

記憶装置の概要*

元 岡 達**

1. 情報処理技術における記憶装置の重要性

記憶装置のような機能を持った装置は、電子計算機が出現するまでは、ごく小規模のものを除いてほとんど存在しなかった。したがって記憶に関する技術は、電子計算機の着想と共に生れ、その進歩は電子計算機の進歩と歩調を共にしてきた。リレーから電子管、トランジスタと変遷をたどった論理素子の進歩も、計算機の進歩に多大の影響を与えたことは事実であるが、それと同程度に、あるいはそれ以上に記憶装置の進歩は計算機の方式・性能の向上に大きな影響を与えた。すなわち、電子管を記憶装置として使用していた電子計算機の創生期時代にはプログラムを記憶装置に入れることは到底考えられず、プラグボードによる制御が計算機の方式・性能に決定的な影響を与えていた。

プログラム記憶方式の制御は、水銀柱超音波遅延線・磁気ドラム・陰極線管・磁心マトリクスといった一連の、高速記憶装置の実用化によって始めて可能となり、計算速度の向上も記憶装置の直列方式から並列方式への変換、循環記憶方式から即時呼び出し方式への変換によって達成された。さらに ALGOL などの共通言語の使用を中心としたプログラム技術の向上も低廉・大容量の磁心記憶装置を高い信頼度で使えることが前提となっている。また事務組織の機械化を始めとする一連の大容量のデータファイリングの機械化も、磁気ドラム・磁気テープ・磁気ディスクといった外部記憶装置の発達と共に進歩してきたといえる。

将来の情報処理技術の進歩を考えてみても、計算機の大形超高速化の方向に対して限界を与えるものが記憶装置の速度であることはまず間違いない。またコンパイル・機械翻訳・パターン認識といった技術の進歩のためには、連想記憶 (Associative Memory) を始めとする新しい方式の記憶装置の実用化が必須の条件となるであろう。

2. 呼び出し方式による記憶装置の分類

このような記憶装置に使用される記憶素子については計算機発達当初より多くのものが提案されている。これらのうち、現在盛んに使われているもの、および将来使用される可能性のあるものについて以下概観してみることにする。

記憶装置は、通常記憶媒体によって分類されているが、呼び出し方法を中心に分類してみると、下記のように分けることができる。

- (1) 遅延を利用するもの。
- (2) 機械的な運動を利用するもの。
- (3) 回路選択によるもの。
- (4) 電子、光などの偏向によるもの。

(1) はいうまでもなく、超音波や電磁波の遅延時間を利用するもので、水銀柱遅延線・磁歪遅延線など超音波の遅延については実用に供されたものも多い。将来計算機の超高速化が進むにつれて、電磁波の遅延を利用するものも脚光をあびてくるものと思われる。この方式の本質的な欠陥は、遅延時間を長くして多くの情報を貯えようとする、平均の呼び出し時間が長くなり、また温度などの遅延時間を変える因子の制御が困難になることである。

(2) の機械的な運動を利用するものとしては、磁性面記憶があげられる。磁気テープ・磁気ドラム・磁気ディスクなど、今日実用されている代表的な外部記憶装置は全てこの範ちゅうに属し、低速・大容量の記憶に今後とも広範囲に利用されるであろう。機械的な運動にたよるため本質的に高速化には不利な方式であり、もっぱら大容量・低価格のものが目標となる。

(3) の回路選択によるものは、現在の高速記憶の中心となっている。すなわち現在実用されている高速記憶装置のほとんどが磁心マトリクス記憶であって、この範ちゅうに属する。即時呼び出し方式であるため高速化に関して原理的な欠陥はないが、選択回路が高価なものとなることなど、大容量化に関しては障害が多い。将来の高速記憶素子として有望視されている磁気

* Survey of Digital Computer Memory by Tohru Moto-Oka (Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo)

