展望

磁気バブル

磁気バブルメモリの展望

Outline of Magnetic Bubble Memory

桜井良文

大阪大学

Yoshifumi Sakurai Osaka University

Magnetic bubble played an important role in the field of "Magnetics." This technology was born from the combination of magnetic films with perpendicular magnetization and control of domain propagation. Bobeck presented the first paper in INTERMAG conference in 1968, and now above 50 papers on the magnetic bubble are presented in INTERMAG conference every year.

In conventional magnetic bubble devices, permalloy patterns, such as T bars, chevrons and half-discs, are used and contiguous disc devices using ion implantation are developing in bubble devices with below 1 μm diameters.

Bubble lattice devices and current access devices, such as a dual conductor system, are also hopeful.

Magnetic bubbles are higher bit density memory compared with semiconductor memory, but their cost is a little expensive. Efforts must be done in the future in cost reduction and improvement in switching speed.

1. 磁気工学 (Magnetics) と磁気バブル

磁気バブルはここ数年で急激な発展を遂げたが、このデバイスが磁気工学の歴史の中で演じた役割は極めて大きい。1967年に Bobeck が磁気バブルを発明した頃は電子計算機が大規模化をしている最中であり、コンピュータメモリに対する要求も高速かつ小形化という点で激しい競争に突入していた。それまで使われてきたフェライトコアメモリはもう小形化の極限に達しており磁性薄膜としてパーマロイメモリが研究開発されてきていたが、これも生産技術の点で、はかばかしく進まなかった。パーマロイ薄膜メモリの研究中に確立された磁気光学による磁区の観測技術はやがて孤立磁区のパルスによる駆動に成長し、磁区で1ビットの情報を表わす方式は多くの人々によって試みられ、製品としては Spain の DTPL (Domain Tip Propagation Logic) や BASF の静止ディ

スクメモリが新規性をもつものとしてあらわれた。図1は BASF の静止パーマロイディスクの写真であるが、4チャンネルのスパイラル状のソフト膜の中を各16Kビットのパーマロイ磁区が動いてゆくものである。

これより前に高密度メモリの実現にキュリー点を利用して微小領域の磁化反転を行なうことが提案され、光磁気読出しメモリが研究されていたが、MnBi 膜によってその優れた特性が示された。この場合、MnBi 膜の膜面に垂直に磁化をもつ性質が高密度につながることに注目され、その後、垂直磁化膜としていんなものが探された。オルソフェライトもその一つであるが、この結晶膜では磁壁の保磁力がニュークリエーション磁界にくらべて極端に小さいことから上述のパーマロイ静止ディスクより優れていることが認められ、磁気バブルが誕生するに至った。

磁気バブルは垂直磁化膜に生ずる円筒状磁区であるがその特性を理解するには磁壁の構造、さらにはスピンドイナミクスが重要であり、その意味では磁気物性の知識が不可欠となる。それまでのいわゆるパワーマグネティクスでは、磁束、磁界、透磁率というような物理現象を代表するマクロな変数がとり扱われていたが、次第にミクロな構造に入りこまなければ技術が進まないように

図1 BASF のパーマロイ静止ディスクメモリ。
Permalloy static disc.

表1 インターマグにおける研究発表の動向. Number of representations in INTERMAG Conference.

開催年次	'63	'64	'65	'66	'67	'68	'69	'70	'71	'72	'73	'74	'75	'76	'77	'78	'79	'80	'81
開催地	ワシントン	ワシントン	ワシントン	シユツガルツト	ワシントン	ワシントン	アムステルダム	ワシントン	デンバー	京 都	ワシントン	トロント	ロンドン	ピッツバーグ	ロスアンゼルス	フロリダ	ニューヨーク	ボストン	グルノーブル
1 一般			4	4	2	4	1	2	1	2	2	3		4		4	4		
2 材料 (金属物理)	5	19																	
3 パワーマグネティクス (磁気増幅器, 論理を含む)	48	31	41	26	30	20	16	5	15	22	16	50	56	35	30	38	55	49	86
4 メモリ (薄膜, フェライトなど) (ドメイン, バブル)	30	25 (25)	37 (37)	39 (39)	30 (30)	58 (58)	75 (75)	65 (50)	87 (52)	82 (45)	69 (37)	86 (29)	61 (19)	62 (1)	66 (6)	54 (20)	82 (23)	57 (12)	53 (3)
5 磁気記録	9	7	11		10	11	40	30	36	44	18	39	42	31	34	53	38	41	75
6 磁気光学				9	6	10	8	10	12	13	15	7	10		7	10	12	10	15
7 超電導		9	7	21	8	12	9			10	6	18	10	12	9	6	3	6	11
8 マイクロウェーブ			5	10	9	11	24	4	12	20	7	6	16	10	12	20	12	20	14
9 測定							11	8	12	16	6	3	6	10	9	8	10	10	12
10 アモルファス													7	45	21	35	61	30	47
11 bio-mag.													1			7		8	
12 磁気分離													20	8	9	15	14	12	28
13 その他							17	11		5	11	11	11	3	8	17	4	5	3
合 計	92	91	105	153	108	145	229	162	213	268	170	246	283	331	242	322	410	277	389

