

分子シンクロナイゼーション光デバイス

谷田貝豊彦・原田 建治

新しい世紀、高度情報化社会を迎えるにあたって、光技術は、その基盤技術として脚光を浴びている。しかし、従来の光応用は、光のエネルギー応用、光の干渉性の利用、光の高帯域性の利用といった面が中心であり、光の2次元並列性を実用に生かした例は必ずしも多くはない。これは、光の空間的な特性を高速かつ効率よく変調する技術が存在していなかったからである。ここでは、分子シンクロナイゼーション機能を有効に活用できる可能性を備えた材料形態のひとつとして、フォトニッククリスタル¹⁻³⁾という全く新しい光学材料を用い、デバイス内の光波の空間分布を制御することによって、効率よく信号光の変調を行うことができる光波空間変調デバイスの研究について紹介する。

従来の光変調素子用の非線形光学材料としては、液晶、半導体材料、無機誘導体結晶、有機非線形材料等が知られていた。ここで開発する素子は、フォトニッククリスタルという新しい概念により設計製作された非線形材料を用い、従来材料では困難であった高性能空間光変調素子を開発するものである。現在まで開発されている空間光変調素子は、液晶空間光変調器に代表されるように、低解像度で、応答速度もミリ秒程度と遅く、高解像度の画像を高速に表示する必要のある分野、例えば、マルチメディア用の立体ディスプレイや動画ホログラムディスプレイの応用には、はなはだ不適當であった。フォトニッククリスタルは、通常の光学結晶と異なり、構造の設計、最適化が可能であり、これとシリコン集積化回路との組み合わせにより、多機能化も可能となる。このデバイスが実用化されれば、従来の受動的な適応光学の能動化、並列処理に不可欠の光インターコネクションの能動化をもたらし、新規な立体映像表示

法実現の可能性も生まれる。例えば、マルチメディアにおける動画並列伝送、超高速並列画像処理など、次世代の情報基盤技術の一角を構成する技術となりうるものである。さらに、この技術は、単に波面の制御ばかりでなく、光の振幅変調、波長変調技術にも当然応用可能であり、きわめて広範な光エレクトロニクスデバイスの概念を一変する可能性をもっている。

ここではまず、分子シンクロナイゼーションとフォトニッククリスタル構造について述べ、次に、このフォトニッククリスタル構造をもった電気光学効果 (EO) ポリマーを用いた光変調デバイスを紹介する。

1. 分子シンクロナイゼーションとフォトニッククリスタル

分子シンクロナイゼーションの概念が提起されて、材料そのものの中に入出力変換機能を組み込むことが検討されてきている。光変調デバイスにおいても、このようなインテリジェントな材料を使用することによって新しい発展が期待できる。特に、有機系の材料においては、材料設計、物性評価、デバイス化の面においてこの新しい概念に基づく研究が開始されつつある。電気光学効果ポリマーを用いたデバイスにおいても、電気光学効果の大きい材料の探査ばかりでなく、このシンクロナイゼーションの概念を導入したデバイスの研究がなされつつある。ここでは、分子シンクロナイゼーションの概念である、分子間相互作用の協調・同期現象そのものではないが、光波の領域において ($0.5 \mu\text{m}$ 程度) 同期を巧妙に利用したフォトニッククリスタルについて述べる。

