

특집 : 磁氣情報記錄材料

광 자 기 기 록 재 료

김 순 광

(한국과학기술원 재료설계 연구실장)

1. 서 론

빛을 이용하여 정보를 기록, 재생하는 착상은 일찌기 Newton이 시도한 적이 있다고 하나 실제로 응용된 것은 훨씬 뒤에 유성영화의 녹음방식과 컴퓨터의 카드·리더, 그리고 마이크로필름 정도이다. 지난 90여년간 정보기록수단의 주종을 이루어온 자기기록매체에 이어 차세대 정보기록매체로 등장하기 시작한 광기록매체가 현실화될 수 있게된 가장 큰 계기의 하나는 1960년에 최초로 발진에 성공한 레이저의 등장이다. 그후 일련의 관련기술개발, 예를 들어 1973년에 개발된 반도체 레이저의 꾸준한 대출력화, 고신뢰도화, tracking focussing Servo 기술 개발, 반도체 재료 및 소자의 발전을 가능하게 한 미세가공 및 박막기술, hard magnetic disk 기술 등이 뒷받침되어 1980년에 ROM인 optical video-disk(상품명 Laser Vision)가, 그리고 1982년에 digital audio disk(상품명 Compact Disk)가 처음으로 상품화될 수 있었다.

한편 사용자가 정보를 기록시킬 수는 있으나 지울 수가 없는 WORM(Write Once Read Many) Disk의 개발도 1960년대 부터 레이저 가열에 의한 매체손상 또는 매체의 상변태를 이용하는 방식 등이 여러 방향으로 연

구되어온 결과 지금은 Te계 또는 유기재료계의 재료를 매체로 한 디스크가 대용량문서 File, 컴퓨터 외부기억장치 등으로 상품화되기 시작하였다.

정보기록매체로써 광 디스크에 요구되는 궁극적인 기능은 자기 디스크와 같이 정보를 반복적으로 기록, 소거할 수 있는 이른바 재서형(Rewritable or Erasable) 기능이므로 재서형 광 디스크매체개발은 광 디스크연구의 핵심이 되어왔는데 대표적인 방식으로 매체의 상변태에 따른 광반사율차이를 이용하는 가역상변태방식과 광자기방식이 있으나 현재 실용화에 이른 것은 광자기 방식이다. 광자기 기록매체연구는 1957년 Williams 등의 MnBi 박막에 열 Pen으로 기록한 역자구를 Faraday 효과를 이용하여 관찰한 것이 효시가 되었다. 레이저의 발명은 역시 광자기기록매체개발연구를 가속시키는 결정적인 역할을 하였으나 다결정인 MnBi계 합금은 결정립계로 인한 잡음 문제와 상변태의 불안정성 등의 근본적인 문제점으로 인하여 다각적인 재료개발노력에도 불구하고 광기록재료로서 실용화되지 못하였다.

현재 제1세대 광자기기록재료로서 실용화를 눈앞에 두고 있는 회토류-천이금속(Rare Earth-Transition Metal: Re-TM) 비정질합

금 박막은 < 표 1 > 과 같이 1973 년 IBM 에 구 개발에 돌파구가 열리게 되었기 때문이
 의하여 Gd-Co 합금박막이 개발됨으로써 연 다. 1)

