

## 報 告



## パネル討論会

## 新しい情報処理デバイスの展望

—新しい計算機システム構築のために—

昭和 59 年後期第 29 回 全国大会<sup>†</sup> 報告

## パネリスト

西澤 潤一<sup>1)</sup>, 安部 正幸<sup>2)</sup>, 岡部 洋一<sup>3)</sup>  
 阪口 光人<sup>4)</sup>, 中村 慶久<sup>5)</sup>, 角田 義人<sup>6)</sup>  
 堀 浩雄<sup>7)</sup>, 司会 野口 正一<sup>8)</sup>

司会 ではただいまからパネル討論「新しい情報処理デバイスの展望」を始めさせていただきます。

初めに、各パネリストをお一人ずつご紹介してまいりたいと思います。

一番左におられます先生が、皆さんよく承知の西澤先生でございます。もうすでに昨日の講演会でご承知でございますから改めてご紹介することはありませんけれども、先生は 23 年の東北大学の電気工学科のご卒業でございます。現在は電気通信研究所の所長。専門分野は皆さんご承知の SIT を初め、半導体の基礎から応用にわたる日本における代表的な権威者でございます。

続きまして、二番目の安部さんをご紹介いたします。安部さんは大阪大学の基礎工学部博士課程を昭和 48 年にご卒業でございます。現在は富士通の個別半導体事業部におきます開発技術部長付でございます。ご専門はきょうのお話にあります HEMT の研究であります。

続きまして東京大学の岡部先生をご紹介いたします。岡部先生は昭和 42 年に東京大学電気工学科のご卒業でございます。現在は同じく東京大学の工学部電気工学科の助教授で、教育用計算センターの方の助教授も兼務されておられます。ご専門は電子デバイス工学、特にジョセフソン素子、それから将来の集積回路工学及び人工頭脳が研究分野でございます。

続きまして阪口さんをご紹介いたします。阪口さん

は名古屋工大の電気工学科を昭和 37 年のご卒業でございます。現在は日本電気の光エレクトロニクス研究所光応用研究部の部長でいらっしゃいます。ご専門は光情報処理ハードウェアの関係、光交換、光ディスク、ディスプレイがご専門でございます。

続きまして中村先生をご紹介いたします。中村先生は昭和 43 年、東北大学大学院工学研究科博士課程のご卒業で、現在は東北大学の電気通信研究所の助教授でいらっしゃいます。ご専門は高密度磁気記録に関する研究、特に垂直磁気記録に関する研究でございます。

続きまして日立製作所の角田さんをご紹介いたします。角田さんは昭和 43 年、東大教養学部基礎科学科のご卒業でございます。現在は日立製作所中央研究所の第 6 部の主任研究員でございます。入社以来、光ディスク、ホログラフィなど光記録の研究をご専門にされております。

最後になりますが堀さんをご紹介いたします。堀さんは東北大学工学部通信工学科を昭和 36 年にご卒業でございます。現在は東芝の電子技術研究所に勤務されております。ご専門はディスプレイデバイスの研究開発でございます。

以上が講師のご紹介でございますが、今回このパネルを持ちました理由は、現在、情報処理学会と他の学会、つまり通信学会あるいは応物学会などの境界の研究テーマとして、このデバイスの問題はきわめて重要であるということ、そして将来われわれシステム屋が新しいシステムを構築する上でデバイスの問題はきわめて重要な問題であるということです。先ほどもお話ししたのでありますが、システム屋がいくらがんばっ

<sup>†</sup> 日時 昭和 59 年 9 月 13 日 (木), 12:30~14:45

場所 東北工業大学

1) 東北大, 2) 富士通, 3) 東大, 4) 日電, 5) 東北大,

6) 日立, 7) 東芝, 8) 東北大

たところで、システムの性能を数 10% 上げるということはきわめてむずかしい。それに対しまして、デバイスの方から攻めてまいりますと二けたまでとはいきませんが、一けたレベルの性能の向上はそれほど困難なくできるのではないかと。そのため将来われわれが大規模なシステムを構築する上で、ぜひともデバイス側に対していろいろ物を申し上げたい。

きょうはひとつ、お互いがどういふことを将来やっていくかという問題を、システム—デバイス屋間、またデバイス屋の間で十分な討論がパネルを通してできれば大変うれしいと思っております。まず最初に各ご専門の先生方からご自分のデバイス屋の立場から将来システムを構築するにはどうするかという点から、お考えになっているいろいろのお話を 15 分間くらいしていただき、その 1 ラウンド過ぎましたら、いまのお話を基に各フロア及びパネルの方々の間で活発な討論をしていただきたいと思います。場合によりまして私がフロアの先生方にもアクチュエートする意味でいろいろ質問をお願いすると思しますのでどうぞよろしくお願いいたします。

では、最初に西澤先生からお願いいたします。

西澤 大体、将来のことを年寄りに聞くというのははなはだ心得違いでして、過去のことを話すのが年寄りの務めだろうと思いますが、何か、たまたま私の研究室の若いのがお話しができるのがおらないものですから、しょうがなしに私が代役を務めさせていただく

わけです。

現在のところいろんなお話がございませけれども、結局どうもオーソドックスにトランジスタの周波特性をよくしていく、また、低電力動作を実現していくことが従来の情報処理機器の進歩にじかにつながっていたということになっているわけです。本当はそれだけでは望ましくないで、野口先生ともあろう方が、デバイス側からイノベーションを出せなんていうことを一方的に言うてくださっては困るわけでありまして、大いに系統的にこういうものをつくるべきだとか、そのためにこんなトランジスタを作れということハード屋に要望を出していただくというような形に早くなっていたいただきたいものだというふうに考えております。

で、図-1 に示したのが加える電力とスイッチおくれ時間の関係で、SIT 関係の集積回路が比較的電力側にあります。いままでの SIT は接合型を中心にしてやってまいりましたので、どうしてもその到達の速さが図-1 にかいてありますように 0.1 ナノまでくらいです。で、すでにこれを CMOS 化することによりましてもうちょっと速くまでいっておりますが、将来 MOS 化や、ガリウムヒ素でやるということを考えますと 1 psec の辺まで来そうだ。実は、もうちょっと言いたいことを言わせていただきますと、サブピコくらいまでは来そうだという気がしております。

いずれにいたしましてもこういうものを実現してい

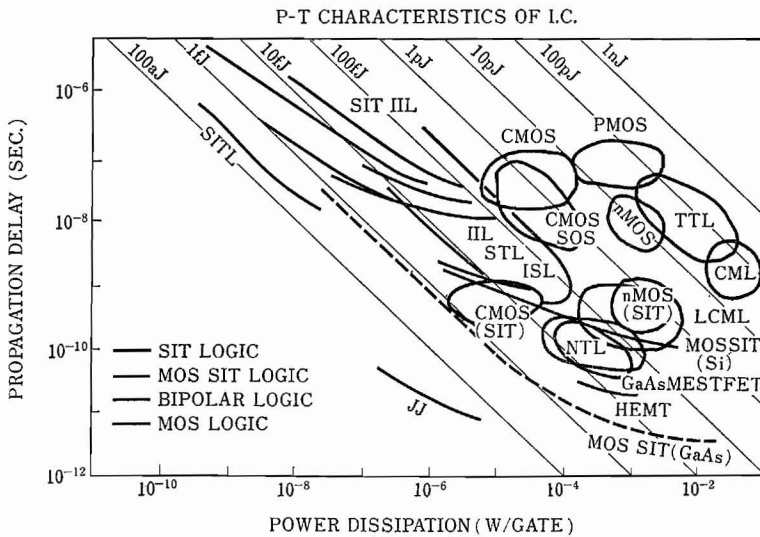


図-1

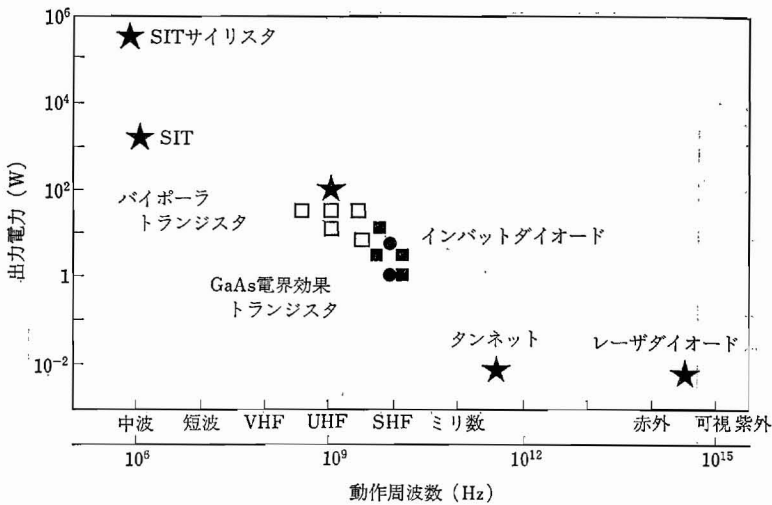


図-2

くということ、速いものをつくってゆけるということになるんだろうと思うんですが、同時に、そろそろシステムの方からご支持をいただかなければいけないのは、いくらトランジスタが速くなりましても、回路の伝播時間と分布容量をどうすることもできないということです。これはやはり微細化ということのもう一つの方向でございまして、小さくすることによって伝播時間と分布容量を小さくし総合的なスピードアップを図ってきたということがあるわけでありまして、あまり表には出ないのですが、微細化ということがほかのことからの要望であるかのごとく考えておるわけですが、同時にスピードアップのために非常に大きな働きをしてきておるということになるわけです。

こういふことで、自動的に集積回路の動作時間を短くするというに貢献をしてきたというのが微細化だと思いますが、いずれにいたしましてもそろそろ頭打ちになってまいりますので、これから先、むしろ分布的な処理方式というものでも入れて、分布定数線路的な発想を持った回路構成というものもやはりこれから相当研究してみるようなことが必要になってくるのではないかというふうに思っております。

で、いままで私どもの方でやってまいりましたもの、これはちょっと宣伝めいて恐縮ですが、わりかたパワーの大きくて速いものが出てきておるわけございまして、タンネットというダイオードは、基本発振は388ギガヘルツというのが出ております。

で、これは後でちょっとご紹介いたしますが、とにかく半導体レーザがもっと上にございましてタンネッ

トとレーザの間に大きな穴があいておるわけでありまして、高速動作デバイスを実現することによってタンネットにつながっていった要するに通信の方から見れば、高い周波数の実用化ということにつながるわけでありまして、それは一昨日申し上げたとおりでございます。やはり、通信というたてまえ及びコンピュータという両方の意味から高速スイッチングということが重要になってくるわけございまして、この辺の開発ということがやはりこれからの半導体屋の一つのターゲットでございます。

図-1はエネルギー的な絵が書いてございまして、この方はどうがんばりましても量子効果デバイスにはかなわない。つまり量子効果デバイス、その一つはジョセフソンジャンクションでございますが、これは単量子、一つの量子で動くという原則がございまして、量子デバイスにいわゆる連続的なエネルギーを使う従来のトランジスタグループが対抗できるはずがないわけです。その点は泣き所です、最低エネルギーの動作ではまだまだわれわれの方の200アットジュールというようなエネルギーから見ましても一けた以上のハンディが出てくるわけです。これは、今後とも永久に追いつけないものだというふうに思っております。

そういう意味ではエネルギーは弱いんですが、冷やなくても働くというのが特徴でございます。きょうお見えの安部さんのところのヘムトなども要するに液体窒素温度程度冷やせばそれでいいんだということであるわけですが、もちろん常温でも働くわけですが、そういうところが利害のバランスということになってくる

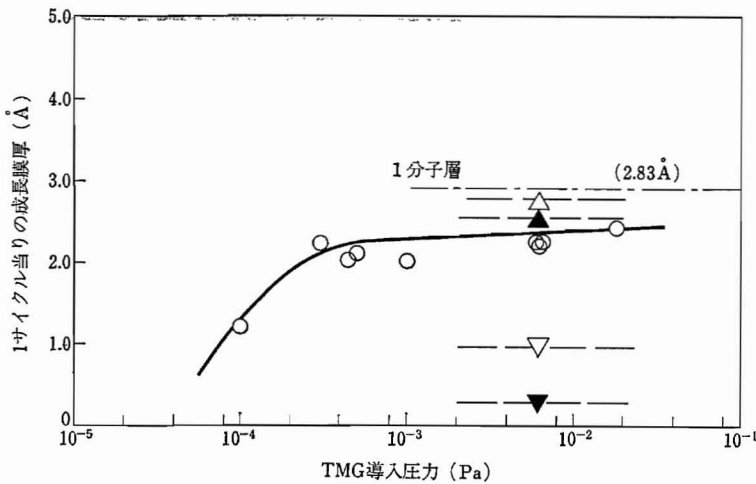


図-3

んだらうと思うんです。

そういたしますと、一昨日も申し上げましたように一体どこまでエネルギーが下がるか、どこまで量子効果デバイスに追従できるかということは理論的にまだ解明されていないわけでごいまして、ベルが完成したところでガンマ理論とかというのでこれが解析できるそうですが、私まだ見ておりませんので、そういうもので一応理論づけができたという発表がございますがまだわからないんですが、いずれにいたしましてもちょっと負けるということですね。で、速度の方を速くするということががんばるわけです。

これがこの間発表いたしました分子層エピタキシという技術でございまして、ガスを入れては真空に引っ張ります。この場合はトリメチルガリウムですが、単分子層で吸着するという性質を利用いたしまして、くっついたところで、その次にまた  $\text{AsH}_3$  を入れてやりますと、これは砒素の水素化合物ですが、これが吸着分子と反応いたしまして、結果的には出てくる  $\text{GaAs}$  分子の厚みというのは1サイクルの操作で1分子で大体  $2.8 \text{ \AA}$  というところになりまして、温度が上がり過ぎると変なことになってまいります。比較的広範囲のところではガスの流量を入れ間違ってもあまり変わらないで済むというようなことで、まだこれはちょっと中途のデータでございますからもうちょっとよくなってはおりますが、大体、ガスを1サイクル切りかえることによりまして間違いないに1分子層が育つということになってまいりました。

で、光を当てますとこれが大体300度くらいでもできることになってまいります。したがって、あまり温度を上げ過ぎて物がおかしくなるということなしに単分子層化をつけるということが出来るわけでありまして。ですから、99層つけたいと思えば99回くり返せば99層つくということになりますので、非常に薄い膜の厚みを厳格に制御するということができるようになりました。要するにこの場合には精度は原子や分子が一つ余分についているかいないかということでごいまして、大体うまくやれば一つ分子・原子の過不足なしにつくのだということになりますのでアトミックアキラシ(AA)という名前をつけたわけですが、原子程度の精度であるということになります。つまり、これはある意味ではこれ以上の精度はあり得ないんだということでありまして、これで薄い膜を、たとえば10層つけたい、13層つけたいということが制御ができるわけでありまして。

こういう技術を使いましてつくろうとしておりますのが、いわゆるSITでございまして、ああいうポテンシャルの山。とにかく真空管と同じでございますからゲートとゲートの間の、つまりグリットとグリットの間のポテンシャルの電圧よりも高い所を抜けて電子が走るのを利用するわけですが、この山の高さを調整するというのは真空管とまったく同じです。

で、そのときに従来ですと結晶格子とぶつかってスキュッタして戻ってくる電子がございますので、ここでいわゆる擬平衡状態が成立いたしまして、ボルツマ



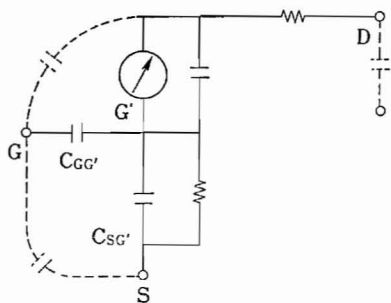


図-4

ンの運動方程式を使って解析しておいたわけですが、ほとんどぶつからなくなりますために、要するに電子放射と同じようになってまいります。飛び出した電子が、途中でぶつかることがあってもほとんど返ってこないということであれば行き放しということですから、真空管時代に戻るわけです。したがって、このときの周波数特性というものを計算してみますと、ほとんど普通のトランジスタの場合に問題になるようなパラメータはきかなくなつてまいります。で、こういうものをこれからつくっていくと、たとえばソースとドレインの間は分子が10層重なったようなものだというようなことをやっていきたいと思うわけがあります。これでやりますととにかくテラヘルツ帯の動作ができるらしいわけです。

そのときのリミッティングファクタは何かということこれはあまりいい絵じゃございませんが、こういう所にくっついております浮遊容量、まあ、中のものも入るわけですが、そういうものを足し合わせたものこのトランジスタのトランスファコンダクタンスの  $G_m$  でございますから、われわれ年寄りが昔なつかしい  $G_m/C$  という、Cはミラー効果を含むわけですが、そういう利得帯域幅積になってまいります。で、計算しますと大体さっき申しましたようにテラヘルツ帯に入るわけでありまして、ですから、情報処理というたてまえから言いましても、配線の容量の問題はそろそろ大問題になってくるわけでありまして、デバイスとしては恐らく、これはつくってみなければ何とも申し上げかねますが、現在われわれはテラヘルツを狙っておるところであるということでもあります。