フォトニッククリスタルとは、光の波長程度の周期で誘電率を変調させた材料で、光波モードの効率的な制御が可能なるものである。これは、通常の結晶内の周期的ポテンシ

筑波大学物理工学系 (〒305-8573 つくば市天王台 1-1)
E-mail: yatagai@bk.tsukuba.ac.jp

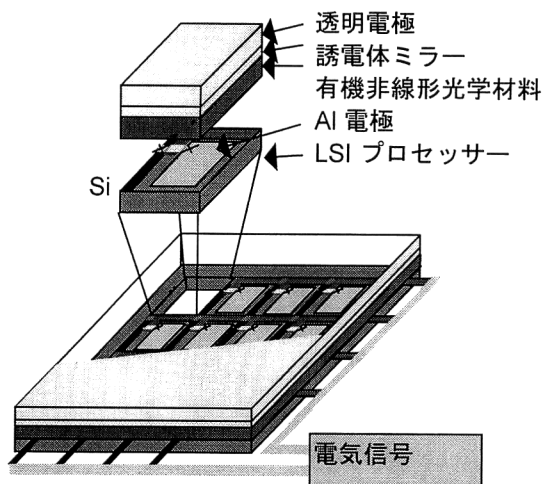


図1 電気アドレス型空間光変調素子.

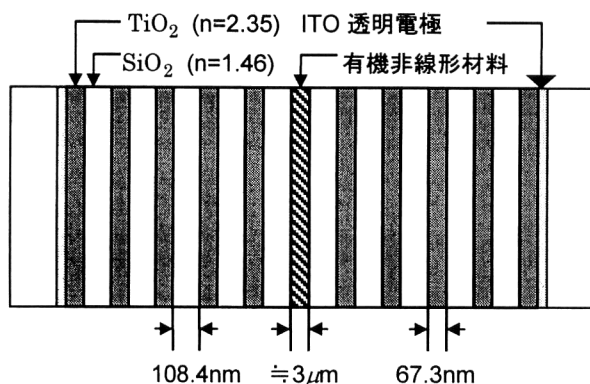


図2 有機非線形材料を用いたフォトニッククリスタル.

ャルで、電子のバンド構造が決定されるのと類似の効果であり、電子を光子に置き換えた結晶という意味から、フォトニッククリスタルとも呼ばれている。光波モードの制御により、光の自然放出の制御が可能であり、超低閾値のレーザーの実現が期待されるほか、特定の位置に強く局在する光波モードを利用した非線形光学効果の著しい増強効果が期待される。

いま、誘電率が周期的に変化している材料を考えよう⁴⁾。例えば、SiO₂とTiO₂を光学的厚さ $\lambda/4$ の厚さで交互に積層したものは典型的な1次元的なフォトニッククリスタルである。この材料の分光透過率分布には半導体のバンドキャップに相当する不透明なバンドが存在する。次に、このフォトニッククリスタルに不純物の層を導入すると、この材料の不透明バンドには、シャープな透明ピーク（不純物準位）ができることが知られている。このような不純物層近辺には電場分布の局在が観測される⁵⁾。非線形光学材料を不純物層に導入すると、この電場局在の効果により非線形現象の増強が期待できる。

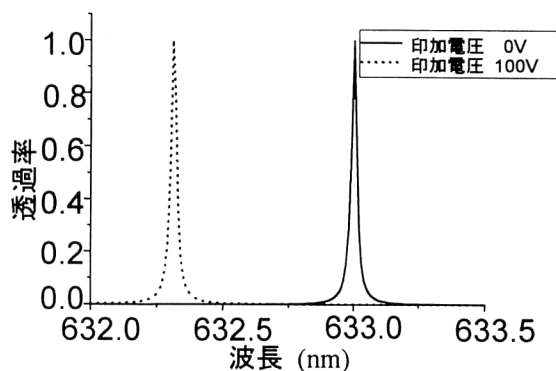


図3 電圧印加時の透過特性の計算結果 ($r_{13}=20$ pm/V 層数31層).

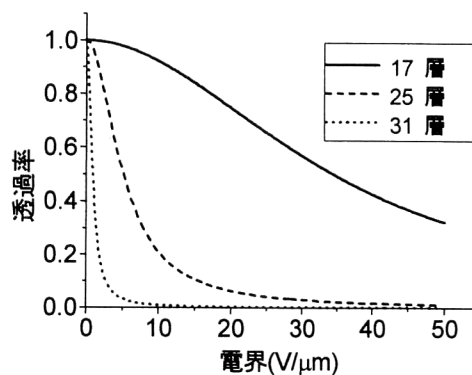
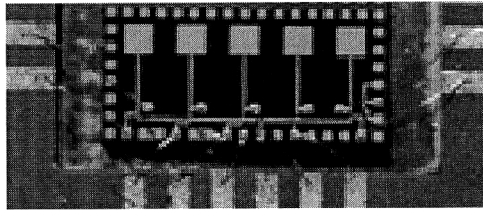


図4 波長633 nmでの電圧印加時の透過特性の計算結果.

