

微小光共振器構造を用いた光非線形効果補償デバイス

～ ナノ構造の光デバイスで超高速光伝送の限界を打破する～

東京工業大学大学院

物理電子システム創造専攻博士課程 2 年

須田 悟史

1. はじめに

現在の IT 化に伴う高度情報化社会において、データ通信量は増加の一途をたどる。NTT の「フレッツ光」に代表されるように、光ファイバを使った通信はもはや欠かせない技術となっている。光ファイバは現在急速に普及しているブロードバンドの中で、速度・安定性からもっとも優れた通信回線であり、ユーザ端末を結ぶアクセス系においても、実用化されているものでは 100 Mb/s の速度を持つ。まさに高精細の動画を配信するブロードバンドの本命とされるサービスである。また、将来的にはビデオオンデマンドと言った大容量通信や図 1 のようなスーパーハイビジョンの時代が到来する事が考えられる。その増大し続ける膨大な情報量に伴い、アクセス系においてはギガビット/秒を超え、それを束ねる幹線系においてはテラビット/秒を超える、更なる光通信の高速化が期待されている。現在の幹線系では、1 本の光ファイバの中に何本もの違う波長の光を入れる事によって高速なデータ通信を可能にする WDM(Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重方式)というシステムを用いている。波長をひとつだけ用いる既存の光通信では、単一の光の波長での伝送速度を向上させる必要があり、大容量化に限界があった。最近ではさらに高密度化を進めた DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing : 高密度波長分割多重方式)の発展が著しく、1 波長当たり 40 Gb/s (1Gb/s : 1 秒間に 10 億個のデータを送信できる速度)の伝送容量を持つ光を違う波長を使って伝送する事によって 20 Tb/s を越える伝送量もすでに研究では実現されており、2015 年頃には数 10 Tb/s ~ 100 Tb/s 級 (1Tb/s : 1 秒間に 10 兆個のデータを送信できる速度)の超大容量通信トラフィックの処理が必要になると考えられている。1 Tb/s というのは新聞 300 年分の情報をわずか 1 秒で伝送する速度に匹敵する。イーサネットも 10 Gb/s が実用段階になり、100 Gb/s イーサネットも規格が検討され始めている



