

## 3次の非線形性を利用した有機光制御デバイス

井筒 雅之\*・村田 博司\*\*

3次の非線形光学効果を利用すれば、光双安定デバイス、光-光型や自己保持型の超高速光スイッチなど、電気、音響、磁気光学効果のような他種の非線形効果を用いたものでは得ることのできない、特徴ある、有用な光制御デバイスを実現することができる。このようなデバイスは、光通信や光信号処理システムへの応用が期待されている。

光導波路においては、光閉込め効果のために、光波は高い光電力密度を保ったまま回折広がりを受けずに伝搬するので、大きな非線形分極と相互作用長を比較的容易に得ることができる。このため、光波間の非線形相互作用を利用するうえで有利といえる。

これまで、さまざまな導波型3次非線形デバイスの研究の報告がなされている<sup>1,2)</sup>。研究の中心は、光波電界による屈折率変化を利用して、光によって光の変調を行うデバイスである。基本構造としては、導波型の結合器、干渉計などの光回路素子を非線形光学材料基板上に構成したものがほとんどである。導波光学系における光波モード間の結合、干渉などの特性を、非線形屈折率効果(光カー効果)による非線形相互作用によって変化させることで、光-光変調や光強度による出力ポートのスイッチングなどの機能をもたせたものである。

一方、筆者らは、非線形屈折率効果を導波路全体ではなく、一部分だけでもたせた導波光学系の光波伝搬特性に着目し、これを応用した新しい非線形光デバイスの研究を進めている<sup>3-5)</sup>。導波路断面方向、および光波伝搬

方向についての特定の部分だけが3次非線形性をもつ構造を用いることで、光波間の非線形相互作用を光強度だけでなく、非線形性をもつ領域の大きさや位置を調節することによっても制御することが可能となる。例えば、結合導波路に部分的非線形構造を適用した場合には、構造に強く依存した興味深い光波伝搬特性が生じる。このような導波路を、分岐導波路や方向性結合器と組み合わせることで、光双安定デバイス<sup>3,5)</sup>、光-光スイッチ<sup>4)</sup>などの光機能デバイスを実現することができる。

有機光学材料においては、高速でかつ比較的大きな3次の非線形性を示すものが報告されており、加工性にも優れているものが多い。したがって、非線形光導波路や導波型非線形デバイスへの応用に適した材料であると考えられる。しかし、これまでの有機非線形導波型デバイスの研究は、2次の非線形性を利用した波長変換デバイスを指向したものが多く、3次の効果を考えてものは少ない。これからの研究課題であり、その進展が期待される場所である。

本稿では、3次の非線形性を応用した導波型の有機非線形光制御デバイスの研究について、特に部分的非線形構造を利用したデバイスを中心に述べる。

### 1. 3次非線形導波型光制御デバイス

図1に、これまでに提案されている代表的な3次非線形導波型デバイスの基本構造を示す<sup>6-11)</sup>。スラブ導波路を用いたデバイスも提案や実験の報告がなされているが<sup>12,13)</sup>、ここでは、応用上重要と考えられるチャンネル型導波路を用いたもののみ示している。これらは、導波路全体、あるいは導波路基板に3次非線形光学効果のひとつである非線形屈折率効果(光カー効果)をもつ光学材

\*通信総合研究所電磁波技術部(〒184 小金井市貫井北町 4-2-1)

\*\*大阪大学基礎工学部電気工学科(〒560 豊中市待兼山町 1-3)  
E-mail: murata@ee.es.osaka-u.ac.jp

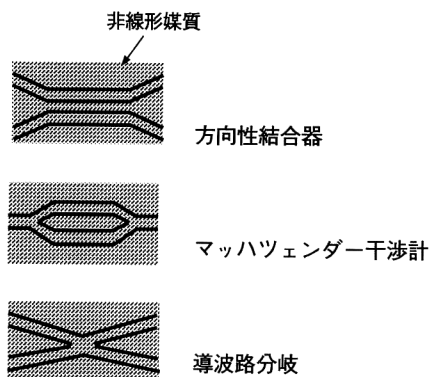


図1 3次非線形導波型デバイスの例。

料を用いて、方向性結合器<sup>9)</sup>、マッハツェンダー干渉計<sup>7,8)</sup>、分岐<sup>9-11)</sup>などの導波型光回路素子を構成した構造となっている。導波光学系における光波モード間の結合、干渉などの現象を利用して、これらの特性を非線形屈折率効果による相互作用で制御することで、光信号によりデバイスの特性をコントロールするものである。デバイスへの入力光の強度による出力ポートのスイッチング、あるいは光-光変調動作などが可能である。