なって磁気における基礎と応用とがより緊密に手をつなぐようになり, アメリカの I. E. E. E. の中に Magnetics Society が生まれ, 日本にも本学会が誕生した.

この磁気バブルをとりまく磁気工学の歴史は国際会議における研究発表を年代を追って調べると良くわかる.

表1はインターマグについて第1回から今年までの移りかわりを示したもので, はじめて磁気バブルがこの会議で発表されたのが1968年であり, 翌69年には多くの人々の注目を集めた. この表では1970年から別欄に示してあるが, 最近ではメモリの大部分を占めていることがわかる. インターマグは磁気的应用についての国際会議であるから, 磁性材料や磁気物性よりもパワーマグネティクスやメモリ, 記録などが主流であるが, 先に述べた基礎と応用の接近により, 最近では磁気物性に近い論文が増えてきた. この数年における会議の3本柱は磁気記録, 磁気バブル, アモルファス磁性体であるが, いずれの分野においても日本の研究の伸びは著しい. 特に磁気バブルではデバイス化は日本が最も進んでしまったようで, 本年のインターマグでもこの点が目立っていた. 最近における進歩については本特集にくわしく述べられているが, 今後の問題はむしろその応用面にある. 他のメモリとの競争は(とくに半導体 MOS メモリとの)ますます激しくなっていくので, 小形化と低価格の点で一層の努力が必要とされる.

2. メモリデバイスと磁気バブル

メモリデバイスはコンピュータの発達に伴って急激に需要が伸びているが, 遅いメモリ(外部メモリ)である磁気テープを除くと大別して2つのカテゴリーに分けられる. 第1はフェライトコアや半導体メモリのようなランダムアクセスメモリ(RAM)である. これは高速読出しのため, どこにある情報でも同じ速度で読出せるように組まれたもので, 次世代メモリといわれる高速のジョセフソン接合素子(Josephson junction)メモリなどもこれに入る. 第2は循環メモリで, 初期のコンピュータでは金属線や水銀などの中を伝播する音波にデジタル情報をのせ, その出力を電気シグナルに変えて入力に戻す方式が使われた. その後, 磁気ドラムや磁気ディスクのように情報をもつ媒体を機械的に回転させる方式に移ったが, この方式では情報の一循環する時間が遅れとして残るので, 高速化に問題がある.

情報に微小磁区を用いるようになった DTPL では, 磁区を磁界によって媒体中を動かすので, 上の2つの循環方式の中間に位置するものであるが, 利点としては媒体は静止したままであることと, 停電のような場合にも情報が消えないことがあげられる. しかし, DTPL などでは磁化は膜面内に存在するので, 磁区の寸法を小さくしてゆくと反磁界のために磁区が消滅し, 高密度には不適である. これに対し垂直磁化膜では, 高密度に磁区を作

表2 磁気バブルの歴史. Historical view of magnetic bubble.

年次	材	料	回	路	デ	バ	イ	ス
'67	オルソフェライト							
'68								
'69	材料の条件, 温度特性	Perneski: Tバー						
'70	日電の Fl. Zone 法, ガーネット出現				RDM ($\text{Sm}_{0.55}\text{Tb}_{0.45}\text{FeO}_3$)			
'71	LPE, CVD 法	USSR 法			同上 (マージン : ロジック 速度)			
'72	ガーネット定着 Capped Film	各種検出器 数珠形転送回路			磁気光学の利用 (ディスプレイ パターン回路)			
'73	アモルファス膜 CaGe 系ガーネット	ダラー・サイン T・G Xバー, 平行バー 磁界アクセス法定着			$13^3 \sim 10^4$ b チップデザイン Overlay 作成法 モジュール化			
'74	GGG 基板の広面積化 サブマイクロバブル材料 3元アモルファス膜 High- <i>g</i> ガーネット	Lithography 技術によるパターン 作成 Time Slot Interchanger			0.64 Mb メモリ 8 Kb アモルファスバブルメモリ BLD バブル IC メモリ			
'75	Hydrothermal Epitaxy 法 BLD 用 Capped Film	数珠形転送回路 Channel Bar 回路			チップコスト チップテストニング 信頼性 アモルファスバブル膜製法			
'76		ハーフディスク 非対称シェブロン			POS-8 プレーナ技術			
'77	GdLuFeAlMn ガーネット (高移動度)	コンティギュアスディスク (CD) 導体とパーマロイの組合せ			27 Mb 電子交換機			
'78					1 Mb メモリ 16 Mb メモリ Single Level Mask 技術			
'79		Dual Conductor Complementary Permalloy			1 Mb チップ 15 Kb BLD			
'80	YSmLuFeAlSc ガーネット (サブマイクロバブル)				イオン打込 CD デバイス (1 μm バブル 4 μm 周期)			