図 1. 現状のハイビジョン映像とスーパーハイビジョン映像の違い

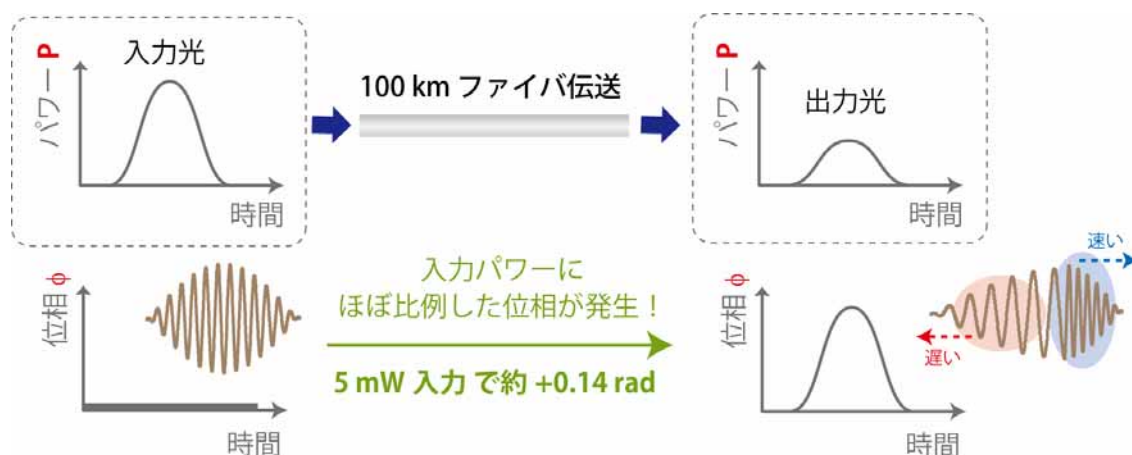


図 2. 非線形光学効果による入力波形のひずみ

しかし光伝送の高速化に伴ってはさまざまな問題点が発生する。高速化するためには非常に大きな光のパワー（単位時間当たりのパワー密度）を必要とし、図 2 のように光ファイバに入れる光のパワーが大きくなるとファイバ中の非線形光学効果と波長分散というものによって伝送した波形が劣化して広がってしまう現象が起きる[1]。非線形光学効果とは、高いパワーでファイバ伝送を行った時にファイバを進む光が感じる屈折率が変化する現象の事である。入力パルスのピーク部分ではパワーが強いのでパルスの裾に比べると大きな位相差が発生している事になる。この現象は光のパワーに比例して、光ファイバの屈折率が減少する光カー効果として知られる。この屈折率の変化は位相変化を引き起こし、超高速・長距離伝送では信号伝送に致命的な影響を与える。また、伝送するパルスは実際には周波数（波長）帯域をもっており、ファイバ中を進む光の速度は波長ごとによって異なるため、遅延が生じる事によって波形が広がってしまう現象を波長分散と呼ばれる。超高密度化されたネットワークでは光の波長間隔が非常に狭くなっており、非線形光学効果と波長分散によって波形が歪む事によって隣り合う光と干渉し、信号として判別できなくなるため、非常に綿密な制御が必要となる。位相変化 $\Delta\phi$ は屈折率変化を Δn 、光の波長を λ 、ファイバの距離を L とすると、次の式で表される。

$$\Delta\phi = n \frac{2\pi}{\lambda} L$$

これまで、高速光伝送を実現するために、波長分散（波長による光速度の違い）を補償する光学的、電気的技術が確立されてきたが、これはあくまで非線形効果には無力な線形領域での補償技術である。40 Gb/s を越える高速化に伴い、前述した非線形光学効果による波形歪みが最大の問題として顕在化してきたが、非線形光学効果に対する補償技術は未開拓の研究領域であった。40 Gb/s を超える通信の長距離伝送化を可能にするためには波長分散の制御と光カー効果の制御の綿密な制御が必要となる。本研究では、ナノ構造の新規光デバイスの創成により、非線形光学効果の光領域での補償技術という新しい手法を提案し、超高速光ファイバ伝送での限界を打破することに挑戦している。

2. 光非線形補償デバイスの提案

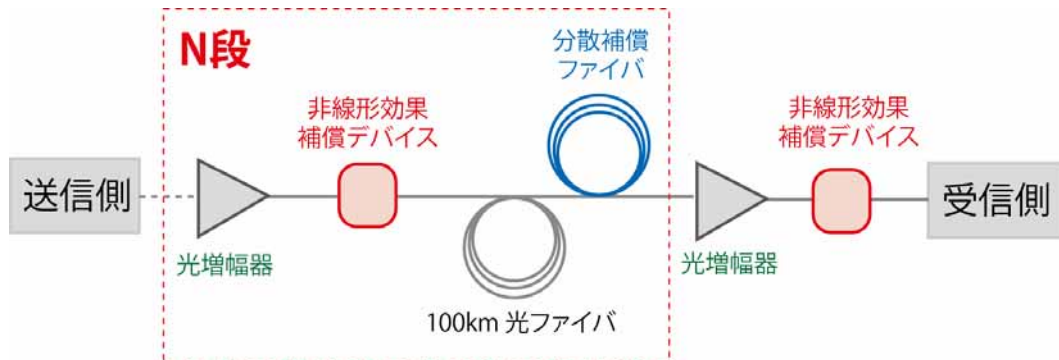


図 3. 補償技術を用いた中継システムの概念図

本研究では、光ファイバを伝送した際に非線形光学効果によって発生した位相差を打ち消す新しい位相補償技術の開拓に挑戦している。図 3 は非線形補償デバイスを高速光伝送に適用する概念図を示している。ここでは小型・低消費電力・二次元アレイ化に優れている垂直微小共振器構造を有した非線形エタロンに着目し、入射する光のパワーを制御し、非線形光学効果によって発生する位相差を逆の符号の大きさを持つ位相差で相殺する事で波形を整形する新たな光非線形補償デバイスを提案した。

