

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering



大石 泰文 (yasutake OHISHI, Ph. D.)

豊田工業大学大学院工学研究科教授

(Graduate School of Engineering, Professor Toyota Technological Institute)

電子情報通信学会 応用物理学会 日本セラミックス協会
Optical Society of America IEEE 会員

受賞: 2009年 豊田奨学基金研究業績賞 2007年 日本セラミックス協会学術賞 2001年 電子情報通信学会業績賞
1998年 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティエレクトロニクス賞 1998年 NTT 研究開発本部長表彰
1998年 NTT 光エレクトロニクス研究所所長表彰 1997年 光産業技術振興協会 櫻井健二郎氏記念賞 1997年 Second Optoelectronics & Communications Conference, Best paper award 1997年 NTT 光エレクトロニクス研究所所長表彰 1994年 電子情報通信学会論文賞 1992年 NTT 研究開発本部長表彰

著書: セラミックス機能化ハンドブックエヌティーエス(共著) 2010年 先端ガラスの産業応用と新しい加工エヌティーエス(共著) 2009年 ガラスの百科事典朝倉書店(共著) 2007年 光デバイス精密加工ハンドブック オプトロニクス社(共著) 2003年 ニューガラスハンドブック丸善(共著) 1991年 セラミックス辞典丸善(共著) Optical fiber amplifiers Artech House(共著) 1997年

研究専門分野: 光ファイバ増幅 光ファイバレーザ 光ファイバ光学 非線形光学 フォトニクスガラス

あらまし 誘導ブリルアン増幅によるパルス歪みを抑制した誘導ブリルアン散乱によるスローライト生成を実現するため、零利得法 (ZG 法) および 2 重利得法 (DG 法) の理論的および実験的検証を行い、その有効性を明らかにした。現在、石英ファイバが遅延媒体として主に研究されており、パラメトリック増幅を利用した波形整形を利用すれば W レベルに近い励起光が必要になるが、テルライトファイバを利用すれば、1dB/mW 以上の利得効率が実現できるため、実用的なパラメトリック増幅媒体の開発が期待できる。誘導ブリルアン増幅による波形歪みを補償するための手法として非線形効果による高効率波形整形を実現するため、1.55 μm 帯分散シフト高非線形微細構造テルライト光ファイバの作製に成功してパラメトリック利得の確認し、高効率波形整形実現が可能であることを示した。

1. はじめに

FTTH の普及と急速なブロードバンド化の進展により、基幹ネットワークにはますますの大容量化が求められている。今後さらなる高速情報処理が必要と考えられており、これを実現するためこれまでの電気信号処理の速度・消費電力等の限界を超える全光信号処理技術の研究が行われている。超高速ネットワークのノードでは、光パルスの波形整形や分離などの機能を実現するための超高速全光スイッチや光パルス列を一時的に保持する光バッファメモリーが必要になっている。現在、光バッファメモリーの候補として光ファイバ遅延線バッファが検討されているが、ファイバ長で遅延時間が決まり、半導体と異なり任意の時間での光パルスの取り出しができないという欠点のほか、小型化が困難という欠点もある。

全光型の光バッファメモリーの研究は、主に光半導体レーザによる光双安定素子などを用いたビットメモリと吸収や利得による大きな屈折率分散を利用した群速度の制御による、いわゆる、“slow light”を利用したものに分けられる。前者については、面発光半導体レーザの光双安定動作を用いたものが研究され、通信波長域で動作する素子の開発が行われている。光半導体レーザを用いたものは、小型化および省エネルギー性に優れるもの動作波長を決定する際に、半導体材料お

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

よび構造の選定等の検討課題があると言われている。

一方、“slow light”を利用したものは1999年冷却希ガス原子のEITによる実験以来、フォトニック結晶や光ファイバの非線形散乱を用いたものが研究されている。光ファイバのブリルアン増幅を用いた場合、遅延媒体である光ファイバと伝送路との結合性がよく、また、励起強度を変えることにより遅延量を容易に可変にすることができることから、石英光ファイバを用いたslow light生成実験やシステム実験が最近行われている。しかし、遅延特性と帯域はトレードオフの関係にあり、実システムではブリルアン増幅を用いた場合、1ビット程度のメモリーが実現できるに過ぎず、位相シフターへの応用ができる程度と考えられている。したがって、何らの手法を用いて実システムの信号帯域で十分なメモリー容量を実現する遅延特性を達成することが課題である。