で、さらにこれはバリスティックトランジスタという名前をつけて真似されてしまいましたので、ちょっと腹が立ちましたのでもう少しいい物を考えてみたくて、接合の中心にはご存知の江崎ダイオードに近い特性を出しているわけですね。そういたしますとこの中

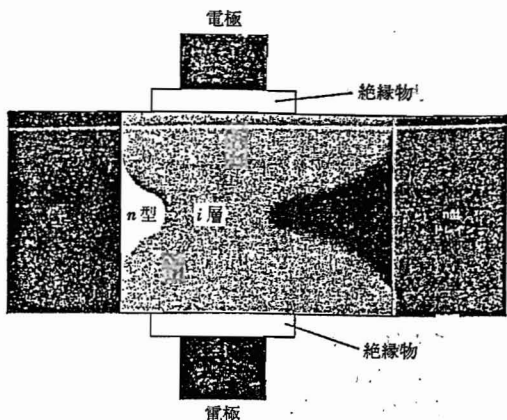


図-5

トンネル注入型の SIT

心に非常にハイフィールドが立っております。この辺のことはすぐおわかりいただけると思うのですが、中心のところだけ電界を強くするためにちょうどその場所にN型不純物を入れておくということを行います。そうすると、ここだけはトンネル効果が出るわけですね。左の接合の中心のところから電子が出てくるという絵になるわけですが、この寸法を非常に小さくつくっておきますと、ゲートに電圧をかけてやると接合中心に空乏層が広がるわけですが、接合中心をゲートの空乏層の中を含むような形にできるわけですね。そういたしますと、ゲートにかけた電圧によってトンネル効果を起こしている接合中心の電界強度を同時にコントロールできる。そうすると、抜けてくる電荷のトンネル電流量も調節できますので、こういうふうにしたときのソースのタイムコンスタントはまたこれは非常に高いということは、江崎ダイオードが非常に高い性能で働いているということはもうおわかりいただけると思うのですが、これで計算しますと、理論値からは100テラヘルツくらいの限界周波数になってまいります。まあ、これはやってみないというんなほかの物理現象が同時に規制しておりますので、果してそこまでいくかどうかはやってみなければわからないわけですが、むしろ、その何が出てくるかというのが非常に楽しみですけれどもそういう意味では、デバイスとしては野口先生のご期待にはまだ不十分かもしれませんが、理論上からいえば、光波長につながるくらいのところまでは一応検討はできる状態にまできておるのではないかとことをひとつお話ししたいと思ったわけでありまして、

それから、あまり直接ではございませんが私がいま

やっておりますもう一つの問題は、CCD というのが非常におかしな存在になってきているんじゃないかと。つまり、あれはコンパータが1列に並んでおりまして、それを次から次へトランスファさせて記憶させておるわけです。これは、何でああいう方式がはやっちゃったのか私にはちっともわからないのでございます。あのころは結晶性があまりよくなくてバラつきがひどかったためにああいうことをしたのではないかと、それから、マトリクスで各素子の特性がピタリと合うようになれば、初めからマトリクスとして処理なさるのが当然なんではないかという気がいたします。そうすればおわかりのように、とめておいてコンバージョンいたしますから、要するに CCD の場合ですとコンパートしたやつをすぐ次に送る。で、そのコンパートする一つの素子への当りの時間というのは 1/1000 くらいになっておるわけでありまして、初めからマトリクスでやればとめっ放しできますので、そこだけで1千倍くらいの感度があるわけです。で、たまたま、バカの一つ覚えでございまして先ほどの SIT 構造というものをに入れてやってみましたところが、それだけで大体、感度が1千倍になるわけでありまして、マトリクスにすればまあ計算上からいえば100万倍くらいの感度が実現することになってくるだろうと思っております。したがって、いわゆる2次元処理ということにも、従来の CCD 型のかわりにマトリクス型を入れることによってもそれだけで1千倍くらいの感度が出るんじゃないかというようなことが、現在私も半導体屋として実験をしております一つの——、マトリクスはすでにできておりますけれども、一つのトピックスでございまして、ご関心のある方からいろいろエキサイトをお願いしたいということでもあります。

司会 どうもありがとうございます。

それでは続きまして HEMT の安部さんからお願いいたします。

安部 富士通の安部です。

冒頭に野口先生の方からお話ありましたが、とにかくデバイスに対する期待が非常に本格化してきております。従来のシリコンのデバイスというのは微細化技術をベースに発展してきたわけでありまして、次第にその進展の度合いが鈍ってきたんじゃないかということがしばしばさやかれております。

そこで、なぜ HEMT かということですが、要するに速いシステムをつくるということは、小さなデバイスで大電流をいかに取るかということになるのではな

いかと思います。そこで、HEMT の電流に比例する物理量として、電子移動度、これは、電子の動きやすさの度合を表したのですが、この電子移動度を最大限活用したトランジスタを開発したわけです。

まず全体を大きく分けまして、HEMT の利害得失ということを中心に触れまして、それから LSI に向けて解決してきたこと、それから LSI のパフォーマンスということについて述べていきたいと思います。

HEMT 発明以来ちょうど4年になるわけですが、現状は大方 LSI レベルの入り口に立ったあたりにきているんじゃないかと思っております。過去10年間で各年ごとに達成したトップスピードをプロットしてみますと、ちょっと面白いことに、MOSFET、バイポーラ、GaAs MESFET、HEMT、というように各種デバイスが次々に現われてきて、これらは、一種のブレイクスルーを意味しているように思っております。そこで、最近では10 ps にいきまして、今年内に10 ps 以下になるはずであります。近いうちに5 ps くらいにいくなんじゃないかということが予想されます。

HEMT の基本構造というものを見ていきます。基本的には、FET の一種であり、GaAs/AlGaAs ヘテロ接合構造になっております。GaAs の持つ一つのメリットというのは、基板の材料が半導体性であるため、キャパシタンスなどが非常に小さくシリコンにおけるより、配線による遅延を小さくすることができます。それから GaAs MESFET との違いは、高純度の GaAs の上に AlGaAs、こういったものをヘテロ接合というわけですが、こういった構造にしておきます。AlGaAs の方に不純物を入れておきますと、電子が高純度の GaAs の方に引き寄せられます。このため、電子は高純度の領域を走ることとなりますから、不純物散乱が無視できるくらい小さくなります。さらに、室温から77 K へと低温に冷やしていきますと格子散乱も小さくなりまして、電子がほとんど散乱されなくなり、まさに理想的な状態になってまいります。

各々のデバイスの性能を比較するということは非常に難しいんですけども、現状の1  $\mu\text{m}$  リソグラフィの微細化技術で一応比較します。非常にラフな比較なんですけども、HEMT とジョセフソンは、大体スピードとしては同じで、ジョセフソンの方が二けたパワーが小さいかと。最近では Si のバイポーラでも非常に良い特性が出ておりますし、NMOS でも、0.25  $\mu\text{m}$  にしますと20 ps と出ております。しかし、スピードだけではなくてパワーも小さいことが必要です。また、

LSI に組んだ場合にいかに多数の素子を安定に動作させるかということも重要なファクタになってきました。材料物性の特長を活かして安定にハイスピードを実現しようというのが HEMT です。

そこで、まず現状の、ハイスピードデバイス、すなわち HEMT, GaAs MESFET, バイポーラ, MOS, それから GaAs ヘテロバイポーラ, そういったものを例を取りまして比較してみます。性能にはスピードとパワーがあります。HEMT のスピードは、10 ps, パワーは MOSFET 並みの 0.1 mW 前後と。

そこで、特に最近わかってまいりましたのは、デバイス寸法による依存性のデータが得られてきて、HEMT は、ジオメトリのコントローラビリティが非常に高いんじゃないかというふうに考えております。

それから安定さですが、ユニフォームリティとか IC 化の場合に必要なデータですが、閾値電圧の標準偏差が大体ロジックスイングに対して 2% 前後になっております。シリコンの方は 1% 以下になっております。

MOSFET の場合にはパワーは非常によろしいんですが、スピードがおそい。また、バイポーラはパワーが大きいといったことになるかと思えます。

それで、続きまして製作上とかマテリアルの問題、トータルではどうかといったことを考えていきたい。シリコンのデバイスに対して、特に GaAs MESFET は構造が非常にシンプルです。また、HEMT は、AlGaAs を一層加えてはいますが電子が 2 次元で閉じこめられているため、動作がシンプルで、原理的なメリットを持っています。

ところが、HEMT の場合は、現状ではマテリアルに、トラップが多いとか、表面の欠陥が多いとか、またはスループットが非常に低いとか、これが今後解決していかなければならない問題になっているわけです。ヘテロバイポーラは、それに加えて、さらに、プロセス技術になんらかのブレイク・スルーが必要となっております。トータルで見た場合に、いろいろ解決すべき問題もありますけれども、やはり HEMT が一番将来技術として有望じゃないかと考えております。

現時点で、HEMT にとって重要なことは、LSI 化に照準を合わせて、デバイス構造をいかにリファインしていくかでありまして、一応解決されてきております。最初申し上げましたように、高純度の GaAs の上に AlGaAs, その上に GaAs トップ層を形成するわけです。この中に AlGaAs の非常に薄い、原子が

10 層くらいの層を 1 層入れておきます。回路に必要なノーマリオフタイプとかロードのダメージオンタイプとか、そういったデバイスをつくり分ける必要があります。このために、GaAs と AlGaAs の物質の違いを利用して加工精度を向上できる技術を開発しました。

特に重要な技術は、選択エッチングといひまして、GaAs に関しては非常に加工速度が速くて、AlGaAs に関しては非常におそい。こういった性質を利用しますと加工精度が非常に高くなるわけです。特にフレオン系のガスを用ひまして、GaAs は 520 nm/min, AlGaAs はその 1/260 の 2 nm/min になる。いひかえますと、1 分間に原子を 4~5 層加工できるというように、非常に精度が上がってくるわけです。ハイスピードのための基本的な電流利得係数について見てみますと、1  $\mu$ m, 0.5  $\mu$ m とゲート長を短くしても、ショートチャネル効果というのが非常に少なくなくて微細化に強いといった特長があることがわかってまいりました。

また、LSI 化のためには何万素子というものをつくるわけですので、そういった観点からユニフォームリティを見てみますと、2 インチウェハ内で、標準偏差 19 mV が得られております。また 1 mm<sup>2</sup> の面積内では、2~3 mV と、非常に均一な特性が得られています。これを特に決めておりますのは先ほどの AlGaAs 層の厚みのコントロールでして、それに対する結晶成長技術としては、MBE 技術というのを用ひまして、原子層レベルのコントローラビリティで成長していくといったことができるわけです。

また、加工する方ですが、先ほどのフレオン系のガスエッチングで加工すると、原子 1~2 層分のコントロールが可能になっています。

今年 2 月のサンフランシスコでの国際固体回路会議 (ISSCC) で報告しましたように 1 KSRAM が試作されております。2.9 mm $\times$ 3 mm の中に 7,244 個の HEMT を集積しています。デバイスのゲート長は、周辺回路が 1.5  $\mu$ m, セル部分が 2  $\mu$ m という非常にラフな精度で試作したわけですが、そういった緩いパターン精度でも初めてサブナノ秒 (0.87 ns) のアクセス時間が確認できました。さらに、4 KSRAM を試作いたしました。ちょうど動作を確認したところですが、これは 4.4 mm $\times$ 4.8 mm の中に 2 万 7 千素子の HEMT を集積したパターンです。こういった技術で将来どのくらいの高速 SRAM ができるかと申します

と、ラフな方がいいになりますが、大体 1KSRAM で 200~300 ps, 4KSRAM で 700~800 ps 実現できるんじゃないかと。パワーが小さいものですから、たとえば 16 K とか 64 K とか、将来に向けて非常にプロミシングなデバイスじゃないかと考えております。

システム屋さんは厳しくて、リングオシレータで 10 ps を切ったといっても納得しませんので、実際に LSI で搭載される NOR ゲートという論理回路を組みまして分周器を試作しました。ファンアウト 2 のロジックで、77 K で 22 ps, 室温で 36 ps というデータを実現しております。これらのデータは現状では最高速になっておりまして、GaAs MESFET の約 3 倍のスピードに相当しております。HEMT の LSI 性能ですが、内部論理の負荷による遅延とか、配線のキャパシタンス、それから、LSI チップ間の配線遅延とかそういったものを一応考慮に入れて、ファンアウトが 3 の場合を計算しました。たとえば微細加工レベルが 0.5 μm で液体冷却の放熱 20 W/cm<sup>2</sup> を仮定いたしますと、300 K と液体窒素温度 (77 K) で、10 K ゲートの LSI チップの性能を推定してみますと 77 K で 40 ps, 室温で 70 ps ぐらいになります。さらにチップ間の配線遅延を考慮してみますと、システムの遅延としては室温で 100 ps ということになります。LSI チップの遅延は現状の高速のシリコン LSI より 1桁小さいものですから、将来のシステムクロックサイクルタイムというものを考えた場合に 1~2 ns, 要するにギガヘルツコンピュータが実現できるんじゃないかと思えます。現状の 10 MIPS くらいのコンピュータが 100 MIPS を越えていくといったことにつながるんじゃないかと期待されるわけです。

図-6 のように、過去 15 年間の集積規模の進展をふりかえります。シリコンは現状では 1 M ビットまで

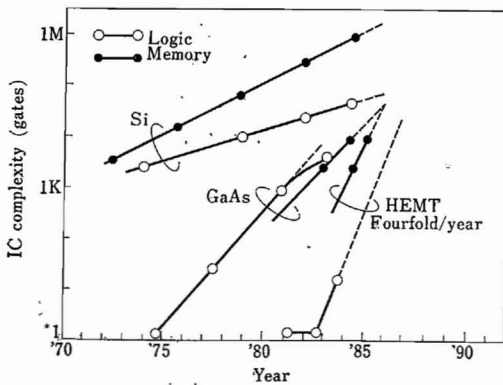


図-6

きております。まだ鈍化する気配もありません。ロジックの方は 32 ビットマイクロプロセッサまでこのように進展しております。

GaAs MESFET は約 10 年前にスタートしておりまして LSI 指向のセルフアライン構造デバイスが、1982 年あたりから日本を中心に活発に開発が行われてまして集積度がシリコンの年 2 倍に対しまして、年 3 倍の増加率になっております。HEMT は、年率 4 倍になっております。1K, 4K とさらに来年は、GaAs MESFET に追いつくんじゃないかと。それからロジックも立ち上がっていくと思います。この辺の進展度合は、ひとえにシリコンとか GaAs の基本技術、すなわち微細化の技術に助けられて急激に立ち上がってきていると思われます。ここで HEMT 特有の問題をすでに冒頭に示しましたけれども、現状では特にマテリアルの問題が重要でして、いかにして高品質で大口径の材料をつくっていくかということが決め手になっていくというふうに考えております。現状はそういう所にポイントを合わせて開発しています。

以上です。

司会 どうもありがとうございました。

以上で一応半導体関係のお話を終わります。続きまして超伝導デバイスの方に移ります。岡部先生よろしくお願いたします。

岡部 それではジョセフソン素子のお話をしたいと思います。

ジョセフソン素子というのは、皆さんから見るとやや特異なデバイスという感じがされるのではないかと思います。液体ヘリウム温度でないとならない素子

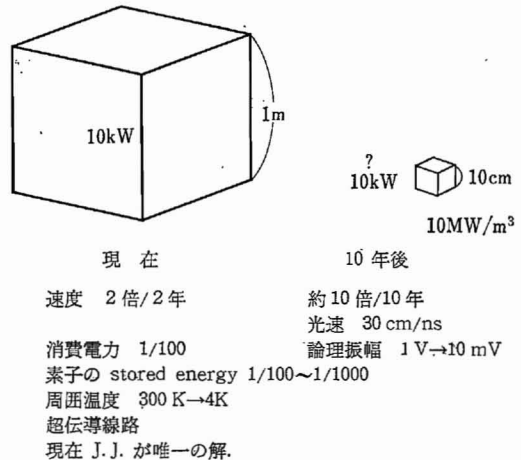


図-7

であるし、量子単位で動くとか、それから皆様ご存知の半導体ではないわけですからちょっと別のテクノロジーになっているわけなんです。しかし、10年くらい先を考えますと、どうしてもジョセフソン素子がかなり有望にならざるを得ないような条件にあるのではないかとこのように思っております。

