

解説

3. 光情報処理システム



3.7 光コンピュータの基本問題と展望†

野 口 正 一†

1. はじめに

より速く、より多くの処理が可能なコンピュータの実現は多くの研究者の希望である。このためには従来の発想と全く異なる立場から将来のコンピュータ構築の問題を考えることも重要であろう。この一つのアプローチとしてわれわれの前にあるのが光コンピュータである。本報告ではこの立場に立って、将来、光コンピュータを構築する上での基本問題をとりあげ、いろいろの立場からの考察を進めてみたい。

2. 新しいコンピュータ構築の基本的な考え方

新しいコンピュータを設計する上で、つぎの三つの大きい考え方のレベルがある。

(1) 現在のコンピュータのもつ演算や、制御などのマイクロレベルの基本演算をできる限り速くできる新しい物理論理デバイスの開発

(2) 従来のコンピュータシステム構築の上で、処理速度を飛躍的に増加させる新しいコンピュータ・アーキテクチャの研究・開発

(3) 今までの数値処理と異なる人間のもつ知的情報処理を完全に代行できるコンピュータシステムを設計する研究

この考えに立てば光コンピュータへの期待は当然のことながら、(1)、(2)のカテゴリに属するものである。そして研究のターゲットは光のもつ極限の速さで動作する素子をどのようにして開発するか。また、これを用いて究極的な速さをもつコンピュータシステムをどう設計したらよいかという研究である。つまり、(1)、(2)の研究は光論理デバイスから現行のアーキ

テクチャのもとでの光コンピュータ開発の研究である。しかしながらこのカテゴリの研究にもいくつかの研究の階層がある。この点を明確にするため、技術開発の階層をまず明らかにしておくことが必要である。

3. 光コンピュータ構築のための技術開発における階層

まず図-1 を見ていただきたい。図-1 がコンピュータが開発されるまでの開発手順の階層である。つぎに各階層の意味について述べる。

(1) 第1レベル

このレベルは将来のニューデバイスを開発するための新しい物理現象及び、これが実際に動作する新材料開発のレベルであり、論理素子開発の上できわめて重要なものとなる。

(2) 第2レベル

このレベルは第1レベルの結果を用いて具体的に基本論理素子をどのように設計、開発するかのレベルであり、論理素子として基本論理演算のレベルが中心である。

(3) 第3レベル

第2レベルの結果を用いて、ここで開発された基本論理素子を組み合わせ、できる限り早く、信頼性の高い、しかも high integration のできる LSI の設計をどのようにして行うかのレベルである。当然コンピュータシステムが必要とする基本 LSI 素子の開発がその対象となる。

(4) 第4レベル

このレベルは問題ごとと与えられるコンピュータシステムのアーキテクチャに対し、その実現のため、第3レベルで開発された基本 LSI 素子を用いて効率よくこのアーキテクチャを実現するための、つまりコンピュータシステムを構築する研究開発のレベルである。

(5) 第5レベル

† Fundamental Problem of Optical Computer and its Future Prospect by Shoichi NOGUCHI (Research Institute of Electrical Communication Tohoku Univ.).

† 東北大学電気通信研究所

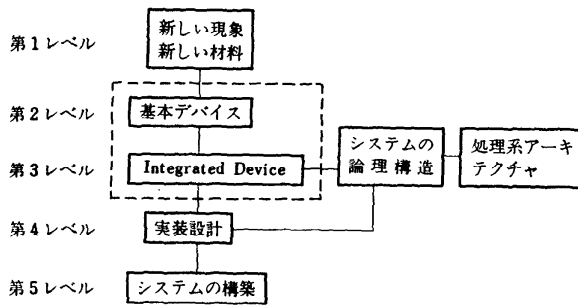


図-1

このレベルはコンピュータシステムのトータルな構築、たとえば二次記憶系や入出力機器系との整合問題などをシステムとして効率的に設計を行うトータルなレベルの研究である。

この第1レベルから第5レベルの問題を、光コンピュータの研究開発の流れの中で改めて考えればそれぞれに対する特有な問題がクローズアップされる。特に第4レベルのアーキテクチャと光との関係は光のもつ並列性の性質を積極的に取り入れる問題として興味深いものである。しかし本報告では第1～第3レベルの問題を光コンピュータ開発の原点と考え、この基本的な問題について考えていくことにする。そのためつぎに光デバイスに対する本質的な期待についてまず考えてみよう。

