

## 平成 28 年度研究開発成果概要書

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相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、ロックインレンジの拡大が必要
- 光位相同期回路のロックイン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、光位同期の安定化が可能となる。同時に、光位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、これらの技術を集積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 (実施責任者 助教 葛西恵介)、日本電信電話株式会社、国立大学法人東京大学 (実施責任者 准教授 石川靖彦)

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 700 百万円 (平成 28 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 (国立大学法人東京大学)

## (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       | 7     | 2       |
|      | 外国出願       | 0     | 0       |
| 外部発表 | 研究論文       | 1     | 1       |
|      | その他研究発表    | 27    | 20      |
|      | 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

## 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28年度に実施した研究項目1-3との共同研究開発で、アナログベース光PLLシステム、デジタルベース光PLLシステムの動作評価比較を行った。その結果、アナログベース光PLLシステムでは、FPGAの動作クロックに制限されずサンプリング速度を高めることが可能であり、それにより性能をデジタルベース光PLLシステムに比較して向上させることが可能であることを確認した。また、懸案であった長期安定動作に関しては、光電圧制御発振器の発振帯域の広帯域化を図ることにより10時間程度の位相同期を実験的に確認した。同期はずれの原因はフロントエンドにおける偏波アライメントが不完全であることに起因すると考えられ、偏波ダイバーシティなどを用いた偏波無依存化により克服できる見通しを得た。また、自律位相同期システムに関しては、研究項目1-2及び研究項目1-3との連携動作を通して波長設定精度、設定時間、波長検出器の測定精度に関する課題を抽出した。

## 研究項目1-2 波長可変狭線幅LO光源の開発

本年度は前年度までに開発した狭線幅波長可変半導体レーザの発振波長高速スイッチング回路（粗調整）および広帯域連続掃引回路（微調整）の試作・評価を行った。デジタル信号処理回路で回転角を制御したステップモータを用いてレーザの波長可変フィルタ及び石英板を回転させることにより、1sec未満の高速な波長スイッチング動作と1GHz以上の広帯域なモードホップフリー周波数掃引を実現した。また本光源を用いて研究項目1-1、1-3との連携実験を行い、光PLLの基本的な動作を確認するとともに、光PLL自動ロック動作を実現する際の課題抽出を行った。

さらに本年度は波長可変ファイバレーザの開発に取り組んだ。利得媒質としてエルビウム添加光ファイバ、波長選択・可変素子としてファブリーペローエタロン及び帯域75GHzの波長可変フィルタを用いたファイバリングレーザを作製した。波長可変範囲はエタロンの波長可変範囲に制限されるものの、C-band全域で波長可変な高出力、狭線幅光源を実現した。

## 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と共同で行い、システムの安定化を達成し、さらなる高安定化への知見を得た。また、研究項目1-2とも連携し、自立位同期化への確認実験、課題抽出を行った。

光信号モニタリングシステムではシステム構築を行い、コンスタレーション波形観測を行った。現状では単独のシステムであるため、今後は研究課題1-1、1-2と連携したシステム全体の構築を行う。

## 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、H28年度は、SiON 導波路型 OH と Ge-PD を互いの単体特性を維持しつつ集積する技術を検討する。さらに SiON 導波路型 OH の特性改善を進め、まず単体で要求性能を実現する。

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、H28年度は、H27年度に実現した Si 基板導波路上の InP 薄膜上にイオン注入、熱拡散を用いて p-i-n 構造を形成し、LD on Si の単一モード発振を実現する。

#### 【実施内容及び成果】

OH および Ge-PD との集積については、試作した SiON-OH の特性分析を行った。要因切り分けを行い、特性改善に向けた 2 次試作を実施した。同時に SiON/Ge 集積プロセスのデバイス特性変化への影響を確認する為に、Ge/SiON 集積試作を開始した。

Si 基板上への LO 光源集積については、シリコン導波路上に横注入埋込み活性層と表面回折格子を形成した DFB レーザを作製し、室温シングルモード発振を実現した。

### 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、H28年度は、昨年度設計及び検証を行った帯域 22GHz の TIA 及びサンプリング回路を一体集積する検討を行う。受信 FE に実装した際に、両機能間の帯域劣化を最低限にするとともに、電気長を物理的に最短にすることを目標とする。

FE の実装については、H28年度は、サンプリング回路単体 IC を実装する高周波 PKG を試作し、同じく試作したサンプリング回路をこれに実装し、PKG を単位とする動作検証を行う。

#### 【実施内容及び成果】

電子集積デバイスについては、昨年度設計及び検証を行った TIA とサンプリング回路の構成を基本として、両機能間の帯域劣化の抑制と、電気長の短縮に有用な、一体集積回路の構成方法を検討した。実際に IC を試作し、良好なサンプリング動作を確認した。

FE の実装については、昨年度設計した高周波 PKG を試作し、作製したサンプリング回路を搭載して、その動作を検証した。PKG を単位とするサンプリング動作を確認した。

## 研究項目3：光 PLL 用ゲルマニウムデバイスの研究開発

研究項目3においては、「①光 PLL 用 Ge-PD の開発」、「②Ge-PD の暗電流低減」、「③ Ge-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 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  $\mu$ A 以下（動作温度 80°C）を達成した（それぞれ 1.0 $\pm$ 0.3 A/W@1.55  $\mu$ m および 0.3  $\mu$ A@80°C）。一方で、動作周波数は 40GHz 以上の目標値に対して 10GHz 程度であるため、主要因である寄生抵抗の低減を試みた。
- ② 接合面積あたりの暗電流（暗電流密度）の数値目標 10 mA/cm<sup>2</sup> 以下に対して、ほぼ目標値に匹敵する 10-20 mA/cm<sup>2</sup> を達成済みであるが、p 型 Si 層上に Ge pin PD

(28-1)

を形成した場合に限定されていた。n 型 Si 上でも約 30 mA/cm<sup>2</sup> の低暗電流の PD を実現した。

- ③ Ge-PD へ引っ張りひずみを導入することで L バンド（長波長）側への動作波長範囲拡大を試みた。圧縮ひずみを有する SiGe キャップ層を用いる方法と SOQ（Si-on-Quartz）ウエハを用いる2種類の方法を検討し、両者ともにフォトルミネセンス発光ピーク（吸収端波長に相当）の長波長シフトを観測した。