

二分決定グラフにもとづくフォトニック結晶集積デバイス

Photonic-Crystal Logic Devices Based on the Binary Decision Diagram

浅井 哲也, 雨宮 好仁, 小柴 正則

Asai Tetsuya, Amemiya Yoshihito, and Koshiba Masanori

北海道大学 工学部

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

フォトニック結晶は屈折率の異なる2種の媒質からなる人工結晶である。これを用いると、光波長程度に寸法の小さい光導波路素子 [1] や大きな分散・異方性を呈する光制御材料を構成できる可能性がある。そのため情報処理システムに応用して新しい集積フォトニクス - 超高速の光集積回路を構築しようという研究が始まった。ここでは「フォトニック結晶と二分決定グラフを組合せて新しい光集積回路を創る」という提案 [2] を紹介する。

2. デジタル論理の表現と回路化

フォトニック結晶を用いて光集積回路を構成しようとするとき、はじめに次の点が問題となる。すなわち従来のシリコン集積回路では、目的とするデジタル論理処理をブール代数式で表現し、それをMOSトランジスタの組合せで具現化(回路化)している。ところがフォトニック結晶デバイスはMOSトランジスタとは動作概念が異なるので、ブール代数式を回路化しようとしても既存の回路アーキテクチャを用いることができない。そのため光集積回路の実現は難しい状況であった。

3. グラフ論理表現にもとづく回路アーキテクチャ

上の問題に対処するため、著者はフォトニック結晶デバイスに適した回路アーキテクチャについて検討し、ブール代数式に代えてグラフ論理表現にもとづく回路構成が好ましいという結論を得ている。グラフ論理表現とは「有向グラフ上でトークン(動点)を移動させることにより論理処理を表す」手法をいう。その代表例が以下に述べる二分決定グラフである。提案する光集積回路では、二分決定グラフに対応する回路をフォトニック結晶中に形成し、そのグラフ回路に沿って光を伝搬させることにより論理処理を行う。

4. 二分決定グラフとは

二分決定グラフはデジタル関数のシャノン展開をグラフ表記したものである。多くの論理関数をブール代数式よりも簡潔に表現できる。グラフは多くの節点と有向枝からなり、節点には入力変数 X_i が対応している(図1)。論理値を求めるときには頂点から定数節点に向かってトークンを動かす。各節点においては変数の1-0値に対応する有向枝にトークンを進める($X_i = 1$ なら1-枝、 $X_i = 0$ なら0-枝)。トークンが到着した定数節点をみて論理を判定する。すなわちトークンが定数節点1に到着すれば論理値は1、定数節点0に到着すれば論理値は0である。

実用の論理システムで扱われる関数の多くは、互いに共通の部分をもつことが多い。このようなときには、部分グラフを共有する一組の二分決定グラフを使えば、複数の関数を簡潔に表現できる(図2)。これを共有二分決定グラフという。

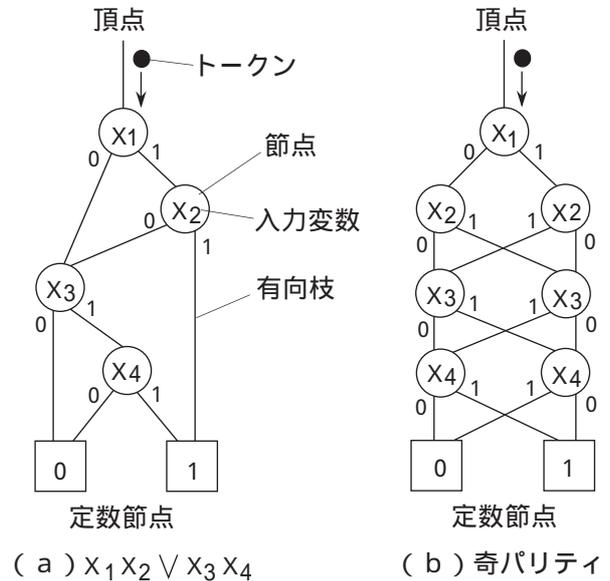


図1 二分決定グラフの例.