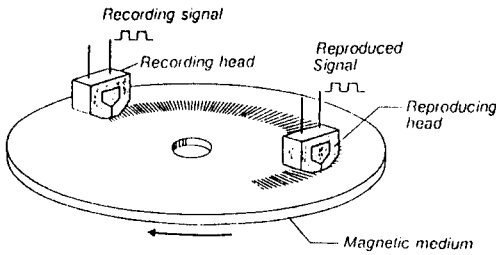
< 표 1 > 광자기 기록 연구의 변천

년 도	단결정박막	다결정박막 Amorphous 박막	Memory system과 특징	관 련 기 술
1960		MnBi	·열기록, Kerr 효과로 자구관찰 ·전자 beam 기록	He-Ne laser 발진
	GdFeO ₂ (Bulk)		·laser 에 의한 광자기 memory 제안	반도체 laser 발진
1970	GdFeO ₂ (Gd-IG)	EuO CoP+Ni	·GdIG, MnBi+gas laser 에 의한 광자기 memory 실험 ·CoP disk memory(Ampex)	자기 bubble memory 발명 (Bell 연구소) 광 disk 출현
	GdYbAl-IG	MnAlGe MnGaGe MnTiBi GdCo MnCuBi PtCo	·MnBi disk memory(Honeywell) ·EuO disk memory(IBM)	
1980	TbYb-IG SmFr-IG	TbFe DyFe YGdFe	·MOPS random access memory (Philips) ·MnCuBi disk memory(NTT)	수직자기기록방식 (CoCr, 동북대학)
		GdFeBi GdTbFe	·CrO ₂ disk memory(NHK)전사를 이용 ·TbFe-GdTbFe disk memory(KDD) ·반도체 laser 에 의한 고밀도 기록재생의 동작실험 성공	laser disk 실용화
1981		TbDyFe	·TbDyFe disk memory(Sharp) ·MnCuBi-GdTbFe disk memory (Matsushita)	
1982		GdTbCo	·GdCo disk memory(NHK) ·GdTbFe disk memory(Philips), floppy 의 치환	CD 실용화 DRAW disk 실용화
1983	BiYbSm-IG	GdFeCo PtMnSb TbFeCo	·TbFe disk memory(Xerox) ·TbFeCo disk memory (KDD-Sony)	TeOx Rewritable type disk (Matsushita 전기)
	CoFe ₃ O ₄	TbDyFeCo GdTbFeCo	·TbFeCo disk memory (Ricoh) ·GdTbFe disk memory (Olympus) ·TbFe/GdFe disk memory (Daido 특수경) ·TbFe/GdFeCo disk memory (Nikon) ·GdTbFeCo disk memory (Canon)	
1984				

2. 기본원리

광자기 디스크 장치는 기록매체로서 자기광학효과가 큰 수직자화박막을, 기록, 재생 Head로서 반도체 레이저를 광원으로 하는 광학 Head를 사용한다(그림 1). 광자기기록은 열자기기록(Thermo-Magnetic Recording)과, 자기광학재생(Magneto-Optic Reading)이 특징이다.

Magnetic disk



Magneto-Optical Disk

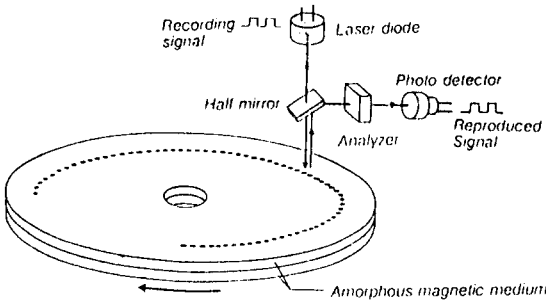


그림 1. 자기 및 광자기 Disk장치

(1) 열자기기록

열자기기록은 그림 2 (a)와 같이 레이저 광을 직경 $1\mu\text{m}$ 이하의 미소한 스폿트로 매체면에 집광, 국부적으로 가열함으로써 레이저 조사부의 보자력이 온도상승으로 저하되는 현상을 이용하여 약한 외부 바이어스 자장으로 자화 방향을 쉽게 반전시켜 미소한 원주상 자구를 형성하는 원리이다. 바이어스 자장의 방향을 기록

시와 반대로 인가하여 다시 레이저 광을 조사하면 그림 2 (c)와 같이 기록되어 있는 정보가 소거된다.