非線形エタロンは図 4 のように上下 2 枚の多層膜反射鏡(DBR)で構成され、共振器内部に可飽和吸収体を含んだ構造を取る[2]。可飽和吸収体は光を吸収し、媒質中のキャリア密度が変化する事によって屈折率変化が起こり、位相差を発生させる事ができる媒質である。非線形エタロンに光が入射されると、共振波長の光は何度も共振器内部を反射し、可飽和吸収体を通過するため、可飽和吸収体で吸収される光パワーは増幅され、大きな屈折率変化を得る事ができる。入射する光のパワーの量によって可飽和吸収体で吸収される光の量も変わるため、屈折率を自在に変える事ができる。また、図 6 のように

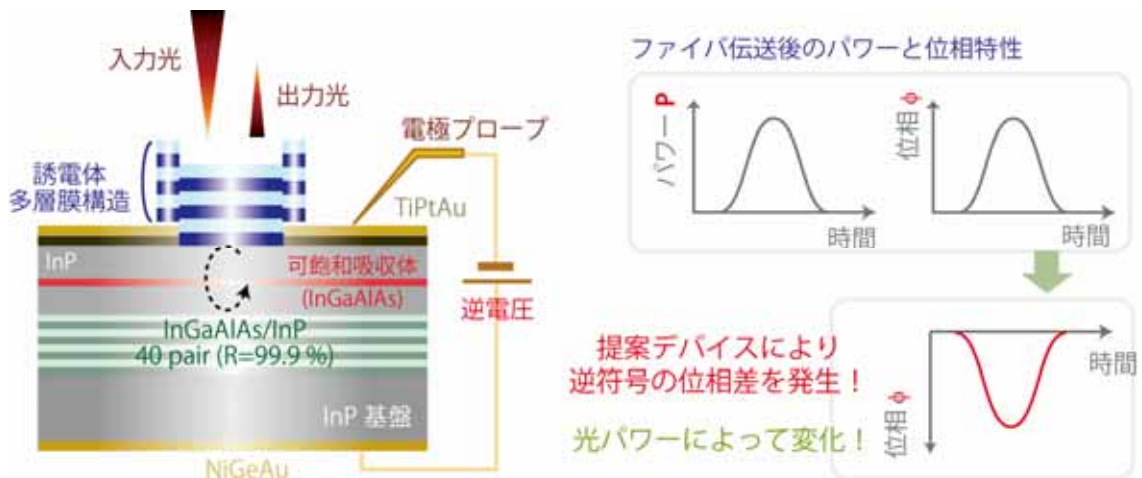


図 4: 提案する非線形効果補償デバイスと入力パワーによる位相曲線の変化

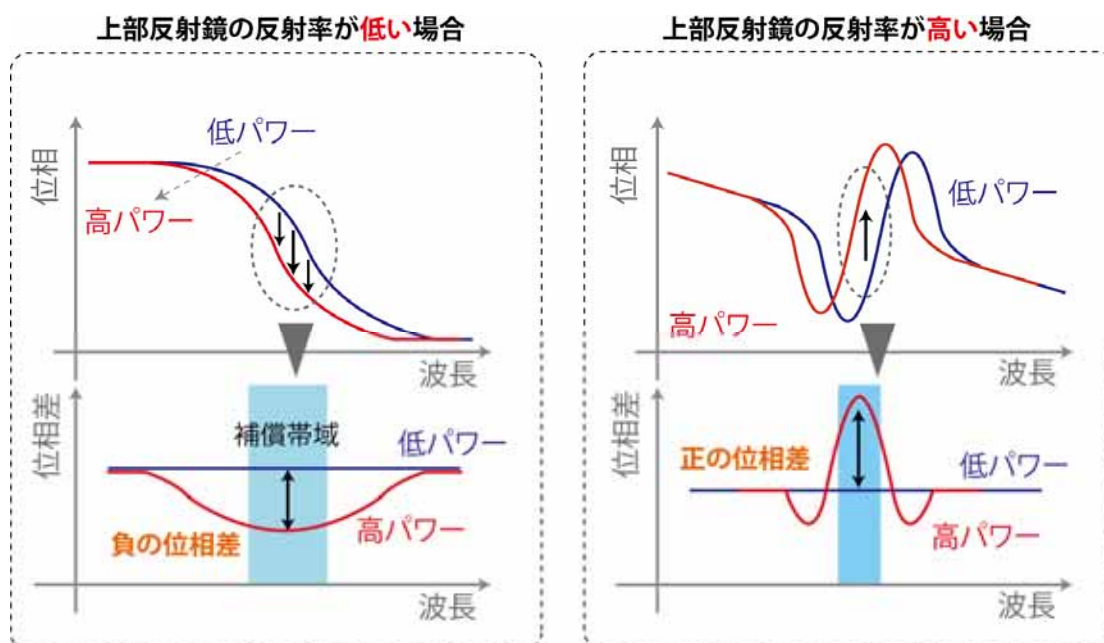


図 5: 上部反射鏡の反射率による位相特性の違い (反射率制御で正負両符号の位相差を作り出せる！)

上部の誘電体多層膜構造部分の反射率によって、補償帯域と位相量と位相の符号を調整する事ができ、状況に応じて柔軟な設計が可能である[3]。負の位相差は光カー効果で発生する位相を打ち消す事ができる。また、正の位相差はパルス圧縮技術やレーザ発振時の位相の乱れを補償するようなデバイスとして利用できる。以上から光の位相差を操る事で、伝送路の切り替えによって距離が変わっても、非線形光学効果によって発生する位相差を打ち消す事が可能となる。また、40 Gb/s を超えるような高速パルスに应答させるためには、キャリアの回復時間を十分に小さくしなければならない。キャリアの回復時間が遅いと、高速パルスが入ってきても可飽和吸収体が光を感じるまでの速度に遅延が発生するため、十分な効果が得られない。ここで、「位相」と「位相差」という言葉に注意して頂きたい。実際に利用する場合には「位相差」で論議する必要がある。「位相」は絶対的なものであり取る基準によってどのようにも変わり、「位相差」はある「位相」を基準とした相対的なものであり、「電位」と「電位差」のようなものである。

本研究の特徴は以下に集約される。