** 東京大学工学部

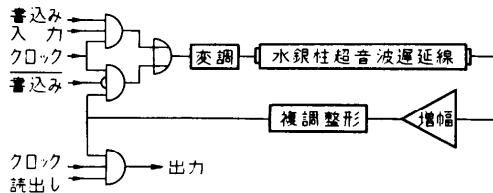
薄膜・超伝導記憶素子などを用いる記憶装置もこの範ちゅうに属する。

(4)の電子や、光のビームの偏向を利用して呼び出しを行なう方式は、原理的には非常に優れたものと思われるが、この方式による記憶装置では信頼度・寿命などに問題のあるものが多く、今のところ実用化されているものは少ない。陰極線管を用い、螢光面の2次電子放出を利用して電荷の分布で情報を記憶させるWilliams管は磁心マトリクス記憶装置が実用化される以前には、高速記憶装置として広く使用されたが、現在ではほとんど使用されていない。

3. 遅延を利用する記憶装置

実用化された最初の遅延線記憶は、遅延に水銀タンク中の超音波の伝播を利用したもので、電気信号と超音波信号との間の変換素子としては水晶のようなピエゾ効果の大きい結晶を使う。水銀を使う理由は振動子との整合の良い物質を使う必要からである。また初期の時代に固体を使わず液体中の伝播を使った理由は縦波のみならず横波など、いろいろなモードの波が発生すると雑音となり、好ましくない影響を及ぼすのをさけるためであった。バンド幅を制限して整合をよくするために、変調技術が使われ、5~30 Mcの搬送波が使われた¹⁾。したがって信号パルスの繰り返し周波数は数 Mc 以下である。

第1図が、水銀柱超音波記憶装置の原理を示したブ



第1図 水銀柱記憶装置ブロック図

ロック図である。長い遅延時間を得るためには長い水銀タンクが必要となるが、あまり長いものは取扱いも不便だし、容器の価格も高くなる。このために容器を多角形にして多数の反射を使い、比較的小形で長い遅延時間を得る技術が用いられるようになった。

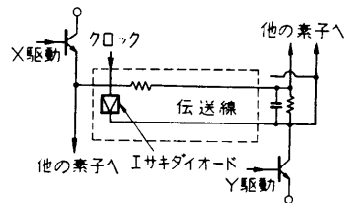
その後伝播媒質としては、熔融水晶・ガラスなどが振動子との整合もよく損失が少ないこと、温度特性が良好であることなどの理由から、水銀に代るものとして用いられるようになった。しかしピエゾ効果を利用する超音波遅延線は、増幅・変復調などにも経費が

かり、遅延時間を長くしようとすると呼び出し時間が長くなるので、今後電子計算機などのデジタル技術で用いられる可能性はほとんどない。

磁歪を用いた遅延線はこれに対して、安価な比較的小容量の記憶素子としてレジスタなどに今後も用いられる可能性がある²⁾。磁歪遅延線としては通常ニッケル線が用いられている。コイルによって電気信号を磁界にかえ、これで磁歪を起させ、この超音波信号がニッケル線を伝播して受信端では、磁歪による透磁率の変化を再びコイルで検出して電気信号に変換する。伝播する超音波信号としては縦波も用いられるが、伝播中の減衰を減らす意味で、ねじれ波も用いられるようになった。

伝送信号のパルス繰り返し周波数は、高くなるにつれて遅延線での減衰が増加するのみならず、変換コイルの大きさによってもパルス幅が制限されるので、数Mcが実用上の限界となっている。パルス幅を狭くするためには、コイルを小さくしたり、形状に工夫をこらしたりしているが、画期的な性能の向上は望めそうにない。

電磁波の伝播を利用することも古くから考えられていたが、小形で長い伝播時間を得るためには、インダクタンス・静電容量を組み合わせた擬似送電線を使う必要があり、これがかなり高価なものとなって、あまり実用化されなかった。しかし超高速パルス回路技術の発展と共に、短い遅延時間でも多くの情報が貯えられるようになり、同軸ケーブル、ストリップラインなどが遅延線として用いられる可能性が生れてきた。その一例が第2図に示すエサキダイオードと遅延線とを



第2図 エサキダイオード伝送線記憶をマトリクス状に配置した記憶装置

組み合わせた記憶装置であり、800 Mcの繰り返しパルスを記憶させた例が報告されている³⁾。

この方式では、記憶も電磁エネルギーの形で行なわれるからエネルギー変換にともなう損失はなく、この例でも明らかのように入出力回路が簡単になる可能性がある。この回路では、1本のエサキダイオードが励

