

3. 考察と問題点

今回の回路で、正のパルスと同時に負のパルスも安定に伝播することがわかった。また向心衝突に対して安定であることもわかった。しかし速度と幅の振幅依存性は、キャパシタとして用いたペアのダイオードの特性から予想されるものと異なっていた。この違いは測定されたペアのダイオードの容量特性と回路内での実際のダイオードの特性が異なるためと考えられる。事実、測定された特性は例えば、正の電圧に対して下側のダイオードにかかる電圧が 0 V で全電圧が上側のダイオードにのみかかるとしたときの合成容量とほぼ一致している。ところが実際の回路内では Fig. 8 で見られるように正のパルスに対して下側のダイオードにも電圧がかかり、さらにパルスとパルスの間で接合点の電位が負になっている。このように回路内ではキャパシタの特性が測定された特性と一致していないために、実験値と理論値が Fig. 3, 4 のように異なるものと考えられる。

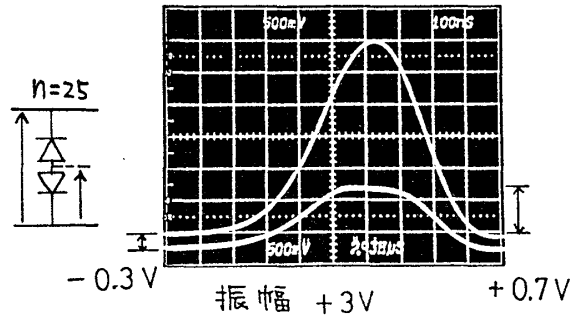


Fig. 8

今後この違いを調べ理論式を導くとともに、より散逸の少ない長い回路で正と負の追い越し衝突等の実験を行っていきたい。

文 献

H. Nagashima and Y. Amagishi, J. P. S. J. 45 (1978) 680.

光ファイバ中の誘導ラマン散乱と光ソリトン

NTT 電気通信研究所 中 沢 正 隆

光ファイバを用いた光通信の広範囲な実用化とともに、数多くの応用研究が盛んになってきている。中でも、光ファイバの低損失性（波長 $1.5 \mu\text{m}$ 帯にて $\sim 0.2 \text{ dB/km}$ ）、狭い断面積に閉じ込められた高い光強度、および相互作用長が長くとれる点などに着目した光ファイバ中の非線形光学効果の研究が各国で精力的に行なわれている。この中には、誘導ラマン散乱、誘導ブリルアン散乱、誘導 4 光子混合、光パルス圧縮、光ソリトン等の様々な効果があるが、本稿では、実験的にも理論的にも取り扱いが容易でよく研究されている誘導ラマン散乱と、ファ

イバ中の群速度の分散と自己位相変調効果との釣り合いによって生ずる光ソリトンを中心に概説する。

(1) 光ファイバ中の誘導ラマン散乱

誘導ラマン散乱 (Stimulated Raman Scattering : SRS) は、強い単色光を物質にあてて散乱させるとき散乱された光の中にその物質の光フォノンと相互作用することにより、固有な量だけ波長がずれたコヒーレントな光 (ストークス光) が混ってでてくる現象である^{(1)~(4)}。波長 $1\mu\text{m}$ 帯において、1つのモードだけが伝播するシリカ系ファイバのコア径は、 $\sim 10\mu\text{m}$ 程度であり、1Wの入力に対してパワー密度は $1\text{MW}/\text{cm}^2$ 以上とたため容易に SRS が観測される^{(5)~(8)}。ストークスシフト量は $\sim 440\text{cm}^{-1}$ あたりに強いピークを持ち、シリカ系ファイバのラマン利得係数は波長 $1\mu\text{m}$ において約 $1 \times 10^{-11}\text{cm}/\text{W}$ である。コア部に用いるドーパントの種類 (GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3) を変化させることにより、ラマンシフト量、利得係数を調整できる。長さ 1km 、入力 1W の場合ラマン利得として容易に 20dB 以上の利得が得られるため、半導体レーザ光の直接光増幅を SRS で実現できる^{(9)~(12)}。