1. 超高速光通信における非線形光学効果を補償する新技術の開拓
2. 微小光共振器を用いた巨大光非線形効果の発現
3. 広帯域・高位相補償量を持つ位相補償光デバイスの実現
4. 超高速光ファイバ伝送への適用の検討

3. 高密度多重伝送に向けた新たな位相制御デバイスの設計・製作と測定

まず、理論解析を行う事により、実際に 100 km のファイバを伝送した際に発生する非線形光学効果によって発生する位相差を打ち消す事を考える。一般に利用されている光ファイバを用いて通信波長でもっとも良く使われている波長 $1.55 \mu\text{m}$ 、5 mW の光を 100 km 伝送させると非線形光学効果により、パルスのピーク部分では $+0.14 \text{ rad}$ の位相差が発生する[4]。これを非線形エタロンによって逆の符号の -0.14 rad の位相差を発生させる事で打ち消す。多層膜反射鏡は高屈折率材料と低屈折率材料を順番に積層し、層数によって光の反射率を操作する事が可能である。可飽和吸収体の解析には文献[5][6]を参考にした。今回のモデルと実験では上部多層膜反射鏡には、低温度依存性である誘電体材料 SiO_2 と Ta_2O_5 を 3 ペア（反射率 80 %）と Si と SiO_2 を 4 ペア（反射率 99.3 %）の 2 タイプのものを製作し、下部多層膜反射鏡として半導体材料である InGaAlAs と InP を 40 ペア積層したものを作成し、測定した。可飽和吸収体の厚さは 50 nm である。後者の反射率が高いものは一般的に VCSEL（面発光レーザ）と呼ばれている構造である。

図 6 に反射率のタイプが違う 2 種類のデバイスでの測定結果を示す[7][8]。理論通りの正と負両方の位相差が得られている事を実証した。測定には光コンポーネントアナライザを用いて群遅延を測定した。群遅延 ($\Delta\tau$) と位相 (ϕ) には、 $\Delta\tau = \delta\phi / \delta\omega$ の関係があるため、波長領域で積分する事で位相を逆算する事ができる。そのため、短波側で若干積分誤差が見られているが、コンポーネントアナライザの精度に依存するものである。