振パルスの使用によって書込み、読出し、再生の役割を果たしている。入力信号に応じてエサキダイオードで発生されたパルス信号は電磁遅延線を伝播し、他端で反射して遅延線の2倍に相当する時間後に再び反射波として入力端のエサキダイオードのところに戻ってくる。ここで記憶を続けたいときには、エサキダイオードがその反射波を再生増幅して再び遅延線に送り出すことになる。新しい情報に書き変えたいときには反射波に打ち勝つだけの入力信号を加えればよい。

物理現象の遅延を利用する記憶装置で、上述のものと少し毛色の変わったものとして、磁気共鳴のスピンエコー現象を利用することが提案されている。最初核磁気共鳴の利用が提案されたが、この方式では0.1 s ぐらいの遅延で1,000 bits の記憶容量を得ることが限度であり、他の方式に比してあまり利点が認められなかった。電子の常磁気共鳴を利用するとパルス繰返し周波数・記憶容量ともに改善される可能性があることが報告されている。この場合には $10^5 \sim 10^6$ bits の記憶装置を作り得る可能性があり、小さな記憶容量のときには $1 \mu\text{s}$ 以下の呼び出し時間となり得る。CaCO₃ 中の Mn²⁺ などでも実験されているが、実用化の可能性は適当な物質を得ることにかかっている状態である。

4. 呼び出しに機械的な運動を利用する 記憶装置

この方式に属するものは大部分呼び出しに機械的な運動を利用しているものであって、必然的に速度は純電子的なものに比して遅くなる。この方式に分類できるものは記憶媒体としてほとんどのものが磁性面を用いており、代表的な大容量低速記憶装置である。磁気テープ、磁気ドラム、磁気ディスクはすべてこの範ちゅうに属すると考えてよい。磁気ドラムや磁気ディスクのように一定速度の回転を利用しているものは時間的な選択となるので、遅延線による第1の方式と類似点も多い。

磁気テープは、録音用として古い歴史を持っているが、これをデジタル信号の記憶に使用するには幾つかの障害を乗り越える必要があった。録音用のテープでは特性の均一性が望まれるものの、これはかなり巨視的な意味での均一性である。たとえば、テープに小さなきずがあるということは、音を再生したときに小さなクリックが入る程度で、テープが使用にたえないというような欠陥とはならない。

デジタル記憶テープでは特性の多少の変動は問題

にしないが、小さなきずのようなものは情報の誤記憶となり、これが磁気テープの実用化を長い間妨げる最大の要因となっていた。このため初期には磁性を持った金属テープなども一部に使用されたが、現在ではこの問題はほとんど解決しており、マイラをベースに使った1/2 in 幅のテープが広く使われている。これに200 bits/in の密度で7~9 channel 貯えることが標準の技術となっており、1,500 bits/in のものもできている。この密度もテープの特性によって押えられているものではない。

磁気テープの駆動機構にしても、録音・録画を目的とするときには等速度性のみが問題となるが、計算機に使用する場合には任意の場所をできるだけ早く呼び出すために高速度の発進、停止のできる機構をそなえる必要がある。このため大きな力がテープに加わることになるが、これによってテープが傷まぬようにいろいろ工夫がほどこされている。リールに巻かれたテープ部分とヘッド近辺のテープ部分の間にとるみを持たせ、高速の発進、停止をするテープ部分をヘッド近辺だけに限って質量を減らし、駆動を容易にする努力がはらわれている。この緩衝部分を制御するのに、当初はアームテンション方式という機械的な方式によっていたが、最近の高速度のものではほとんど、空気圧を利用する方式になっている。また駆動部分の制御にも空気圧を利用して高速化とテープ保護をはかっている例も多い。現在1ないし3 ms の時間で発進あるいは停止が可能となっている。テープ速度は50~150 in/sec 程度である。