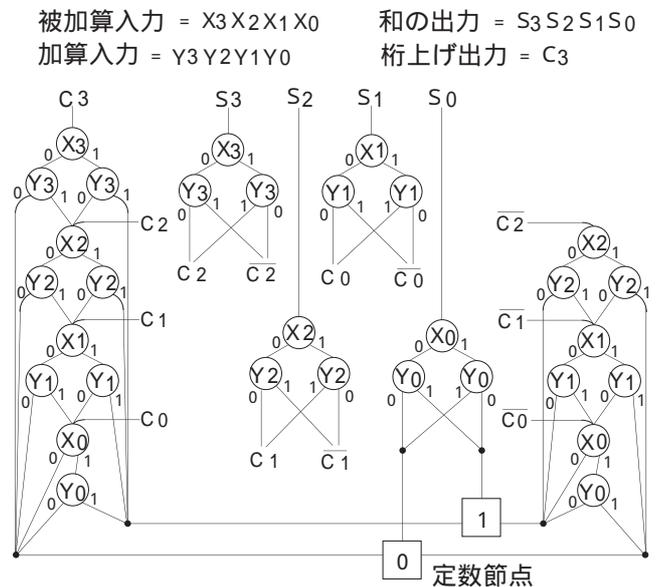


図2 共有二分決定グラフの例(4ビット加算).

二分決定グラフでは、入力変数の値を与えると、頂点からいずれかの定数節点に至る経路がただ一つ定まる。したがって、論理値を判定するために、定数節点1から頂点に向けてトークンを動かしてもよい。トークンが頂点に到達すれば論理値は1、経路が切れて到達できないとき論理値は0である。

5. フォトニック結晶素子による回路構成

フォトニック結晶を用いて二分決定グラフを具現化するときには、グラフの節点を光の二分岐スイッチ素子で構成

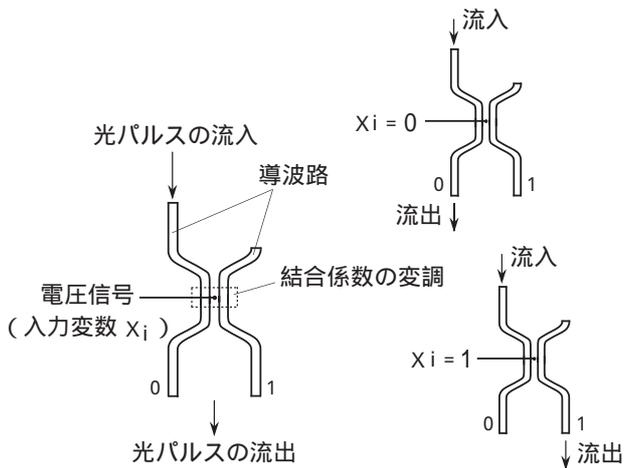


図 3 方向性結合器による二分岐スイッチ.

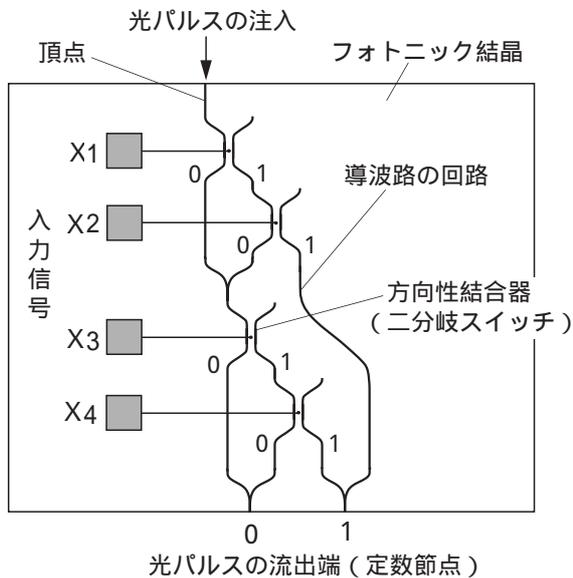


図 4 フォトニック結晶の中に集積した二分決定グラフ光回路 [図 1(a) のグラフを回路化したもの].

