

특집: 磁氣情報記錄材料

자기 버블 및 수직 블로흐 磁線 기억 소자 재료

조 순 철

(숭실대학교 전자공학과 조교수)

I. 서 론

자기 버블 기억 소자 (magnetic bubble memory device)¹⁾는 전 전자식 기억소자로 비 휘발성 (non-volatile)인 특징을 가지고 있다. 따라서 기존의 자기 기억장치와는 달리 기계적인 부품 (대표적으로 모터)을 포함하지 않으므로 고장의 위험이 거의 없어, 환경적인 악조건하에서나, 고신뢰도를 요구하는 분야에서 그 응용범위를 확대하여 나가고 있다. 현재까지의 대표적인 응용분야는 전자 교환장치, 공작기계 수치제어, 공장 자동화, 항공 우주 분야 등이다. 버블 소자는 반도체 기억 소자와 거의 비슷한 방법으로 생산되며 현재 4M bit 칩이 공급되고 있다. 수직 블로흐 磁線 (Vertical Bloch Line: VBL) 기억소자²⁾는 버블 소자로부터 발전된 새로운 기억 소자로 자기 버블의 자벽 (magnetic domain wall)에 존재하는 VBL 쌍 (pair)을 기억 단위로 사용함으로써, 자기 버블 자체를 기억 단위로 사용하는 버블 소자보다 기억밀도를 크게 신장시킨 소자이다. 현재 일본, 미국, 유럽 각국의 연구실에서 활발히 연구되고 있으며, 궁극적으로 1 Gbit/cm²의 기억밀도를 가능케할 것으로 기대되고 있다.

현재, 이러한 자기 버블 및 VBL 기억 소자의 재료로는 자기 가넷 (magnetic garnet)이

유일하게 사용되고 있으며, 비자성 가넷 기판 위에 자기 가넷 박막을 액상 성장법 (liquid phase epitaxy: LPE)으로 성장시키는 방법이 일반적으로 채택되고 있다.¹⁾ 본 논문에서는 자기 버블 및 VBL 기억 소자의 동작 원리를 간단히 살펴 본 후, 가넷을 포함한 소자 재료로 사용될 수 있는 물질을 고찰해 보고자 한다. 다음 현재 이들 소자의 재료로 사용되고 있는 자기 가넷 박막의 설계 방법과 제조 방법을 논하자 한다.

II. 자기 버블 및 수직 블로흐 磁線 기억 소자

현재 시판되는 버블 소자는 자기 가넷 박막 위에 그림 1에 나타낸 바와 같은 퍼멀로이 패턴을 반도체 소자 제조공정에서 사용되는 사진식각 방법에 의해 제조하여 만들어진다.³⁾ 자기 버블은 원통형의 자구 (magnetic domain)로서 박막면에 수직으로 자화되어 있다. 이러한 버블을 유지하기 위해서는 버블의 자화와 반대 방향의 외부자계가 인가 되어야만 한다. 또한 기억 소자로서 사용되기 위해서는 정보를 기억, 재생시키기 위해 버블을 이동시켜야 하며, 그림 1은 그 이동 방법을 나타낸다. 즉 박막면에 평행인 회전 자계를 인가하면 퍼멀

로이 패턴에 자극 (magnetic pole) 이 발생하며, 버블은 자극에 이끌리게 된다. 회전 자계가 회전함에 따라, 자극 (그림 1 에서 +자극) 이 패턴을 따라 움직이며 (그림 2 에서 오른쪽으로), 이와 함께 버블도 움직이게 된다. 이와 같은 퍼멀로이 버블 소자는 4 Mbit 칩 이상으로 집적화 시키기가 어려우므로 퍼멀로이 패턴 대신 이온 주입 패턴을 이용한 새로운 버블소자⁴⁾가 16 Mbit 칩용으로 개발되고 있다.

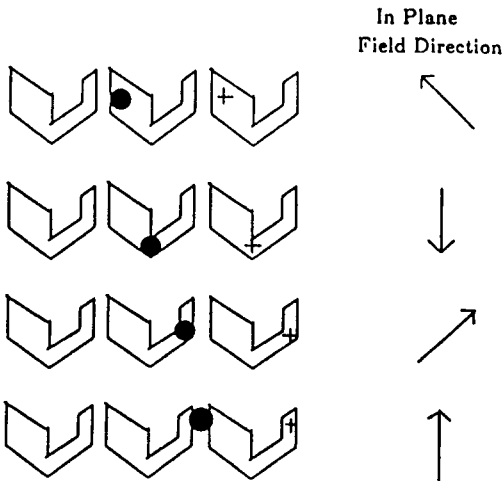


그림 1. 퍼멀로이 버블소자에서의 버블 전파
Fig 1. Bubble propagation along permalloy tracks.