磁気記憶装置が普及する前には、磁気ドラムが中・小形計算機の主記憶装置として用いられ、その時代には、呼び出し時間を短縮するために回転数を上げるための努力がはらわれ、10,000 rpm 以上のものが使われた。現在では外部大容量記憶としての用途が大部分なので、1,500~3,600 rpm のものが多い。磁性面とヘッドの接触をさけ、しかも記憶密度を上げるために1 mil 程度の距離に間隔を維持しなくてはならない。このようにしても記憶密度は2~300 bits/in 程度が限度で、トラック数も1 in 当り10~100個程度である。最近ヘッドを固定せず空気圧の利用で浮かせる方式が開発されているが、この方式によれば1,000 bits/in くらいまで記憶可能といわれる。

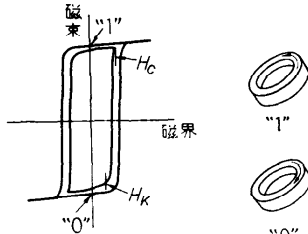
浮動式ヘッドが実用化されたことによってヘッドも動いて、呼出しの役割を分担する方式が廉価な大容量記憶方式として脚光を浴びているが、その代表的な

のが磁気ディスクである。これは磁気ドラムがドラム表面という2次元的な記憶方式であるのに対して薄い円板を多数重ねることによって實質的に3次元的な記憶方式にして、体積当りの記憶容量を増している。これで1台当り 10^8 bits 前後の記憶を実現している。仕様その他については川又氏の論文(本誌315ページ)にくわしいので、ここでは省略する。

5. 回路選択によって呼び出す記憶装置

この方式に属する最も代表的なものは前述のとおり磁心記憶装置であり、広く主記憶装置として使用されているので、現在使用されている技術についてふれておくことにする。今後の発展については榎本、小関両氏の論文に詳しく紹介されている(本誌308ページ)。

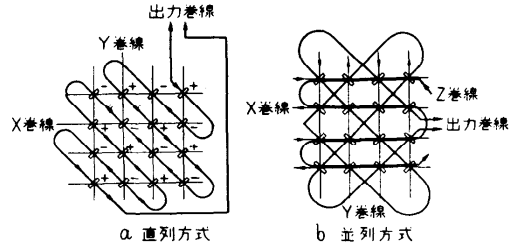
情報 1 bit の記憶に、角形ヒステリシス特性を持ったリング状のフェライト磁心一つを用い、残留磁束の向きが第3図に示すように磁心中で左回りであるか、



第3図 磁心記憶素子の原理

右回りであるかによって、これを“1”，“0”の情報に対応させ、記憶することは衆知のとおりである。磁性材料としては Mg-Mn 系のフェライトが良く用いられる。Mo-パーマロイなども一部に用いられ、抗磁力が小さいという利点もあるが、高速化のためにはうず電流をさけるために非常に薄くする必要があり、このため取扱いがむずかしく高価なものとなる。今日ではスイッチング用の磁心に一部用いられるのを除き、ほとんどフェライトが用いられている。磁心の大きさについては初期には外径 80 mil のものが用いられていたが、駆動電流を減らすために次に小形化され、現在 50~30 mil のものが主として用いられており、他の論文にもあるとおり、さらに小形のものも作られている。

この磁心をマトリクスに組んで記憶装置を作るわけであるが、第4図のような磁心マトリクスを用いて縦・横の駆動巻線群からそれぞれ1本ずつを選び、その交点にある磁心を選択し、読み出し、書き込みを行



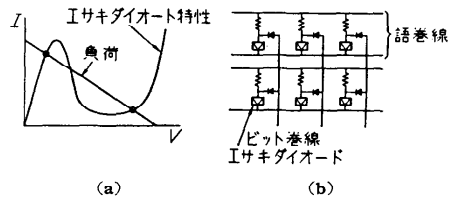
第4図 電流一致方式磁心マトリクス

なう電流一致選択方式が一般に用いられている。この場合、磁心は単なる記憶作用だけでなく、選択作用の一部もひきうけている。第4図(a)は磁心マトリクスの原理図で、マトリクス1枚で記憶装置を作り、直列読出しを行なう場合に用いられる。通常は第4図(b)のような組み方をしたマトリクスを用いる。これを1語を構成するビット数だけ重ね合わせたものを用い、駆動巻線 X, Y は全マトリクス共通にして、1語の並列読出し、書き込みを行なうようにしている。このため各マトリクスに異なった情報を書き込めるように Z 巻線あるいは抑止巻線と呼ばれる書き込み用の巻線を余分にもうけている。