る方がエネルギー的に安定になるので, 磁気バブルが有利となる. この垂直磁化膜という概念は MnBi 以前にはあまり一般的ではなかったが, 磁気バブルによって注目されるようになり, 最近では磁気記録の分野でも CoCr 膜などの研究が盛んになっている.

磁気バブルをその誕生から最近に至るまで歴史的に追ってみると表2に示したように短い期間に幾多の変化があることがわかる. これは最近の半導体技術においても同じであるが, この裏には多くの研究者の努力がある. 現在, 製品として出まわっている 3 ~ 5 μm 径のバブルは CaGe 系ガーネットを用いているが, 希土類元素の種類を変えて 0.5 ~ 1 μm とバブル径の小さいものへと移っている. 一時注目された希土類鉄族のアモルファス膜は温度特性の悪いことから見送られたが, バブル材料をもっと廉価なものにするという課題は依然として残されている. 回路については初期の T バーパターンから非対称シェブロンへと変化し, 2 μm 径のバブルは専らこれが用いられている. 現在, 各社が競争しているのは conti-

guous disk (C.D.) であるが, 昨年の ICMB-4 (第4回国際磁気バブル会議) から今年のインターマグ (グルノーブル) にかけては IBM と日立, 富士通の3社が 1 μm 径 (4 μm 周期) のものを発表し, しのぎをけずっている. これに対し 1979 年 Bobeck によって発表された dual conductor system は高速性における優位は認められてはいるが, 発熱などの問題でまだ実用化には至っていない. チップでは各社とも 256 Kb から 1 Mb チップに移ろうとしているが, 一部には 4 Mb チップの動きもあらわれており, 予断は許さない. 回路構成は大体メジャー・マイナーループ構成であるが, バブルのトランスファ回路などについてはまだ改良中である.

ハードバブルの出現以来, バブル磁壁中におけるスピン構造について詳しく調べられ, ブロッホ・ウォール, ブロッホ・ラインなどがバブルの動特性と密接に結びついていることがわかった. これを高密度メモリに利用しようとして“バブルラティス”メモリが開発されたが, C.D. をしのぐには至っていない. このように技術が激

物	性	そ	の	他
				BSTJ Oct. Bobeck インターマガで発表 GdIG の Lattice
速度の飽和 (Hexaferrite)				
同上 (ガーネット)				Bubble Lattice
ガーネットの異方性				日電の Bubble Lattice
ハードバブル				
磁壁速度 (Dynamics)				
ハードバブルと B. L.				トポロジカルスイッチング
アモルファス膜の異方性				
Vella-Coleiro の実験				
動特性の観測				サンフランシスコ・3M
GdCo 膜の Hall 効果				第1回 ICMB
B.L. の観察 (電顕)				
3層ガーネット				
転送動特性の解析				アモルファス膜の熱磁気書き込み
バブルの慣性と磁壁構造				
3元 (Amorphous) 膜の Hall Effect				
Amorphous 物性				
Cross Tie Memory				第2回 ICMB
イオン打込バブルの構造、特性				
イオン打込膜での チャージドウォール				
CD バブル転送の方位依存性				
$S = 1/2$, 1バブルの安定性				第3回 ICMB
				第4回 ICMB

しく変わっていることと、価格における半導体メモリとの競合のため、磁気バブルメモリは技術的に固定化したとはいえず、今後の動きが注目される。

3. これからの磁気バブル

磁気バブルは現在、電子交換用のファイルメモリや N.C. (数値制御) 工作機械、ターミナル機器などのメモリとして実用化されているが、他のメモリデバイスも性能の向上に力をそそいでいるのでその将来は楽観を許さない。現在では、高速度化、低価格化においては半導体 MOS メモリが一步先んじており、生きのびるためには次の3点における改良が必要とされる。(1)高密度、(2)低価格、(3)高速度動作、である。特に重要なのは(1)の高密度化で、これが達せられるとそれに伴って(2)、(3)の点も機能向上が行なわれるからである。

まず高密度化を実現するにはバブルの径を小さくする必要があるが、図2に示すように $1\mu\text{m}$ 以下の径のバブルをもつガーネット材料はすでにいくつか見つけられて

図2 特性長 l , バブル径 d と材料の $4\pi M_s$ との関係。
Garnet materials with various bubble diameter.