4. 今なぜ光デバイスなのか

光技術の発達はこの数年来目覚ましいものがあり、特に光伝送、通信技術について考えれば従来の通信技術をドラスティックに変更する大きいインパクトを与えている。この状況を当然コンピュータの分野にも持ち込み、新しい展望をこの分野で掘げられないかという希望は当然のものである。さて、光デバイスに対する素朴な期待として一体何があるのであろうか。まずその可能性について考えてみよう。

4.1 演算素子からみた光への期待

当然の第1の期待として、光素子の演算速度に対するものがある。すなわち光の速度に対応する演算素子が得られないかということである。このことは光素子をもつ幾何学的形状が定まったとき、素子に信号が入力されて必要な演算出力が求まるまでの時間が、この素子を通する時間で定まり、この通過時間が光の速度に対応する速さであるものが作れないかということである。

第2の期待としては素子間結合を含めた演算動作に対する光からの期待がある。すなわち従来のエレクトロン素子の演算と素子内の信号伝搬を考えたとき、エレクトロンがもつ本質的な電磁誘導の問題がある。つまり stray capacity, stray inductance の存在である。そしてこれによる演算速度、信号の伝搬遅延は本質的に大きい問題となっている。これに対し光素子はこの問題から解放されることになる。

第3の期待は光素子の演算に必要な動作温度がある。すなわちエレクトロンによる素子では素子のスイッチング時間を早めるため、エレクトロンの移動度を上げなければならない。このために素子の温度をある程度まで下げ衝突による影響を少なくし、エレクトロンの移動度を上げてスイッチング時間を向上させるのが通常の方法であろう。事実、最近特に有名な HEMT は GaAs の基盤で stray capacity を下げ、素子温度を液体窒素まで下げてエレクトロンの移動度を上げ、素子の高速演算を達成している一つのよい例である。さて光素子の場合、動作の担い手がフォトンなら、エレクトロンの場合と異なって十分室温でも高速演算が可能な素子を見出せるはずである。

4.2 デバイスの高密度化の可能性からみた光への期待

従来の LSI 素子では内部の基本素子を連結するためには当然のことではあるが、それぞれの結線は直接交差することがないように結線しなければならない。しかし光の場合には光の直進性により、原理的に各素子間の結線はクロスしても動作可能となる。このことは集積化の上で多層化の複雑度を積極的に減少させる大きい効果をもっている。すなわち光素子は集積化技術の上に大きい影響を与える可能性がある。

5. 現時点での光コンピュータへの接近法

現時点における光コンピュータのための演算・制御の基本的な考え方はすべて情報の伝送は光デバイスを用い、演算・制御は電子デバイスで行ういわゆるハイブリッド方式が中心となっている。すなわち、光デバイス→電子デバイス→光デバイス→……の情報の流れの中で高速演算を行おうとするものである。当然のことであるが、つぎの二つの大きい問題がある。

(1) O (光)→E (電子), E→O 変換にもとづく速度及び消費電力のオーバヘッド

(2) 光コンピュータの速度は電子デバイスの速度で定まってしまう制約

特に(2)項の制約は本質的であり、そのためこの方式に従う論理デバイスを用いる限り光コンピュータの処理速度はビットスリームで考えると 10G bits/sec が限度と言われている。当然のことであるが、この速度では半導体のみによる論理デバイスと比較してみても光コンピュータの将来性はきわめて低くなる。このためには光論理素子に対する考え方を根本的に変えねばならない。