増幅帯域を拡大するひとつの方法として複数の波長を励起光とする他波長励起が考えられるが、SBSの効率が上げられないとトータルの励起量が増え電力消費量の観点から実用性がない。そのため増幅効率を上げる観点から非線形性の高いカルコゲナイドファイバや酸化ビスマスガラス光ファイバを用いたslow light生成の実験が行われているが、損失低減が困難であり特性向上が難しく実用性が確認できる段階には至って

いない。また、帯域を広げるのみならず、遅延に伴うパルスの広がりによるメモリー容量の低下を解決することは重要な課題である。しかし、遅延と同時にパルスの広がりを抑えメモリー容量を拡大する手段は非常に重要にも拘らず開発されていない。

筆者らは、高非線形テルライトガラスを開発し、高非線形テルライト光ファイバによる光信号処理の研究を進めてきた。四光波混合によるパラメトリック増幅、波長変換等の他SBS(誘導ブリルアン散乱)、SRS(誘導ラマン散乱)によるslow light生成の研究を行った。その結果、テルライト(TeO_2 を主成分とするガラス)ファイバのSRSを利用した場合、石英ファイバの80倍以上のslow light生成効率を持ちえることを明らかにした⁽¹⁾。また、テルライトファイバのSBS特性をはじめて明らかし、遅延効果を解析した結果、図1に示すようにテルライトファイバのSBSを利用した場合、たとえば200m長るとき、石英ファイバの180倍以上の遅延効果を持ちえることを明らかにした⁽²⁾。

また、現在、slow light特性が検討されている酸化ビスマス系の光ファイバやカルコゲナイド光ファイバと比較しても優れた特性を持つことを明らかにした。たとえば、テルライト光ファイバなどの酸化物系のファイバと比べ非常に大きい非線形性を有するカルコゲナイドガラスと比較しても、3倍もの遅延効果が実現でき

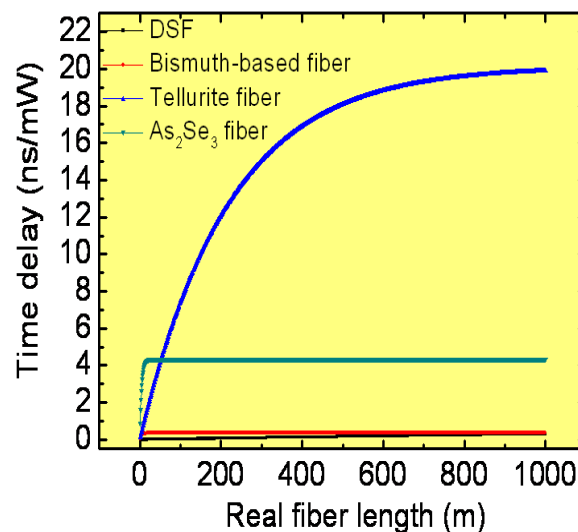


図1 ブリルアン増幅による各種ファイバの遅延特性の比較

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

る⁽²⁾。これは、テルライトファイバがカルコゲナイドファイバには及ばないものの石英ファイバに比べ 100 倍近い高い非線形性を有することと、比較的低い伝送損失を持つためである。筆者らはテルライトファイバがSBSを利用した遅延ファイバデバイスを実現する有力なファイバであると考えている。

本研究はブリルアン増幅を利用したファイバ型の可変光バッファを実現することを目的とする。本研究では、ブリルアン増幅を利用した場合でも遅延に伴うパルスの広がりを遅延と同時に補償できる機構を持つ可変遅延媒体を開発することにより、これまで困難であった遅延時間とビットレートで決まるメモリー容量の増大を目指す。

また、現在、石英ファイバが遅延媒体として主に研究されており、パラメトリック増幅を利用した波形整形を利用すればWレベルに近い励起光が必要になり、実用性がなくなる。しかし、テルライトファイバを利用すれば、1dB/mW以上の利得効率を実現できるため、実用的なものが開発できる。したがって、テルライトファイバを遅延媒体に利用すれば、SBSによる遅延効率も高く、また高効率な波形整形もできるため、遅延と遅延によるパルス広がりの補償を同時に実行でき、その結果SBSを使ったバッファメモリー容量を拡大した実用的なバッファメモリーが実現できると期待できる。以下、本研究で得られた成果を報告する。