たとえば10年先の計算機というのをOHP (図-7)で適当に書いてみたんですが、大体、スピードが2年に2倍くらいのペースで上がっていくとすると、10年には大体10倍くらいになるだろうと思われま。そうすると、一番問題なのは伝播遅延でして、光が速い速いといっても1nsのクロックでわずか30cmしか走れないわけです。現在のCPUのサイズを1m<sup>3</sup>ぐらいで消費電力10kWとしてみましよう。10倍くらいの大きい小さいは見逃していただくことにしまして現在の比較的大きな計算機ではこんなオーダになっていると思います。そういたしますと、10年後には伝播距離の30cmに対して、サイズが十分小さくなければならないからCPUの大きさとしては10cmくらいにしかできないだろうということになります。なんとこの10cmの立方体で、いまと同じテクノロジーを使うと10kWの電力が消費される。これはひどい話でして、10MW/m<sup>3</sup>というわけですけれども、この熱はいくら液冷を使っても多分取り切れないのではないだろうかと思ひます。そういたしますと、デバイスの消費電力そのものを1/1000くらいに落とさないといけない。少く見積っても1/100くらいに落とさなければならないこととなります。半導体の動作電圧はいろんな障壁電圧で決まります。ところが物質のバンドギャップなどの種々の定数は大体ボルトのオーダなんです。で、ボルトとボルトをうまく組み合わせ、キャンセルしてがんばって見たところで0.1Vぐらいの論理振幅は取らざるを得ないわけですが、それをなんとかして消費電力を落とすために1/100ぐらいの10mVのオーダにしなければならないということが出てくるわけです。多分大型の高速計算機のデバイスを作られていらっしゃる方は、そろそろこういうことをひしひしと感じられていらっしゃるのではないかと思います。

では、その次にどういうことが問題になるかと言ひますと、素子が、たとえば論理1というものをストアするにはなんらかのエネルギーをためているわけですね。たとえば、C-MOSですとゲートにゲート容量があって、その電位を、5Vにするか0Vにしておくかということ論理状態を保っているわけです。ロ

ジック動作を行うことは、この静電エネルギーをたとえばショートによって捨てるようなことに対応するわけですから、当然ロジックを行うたびにエネルギーが放出されるわけです。これが最終的には電力消費になるわけです。普通のバイポーラトランジスタのロジックですといわゆるスタンディングパワーが要るわけですが、だんだんスピードが上がってきますとそのスピードに比例して損失が出てくるわけです。C-MOSではそのスタンディングパワーは0で大部分のエネルギー消費はたまっている静電エネルギーをショートすることによって起こることになります。いずれにせよ、最後は発熱へつながってくるわけです。こうした蓄積エネルギーも、論理振幅を下げるとその分だけ当然下がるわけですから、たとえば1/100くらいに落ちてあてしまう。

この蓄積エネルギーが下がると、今度は熱雑音との闘いが出てくるわけです。ということは周囲温度を落とさざるを得ない。周囲温度を1/100に落としますと、別に合わせたわけじゃないんですが、絶対温度300Kが大体3K。ちょっとサバ読んで4K(笑)。要するにヘリウム温度というのは、必然であるという結論が出てくるわけです。

動作温度4Kというのは普通はジョセフソン素子の欠点であると言われていたんですが、これは仮に半導体素子を使ってもどうしても達成しなくては行けない値であるということはおわかりいただけたかと思ひます。

論理振幅10mVというのも、これは先ほど申しましたように半導体では100mVくらいになりますから達成するのはちょっと難しいといえそうですが、ジョセフソンの場合はこれが幸いに2mVしかないんですね。最初はこれが非常な欠点であろうと思われたのですが、どうも突き詰めていくと、これからの一つの方向であるという論理的結論になるわけです。多少都合のいいような数字を用いたかもしれませんが、大体の傾向はこんなことだとおわかりいただけたのではないかと思います。そんなわけで、現在のところはジョセフソン素子がそれに対する唯一の解であろうということでございます。

非常に調子のいい話からまずスタートしたのですが、実はデバイス屋というのは、どの素子を作っている人も非常に苦勞をしています。たとえばジョセフソン素子にしても非常に薄い酸化膜を作らなくては行けないのですが、準備期間に数カ月かかって、それで1時間くらいで酸化して、でき上がってみたら全然だめ

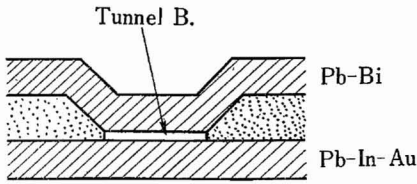


図-8

だったというのが普通なわけです。そこでデバイス屋というのはどなたも自分の素子に非常に愛着を持っていて容易に降りようとはしないわけですね。そんなわけでもなくして自分に都合のいい論理をいっぱい考えてくることは事実でして、皆さんそれぞれ、悪意はなくて自分に都合のいい論理を使っはいらっしやると思うのですが、この低温化の話は近い将来だんだん頭在化してくるだろうと思います。私は半導体の方もちょっとやっておりますが、やはり低温で動くような半導体をどうしても探さなければならないだろうと思っております。

では本論に入りまして、一体ジョセフソン素子というのはどんなものだろうかとといいますと、まず一つの例をお見せします(図-8)。これは、IBM が中心となって精力的に開発したトンネル型のジョセフソン素子と呼ばれるものです。まず基盤電極ですが、超伝導材料の一つである鉛系の電極を使っています。この上になんらかの絶縁物をのせ、窓をあけます。その窓の部分に非常に薄い絶縁膜を置く。超伝導電子はこの膜をトンネルして相手の電極へ移動するわけなんです。この膜厚というのが大体数 nm (数  $10 \text{ \AA}$ ) くらいですから、数原子層くらいの薄い膜厚でないと動かないわけです。この制御をどうやってやるのかというところで非常に苦労しているわけです。その上にまた対向して、別の超伝導体を置くというような構造になっているわけです。

これがトンネル型ジャンクソン素子と呼ばれるものですが、もう少し簡単な素子構造もございまして(図-9)、これは特に大学関係で、研究されているんですが、二つの超伝導体があって、間の部分を非常に薄いある

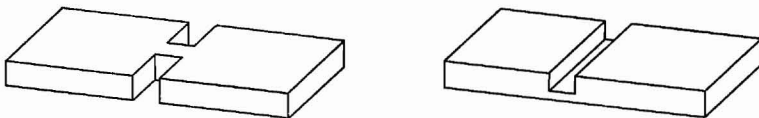


図-9

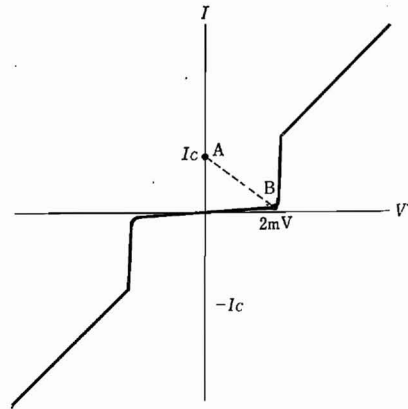


図-10

いは細い別の超伝導なり、あるいは同じ材料でも結構ですし半導体でもいいんですが、何かそういった少し超伝導性の弱い材料でつないでおくと、これが一つの素子として働くわけです。これを弱結合型素子といいますが、まだ物理がよくわかっていないために大学などが喜んでやっております、メーカーはちょっと薄気味悪いからあまりいじらない状態です。いずれの素子にいたしましても半導体に比べると、構造は簡単になっているわけです。ただ、先ほど申し上げましたように、トンネル型の場合には、非常に薄い酸化膜を開発しなければいけませんし、一方、弱結合型の構造では、間隔が実はサブミクロンでないといけない。0.1  $\mu\text{m}$  以下が本当は望ましいのですが、こういう細い溝をどうやって掘るかというのがこれまた大変な技術でございます。ですから、材料的には単なる金属を使っている、多少不純物が入っててもどうってことではないという意味では半導体に比べ非常に作りやすいものなんです。加工技術という意味ではかなりむずかしいところがあるような素子だということがいえると思います。

では、具体的にどんなふうにしてロジックをやるかということについて、あっさりとは説明いたします。ジョセフソン素子の特性というのはこんなような(図-



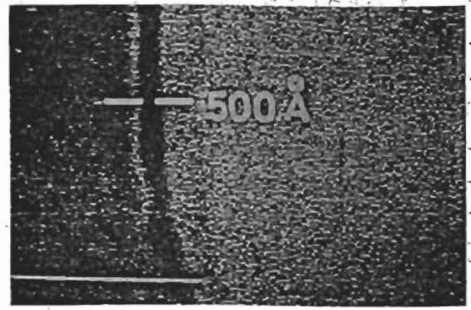
10) かっこうをしております。横軸が電圧で縦軸が電流になっておりまして、大体ジョセフソン素子というのは超伝導の素子ですから、基本的には超伝導特性を持っている。つまり、いくら電流を流しても電圧が発生しないんですが、それに実は上限がありまして、ある電流以上流しますと、別に構造的に壊れるわけじゃないんですが量子力学的に破壊して、状態が遷移するということが起きるわけです。これを利用してほとんどのロジックが作られておりまして、いわば回復可能なヒューズを使っているようなかっこうになってるわけです。ですから、基本的に二端子素子であって、トランジスタのように、入力と出力をうまく分離するのはあまり容易でないといえます。

それから、超伝導体を使っておりますので、たとえば配線の抵抗がなくやりやすい点もあります。

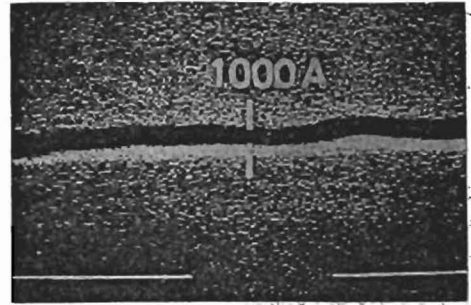
ではどういうかっこうでエネルギーを蓄えるかという問題なんですが、ジョセフソン素子というのは、実は中に流れている電子の慣性を利用した素子でございまして、いわばインダクタンス的な性質を持っています。普通のトランジスタなんかはキャパシタンス的な所でいろんなものをメモライズするのですが、ジョセフソン素子というのはちょうどそれと双対な関係にあります。インダクタンスを使うからまずいということではなくて、双対性から考えますと大体同じぐらいの手間で情報を蓄えることができます。しかし、双対なために、ともかく頭を切りかえなくてはいけないわけです。

そのために、システム屋さんの食いつきが非常に悪いようです。ほかの素子についてはほとんどシリコンテクノロジーのアナログで皆さん考えられて、アーキテクチャなんていうのは大体シリコンのアーキテクチャそのものをコピーすればいい、多少、ドライバビリティが悪いとか、えらく応答特性が速いとかということはあるけれども基本的には同じ考えで理解できるのですが、ジョセフソン素子というのはインダクタンスに情報を蓄えるために、回路を全部裏返して考えなくてはいけないということが多分システム屋さんがとっつきにくい点だろうと思います。

もう一つは、ヒューズみたいなかっこうで動きますので、いわゆるラッチロジックになっている。何かこう入力があると、パカッと遷移が起きてしまう。その状態はリセットしないと、ずっと保持される。つまりラッチ回路が自動的に組み込まれている回路で、それはある場合はうまく働かし、ある場合にはまずく働くということになるわけです。ラッチロジックというの



(a) 500 Å



(b) 1000 Å

図-11

はいいようなんですが、リセットのタイミングを必ず必要とするために、何段も組むとリセットをどう分配するかなんていうのが結構めんどくさくなって困ることになるわけです。

したがいましてデバイス屋からの要求としましては、まだよくわけのわからないうちからシステム屋さんに入っていたかかないと、この素子は死んでしまうのではないかという不安があるわけですね。大体、システムの方というのは、こういっては申しわけないんですが皆さん非常にコンサーバティブな傾向がありまして、石橋をたたいて渡るというようなことから、確実に使えるということが見えてこないと考えてくださらないわけですが、ジョセフソン素子についてはまだ使えるか使えないかわからないぐらいの段階から手をつけていただかないと先が見えてこないような気がいたします。

ちょっと写真をお持ちしたんですが(図-11)、これはわれわれの大学でつくった素子なんであまりきれいではないのですが、たとえば、これが二つの超伝導体で、真ん中にサブミクロンの溝が掘ってあります。まだわれわれの技術では0.2~0.3 μm ぐらいの溝しか安定に掘れませんので、本当は0.1 μm が掘りたいので



すが、これをどうしようというのがいまの悩みの種です。先ほどのトンネルジャンクションについてはもうちゃんとしたものがメーカでは作られるようになっております。

それから、何キロビットのメモリなんていうのをお見せできるというんですが、実は大学では何キロビットなんていうのはつくれませんが、代りに、電電公社が去年発表したジョセフソンの1キロビットのメモリの写真をお見せします。ただしこれが全部動いているとは公社さんもおっしゃってないで、100%動いているとは私も思わないのですが、とにかくメモリはつくれます。ロジックもライズタイムで ps のオーダーのものが作られています。だんだんに日にオリンピック記録みたいに上がってきましていま正確には何 ps だったか忘れて覚えていないんですが、ゲート数も1千ゲートくらいのものがぼつぼつできかかっておりますので、ジョセフソン素子に対する考え方を少し改めていただく方が良いのではないかと思っております。

ジョセフソン素子の問題点というのを OHP(図-12)でちょっと挙げたのですが、どの素子もみんなそうなんですが、これはかなりたくさんございます。一番大きな問題点というのは、まだジョセフソン素子作成技術が完全には確定していないということでございます。材料一つでも、シリコンとかガリウムヒ素とか、HEMT でもガリウムヒ素とアルミニウムヒ素とか決まっておりますが、ジョセフソンの場合いままでも鉛をもっぱら使っていたのですが、どうも鉛というのは低融点材料で不安定なので、もっと高融点材料のニオブ系で何かいいジャンクションができないかというのを、ちょうど今年とか来年ぐらいに猛烈に皆さんががんばって切りかえつつあるところです。

それから、IBM がなぜやめたかというのは多分皆さんかなり興味がおありと思うのですが、あれは記憶回路の問題でございまして、記憶回路というのはいくつかのセルを同時にアクセスしなければいけないというために、長い線を引くわけですね。長い線というのは、MOS の場合にもキャパスタンスの増大を招くんですが、われわれの場合にはインダクタンスの増大につながりまして、それが遅延に結びつく。ですから、適当に区間を区切ってドライバをつけるとか、ちょっと工夫しない限りは遅延がめんどくさいということなんです。

それから、さっきいったようにヒューズで動くもの

#### J.J. の問題点

材	料	鉛合金→Nb 系
素	子	高電流密度化 Ic の再現性
論	理	パンチスルー → フラクソイド論理
回	路	集積度 → 高電流密度 $IcL \approx \phi_0$ 閾値電流の制御 → SFQ デバイス
記	憶	遅延 (インダクタンス)
回	路	マージン低下
実	装	コネクション 電源系 入出力インタフェース サーマルインシュレーション
ア	ー	故障診断
キ	テ	故障救済回路
ク	ク	ラッチ論理
チャ		ファインファンアウト

図-12

ですから、ヒューズもですね、どのくらいのレベルで切れるかというそのレベルがバラバラに食い違っていると、だんだんこれがマージンに影響いたしまして、1キロビットなら大丈夫でも、4キロビットではちょっと覚つかないというようなことが出てくる。現在のリプロデュースビリティとか生産工程の管理ぐあいでは恐らく1キロと4キロ、あるいは4キロと10キロの間くらいが境になるのではないかと思っております。IBM は恐らくあきらめたのではないかと思いますが、いま日本でやっている人たちは、多分もう少し上までは確実にできるだろうと信じていると思っております。

それから前に述べたことと同じになりますが、まだシステム屋さんがあまり介入していないのが大きな問題と言えます。特に、アーキテクチャになりますとシステム屋さんが介入していないこともあって、先が長いような気がいたします。

最後にですが、“Japan is most possible country fo perform Josephson junction computers.” というとかっこいいんですが、実は、“most”ではなくて“only possible country”でございまして、いま世界中見まして、ジョセフソンジャンクション計算機を本気でつくろうと思って張り切っているのは日本だけでございます。アメリカの諸機関は IBM と同時あるいはちょっと後でほとんど中止をし、二、三のまだロジックをやっているところも主として、A/D コンバータなどの一番トップの高速性を要求されるところのロジックだけをやっているというのが現状でございまして。計算機全体をこれで作ろうという冒険的なことを考えているのは、現在のところは日本だけのようござい

います。

大体そんなところですが、最後にちょっと私の研究室でやっているシミュレーションの結果で本当にスピードがどのくらい出るかをお見せします。実際には測ることができませんのでシミュレーションの結果ですけれども、横軸がpsでございます、ちゃんと回路が作ればpsぐらいのライズタイムで物事が動くんだということがわれわれの仕事の紹介でございます。

司会 ありがとうございます。

では次に、とりあえず光の方に話を進めさせていただきます。最終のディスカッションのためどうぞ皆さんいままでのお話をよく頭に入れておいていただきたいと思います。(笑)

では、続きまして光。これは、かなりわれわれとしては希望を持っているものですが、虚像と実像をよくここでご理解していただきたいと思っておりますので、では阪口さんどうぞ。

