

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 17 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860046

研究課題名(和文)大容量・極低消費電力ネットワークに向けた高速・高安定・高精度波長変換器の研究

研究課題名(英文) Research of a high-speed high-stability high-accuracy wavelength converter for large-capacity ultra-low-power networks

研究代表者

加藤 和利 (Kato, Kazutoshi)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・教授)

研究者番号：10563827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：波長可変レーザの波長変化のための高速な電流駆動回路を開発し5ナノ秒で電流値を上昇させることに成功した。また波長変化はレーザ共振器内の物理現象の時定数に最適なフィードバック制御パラメータを、制御理論に即して導出し、さらにフィードフォワード制御を加算することで波長要求精度 $\pm 1\text{GHz}$ 以内に瞬時に収束する波長安定化法を実現した。これら二つの技術により波長可変レーザを制御して、20ナノ秒での波長安定化を実現した。さらに波長可変レーザを用いて波長変換器として波長1540～1560nmの波長範囲で50ナノ秒以下での波長安定性を実証し、目標としていた高速・高精度波長変化およびこれを用いた波長変換器を実現した。

研究成果の概要(英文)：Two key technologies are developed. One is a high-speed laser current drive circuit which has a very short rise-time of 5 ns. The other is a laser current control algorithm consisting of the feedback control with an appropriately deduced control parameter and the feedforward control, which realizes wavelength stability within $\pm 1\text{GHz}$. With these two technologies, the wavelength of the laser can be stabilized within 20 ns. Moreover, the wavelength converter made of the laser has a stable operation within 50 ns at a wavelength range between 1540 nm and 1560 nm.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：波長可変レーザ 波長変換器 フィードバック制御 フィードフォワード制御

1. 研究開始当初の背景

情報通信の多様化、大容量化が急加速で進展し、データトラヒックは指数関数的に増大の一途をたどっている。伝送の光化による大容量化、低消費電力化はすでに大きく進展してきた。例えば日本の基幹伝送ネットワークにおいては40ギガビット毎秒の信号を40波の波長多重によって1.6テラビット毎秒を伝送することが可能となっている。この波長多重技術はさらに進化しネットワークの各ノード(=拠点)で任意の波長を送受信する光アドドロップネットワークが県内ネットワークなどに導入され、またデータセンタなど通信トラフィックが集中しかつ極端に変動が大きなネットワークへのブレイクスルー技術として研究が開始されている。現状の波長多重技術や光アドドロップ技術においては、割り当てられた波長でノード間を接続するいわゆる波長パスが光ファイバネットワーク内に多数存在しており、送受信に使う波長を切り替えることで物理的には一つの光ファイバネットワーク内を論理的には多数のパスを張ることができるというものである。

上記の技術によって情報通信の大容量化に関しては当面技術的には見通しが立っているが、一方でノードにおいて大容量の情報をその配下の小拠点へ分配する技術がボトルネックとなっている。すなわちノードではその配下へ行先ごとに情報を振り分けるために、有限の長さ(=有限の時間)の packets 化された信号を高速に経路切り替えする必要があるが、たとえば40ギガビット毎秒の信号の切り替えには極めて大きな消費電力の高周波信号スイッチ回路を用いなければならないといった技術の限界に直面している。この課題を解決しようと北米、欧州、日本を中心に光によるナノ秒レベルのスイッチングの研究が進められている¹⁾。研究されている方式は主に二つあり、一つは半導体導波路の屈折率やゲインを切り替えることで経路を変えるもの、もう一つは波長変換器で波長を変化することでその後接続した光フィルタ波長分配器を透過する光の出射方向を切り替えるものである。なおMEMS型光スイッチはマイクロ秒以下の切り替えができないため本分野では対象外である。

これら二つの技術のうち、前者の半導体導波路を使う方式は導波路規模の比較的小さい10経路以下の切り替えに有効であると考えられている。一方、大容量通信に必要な10経路以上の切り替えには一つの波長変換器と一つの波長フィルタで構成される後者の方式に圧倒的なメリットがある。すでに応募者はこの方式において世界で初めて1テラビット毎秒のネットワークにおける経路切り替え実証を

行っている。

実際の packets 化された信号を packets ごとに経路を切り替えるためには波長変換器のナノ秒領域での瞬時波長安定化が必要である。すなわち波長変換器を構成するキーデバイスである波長可変レーザの瞬時波長安定化が大容量通信における経路切り替えのブレイクスルーである。しかしながら波長可変レーザは電流の変化により波長を変えるため、切り替えに伴う電流の変化が引き起こす回路の過渡応答、電流変化によるレーザでの発熱量変化が生じ、これらの時定数がマイクロ秒以上と遅いため、ナノ秒領域で波長を安定化させることができなかった。