2. 零利得法 (ZG 法) によるブリルアン利得によるスローライトの発生

2 重利得法 (DG (doublet gain)法) との対比のため ZG (Zero gain) 法によるパルス遅延の特性の検討結果について述べる。これまで、ZG 法によるパルス遅延の特性の詳細解析が成されていなかった。通常のブリルアン利得によるパルス遅延では、**図 2** に示すように励起光量を増大させると利得飽和が顕著になり、遅延量が著しく飽和する傾向にあった。たとえば、1 W 近い励起をしたとしても遅延量は高々 12 ns 程度であった。この利得飽和を抑え、遅延量を増大させる手法が ZG 法である。**図 2** で示したように励起光として 2 つの周波数 (波長) f_{p1} および f_{p2} を用いて励起する。それぞれの励起光による誘導アンチストークス散乱と誘導ストークス散乱との周波数を一致させる。アンチストークス散乱による損失スペクトルを変調周波数を上げて広くし、また誘導ストークス散乱による利得量を相殺させて利得が零となるようにする。その結果、**図 3 (a)** で示したような利得スペクトル、**図 3 (b)** で示したような群屈折率変化スペクトルが得られる。ZG 法では群屈折率変化スペクトルがブリルアン利得のみと比較してより急峻な変化を示すことがわかる。

図 4 (a)、**(b)** はそれぞれ ZG 法によるパルス遅延時間とパルス広がり因子 (入射パルス幅に対する出射パルス幅の比であり、1 より大きければパルスは広がっ