阪口 ご存知のように、レーザが発明されていろいろなアプリケーションがいわれたんですが、その中の一つが光コンピュータです。光通信とか、光ディスクのようにかなり実用になっているものから見ますと、影も形もないというのが実情です。数年前までは光コンピュータというのはほとんど消えかかった言葉だったんですが、ここ1、2年になりまして、官界・学界からもう一度光を見直そうという動きが出て、まあそういう機会ですので、私も考えてまいりましたので見ていただきたいと思います。

いろいろな考え方がありますが、最終的にはどういうアーキテクチャになろうとも、ロジック・メモリからなるそういうチップのようなものとその間をつなぐような配線が要るだろうと。これはどうしてもハードウェアとしてはなくならないだろうと。それを、光チップとか光プリント板という概念を持ち込めば高速化、大容量化のキー技術になるんだらうかということについて考えてみたわけです。

これは釈迦に説法ですが、高速化・大容量化になりますと、消費電力、クロストーク、それから配線長が長くなるということが、光配線、光ロジックというものでブレークスルーできるかということが一番興味あるところじゃないかということです。

光機能デバイスという点でいきますと光ロジック・メモリの話を最初にしなければいけないんですが、これの位置づけを明らかにするため、少し光配線ということから入らせていただきます。

光配線というふうに考えた場合には、一番手短かのアプリケーションとしては光通信です。これはご存知のように、電気信号を光信号に変換して光ファイバ伝送路で伝送して逆変換をするということですが、いま実的に最も速いということでは2 Gb/sということですが、それから現在、実験室的にかなり速いということでは4、5 Gb/s。それから、レーザが変調できたかどうかという所のレベルでは15 GHzです。

こういうような高速性のほかに、光ファイバ通信の最大のメリットはこの光ファイバ伝送路にあるわけです。実はここから光配線というところに持っていきたいがためにこういうような論理を組み立てておるわけですが、その特長といいますのは、非常に広帯域である、それからクロストークは小さい。アースは不要ですし、電磁誘導もない、非常に軽いということです。さらに光導波路、これのイメージというのは、光ファイバは要するに配線材という感じですが、たとえばプリント板の上に光のチップがあってその間を配線で結んでいるという場合を考えると、そこには光の導波路というものがなければいけないわけです。

そこで考えてみますと、まず配線の交差が可能であるということになります。普通の電気ではあり得ない、要するに直交しても直進性のために横にそれていかなないということがあります。それから信号伝送の電力が少ない、あるいは先ほどから問題になっております電気でのキャパシティブな負荷をチャージ・ディスチャージするための時間おくれがない、というような特長があるわけです。

これの数量的なところは後でもう一度出させていただくことにして、当初こういう考え方は日本の電総研などの方で出てきたわけですが、それをサポートするかのごとくアメリカなどでも最近いわれれている問題です。図-13は、光通信の機能を階層的に考えてみよう、大きいものから小さいものへブレイクダウンしていけばどうなるかということです。局間通信というのはご承知のいま盛んに建設が行われている電話網のもので、それを小規模にしたのがワークステーション間通

#### 光通信機能の階層的展開

- 1 局間光通信 → 電話・データ・画像通信
- 2 ワークステーション間光通信 → 光 LAN
- 3 装置間光通信 → 架間光配線
- 4 ポート間光通信
- 5 チップ間光通信
- 6 素子間光通信 → フォトカップラ

図-13

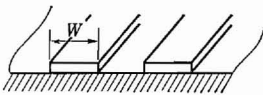
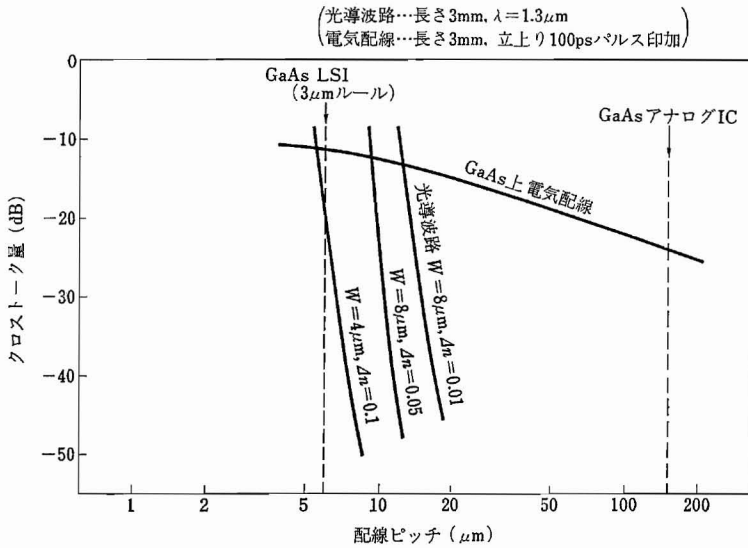


図-14 配線間クロストーク計算例

信ということで、LAN ということで、ここでも話題になっている問題かと思えます。

それから、さらに小さくなりまして装置間の光通信ということで、これは架間配線というんでしょうか、交換機などではこういうものが実際に使われているというふう聞いております。

さらにこれを小さくいたしますと、装置の中のボード間をつなぐということが考えられるわけでございます。これは頭の中で考えられるわけですが、さらにそれを小さくいたしますと先ほどから申し上げておりますように、プリント板があってそこに光の配線でこの光のチップが結ばれておるといイメージになってくるかと思えます。

一番小さい所までいきますと、デバイス、トランジスタとトランジスタを結ぶというところ何かに何かそういう光配線が使えないかということで、成功例といいますが、実際に売っているものはホットカップラということで絶縁性が非常に高いということで使われているのが一つの例かと思えます。

いま問題をこのチップ間の通信ということに絞って考えてみたいと思います。その根拠は、ご存知のようにマシンサイクルタイムが将来、実装系で決まるのではないかという所を一応私どもの狙い目にして、光導波路を使うことをそろそろ考えてみないといけなくなると考えています。

図-14 が一つの計算例ですが、横軸が配線ピッチで

す。縦軸がクロストークが取っております。

GaAs 素子の電気配線ということで、これはちょっと厳しすぎるかなあという線ではありますが、いま GaAs で  $3\mu\text{m}$  ルールでやられておると 図-14 のようなレベルであると。それから、アナログ IC のように非常にピッチを粗くして  $150\mu\text{m}$  くらいになると、20 数 dB のクロストークになっておるのではないかと。

これを光配線でやればどうなるかということですが、幅を  $4\mu\text{m}$  と仮定しまして、閉じ込め量を 0.1 というふうにいたしますと非常にクロストークがよろしいということになるわけです。これは仮定がございまして、電気配線、光配線とも、長さ 3mm で立ち上がり 100 ps のパルスを印加した場合という仮定です。上の方は計算だと思いますが。

それで、問題は先ほどから電気デバイスがどんどん速くなってきておると。どんどん速くなってきますと、たとえば 10 ps になりますとクロストークというのが非常に問題になってくるんじゃないかと。そうしますとこの電気配線のカーブが本当ならば、ねておりますから配線間隔を離していてもあまりクロストークは改善できない。そうなりますと、このカーブは通常の配線ですからもうちょっと電磁波の取り扱いの配線ということを考えることになると思いますが、そのときになってきますと、代替技術として光というものが非常に重要な技術になってくるんじゃないかと。

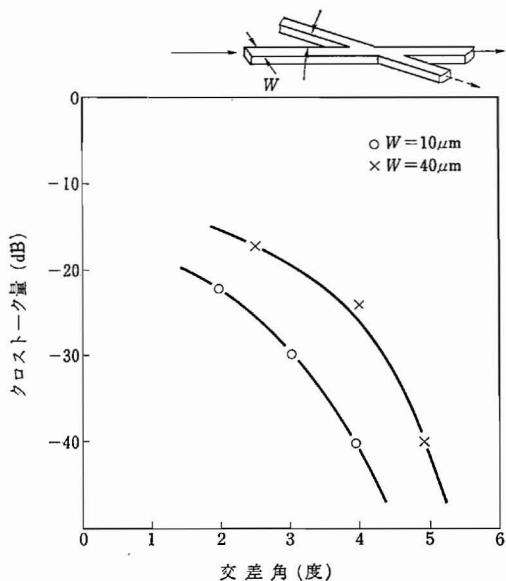


図-15 光導波路の交差角とクロストーク

ないかということがおわかりいただけると思います。

それから高密度配線の点では光配線でもそれほどじゃないんじゃないかというふうにお考えかもしれませんが、このグラフは長さを 3 mm というふうに仮定しておるわけです。これをどんどんプリント板のように長くしますと、非常にクロストークがよくないと 30 cm のボードで配線を引き回すということとはできない。ということをお考えすると、30 cm のボードにおいてもこのような 10 μm とか数 μm ピッチで一応光配線ができるんじゃないかというのがこの光のメリットとして考えられるわけです。

アース不要というのはご理解いただけるかと思いますが、配線の交差が可能という点があります。

図-15 は一つのデータですが、これは二つの光のガイドがありまして、この角度を横軸にとっております。交差角を 5 度くらいにしますとクロストークがやはり 40 dB、まあ 1/10,000 ということになるわけですが、これは何を意味するかといいますと、配線を 5 度おきに重ねてもお互いにまったく独立だということになるわけです。もしも交差がむずかしいために多層配線をしているということならば、そこら辺の問題は光配線によって非常に自由度がふえるんじゃないかということ

になろうかと思えます。

このように光配線というものは電気配線と比べてメリットがあるんじゃないかと。ではそれを実際には光のチップからドライブされないといけないわけで、この光のロジックとメモリが現状はどうなっているかということだろうかと思えます。ここら辺になりますと先ほどの話からいきますとちょっとまだレベルは高くないという感じはするんですが、二つの形態が考えられます。一つは日本から発明されたといいますが、言葉でございませうがオプトエレクトロニクス IC ということで、電子回路の周りを光デバイスで結んで入出力は光でやろうということで、いうならば終端ドライブ機能ということでありませう。

ここでちょっと一例を述べますが、各メーカーさんがいろんな形でおやりですが、私どもの例で引かさせていただきますと、長波長の材料 InP 系を使ってレーザに FET をつけたもので、2 ns というようなスピードの OEIC を試作しています。同じく長波長系ですが、ホドダイオードに FET を集積したもので、PIN/FET という形での集積化も試作しています。GaAs 系でもやられております。電子回路との相性はそういう意味で非常にいいということですよ。

もう一つ、従来からいわれています光 IC というの

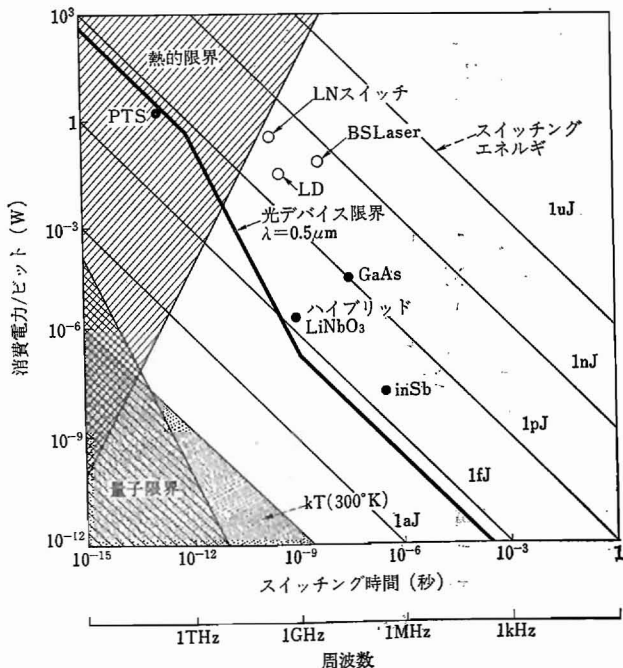


図-16 光デバイスの速度と消費電力の関係  
The Bell System Technical Journal, Oct. 1982 より

があります。これは光の導波路、まあレーザを考慮していただければよろしいんですが、光導波路でいろんなことをやらせようということで、双安定メモリとかスイッチマトリックというようなものが研究されています。

これも私どもの例ですが、半導体レーザに構造的工夫を施してヒステリシス特性を持たしています。プリミティブな実験ですが、光交換実験ということでこのメモリを使った R/W 実験をやっております。

それからもう一つはスイッチです。これは半導体ではないんですが、LiNbO<sub>3</sub> 上に5個のスイッチを集積して、4×4 のスイッチなどを実験しております。

問題はこれがどの程度のレベルであるかということです。横軸がスイッチングタイムで縦軸がパワー/ビットの 図-16 であります。私どものいままでの例は pJ を1桁くらい上回っている領域ということになるかと思えます。

ただ、ここでお断り、と言いますか言い訳になるかもしれませんが、双安定メモリとかあるいはスイッチというのは、それを1個のトランジスタで比較してやるのはかわいそうだということです。というのは、ゲートも複数個のトランジスタで構成されておまして、それがタスキ掛けになってフリップフロップを形成しているわけですので、少なくともトランジスタ数個分の機能は果たしているということです。光の一つの行き方としては、光トランジスタということを実現していくやり方はもちろんあるかと思うんですが、もう少し機能の高いものにしていくというやり方を考えなくちゃいけないと思っています。

私どもの一つの狙いはこの 1 pJ のラインを実現するという、要するに 100 pS で 10 mW というのがわれわれメーカから見た場合の一つのターゲットになるわけです。ただ Bell 研の人が、楽観的に考えれば 1 fJ ぐらいまではなんとはいくんじゃないかということを押定しております。

結論ということはないんですが、光が貢献できるのは光コンピュータというようなことではなくて、電子デバイスと相補的な使われ方をする所であると考えます。先ほどから電子デバイスがどんどん速くなるというお話がございましたが、速くなればなるほど光というものは入りやすいんじゃないかということで、お互に助け合っていくような相補的な役割りを担っていくんじゃないかというふうに考えております。

司会 どうもありがとうございます。

それでは以上をもちまして機能デバイスのお話は終

わります。続きましてメモリの方に入ります。

最初のご講演は垂直磁化に関しまして東北大学の中村先生からお願いいたします。

中村 東北大学の中村です。メモリと言いますと、情報の保持、保存ということですが、ここでは半永久的に保存する記録という立場で話をしていきます。磁気記録は計算機の初めのころから外部補助メモリとして使われてきました。しかし、いまのようにどんどん情報量がふえてきますと、情報ファイルとしての役目はこれから非常に大事になってくるだろうと考えておりますが、多量の情報量をどうやって蓄えていくかという、スペースの問題がとくに重要になってきます。

そういたしますと、単位面積あるいは単位体積当たりにどれだけの記録情報が蓄えられるかということが一番要求される問題になるわけです。その他、当然情報の不揮発性あるいは信頼性、それから、書きかえができるかどうか、経済性などの要求がありますが、一応ここでは単位体積当たりにどれだけの記録容量を蓄えられるかを記録の最大の主題としてお話ししていきます。

その場合、現在の記録の方式ではどうだろうかということをもまず考えてみます。代表的な例として磁気記録を計算機で使う上での一つの標準装置になっている磁気ディスクを考えてみますと、記録媒体の磁性層の厚さ、ヘッドと媒体とのスペーシングいわゆるヘッド浮上量、それからヘッドのギャップ長が記録密度を決めております。いずれもこれらを小さくすることによって、現在記録密度を1万5千ビット/インチくらいまで高めることができるようになります。さらにこれを伸ばす努力をしているわけです。しかし、もっと伸ばそうとすると実は磁性層もヘッド浮上量も、空隙長も限りなくゼロに近づけなければならず、いずれ限界に来るのは目に見えております。

ではなぜ磁性層を薄くしなければならないかということをお話させていただきます。これは磁気記録の原理を書いたものです。磁気記録では、たとえば磁性層の磁化の極性を反転させて情報“1”を記録していくという方法をとっております。

現在の方式ですと、テープの長さ方向、ヘッドの走る方向ですが、その方向に磁化しやすい記録媒体を持ってきて、この 図-17 のように、長手方向を向いた磁石の極性を突き合わせだ形で書きあらわされるように記録されています。そうしますと、磁石同士が突き合っておりますから、当然反発力が働いて、普通の磁石

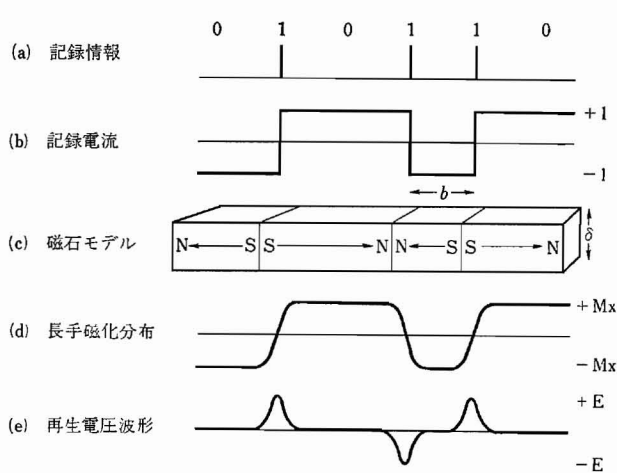


図-17 長手磁化方式による磁気記録の原理

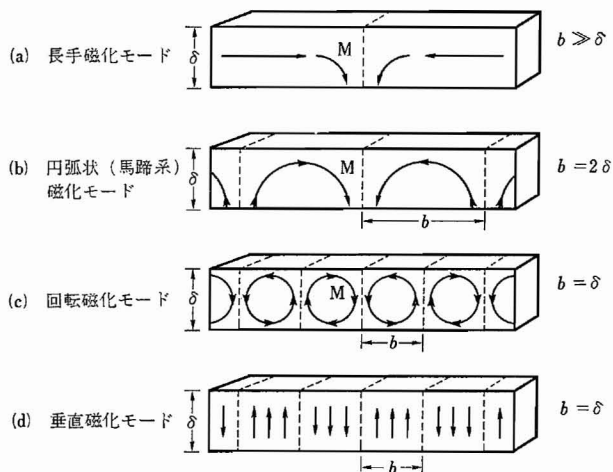


図-18 記録磁化モードのいろいろ  
( $\delta$ : 磁化層の厚さ,  $\lambda$ : 記録波長)