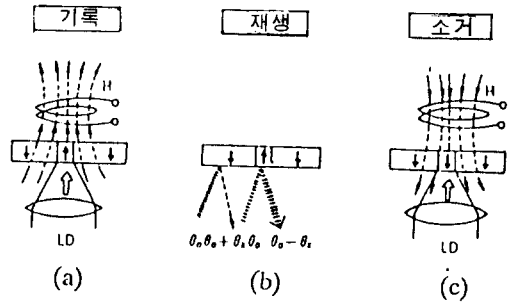


그림 2. 광자기 기록, 재생, 소거 원리

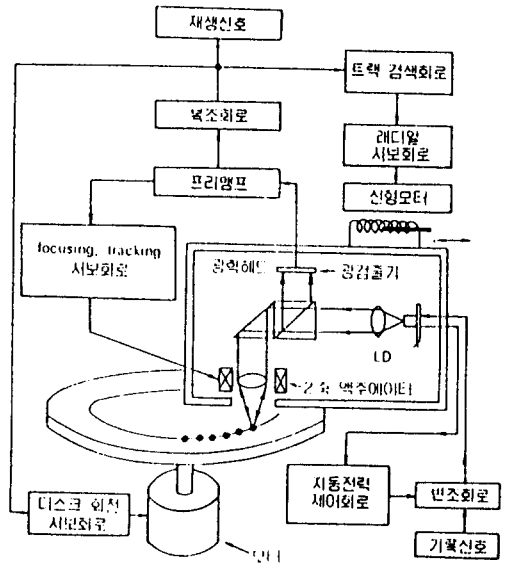


그림 3. 광자기 메모리의 구성

(2) 재생

레이저 직선편광을 매체에 입사시키면 기록되어 있는 정보단위인 원주상자구의 자화 방향과 여타 부분의 자화 방향이 반대이므로 반사광(Kerr 효과) 또는 투과광(Faraday 효과)의 편광면 회전방향이 서로 반대가 되는

자기광학 효과를 이용한다. 그림 2(b)는 Kerr 효과에 의한 재생원리를 그린 것으로 기록된 자구로부터의 반사광은 검광자를 통과하면 편광면의 회전이 광량의 변화로써 광검출기에 의하여 검출된다.

광자기 메모리의 구성은 그림 3과 같이 광자기디스크와 드라이브로 이루어지며 드라이브는 디스크 회전 및 제어계, 광학헤드와 Focusing/Tracking 기구, 및 신호처리계로 되어 있다. 디스크는 플라스틱(PC, PMMA등)이나 유리기판에 기록층과 보호피막층을 Sputtering 한 구조이며 기판의 신호면에는 레이저 빔의 안내를 위하여 약 1.6 μm간격의 Pregroove가 동심원 또는 나선형으로 성형되어 있다(그림 4).

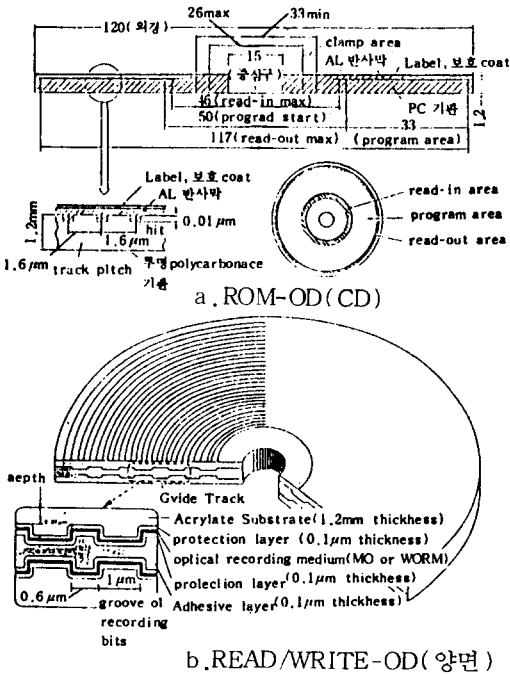


그림 4. Optical disk의 기본 구조

3. 광자기 디스크의 특징

광자기디스크는 종래의 자기디스크와 비교할 수 없을 정도로 높은 기록밀도와 비접촉 기록, 재생이 주 특징이다. 기록밀도는 일차적으로 레이저 광의 파장 λ와 집광 렌즈의 NA (Numerical Aperture)에 의하여 결정되는데 집광 레이저 스폿트의 직경 d는

$$d \cong 0.8 \times \lambda / NA$$

로 표시되므로 λ = 0.8 μm, NA = 0.6의 경우 Spot 직경은 약 1 μm가 되어 면기록 밀도는 10⁸ bit/cm² 정도, 즉 Floppy Disk의 100 배 이상에 상당하는 고밀도 기록이 가능하다. 그림 5는 광자기 디스크의 기록밀도를 기존의 각종 기억매체와 비교한 것으로 LASER 광의 단파장화와 집광 Lens의 NA 증가에 의하여 기록밀도를 더욱 증가시킬 수 있을 여지가 많아 차세대 기록재료로서의 위치를 확고히 하고 있다.

