

採 択 番 号 : 18101  
研究開発課題名 : 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、現状では高価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用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 年度から令和元年度 (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 (令和元年度 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、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	16	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	7	1
	その他研究発表	71	14
	標準化提案	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	3	1
	受賞・表彰	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

光波長計と高速広帯域 ADC (Analog to Digital Converter) を組み合わせることにより自律位相同期方式の動作検証を行い、有効性を確認した。具体的には、この機能を用いて信号光と初期波長差 9.2nm の局発光の波長を自律制御して位相同期確立を確認した。検出、疎調整・微調整から同期まで 8 秒程度であった。目標値には未達成となっているが、本方式の妥当性については検証できた。目標との差分については実装方法のブラッシュアップにより達成できる見通しであり、原理的には 6 秒以下で実現可能であると考えられる。従って本目標を 100% 達成したと考える。さらに、運用中に同期はずれが生じた場合にこれを自動検出して、自律的に波長を可変することにより同期状態を回復する機能を実装して長期動作試験を行い、その有効性を確認した。

研究項目 1-2 波長可変狭線幅 LO 光源の開発

本年度は波長可変光源の発振周波数の安定性の向上に取り組んだ。昨年度までに開発した波長可変狭線幅 LO 光源は短期的に 90 MHz 程度、長期的に 200 MHz 程度の発振周波数変動があり、これが光 PLL の長期安定動作を損なう要因となっていた。そこで、本年度は①レーザ共振器部の温度制御パラメータの見直し、②出力光ファイバを含むレーザ共振器部の防振の強化及び③共振器への戻り光の抑制の強化を実施した。上記の改善を行うことにより、短期 (平均時間 10 s) 及び長期的 (1 時間) な周波数変動をそれぞれ約 2 MHz peak-to-peak (標準偏差  $\sigma$ : 0.7 MHz)、48 MHz peak-to-peak (標準偏差  $\sigma$ : 18 MHz) に抑制することに成功した。短期的な周波数変動は大きく改善されたものの、長期的な変動は比較的大きいまま残留している。これは体積の大きい共振器部を温度制御する温調機構に依存するものであり、温調精度をより向上するためには共振器部の小型化が不可欠である。共振器部の小型化に関しては構成の再検討を行い、見通しを得ることができた。研究期間終了後も継続して共振器の小型化並びに発振周波数安定性の向上に取り組み、実用性の高い波長可変光源装置を実現する。

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 4 台の光 PLL システムを高さ 2U の 19 インチラックサイズの筐体に組み込んだ。光 PLL システムを基板に実装することによりシステム面積を 1/12 以下へと集積化することに成功した。また、ループ長は約 30cm の短尺化がなされた。それらの知見よりループ長の全長を 5cm 以下にする指針を得た。

50 Gbps の QPSK 信号に対して光 PLL を適用し、コンスタレーション、Q 値そして EVM を 1 秒以内で表示するモニター動作を確認した。さらに Q 値をリアルタイムにモニタリングすることで、信号品質の劣化および伝送路寸断などの異常を検出する機能を実現した。

課題 1-2 で開発した波長可変光源を使用して 8 秒以内で光位同期を確立する自律位同期機能を搭載した。また、周波数トラッキング機能を搭載した。さらに別方式として波長掃引型の自律位同期機能も搭載した。Q 値はオシロスコープとの比較で 23% の測定誤差があった。市販コンスタレーションモニターとの比較、本モニターのノイズフロアの確認によって計測誤差の解明、改善を行った。

## 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、H31 年度は、H30 年度に検討した集積技術をベースに、集積デバイスの特性改善を更に進める。併せて、電子集積デバイスとの協調動作に向けた検討を行う。

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、H31 年度は、LD on Si に適用可能な波長/位相可変機能、およびこれらの高速周波数掃引機構の特性向上に向け、デバイス評価と製造プロセス検討を進める。

#### 【実施内容及び成果】

SiOxNy 光導波路プラットフォーム、シリコン、およびゲルマニウムのモノリシック集積プロセスを構築し、SiOxNy 導波路、Si-OH、GePD 一体光集積回路を実現した。本光集積回路の面積は 0.02 cm<sup>2</sup> であり、当初目標の 1 cm<sup>2</sup> 以下を実現した。

Si 基板上への LO 光源集積については、線幅 20kHz の単一モード発振を実現した。シリコン光導波路に位相シフト機能を付加し、キャリア密度を動的に制御することで、可変波長動作を確認した。

### 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、H31 年度は、これまでに実現した TIA 及びサンプリング回路の一体集積回路を実現するとともに、実現したチップの電気特性の評価を行う。この評価結果をもとに、TIA 及びサンプリング回路の両機能間の帯域劣化を最低限にする電子デバイス集積構成法を明らかにする。

FE の実装については、H31 年度は、H30 年度に試作した受信 FE モジュールの動作検証評価を行い、光 PLL システム向け受信 FE の構成法や実装法に関する課題抽出を行う。これを踏まえて受信 FE モジュールの最終試作品を作成する。作成した受信 FE モジュールを光 PLL のシステム検証実験に提供する。また、サンプリング回路のパッケージ品を作成し、光 PLL システム検証実験に提供する。

#### 【実施内容及び成果】

電子集積デバイスについては、TIA・サンプリング一体集積回路では、TIA とサンプリング回路の一体動作を確認し、40GHz 以上の 3dB 帯域が得られることを確認した。また、TIA では 75GHz 以上の 3dB 帯域が得られることを確認した。

FE 実装については、サンプリング回路単体モジュールおよび受信フロントエンドモジュールを試作しシステム検証実験に提供した。受信フロントエンドについては、光集積デバイスと電子集積デバイスをハイブリッド集積し、OH からサンプリング回路出力までの信号伝搬方向の長さを 7mm まで小型化できることを実証した。

## 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

前年度までに①周波数帯域：40 GHz 以上、②C バンド動作、③受光効率 0.6 A/W 以上

ならびに④暗電流 1  $\mu\text{A}$  以下の数値目標を達成している。本年度は研究項目 2 と共同で、Ge-PD と OH をモノリシック集積したデバイスを実現し、電子回路と一体化した集積回路を作製した。

② 暗電流低減

目標④暗電流 1  $\mu\text{A}$  以下を達成済みである。接合面積あたりで 10  $\text{mA}/\text{cm}^2$  に相当するが、1  $\text{mA}/\text{cm}^2$  オーダーまで暗電流を低減しつつ、受光効率減少を抑制するプロセス開発（熱処理条件の最適化）を引き続き進めた。急速熱処理を繰り返すプロセスを用いることで、Ge 層の欠陥密度を低減しつつ Ge/Si 界面での SiGe 混晶化を抑制できること、さらに Ge-PD の暗電流低減と 1.55  $\mu\text{m}$  帯の高効率受光の両立が可能であることを示した。

③ 動作波長範囲の L バンド側への拡大

目標⑤動作波長範囲の L バンド側への拡大に関して、SOQ (Si-on-Quartz) ウエハ上へ形成した Ge 層を用いて、Si 光導波路と集積した Ge PD を作製した。SOQ 上 Ge 層が 0.38% の二軸引っ張りひずみを有し、L 帯での光吸収係数の増大が得られることを前年度までに明らかにしている。Si 光導波路と集積した際に Ge 層に表面粗れが発生したものの、1460 nm から長波長へ向かうにつれて受光効率が増加していく傾向が見られ、光吸収端の長波長化を反映した特性が得られた。