この記憶装置で読出し、書き込み速度に限界を与える最も重要な要素は、磁心の磁束の向きが反転するのに要する時間すなわち、磁心のスイッチング時間である。

現在実用化されているものの速度は読出し・書き込み周期(サイクル時間) $2 \mu s$ 程度で、電流一致によらず高速化したものでも飛躍的な改善は望めない。この壁をやぶるものとして期待されているものに磁性薄膜がある。磁気薄膜記憶ではサイクル時間にはスイッチング時間は無視できる。マトリクス上での信号の伝送時間、駆動回路、読出し増幅器での遅れなどがこの周期を制限する要因となってくる。したがって周期を 100 ns 以下にすることはかなり困難である。

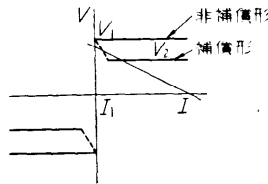
エサキダイオードと抵抗を組み合わせた回路が第5図に示すように、二つの安定状態を持つことを利用し



第5図 エサキダイオードマトリクス記憶

て、エサキダイオードを記憶素子として使い、これをマトリクス状に配置した記憶装置⁹⁾も超高速記憶装置として一部に使用されているが、エサキダイオードが現状ではかなり高価なものなので、大容量の記憶に適したものとはいえない。素子のスイッチング時間は確かに速いが、磁気薄膜のところでも述べたように、サイクル時間に限界を与える要因が駆動線、読出し線での信号の伝送時間となると、磁気薄膜の場合と類似の周期になってしまう。ただ駆動電流が比較的小さくてよく、出力信号も大きいことを考慮すると、磁気薄膜よりは速度の点ではやや有利であろう。

もう一つ忘れることのできないものに極低温現象を利用した記憶素子がある。第6図はGe中の不純物の極低温における衝撃電離を利用した Cryosar と呼ばれる素子の電圧・電流特性である⁹⁾。図にあるように

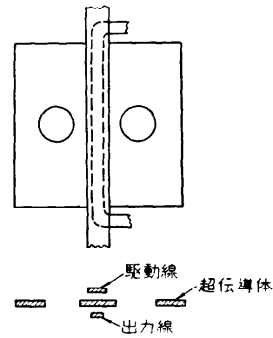


第6図 Cryosar の V-I 特性

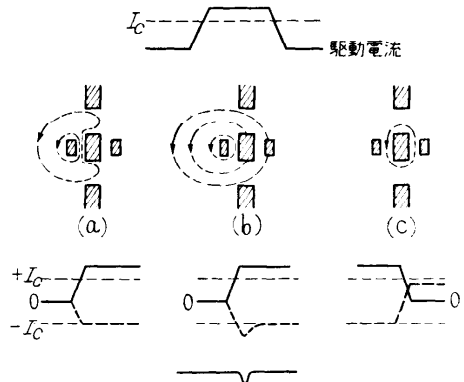
補償形の Cryosar はエサキダイオードと同様負性抵抗特性を示すので抵抗と組み合わせると二つの安定状態を作ることができる。ただし、エサキダイオードと Cryosar では電圧と電流の関係が逆になっている。

この素子は 10 ns 以下のスイッチング時間を持ち、小形化が容易でマトリクス状にも簡単に作れる利点があり、液体ヘリウム程度の極低温を必要とすることを除けば、理想的な記憶素子といえる。極低温のため現状ではかなり大容量にならぬと採算に合わないが、将来大容量・高速の記憶装置が必要ときには使用されるようになる。

極低温での超伝導現象を利用したものに持続電流で記憶をさせる記憶素子がある⁶⁾。これは超伝導体に二つの孔があり、中間が狭い超伝導の橋でつながれた第7図のような構造をしている。駆動線と読出し線は図のように超伝導体を間にはさんで、橋の部分に配置する。持続電流の書き込みには、超伝導体に磁束が貫通しないという性質を利用する。すなわち、駆動電流を流すと、まず、第8図(a)に示すように駆動電流による磁束を打ち消すように橋の部分を通して孔の周りに電流が誘起される。駆動電流が増し、磁界がある閾値