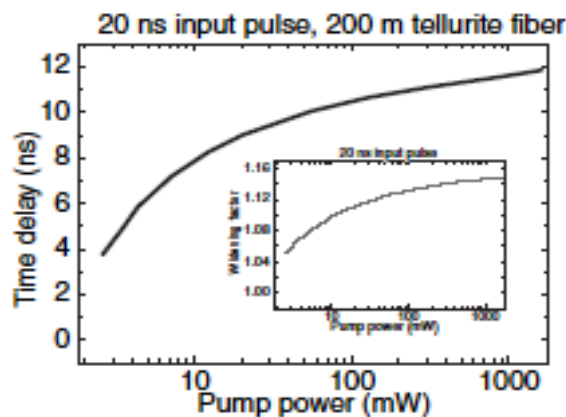


図 2 ブリルアン増幅によるパルス遅延特性。挿入図はパルス広がり因子の励起光量依存性

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

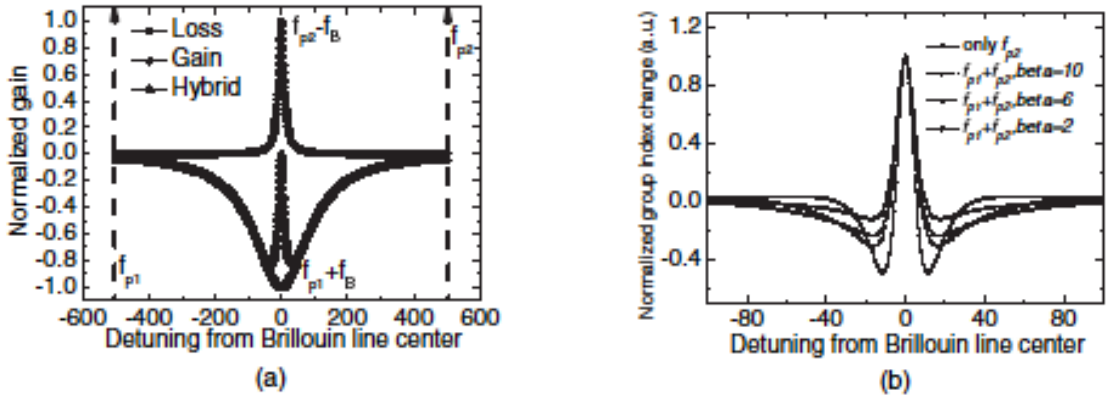


図3 零利得法 (ZG 法) によるブリルアン利得 (a) 利得スペクトル、(b) 群屈折率変化の波長依存性

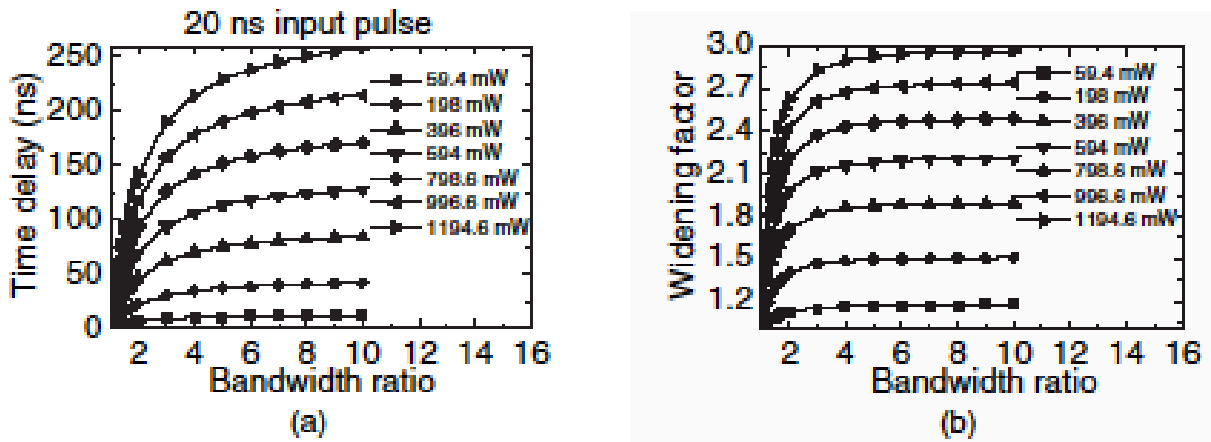


図4 ZG法によるパルス遅延時間とパルス広がり因子のブリルアン利得と損失スペクトル幅の比 (β) 依存性

ていることを示す。)のブリルアン利得と損失スペクトル幅の比 (β) でプロットしたものである。励起光量およびスペクトル幅の比 (β) を大きくするに従い、遅延量は大きくなり 250ns にも達することが分かる。これは、図2のブリルアン利得によるものの20倍以上

遅延量となっている。また、広がり因子は3程度にもなることが分かる。このように、ZG法ではパルス遅延は大きくなるもの、パルスは遅延により広がることを定量的に明らかにした^{(3),(4)}。次にこのパルスは遅延による広がりを抑える手法を検討した。

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

3. 2重利得法 (DG 法) によるブリルアン利得によるスローライトの発生

この手法は図5に示すように、2つの励起光を使い2つのブリルアン増幅帯を発生させてその全体の増幅スペクトルにより遅延の発生およびパルス波形の制御を行う方法である⁽⁵⁾。ブリルアン増幅スペクトルの幅を Γ_B 、2つのブリルアン増幅スペクトルの間隔を 2Δ とする。今後 Δ は Γ_B をユニットとして規格化して示す。

図6(a)は Δ の変化による遅延量をパルス幅で規格化

した相対遅延とパルス広がり因子の関係を示している。 Δ を大きくすることにより、パルス広がり因子は小さくなり、1 よりも小さくなり、パルスの圧縮を起こさせることができることがわかる。また、遅延もマイナスの遅延、つまり、ファストライト (fast light) の発生ができることがわかる。図6(b)(c)は Δ と相対遅延とパルス広がり因子の関係を示したものであり、(c)は(b)を拡大したものである。相対遅延が1程度であり、パルス広がり因子は1.4以下から圧縮(1以下)までで