高密度多重方式で現在実用化されているもっとも高密度なものでは 1 波当たりの波長間隔が 0.4 nm (50 GHz チャンネル間隔) である。利用帯域としてはおよそ 0.8 nm (100 GHz) の幅を持つため、十分にカバーでき、わずか 50 nm というナノスケールの可飽和吸収体で 100 km 伝送の際に発生する非線形効果を補償する事ができることを実験的に示した[9]。

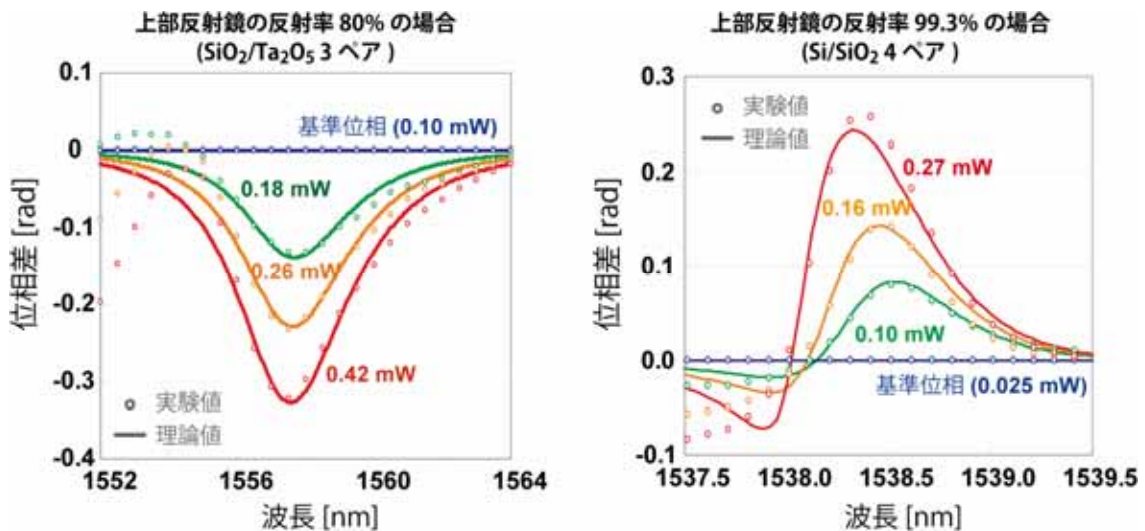


図 6: 上部反射率が異なる非線形エタロンの位相差特性

4. 非線形シュレディンガー方程式を用いた超高速光ファイバ伝送シミュレーション

ファイバを伝送するには、実際には符号を持った信号が連続で入る事になる。そこで、疑似ランダム信号(NRZ 信号)を仮定し、非線形シュレディンガー方程式を用いて波長分散と光カー効果の影響を考慮する事による波形劣化の影響と補償効果を解析してみた。最初に述べたが、波長分散は線形伝達関数で表す事できるため、逆の符号の分散で完全にパルスを整形する事ができ、この技術を分散補償技術と呼ぶ。

現在では LEAF(Large Effective Area Fiber)という種類のファイバが高速伝送には良く用いられており、LEAF を用いて 500 km 伝送 (図 3 にて $N=5$) させた時のアイパターン評価を図 7 に示す。アイパターンとは出力波形を中央で折り返したような波形であり、伝送波形劣化の指標のひとつとして良く用いられている。パルスが広がればアイ(眼)はつぶれていき、特性が劣化している事が分かるようになっていく。図 7 の左図は 10 Gb/s の伝送速度での波形である。入力パルスのピークパワーは 5 mW、ボトムパワーは 0.5 mW とした。10 Gb/s 程度の伝送速度であれば、分散補償を行えば光カー効果による影響はほとんど無視できる事が良く分かる。一方、中央図は 40 Gb/s における伝送波形であり、分散補償を行ってもアイはややつぶれており、波形が劣化している事が分かる。そこで、提案した本デバイスを挿入すると、図 7 右のようにアイが開き、波形劣化の影響が改善されている事が分かる。40 Gb/s の伝送速度において、提案デバイスを考慮した時と考慮しない時では+3.5 dB の消光比の改善が見られている。このアイパターンは構造の最適化により更なる改善が期待できる[10]。