本研究では、波長切り替え時に高速光検出器で瞬時に波長を検出し、検出した波長情報から高速波長フィードバック制御回路を介して瞬時にレーザの電流値を制御してナノ秒領域での波長安定化する波長変換器およびこれと波長分配器を組み合わせた大容量光スイッチを実現することを目的とする。本研究では波長可変レーザに加えて高速光検出器もキーデバイスとなるが、これは応募者が研究実績として有する高速フォトダイオード(1999年当時世界最高速)の成果を活用する。

2. 研究の目的

通信ネットワークの抜本的な大容量化、極低電力化のためには、光信号を光のままスイッチングすることで膨大な電気信号の処理を省くことができる光スイッチが必要であるが、従来の光スイッチは短時間での安定化が不可能であり、ネットワークにおいては単に光パスを切り替えるという静的動作に限定して使われ従前のネットワークを改善するだけの機能にとどまっていた。本研究では応募者が有する高速フォトダイオード技術、高速制御技術を用い、また応募者が過去に在籍・共同研究していたNTT研究所の波長可変レーザ技術を融合することで、ナノ秒領域で動作する光スイッチングを実現するための高速・高安定・高精度波長変換器を発明、動作実証し、これによって将来の大容量化、極低電力ネットワークの可能性をハードウェアの立場で明らかにする。

3. 研究の方法

将来の革新的極低電力ネットワークのための基盤技術である大容量高速光スイッチシステム実現に向けて、本研究では光スイッチシステムの二大構成要素である波長変換器と波長分配器のうち、技術のボトルネックとなっている波長変換器について、高速化、高安定化、高精度化の研究を行う。波長変換器の技術構成要素としては、波長可変レーザ技術、高速波長検出技術、高速波

長フィードバック技術がある。このうち波長可変レーザ技術は応募者も共同研究者の一人となっており世界でもトップの技術を有し実際の光ネットワークへの導入実績がある NTT 研究所から協力を得て、最先端の波長可変レーザの提供、駆動方法、解析方法の議論を行う。本研究では応募者がすでに開発した 100GHz 級高速フォトダイオードを用い、高速波長検出と高速波長フィードバックに焦点を置き、これらと波長可変レーザ技術との融合によって、光と電気のそれぞれのメリットを最大限に生かした高速・高安定・高精度波長変換器を実現する。

波長変換器の瞬時波長安定化のために必要な三つの要素技術およびこれらを統合した波長変換器の研究の進め方を以下に述べる。

(1)高速波長検出

レーザ波長と基準波長を同時に高速フォトダイオードに入力することで波長差と同じ高周波電気信号が発生する。この高周波電気信号の処理に無線信号処理技術を初めて適用し、電子回路による 50 ナノ秒以下の波長検出を実現する。

(2)高速波長フィードバック制御

従来の電流による制御または温度による制御ではなく、電流制御回路の短い時定数と温度制御回路の長い時定数とを組み合わせた 20 ナノ秒以下の瞬時応答かつ分以上の安定な波長フィードバック回路を実現する。またフィードバック制御アルゴリズムとして電流と温度など複数の変数を持つフィードバックループ最適の構成方法を確立する。

(3)高速・高安定・高精度波長変換器

上記三つの成果を統合して、最終的には波長切り替え直後のナノ秒領域(1 ナノ秒~100 ナノ秒)で高精度で安定した波長を出力する波長変換器の動作を実証する。具体的には光ファイバ通信で用いられる波長 1540~1560nm の波長範囲で入力光を任意の波長へ変換し、かつ変換後の波長をナノ秒領域で高安定・高精度な波長切り替えを行う波長変換器および大容量高速光スイッチを実現する。

4. 研究成果

研究期間内に以下の成果があり目標としていた高速・高精度波長変化およびこれを用いた波長変換器を実現した。

(1) 高速波長検出

波長変換に用いる波長可変レーザの波長はその電流値によって変化させることから、瞬時に数百ミリアンペアという比較的大きな電流を高精度に制御する回路が必要である。本研究においては、カレントミラー形式を用いた高速な電流駆動回路を開発し 5 ナノ秒で電流値を上昇させることに成功した。この駆動回路を用いて波長可変レーザの波長変化を行った。波長可変レーザからの出射光をマッハ・ツェンダ干渉計に透過