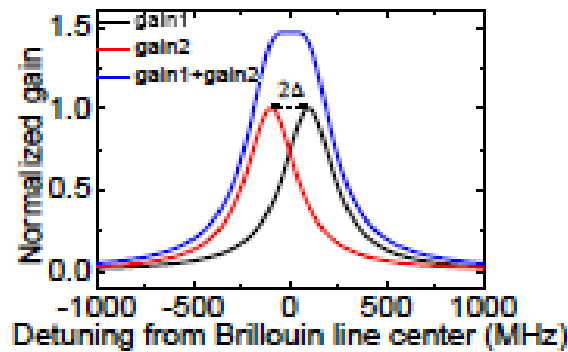


図5 2重利得法 (DG 法) によるブリルアン利得

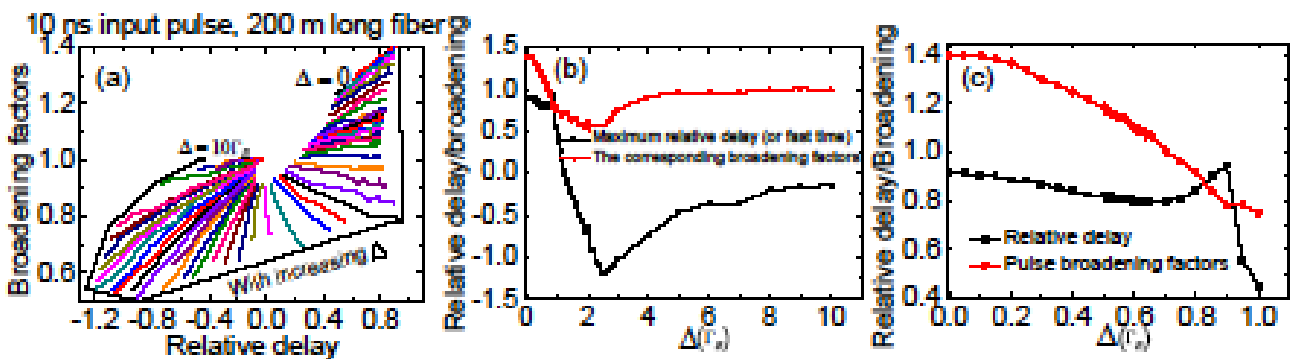


図6 (a) : Δ の変化による遅延量をパルス幅で規格化した相対遅延とパルス広がり因子の関係、(b) : Δ と相対遅延とパルス広がり因子の関係、(c) : (b) を拡大したもの

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

ることが分かる。

図7(a)(b)は Δ による遅延の起こり方の変化を示している。(a)の $\Delta=0.7\Gamma_B$ では、パルスが広がらずに遅延していることが分かる。(b)の $\Delta=0.9\Gamma_B$ では、パルスの壊れる(パルスブレイキングが起こっている。)ことが分かり Δ を $0.9\Gamma_B$ 以上にはできないことが分かる。

これらの解析により DG 法によりパルス波形の広が

りを抑えてパルスの遅延を起こさせることができることを明らかにした。また、本手法はパルス波形の広がりを抑えるだけでなく、圧縮も起こさせることができ、波形整形への応用が可能であることを明らかにした。