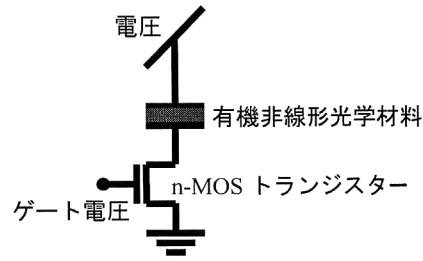
2. 電場配向ポリマーを用いた空間光変調器

物質の光学定数を変化させる効果のうちで、空間光変調素子⁶⁾を実現するために利用しようと考えられる諸効果には、エレクトロクロミック効果、フォトクロミック効果、ポッケルス効果、カー効果、ピエゾ効果、ファラデー効果、磁気カー効果、発光状態の変化等があげられる。入力信号に対する感度が高く、応答速度も速く、変調のダイナミックレンジも広く、空間分解能も高く、さらに操作性のよい素子を構成できるものが存在するならば理想的である。しかし、これらの要求すべてを満足する物質は、まだ見いだされていない。したがって、現在は感度、応答速度、変化範囲、空間分解能のいくつかについて、ある程度の性能を実現できそうな物質を探し出し、いろいろな素子を試作している段階である。

ここでは、高速応答、高いコントラストを併せもつ有機非線形光学材料を用いた空間光変調器の開発に向けての検討のいくつかを紹介する。この有機非線形光学材料を用いた新しいタイプの空間光変調器は、超高速応答と高いコントラストが期待できる。現在筆者らは、電気アドレス型と光アドレス型の2つのタイプの空間光変調器について検討している。図1に電気アドレス型の概念図を示す。この電



(a)



(b)

図5 (a) 有機駆動用集積回路, (b) 等価回路.

気アドレス形空間光変調器は、有機非線形材料、透明電極、平坦化層、LSI プロセッサ等で構成され、時系列電気信号によって光波の制御を行う。

光変調材料として、電気光学効果をもつポリマーを考えよう。このとき、例えば、DR1 (disperse red 1) を PMMA にドープした厚さ $100 \mu\text{m}$ の材料を用いる場合には、光の位相を π (rad.) 変調するためには、 $500 \text{ V}/\mu\text{m}$ 程度の高電圧を印加しなければならない。この電圧は通常の絶縁破壊電圧を超えてしまう。低電圧で駆動可能にするためには、上記のフォトニッククリスタル構造が利用できる。図2のようなフォトニッククリスタル構造で、不純物として中央層に電場配向された有機非線形材料を使った場合、この材料に電圧を印加すると透明ピーク位置が変化する。図3にその計算結果を示す。この構造の透過率の電圧依存性は図4のように計算される⁴⁾。層数が増加すると、より低電圧で光制御できるようになり、31層のフォトニッククリスタルを使用した場合には印加電界 $10 \text{ V}/\text{m}$ でコントラスト $100:1$ が得られる。また、 10 MHz 程度の応答スピードが得られている。図5(a), (b)に試作した有機空間光変調器駆動用の n-MOS トランジスタを集積した回路の写真とその等価回路を示す⁹⁾。ICのサイズは $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ で、1素子は $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ である。回路のアルミニウム電極上に有機薄膜のフォトニッククリスタルおよび上部電極を付けることによってデバイスが完成する。このデバイスの等価回路は図5(b)のようになり、有機薄膜はコンデンサーと等価であると考えることができる。現在この集積回路に変調材料系の装着技術を研究中である。