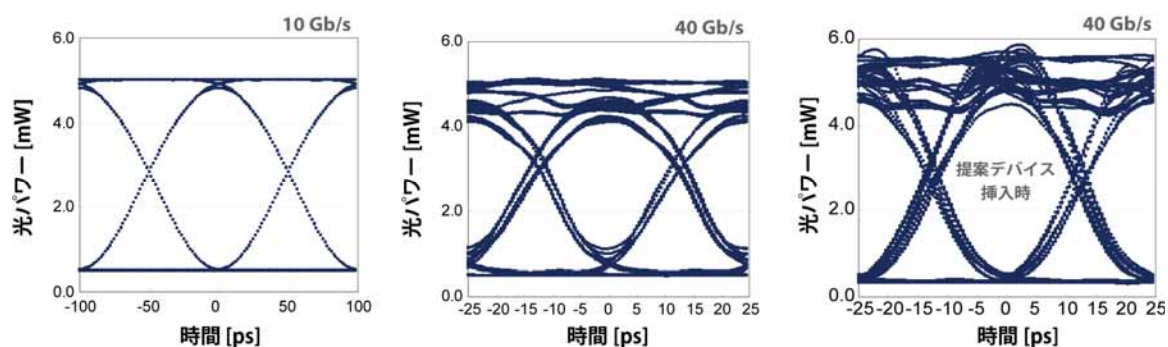


図 7. 疑似ランダム信号送信時のアイパターン評価

5.非線形位相シフトの超高速時間応答の測定

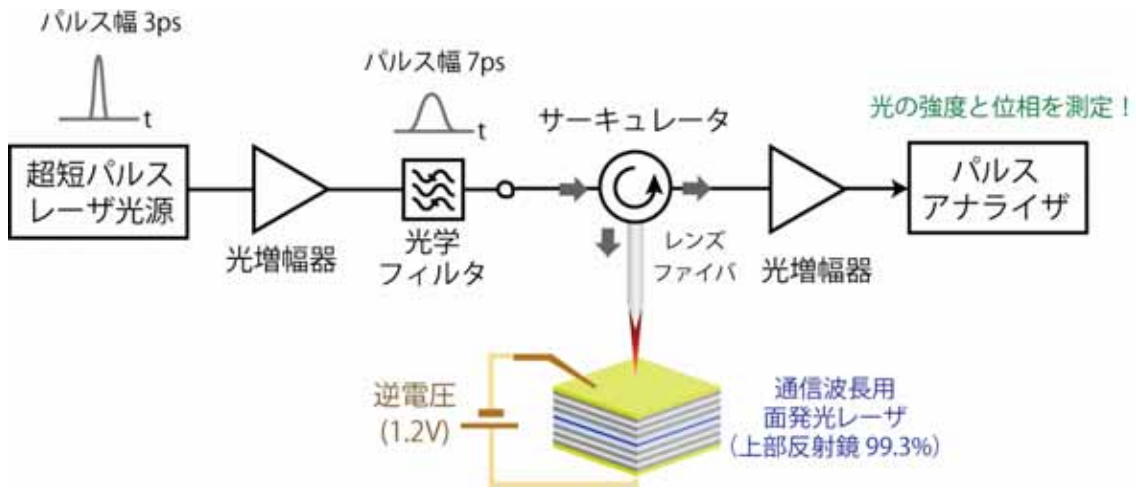


図 8: 1.55 μm 波長帯通信用面発光レーザーを非線形エタロンとして用いた測定系

続いて、我々は通信用の 1.55 μm 面発光レーザーを発光素子としてではなく、非線形効果補償デバイスとして用いる事を試みた。面発光レーザーの構造は今回提案した非線形補償デバイスと同様に、上部の反射率が極めて高いという構造を持つ。また、上部の反射率が極めて高い状態にある場合は、位相曲線が共振波長付近で反転するという現象が生じる(図 6 右)。