(2) モード同期ファイバラマンレーザ

SRS を用いた1つの例としてモード同期レーザがある^{(13)~(15)}。即ち、励起光として強制モード同期の YAG レーザのパルス列を光ファイバ共振器に入射する。ラマン利得が共振器の損失より充分大きければ、ストークスパルスが立ち上がり定常的に安定なパルスが発生する。このとき、励起パルスの繰り返しはストークス・パルスのファイバ共振器内部での往復伝播時間の整数倍に等しい。このレーザの特徴はその波長可変性にある。即ち、共振器の長さを僅かに変化させるとストークスの伝播時間が異なってくるが、励起光の繰り返しが固定されているため、ストークスパルスは波長を変え分散を介して伝播時間を前と同じにする必要がある。この際、波長シフト量がガラマン帯域内であれば、共振器長の変化に応じてストークスの波長変化を生ずる。本レーザにより光ファイバの波長分散特性が測定できる⁽¹⁵⁾ 他ジャイロスコープへの応用が考えられている⁽¹⁶⁾。

(3) 自己位相変調効果と光パルス圧縮

LiNbO_3 や LiTaO_3 等の結晶にみられる2次の電気光学効果としてカー効果がある。光の領域においても、その電場が充分強ければ光カー効果が観測される⁽¹⁷⁾。即ち、媒質の屈折率は固有な量 (n_0) と入射光強度に比例した量 ($n_2 I$) から成る。この係数 n_2 は一般に非線形屈折率と呼ばれ、シリカの場合、 $3.2 \times 10^{-16}\text{cm}^2/\text{W}$ である⁽¹⁸⁾。超短光パルスは短時間に光強度が変化して急激な位相変化が生ずるので、結果として周波数変化を有することになる。これを自己位相変調効果と呼ぶ。従って、光ファイバ中を伝播するにつれ、光パルスの立ち上がり部

分はキャリア周波数より周波数は低く、立ち下がり部分では周波数が高くなる。このとき、ファイバ中の群遅延に分散があるならばその符号の正負により、パルスが圧縮されるかあるいは矩形パルスに変形していく。

シリカ系単一モードファイバでは波長 $1.3 \mu\text{m}$ より短波長側では正常分散となり^{(19), (20)}, 光パルスの立ち上がりは(低周波側, 即ち長波長にシフトするため)より速く、立ち下がりはいより遅くなり矩形パルスに近づく⁽²¹⁾。この際, Optical Wave Breakingなるさざ波現象が観測されている^{(22), (23)}。 $1.3 \mu\text{m}$ より長波長側では異常分散となり, 立ち上がりで速度は遅く逆側では速い。この結果パルスは圧縮される。

可視光領域では比較的容易に数 psec 程度の高出力超短パルスを発生できるので, これをたねとして極超短パルスの発生が可能となっている^{(24)~(26)}。可視域でパルスを圧縮するには, 異常分散を有する媒質が必要となるが, Na 蒸気の共鳴⁽²⁷⁾ や 2 枚の回折格子の組み合わせが用いられている⁽²⁸⁾。最近では, CPM リング色素レーザと回折格子の組み合わせにより 8 フェムト秒 ($8 \times 10^{-15} \text{s}$) のパルスが作り出されている⁽²⁹⁾。

(4) 光ソリトン

(3)で説明したように $1.3 \mu\text{m}$ より長波長の異常分散域では, ファイバだけでパルスの圧縮が生ずる。このとき, 自己位相変調効果による圧縮の効果と, 分散による広がり効果とが釣り合うならば, 安定な光パルスが存在することになる。この状態は非線形シュレディンガ方程式に帰着され, $N=1$ のソリトンは sech パルスで表現されることが知られている^{(30)~(32)}。ソリトンパルスはじょう乱に対して安定であり, 数 p 秒~数 100 f 秒とパルス幅が狭いので大容量通信に適している。非線形シュレディンガ方程式は

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + |u|^2 u \quad (1)$$

と表わされ, u , ξ , s はそれぞれ無次元化した光パルスの包絡線関数, 位置, 時間を示す。

上式の 1 つのソリトン解 $u(\xi, s)$ は⁽³³⁾

$$u(\xi, s) = 2\eta \operatorname{sech}(2\eta s) e^{-i2\eta^2 \xi}. \quad (2)$$

このソリトンの初期値問題は Satsuma と Yajima⁽³⁴⁾ によって解かれており, $u(0, s) = A \cdot 2\eta \operatorname{sech}(2\eta s)$ の光パルス入力に対しては

$$A + \frac{1}{2} \geq N$$

を満たすような N ソリトンが存在する。 $A < \frac{1}{2}$ では自己位相変調効果より分散性が支配的でソリ

トンではない。 $N=1$ ソリトンは

$$\frac{1}{2} \leq A \leq \frac{3}{2}$$

の条件で得られ、その形は sech パルスとなる。入力的光パルスの FWHM を τ とすると $N=1$ のソリトンのピークパワー $P_{N=1}$ は

$$P_{N=1} = 0.766 \frac{\lambda_{\text{vac}}^3}{\pi^2 c n_2} \frac{|D|}{\tau^2} A_{\text{eff}} \quad (3)$$