実験により本手法の効果を検証した。図8は、DG法によるスローライト発生のための実験構成図である。波長 1550nm の LD 光源の光を 2 分岐して一方を励起

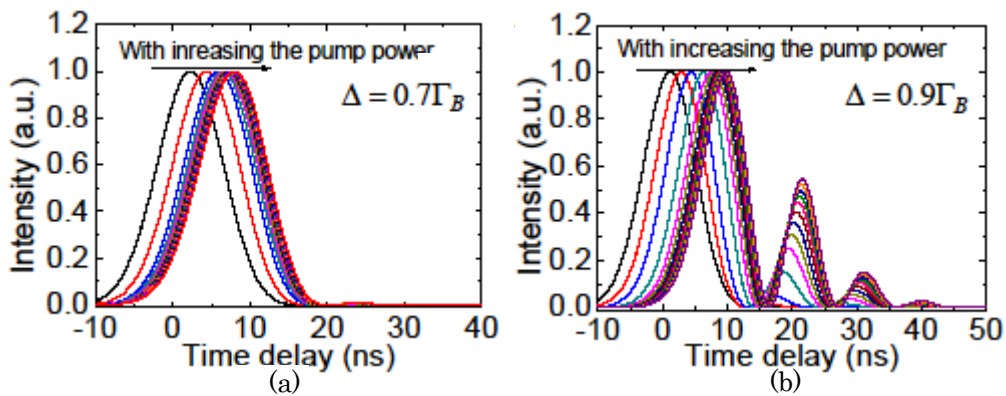


図7 Δ によるパルス遅延の起こり方の変化

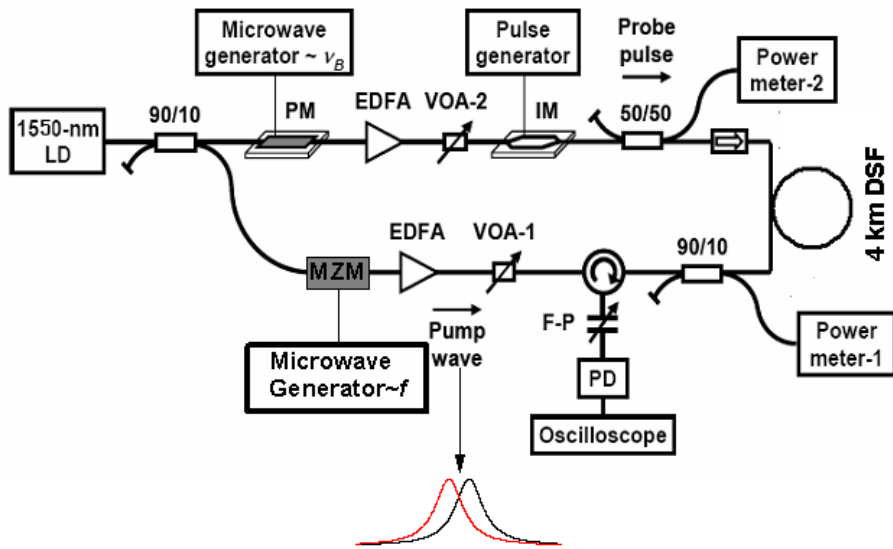


図8 DG法によりスローライト発生のための実験構成図

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

光、他方を信号光とした。励起光は MZM (マッハツェンダー変調器) による変調をかけて 2 つ波長の励起光を得て 2 重利得を実現した。変調周波数を変えることにより Δ を変化させた。信号光も変調器を通すことによりパルス光とした。

図 9 (a)(b) は、それぞれ MZM の周波数によるパルス波形の変化および相対パルス遅延 (パルス幅で規格化) とパルスの広がりまたは圧縮をプロットしたものである。特に (a) 中の挿入図のスペクトルは、MZM の周波数による利得スペクトルの変化を示している。MZM の変調周波数が上がるにつれてパルスの遅延が

おこること、10MHz 以下であればパルスの広がりには起こらずにパルス遅延が起こることが分かる。10MHz のときの相対遅延 (パルス幅で規格化) は、約 0.9 であった。このように、DG 法によれば、パルス広がりを起こさずに遅延を起こさせる、つまり、スローライトを発生させることができることを実験的に初めて実証した。図 10 は MZM の変調周波数が 30MHz 以上の場合の光パルスの変化である。理論で予想されたようにパルスブレイキングを起こっていることが検証できた。したがって、MZM の変調周波数には上限が存在することが実証できた。

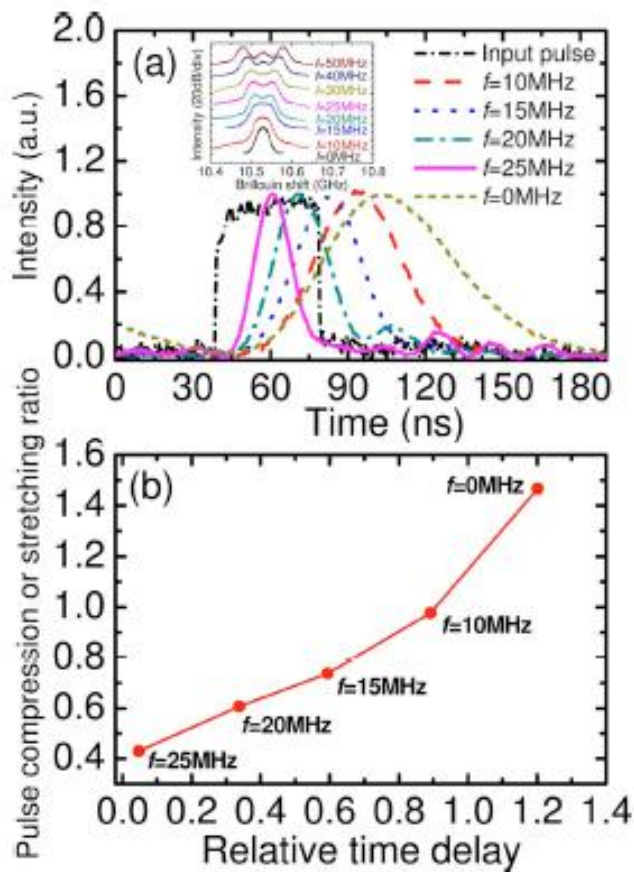


図 9 DG 法における MZM の周波数によるパルス波形の変化 (a) (ブリルアン励起光量は 80mW, 挿入図は MZM の周波数によるブリルアン利得スペクトルの変化) および相対パルス遅延 (パルス幅で規格化) とパルスの広がりまたは圧縮の関係 (b)