有機材料を用いた3次非線形光導波路の作製については、共役系高分子化合物ではポリジアセチレンが<sup>3)</sup>、低分子化合物では比較的大きなパイ電子系をもつフタロシアニン、DAN、アゾ色素などが主に研究の対象となっている<sup>14)</sup>。2次の非線形性を利用した波長変換デバイスに比べると、チャンネル導波路デバイスの研究は少ないのが現状である。これまでに報告されているものとしては、ポリジアセチレンを用いたものでは、非線形方向性結合器を作製して、光スイッチング動作実験を行った報告などがある<sup>15,16)</sup>。

## 2. 部分的に非線形性をもつ導波型デバイス

1. で述べたデバイスは、導波路全体や基板が非線形性をもつ構造を基本としている。これに対して、全体ではなく、一部分のみが大きな3次の非線形性をもつ光導波路では、特定の領域だけで生じる非線形相互作用のために、導波路の構造に強く依存した特徴的な光波伝搬特性が生じる。例えば、片側の導波層のみが強い非線形性をもつ結合導波路では、固有モードの伝送電力に対する変化が非線形領域の大きさや位置に強く依存するため、これらを調節すると双安定的な非線形分散特性を示すようになる。したがって、導波型回路素子の特定の部分に非線形性をもたせることにより、双安定的な非線形分散特

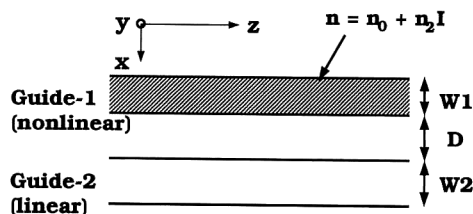


図2 部分的に非線形性をもつ結合導波路。

性を利用した、さまざまな光機能デバイスを実現することが可能と考えられる。以下では、部分的に非線形性をもつ導波路の光波伝搬特性と、筆者らが提案している部分的非線形構造デバイスについて述べる。

### 2.1 部分的非線形結合導波路の非線形分散特性

非線形屈折率効果をもつ光導波路においては、光強度に比例した屈折率変化が生じる。このため、導波路の固有モードの界分布や位相速度はモードの伝送電力によって変化する。導波路の一部分だけが他の部分に比べて大きな非線形屈折率をもつ場合でも、固有モードの界分布や位相速度は伝送電力に依存するが、非線形領域を通過する光電力によって屈折率変化が決まるため、導波路全体の光電力に対する固有モードの変化は、さらに複雑なものとなる<sup>5)</sup>。

図2に示す一方の導波路だけが非線形屈折率効果をもつ結合導波路を考える。この系の固有モードは、TEモードについてはJacobiの楕円関数を用いて解析的に表すことができる。図3(a)に、固有モードの非線形分散特性の例を示す。この場合では、偶モードの特性に双安定的な変化が現れる。分散曲線上のa, b, c点でのモードの界分布を示したものが図3(b)である。これらのモードは、伝送電力の値は同じであるが、非線形導波層での光強度が異なり、誘起される屈折率変化の大きさが異なっている。このように、同じ伝送電力、同じ次数のモードが複数存在することが大きな特徴である。

また、この非線形分散特性は、非線形性をもたせる領域の大きさや位置、導波路の構造によって大きく変化する。例えば、図2の系では、2本の導波路の間隔Dの値が十分小さくなると双安定的な分散特性は生じない。

このような線形-非線形結合導波路を導波型回路素子と組み合わせた部分的非線形構造を用いることにより、双安定的な導波特性を応用した、さまざまな新しい光機能デバイスを実現可能である(図4)。以下では、筆者らの提案しているデバイスのなかから、分岐導波路に部分的非線形構造を適用した2種の光デバイスについて述

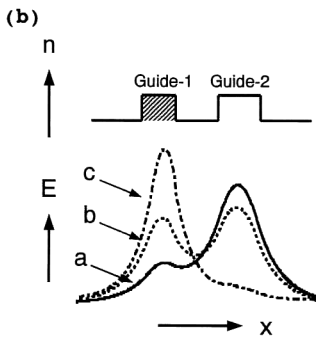
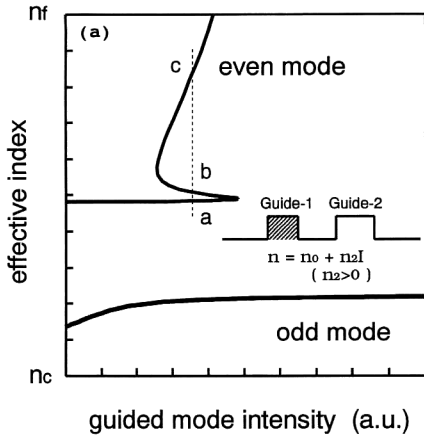