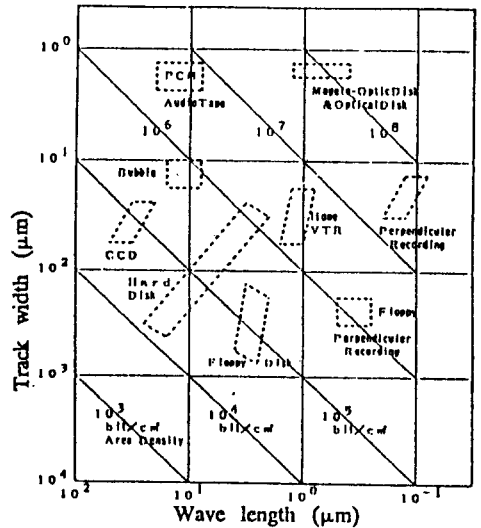


그림 5. 여러가지 기억매체의 기록밀도 비교

4. 기록매체 요구조건

광자기 기록매체재료의 일반적인 요구조건을 요약하면 <표 2>와 같다.

<표 2> 광자기 기록매체 재료의 요구조건

(1) 자기이방성	자화가 매체면에 수직방향을 이루는 재료
(2) 기억 밀도	$d \propto \alpha_w / 2M_s H_c$: 최소 bubble 직경 $10^7 - 10^{11}$ bits/cm ² ($\sim 1 \mu\text{m}\phi$)
(3) 기록 power	$\Delta T = T_c - T_o$ T_o : 유지온도 (ambient T) T_c : 100-200 C
(4) 감응수계수	$(I_o - I_T) / I_o = 1 - \exp(-\alpha t)$ 감응수항 $\alpha t > 2$ 필요 ($t = 100 \text{ nm}$, $\alpha > 10^8 \text{ cm}^{-1}$)
(5) 재생 성능	투과외 경우: $\exp(-2\theta_f / \alpha t)$ 반사의 경우: $\sqrt{R} \times \theta_s$
(6) 미세균일성	잡음원 (a) shot 잡음 ($S/N \propto \sqrt{I \theta_s}$) (b) 매체잡음 (pin hole, grain size, bit 형태)
(7) 반복기록성	10^6 회 이상
(8) 매체대형화	직경 3.5"-14" 균질성
(9) 신뢰성	기계적, 결정학적, 화학적 안정성, >10yrs
(10) 경제성	제작방법 용이, 재료 가격

(1) 기록 밀도

높은 기록밀도를 얻기 위해서는 수직자화막이 되어야 하는데 그 조건은 다음과 같다.

$$K_L > 2\pi M_s^2$$

여기서 K_L : 수직자기 이방성 에너지

M_s : 포화자화

수직자화막 중에 안정적으로 존재할 수 있는 원주상의 역자화자구의 최소직경 d_{min} 은 근사적으로

$$d_{min} \approx \sigma_w / M_s H_c$$

(여기서 σ_w : 자벽에너지 밀도 $\propto \sqrt{AK_L}$)

으로 주어진다. 2)

따라서 기록밀도 즉 기록 bit 크기를 결정하는 주요 재료상수인 K_L , M_s , H_c 의 최적화가 재료개발의 일차적인 초점이다.

(2) 기록 Laser Power

광자기 기록 박막에 열자기적으로 정보를 기록하는 방법으로는 그림 6 과 같이 Curie점 기록과 보상점 기록 그리고 ΔH 기록이 있는데 기록에 필요한 온도상승을 ΔT 라 하면 기록에 필요한 laser power 는 ΔT , 자구체적 및 기록층과 기관의 열전도도에 의하여 결정된다.