6. 光論理デバイス

新しい光論理デバイスを考える上でつぎの二つの考え方があろう。

- (1) フォトンレベルでの光論理素子
- (2) 光パルスレベルでの光論理素子

従来の光論理素子の考え方は主として(2)に対応するものである。しかしながら今後の光コンピュータの発展を思うとき、(1)のアプローチが本質的に重要な

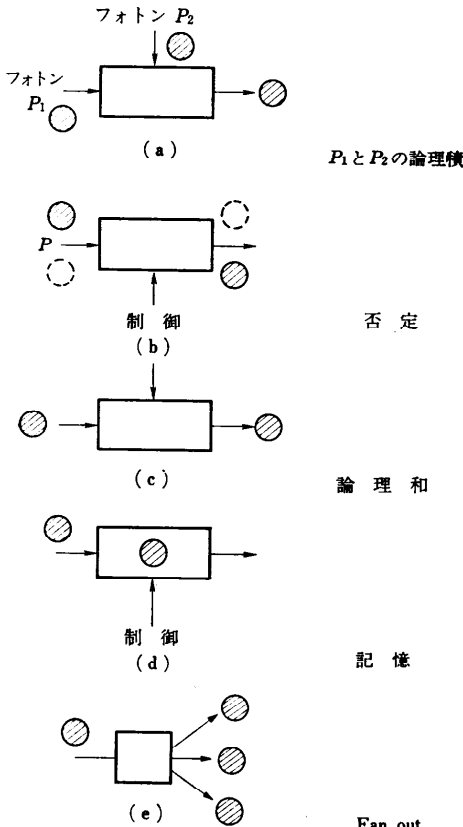
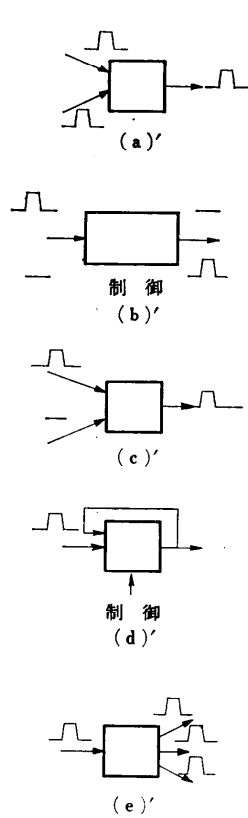


図-2

話となろう。いずれにしても、本章ではまず論理的側面から光デバイスに対する問題を考えてみる。

さて(1),(2)の論理デバイスは光そのものが情報の担い手として動作するものでなければならない。当然のことであるがどのレベルで考えても、光で情報を保持したり、論理演算を行ってくれる物理素子が実際に見出さなければならない。しかし残念ながら現時点ではフォトンレベルで動作する論理素子が具体的にあるわけではない。将来どのような光論理機能をもつものが必要なのか、まず論理動作の上で必要な諸機能について以下に示してみよう。

図-2を参照していただきたい。図-2では(1)のフォトンレベルと(2)の光パルスレベルでそれぞれ必要となる機能を示している。ここで()と()'はそれぞれフォトンレベルつまり粒子デバイスとしてのものと、光パルスレベルに対応するものとなっている。さて、(a)'~(e)'に示した論理動作の考え方は光パルス特有のものでなく、従来よりたとえば神経回路網の論理動作を基本とした論理素子、ニューリストによる



論理回路の構成のときにも議論されたものである。図-2の中で特にフォトンレベルの動作で難しいと思われる機能は(b)の否定演算と(d)の記憶機能であろう。特に(d)の機能はつぎのごとくなる。いまこの素子にフォトンが入力された場合(1個のフォトンでなくフォトンのグループと考えた方がよい)この素子はつぎのごとく動作する。すなわち制御側にフォトンがなければ入力フォトンを取り込み、フォトンがあれば入力フォトンそのまま出力する。また制御フォトンのみがこの素子に加わればつぎのごとく動作する。すなわちこの素子がすでにフォトンを取り込んでいれば、それを出力し、なければなにも出力しない。つまり(e)の論理素子はフォトンの捕捉を制御できる素子である。現在の時点ですでに述べた通り(a)~(e)の機能をもつ具体的な素子は発

見されていないが、(a)'~(e)'の機能をもつ光論理素子に対しては有望な素子が考えられている。また(d)と(e)の機能が万能であることも証明できる。さて(1)のレベルと(2)のレベルの論理素子として本質的な違いとしてつぎのことが考えられる。(1)のレベルではフォトン単位が1個でないとしてもその数はかなり少なくすむ。しかし(2)のレベルのデバイスは果して何個のフォトンレベルのもので可能となるのか、この比較は今後の興味あるところである。