第7図 2孔形超伝導記憶素子

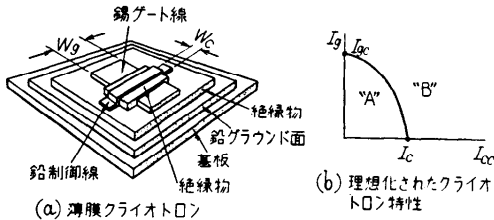


第8図 2孔形超伝導記憶の動作原理

を越えると(b)に示すように、超伝導体は通常の抵抗を示す導体に変じ、磁束は貫通して読出し線に電圧を誘起するようになる。駆動電流が切れると、超伝導体には(c)に示すように閾値を越えた分に相当する電流が持続電流として残ることになる。

実際にこの素子を作ろうとすると、孔にそった部分で超伝導体の厚さが次第に薄くなる端効果のために、均一な特性を持った小形の素子は作りにくい。このため均一に超伝導物質を蒸着した板が使われているが、原理は全く同じである。この方法によると 10^7 bits/in³ の密度で記憶が可能であり、100 ns くらいのサイクル時間が可能といわれている。

超伝導制御素子 Cryotron ももちろん、記憶素子として使用できる。初期の Cryotron は Ta のゲート線に Nb の制御巻線を巻いたものであったが、今日考えられているものは高速化と大量生産に適した方式として薄膜化したものであって第9図(a)のような構造になっている。制御線の電流によって作られた磁界でゲート線を超伝導状態から、普通の抵抗を持った状態に



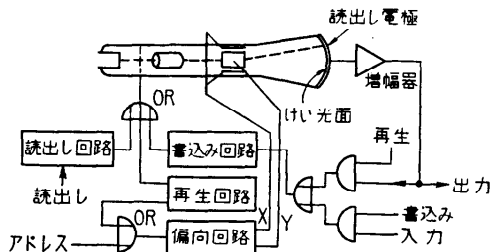
第9図 クライオトロン

変えることによって回路の開閉を行なうのがその原理であって、第9図(b)はその特性例で“A”で示した範囲で超伝導を示し、“B”で示した部分で普通の抵抗を示す。Cryotron そのものを使って通常の記憶装置を作ることは得策とは思えないが、近年各方面から要望の高まっている連想記憶に使用する素子としては、それ自身が論理回路素子である点で非常に有望であり、数例が提案されている⁹⁾。

このほか、強磁性体材料のかわりに強誘電体材料を用いた記憶装置、ねじれによって螺旋状に磁化容易軸を作る Twistor など、この形に属する記憶装置は多数あり、半永久記憶の多くもこの形に属しているが、紙面の都合上この程度にとどめることにする。

6. 電子や光のビームの偏向を利用するもの

電子や光のビームを偏向して希望の場所を呼び出す方式は、高速記憶を可能にする手段として早くから着目され、Selectron など複雑な構造の陰極線管が提案されたが、実用化されたものは Williams 管と呼ばれる一般のブラウン管とほとんど同じ構造の陰極線管を用いるものである。これは蛍光面上に電子ビームを当てて2次電子放射を利用して電荷を貯えることによって記憶させる方式である。すなわち蛍光面上にビームで入力信号に対応した適当なパターンを描き、電荷分布の形で情報を記憶する。読み出しに際しては読み出し用

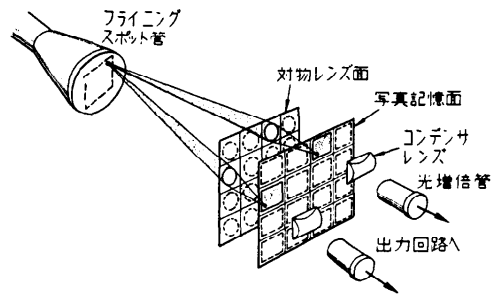


第10図 Williams 管記憶装置

パターンをビームで描き、電荷分布の変化を蛍光面に面して置いた平面電極に容量結合で出力として取り出す。記憶内容は漏洩抵抗を通して数 ms の時定数で消えるから、第10図に示すような回路方式にして再生する必要がある。