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

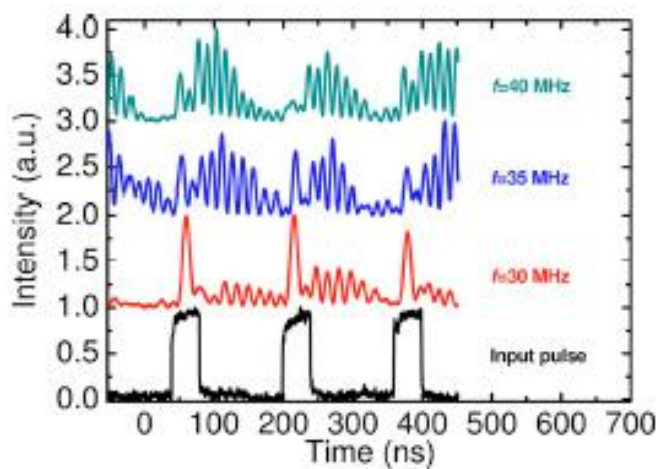


図10 DG法におけるMZMの周波数が30から40MHz時のパルス形状の変化（ブリルアン励起光量は80mW）

4. 分散シフト微細構造テルライト光ファイバの作製

誘導ブリルアン増幅による波形歪みを補償するための手法としてパラメトリック利得等の非線形効果による高効率波形整形が考えられる。テルライトファイバは高非線形を有しているが、通信波長帯を含む近赤外

域で高効率パラメトリック利得を実現させるのに必要な零分散化することは困難であった。図11に示す構造の微細構造テルライト光ファイバの作製に成功し、零分散化に成功した⁽⁶⁾。図11は図12に示したそれぞれのファイバの波長分散スペクトルである。近赤外域で