VBL 기억 소자는, 버블의 자벽속에 존재할 수 있는 VBL 쌍 (그림 2) 을 기억단위로 사용한다. 자벽에는 수많은 VBL 쌍이 존재할 수 있으므로 기억밀도는 버블 소자보다 10배 이상 증가될 수 있다. 이러한 VBL 쌍은 수직의 부자계 (bias field 라 부름) 를 변화시킴으로 움직일 수 있다. VBL 소자의 입출력에는 자기 버블을 사용하므로 입력에는 자기 버블을 VBL 쌍으로 변환시키는 부분과, 출력에는 다시 VBL 쌍을 자기 버블로 변환시킬 수 있

는 부분이 필요하다. 전술한 퍼멀로이 소자나, 이온 주입형 소자는 회전 자계에 의해 버블을 이동시키는데, 이 회전자계의 회전속도가 정보의 전송속도를 결정하게 된다. 기존 버블 소자의 전송속도는 회전자계의 회전속도를 증가시키는데 어려움이 따르므로 수백 KHz 로 제한된다. VBL 소자에서는 이러한 전송속도를 증가시키기 위해, 입출력 부분에 전류에 의해 버블의 구동이 가능한 전류구동형 버블 전파 회로⁵⁾를 사용한다.

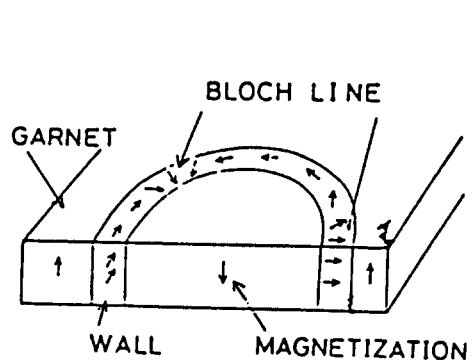


그림 2. 자기 버블의 자벽 구조
Fig 2. Domain wall structure of magnetic bubbles.

Ⅲ. 소자 재료

전술한 바와 같이 현재 사용되는 버블 소자의 재료는 자기 가넷 뿐이나, 버블 박막은 다른 물질로도 제조 될 수 있다. 그림 3 에, 버블 소자에 사용 가능한 물질들의 특성이 나타나 있다.¹⁾ 버블 재료의 가장 중요한 조건은 충분한 수직 자기 이방성 K_u 를 가져야 한다는 것이다. 버블 재료가 수직 자화를 갖기 위해서는 K_u 가 감자 (減磁, demagnetizing) 에너지 $2\pi M_s$ 보다 커야 하기 때문이다. 양호도 (quality factor) Q 를 $K_u/2\pi M_s$ 로 정

의하면 Q는 1보다 커야 한다. 다음으로 중요한 인자는 버블 직경 d로서 d는 기억밀도를 결정한다. 정보의 기억 밀도를 증가시키기 위해서는 d를 감소시켜야 한다. 포화자화 $4\pi Ms$ 는 d에 반비례하며, d가 결정되면 포화자화가 또한 결정된다. 4 Mbit 버블 칩에서는 $1 \sim 2\mu m$ 직경의 버블이 사용되고 있다. 그림 3 으로부터 가넷계로부터 제조 가능한 유용한 최소 버블 직경은 $0.3\mu m$ 인 것을 알 수 있다. 이보다 작은 버블은 $BaFe_{12}O_{19}$ 와 같은 육방정계 페라이트(hexaferrite)로부터 얻을 수 있다. 또한 사방정계 페라이트(orthoferrite)를 사용하면 수백 μm 크기의 버블을 얻을 수 있으며 초기의 버블 연구에서 사방정계 페라이트를 사용한 이유를 알 수 있다.⁶⁾ 이외에도 비정질 합금(대표적으로 Gd-CoMo)에 대한 연구도 한 때 활발히 진행되었다.⁷⁾ 비정질 합금은 버블 직경이 $0.2\mu m$ 에서 $0.6\mu m$ 까지인 경우 사용 가능하기 때문에 현재까지 사용하기에는 부적당하였다. 직경이 $0.6\mu m$ 보다 크면 열적 안정성을 잃으며, $0.2\mu m$ 보다 작으면 충분한 자기 이방성을 가진 박막을 제조할 수 없다. 충분한 성장 수직 자기 이방성을 갖는 비정질 박막을 제조할 수 있으면 앞으로의 고밀도 버블 소자 제조에 사용될 수 있을 것이다. 이상의 여러가지 이유 때문에 현재로는 자기 가넷만이 버블 및 VBL 소자 재료로 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 자기 가넷에 국한하여 그 설계 및 제조 과정을 살펴 보고자 한다.