図3 非線形分散特性と固有モードの界分布。

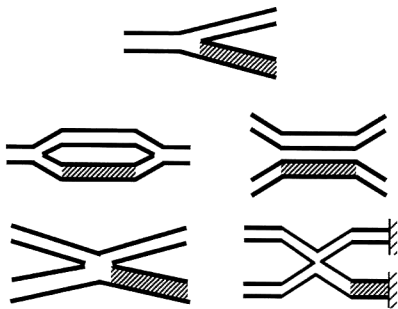


図4 部分的に非線形性をもつ導波型光機能デバイス (斜線部分が非線形性をもっている)。

べる。

## 2.2 Y分岐導波路を用いた双安定デバイス<sup>5)</sup>

図5(a)に構造を示す。2本の分枝と1本の直線導波路からなり、それぞれが単一モード導波路となっている。分枝1のみが自己集束性の非線形屈折率効果を持ち、他の部分は非線形性を示さないとする。また、非線形性が小さいときには、分枝1の導波モードの等価屈折

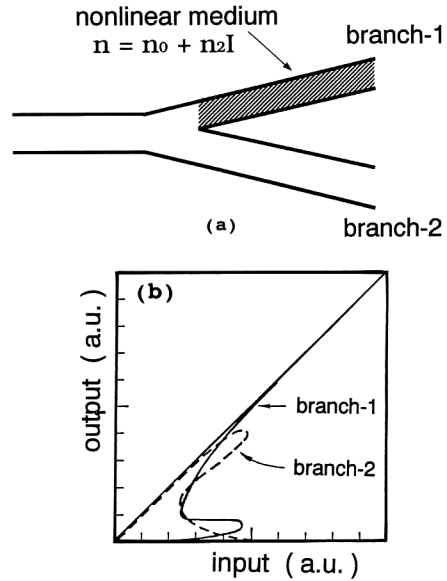


図5 部分的非線形構造Y分岐。(a)構造，(b)入出力特性。

率は分枝2に比べて小さくなっている。

分岐導波路においては、分岐角度が十分小さいときは、階段近似により分岐を方向性結合器型導波路の連続したものみなすことができる。したがって、直線導波路から光波を入力したときの伝搬特性は、各方向性結合器における偶モードを緩やかに変化させたものと近似できる。図5の場合では、それぞれの方向性結合器は片方の導波層だけが非線形性をもつ構造となるので、すでに述べたように、偶モードは双安定的な非線形分散特性を示し、伝送電力によって光波分布が大きく変化する。このことから、Y分岐導波路の入出力特性には双安定特性が生じることになる<sup>3,4)</sup>。

非線形屈折率効果による固有モードの変化の効果を考慮した修正ビーム伝搬法(BPM)を用いて、光波伝搬特性の解析を行った。この解析においては、光波の界分布と非線形屈折率変化を含めた屈折率分布とが互いに自己無撞着となっている。直線導波路への入力光強度に対する各分枝からの出力光強度の関係を図5(b)に示す。縦軸、横軸は光強度を非線形係数で規格化したものとなっている。図からわかるように、入力光波自身のパワーによって、出力ポートが切り替わるとともに、履歴特性を示す。光メモリー、自己保持型の光スイッチとしての応用が考えられる。

## 2.3 X分岐導波路を用いた光-光スイッチ

X分岐導波路を用いれば、デバイスを通過する信号

光の出力ポートを、別の光波（制御光）の電力によってコントロールする光-光スイッチが得られる<sup>3,4)</sup>。

例として、図6(a)に示す構造を考える。各分枝は単一モード導波路であり、分枝4のみが非線形屈折率効果をもつ媒質からなるとする。非線形性が無視できるときには、分枝2, 4の導波モードの等価屈折率が、それぞれ分枝1, 3に比べて大きくなっている。信号光（波長 $\lambda_1$ ）を分枝1から、制御光（波長 $\lambda_2$ ）を分枝2から入力する。分枝4の非線形屈折率は波長分散特性を示すものとし、信号光波長 $\lambda_1$ に対しては自己発散性（ $n_2(\lambda_1) < 0$ ）、一方、制御光波長 $\lambda_2$ においては自己集束性（ $n_2(\lambda_2) > 0$ ）であるとする。