同士ならお互いに離れ合います。しかし、媒体の場合にはそうはいきませんで、媒体の磁化を弱める減磁界として、どうしてもその磁化の極性が反転する変位の領域を広げるように働きます。したがって再生電圧パルスの幅が広がりますので、記録密度を上げるためには、このパルス幅を狭め、パルス間隔をもっと狭くしたいのですが、なかなか狭くできないことになります。

この現象をさらにもう少し細かく調べてみますと、図-18 のようになることがわかります。一つの情報が入っている磁化転移の所では、向き合っている磁化ベクトルがお互いに反発して(a)のように横を向き、媒体の表面方向を向いてしまいます。したがって、ビット間隔を狭くしていきまると、(b)のように磁化分布

は半円状になり、さらにビット間隔を狭くしていきまると、(c)のように磁性層内で閉磁路をつくってしまった方がエネルギー的に安定になるような性質を本来持っております。そのため、ビット間隔を磁性層の厚さ以下に狭めようと思はると、磁束が磁性層の外に出てこなくなって再生出力が急激に減少してしまうという現象が生じます。

そのため、現在の記録方式では、高密度記録を行うため、二つの方法がとられています。一つはビデオ記録のように比較的厚い磁性層の表面を浅く記録する方法です。ビデオ記録の場合には、磁性粉末を塗布した磁気テープを使いたいのですが、薄く塗れませんので、再生出力がチャンと出るような磁性層内の磁化分布が閉磁路を形成する直前の馬蹄形磁化の状態で記録する必要がありますので、表面層だけを磁化することになるわけです。そのためは、記録媒体をできるだけ均質性をよくして、表面を非常にきれいに仕上げていく、というような、塗布技術を上げていくことが大事になってきます。しかし、これにはどうしても限界があります。

もう一つの方法は、磁気ディスクのように、磁性層そのものを薄くする方法です。デジタル記録の場合には信頼性が非常に大事ですので、磁性層の正と負の飽和磁化間の磁化転移で情報を記録する飽和形記録を行っています。ビット間隔を狭くして確実に情報を記録していくためには、必然的に媒体磁性層を薄くしていく必要があります。

ビデオ記録方式でも、磁気ディスク方式でも磁化層を薄くしていきまると、信号レベルが下がってきますので、これにも限界があります。

そこで、薄くしても出力がとれるような、磁石としてのエネルギーが高い磁性材料を使うという考え方もありますが、そうしますと強い磁界を出せるベッド材料になかなか適当なものがないという問題が出てまいります。そういうことで 図-18(d) のような垂直記録方式はどうだろうかということで、数年前から研究が進められているわけです。これは今までの方式と違ひまして、媒体面に垂直な方向に磁化されている磁石を反並行に並べてその磁化反転の所に情報を与えます。そういういたしますと、ビット間の磁化分布は減磁界で磁化



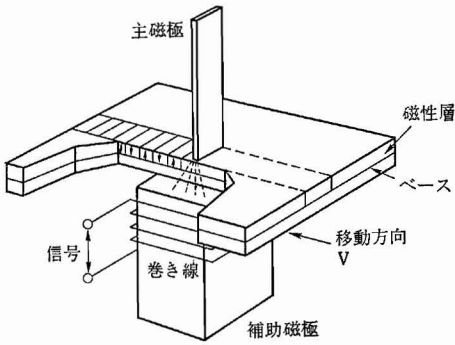


図-19 垂直磁気記録方式

が減る可能性があります。磁化転移をしている付近では減磁界がゼロになって鋭い磁化転移ができ、再生電圧パルスも非常に狭く鋭くなります。したがって、原理的には磁化転移幅がゼロの状態ができますが、実際にはヘッドの磁界分布の鋭さとか、使う媒体磁性層の微小磁区の最少寸法で決まってしまうけれども、かなり高密度な記録ができるはずだと考えまして、図-19 のような方法で実験しました。

従来のリングヘッドに対しまして媒体の磁性層面に垂直の方向に効率よく磁界を出すためにギャップに相当する所を軟磁性薄膜で置き換えた構造です。

これを励磁するためにわれわれは媒体を挟んだ反対側にコイルを巻いた大きな磁極を置き、いわゆる補助磁極を用いる単磁極形ヘッドというものを考えまして、それで記録ばかりでなく、信号の再生を行いました。

それから、媒体は当然厚みの方向に磁化しやすいような磁性材料を探さなければいけないということで、われわれはコバルトとクロムの合金膜をスパッタ法でつくったものを使っています。そして、さらに、この図には書いてありませんが、垂直に磁化するコバルトとクロムの合金層の裏側に、もう一つ軟磁性層を置きてヘッドの軟磁性膜と媒体の軟磁性層とで情報を記録する垂直磁化層を挟む形にしました。こうしますと、コバルト・クロム層に強い垂直の磁界を集束させることができまして、実用的な記録再生感度が得られます。

図-20 は横軸が西暦年、すなわち研究経過を表わし、縦軸がそれに対する線、記録密度の向上の様子を示しています。実線の×印は、IBM の磁気ディスク、○印は、VTR での記録密度ですが、これに対して垂直磁気記録での記録密度を破線の○印で示しています。こ

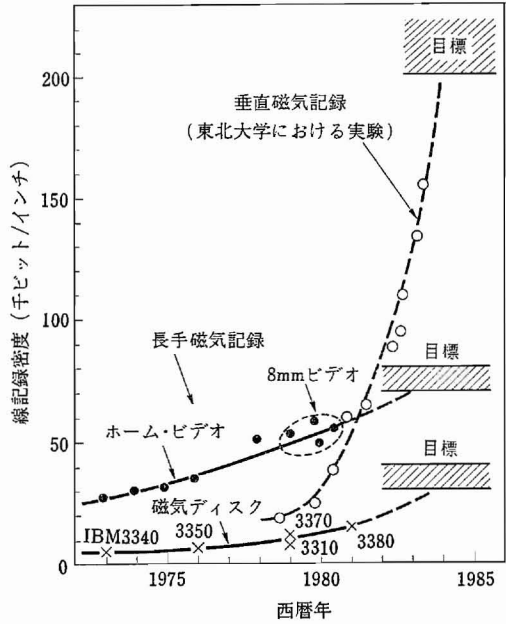


図-20 垂直磁気記録の記録密度の経過

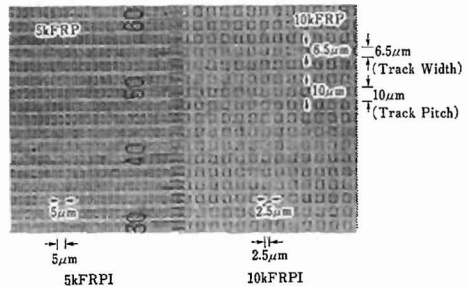


図-21 狭トラック単磁極ヘッドで記録された垂直記録媒体表面の磁化状態

れはわれわれの実験室でのデータですので必ずしもこのままで実線との比較はできませんが、垂直磁気記録の素性の良さは十分あらわしていると思います。ヘッドの精度、媒体のつくり方をうまくしていきますと、どんどん記録密度が伸びてきておりまして、この図は実用的に十分な SN 比をもつ記録密度をプロットしてありますが、記録再生できるということでは 20 万ビット/インチ以上のところも実験室では可能になっております。

さらに、線密度だけではなくて単磁極ヘッドの幅を狭くしまして、トラック幅 6.5 ミクロン、トラックピッチ約 10 μm くらいで鮮明に記録できることを確かめたので 図-21 です。これは記録済みの媒体表面



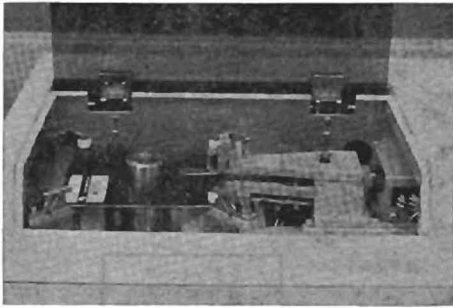


図-22 フレキシブル垂直磁気ディスク装置のヘッド・媒体駆動部

に磁性粉を塗ったものですが、実験上の都合で、少し線密度は低くしてありますけれども、情報の反転しているところが非常にきれいな矩形領域で見えます。線記録密度は10万BPI以上に上げられますから、面記録密度では大体いまの光記録程度までは、記録できることが一応実験では確認できております。再生も、トラック幅6.5μmくらいまでは単磁極ヘッドでできておりますので、実用的にもむずかしい問題ではないだろうと考えています。

垂直磁気記録では、テープ状またはフレキシブルディスク状の記録媒体が使えますので、体積当たりの記録容量がかなり上げられます。しかももう一つ好都合なのは、現在の磁気記録で使っている周辺の基本技術がそのまま利用できます。

垂直磁気記録方式は現在各方面で開発が進められ、3.5インチ径のフレキシブルマイクロディスクの片面に3メガバイトから4メガバイトの情報が記録できるフレキシブル垂直磁気ディスク装置が試作されています。

図-22はわれわれの所で実験に用いている垂直磁気ディスク装置です。

現在のフロッピーディスクのジャケットに入っているのが垂直記録媒体で、5インチ径のプラスチック・フィルム上に、コバルト・クロムとニッケル・鉄のそれぞれの合金膜をつけた二層構造のディスクが入っております。現在このディスクの中に大体線密度で7万から10万ビット/インチくらい、それからトラックピッチで50μm、ですから片面当たり30~40メガバイトくらいが、一応SN比的に満足できる状態で実験室ではできております。

また同様な装置を用いて、NHKの放送技術研究所と協力して、カラー画像の記録やデジタル録音の実

験なども行っております。将来、画像ファイルとしても大いに使えそうな感触を得ています。

現在記録媒体の量産技術の研究がいろいろと進められていますが、現在、線密度で1インチ当たり15万から20万ビットぐらい、トラック密度で1インチ当たり2千から2千5百トラックは一応実験ができていますので、これを組み合わせて将来的には、3.5インチ径のディスク片面に200バイトくらいは可能ではないかと期待しています。それからビデオカセット、テープ状の媒体ができますと、1本に100ギガバイト以上の情報量が入る、高品位画像ファイルの可能性もあります。たとえば白黒X線画像を2000画素×2000画素、10ビット階調で、冗長度50%で記録しようとする1枚当たり7.5メガバイト必要になりますが、3.5インチ径ディスクに20枚から30枚、テープ状にしますと1万枚以上入る計算になります。

ただ、そのために現在問題になっておりますのは情報媒体の大量作製技術です。記録媒体は紙に相当しますから、たくさんできないと困るわけで、信頼性の高い、良質の記録媒体がいつ量産できるかが、垂直磁気記録技術が浮上できるかどうかの鍵を握っていると言っているかと思えます。

以上でございます。

司会 どうもありがとうございました。

続きまして光ディスクの現状について角田さんお願いします。

角田 日立中研の角田でございます。

私の話はまず最初に、光ディスクの現状はいまどういふところに来ておるかということをお話したいと思います。続きまして将来どういふ課題を持っているか、それから最後に、特に新しい計算機システムとの関係においてどういふインパクトを与えるかという順番でお話したいと思います。

まず、光ディスク自体は1970年ごろから世界的にいろいろな所で開発が始められております。図-23に

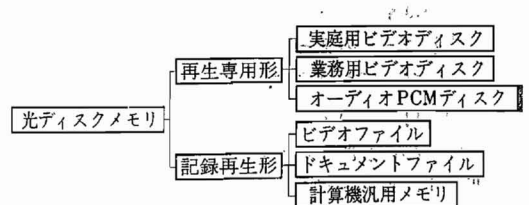


図-23 各種光ディスク関連技術

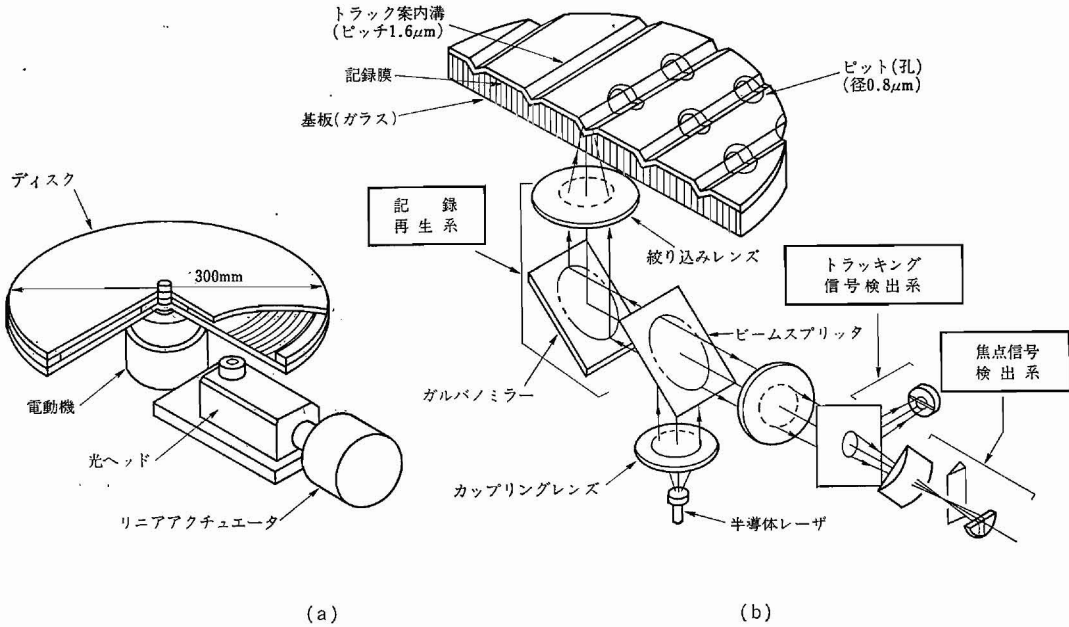


図-24 光ディスクファイルの基本構成  
基本構成要素を(a)に、この中のディスク、ヘッド部分の詳細構成を(b)に示す。

示したのが光ディスクに関連したいろいろな応用技術のマップでございます。大きく、再生専用型の光ディスクと記録再生型の光ディスクに分かれます。再生専用型はすでに製品化されているものばかりですが、皆さんご承知のように家庭用ビデオディスク、業務用のビデオディスク、あるいはオーディオ用のPCMディスクなどがあります。これはあらかじめ情報をディスクの上に凹凸の小さい穴として記録しておいて、それを小さいスポットに絞ら込んだレーザー光で再生するものです。

これに対して1975年ごろから記録再生型のディスクの開発が活発になってきました。これは通常追記型ディスクと呼んでおりますが、薄膜の記録材料にレーザー、特に半導体レーザーを非常に小さいスポットに絞り込みまして、その熱によって穴をあけたり、変形させたりあるいは結晶化させたりなどの変化で情報を書く、つまりユーザのデータを書き込むようなタイプのディスクになっております。

この記録再生型のメモリは、当初はエラー率が非常に高く、品質があまりよくなかったため、高い信頼性を要求するコードデータの記録には応用できず、ドキュメントあるいはイメージなどの情報記録に限定されていたんですが、材料の開発や装置の改良によりま

して、ごく最近になってコンピュータ用のコードデータも記録できるレベルのものが出てくるようになったわけです。

図-24がコンピュータ用のコードデータを記録できる装置の一例でございます。ディスク自体は直径30センチで、カートリッジの中に入れておまして、これを自動的に装てんします。装置の中には半導体レーザーを光源に用いた小さなヘッドがございまして、そのヘッドで情報を記録再生します。

主な仕様を申し上げますと、この30センチのディスクの片面に1.3ギガバイトの情報量が入ります。これは、両面ありますので1枚のディスクに2.6ギガバイト入ります。データ転送速度は、0.44メガバイト/秒。平均のアクセス時間が250ミリ秒です。ディスク自体のエラーレートでは大体 $10^{-6}$ から $10^{-7}$ 程度ですが、これに冗長性を持たせましてエラーコレクションのコーディングをしますと $10^{-12}$ で、普通のコンピュータ用のコードデータがかなり信頼性高く記録できるようなレベルのものになっております。

