期回路の長時間安定動作を強固なものにするためには、光部品、電気部品の機能を持つ、光電子集積技術を開発する。光電子集積技術を用いてループ遅延を小さくすることにより、信号光・LO 光の位相雑音に対する耐性が向上し、光位相同期の安定化が可能となる。同時に、光位相同期システム全体のサイズを大幅に小型ができ、計測器としての実用性を大幅に向上することができる。光電子集積技術には新たに開発する光導波路、電気高周波部品、超高速 Ge-PD などが含まれ、集積化がなされる。さらに、これらの技術を集結しモニタリングシステムの構築を行う。モニタリングシステムにおいては 100Gbps 超級の QPSK 信号等の光信号をモニターする機能を有し、5-10 年後にアクセス系等で想定される伝送速度及び広い光周波数帯域利用に対応できるものである。

(2) 研究開発期間

平成 27 年度から平成 31 年度 (5 年間)

(3) 実施機関

株式会社アルネアラボラトリ<代表研究者>
沖電気工業株式会社
国立大学法人東北大学
日本電信電話株式会社
国立大学法人豊橋技術科学大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 700 百万円 (平成 29 年度 140 百万円)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究項目 1 : 光 PLL システムの研究開発

1. 高安定光 PLL 技術の開発 (沖電気工業株式会社)
2. 波長可変狭線幅 LO 光源の開発 (国立大学法人東北大学)
3. 光信号モニタリングシステムの開発 (株式会社アルネアラボラトリ)

研究項目 2 : 光 PLL 用光・電子デバイスの研究開発

1. 光集積デバイスの開発 (日本電信電話株式会社)
2. 電子集積デバイスの開発 (日本電信電話株式会社)

研究項目 3 : 光 PLL 用光・電子デバイスの研究開発

1. 光 PLL 用ゲルマニウムデバイスの開発 (国立大学法人豊橋技術科学大学)

(6) 特許出願、論文発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	11	3
	外国出願	0	0
外部発表	研究論文	4	3
	その他研究発表	39	10
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	2	2
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究項目 1 : 光 PLL システムの研究開発

研究項目 1-1 高安定光 PLL 技術の開発

平成29年度は、抽出した自律位相同期実現に関わる課題の整理と、課題解決に向けたハードウェア構成、アルゴリズム等を再考した。平成28年度までに検討した可変波長光源の波長制御法では、第一段階での疎調整アルゴリズムを実施し、第二段階で微調整アルゴリズムの実施を検討した。検討の結果、微調整に関わる部分ではビート周波数が従来の見積もりより高精度である必要があると判明した。そのために、一部構成、手順等を改良した。具体的には疎調整アルゴリズムが終了し、十分ビート周波数が低くなった後 (30MHz 以下)、位相誤差抽出と同じように誤差信号をデジタル化し、適切なフィルタリングを行った後に累乗アルゴリズムを実施して変調成分を除去する。その後、必要な精度を得るためのデータ長で FFT を行い、ビート周波数を検出し、その情報を可変波長光源制御回路へ入力することにより、よりきめ細かく波長制御を行う手法を提案した。可変波長光源の設定分解能不足となる場合も考慮し、一部アナログによる注入電流制御も検討した。

研究項目 1-2 波長可変狭線幅 LO 光源の開発

本年度は C バンド (1530~1565 nm) 全域で線幅 8 kHz 以下、出力強度 2 mW 以上、サイドモード抑制比 46 dB 以上、相対強度雑音 -130 dB/Hz 以下の特性を同時に満足するフル C バンド波長可変半導体レーザー装置のプロトタイプを 1 ユニットの小型筐体に収納した。また、本光源を LO として用いた光 PLL 実験を課題 1-1、1-3 と連携して実施し、光 PLL の基本動作を確認するとともに、自律光位相同期を実現する際の本光源の波長設定精度及びシステム全体の波長測定精度に関する課題を抽出した。

研究項目 1-3 光信号モニタリングシステムの開発

本年度は光信号モニタリングシステムに実装可能な光 PLL システムの性能および安定性向上を目的として研究項目 1-1 と共同で引き続き行った。光 PLL システムのレベルダイヤを見直し、小型化への改良などを行った。また、研究項目 2-2 で得られたサンプリング回路を評価し、単体評価では 195MHz クロックによる駆動時に Q 値が市販品よりも 6dB 以上優れている結果が得られた。この回路を実装することにより、さらなる性能向上が期待される。