となる⁽³²⁾但し、 A_{eff} は有効ファイバ面積、 $|D|$ はファイバの群速度分散を示す。 $N \geq 2$ のソリトンは周期が $\xi = \frac{\pi}{2}$ で変化するのでその周期 Z_0 は、

$$Z_0 = 0.322 \frac{\pi^2 c}{\lambda_{\text{vac}}^2} \frac{\tau^2}{|D|} \quad (4)$$

で与えられる。F センタレーザのパルス幅 $\tau = 7$ psec, ファイバ分散 $|D| = 15$ psec/km · nm, $A_{\text{eff}} = 1 \times 10^{-6}$ cm² とすると $P_{N=1}$ は約 1 W となる。

$N \geq 1$ ソリトンを用いると大幅なパルス圧縮の効果が期待でき、 $N \simeq 13$ のソリトンにおいて 7 psec のパルス幅が 310 フェムトに圧縮された報告がある⁽³⁵⁾。また、式(1)が成立するような波長域にコヒーレントな cw 光を入射するとそれは安定ではなくわずかな振幅の変化により、最終的には波形がソリトン化していく変調不安定性についての報告がある⁽³⁶⁾。

(5) ソリトンレーザ

光ファイバをパルスの波形整形装置としてレーザの共振器の一部に挿入すると、共振器内部の光パルスの強度が充分強いとき光ソリトンを発生できる。これをソリトンレーザと呼ぶ⁽³⁷⁾。この際、ファイバへの光パルスの結合には、不可避な損失を伴うので、パルス増幅用の媒質が必要となる。レーザ媒質は利得とその帯域による分散効果により表現できる。このレーザは $N=1$ ソリトンより $N=2$ ソリトンを発生しやすい⁽³⁸⁾。これは、強く励起された $N=1$ ソリトンの周波数スペクトル幅が $N=2$ ソリトンのそれより広い、即ち、 $N=1$ ソリトンの幅の方が $z=0$ もしくは z_0 における $N=2$ ソリトンのそれより狭いことに起因する。このため $N=2$ ソリトンがレーザ媒質を通過した際うける全利得は $N=1$ ソリトンより大きくなり、レーザ発振の閾値は低くなる。(1)節において述べた SRS を用いた波長可変ソリトンレーザも提案されている⁽³⁹⁾。

(6) 光ソリトン系におけるカオス

光カー効果を有する媒質を閉ループに挿入した系は、その非線形屈折率による位相変化が 2π 付近になると不安定性を生ずる⁽⁴⁰⁾。この効果は Ikeda により理論的に導びかれたが、単一モ

ードファイバを用いた共振器に波長 $1.06\mu\text{m}$ Q スイッチモード同期レーザパルスを入射させ実験的にも Bifurcation が発生することが示された⁽⁴¹⁾。容易に推察されるが、 $1.5\mu\text{m}$ 帯で動作するレーザパルスを入射させると光ソリトンが形成され、それが不安定な振舞いをする可能性がある。周期的に印加される擾動の大小にかかわらず、非線形な位相変化が蓄積されカオス的な動きをすることが理論的に示されている^{(42), (43)}。