7. フォトンレベルでの論理素子の限界

さて以上の話はすべて論理レベルから考察した光素子に対する考え方である。つぎにフォトンレベルで動作する論理素子があったとしたとき、この素子の物理的諸元の限界、つまりスイッチング時間、消費エネルギー、集積度などがどうなるかこれらの問題についてそれぞれの上限を以下に示しておこう。この考察は光コンピュータの将来を考える上できわめて重要である。本章ではこの立場からある物理的な条件のもとの上限を考えてみる。また別の立場の報告が本学会誌で神谷によって報告されよう。

7.1 動作に必要なフォトン数

論理素子が動作するためには当然のことであるが、動作のための最低限のエネルギーが必要である。このエネルギーを定める基本的な考え方は物理素子が誤りなく動作するために必要な条件から求められる。そして従来型の素子ではこの限界を与えるものが、(1)信号対雑音比 S/N の関係であり、(2)が論理素子への入力の大きさや、入力の同期のばらつきから定まるエネルギーと時間幅の関係である。さて素子における background noise の問題はいろいろと議論のあるところであるが、この問題に触れず、本節では一つの LSI のデバイスを考え、このデバイスが全体として確実に動作するための条件から必要となるフォトン数の平均を求めてみる。まず1個の素子が確実に動作するためには当然のことであるけれども入力情報があるときには確実に入力があり、出力すべき情報があれば確実に出力されなければならない。今光論理素子として1に対し、フォトン数が1以上の状態を対応させ0としてフォトンがない状態を対応させよう。このときフォトンが情報の担い手になる確率はつぎの(1)式の関係から与えられる。神谷によるとフォトンの平均数が m のとき、フォトン数 n が観測される確率 $P(n|m)$ はつぎのごとくである。

$$P_n = P(n|m) = \frac{m^n}{n!} \exp(-m) \quad (1)$$

このとき入力0と1が区別されるためには、 P_0 と $(1 - P_0)$ が明確に区別されなければならない。(1)式より

$$P_0 = \exp(-m) \quad (2)$$

である。問題はどれだけの m が必要かということである。さて情報処理システム全体が十分に高信頼度の環境下のもとで動作するために必要なフォトンの平均数 m をつぎの仮定のもとで考えてみる。

システムに対する仮定

(a) 情報処理システムまたは一つのチップの複雑度はゲート数換算で 10^6 とする。

(b) 論理素子の動作サイクルタイムを 1 psec とする。

(a)と(b)の仮定よりシステムの単位秒当りの(ゲート)×時間の複雑度は 10^{18} である。今システムの信頼度を 10^{-20} /秒とするとつぎの関係式が成立する。

$$(1 - P_0)^{10^{18}} \geq 1 - 10^{-20} \quad (3)$$

この関係式から大略の必要となる平均フォトン数 m を考えると、 $m \approx 100$ 個程度で(3)式は満足できる。

このことは物理素子として光デバイスを考えたとき、どのような光素子を用いてもフォトン同志の相互作用が可能なデバイスを考えると、最低限必要となるフォトンの平均数は100以上となることを言っている。

7.2 フォトン型光論理素子の動作速度と消費エネルギー

光論理素子を考える上で、まず重要なことはフォトンが通過するだけでは論理演算は不可能であり、フォトン同志の相互作用、つまりフォトンによる非線型演算が可能な物理素子が必要であるということである。このことをよく理解するため2つのフォトン P_1, P_2 による論理積回路について考えてみよう。図-3を参照していただきたい。この図ではフォトンがある状態が1に対応している。素子 D は二つのフォトンの入力

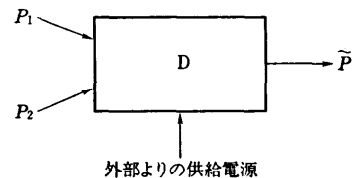


図-3

P_1, P_2 に従って P_1 と P_2 の論理積 P に対応するフォトン \bar{P} を放出する。当然のことであるけれども、 P_1, P_2, \bar{P} のもつ基本パラメータ、たとえば平均値などはすべて同一の性質を持たなければならない。