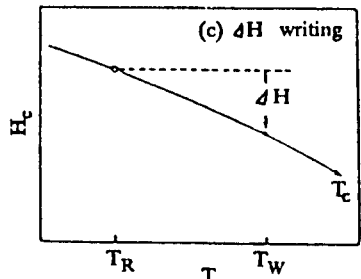
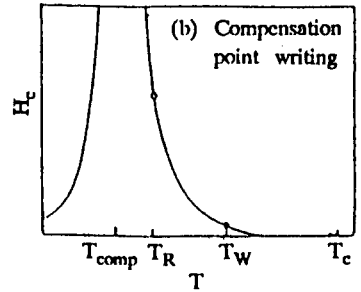
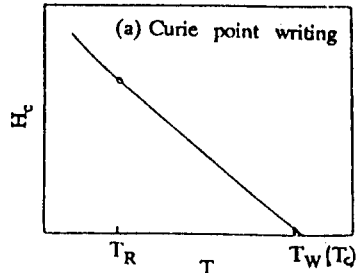


그림 6. 자기광학 기록매체의 기록 방법

기록감도는 Curie 점 기록에서는 T_c 가 낮을수록 좋으나 너무 낮게 되면 외부 온도변화 및 재생 빔 가열에 의하여 기록된 정보의 열적 안전성이 저하되며 반대로 T_c 가 너무 높으면 기록에 높은 laser power 를 요할 뿐만 아니라 비정질 RE-TM 매체의 경우 결정화 온도가 300~400C밖에 되지 않아 적정 T_c 는 경험적으로 100~200C 정도로 보고 있다.

보상점 기록에서는 보상점의 상온부근이 되도록 조성을 조정할 필요가 있다.

기록감도를 결정하는 다른 하나의 요인인 매체의 광흡수계수 α 는 두께가 t 일 때 $\alpha t > 2$, 즉 입사광의 50% 이상을 흡수할 필요가 있다.

(3) 재생 특성

재생 성능은 광검출기의 주된 noise source 를 shot noise 라 가정할 경우 재생 신호의 S/N 비가 $\sqrt{RI} \cdot \theta_k$ 에 비례하므로 이를 성능지수라 부른다 (여기서 R 은 박막의 반사율, I 는 입사 laser power, θ_k 는 Kerr 회전각).

따라서 재료개발의 최대 관심사의 하나는 현 수준에서 θ_k 가 0.3° 내외인 RE-TM 합금의 θ_k 향상이다.

이외에도 광자기 디스크의 본격적인 실용화를 위해서는 박막에 Pin Hole 이나 결정립계 등의 초직결함이 적고 조성, 두께 등이 균일할 뿐만 아니라 재현성이 높아야 하는 등의 박막기술과 장기신뢰성, 반복기록소거에 의한 열화 저항 향상등 앞으로 지속적인 연구개발을 요한다.

5. 재료 개발 현황

(1) 광자기 재료의 종류

광자기 기록용으로 연구되어온 재료는 <표

3 > 과 같이 결정계 금속재료, 산화물계 재료 및 비정질 재료가 있다. 결정질 금속재료로는 MnCuBi, MnAlGe, MnPtSb 등이, 산화물계로는 CoFe_2O_4 , $\text{CoCrFe}_2\text{O}_4$, BaFe_2O_4 등의 Ferrite 나 BiAlGdIG, BiCaYIG 등의 Garnet 등이, 그리고 현재 실용화가 임박한 비정질계로는 TbFeCo, GdTbFe 등이 있다.

< 표 3 > 광자기 기록용 재료

materials	T_c (C)	Hc[Oe]	θ_k	$2\theta_1/\alpha$	Wavelength λ
GdCo	~ 600	0.5-200	0.28~0.33		0.80 μ m
TbCo	~ 350	5000 以上	~ 0.3		0.80
TbFe	~ 140	5000 以上	0.24~0.3		0.80
GdFeBi	~ 180		0.3~0.4		0.80
GdTbFe	~ 165	3000 以上	0.3~0.4		0.80
TbFeCo	~ 200	8000 以上	0.3~0.35		0.80
GdTbFeCo	~ 200		0.34~0.48		0.80
NdDyFeCo	~ 160	3000 以上	~ 0.4		0.80
MnCuBi	~ 200	1500 以上	0.5	1.1	0.63
PtCo	390	2000 以上		4	0.63
PtMnSb	209		1.27		0.72
CoCrFe ₂ O ₄	150	1000 以上	3		0.74
BiAlGdIG	136	~ 600		18	0.63
BiGaYIG	177	450		5.8	0.52