非線形性による屈折率変化が十分小さいときには、分枝1から入力された信号光は、出力側の等価屈折率の小さな分枝3から出力される。制御光により分枝4におい

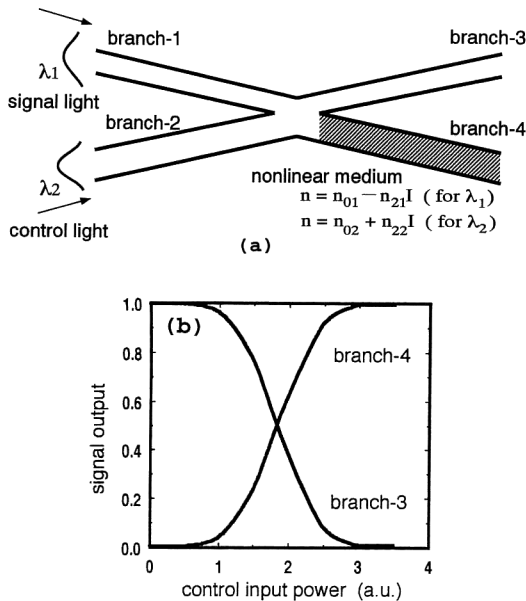


図6 部分的非線形構造 X 分枝。(a) 構造, (b) 光-光スイッチング特性。

て非線形効果が生じると、誘起された屈折率変化のために信号光に対しては分枝4の等価屈折率が小さくなる。したがって、制御光の強度を大きくしていくと、あるところで分枝3と分枝4の等価屈折率の大小関係が逆転し、信号光は分枝4から出力されるようになる。つまり、制御光によって信号光の出力をコントロールする光-光スイッチとして動作する。

ビーム伝搬法を用いて求めた制御光入力に対する信号光出力の特性を図6(b)に示す。制御光入力によって、信号光出力ポートが切り替わるのがわかる。非線形屈折率として  $n_2(\lambda_1) = -1 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{W}$  を仮定して、デバイス長1 cm, 導波路断面積  $10 \mu\text{m}^2$ , 光波の波長を  $1 \mu\text{m}$  とすると、スイッチングに必要な制御光電力は約100 mWとなる。

### 3. 有機材料を用いた部分的非線形光導波路

有機非線形光学材料を用いて図4に示すような部分的に非線形をもつ構造を実現する方法としては、種々のものが考えられる。筆者らは、まず、線形光学材料によってベース導波路を作製し、その後選択的に非線形光学材料を導入する手法を利用して研究を進めている。実際に、有機色素を用いた部分的非線形光導波路の試作・実験を行っており、導波路の非線形光学特性の測定、および光-光制御デバイスの製作を進めている<sup>17)</sup>。

図7に示すように、ベースとなる線形な光導波路において、非線形性をもたせる部分の上部だけに有機非線形膜を形成することで部分的非線形構造を得ることができる。ベース導波路にはガラス導波路を用いている。その上部にマスクパターンを作製し、キノン系有機色素薄膜<sup>18)</sup>を真空蒸着することにより、部分的に非線形性をもつ導波路が得られる。

作製した導波路の非線形性を測定したところ、波長780 nmにおいて、実効的な導波路の非線形屈折率  $n_2$  は、 $n_2 = -1.9 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{W}$  で、その応答時間は10 ps以下であった。観測された光誘起位相変化量は  $2\pi$  を越

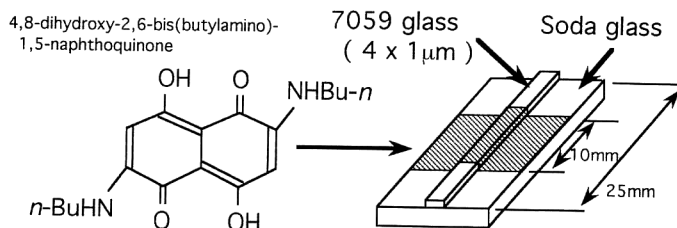


図7 部分的非線形有機光導波路。

えるものであり（色素装荷部分の長さ1 cm）、この値はこれまでに報告されている有機非線形光導波路のなかでもかなり大きなものである。現在、さらなる非線形特性の測定、およびマッハツェンダー型導波路デバイス、および分岐導波路デバイスの作製・動作実験を続行中である。

また、この他にも、ポリイミド、PMMAなどを用いて作製した光導波路の一部に選択的に色素などの有機非線形光学材料をドープする方法についても検討を行っている。

光-光制御デバイスの設計にあたっては、信号光と制御光の波長が非線形光学材料の共鳴吸収波長の近傍となるようにすれば、共鳴効果による非線形係数の増強により、デバイスの動作光電力を小さくすることができる。さらに、共鳴吸収波長近傍での非線形屈折率の波長分散特性を利用することで、図6(a)のように制御光に対しては自己集束性の非線形屈折率を、信号光に対しては自己発散性の非線形屈折率をもつように両光波の波長を選ぶことができる。このとき、信号光の波長は吸収端よりも長波長側になるので、信号光の光吸収による損失を低く抑えることができる。