さて、このようなデバイス D を作るのに、 D がもたなければならない素子としての条件はなんであろうか。そのため D が必要とする動作を考えてみる。まずこの動作は一つの考え方としてつぎのようにしてモデル化できる。 D は二つの内部状態 0 と 1 をもつ。超電導素子を例にとればスーパーとノーマルの状態などがこれに対応しよう。 D の動作は通常 0 の状態にいるわけであるが、二つのフォトン P_1, P_2 が同時に加わったときのみ始めて D は 1 の状態に遷移し、入力が終わればもとの状態 0 に戻るように動作させる。これが非線型演算に対応するものである。このモデル化に従えばこの論理素子について論理素子の重要なパラメータすなわち、(a) 素子の動作速度と (b) 素子の消費エネルギーが規定できる。またこれにより (c) 集積度の問題も議論できる。

素子の動作速度つまりスイッチングタイムはデバイス D の状態が $0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$ に戻るまでの時間に対応する。この時間を Δt としよう。素子の消費エネルギーはデバイス D が状態変化を起こすのに必要な消費エネルギーである。

なお D の内部状態が状態変化を起こすときに発生する D のエネルギーが出力 \bar{P} を生成すると考える。しかし実際の素子ではこのような理想的な動作はせず、動作のためにいろいろのフォトンを誘発するはずであり、これがバック・グラウンド・ノイズになる。

(a) スwitching 時間

さてこのようなモデル化でスイッチング時間 Δt の上限を考えてみよう。まずデバイス D のもつ二つの状態に対応するエネルギー・ギャップを ΔE としよう。このときエネルギーと時間に対する不確定性原理からつぎの関係式が成立する。

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec} \quad (4)$$

ここで $\hbar = h/2\pi$ で h はプランクの定数である。

(2) 式より明らかなごとく Δt はデバイス D のエネルギー・ギャップ ΔE に依存する。今 ΔE としても 1 eV 程度のものが見つかれば

$$\Delta t \approx \hbar / \text{eV} \approx 10^{-34} / 10^{-19} \approx 10^{-15} \text{ sec} \quad (5)$$

つまり 1 へト秒 程度の速度をもつ素子の可能性がありそうである。しかし光論理素子の速度の速さに対する限界はこの程度ではなからうか。

(b) 消費エネルギー

つぎに光論理素子の消費エネルギーを考えてみよう。すでに述べたようにデバイス D は二つの入力 P_1, P_2 を受けて、出力 \bar{P} を放出する。 P_1, P_2, \bar{P} の物理的性質はほぼ同じでなければならないので、少なくとも P_1 がもつエネルギー相当分は確実に D で消費される。また消費のさせ方が素子を作る上で重要であろう。一方 D の状態変化を起こすためには二つの入力 P_1, P_2 のもつエネルギー $|P_1|, |P_2|$ だけでは一般に困難であり、そのため外部からのエネルギーの供給 W_{ex} が必要であろう。このためデバイス D で消費されるエネルギー W はつぎの通りになる。

$$W = |P_1| + W_{ex} \quad (6)$$

さて $|P_1|$ の推定であるけれども、今使用する光の波長を 8000 \AA とし、前節で求めたフォトン数の平均数を 100 とすれば

$$|P_1| = 100 \times h\nu \approx 2.4 \times 10^{-17} \text{ J} \quad (7)$$

となる。現在 W_{ex} の大きさを推定することは困難であるが、一応 (7) 式と同程度に見込むことはできよう。

以上の考察に従えば光論理素子 1 個当りの消費エネルギーは常温の動作で考えて $10^{-16} \sim 10^{-17} \text{ J}$ 程度が予想される。

(c) 高密度集積度の問題

いままでの考察によれば 8000 \AA の光を用いたとき、 1 個の論理素子の消費するエネルギーを少なくとも、 $2.4 \times 10^{-17} \text{ J}$ はあると推定した。

この節では、消費電力と集積度の関係を考えてみよう。

つぎの仮定をおく。

(i) 論理素子のスイッチング時間を 10 へト秒 、対応する基本クロックを 100 へト 、つまり 10^{13} ヘルツ とする。

(ii) 集積度は 10^6 gate とする。

(iii) 処理システムの中で 10% の素子が常に active となる。

以上の仮定のもとでこのときの発生する電力 W を求めると

$$W = 2.4 \times 10^{-17} \times 10^{13} \times 10^6 = 24 \text{ J/sec} \quad (8)$$