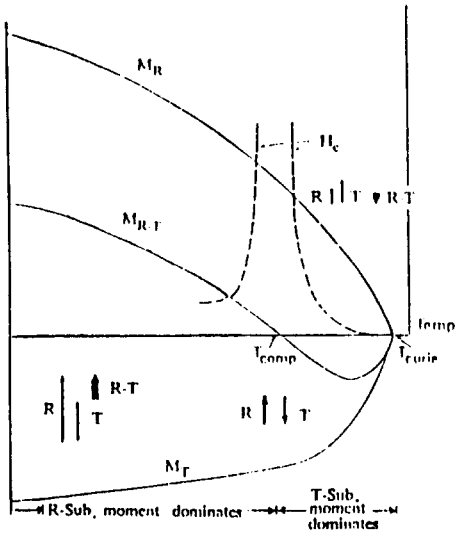
TbFeCo 로 대표되는 RE-TM 비정질 합금이 비교적 낮은 θ_k 에도 불구하고 현재 실용화가 임박한 제1 세대 광자기 기록매체로 발전하게 된 이유는 다음과 같이 요약된다.

1) Ferri 자성을 가지므로 Curie 온도 이하에서의 M_s 가 적고 수직자화막으로 만들기 쉽다.

2) 보자력이 큰 Tb-TM 은 미소자구가 안정적으로 존재할 수 있어 고밀도기록이 가능하다.

3) 조성변화에 의하여 Curie 온도 및 보상온도의 조절이 용이하다. (그림 7) .

4) 비정질이므로 결정립계 잡음이 적다. 결점으로는 θ_k 가 다른 자기광학재료에 비하여 비교적 적어 다원합금화, 다층막화 등이 불가피하여 산화하기 쉬운 희토유 원소의 내산화 내식 합금화 및 보호피막을 요하는 점이다. 따라서 이러한 결점을 개선하기 위한 꾸준한



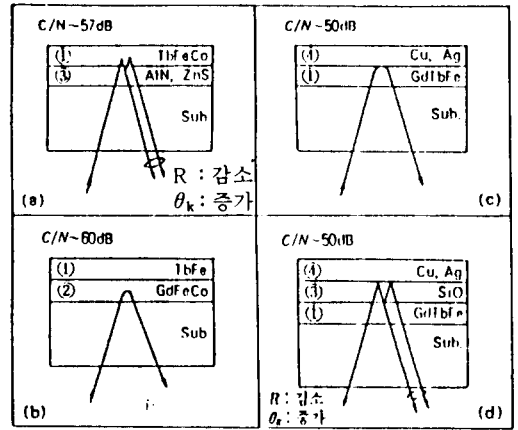
Ferromagnetic, anti ferromagnetic coupled

그림 7. 중회투류 (hR) - 천이원소 (T) 합금의 포화자화 및 보자력의 온도의존성

연구개발 결과 비정질 합금 박막의 θ_k 는 당초의 $0.2 \sim 0.3^\circ$ 선으로 부터 최근에는 최고 0.45° 까지 보고될 정도로 향상되었으며 다원 합금화, 다층박막화(그림 8) 등의 재료 개발과 함께 광학 Head의 꾸준한 개선으로 신호 품질을 그림 9와 같이 당초 CNR 35~40 dB로 부터 지금은 60 dB 선까지 발전하여 디지털, 아날로그 메모리로서 광범위한 응용이 가능하게 되었다.³⁾

(2) 박막 합성 기술

광자기기록매체의 일반적인 합성 방법으로 확립된 magnetron sputtering 법은 도달진공도 10^{-7} torr 이하가 요구되며 플라스틱 기판의 경우 예비가열 또는 장시간의 배기에 의하여 충분한 탈수처리가 필요하다. 보호막으로는 산화물 또는 질화물계가 알려져 있으나 조성, 제조방법 등에 관한 상세한 정보는 알려져 있지 않다. 합금화 sputtering 방법으로