それから、一つの装置の中にディスクを複数枚入れて、ちょうどジュークボックスと同じような形で非常にたくさんの容量をオンラインで使えるライブラリ装置があります。通常32枚のディスクが入りまして、

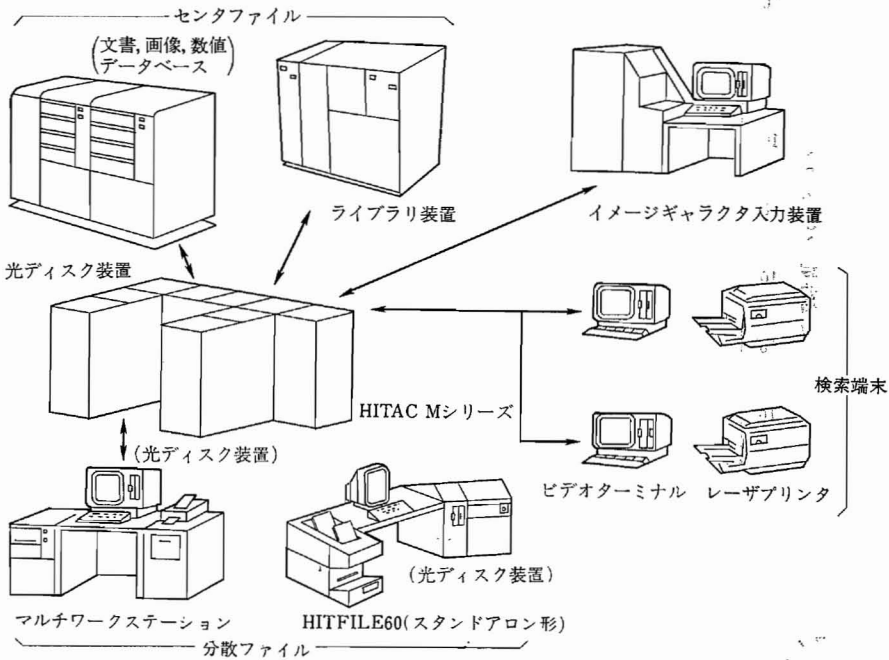


図-25 光ディスクを用いたシステム構成例

光ディスク装置は、センタファイルとしてあるいは分散ファイルとして種々の使い分けができる。

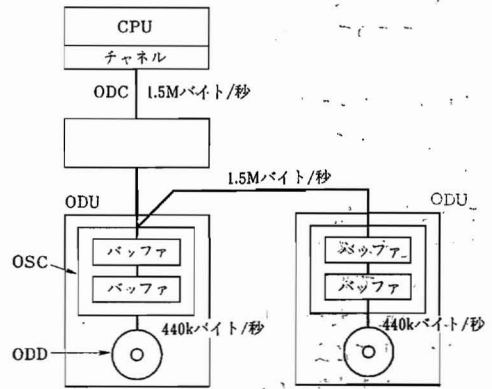
1システムで80ギガバイトの非常に大容量なものになっております。

一方、小型の方の応用ではワークステーションなどの中にこういう装置を組み込む使い方もありますし、あるいはこの装置自体が独立したスタンダーロンタイプ、たとえばスキャナ、プリンタなどを一緒に組み込んだ形のものもございます(図-25)。これを使いますとたとえばオフィスオートメーションで文章などを光ディスクの中に入れますと、一つのディスクに約4万枚くらいのもが入ります。

図-26が実際にシステムの中で装置がどのように接続されているかということを示したものです。ドライブ装置がここにございます。ドライブ装置自体の転送速度はまだおそいものですから、このドライブ装置のすぐ上にバッファメモリを持ったコントローラがありまして、ここである程度情報をためて、この上のチャンネルにつなぐようになっております。ここでは大体1.5メガバイト/秒くらいのスピードになっております。これ全体をもう一つ上位のコントローラで全体をコントロールして、その上が普通の大型コンピュータのチャンネルと同じような形になっているというわけ

です。

こういった光ディスクを従来の磁気ディスクの技術と比較してみたものが図-27です。縦軸が記憶容量、



注) 略語説明

OSC (Optical String Control: 光ディスク接続装置)  
 ODD (Optical Disk Drive: 光ディスク駆動装置)

図-26 光ディスク多重読み取り・書き込み構成  
 複数のOSCでチャンネル~ODC間のパスを時分割で専有し、多重読み取り・書き込みを行う。

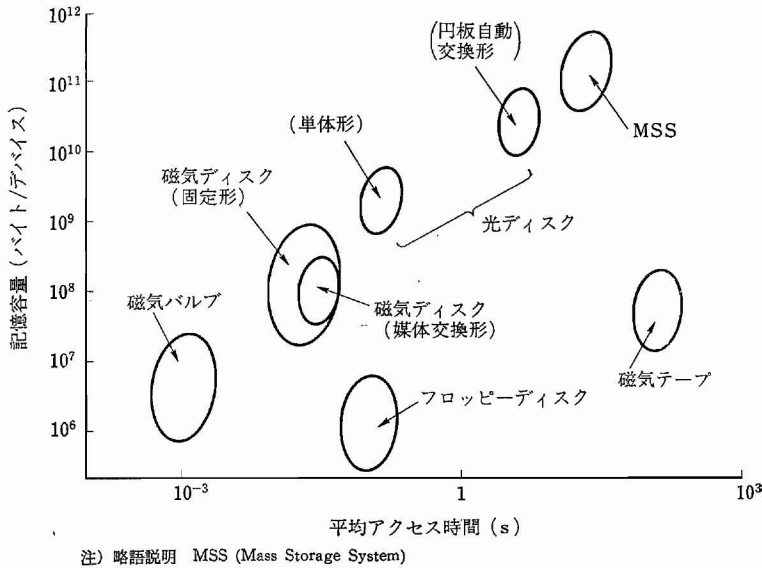


図-27 各種メモリの容量とアクセス時間  
 ファイルメモリは記憶容量とアクセス時間で役割が分担される。光ディスクは磁気ディスクとMSSの中間に位置づけられる大容量ファイルである。

これはデバイス当たり一体どのくらいの容量が入るか、それから横軸が平均のアクセス時間です。光ディスク、単体のものがちょうどこちらになり、ジュクボックスタイプのもが上になるわけです。従来の単体の磁気ディスクとよく比較されるわけですが、アクセスタイムは一けたくらいおそくなっております。容量で言いますと大体記録密度が20倍から50倍高くなっておりますので、それに対応した容量を持っております。

従来の磁気テープと比較しますとアクセスタイムがかなり速くなっていて、かつ容量も大きくなっています。

このように磁気ディスクあるいは磁気テープなどと競合して光ディスクが使われるわけですが、一体どういう応用領域で光ディスクが必要とされているかということを整理したのが図-28です。これは横軸にいろいろな応用で必要としている記憶容量、縦軸はその応用に必要な1時間当たりの検索の頻度が書いてあります。

こういった大容量のメモリの応用領域は大きく四つの分野に分かれております。一つはここにございます集中型の画像処理です。これはセンタファイルのなしかも画像情報を主に扱う応用ですが、たとえば銀行で

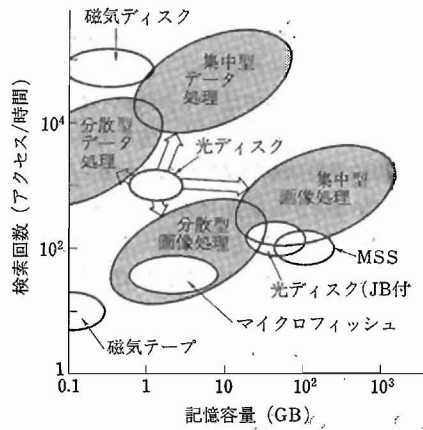


図-28 ファイルメモリの応用分野

すとか生命保険会社、情報センターあるいは官庁などで具体的に使われるものです。

2番目は分散型の画像処理です。これはオフィス、あるいは営業所などにおいてオフィスの中にある文献情報あるいはデータ類を小規模にまとめてファイルするといった応用になります。

表-1 光ディスクに対する要求仕様と技術課題

光ディスクにはさらに大容量化、高速化、小形・低コスト化が望まれる。また、可逆化への期待も大きい。これらを実現するためには多くの技術課題があるが、確実に実現してゆくと考えられる。

項番	要求仕様	技術課題
1	大容量化	・高 S/N 記録媒体 ・高解像度光ヘッド
2	高速化	・高感度記録媒体 ・高出力半導体レーザ
3	可逆化	・高信頼可逆記録媒体 ・消去機能付光ヘッド
4	小形・低コスト化	・簡易構造ディスク ・超小形光ヘッド

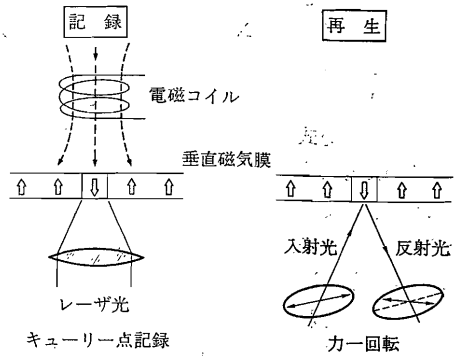


図-29 記録・消去および再生の原理

このような画像型の応用に対してデータ型の応用があります。その中でもやはりセンタファイル的な集中型データ処理と、もう一つ分散型のデータ処理とがあります。この領域は現在磁気ディスクがほとんどカバーしているわけです。

光ディスク自体の一つの大きな問題はスピードが非常におそいということで、これを相当上げないとなかなかデータ処理に対応していけないと思います。

このような各種応用展開を考えますと光ディスク自身、密度は高いんですがもっと性能を改良していかなければなりません。

表-1 は今後の開発課題を簡単に整理したものです。まず第1は容量の増加、2番目がスピードアップ、3番目は可逆化、それからもう一つは、パーソナルコンピュータなどに光ディスクがやがて使える時代がくるだろうということで、小型化、低コスト化ということが非常に大きな課題になっております。

この中の可逆化ですが、これはいま各所で活発に開発中であります。

その中で代表的な方法として光磁気材料というのがございます(図-29)。これは、垂直磁化膜に磁場をかけておいて、同時にレーザ光線を当ててやります。そういたしますと、この部分の温度がキュリー温度より上がります。その結果磁化が消失する、そこへちょうどあらかじめ一つの方向に向けておいた磁化と逆方向に磁場をかけておきまして、それで冷やしてやる、冷やすときに磁化が磁場の方向にちょうど逆向きになって記録が行われる

わけです。これを読み出すときには直線偏光したレーザ光を照射するとカー回転によってその偏向面がお互いに逆の方向にわずかに回転するわけです。その回転した偏向面を検光子で光の強弱に変えて読み出します。この方法の一番大きな問題は、この回転の角度が非常に小さいためになかなか大きな信号が出てこな

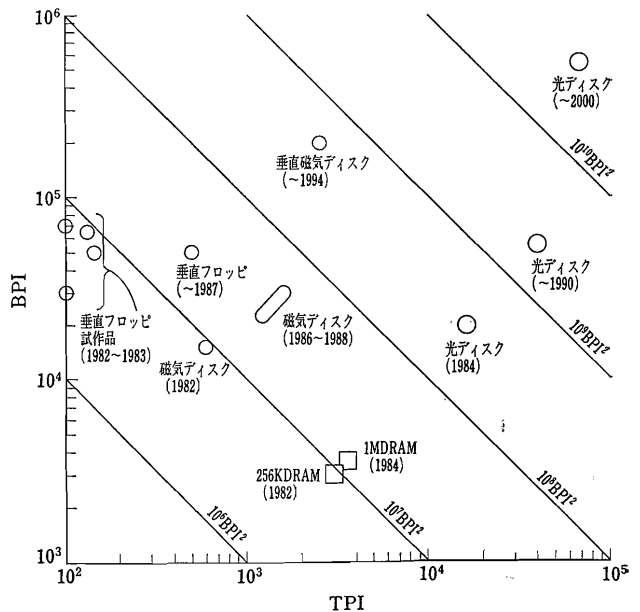


図-30 ファイルメモリ記録密度の比較

い、つまり SN がとれないということです。しかし、ここ数年非常な勢いで SN が改善されてきておりまして、デジタル記録に必要とされている 45 デンベルをかなり上回るようなデータが最近出てきております。かなりこの方式も実用化に近いのではないかという感じがいたします。

次に記録密度ですが、図-30 はいろいろなファイルメモリの記録密度を比較したものです。横軸が TPI、縦軸が BPI を示してあります。

現在、製品化されている光ディスクの位置づけはちょうどここにあるわけです。トラックが1インチ当たり2万トラックくらい、それからビットが1インチ当たり2万ビットくらいで  $10^8$  ビット/スケアインチよりちょっと高い所にあるわけです。

これに対しまして現在の磁気ディスクはちょうど約1けた、約  $1/20$  くらいの所にあります。現在リジットの磁気ディスクで盛んに開発されている 2.5 ギガバイトあるいは5 ギガバイトのディスクは記録密度で言いますとちょうどこの辺にまで伸びています。先ほど中村先生からお話のあった垂直記録は、1980 年から

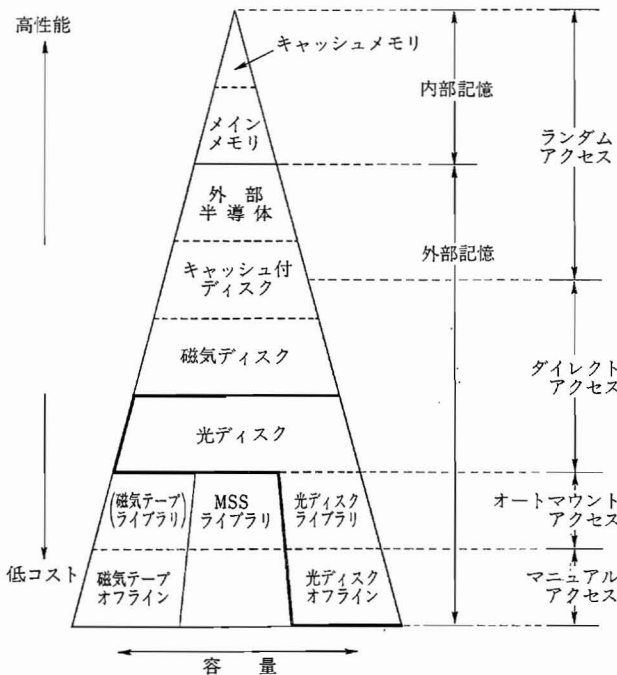
1983 年くらいに方々で発表された試作品のレベルでちょうどこのあたり、 $10^7$  BPI/スケアインチをちょっと割ったような所にあります。

先ほど中村先生から「将来、5万 BPI、500トラック/インチくらいが一つの試作の大きな目標になっている」というお話がありましたが、それをプロットするとちょうどこの辺の所になります。

また、垂直磁気記録が原理的に20万 BPI、2,500 TPI くらいまで将来いこうだろうといわれていますが、それをプロットいたしますと大体この辺になります。

ちょうど同じくらいの時期に光ディスクが一体どのくらい記録密度が伸びているかということ、5万 BPI、5万 TPI くらいはいくだろう、つまり、1けたくらいはこれから上がるだろうと思っております。その先2000年くらいになったら一体どうなるかと考えて見ますと、この辺の所はまだいろいろ可能性の段階ですが、光の持っているほかのパラメータを記録にもっと応用できるかも知れません。

たとえばその代表的な方法としてよく知られているのが、IBM などではいま盛んに研究をやっているの



注) 略語説明 MSS (Mass Storage System)

図-31 計算機システムでのメモリ階層

光ディスク記憶装置は、ダイレクトアクセス可能なメモリとして最大容量をもつ。可搬形であるため、オートマウント(ライブラリ)タイプによるアクセスやオフライン蓄積が可能である。

ですが、波長多重記録というのがございます。同じ場所に波長を変えてどんどん情報を記録してやる。そうすると1000多重くらいくんじゃないかというようなことを、非常に基礎的な実験ですがやっております。仮に1000多重はいかなくともせいぜい10から数十くらいいこうと考えると大体2000年には約1けた上の所、つまり  $10^{10}$  ビット/スケアインチくらいの所までは光が来るんじゃないかと考えております。

最後にまとめとして、計算機のメモリハイアラキーの中で一体光ディスクがいま現在どういう位置を占めていて、今後どういうふうに進展していくかということについて簡単にご説明します。

図-31 はメモリハイアラキーの絵なんですけど、ちょうどこの場所に光ディスクが位置づけられております。大きく言うと三つの領域があると思います。一つは、ちょうどこの磁気ディスクのすそ野くらいの所にある。つまり非常に大容量で、そんなに速いスピードではないけれどもコンピュータがダイレクトアクセスができるようなメモリタイプであって、かつビットコストが相当安いメモリとい