IV. 자기 가넷 박막 설계^{1), 8), 9)}

자기 가넷의 구조식은 $\{RE_3^{3+}\}[Fe_2^{3+}](Fe_3^{3+})O_{12}$ 로서 입방체 결정구조를 가지며 희토류(RE)와 철(Fe) 이온이 세가지 다른 종류

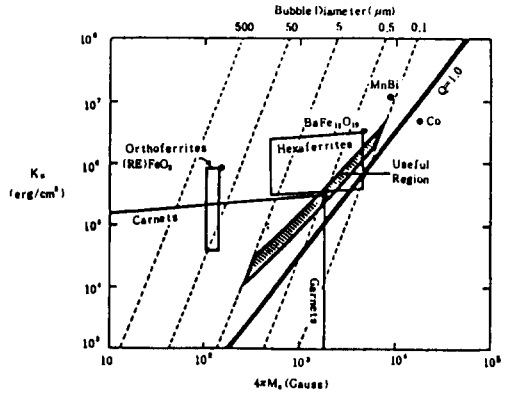


그림 3. 버블 재료들의 특성 범위
Fig 3. Range of properties for several families of bubble materials.

의 격자간 위치(interstitial site)에 존재한다. 그림 4에 표시된 바와 마찬가지로 이 세가지 위치(site)는 8개의 산소 이온으로 둘러싸이고 RE 이온이 위치하는 dodecahedral site, 6개의 산소 이온으로 둘러싸이고 철 이온이 위치하는 octahedral site와 4개의 산소 이온으로 둘러싸이고 철 이온이 위치하는 tetrahedral site이다. 이 3가지 위치에 존재하는 이온들은 세개의 sublattice를 형성하며 이들 사이에 상호교환작용이 존재한다. 이때문에 이들 세 sublattice의 자기 모멘트는 그림 5와 같이 배열되며 자기 가넷은 ferrimagnetic 특성을 띠게 된다.

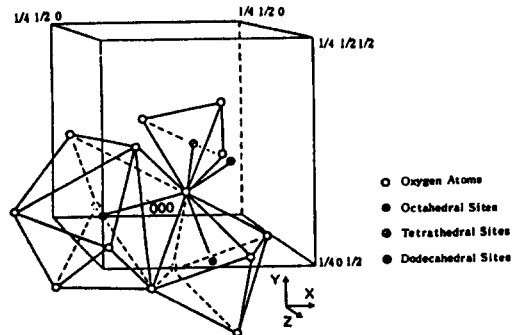


그림 4. 자기 가넷의 결정 구조
Fig 4. Crystal structure of magnetic garnets.

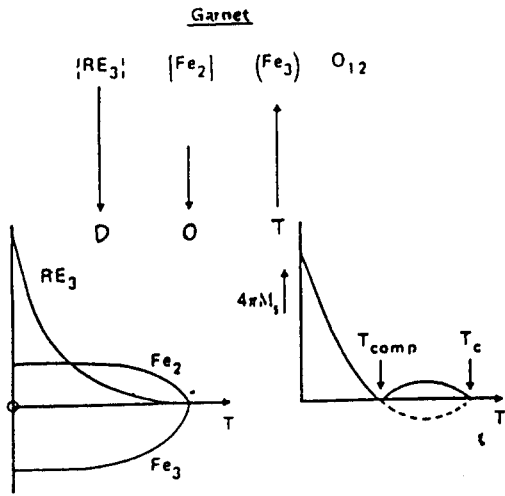


그림 5. Sublattice의 자기 모멘트 방향, 온도변화에 따른 각 Sublattice 자화변화와 온도변화에 따른 전 자화 ($4\pi M_s$) 변화

Fig 5. Sublattice orientation, sublattice magnetization vs temperature and total magnetization ($4\pi M_s$) vs temperature (T).