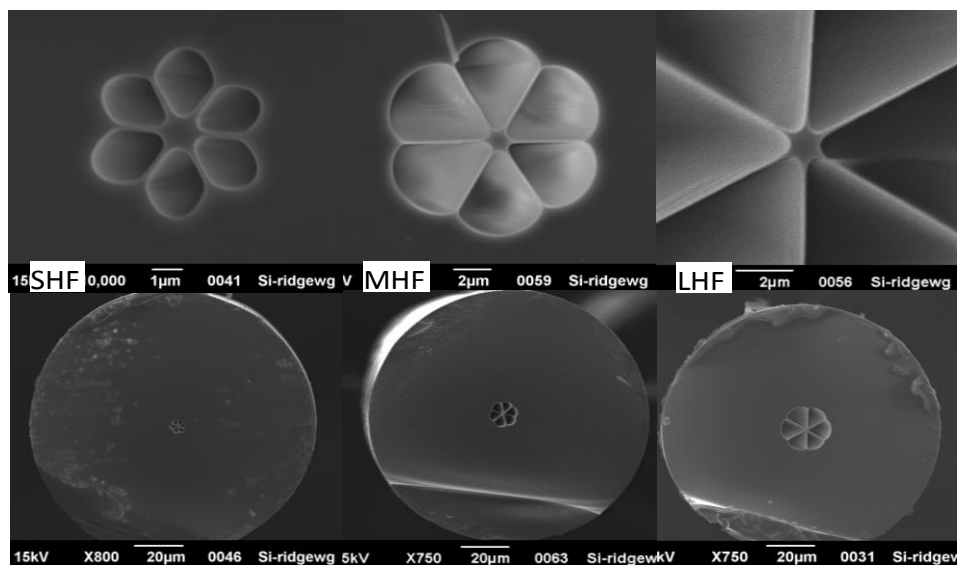


図11 試作に成功した微細構造テルライト光ファイバの断面写真

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

波長分散が零になっていることが分かる。この微細構造テルライト光ファイバを用いて通信波長帯域における広帯域パラメトリック利得確認に成功した(図13)。

帯域は 70nm 以上あることが確認できた。このパラメトリック増幅は高効率波形整形に応用が可能であると考えている。

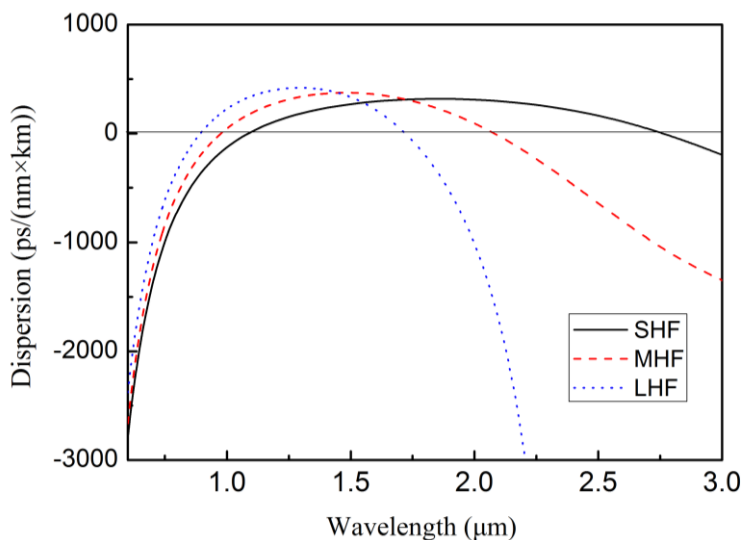


図12 図9に示した微細構造テルライトファイバの波長分散スペクトル

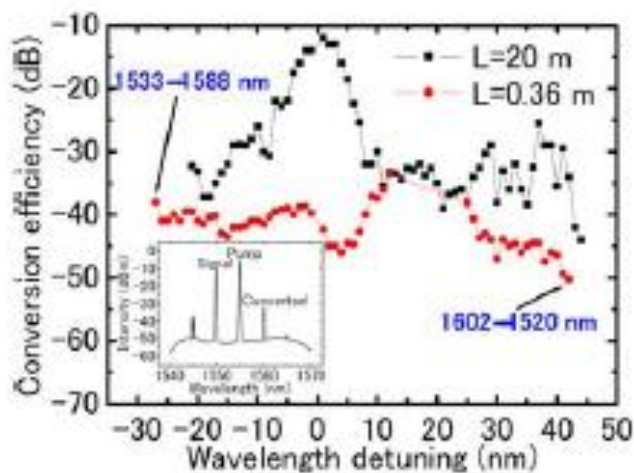


図13 微細構造テルライトファイバによるパラメトリック波長変換特性. 励起波長は 1560nm.

誘導ブリルアン散乱を用いたスローライト生成の研究

Slow light generation by stimulated Brillouin scattering

5. まとめ

誘導ブリルアン増幅によるパルス歪みを抑制し、パルス広がりを抑えた誘導ブリルアン散乱によるスローライト生成を実現するため、零利得法（ZG法）および2重利得法（DG法）の理論的および実験的検証を行い、その有効性を明らかにした。また、誘導ブリルアン増幅による波形歪みを補償するための手法として非線形効果による高効率波形整形を実現するため、1.55 μm 帯分散シフト高非線形微細構造テルライト光ファイバの作製に成功してパラメトリック利得の確認した。また、DG法とZG法を併せたDG-ZG法は、励起効率が向上すれば実用性があると考えられる。パラメトリック増幅による波形整形やDG-ZG法はパルス広がりを抑える有効な手法として今後引き続き検討する。

参考文献

- (1) G. Qin, R. Jose and Y. Ohishi, “Stimulated Raman scattering in tellurite glasses as a potential system for slow light generation”, *J. Appl. Phys.* **Vol.101**, pp.093109-1 – 093109-5, (2007).
- (2) G. Qin, H. Sotobayashi, M. Tsuchiya, A. Mori and Y. Ohishi, “Stimulated Brillouin Amplification in a Tellurite Fiber as a Potential System for Slow Light Generation”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **Vol. 46**, pp.L810–L812, (2007).
- (3) G. Qin, T. Suzuki and Y. Ohishi, “Numerical Modeling of Zero-Gain Brillouin Slow Light in a Tellurite Fiber”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **Vol.47**, pp.4589-4591,(2007).
- (4) G. Qin, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Zero-broadening and pulse compression Brillouin slow light based on doublet gain lines in an optical fiber”, Technical CD, CLEO/IQEC2009, JWA59, (2009).
- (5) G. Qin, T. Sakamoto, N. Yamamoto, T. Kawanishi, H. Sotobayashi, T. Suzuki, Y. Ohishi, “Tunable all-optical pulse compression and stretching via doublet Brillouin gain lines in an optical fiber”, *Opt. Lett.*, **Vol. 34**, pp.1192-1194, (2009).
- (6) M. Liao, X. Yan, G. Qin, C. Chaudhari, T. Suzuki, Y. Ohishi, “A highly non-linear tellurite microstructure

fiber with multi-ring holes for supercontinuum generation”, *Opt. Express*, **Vol. 17**, pp.15481-15490, (2009).

この研究は、平成19年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成20年度～22年度に実施されたものです。