つまりこの集積回路は常に 24 W の電力を消費していることになる。 24 W のクーリングが果してできるのかかなり厄介な問題となり、この熱のクーリングのため集積度か、動作速度を落す必要があるかもしれない。

8. 超電導デバイスとフォトンデバイス

前章まで理想論理素子としての立場からフォトンデバイスについて考えてきた。現在フォトンデバイスに対抗するものとして(1)半導体素子, (2)超電導素子があるが, 本章では究極の論理素子の比較という意味で超電導素子を対象とし, 特に消費エネルギー, スイッチング速度の点からこの両者の関係を考えてみよう。

また現在量子デバイスとして世に存在するものは量子磁束を用いた超電導素子が唯一のものである。

まず超電導素子の動作原理を簡単に説明する²⁾。図-4はジョセフソン素子を用いて構成された1単位磁束 Φ_0 を捕捉している超電導閉回路である。図-4で, X, Yはジョセフソンゲート素子, α, β は制御用のトリガの入出力端子である。またこの回路には常時端子A, B間に直流のバイアス電流Iが流れている。またこの各ジョセフソン素子がスーパーからノーマル状態に移るに必要な電流を I_0 (ジョセフソン臨界電流)とすると $I < 2I_0$ で, この回路は通常は超電導状態にある。いまこの回路のもつ等価なインダクタンスをLとするとこの回路が1磁束量子 Φ_0 を捕捉しているためには大略つぎの関係が必要である。

$$\Phi_0 \approx LI_0 \tag{9}$$

また Φ_0 は

$$\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb} \tag{10}$$

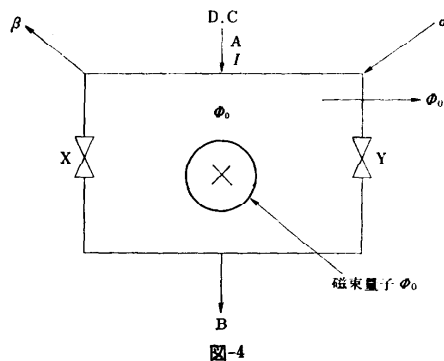


図-4

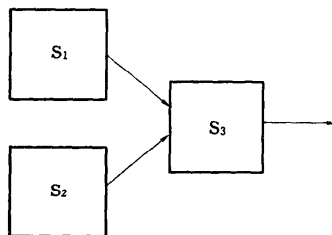


図-5

この素子をSとする。いまSのトリガ端子に電流を流し, Yに流れる電流を I_0 になるまで流せば, Sに捕捉されていた内部磁束量子 Φ_0 は図の方向に移動して消滅する。この原理を用いて論理回路を作ると図-5の構成により, 論理和, 積などの回路が作られることが知られている³⁾。この詳細な議論は省略するが, 本章で問題となる点はこの1量子磁束 Φ_0 を移動させるに必要なエネルギーと, この推移に必要な時間, すなわちスイッチング時間の上下限の推定であり, またこの両者の関係である。

8.1 消費エネルギー

まず移動に必要なエネルギー ΔW の推定を行う。この回路に蓄えられているエネルギーWは

$$W = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \Phi_0 I \tag{11}$$

Φ_0 を外に移動するにはこのWに相当するエネルギーが必要であり, また論理演算の場合に回路中で消費される素子当りの消費エネルギーの下限はWであるので, 超電導素子の1素子当りの消費エネルギー ΔW の概算は次式で表される。

$$\Delta W \approx \frac{1}{2} \Phi_0 I_0 \tag{12}$$

現在超電導素子に用いられている I_0 はmAのオーダーでありこれを用いると

$$\Delta W \approx 1 \times 10^{-18} \text{ J} \tag{13}$$

となる。

(13)式の大きさはフォトンレベルの素子の必要エネルギーの比較で一応同じオーダーであることが分かる。しかし超電導素子として, もし, より I_0 の小さいものを用いることができれば, ΔW の大きさはさらに下げることが可能であろう。しかしながら I_0 の減少に伴って一つの問題が生ずる。すなわちスイッチング時間の問題がある。つぎにこの問題に触れる。