자기 가넷계의 가장 큰 장점은 희토류와 철 이온을 부분 치환함으로써 자기적 특성을 넓은 범위에 걸쳐 손쉽게 변화시킬 수 있다는 점이다. 이렇게 여러 이온들을 치환할 때 주의할 점은 기관으로 대부분의 경우 사용되고 있는 비 자성 GGG(Gadolinium Gallium Garnet, $Gd_3Ga_5O_{12}$)의 격자 상수와 이 기관위에 에피택셜하게 성장되는 자성 박막의 격자 상수의 matching 문제이다. 격자 상수간의 mismatch는 가급적 줄이는 것이 박막의 응력을 감소시켜 원하는 자기적 성질을 구현하는데 도움이 된다. $Y_3Fe_5O_{12}$ 이 기관인 GGG와 격자 상수가 거의 같으므로 이 Yttrium 가넷을 기준으로 Y와 철을 다른 원소들로 부분 치환하여 원하는 자기적 특성을 얻는다. 물론 이때 격자상수를 비슷하게 유지할 수 있도록 적당한 크기의 원소를 사용하여야 한다. 이와 같이 부분 치환된 가넷들의 자기적 성질을 순수 가넷들, 즉 희토류 원소와 철이 부분 치환

< 표 1 > 순수 희토류 가넷, $(RE)_3Fe_5O_{12}$ 의 특성

RE	R. T. $4\pi M_s$ [G]	T_c [K]	a_0 [Å]	λ_{111} [10^{-6}]	λ_{100} [10^{-6}]	λ' [10^{-7} s·Oe ²]
Sm	1675	578	12.529	+21.0	- 8.5	12.0
Eu	1172	566	12.498	+21.0	+ 1.8	2.1
Gd	56	564	12.471	0.0	- 3.1	0.52
Tb	198	568	12.436	- 3.3	+12.0	48.0
Dy	376	563	12.405	-12.6	- 5.9	26.0
Ho	882	567	12.376	- 3.4	- 4.0	42.0
Y	1767	553	12.376	- 1.4	- 2.4	0.52
Er	1241	556	12.347	+ 2.0	- 4.9	7.0
Tm	1397	549	12.323	+ 1.4	- 5.2	1.2
Yb	1555	548	12.302	+ 1.4	- 4.5	4.2
Lu	1815	549	12.283	- 1.4	- 2.4	0.52

Where T_c =Curie Temperature, a_0 =Lattice Constant, λ_{111} and λ_{100} = Magnetostriction Constants and λ' =Damping Parameter.

되지 않은 가넷들의 자기적 성질(표1)을 부분 치환된 정도에 따라 보간(interpolate)함으로써 얻어진다. $Y_3Fe_5O_{12}$ 의 자화는 1,767 Gauss로 $0.5 \sim 0.6 \mu m$ 직경의 버블이 존재

하게 된다. 따라서 이보다 큰 직경의 버블을 원하면 자화의 크기를 감소시켜야 한다. 이러한 목적으로 Ga나 CaGe을 사용하여 철 이온을 부분 치환하여 자화의 크기를 감소시킨다(그림6 참조).

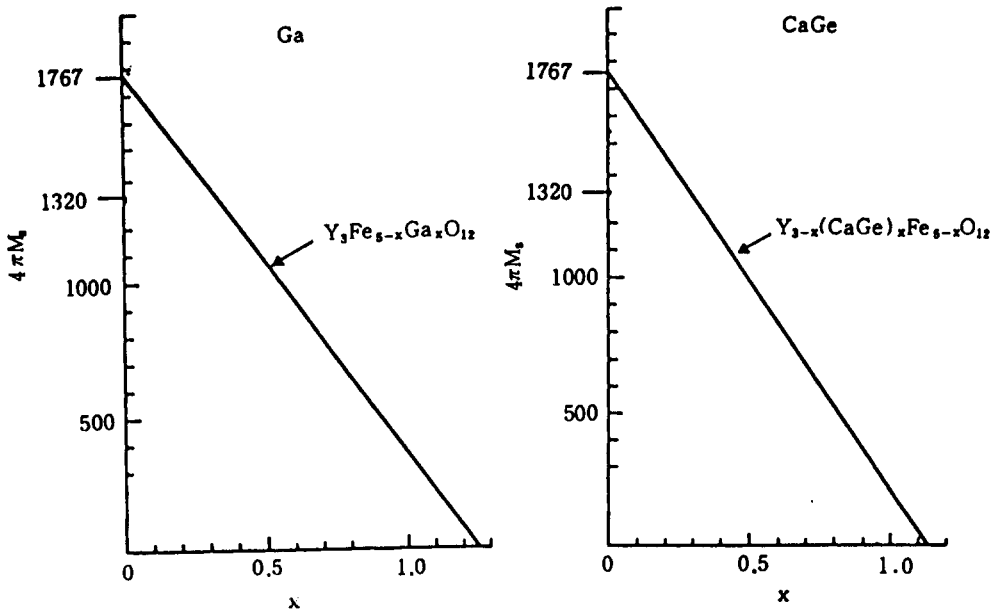


그림 6. Ga 또는 CaGe 치환량 x에 따른 $4\pi M_s$ 의 변화
 Fig 6. $4\pi M_s$ vs Ga or CaGe dilution x.

수직 자기 이방성은 주로 결정성장 과정에 의해서 얻어진다. 결정 성장에 의한 자기 이방성은 큰 희토류 이온과 작은 희토류 이온의 pair ordering 모델로 설명된다. 이는 결정 성장시 특정한 결정축의 방향으로 특정한 크기의 이온들이 선택적으로 위치하게 되며 이로부터 자기 이방성이 생성된다는 이론이다. 자기 버블 박막에 사용되는 이온들 중 큰 이온으로는 Sm이 대표적이며 작은 이온들로는

Lu 또는 Tm 등이 있다. pair ordering 모델은 Bi를 사용하지 않는 가넷계에서는 상당히 정확히 결정 성장에 의한 자기 이방성을 예측할 수 있으나 요즘 많이 사용되는 Bi 가넷 계의 자기 이방성을 설명할 수는 없다. 그밖에 자기왜(magnetostriction) 상수, 감쇄 상수(damping), 교환(exchange) 상수 등도 순수 희토류 가넷들로부터 부분 치환된 원소들의 양에 따라 선형 보간법을 사용함으로써

얻어진다.

V. 자기 가넷 박막 제조 과정

기판인 GGG는 Czochralski 결정성장 방법에 의해 제조된 Boule을 슬라이스(slice), 연마(polish) 함으로써 얻어진다. 자기 가넷 박막은 이 기판위에 액상성장(LPE) 방법으로 성장된다. 기상 반응(CVD) 방법도 시도 되었으나, 이 방법으로는 결정 성장에 의한 수직 자기 이방성을 얻을 수 없으므로 응력에 의한 이방성에만 의존해야 하며 따라서 충분한 이방성을 얻을 수 없으므로 이 방법은 현재는 사용되고 있지 않다. LPE 방법⁸⁾으로는 현재 4 inch 기판에 전위(dislocation) 밀도 $0.5/cm^2$ 의 우수한 박막을 제조할 수 있다. 그

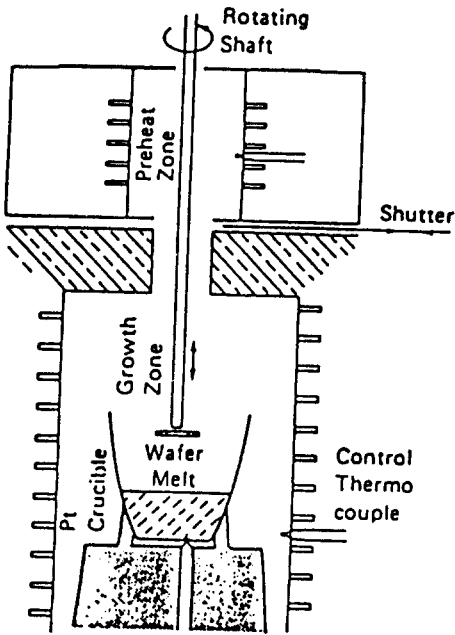


그림 7. 가넷 박막 성장에 사용되는 장치의 단면도
 Fig 7. Cross section of the apparatus used for growing garnet films.