測定方法は図 8 に示すように、パルスアナライザを用いてデバイスの測定を行う。パルスアナライザは、入力波形の光強度と光の位相を同時に確認する事ができる装置である。また、光源として利用している超短パルス光源は非常にパルス幅が狭いため、これをフィルタによって周波数帯域をカットする事で若干パルス幅を広げている。測定に用いた面発光レーザーの図は図 9 に示されるように、上部反射鏡には Si と SiO₂ を 4 ペア(反射率 99.3%)、

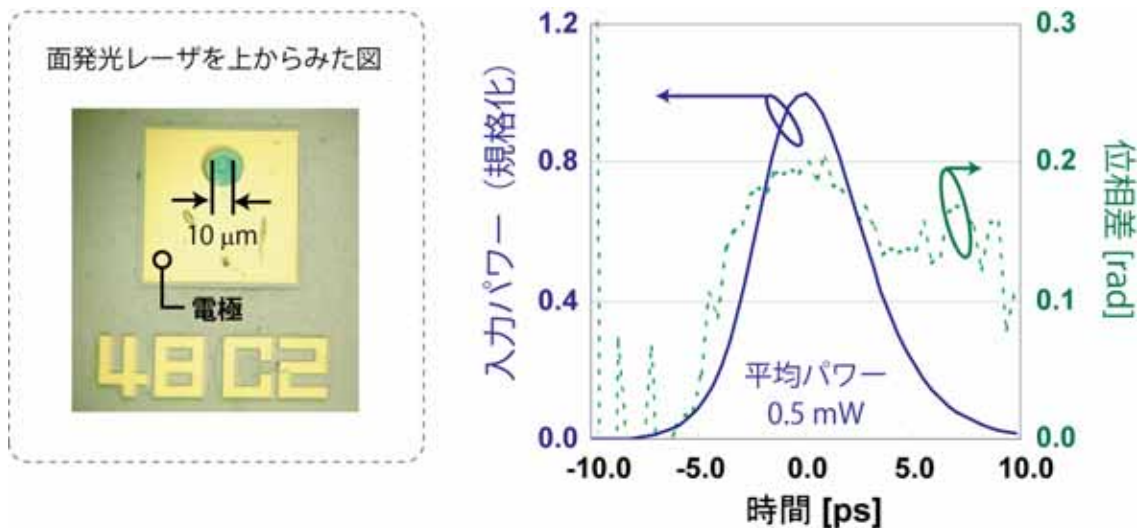


図 9. 通信用面発光レーザーを用いた位相の時間応答

下部反射鏡にはInGaAlAsとInPの40ペア(反射率99.9%)の層で構成されている[11]。これによって測定した結果を図9に示す。計算と測定の値の傾向がほぼ一致しているのが見て分かる。わずか50nmの厚さを持つ可飽和吸収体に入力パワー0.5mWの光を注入すると0.2radという巨大な正の位相シフトが得られているのが見て分かる[12]。また、反射光も30%(-1.5dB)程度しか減衰していないため、数段にカスケードすれば非線形位相シフトをさらに増やす事も可能となり、位相制御デバイスや制御光を使う事による位相変調器としての可能性も期待できる[12]。

5. 結論

本研究では、次世代超高速光通信でボトルネックとなる非線形光学効果を光信号領域で補償する新手法を提案した。すなわち、光ファイバにおけるカー効果に対して、逆符号の位相差で打ち消す新規な微小垂直共振器を有した光非線形位相補償デバイスを考案した。非線形エタロンの構造を適切に選ぶ事により、正・負両方の位相差を自在に制御できる事が分かり、正の位相差を発生させる事は伝送波形を圧縮するような技術、負の位相差を発生させる事はファイバ伝送時に発生する非線形光学効果による波形劣化を整形する事ができる。

低消費電力、小型である垂直共振器を有した非線形エタロンを利用する事で、ナノスケールの微小デバイスで数100kmという長距離の光ファイバ通信で発生する非線形光学効果を補償できる事を理論的に示し、わずか50nm程度の厚さの可飽和吸収体によって0.27mWという非常に低パワーの光によって0.25radという非常に大きな位相差を発生することに成功した。さらに、40Gbpsを越える高速信号へも対応可能な10ps程度の高速応答を実証した。