8.2 スイッチング時間

現在前述したごとく超電導素子をもつ超電導とノーマルとのenergy gapはmeVのオーダーである。

フォトンの場合と同様に不確定原理に基づくスイッチング時間 Δt を求めると

$$\begin{aligned} \Delta E \cdot \Delta t &\geq \hbar \\ \Delta E &\approx \text{meV} = 1.6 \times 10^{-22} \text{ J} \end{aligned} \tag{14}$$

の関係より

$$\Delta t \approx 0.5 \text{ ps} \tag{15}$$

のオーダーとなり, これが現在の超電導素子のスイッチング時間の上限と考えることができる。もちろんスイ

ッチング時間も ΔE の大きいものが見つかれば当然速い素子はできるか、一方、消費エネルギーとの trade off がある。つぎにこの両者の関係を調べてみる。

8.3 超電導素子における Figure of Merits: エネルギー・スイッチング時間 $\Delta W \cdot \Delta t$ の関係

明らかのように

$$\Delta E = \alpha \cdot I_0$$

ここで $\alpha = 1.6 \times 10^{-19}$ J/amp

また、 $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$, $\Delta W = \frac{1}{2} \Phi_0 I_0$

の関係より

$$\Delta W \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar \Phi_0 \cdot \frac{1}{\alpha} \approx 0.68 \times 10^{-30} \text{ J} \cdot \text{sec} \quad (16)$$

の関係式を得る。

この関係式は超電導素子が量子化磁束 Φ_0 を演算の基本単位として考える限り、 $\Delta W \cdot \Delta t$ の下限を与えるものである。

さて(16)式は超電導素子の基本的な Figure of Merits である消費エネルギーとスイッチング時間の積の下限を与えているものである。しかし実際の回路の動作速度は、ここで与えた Δt のスイッチング時間だけでなく、素子間の遅延時間が当然問題になる。超電導素子もエレクトロンの移動で動作する限り、電磁界による stray capacity の問題はさけることはできず、実際上の動作速度の上限を定めるには、さらにこの要因も加味しなければならない。

一方フォトンデバイスの理想状態に近い状況での $W \cdot \Delta t$ の関係を超電導素子との比較の上で考えてみよう。すでに述べたようにフォトンレベルの光素子には最小限 100 個のフォトンが必要であるとした。この条件により $\Delta E \approx W$ とし(4)式を用いると

$$100 \times W \cdot \Delta t \approx 1.05 \times 10^{-32} \text{ J} \cdot \text{sec} \quad (17)$$

となり(16)式と比較してフォトンデバイスは超電導素子より約 2 桁よくなっている。このことは 1 量子磁束 Φ_0 を作るのに必要なエレクトロンの数が約 10^4 個

であることを考えれば当然のことであろう。この比較によれば光素子は超電導素子に比較して一応計算上の Figure of Merits は約 2 桁よい結果となっているが、しかしすでに述べたように超電導素子はすでに存在する素子であり、光素子はこれから見出すものである。そのため現実のレベルからの議論は別となろう。特に光素子のフォトン数 100 個は S/N の問題を考えたとき、素子をドライブするのに果して十分な数であるかは問題となろう。

9. 結 論

本報告は光コンピュータの将来への期待に対し、主として光素子の性能を理想的な状況のもとで議論をし、論理素子としての立場からその将来性について一つの考え方を示した。つぎの重要な問題は光コンピュータ構築の上で重要なアーキテクチャレベルの議論や、総合システムとしての光コンピュータ設計の問題を考察することである。

なお本報告をまとめるに当たり、文部省科学研究費補助金総合研究A“光コンピュータの基礎に関する総合的研究”(代表稲場文男)のメンバの方々及び本学の沢田教授の討論と、特に超電導素子について大矢助教授の討論に厚くお礼を申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) 神谷武志: 光デバイスの可能性, 東北大学通研主催第 19 回シンポジウム論文集, 光コンピュータへのアプローチ (Mar. 1983).
- 2) Nakajima, K., Oya, G. and Sawada, Y.: Fluxoid Motion in Phase Mode Josephson Switching System, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-19, pp. 1201-1204 (May. 1983).
- 3) Oya, G., Yamashita, M. and Sawada, Y.: Single-Fluxoid Quantum Four-Junction-Interferometer Operated in the Phase Mode, IEEE Trans. Magn. (1985).

(昭和 60 年 4 月 30 日受付)