うことです。これが将来、可逆化とかあるいは高速化されますとこの磁気ディスクの領域に入っていくでしょう。

それから二つ目の領域はライブラリなどのようにオートマウントのアクセス可能なメモリ領域です。

これは従来の技術として MSS という技術があるんですが、ビットコストがあまり下がらないということで使われていないわけですけども、光ディスクの場合には圧倒的にビットコストが下がりますから、コンピュータの領域におきまして非常に新しいコンセプトのメモリということで今後この領域で非常に使われていくんじゃないかと思っております。

それからもう一つ、マニュアルアクセスの領域。この領域はいま磁気テープがあるんですが、どうも非常に使いにくいものになっている。また小型の容量でいまフロッピーディスクがこの領域に相当するわけですが、容量が少なすぎて困っています。ここに5インチの光ディスクをもってくると、両面で600メガバイト程度入ることになります。このようなメモリが出てきますとこの領域で非常に大きな位置づけになるであろうと考えられます。このように光ディスクは将来方向において幅広い応用展開が期待できると考えております。

以上でございます。

司会 どうもありがとうございました。

最後になりますが、東芝の堀さん、お願いします。

堀 東芝の堀でございます。それでは液晶についてお話ししたいと思います。

新しい計算機といえますと、高速処理ということがあると思いますが、ディスプレイに関してはマンマシンインタフェースということで、相手が人間ですからあまり表示の速度を速くしても人間の方がそれに追いついていきません。情報量の増加ということに対してはディスプレイデバイスも対処する必要があるかと思っております。それから一方、最近オフィスオートメーションなどということが叫ばれておるんですが、そういう OA 機器が将来どんどんふえてくると、ビルの電力がパンクしてしまうということが言われております。それから、将来情報機器が小型化され電卓などの発展したものとしていわゆる電子メモ手帳、あるいはそれのもっと発展したハンディの情報機器というようなものが出てくるかと思えます。これらは低消費電力が要求され、したがって、これからのディスプレイデバイスは消費電力を減らさなければいけません。この意味で消費電力の少ない液晶デバイスは有望ではない

かと考えております。

きょうはその液晶デバイスの情報量の増加という立場から若干お話ししたいと思います。

液晶のデバイスには表示デバイスとそれから情報処理用の空間変調器に使われるものがあります。

また、液晶デバイスにはパネル形と投写形があり、パネル形には単純なマトリクス形と、メモリ形、スイッチマトリクス形というのがあります。

単純マトリクス形は最近かなり普及しております、ドットマトリクス形とも言われます。これがその一例で 80 字×8 行の文字表示ができます。これが最近では 16 行の表示ができるようになり、さらに 25 行の表示のために液晶材料あるいはデバイスの開発が進められておるわけです。ところで、後で簡単に申し上げますが、電極線の数を増し行数をふやすということは情報量がふえるわけなんです、コントラストがどんどん下がってしまうために、単純マトリクス形はもうそろそろ限界が見えてきていると言えます。つまりその限界が 25 行の字が書けるかどうかといったところじゃないかと思えます。さらに表示容量を増すためにはメモリ形あるいはスイッチマトリクス形に期待しなければなりません。

単純マトリクス形の限界について簡単に説明いたします。これがマトリクス形液晶パネルの電極ですが、この Y 電極にはこのようなスキニングパルスを次々に加えます。これが画面の 1 フレームですが、液晶は交流駆動が必要であり、1 フレームごとに極性を反転しております。スキニングパルスに同期いたしまして X 電極に、たとえばそこをオンにするのであればこのパルスと逆相の、ここではマイナスの電圧を、また、オフにするのであれば同相の電圧を加えます。そういたしますと、オンの画素にはこういうパルス、オフにはこういうような、パルスがそれぞれ加わります。液晶は電圧の実行値に应答するわけですが、ここで見ていただきますとわかりますようにオンとオフのパルスはここが違うだけでありまして、いわゆるバイアスの期間の振幅は同じです。電極の数  $N$  がふえればふえるほどこのバイアスの期間が相対的に長くなりますのでオンとオフの電圧の比が 1 に近づくなる。これがコントラスト低下の理由です。

現在、実用になっているのはツイステッドネマチック形で  $N$  が 100 くらいまでですが、 $N$  の限界値は 100~200 ほどと思われます。

表示容量を若干増す手段はありますが、それにして



も限界があるということでありまして、メモリ形とスイッチマトリクス形に頼らねばなりません。

初めにメモリ形の動作を簡単に説明しましょう。液晶そのものにも種々の動作モード、あるいは多くの材料があるわけですが、このメモリ形ではスメクチック液晶という材料の熱・電気効果を使います。ある種のスメクチック液晶は温度を上げますとネマチック相に転移し、さらに温度を上げると分子の並び方がランダムになり普通の液体と同じ光学的に等方的な液体になります。で、加熱を停止すると温度が下がるわけですが、ネマチック状態に戻ったときに電圧を加えますと液晶分子はその長軸が電界の向きに揃います。さらに冷却されスメクチック状態に戻るわけですが、液晶分子がきれいに並んだ状態のスメクチック状態が得られます。したがって、電圧を加えると透明状態になるわけです。一方、電圧を加えませんか等方的液体でのランダムな配列状態がスメクチック相に戻っても保持され、光を散乱するような組織が形成されます。このようにして、白と黒を得ることができます。こういう効果を巧みに使うことによって、通常のドットマトリクス形と同様に表示パネルを動作させることができます。液晶の温度を高め相転移を生じさせるため、一方の電極はストライプ状のアルミのヒータ電極とし、電流を流すようにしてあります。この電極に対向する透明なストライプ状電極との間に加える電圧をオン・オフすることによって文字・図形を表示しようというわけです。

このようにしますと、いわゆるクロストークというものになります。表示量をかなりふやすことができます。これは一つの例ではありますが、漢字ですと1文字の表示に少なくとも $16 \times 16$ ドットあるいは $24 \times 24$ ドットが必要なんです。この表示パネルでは24行の漢字表示ができます。コントラストを低下させずさらに行数をふやすことは動作原理的にも可能でありまして、こういうメモリ・タイプを使うというのが表示容量増加の一つの方向かと思っております。ところで、表示パネルは20センチ角、30センチ角とかそれ以上になりますと、液晶層の厚さをかなりコントロールしないといけないということがかなりむずかしくなりますが、まあ30センチ角ぐらいのものはできると思います。

次にスイッチマトリクス形に話を移したいと思います。これには電界効果トランジスタを使うタイプと、それから二端子の非線形エレメントを使うものがあり

ます。電界効果トランジスタにはシリコンの単結晶のウェハの上にトランジスタを形成するMOS形とガラス基板の上に薄膜技術で形成する薄膜トランジスタ(TFT)形とがあります。それで、この薄膜トランジスタにはいろいろな半導体材料が使われる例がありますが、アモルファスシリコンとポリシリコンが主流になっております。これについてはまた後で報告いたします。

非線形エレメントの方はバリスタ、MIM (Metal-Insulator-Metal) 素子、ダイオードがあります。このダイオードはアモルファスシリコンでつくるといふ例もあります。バリスタは電圧が高いとか再現性がないとかということ最近、研究は中止しているようです。

それでは次に、スイッチマトリクス形の動作について簡単にご説明いたします。まず構成ですが、XYマトリクスの交点に、ここに見ていただきますように、トランジスタと必要に応じてキャパシタすなわち信号蓄積容量を設けます。キャパシタに平行に表示素子が、液晶のエレメントと考えていただいてもいいわけですが、接続します。液晶のエレメント自体もキャパシタであり、それで十分であれば補助キャパシタの必要はありません。

Y電極を順々に上から走査していくわけですが、いまこのラインがスキャンを受けてゲートがいているとします。スキャンに同期させて、信号を平行に入れますと、各キャパシタにはその信号に応じた電荷量がチャージされます。チャージされると同時にその電荷でそれぞれの液晶素子がドライブされるわけです。

次の走査までの1フレーム期間中、キャパシタに蓄えられた信号でこれらの液晶素子をドライブするわけで、走査を受けたその瞬間だけ動作する先ほどの単純マトリクス形と大いに違うところです。すなわち、励起時間が長いということで、液晶に加わる電圧が十分に高くなり、コントラストが高くなります。それにレスポンスも速くなります。それから、スイッチ作用のあるトランジスタが設けられてありますのでいわゆるクロストークという現象が起こらなくなるということからコントラストが良くなります。このような利点があるわけです。

そういうことでクロストークがないため、走査電極数を増してもコントラストが劣化せず、多画面化が可能であるということによって本駆動方式は大容量表示に向く

ということでありませう。

それから、将来的には周辺回路を一体化できる可能性があります。表示デバイスで、表示容量を増しますと何が問題になるかといいますと、端子のコネクションがかなりむずかしくなってきました。密度が高くしかもたくさんの電極を結ばなければならないということですが、将来的には駆動回路を同じガラス基板上に形成してしまうという技術があるかと思えます。このように一体化することで小型になり、また高信頼化が期待できます。

最近注目されておりますのに TFT (駆動) 形があります。先ほど MOS トランジスタ (駆動) 形について述べましたが、MOS 形ですと製造コストが高くなるという欠点があります。それに対して TFT は製造工程が簡略化できることもありまして、安くできそうです。それからガラス基板上に形成しますので大きなものができるということがあります。それとともに、ほとんどのものが透明でありますためにカラーフィルタとの組み合わせによってカラー化ができます。シリコンのウェハを使う MOS 形ですと光が透過しませんので透過型でカラー化が困難です。そういう意味で TFT というのはかなり意味がある。

それから透過形ということで、液晶が一番ポピュラーであり、しかもコントラストがよい TN 形が使えます。以上のような理由で TFT 形というのは存在の意味があると思えます。

これが TFT 駆動液晶表示モジュールの構成です。この一方のガラス基板にはアモルファスシリコンあるいはポリシリコンの半導体層、絶縁層、電極導体などが堆積形成され、トランジスタあるいはキャパシタのレイや電極母線が設けられています。

もう一方の基板の内側には三原色のカラーフィルタがモザイク状につくられています。このフィルタの上には、透明共通電極が形成されています。この透明共通電極と画素電極との間の電圧を TFT で制御することによって、液晶を動作させ、光を通したり遮断したりするわけです。この例では TN 形ですので 2 枚の偏向フィルタが使われており、裏側に光源が設けられ、その光を透過させてみるようになっています。

これは MOS 形の例であります。4 インチ φ のシリコンウェハから 1 枚だけ作れるというような寸法のパネルです。画素数は 480×480 ありまして、アルファベット 12 の文字ですと 3,600 の文字を表示できます。もちろん、グラフィック表示も可能です。

この表示パネルでは、スキャナもトランジスタアレイ部と同時に同一シリコン基板上に作られております。そういうものができるようになっておりますけれども、要は値段だけの問題かと思っております。こういった表示パネルが将来、小形の情報機器に使えるかどうかは、コスト問題にかかっていると考えております。

これは同じく、MOS 形によるテレビ画像表示の例です。

次に、TFT 駆動形での表示例を示します。カラー表示もできます。

二端子構造の素子では、最近、MIM (Metal-Insulator-Metal) 素子というものが注目されております。タンタル電極とクロム電極の間にタンタルオキシサイドの絶縁膜を挟んだ構造の素子で、一種のバリスタ的な特性があります。このような素子と液晶とを組み合わせると図形表示を行った例がこれです。

以上、述べたスイッチマトリクス形について表示面積と表示画素数がどのような範囲にあるのかを、この図は示しています。MOS 形は高価であるが、解像度が高く、小形の端末に向いています。それから TFT 駆動形は比較的大きな表示デバイスまで対応できます。しかし小さなものもできます。将来的に、表示デバイスを大きくしようという意味では有利なもので、これから画素数がふえると同時に密度も上がってくると考えられます。

次に投写形の一例を簡単にご紹介したいと思えます。先ほど、温度を変えると相転移をおこす液晶について説明いたしました。それと同じ液晶材料を使う例です。液晶の加熱は近赤外線半導体レーザービームを照射することによって行います。最近の例ですと、32 個の半導体レーザーを平行に動作させ書き込みの速度を高めています。ビーム照射は光ファイバを介し液晶の面を機械的にスキャニングすることによって行います。半導体レーザーは一つが 10 ミリワット程度の出力のものですが、それを XY の方向 12.5 μm 程度のピッチになるように振り、書き込んでいくというものです。

これが表示された例ですが、液晶のデバイスそのものは 10 センチ角の大きさです。12.5 μm のピッチでレーザーダイオードで書き込んでいくわけですが、それを表示するときには 10 倍に投写するということで、1 m 角に投射して、8 本/mm の解像力を持つ表示ができるということでした。

この表示方式はまだスピードがおそく1秒間に62.5 cm] スキャンするといった程度で、この例ですと画素数が  $8,000 \times 8,000$  と表示力が上がるんですが、1枚の画を書くのに40秒ないし1分近くかかります。

液晶材料にはいろいろあります。たとえば、最近ですと強誘電液晶があります。これはスピードがかなり速く、たとえばレスポンスタイムが通常の液晶ですとどんなにやってもミリ秒のオーダーなんですが、強誘電液晶は  $10 \mu\text{s}$  あるいは  $\mu\text{s}$  になると言われています。ただまだ実験室的な段階とも言えます。この種のもので大きなパネルはできてないのですが、今後そういった例あるいは先ほどのパネル型のディスプレイに使われるという可能性がありますけれども、将来のりっぱな計算機をつくるという意味では表示デバイスは足を引っ張ってしまうような気がしてならないんです。けれども、まあ、CRTというりっぱなものがあるわけなんです、それに対抗すべくわれわれはパネル形というのをやっているわけです。あるいは将来もう少しそういう新しいシステムに使えるようなものを開発したことは考えております。現状はこんなことです。

以上簡単ですが、液晶関係について述べました。

司会 それでは大分時間を費やして申しわけありません。

討論する時間、予定ははっきりしてないんですが、この会場は幸いなことにエンドはありませんので、少し時間をいただきまして、フリーなディスカッションをさせていただきたいと思えます。

お聞きいただきましてわかりますように、非常に多岐にわたるまた大変に広いフィールドのテーマでありますので、若干整理をさせていただきたいと思えます。

最初に機能素子を中心にいろいろなディスカッションをお願いしたいと思うんですが、それからメモリなどということになります。

最初に岡部先生の方からお話しがありましたように将来の一つの大きい問題は、素子の大きさと熱の戦い。もちろんスピードの問題もありますけれども、結局のところ最終デバイスは超伝導素子にいかかなければならないんじゃないかという提言があったわけです。それに対するディフェンスをひとつ半導体側からお願ひしたいと思います。

西澤先生いかがでしょうか。

西澤 おっしゃるとおりで、雑音が少ない方がいい、ということだと思えますね。で、その点から言いますと、冷やしていくということは必然的に雑音を

減らすということになりますから、そういう意味でも冷やすメリットというのは出てくると思うんです。

ただですね、雑音というのは、これは私の考え方で言いますと、要するにできている素子のバラツキとレアリビリティというのもこれ一種の雑音であると等価的に換算できるわけですね。そういう意味で、超伝導素子が非常につくるたびに必ずピタリとすばらしい性能が出ると、不ぞろいが非常に少ない、ないしは使っていても変動要素が非常に少ないということまでくれば、半導体はあるいはしっぽを巻いて逃げていかなければいけないかもしれないわけですね(笑)。

ところが逆に申しますと、私はこれであまり超伝導の方に首を突っ込むことをしなかったわけですが、いま超伝導材料の大多数は多結晶体である。特に、多結晶体というのは結晶が切れ切れになってつながっているというよりははるかに複雑な特性を持っておりまして、粒界現象というのは大変異常なものがまだたくさんあるんじゃないかというように私は思うんです。

で、かつてIBMの人が言っておりましたが、「スイッチを入れて動くとするばらしい性能を示すけれども、スイッチを入れてみるまでは動くか動かないか見当がつかない」という話があったわけですね。いま残念ながら超伝導デバイスというのはそういう状態にあるんじゃないかと。それからポリクリスタルでございまして、切っていくときにやはりグリーンに対応した凸凹というのがかなり出てくるわけです。これは絶対出るとは決して申しませんが、そういう技術が現在非常に多いということです。その問題が克服されるということが条件ではないかというふうに思えます。

司会 安部さん、同じ問題についていかがでしょうか。

安部 HEMTは室温で動作するわけですがけれども、冷やせば性能が一層良くなっていきます。室温から77Kの液体窒素温度、さらに液体ヘリウム温度にしていくとますます性能が良くなっていくわけです。たとえば電子移動度は室温で  $8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  77Kで20万、さらに4.2Kで100万、また、光を当てますと200万まで到達することが確かめられています。電子移動度は、シリコンが大体室温で500、77Kに冷やしまして2千くらいですから、2桁以上高いわけです。また、HEMTではほとんど冷やしても通常の半導体におけるように電子がトラップされることがなく、4.2Kでも電子が消滅しませんので、将来の極低温半導体デバイスの領域を築いていける可能性を秘めてい