以上、SRS と光ソリトンとその周辺について概説した。この分野は、学問的魅力と大容量通信の実現という実益を兼ねているため、非常に興味深く、今後の発展が望まれる。

参 考 文 献

- 1) N. Bloembergen, *Nonlinear Optics*, The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1965.
- 2) R. L. Carman, F. Shimizu, C. S. Wang and N. Bloembergen, *Phys. Rev.* **A2** 60 (1970).
- 3) S. A. Akhmanov, K. N. Ddabovich, A. P. Sukhorokov and A. S. Chirin, *Soviet Physics JETP* **32** 266 (1971).
- 4) M. G. Raymer, J. Mostowski and J. L. Carlsten, *Phys. Rev.* **A19** 2304 (1979).
- 5) R. G. Smith, *Appl. Opt.* **11** 2489 (1972).
- 6) R. H. Stolen and E. P. Ippen, *Appl. Phys. Lett.* **29** 428 (1976).
- 7) J. AuYeung and A. Yariv, *IEEE, J-QE*, **QE-14** 347 (1978).
- 8) R. H. Stolen, *Proc. IEEE* **68** 1232 (1980).
- 9) Y. Aoki et al., *Electron. Lett.* **19** 620 (1983).
- 10) M. Nakazawa, M. Tokuda, Y. Negishi and N. Uchida, *J. Opt. Soc. Ame.* **B-1** 80 (1984).
- 11) J. Hegarty, N. A. Olsson and L. Gardner, *Electron Lett.* **21** 291 (1985).
- 12) M. Nakazawa, *Appl. Phys. Lett.* **46** 628 (1985).
- 13) R. H. Stolen, C. Lin and R. K. Jain, *Appl. Phys. Lett.* **30** 340 (1977).
- 14) C. Lin, R. H. Stolen and L. G. Cohen, *Appl. Phys. Lett.* **31** 97 (1977).
- 15) C. Lin, L. G. Cohen, W. G. French and H. M. Presby, *IEEE, J-QE*, **QE-16**, 33 (1980).
- 16) M. Nakazawa, *Opt. Lett.* **10** 193 (1985).
- 17) T. K. Gustafson et al., *Phys. Rev.* **177** 306 (1969).
- 18) R. H. Stolen and C. Lin, *Phys. Rev.* **A17** 1448 (1978).
- 19) 大越, 岡本, 保立, “光ファイバの基礎” オーム社 1977.
- 20) 末松, 伊賀, “光ファイバ通信入門” オーム社 1976.
- 21) D. Grischkowsky and A. C. Balant, *Appl. Phys. Lett.* **41** 1 (1982).
- 22) A. M. Johnson and W. M. Simpson, *J. Opt. Soc. Ame.* **B-2** 619 (1985).
- 23) W. J. Tomlinson, R. H. Stolen and A. M. Johnson, *Opt. Lett.* **10** 457 (1985).

- 24) B. Nikolaus and D. Grischkowsky, Appl. Phys. Lett. **43** 228 (1983).
- 25) J. G. Fujimoto, A. M. Weiner and E. P. Ippen, Appl. Phys. Lett. **44** 832 (1984).
- 26) J. -M. Halbout and D. Grischkowsky, Appl. Phys. Lett. **45** 1281 (1984).
- 27) H. Nakatsuka, D. Grischkowsky and A. C. Balant, Phys. Rev. Lett. **47** 910 (1981).
- 28) E. B. Treacy, IEEE, J-QE, QE-5, 454 (1969).
- 29) W. H. Knox et al., CLEO'85, Thzz3-1.
- 30) A. Hasegawa and F. Tappert, Appl. Phys. Lett. **23** 142 (1973).
- 31) A. Hasegawa and Y. Kodama, Proc. IEEE **69** 1145 (1981).
- 32) L. F. Mollenauer, R. H. Stolen and J. P. Gordon, Phys. Rev. Lett. **45** 1095 (1980).
- 33) V. E. Zakharov and A. B. Shabat, Soviet Physics JETP Lett. **34** 62 (1972).
- 34) J. Satsuma and N. Yajima, Suppl. Prog. Theor. Phys. **55** 284 (1974).
- 35) L. F. Mollenauer et al., Opt. Lett. **8** 284 (1983).
- 36) A. Hasegawa, Opt. Lett. **9** 288 (1984).
- 37) L. F. Mollenauer and R. H. Stolen, Opt. Lett. **9** 13 (1984).
- 38) H. A. Haus and M. N. Islam, IEEE, J-QE, QE-21, 1172 (1985).
- 39) H. A. Haus and M. Nakazawa, to be published in J. Opt. Soc. Ame., **B**, (1986).
- 40) K. Ikeda, Opt. Commun. **30** 257 (1979).
- 41) H. Nakatsuka et al., Phys. Rev. Lett. **50** 109 (1983).
- 42) K. Nozaki and N. Bekki, Phys. Rev. Lett. **50** 1226 (1983).
- 43) K. J. Blow and N. J. Doran, Phys. Rev. Lett. **52** 526 (1984).