この記憶装置は磁心マトリクス記憶が実用化される以前には代表的な高速記憶装置として使われたが、出力信号が小さく S/N 比が良くないこと、再生が必要なこと、などのために信頼度もあまり高くなく、管の寿命も短いので、今日ではほとんど用いられていない。通常この方式では 3in の陰極線管を使って 1,000 bits 程度の情報を貯えているが、情報記憶密度をあげるために蛍光面の近くに2次電子を集める電極を置いた陰極線管も開発されている。この管では 5in のもので $1 \sim 2 \times 10^4$ bits 記憶ができる。

写真乳剤が非常に高分解能を持つことを利用して、大容量の記憶を小さな面積でやる試みは代表的な半永久記憶装置として注目されている。実用化された代表的なものとしては Bell が電話の電子交換に利用した Flying Spot Store がある⁹⁾。第11図のように陰極線



第11図 フライニングスポット記憶装置

管の前に多数のレンズ系を並列に置いて並列読み出しをすることもできる。5 μ s 程度の即時呼び出し時間を持ち、 10^7 bits 以上の記憶容量を持った半永久記憶装置が比較的簡単に作れる点で今後の発展が望まれる。

写真乳剤と共に注目される記憶媒体に National Cash Register で開発した Photo chromic coating がある¹⁰⁾。これは写真乳剤と類似の性質があるが、粒子でないので本質的に分解能が高く 1,000 lines/mm 以上である。しかも現像処理を必要とせず、可逆的である。原理は個々の分子が可視光線を透過する状態と可視光線を吸収する状態との間をスイッチすることによって、像を作ることを利用している。現在使われている物質では紫外線で着色状態となり、熱や適当な可

視光線で無色状態になる。

7. 緒 言

以上、種々の記憶装置を概観してきたが、現在実用化されているものすべてを網羅したわけではない。またほかの論文との重複をさける意味で、別に比較的詳細な説明のあるものについては簡単にふれたり、省略した。これらの中には現在代表的な記憶装置として広く使用されているものが多く含まれている。それらについてはほかの論文を参照されたい。

記憶装置の技術は、電子計算機の進歩と歩調を合わせ、今後ますます高速化・大容量化の方向に向かって進んで行くであろうが、高速化については現在の技術を押しすすめたのでは数千語の記憶装置では 100 ns 程度の呼び出し時間が一つの限界と考えられ、大容量化については写真技術が限界を示しているといえる。また連想記憶を始めとする種々の機能をそなえた記憶装置の実用化も今後に残された大きな課題である。

参考文献

- 1) I.L. Auerbach et al: Mercury delay line memory using a pulse rate of several megacycles; PIRE, 37 (Aug. '49) pp. 855~861
- 2) A. Rothbart: Bibliography on magnetostrictive delay lines; IRE Transaction on Electronic Computers EC-10 (June '61) p. 285
- 3) E. Goto et al: Esaki Diode High-Speed

Logical Circuits: I.R.E. Transaction on Electronic Computers EC-9 (Mar. '60) pp. 25~29

H.H. Haris and W.D. Pricer: Electrical Delay-Line Memory System Using Tunnel Diodes, Digest of Technical Papers 1963 International Solid-state Circuits Conference pp. 14~15

- 4) M.E. Browne et al: Electron Spin Echo Serial Memory Storage, Large Capacity Memory Techniques Macmillan (1962) pp. 263~276
- 5) R.C. Johnston: Cryosar Memory Design, IRE Transaction on Electronic Computers EC-10 (Dec. '61) pp. 712~717
- 6) L.L. Burns et al.: Coincident Current Superconductive Memory, IRE Transactions on Electronic Computers EC-10 (Sept '61) pp. 438~446
- 7) R.R. Secber & A.B. Linquist: Associative Memory with Ordered Retrieval, IBM J. Res. and Develop. 6 p. 126 (1962)
- 8) F.C. Williams et al.: Recent Advances in Cathode Ray Tube Storage, PIEE 100 pt II (1953) pp. 523~539
- 9) C.W. Hoover and G.Hangk: The Flying Spot Store, Large Capacity Memory Techniques Macmillan (1962) pp. 79~98
- 10) C.O. Carlson et al.: The Photochromic Microimage Memory, ibid pp. 385~410

(昭和 38 年 10 月 15 日受付)