るわけです。現状では実用性の高い 77 K くらいを目標にしているわけです。

ところが、いいことばかりではないと思っています。シリコンは GaAs に比べて、電子が重いですが、一方では、このことは電子を単位体積当たりになくさん存在させることができることを意味します。電流というのは電子移動度と電子数に比例します。シリコンの方が電子数をとれるわけです。電子移動度と電子数の積でどちらのメリットを生かせるかということが今後の問題じゃないかと。

もう一つ欠点をあげると、冷やせばいいというのは確かにあるわけですが、熱雑音はどんどん減っていくとして、たとえば物性に起因したデメリットがあります。GaAs の場合にはバンド構造に起因しまして、たとえば熱雑音がなくなっても電子の質量が重い領域と軽い領域というように違う領域が同一実空間内に存在しまして、トランスファデヒュージョンといいます。そういう新たな拡散メカニズムが雑音に関係してくることも考えられます。現状では、冷やしてでも使いたくなるといったパフォーマンスの良さ、システムのトータル・レベリングが必要になっていくんじゃないかと思っておりますが、魅力は絶大です。

一言で言いますと、HEMT は新しいデバイスですが、もとはといえば半導体であるため、従来の半導体技術の延長線上のアプローチで一応はある点までは開発を進めていくことができると思います。この点が非常に有利であると感じております。

司会 ある点といいますのを、具体的にどのくらいのスピードでどのくらいのインテグレーションができるかという点についてとしていかがでしょうか。

安部 データの蓄積がまだ少ないので予測は難しい面があるんですが、100 K ゲートくらいがどうかというのが検討に値すると思います。現状では 10 K ゲート前後のロジックとか、そういったところが一つのターゲットになるのではないかと思っております。

司会 岡部先生、ただいまの件についてご意見をまた超微細加工の将来性の問題も含めまして、もう一回ジョセフソンの将来性について夢を語るという立場からお話をしていきたいと思うんですが。

岡部 夢のある方の話は結構でいくらでもできるんですが(笑) いまのお二人のお話、私も半導体を少しいったこともありますのでよくわかりまして、おっしゃるとおりでございまして、現在ジョセフソンジャクソンが唯一の解と申ししたのは、低温で動くとい

う条件でジョセフソンの方がまだ可能性が高いという意味で唯一でして、ジョセフソンで絶対できるというわけではないんですね。それは非常に多くの問題がございまして、逆説的な言い方になるんですが、ジョセフソンの解くべき問題というのはまだかなり山積みでございまして、その意味では、いまの半導体の技術というのは大体技術の予測が立てやすいと思います。ジョセフソンの方はまだ立てられない部分があつてふんあるわけです。ですから、やはりあと5年くらいジタバタさせていただいてですね、本当にそれが解けるものかを確認するまでは本当は大見得を切れないですけれども、確かに少なくとも周囲温度は下げざるを得なくなってくるだろうということは事実ですから、半導体は半導体で、やはりいまの技術をどんどん進めることによっておそらく低温化というのが進んでいくと思います。ジョセフソンは最初から低温ですね。先ほど申し上げましたのは、低温がいかに悪いように皆さんよく言われることがありますので、いや、低温は本質的なんですよ、ということを上げなかったということでございまして、まあ、先ほどの言いわけについてはそういうことでございまして。

それから将来につきましては、技術というのは本当にわからないところがございまして、われわれはできると信じてやってるんですがどうかでもすごい壁があつてだめになってしまうかもしれないんですね。ですから、現状では少なくとも、従事している人はかなり希望を持ってやってるのであるということにしたいなと思います。

司会 ただいまの討論につきまして何かフロアの方からコメントあるいはご質問でも結構でございますがございせんでしょうか。

司会 それでは今度は光の方の問題に移ってまいりたいと思いますが、当然、ハイスピードということを狙えば光素子というのは一つのターゲットというふうにもなるわけです。それにつきまして阪口さんからいろいろとお話しがございましたが、一つの夢の上でですね、果たして将来は全部光素子になっちゃうよという話になるのか、そうではないよ、まだまだそのような状況ではないのか、その辺のお話をお願いしたいと思いますが。

阪口 まあ、どれくらいの期間によるわけですが、少なくとも10年以内というような観点でいきますと、光ですべてが動くというのはちやうど言うだけの根拠がないんじゃないかという感じがするんです。で

すから、どういふ点にメリットを感じるかということになるんじゃないかと思うんです。やはり最近いろいろな並列処理ということで、並列プロセッサ間のネットワークというんですか、まあルータというような言い方をしているのかもしれませんが、そういうようなネットワークの中にやはり光を入れていくというのがやはり光通信の流れから考えて一番良いのではないかと考えます。

そのための光の発光受光のデバイスなんです、そのスピードをリミットしているのはキャリア寿命といいますが、要するに電流を流すことによって反転分布をつくって発振させるという、そのキャリアの寿命の問題が出てまいります。これは 100 ps オーダであるということはまず確められておまして、その壁をどう破るかということが一つの問題になっております。

ちょっと物理的な話になるかもしれませんが、最近マルチカンタムウェル (MQW) というような非常に薄い層の多層構造で非線形効果を出してやろうということで、この春の学会でたとえば 100 ps 以下の光の変調ができるというような報告がございます。そうなりますと、半導体レーザというのはいわゆる電源に相当する光源であるという物の見方で、その間にいろんなロジックをやっていくと、あるいはアンプもやっていくということが考えられます。そういうデバイスを考えていけば 100 ps を切れるかもしれないと考えます。それがどこまでいくのかというはそれはよくわかりませんが、そういう芽の提案があるという段階じゃないかと思えます。そういうものが本当にいろんな、アンプとかインバーダとかそういうデバイスができるようになって初めてオール光という議論が始まるんじゃないかというふうに考えております。

司会 ありがとうございます。

いかがでしょうか。光素子に関してのいろいろコメントあるいはご質問、ございませんか。

西澤 私も将来問題としてはやはり光も十分に検討の価値があると思うんですね。要するに、小さくしなければどうしてもスピード的に追いつかないと、それから先ほど出ましたインタコネクションだけを光でやるというのは確かに重要な考え方だと思うんですが、そのコンバージョンのときにタイムロスが非常に多いんですね。そうなりますと、よっぽどのときでないインタコネクションにもあまり使えないものじゃないのではないかという気がするわけです。

基本的に申しますとやはり単位長を走る間のゲイン

がうんと上がることが、やはり小さなレーザができるための基本要件ではないかと思うんですね。そういう意味では、やはり材料的にもう一度むけないといひものが出てこないし、またそれがどこまで行くかという見極めをつけるということがオフチャルコンピュータの将来の見通しにつながるのではないかというふうに考えております。素人としては。

司会 一つは、光を電気変換して論理をやるんだというのはいずれいんじゃないかと思う。光自体、つまり何か新しい現象を見つけて、ロジックができないと半導体に太刀打ちできないんじゃないだろうかという気がするんですがいかがでしょうか。

阪口 おっしゃるとおりかもしれません。いまのところは光でいろんなことができるといういままでもコントロールは全部電気で行っているという状態ですから、電流を流してどうのこうのという現象だけではなくハイスピード化はむずかしいなという感じはしております。そういう意味で、一度むけなければいけないということ言うならば MQW で非線形性を非常に高くすることが一つの芽になってくれればいいがなあという感じでおります。

司会 何か、光の関係でご質問ございませんか。

では、続きまして今度はメモリの関係の方にまいります。

従来からマグネと半導体関係者との間には熾烈な技術の競争があったわけですが、半導体のグループから見るときに、いわゆるメモリに関する将来性はいかがでしょうか。

安部 メモリの容量に関してはシリコンが絶対的に強いと感じているんですが、それぞれの分担があると考えております。高速メモリというあたりは、望みがあるのではないかと思います。現状では、将来の微細加工と物性の、特に材料面の進展が重要であるかと思えます。高速メモリ、特に室温から将来の低温ということを含めて HEMT あたりは本物になっていくんじゃないかというように感じます。

西澤 何か安部さんは HEMT 万能のようでございますから、少し変わった観点から言いますと、やはり 1メガビットはそろそろ商品化ということが目に見えてきておるわけですね。で、初めは 1メガビットなんていうのは絶対にできないんだというふうな話がありました。で、まあ大体最近の様子を見ますと、どうもあと 2 回くらいはつまり 4メガ 16メガビットくらいまではどうも IC 従来方針でやれるんじゃないかと

というような感じが大体するんじゃないかと思うんです。そうなりますと、何か大分前に計算をなさって、これは私も言い出しっぺですが、レコードが何枚かICに入るという話を聞いたんですが、これはどうも私には計算がよくわからないんですが、しかし事務用のメモリ程度の集積回路ということは考えられるわけございまして、これはモータが要りませんので、電気スキャンでやれるという点から考えますと、小型のあまり音質を問題にしない程度の記録機器でございましたならばシリコンチップで録音するという事は現実の問題になっているんじゃないかというように考えます。すでにある会社では、チップを入れて時計に短時間のレコーディングをなさった所があるようでございますけれども、ああいう傾向というのはおそらくだんだんに出ていくんじゃないかということで、将来、ページメモリくらいのことはマグネから頂だいすることになるんじゃないかという気がいたしております。

司会 さっき角田さんに見せていただきましたメモリの階層性についてのスライドがありましたね。いわゆるキャッシュメモリから一番低いレベルのメモリまでいろんな階層があるわけですけども、光ディスクというのは一体将来どの辺まで領域を広げられるのだろうか。さっきの話ではきわめて内輪に、垂直磁化によるメモリ領域はカバーできるというようなお話があったわけでありましてけれども、その先は可能性はあるんでしょうか。上の方ですが……。

角田 その辺は非常に謙虚に考えております。

いまの磁気ディスクとその上のところの階層というのはものすごいギャップがあるわけですね。そのところを多少食い込んだとしてもあまり意味がないんじゃないかと思っております。光としては、当面考えているのはせいぜい磁気ディスクの置き換えで、むしろ本命の領域は底辺の方にあるんじゃないかと考えています。可搬性があるとか、オートマウントができるなどという特徴はいままでの計算システムから見たときにメモリとして相当不足している領域ですから、その所でなんとか生きていくというのが大事じゃないかと考えております。

中村 先ほど西澤先生がおっしゃったように、やはり半導体の領域との競合というのはないのではないかと思います。やはりむしろ光ディスクとの間でどこをどう使うかということが問題になってくるのではないかなというような感じがします。磁気記録というのは、昔から情報をとっておくというような使い方をしておりますし、これからもそういう要求が強いらろうと思

います。たとえば病院で、レントゲン写真が収容しきれないくらいあふれちゃうので、これを何とかしたい。一つの方法として、それを光ディスクによるというシステムもあるけれど、個人ベースでもう少し簡単に使えるものとして、垂直磁気記録というものがもうひとつ注目されているわけです。

ただ、先ほど言いましたように、媒体が一番かなめなんです。信頼性のある媒体がいつできるか、これが解決されれば、媒体の製造工程としては光ディスクをつくるよりもかなり大量に、安く供給できるようになります。

先ほどごらんに入れるのを忘れましたが、普通のフロッピーディスクケースの中に入れてある垂直媒体は、プラスチックベース上の金属膜ですのでこれをテープ状にしようか、ディスク状にしようか、カード状にしようか、非常に体積当たりの記録容量は大きくなります。ですから狭い倉庫でもたくさんの情報が入られるわけで、この辺が最も期待されています。磁性材料は従来から高い信頼性をもっておりますので、今後も光ディスクと違った分野で、ますます使われていくのではないかと期待しております。

司会 ただいまのお話を総合いたしますと、半導体からマグネ、光ディスク、すべて共存共栄できるという状況のようなお話なんですね。

では今度は堀さんをお願いしたいんですが、いわゆる液晶の関係というのは将来、記憶系に対して何か意味を持つような状況がつけられるか。さっきかなり悲観的な話だったわけですが、その辺いかがでしょうか。

堀 そうですね。先ほどいわゆるディスプレイという立場でお話ししたんですが、もう一つ、ソフトコピーといいますか、ペーパーレスの時代ということで先ほどご紹介いたしましたメモリ形のディスプレイを記憶系の一種と考えるならばやっていく意味があるんじゃないかとは考えておりますが。

司会 あと、一つは問題提起になるんですが、最初のときにお話ししましたように、実はデバイス関係のグループといわゆるシステム関係のグループの間の情報のコミュニケーションがきわめて悪い。最初の西澤先生の特別講演のお話の中にあっと思うんですが、たとえばCADシステムについて考えたとき、日本では全部が外国製であると。つまり半導体工業の中心的な部分が全部外国からの輸入では非常に困ることになります。考えてみますとそれはシステム屋に対する一つの猛省をうながす問題じゃないだろうかと思うんですね。

で、こういう問題をやはりわれわれは今後考えていかなければだめでしょう。日本の半導体工業はきわめて隆盛でありますけれども、果して 10 年先はということに関してはきわめて問題があるのではないかと考えております。そういう問題をこれからいかにしたらいいか、これが一つの大きいテーマだと思いますがいかがでしょうか。

**司会** それではデバイス屋さんの方からシステム屋に対しての何か強い要望みたいなものがございましたら一言ずつ簡単におっしゃっていただいで、きょうの幕を閉じたいと思いますが……。

**西澤** 平素ソフト屋さんの方がハードのことに興味を持ってくださらないということを非常に残念に思っておったわけですが、野口教授がそういうことが非常に大事だと思われてるのを聞きまして、これはもうすべて安心して大丈夫だと思ったわけでございます。

**安部** デバイスがどういった領域に使われるのが一番マッチングがとれているかということデバイサイドとして一番知りたいし、その辺はシステムサイドとしても密接なコンタクトを望んでいると思います。現状でたとえば、シリコンと GaAs などいろいろありまして競争するわけですが、ある開発段階では競合するとして、ファイナルな状態でどういったところに落ちつくかということを見極めることが重要であると思います。そのためには、デバイス開発のスタートのレベルからフリーにディスカッションしていくとともに、お互いの柔軟な発想が非常に能率のよい開発につながるんじゃないかと思えます。

**岡部** 先ほど自分の話のときにも申し上げたのですが、ジョセフソンみたいになんか変わった素子になりますと、CPU をどうやってつくったらいいかまったくわれわれには見当がつかないわけですね。ともかくこれは最低限のロジックをやることはわかっている。CPU も原理的に作れることもわかっているけれど、具体的にどう組み合わせたらどこがネックになるかまったくわからないんですが、そのくらいの段階ではシステム屋さんほどなたも関与なされない。できればそういう冒険的なところにシステム屋さんもぜひ入っていただいで、もうわれわれが全部やって、CPU までつくってみせるまで動きませんよなんていう態度ではないことをお願いしたい。できるだけ早いうちに救済措置をとっていただければ非常にありがたいと思っております。

**阪口** 光についてはもうちょっとベーシックなレベルかと思うんですが、いまトランジスタがようやく使えるような時代と同一時代になったんじゃないかと考

えます。要するに 1960 年代のころは、トランジスタを使っているいろんなコンピュータやプロセッサをおつくりになった方は、いまもうむしろ現役じゃなくて、いま現役の方は 256 K IC を持ってきているいろんなツールを組み合わせると何か CPU をつくっていらっしゃる。その点、光というのは本当にトランジスタの時代なものですから、そこまで手を伸ばしていただかないとなかなかわれわれと会話ができないというような時代なんです。ぜひそういう方が一人でも二人でも多く出ていただくと、一緒に何か新しいことを考えていくことができるんじゃないかということで、ぜひそういう方があらわれていただきたいということでございます。

**中村** 私にはちょっとむずかしい質問ですが、新しい磁気記録方式を考えて、装置を試作していると同時に、実はユーザでもあるわけで、現在、われわれのところではわからないことの一つは、どういう記録装置が当面要求されているかという点です。記録容量の大きな媒体も、装置もできそう。一方計算機がある。それらをどういう規模のシステムとしてつないだらいいか、どの程度の記録装置を想定し、インターフェースをどうするのか、記録密度が上がり、転送レートを速くできる。すでにあるインターフェースが流用できるのか、新しい考え方でつくらなければいけないのか、その辺のところを教えてくださいと思っています。

**角田** デバイス屋さんから見るとシステム屋さんというのはクールな人が多くて、素性がはっきりするまでなかなか新しいデバイスを使ってくれようとしなないことが多い。今後、新しいデバイスを積極的に使い新しいシステムを築き上げて行くためにはもう少し本質を見極めたお互いのつき合い方みたいなものが非常に大事じゃないかというふうに思えます。

**堀** 先ほど安部さんあるいは岡部先生の方からもお話があったようで、同じような話になるかと思いますが、デバイスとして完成された時点で取り扱うということではなくて、いろいろ特性的にまだ問題があるというような状態ではあっても、もう少し前から一緒につき合ってやっていたら、システムとして早くできるんじゃないかというような気がいたします。新しいデバイスは、抵抗やコンデンサをつくるように簡単にはいかないということをご理解いただきたいと思えます。

**司会** 貴重なご意見ありがとうございました。

司会の不手際で 30 分ほど延びてしまいましたが、以上で終了いたしたいと思います。

改めてパネリストおよび参加者の皆様に感謝をしたいと思います。