させその創価強度の時間変化をサンプリングオシロスコープで観測することにより、分解能 1 ナノ秒での波長検出を実現した。

(2) 高速波長フィードバック制御

半導体レーザの波長変化はレーザ共振器内の複数の物理量変化によって生じるがそれぞれの物理現象の時定数が大きく異なるため最適な制御パラメータを見つけることが困難であった。本研究では部分マッチング法を用いて制御理論に即したフィードバック制御パラメータを導出し、さらにフィードフォワード制御を加算することで波長要求精度 $\pm 1\text{GHz}$ 以内に瞬時に収束する波長安定化法を実現した。これを上記(1)で述べた高速電流制御回路の駆動アルゴリズムとして実装し、実際の波長可変レーザを制御して、20 ナノ秒での波長安定化を実現した。

(3) 高速・高安定・高精度波長変換器の実現

上述の波長可変レーザを用いて波長変換器としての波長変換特性を測定し、波長 1540~1560nm の波長範囲で 50 ナノ秒以下の波長安定性を実証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

H. Onji, S. Takeuchi, Y. Tatsumoto, N. Nunoya, M. Shimokozono, H. Ishii, K. Kato, "Fast wavelength switching with Tunable Distributed Amplifier (TDA-) DFB laser by using feedforward control technique," Japan. J. Appl. Phys. Nov. 2014 (to be published).

[学会発表](計 7 件)

S. Takeuchi, H. Onji, N. Nunoya, M. Shimokozono, H. Ishii, K. Kato, "Wavelength stabilization of tunable lasers based on thermal-drift canceler," 18th Microoptics Conference (MOC) 2013, H20.

H. Onji, S. Takeuchi, N. Nunoya, M. Shimokozono, H. Ishii, K. Kato, "Acceleration of wavelength switching for tunable distributed amplification (TDA-) DFB lasers," 18th Microoptics Conference (MOC) 2013, H19.

武内翔太, 恩地裕和, 布谷伸浩, 下小園真, 石井啓之, 加藤和利, "デジタル制御熱ドリフト補償による波長可変レーザの波長安定化," 電子情報通信学会 2013 ソサイエティ大会, C-4-29.

恩地裕和, 武内翔太, 布谷伸浩, 下小園真, 石井啓之, 加藤和利, "フィードフォワード制御による TDA-DFB レーザの高速波長切替," 電子情報通信学会 2013 ソサイエティ大会, C-4-30.

佐伯淳, 武内翔太, 恩地裕和, 加藤和利, "光差周波を用いたフレキシブルグリッド

向け高精度レーザー波長安定化,” レーザー学会第 34 回年次大会.

佐熊一輝, 武内翔太, 布谷伸浩, 下小園真, 石井啓之, 加藤和利, ” 波長可変レーザーの最適フィードバック制御パラメータ設計,” 電子情報通信学会 2014 総合大会, C-4-21.

立本雄大, 恩地裕和, 武内翔太, 布谷伸浩, 下小園真, 石井啓之, 加藤和利, ” フィードフォワード制御による TDA-DFB レーザの 50ns 以下での波長切替,” 電子情報通信学会 2014 総合大会, C-4-22.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 6 件)

名称: デジタル制御システム

発明者: 加藤和利, 下小園真, 石井啓之, 布谷伸浩

権利者: 九州大学、日本電信電話(株)

種類: 特許

番号: 特願 2013-037729

出願年月日: 2013 年 2 月 27 日

国内外の別: 国内

名称: 波長可変レーザーシステム及びその制御方法

発明者: 加藤和利, 下小園真, 石井啓之, 布谷伸浩

権利者: 九州大学、日本電信電話(株)

種類: 特許

番号: 特願 2013-067206

出願年月日: 2013 年 3 月 27 日

国内外の別: 国内

名称: 高速波長変化モニタおよびこれを用いた光遮断装置

発明者: 加藤和利, 下小園真, 石井啓之, 布谷伸浩

権利者: 九州大学、日本電信電話(株)

種類: 特許

番号: 特願 2013-097119

出願年月日: 2013 年 5 月 2 日

国内外の別: 国内

名称: 高精度光周波数安定化法および高精度光周波数安定化装置

発明者: 加藤和利, 下小園真, 石井啓之, 布谷伸浩

権利者: 九州大学、日本電信電話(株)

種類: 特許

番号: 出願手続き中

出願年月日: 2014 年 4 月 予定

国内外の別: 国内

名称: 極値検出器

発明者: 加藤和利, 下小園真, 石井啓之, 布谷伸浩

権利者: 九州大学、日本電信電話(株)

種類: 特許

番号: 出願手続き中

出願年月日: 2014 年 5 月 予定

国内外の別: 国内

名称: 差周波発生器

発明者: 加藤和利, 下小園真, 石井啓之, 布谷伸浩

権利者: 九州大学、日本電信電話(株)

種類: 特許

番号: 出願手続き中

出願年月日: 2014 年 5 月 予定

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤和利 (Kato, Kazutoshi)

研究者番号: 10563827

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号: