

平成19年度 修士論文

超高速光ゲートの時間多重信号周波数スケーリング則の研究

学籍番号 0532017

大平 高志

電子工学科 光エレクトロニクス講座

指導教官 上野芳康 准教授

富田康生 教授

提出日 平成19年9月10日

概要

近年、通信回線を流れるデータはますます増加している。そこで、さらなる高速・大容量通信を実現するために、1本の光ファイバーに複数の波長の光信号を同時に伝播させる方式(波長多重通信)が現在採用されている。この方式を用いてネットワークを作ると、別々の方向から来た信号の波長が重なる場合がある。この方式では波長の違いによってチャンネルを区別しているので、同じ波長になってしまうとチャンネルを分離できない。このような場合、波長変換器によって片方の信号の波長を変換することで波長多重通信を実現している。DISC(Delayed-Interference Signal-Wavelength-Converter、遅延干渉波長変換器)光ゲートは電気信号にすること無く光信号の波長を変換するので高速な波長変換が出来る。これまでの研究は周波数を1つに固定しており、周波数スケーリング則の解明はまだなされていない。これを行うことで、さらなる高速化への足がかりになることが期待される。

DISC 光ゲートの出力を入力に帰還させると、パルス発生器が構築できる。このパルス発生器は、DISC 光ゲートへの入力パルスパワーより出力パルスパワーの方が強くなる増幅透過の状態にならないとパルスが発生しない。そこで、本研究ではスケーリング則の指標として DISC 光ゲートの信号パワー透過率に注目し、繰り返し周波数が 10.5GHz から 84GHz までの透過率を測定した。SOA は非線形性の強いものと弱いものの 2 種類を使用した。法則の裏づけのために透過率の理論解析も行い、測定結果と比較した。高速化のためにはパルス幅を狭くする必要もあるので、パルス幅を変えた時の透過率も調べた。そして、高周波でも増幅透過を達成させる方法を考えた。

その結果、DISC 光ゲートの透過率は入力信号パワーに対して上に凸の特性を示すことがわかった。これは SOA の種類によらず、計算結果でも同様の傾向を得た。SOA が非線形性の強いタイプで繰り返し周波数が 10.5GHz と 21GHz の時は最大値が 0dB を超え、増幅透過を達成できた。さらに、この最大値は SOA の種類に関わらず-0.4~-0.8 乗に比例した。パルス幅に対しては、透過率はほぼ比例することがわかった。

透過率を上げるために SOA への注入電流を大きくしたところ、透過率の最大値は SOA の種類によってそれぞれ 1.7 乗と 2.9 乗になった。この数値は、周波数やパルス幅にはあまり関係なかった。

1 台の SOA に注入できる電流は限られるので、より高い電流を注入するために SOA を 2 台カスケード接続した。すると、単体の時には出来なかった 42GHz での増幅透過を達成することが出来た。2 台の SOA の間にアイソレータを挟むことによって、さらに透過率を高めることが出来た。これにより、集積化した DISC-LOOP 型パルス発生器で繰り返し周波数が 40GHz のパルスを発生させる見通しが立った。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	2
2.1 将来の波長多重通信	2
2.2 DISC 光ゲート	5
2.2.1 DISC 光ゲートの特徴	5
2.2.2 DISC 光ゲートの原理	7
2.2.3 CW 光に対する利得	10
2.2.4 CW 光の非線形位相シフト量	11
2.2.5 信号の高周波化による DISC 光ゲートへの影響	13
2.3 DISC-LOOP 型パルス発生器	14
2.4 研究の目的	16
第 3 章 DISC 光ゲート実験と出力計算の方法	17
3.1 DISC 光ゲート実験の方法	17
3.2 DISC 光ゲート出力の計算方法	21
3.3 位相バイアスを動かした時の相互相関波形とスペクトル	22
第 4 章 SOA 単体での DISC 光ゲートの透過率	24
4.1 SOA 単体での DISC 光ゲートの透過率	24
4.1.1 AVANEX 製 SOA の場合	24
4.1.2 計算値との比較	28
4.1.3 CIP 製 SOA の場合	32
4.2 DISC 光ゲート透過率と信号パルス幅の関係	34
4.3 透過率最大値の注入電流依存性	39
4.4 透過率最大値の周波数依存性	45
第 5 章 SOA カスケード接続時の DISC 光ゲート透過率	48
5.1 SOA カスケード接続時の利得飽和特性	48
5.2 SOA カスケード接続時の DISC 光ゲート透過率	50
第 6 章 結論	55
謝辞	57

第1章 序論

DISC(Delayed-Interference Signal-Wavelength-Converter、遅延干渉波長変換器)光ゲートは、光信号の波長を変換するものである。電氣的な波長変換器は電氣信号の伝搬時に自由電子が原子に衝突することで起こる電子のドリフト速度の限界による制限を受ける。一方、DISC光ゲートを含めた全光波長変換器は波長を変換する際に光信号を一旦電氣信号にすることが無いので、高速な波長変換が出来る [1][2][3]。また、構造が簡単なこと[1]や入力パワーが小さくても動作することが利点として挙げられる。一旦電氣信号に変換する方式での伝送速度は 40Gbit/s が限界であるが、DISC 光ゲートならばその制限はなく、320Gbit/s での波長変換が達成されている[4]。

DISC 光ゲートは、内部の偏光板を回すことにより出力波形が変わる。光通信では、情報はパルスの形態で搬送波に載せられるので、出力波形はパルス列の状態でなければならない。パルスの形が崩れると情報が失われることになる。また、信号のパワーは強いほど雑音に強くなり、データの誤りが少なくなる。入力信号より出力信号のパワーの方を大きく出来れば、ネットワーク中の増幅器の削減にもつながる。さらに、DISC 光ゲートの出力を入力に帰還させて構築したパルス発生器では、ゲートへの入力パルスパワーよりゲートからの出力パルスパワーの方が強くなしないとパルスが発生しない。これらの理由から、本研究では出力信号のパワーを入力信号のパワーで割ったものをゲートの透過率と定義し、ゲート動作の評価方法として使用することにした。

出力波形がパルス列になっている場合、DISC 光ゲートの平均出力パワーはゲート内にある半導体光増幅器(Semiconductor Optical Amplifier、SOA)での利得と非線形位相シフト量によって決まる。利得を G 、非線形位相シフト量を $\Delta\Phi_{NL}$ とすると、

$$\text{出力パワー} \propto (G) \times (\sin^2 \Delta\Phi_{NL}) \quad (1.1)$$

である。

第2章 研究の背景と目的

2.1 将来の波長多重通信

近年情報化社会の進展と共に、ネットワークを流れる情報量(トラフィック)は年々増加している(図 2.1(a))。また、ブロードバンドの契約者数についても増加傾向を示しており、特に最近は通信速度の高い(100Mbps)FTTH の伸びが大きい(図 2.1(b))。これらのことからトラフィックの需要は今後も増加していくことが予想される。それに応えるために伝送容量を拡大していくことは必須の課題である。

光通信では、信号のパルス幅が十分に小さければ、パルスとパルスの間にもう一つパルスを入れることによりファイバーあたりの伝達容量を高めることが出来る。これを時間多重通信という(図 2.2(a))。しかし、パルス幅には限界があるので、伝送容量にも限界がある。そこでさらに伝送容量を高める手段の一つに、波長多重通信がある(図 2.2(b))。これは、一本のファイバーに複数の波長の搬送波による信号を同時に送る通信方式である。この方式で通信を行うためには、二方向からやってきた同じ波長の別々の信号を同じ方向に送る場合などで、搬送波の波長を変換しなければならない。波長多重通信ではチャンネルの違いを波長の違いで区別しているので、同じ波長に2つのチャンネルが重なってしまうと伝送後に分離できなくなるからである。現在の商用システムでは光信号を一旦電気信号にすることで波長変換している。電子のドリフト速度には限界があるので、伝送速度を上げると信号の伝達時間より周期の方が短くなってしまい、伝達しない。そこで電気信号にすることなく信号を別の波長の光に載せる全光波長変換器が研究されている。

全光波長変換器には様々な種類があり、信号光と被変換光の間で起こる非線形現象を使うものが多い。非線形現象としては、相互利得変調(Cross Gain Modulation、XGM)、相互位相変調(Cross Phase Modulation、XPM)、四光波混合[5]、差周波発生などがある。XGM や XPM を用いた方が後2つに比べて透過率が高い。また、非線形媒質として利用されているものには SOA、高非線形ファイバー[6]、変調器などが挙げられる。高非線形ファイバーを利用したものは、他の媒質に比べて非線形現象を起こすために必要なパワーが大きいので、消費電力が大きくなる。

その全光波長変換器の中の一つに DISC 光ゲートがある。

第6章 結論

本研究では、DISC 光ゲートの高速動作を目指すため、周波数スケールリング則を説明することにした。その指標として、DISC-LOOP 型パルス発生器ではパルス発生条件の一つとなる DISC 光ゲートのパルスの透過率を用いることにした。

まず DISC 光ゲートの透過率が入力信号パワーに対してどのような特性を持つのか調べたところ、上に凸の特性を示すことがわかった。これは SOA の種類によらず、また計算結果でも同様の特性を得た。SOA を変えて実験を行ったところ、透過率の大きさは非線形性の強い SOA の方が大きくなることがわかった。非線形性の強い SOA では、10.5GHz と 21GHz で増幅透過を達成した。

次に、DISC 光ゲートの透過率が周波数やカルサイトの遅延時間によってどうなるのかを調べた。その結果、透過率の最大値が周波数の-0.3~-0.8 乗に比例することがわかった。SOA の種類やパルス幅の違いによる傾きの違いはあまり見られなかった。また、遅延時間と透過率はほぼ比例関係にあることがわかった。これらの結果は、測定結果だけでなく計算結果でも同様の結果になった。

このように、周波数が高くなったりパルス幅が狭くなったりすると透過率が下がることがわかった。そこで、SOA への注入電流を増加させることで、透過率を増加させられないかと考えた。注入電流を変えて DISC 光ゲートの透過率を測定したところ、最大値は注入電流のべき乗に比例した。この傾きの大きさは周波数やパルス幅にあまり関係なく、SOA 自体の非飽和利得の注入電流依存性でほぼ決まると考えられる。非飽和利得でも傾きが小さい SOA#1 では透過率最大値は注入電流の 1.7 乗に比例し、非飽和利得でも傾きが大きい SOA#2 では注入電流の 3 乗に比例した。従来は出来ていなかった 42GHz での増幅透過に必要な注入電流を見積もることも出来た。

しかし、1 台の SOA に注入できる電流には限界があるので、SOA #2 を 2 台カスケード接続して、実質的に注入電流を増加させることにした。その結果、単体の時には出来なかった 42GHz での増幅透過を達成することが出来た。また、2 台の SOA の間にアイソレータを差し込むことにより、さらに透過率を高くすることが出来た。これにより、集積化した DISC-LOOP 型パルス発生器で繰り返し周波数が 40GHz のパルスを発生させる見通しが立った。

今後の課題として、さらなる高周波での DISC 光ゲート実験が挙げられる。まずは繰り返し周波数 84GHz、パルス幅 2ps でのカスケード接続時の透過率測定が考えられるが、単体時に成功しているので、これは問題なく出来ると思われる。しかし、その先の 168GHz となると、パルス幅が 2ps のままでは消光比が悪くなると考えられる。したがって、168GHz での DISC 光ゲート実験を行うためには、カルサイトの遅延時間が 1ps のときに幅が 2ps 程度のパルスしか測定できない問題を解決する必要があると考えられる。

そのほか、透過率最大値の電流依存性の結果が、パラメータを SOA#1 に合わせたのに

傾きが 4.5 乗になった問題もある。この問題を解決するためには、各注入電流における非飽和利得やキャリア寿命などのパラメータを測定する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、熱心に指導して下さい上野芳康准教授に深く感謝いたします。また、上野研究室博士後期課程3年の坂口淳さんには、実験装置の使い方を始め、様々な助言をいただき感謝しております。2005年度卒業の鈴木励さんや現在博士前期課程2年の中本亮一さんには DISC-LOOP 型パルス発生器について様々なことを教えていただき、御礼申し上げます。他の上野研究室の皆様にも、論文査読やセミナーなどを通じて、私が見えていなかった点を指摘していただくなど、研究を進めるに当たって大いに助けていただき、ありがとうございました。

参考文献

- [1] Yoshiyasu Ueno, Shigeru Nakamura, Kazuhito Tajima, Shotaro Kitamura, "3.8-THz Wavelength Conversion of Picosecond Pulses Using a Semiconductor Delayed-Interference Signal-Wavelength Converter (DISC)," IEEE, PHOTONICS TECHNOLOGY, VOL. 10, NO. 3, MARCH 1998
- [2] Shigeru Nakamura, Yoshiyasu Ueno, and Kazuhito Tajima "168Gb/s All-Optical Wavelength Conversion With a Symmetric-Mach-Zehnder-Type Switch", IEEE, PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol.13, No.10, OCTOBER 2001
- [3] Yoshiyasu Ueno, "Theoretically Predicted Nonlinear Phase Imbalance Requirement for Delayed-Interference Signal-Wavelength Converters (DISC)", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No5B, 2004, pp. L665-L668
- [4] Y. Liu, E. Tangdingga, Z. Li, H. de Waardt, A.M.J. Koonen, G.D. Khoe, and H.J.S.Dorren "Error-free 320 Gb/s SOA-based Wavelength Conversion using Optical Filtering", OFC 2006, PDP28
- [5] K. Schulze, M.N.Petersen, J.Herrera, F.Ramos, J.Marti, "Optimisation of 40 Gb/s wavelength converters based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier," Optics Communications, Vol. 276, No. 2, pp.158-160, 2007
- [6] Takuo Tanemura, Ju Han Lee, Dexiang Wang, Kazuhiro Katoh, and Kazuro Kikuchi, "Polarization-insensitive 160-Gb/s wavelength converter with all-optical repolarizing function using circular-birefringence highly nonlinear fiber," Optics Express, Vol. 14, No. 4, pp.1408-1412, February 2006
- [7] Yoshiyasu Ueno, Shigeru Nakamura, Kazuhito Tajima, "Nonlinear phase shifts induced by semiconductor optical amplifiers with control pulses at repetition frequencies in the 40-160-GHz range for use in ultrahigh-speed all-optical signal processing," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 19, No. 11, November 2002
- [8] J. Leuthold, C.H. Joyner, B. Mikkelsen, G. Raybon, J.L. Pleumeekers, B.I.Miller, K.Dreyer and C.A. Burrus, "100Gbit/s all-optical wavelength conversion with integrated SOA delayed-interference configuration", ELECTRONICS LETTERS, Vol.36, No.13, 22nd June 2000

[9] Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen, Soeren Lykke Danielsen, and Kristian E. Stubkjaer, “All-Optical Wavelength Conversion by Semiconductor Optical Amplifiers”, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY , Vol.14, No.6, 1996

[1 0] Rei Suzuki, Takashi Ohira, Jun Sakaguchi, and Yoshiyasu Ueno, “40-GHz mode-locked pulse generation with a new scheme of SOA-based pulse generators”, CLEO/QELS 2006, CMG5

[1 1] 鈴木 励、「半導体全光偏光変換を利用した 40GHz モードロックパルス発生の研究」電気通信大学大学院修士論文、2006 年 3 月

[1 2] 大平高志、坂口 淳、鈴木 励、上野 芳康、「半導体 DISC-Loop 型高周波光パルス発生器に利用する高速偏光変換器のパルス透過率」第 66 回応用物理学会学術講演会、2005 年 9 月、徳島大学、徳島市、Vol.3、P.1034、8a-T-16

[1 3] 大平高志、坂口 淳、鈴木 励、上野 芳康、「半導体 DISC-Loop 型光パルス発生器内部の全光変換透過特性の設計解析」第 53 回応用物理学会関係連合講演会、2006 年 3 月、武蔵工業大学、世田谷区、Vol.3、P.1045、22p-Y-10