また、非線形エタロンを高パワー条件で測定すると巨大な遅延特性が得られるなどさまざまなおもしろい現象が現在確認されており、パルス整形、光バッファメモリ、光遅延線などのさまざまな展開が期待できる[13]。これまで困難であった光の位相を高速に制御する一手法を創出することができ、今後の新世代光通信の新たな領域の方向性を提示したと言える。

謝辞

本研究を行うに当たり、日々ご指導頂いている小山二三夫教授に心より感謝する。
1.55 μ m用面発光レーザー構造を提供して頂いたCorning社の西山伸彦氏(現 東京工業大学)に感謝する。

参考文献

- [1] 山下真司著「光ファイバ通信のしくみがわかる本」(技術評論社)
- [2] H. M. Gibbs, S. L. McCall, T. N. C. Venkatesan, A. C. Gossard, A. Passner and W. Wiegman, "Optical bistability in semiconductors," Applied Physics Letter, Vol. 35, No. 6, pp 451-453, 1979
- [3] S. Suda, F. Koyama, N. Nishiyama, C. Caneau, and C.E. Zah, "Optical Phase Shifter Using Vertical Microcavity with Saturable Absorber," CLEO/QELS 2006, California USA, **Invited**
- [4] M. L. Singth and I. S. Hudiara, "A Piece Wise Linear Solution for Nonlinear SRS Effect in DWDM Fiber Optics Communication System", Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 3, No. 4, April 2004
- [4] S. Suda, and F. Koyama, "Measurement and Modeling of Spot-Size Dependence of CWDM Dielectric Multilayer Thin-Film Filters," OECC/COIN, Seoul, July 2005, 5E-25
- [5] T. Sizer, II, T. K. Woodward, U. Keller, etc., "Measurement of Carrier Escape Rates, Exiton Saturation Intensity, and Saturation Density in Electrically Biased Multiple-Quantum-Well Modulators", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 30, No. 2, February 1994
- [6] Daniel S. Chemla, David A. B. Miller, etc., "Room Temperature Excitonic Nonlinear Absorption and Refraction in GaAs/AlGaAs Multiple Quantum Well Structure", IEEE Journal of Quantum Electronics Vol. QE-20, No. 3, March 1984
- [7] S. Suda, G. Hirano, F. Koyama, N. Nishiyama, C. Caneau, and C. E. Zah, "Tunable Optical Delay and Nonlinear Phase Shifter Using 1.55 μm VCSEL". ISLC '06, Hapuna Beach, Hawaii, WC4, Sep. 2006
- [8] S. Suda, G. Hirano, F. Koyama, N. Nishiyama, C. Caneau, C. E. Zah, "Optical Nonlinear -Effect Compensator Based on Vertical-Cavity Saturable Absorber," ECOC 2006, Cannes, France, September, Th.1.4.7 (2006)
- [9] 須田 悟史, 小山 二三夫, "非線形エタロンを用いた非線形補償デバイス", 2005 年秋期電子情報通信学, CE-103
- [10] 須田 悟史, 小山 二三夫, "面型非線形位相補償デバイスによる光ファイバ伝送特性の補償効果の検討", 春季電子情報通信学会, 名城大学(名古屋), C3-79, 2007 年 3 月
- [11] N. Nishiyama, C. Caneau, G. Guryanov, X.S. Liu, M. Hu, and C.E. Zah, "High efficiency long wavelength VCSEL on InP grown by MOCVD," Electron. Lett., 39, 5, pp.437-439, 2003
- [12] S. Suda, G. Hirano, F. Koyama, N. Nishiyama, C. Caneau, and C. E. Zah, "Tunable Optical Delay and Nonlinear Phase Shifter Using 1.55 μm VCSEL". ISLC '06, Hapuna Beach, Hawaii, WC4, Sep. 2006
- [13] 須田 悟史, 小山 二三夫, "非線形エタロンの自己吸収変調による群遅延特性の考察", 2006 年 春季応用物理学会, 24a-Y-10
- [14] S. Suda, F. Koyama, N. Nishiyama, C. Caneau, C. E. Zah, " High Speed Response of Optical Nonlinear Phase Shifter Based on 1.55 μm VCSEL," CLEO 2007, Baltimore, USA, May, CMP6 (2007)