3. 空間周波数フィルターとしての応用

ここで述べたフォトニッククリスタル構造を有する光変調素子は、特定領域、特定波長の光をシャープに透過する特性を有し、周波数面上で特定周波数成分のみを透過させるフィルターとして使用することにより、空間周波数フィルタリングが実現できる。入力信号の一部を強調したり、特定の成分のみを抽出したり、あるいは雑音に埋もれた信

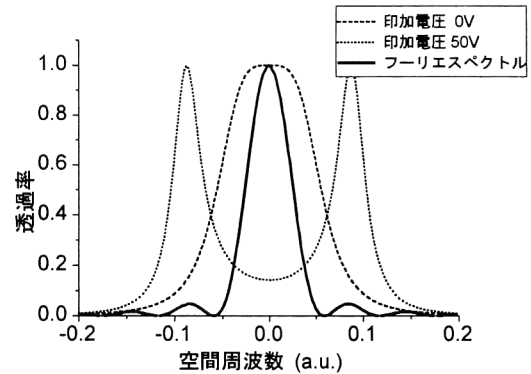


図6 デバイス空間透過率の計算結果.

号を検出する目的で、入力信号のスペクトルを変化させることを、周波数フィルタリングといい、レンズのフーリエ変換作用を使うと、2次元画像のフーリエ変換が得られ、画像情報に対しても周波数フィルタリングができる⁷⁾。これが空間周波数フィルタリングである。一般に、画像スペクトルの低周波成分は画像の大まかな構造に対応し、エッジや微細構造は高周波成分に寄与する。画像の空間周波数成分のうち、低周波成分のみを透過させると、高い周波数のノイズを除去することができる。このようなフィルターをローパスフィルターという。これとは逆に、高周波数成分のみを透過するフィルターをハイパスフィルターといい、画像の境界部分を抽出したり微細構造を強調させる目的で使用される。また、これらの間で、ある特別の周波数帯域のみを透過あるいは除去するためのフィルターが帯域フィルターで、印刷の網点構造の除去のためなどに使用される。

図6は、不純物層の厚みを空間的に変化させ、ひとつの構成要素の中央部を薄く周辺部を厚くした構造のデバイスの空間透過特性の計算結果である。測定波長 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 、有機薄膜屈折率 $n = 1.75$ 、電気光学定数 $r_{13} = 20 \text{ pm}/\text{V}$ 、誘電体ミラー層数 21 層、有機薄膜の光学膜厚 $nd = (5 + x^2/2)\lambda$ として計算した。このような構造のデバイスは、電圧印加によりハイパスフィルターやローパスフィルターとして作用することが理解できよう。もちろん通常の電気アド