光信号モニタリングシステムはこれまで個別に開発していた光 PLL システム、波長可変光源と光信号モニタリング部を連係動作させて、コンスタレーション波形をリア

ルタイムに観測することが可能になった。モニタリングのためのアプリケーションとして、コンスタレーション波形から Q 値と誤り率を表示する機能を追加した。ノイズ付加時の復調波形とコンスタレーション波形の Q 値比較を行った結果、ノイズ付加による Q 値の劣化をモニタリングしていることを確認した。

研究項目 2：光 PLL 用光・電子デバイスの研究開発

研究項目 2-1 光集積デバイスの開発

【目標】

OH およびその Ge-PD との集積については、H29 年度は、H28 年度に検討した集積技術を用いて SiON 導波路型 OH と Ge-PD の集積を実現する。

また、光回路の小型化に向けた Si 基板上への LO 光源集積については、H29 年度は、LD on Si の狭細幅化に向けて試作、評価を行い、100 kHz 以下の線幅を実現する。さらに、広帯域化、及び高速波長掃引機構の最適構成を示す。

【実施内容及び成果】

OH および Ge-PD との集積については、SiON-OH の 2 次試作を実施した。挿入損失、位相誤差等の仕様に対し、それぞれを満足する試作結果を得た。すべての仕様を同時に満たすためのパッシブデバイス試作と、SiON/Ge 集積時の特性変化を定量把握するための集積デバイス試作を開始した。

Si 基板上への LO 光源集積については、DFB レーザの特性改善が進捗し、ファイバ出力 4.6 mW、および、オンシリコンレーザとしては最高温度となる 130°C の発振を達成した。線幅は 100 kHz を超えていたことから、目標達成に向けた要因分析を進めた。

研究項目 2-2 電子集積デバイスの開発

【目標】

電子集積デバイスについては、H29 年度は、より高いボーレートに対応するための 40GHz 帯域の TIA 及びサンプリング回路を実現する。ループ実験で必要な利得（最低目標 10dB）の仕様を決定し、これを満たす TIA を実現する。さらに、利用するボーレートに最適な帯域が選択できる機能を実現する。

FE の実装については、H29 年度は、上記サンプリング回路単体 PKG 品を光 PLL のシステム検討に提供するとともに、受信 FE としてのモジュール設計を行い、これを試作する。

【実施内容及び成果】

電子集積デバイスについては、TIA 及びサンプリング回路の広帯域化を検討した。IC を試作した結果、両 IC で 40GHz 以上の帯域を確認した。また、TIA については、10dB 以上の利得と、帯域選択機能の原理的動作を確認した。

FE の実装については、光 PLL のシステム検討にサンプリング回路単体 PKG 品を提供し、良好な動作を確認した。また、TIA とサンプリング回路の一体集積チップを搭載した、受信 FE のプロトタイプ品を試作し、基本構成法を確認した。

研究項目 3：光 PLL 用ゲルマニウムデバイスの研究開発

① 光 PLL 用 Ge-PD の開発

Ge エピタキシャル成長装置の移設・調整の後、Ge 層の結晶品質の再現性を確認した。NTT 担当の OH と豊橋技術科学大学担当の Ge-PD の集積に向けた設計を行い、

相互が連携して試作を実施した（進行中）。当初掲げた数値目標のうち、受光効率 0.6 A/W 以上および暗電流 1 μ A 以下を達成しているが、動作周波数 40GHz 以上の目標達成に寄生抵抗の低減が必要なため、ドーピングプロファイルの見直しを行い、有用性を確認した。

② 暗電流低減

接合面積あたりの暗電流密度の数値目標 10 mA/cm² 以下（1 mA/cm² オーダー）を達成した。光 PLL 用 Ge-PD に応用すると、暗電流は約 0.01 μ A もしくはそれ以下まで小さくできることになる。成長後熱処理プロセスが特に重要であり、Si/Ge 界面での SiGe 混晶化による受光効率低下を抑制し、低暗電流を実現するための急速熱処理プロセスの開発を行い、フォトルミネセンス発光の増強により有用性を確認した。

③ 動作波長範囲の L バンド側への拡大

Si-on-Quartz ウエハ上の Ge 層において、引っ張り格子ひずみが増加する効果によりバンドギャップが 0.75 eV まで縮小することをフォトリフレクタンス法により確認した。光吸収端が 1.65 μ m 程度まで長波長化していることになり、GeSn 混晶を利用せずに L 帯受光が可能となる見通しを得た。フリースペース PD の試作を開始した。