3次の非線形光学効果をもつ光導波路は、さまざまな光制御デバイス実現の可能性を秘めているといえる。今後は、部分的非線形構造をはじめとする非線形デバイスの構成方法やその動作についてさらに考察を進めるとともに、実際にデバイスの試作・動作実験を行って、その有用性を実証していくことが重要と考えられる。

本文で述べた有機色素光導波路の試作・実験は、京都女子大学の松岡賢先生と共同で研究を進めているものです。色素試料のご提供、ご指導をいただいています松岡先生に感謝いたします。

## 文 献

- 1) 久保寺憲一：“非線形光学導波路デバイスの研究動向”，レーザー研究，**21**（1993）1078-1084.
- 2) G. I. Stegeman and R. H. Stolen: “Waveguides and fibers for nonlinear optics,” J. Opt. Soc. Am. B, **6** (1989) 652-662.
- 3) H. Murata, M. Izutsu and T. Sueta: “All-optical switching in nonlinear X-junctions,” *Nonlinear Optics '90*

- (IEEE LEOS and OSA, Hawaii, 1990) pp. 63-64.
- 4) H. Murata and M. Izutsu: “Novel optical waveguides with localized optical nonlinearity using multi-quantum well structures and their applications to all-optical functional devices,” *CLEO/Pacific Rim '95* (Jpn. Soc. of Appl. Phys., Chiba, 1995) pp. 174-175.
- 5) H. Murata, M. Izutsu and T. Sueta: “Optical bistability in novel waveguide junctions with localized optical nonlinearity,” submitted to J. Lightwave Technol.
- 6) S. M. Jensen: “The nonlinear coherent coupler,” IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 1580-1583.
- 7) A. Lattes, H. A. Haus, F. J. Leonberger and E. P. Ippen: “An ultrafast all-optical gate,” IEEE J. Quantum Electron., **QE-19** (1983) 1718-1723.
- 8) H. Kawaguchi: “Proposal for a new all-optical waveguide functional device,” Opt. Lett., **10** (1985) 411-413.
- 9) Y. Silberberg and B. G. Sfez: “All-optical phase- and power-controlled switching in nonlinear waveguide junctions,” Opt. Lett., **13** (1988) 1132-1134.
- 10) H. Fouckhardt and Y. Silberberg: “All-optical switching in waveguide X junctions,” J. Opt. Soc. Am. B, **7** (1990) 803-809.
- 11) J. P. Sabini, N. Finlayson and G. I. Stegeman: “All-optical switching in nonlinear X-junctions,” Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 1176-1178.
- 12) B. P. Singh and P. N. Prasad: “Optical bistable behavior of a planar quasi-waveguide interferometer made with a conjugate organic polymer film,” J. Opt. Soc. Am. B, **5** (1988) 453-456.
- 13) K. Sasaki, K. Fujii, T. Tomioka and T. Kinoshita: “All-optical bistabilities of polydiacetylene Langmuir-Blodgett film waveguides,” J. Opt. Soc. Am. B, **5** (1988) 457-461.
- 14) 日本化学会編：非線形光学のための有機材料（学会出版センター，1992）.
- 15) P. D. Townsend, J. L. Jackel, G. L. Baker, J. A. Shelburne and S. Etmad: “Observation of nonlinear optical transmission and switching phenomena in polydiacetylene-based directional coupler,” Appl. Phys. Lett., **55** (1989) 1829-1831.
- 16) A. Kaneko, T. Kuwabara, T. Wada, H. Sasabe and K. Sasaki: “All-optical switching phenomenon in polydiacetylene (12, 8) based nonlinear directional coupler,” Inst. Electron. Inf. Commun. Eng. Trans. Electron., **E77-C** (1994) 704-708.
- 17) H. Murata and M. Izutsu: “Nonlinear absorption and light induced index change with a fast response time in the waveguide of a novel organic quinoid dye,” *Proceedings of the ICONO '93* (Florida, 1996) pp. 134-135.
- 18) M. Matsuoka, A. Oshida, A. Mizuguchi, Y. Hattori and A. Nishimura: “Molecular design of quinoid dyes for 3rd order NLO materials,” Nonlinear Opt., **10** (1995) 109-114.

(1996年12月11日受理)