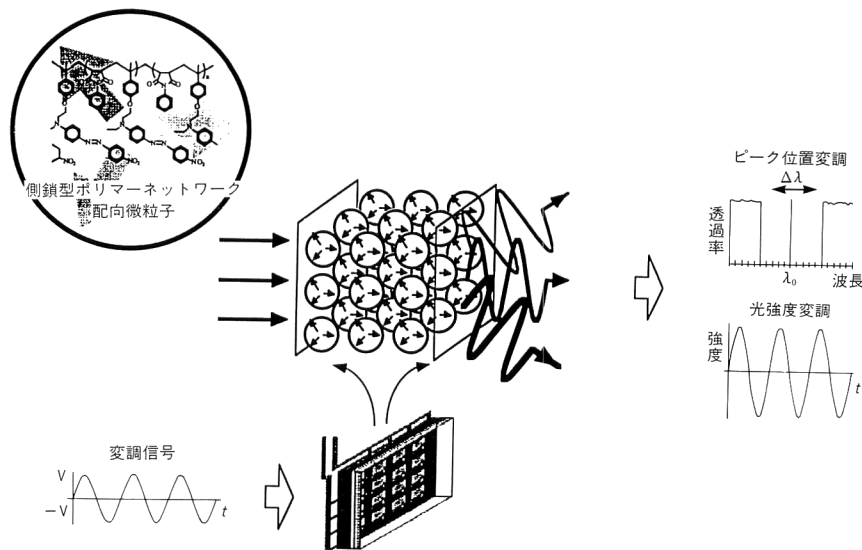


図7 3次元フォトニッククリスタルを用いた光変調デバイスの概念図。

レス型の空間光変調器のように多数の変調画素を並列的に駆動して空間周波数フィルターを構成することもできる。

4. 3次元フォトニッククリスタルデバイス

フォトニッククリスタル構造による電場の閉じ込め効果を高めるためには、3次元構造のフォトニッククリスタルの利用が考えられる。図7に、3次元フォトニッククリスタルを用いた光変調デバイスの概念図を示す。側鎖型ポリマーの微粒子を電場配向させ、これを自己配列させることによって、3次元フォトニッククリスタルを作製することを検討している。3次元構造の実現には種々の技術が検討されている。半導体素子の量子ドット製作に用いられている微細加工技術⁸⁾、コロイド微粒子⁹⁾の利用、微粒子の自己配列技術もしくはレーザートラッピングによる微粒子の配列技術¹⁰⁾などが研究されている。

分子シンクロデバイスの一例として、1次元フォトニッククリスタルによる光変調デバイスの研究開発状況を述べた。従来広く利用されている液晶空間光変調デバイスに比較して、圧倒的な高応答性を期待できる。しかし、駆動回路との接続法、材料の安定性、3次元構造の製造法など困難な課題も多い。それにもかかわらず、共振、同期、協調などに関連したシンクロナイゼーションの現象を積極的に材料設計、デバイス設計に導入することは重要で、今後の材料・デバイス開発に新しい指針を与えるものと考えている。ここで述べたデバイスは、厳密な意味での分子シンクロナイゼーション効果を有効に利用しているわけではないが、

分子シンクロデバイスのイメージの理解と概念形成に役立つれば幸いである。

なお、ここで述べた研究は、文部省重点領域研究「有機非線形材料による光波マニピュレーション」、基盤研究B「波面マニピュレーションデバイスの開発と応用」、ならびに、筑波大学先端学際領域研究センター TARA プロジェクトの援助のもとで行われた。本研究で使用した非線形光学材料の一部をご提供くださった東京理科大学加藤政雄教授ならびに物質工業工学研究所松田宏雄氏、集積回路を設計試作くださった豊橋技術科学大学米津宏雄教授、さらに、本研究に終始適切な助言と援助をいただいた慶応義塾大学梅垣真祐教授の各氏に感謝申し上げる。

文 献

- 1) P. R. Villeneuve and M. Piché: Phys. Rev. B, **46** (1992) 4969.
- 2) E. Yablonovitch, T. J. Gmitter and K. M. Leung: Phys. Rev. Lett., **67** (1991) 2295.
- 3) 井上久遠：応用物理, **64** (1995) 19.
- 4) K. Harada, M. Itoh and T. Yatagai: Opt. Rev., **3** (1996) 440.
- 5) T. Hattori, N. Tsurumachi and H. Nakatsuka: J. Opt. Soc. Am. B, **14** (1997) 348.
- 6) K. Harada, K. Munakata, M. Itoh, N. Yoshikawa, H. Yonezu, S. Umegaki and T. Yatagai: Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) 4393.
- 7) 谷田貝豊彦：光とフーリエ変換 (朝倉書店, 1992).
- 8) J. G. Fleming and S. Y. Li: Opt. Lett., **24** (1999) 49.
- 9) T. Okubo, A. Tsuchida, T. Tanahashi and A. Iwata: J. Colloid Interface Sci., **207** (1998) 130.
- 10) Y. Hayasaki, M. Itoh, T. Yatagai and N. Nishida: Opt. Rev., **6** (1999) 24.

(1999年4月1日受理)