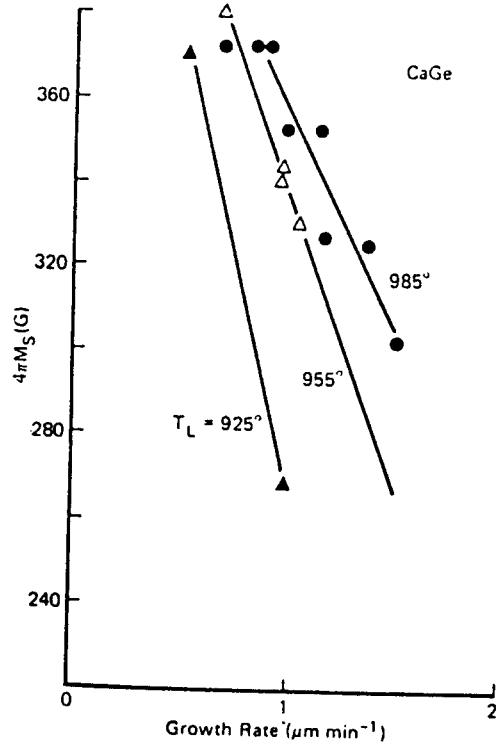


그림 8. 박막 성장율이 $4\pi M_s$ 에 미치는 영향
 Fig 8. Effect of growth temperature on $4\pi M_s$.

림 7은 대표적인 LPE furnace를 나타낸다. 기판을 Melt 내에서 회전시켜 균일한 결정 성장을 유도하며 원하는 박막두께에 비례하는 시간만큼 성장시킨 후 Melt로부터 제거한다. 박막의 성장속도는 기판의 회전속도, 결정 성장온도 및 Melt의 농도에 따라 결정되며 박막의 자기적 성질에 결정적인 영향을 미친다. 이는 Melt의 원소 구성배열과 실제 성장된 박막의 원소 비율을 연관짓는 편석(segregation) 계수가 박막의 성장 속도에 따라 변하기 때문이다. 즉 성장 속도에 따라 같은 Melt로부터 박막에 들어가는 각각의 원소의 상대적인 양이 달라지기 때문이다. 일례로서 그림 8에 Ca, Ge으로 철을 부분치환한 가넷의 경우, 성장속도에 따른 자화의 변화를 보여주

고 있다. 파라미터는 액상 온도 (T_L) 이다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 자기 버블 및 VBL 기억 소자의 기본적인 동작원리 및 사용되는 재료 특히 자기 가넷 박막의 설계와 제조과정을 살펴 보았다. 자기 가넷의 가장 큰 장점중의 하나는 응용 분야에 따라 원하는 자기적 특성을 갖는 박막을 쉽게 성장시킬 수 있다는 장점이다. 그러나 현재의 결과로는 $0.3\mu\text{m}$ 이하의 직경을 갖는 버블 박막은 가넷을 이용하여서는 제조하기 힘들므로 그보다 작은 버블을 원하면 육방정계 페라이트나 비정질 합금을 이용하여야 할 것으로 보인다. VBL 소자의 경우 $0.5\mu\text{m}$ 직경의 버블로 $1\text{Gbit}/\text{cm}^2$ 의 기록 밀도가 예상되므로 가까운 장래에는 가넷이외의 재료를 생각할 필요는 없을 것이다. 현재의 연구 추세로는 $0.3\mu\text{m}$ 직경의 버블을 이용한 버블 소자가 개발되면, 또는 그 이전이라도 VBL 소자가 버블 소자를 대체할 것으로 보여 한동안 가넷이외의 재료에 대한 연구는 활발하지 않을 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

- 1) A.H.Eschenfelder: Magnetic bubble technology, Springer Verlag, 1980.
- 2) S.Konishi: *IEEE Trans. Magn.*, (MAG-19), 1838, 1981.
- 3) A.H.Bobeck and I.Danylchuk: *IEEE Tran. Magn.*, (MAG-13), 1370, 1977.
- 4) Soonchul Jo: *Ph.D. Thesis*, Carnegie Mellon University, U.S.A., 1987.
- 5) A.H.Bobeck et al.: *Bell Sys. Tech. J.*, (58), 1543, 1979.
- 6) A.J.Perneski: *IEEE Tran. Magn.*, (MAG-5), 554, 1969.
- 7) H.Jouve: *Magnetic Bubbles*, Academic Press, 1986.
- 8) R.Campbell: *M.S. Thesis*, Carnegie Mellon University, U.S.A., 1985.
- 9) 김길상, 이윤석, 최연봉, 한은실, 조순철 : 대한전자공학회 반도체, 재료 및 부품연구회 / 씨 에이 디 연구회 합동학술발표회 회지, p.172, 1988.