し、節点を結ぶ有向枝を光導波路で構成してグラフ回路をつくる。そして光パルストークンとしてグラフ回路上を移動させて論理処理を行う。

二分岐スイッチ素子に必要な機能は、流入した光パルスを入力変数の 1-0 に応じて 1-枝と 0-枝に振り分けることである。この機能を実現するための第一候補として、光導波路からなる方向性結合器を考える (図 3)。電圧信号 (入力変数) で導波路対の結合係数を変化させることにより、光の流出経路を切換えて二分岐スイッチを実現する。フォトニック結晶を用いると、方向性結合器の寸法を光波長の数倍程度に小さくできる [1]。

光集積回路の構成例を図 4 に示す。フォトニック結晶の中に二分岐スイッチ素子を集積してグラフ回路をつくる。グラフの頂点から光パルスを入れ、定数節点でそれを観測して論理を判定する。判定結果を電圧信号に変換して出力するインターフェイスが (実用の際には) 必要となるが、それは一関数あたり一つだけあればよい。

共有二分決定グラフを回路化する場合には、グラフの定数節点 1 から光パルスを入れ、それぞれの頂点で光パル

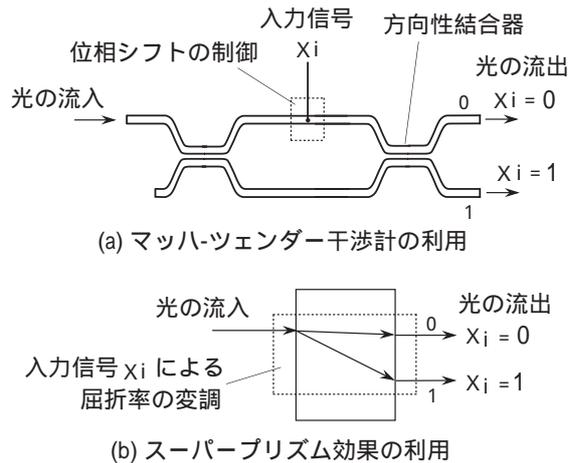


図 5 フォトニック結晶による二分岐スイッチの例.

スの到着有無を観測する。そうすることで複数の関数を同時に論理判定できる。このときには、二分岐スイッチに替えて一対の光スイッチ (電圧信号で光の透過と遮断を切り換えるオンオフ素子) を使用してもよい。

以上の光集積回路の論理動作は非常に速い。いま回路構成に必要な光路長から動作速度を見積ると、たとえば 32 ビット加算器では 演算時間 5 ps ~ 10 ps と超高速が期待できる (シリコン LSI では 1 ns ~ 2 ns)

6. フォトニック結晶による二分岐スイッチ素子

この光集積回路をつくるときのキーポイントは、効率のよい二分岐スイッチ素子の実現である。方向性結合器の他にも幾つか可能性がある。次に候補を二つあげる。

- マッハ-ツェンダー干渉計の片アームを通る光を入力信号で位相シフトして光経路を切り換える (図 5 (a))
- スーパープリズム効果 [3] を入力信号で変調して光の進行方向を切り換える (図 5 (b))

フォトニック結晶では従来の光学材料に見られない種々の物理現象が発現する。その中で「電圧信号により光の進行経路や透過率が大きく変調されるような現象」を探して利用することが今後の課題である。

参考文献

- [1] Koshiha M., et al., "Time-domain beam propagation method and its application to photonic crystal circuit components," *IEEE J. Lightwave Tech.*, Vol. 18, No. 1, (2000).
- [2] Asai T., et al., "A photonic-crystal logic circuit based on the binary decision diagram," in *International Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS)*, (March 8-10, 2000).
- [3] Kosaka H., et al., "Superprism phenomena in photonic crystals: toward microscale lightwave circuits," *IEEE J. Lightwave Tech.*, Vol. 17, No. 11, pp. 2032-2038, (1999).