図3 磁気バブルメモリの記憶密度。
Pattern line width vs memory density in magnetic bubble.

おり、これに伴う諸問題 (たとえば $4\pi M_s$ の増加) についても検討が行なわれている。しかし、ガーネット材料については価格の点において半導体 (Si) にくらべると安くすることが困難という欠点があり、量産可能な材料を探すことが望まれる。高密度化のもう一つの問題は構造の微細化である。Tバーや非対称シェブロン (ハーフディスク) のようなパーマロイパターンを用いた磁界駆動法はすでに限界にきているので、 $2\mu\text{m}$ 以下のバブル径ではイオン・インプランテーションによる contiguous disk (C.D.) が主流になりつつある。この場合はパターンに間隙のないことに加えてバブル径をパターン寸法よりも小さくすることができるので、同じリソグラフィ技術を用いてもバブル径としては遙かに小さいものを使うことができる。

図4
バブルの
推移。
(Bobeck)

図3はパターン線幅を同じにした場合におけるハーフディスク、バブルラティス、コンティギェアスディスク・デバイスにおいて達しうる記憶密度を比較したものであるが、これによってもC.D.が最も有利なことがわかる。パターンの微細加工(リソグラフィ)については光リソグラフィでは $1\mu\text{m}$ が限度であるので、X線や電子線を用いる方法に移りつつあるが、この超微細構造化については半導体技術も同じような立場にあり、加工層数においてはバブルの方が少なくすむので、この点では有利といえる。ただ、現在の寸法よりさらに微細にした場合、いわゆるサイズ効果のようなものが生じ、特にス

ピン間の相互作用がデバイスの動作を制限するようなことも考えられるので、多層膜などで研究されているような問題はさらに重要度を高めることになろう。本誌の前号に述べたような立体構造デバイスについても考えておく必要がある。

図4はBobeckが3年前にたてた磁気バブルの将来像であるが、今になるとこの予想は少し楽観すぎるようである。半導体メモリの方はシリコンチップ上のゲート数が年に倍ずつに増えていることとくらべると、バブルは少し苦しいといわねばなるまい。

動作速度については磁界駆動では1MHzが限界といわれるが、dual conductor systemの発表によってMHzの壁は破られた。しかし、半導体メモリと競争することは到底望めないとすれば、当分は今の性能でゆくのが良いと思われる。ただ、価格の問題については最も厳しい条件下におかれているだけに、材料の問題も含めて何とかしなければならぬ。

以上のように見てくると、やはりバブルメモリはバブルメモリとしての長所を使うような応用を開拓してゆくのが最も大切であり、不揮発性メモリが必要な分野は至る所に存在する。コンピュータはもとよりわれわれの身近な所にメモリの使用が急激している昨今、磁気バブルの応用分野は増える一方で、これにこたえる技術を開発することはわれわれの任務といわねばなるまい。

展望

磁気バブル

イオン注入バブル素子 Ion-Implanted Bubble Devices

P. I. ボニーハード ベル研究所
P. I. Bonyhard Bell Laboratories

Magnetic bubble memory technology has reached a level of maturity where it is appropriate, in the opinion of many of those working in this area, to give serious attention to a some new, second-generation version of the technology. The new version of most widespread interest at present is the one that uses ion-implanted patterns, as opposed to the conventional permalloy patterns, to propagate bubbles. This review is intended to assist with the assessment of the ion-implanted bubble technology.

1. 序 論

磁気バブルメモリが完成の域に入った現在、今後は新しい第二世代の技術に真剣に注目するのが当を得ているとするのがこの分野の研究に従事する人の大方の意見であると思われる。現在、最も広く興味を集めている新しい技術は、バブルの転送にこれまでのパーマロイパターンを用いる代わりにイオン注入パターンを用いるものである。ここではこれまでのイオン注入バブル技術の研究を顧みて、この新しい技術の評価するための一助としたと思う。またここでは特に量産を指向した素子技術に