

## 平成 27 年度研究開発成果概要書

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相同期回路の研究開発  
採 択 番 号 : 18101  
副 題 : 光電子集積技術を活用した光位相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相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、デジタル光位相同期回路を開発し、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、ロッキング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クングレンジは、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ク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ク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) アルネアラボラトリ、沖電気工業 (株)、国立大学法人東北大学、日本電信電話 (株)、国立大学法人東京大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 700 百万円 (平成 27 年度 140 百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発課題と担当

課題 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))
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 (アルネアラボラトリ (株))

課題 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))
2. 電子集積デバイスの開発 (日本電信電話 (株))

課題 3 : 光 PLL 用ゲルマニウム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 (国立大学法人東京大学)

(27-1)

(6) これまで得られた成果（特許出願や論文発表等）

|      |            | 累計（件） | 当該年度（件） |
|------|------------|-------|---------|
| 特許出願 | 国内出願       | 5     | 5       |
|      | 外国出願       | 0     | 0       |
| 外部発表 | 研究論文       | 0     | 0       |
|      | その他研究発表    | 7     | 7       |
|      | プレスリリース・報道 | 0     | 0       |
|      | 展示会        | 0     | 0       |
|      | 標準化提案      | 0     | 0       |

(7) 具体的な実施内容と成果

#### 課題1：光 PLL システムの研究開発

##### 課題 1-1 高安定光 PLL 技術の開発（沖電気工業（株））

平成 27 年度は、光 PLL システムに実装する位相誤差抽出アルゴリズム開発（動作クロック 400MHz 以下）とループフィルタ最適化（ループ帯域～1MHz）に取り組んだ。位相誤差抽出アルゴリズム開発では、デジタル及びアナログ処理の両面から検討を進め、いずれについても動作（サンプリング）クロック 100MHz で動作可能な構成を立案した。また、ループ帯域 1MHz で最適なループフィルタ構成と回路定数を算出し、80km 伝送評価において 20Gbps-QPSK 信号のエラーフリー復調、並びに 50Gbps-QPSK 復調の基礎動作を確認した。

本年度は、また、位相同期の長期安定化に不可欠な、信号光-LO 光間周波数離調の相殺アルゴリズム開発に取り組み、ピーク信号周波数の変化を基にした離調追跡アルゴリズムとカルマンフィルタを用いた離調推定アルゴリズムの 2 案を立案した。また、周波数離調耐性を拡大する別のアプローチとして広帯域 VCO（2GHz）を用いた光 PLL 回路を構成し、基本的な位相同期動作を確認した。

##### 課題 1-2 波長可変狭線幅 LO 光源の開発（国立大学法人東北大学）

本年度は 10 kHz 以下の発振線幅特性を有し、C バンド全域にわたって発振波長を可変できる波長可変狭線幅光源の開発に取り組んだ。SOA、波長可変誘電体多層膜光フィルタ、発振波長微調整用石英基板、ミラーから構成される共振器長約 64 mm の外部共振器半導体レーザを作製し、線幅 8 kHz 以下、出力強度 0 dBm 以上、サイドモード抑制比 46 dB 以上、RIN(Relative Intensity Noise)-130 dB/Hz 以下の波長可変狭線幅光源を実現した。本レーザでは誘電体多層膜光フィルタならびに波長微調整用石英基板をステッピングモータで回転させ、レーザ光の入射角度を変えることで広帯域な発振波長の可変特性を実現した。

##### 課題 1-3 光信号モニタリングシステムの開発（アルネアラボラトリ（株））

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 システムの構築・課題抽出を目的とし、課題 1-1 と共同で行った。前プロジェクトで構築した 20Gbps-QPSK 用光 PLL システムを立ち上げ、様々な基礎データ取得を行った。さらに、50Gbps システムに拡張し、動作確認を行った。また、長時間安定動作のために光受信部において偏波ダイバーシティ方式を採用し、偏波依存性の課題抽出、解決への知見を得た。

また、来年度構築予定の光信号モニタリングシステムの方式調査を行い、検討を行った。

#### 課題2：光 PLL 用光・電子デバイスの研究開発

##### 課題 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、H27 年度は SiON 導波路型 OH の設計とこれを実現する製造技術の開発を進め、単体試作デバイスにて OH としての基本動作を確認する。

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、H27 年度は、狭線幅 LD on Si の実現に向け、Si 基板導波路上に InP 導波路構造を作製する技術を確認する。また、レーザの単一モード・狭線幅設計とその検証を行う。

【実施内容及び成果】

OH および Ge-PD との集積については、SiON 導波路から構成される MMI 型 OH の初期設計を行い、OH としての基本動作を確認した。

Si 基板上への LO 光源集積については、製造容易性に着目した SiO<sub>2</sub> 表面回折格子を導入するレーザ構造の設計を実施、設計上は単一モード・線幅 100 kHz 以下が得られる見通しを得た。

課題 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、H27 年度は、デジタルコヒーレント通信で広く利用されている 32Gbaud DP-QPSK 方式に対応した帯域 22GHz の TIA 及びサンプリング回路を実現し、設計技術及び評価技術の検証を行う。

FE の実装については、H27 年度は、サンプリング回路単体 IC を実装する高周波 PKG の設計を行い帯域 22GHz の実現を目標とする。

【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回路構成を検討し、インタフェース仕様を整理するとともに、実際に IC を試作した。IC の評価により、TIA 及びサンプリング回路それぞれについて、22GHz を超える帯域を確認し、設計技術及び評価技術を検証した。

FE の実装については、サンプリング回路単体 IC を実装する高周波 PKG の設計を行い、帯域 22GHz 実現の見通しを得た。

課題 3：光 PLL 用ゲルマニウムデバイスの研究開発

課題 3 においては、「①光 PLL 用 Ge-PD の開発」、「②Ge-PD の暗電流低減」、「③Ge-PD の動作波長範囲の L バンド側への拡大」を目標に検討を進めた。

- ① 光 PLL 用 Ge-PD の開発に関しては、40GHz 動作する pin 構造の Ge-PD を設計し、Si 光導波路と集積した構造を試作した。所望の構造が得られ、特性評価を進めている。
- ② Ge-PD の暗電流低減に関しては、Ge 成長プロセスの改良を行った。緩衝層成長後の熱処理により暗電流を低減でき、10 mA/cm<sup>2</sup> の低い値を得た。
- ③ Ge-PD の動作波長範囲の L バンド側への拡大に関しては、上記の緩衝層成長後の熱処理により Ge 層の伸張ひずみが増す傾向があり、L バンド全域の受光には不足しているものの、受光域長波長化の可能性が示唆された。一層の伸張ひずみ導入のため、SiGe 層を応力源する新たな手法を着想した。