(1) 기록층 (2) 재생층 (3) 간접층 (4) 반사층

그림 8. 다층구조화에 의한 광자기 기록매체의 특성향상 예

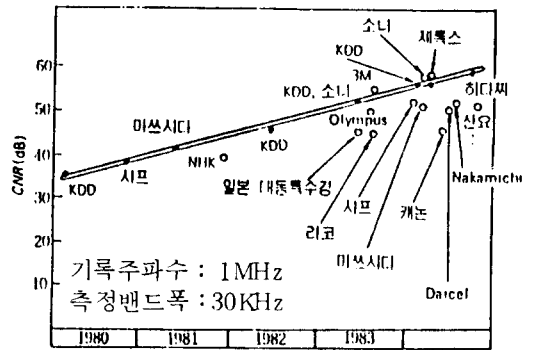


그림 9. 광자기 기록매체의 CNR 향상 추세

는 composite target sputtering, co-sputtering 또는 alloy target sputtering 법이 있으나 대량 생산용으로는 alloy target, in-line sputtering 이 생산효율상 유리하다. 이때 합금 Target의 산소 등 불순물 함량, Target 합금조성 등은 박막의 물성에 지대한 영향을 미치므로 연구개발의 중요과제이다.

(3) 성능지수

성능지수를 결정하는 θ_k 는 RE-TM 합금의 TM sublattice의 자화에 비례하는 것으로 알

려져 있는데 다원 합금의 경우 θ_k 는 합금구성원소의 종류에 관계없이 그림 10과 같이 합금의 T_c 가 높을수록 증가하는 것으로 보고되어 있다. 그러나 최근 4원 합금이나 Bi등을 첨가한 RE-TM 합금에서는 이러한 관계가 성립 되지 않는 경우도 있어 광범위한 재료에 걸쳐 보다 체계적인 연구가 필요하다.

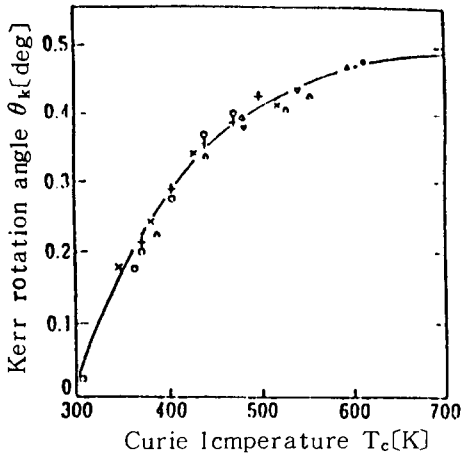


그림 10. RE-FeCo 합금의 θ_k 와 T_c 의 관계⁸⁾

현재 TbFe 합금의 특성개선은 Gd를 첨가한 GdTbFe($T_c=165^\circ\text{C}$)가 $\theta_k=0.3\sim 0.4^\circ$, Co를 첨가한 TbFeCo($T_c=200^\circ\text{C}$)가 $\theta_k=0.3\sim 0.35^\circ$ 로 주종을 이루고 있다. 그러나 최근에는 GdDyFeCo나 NdDyFeCo 등의 4원 또는 5원 합금화가 진전되고 있는데^{4,5)} 이는 특허문제회피와 함께 θ_k 향상이 주 목적이다. 그러나 현수준의 RE-TM 재료의 θ_k 로서는 단층막으로 실용화하기에는 부족하여 발표된 광자기디스크는 대개 그림 8과 같은 다층막구조로 만들어 신호품질을 증가시키고 있는데 그림 8(a)(b)와 같은 무반사조건을 이용한 Kerr enhancement 나⁶⁾ 그림 8(c),(d)와 같이 두 종류의 서로 다른 RE-TM 박막의 2층막 구조화

를 통한 방법⁷⁾등이 대표적인 예이다.

(4) 신뢰성

광자기 디스크를 디지털 메모리로 사용할 경우 데이터의 bit error rate(BER)가 문제된다. 일반적으로 video 메모리용으로는 BER이 10^{-6} 이하, audio 메모리용으로는 10^{-9} 이하, 데이터 메모리에서는 10^{-12} 이하가 요구되는 것으로 알려져 있다.⁹⁾ 광자기디스크의 bit error 요인은 sputtering시 생기는 막의 pin hole이며 pin hole의 원인은 주로 박막제조시의 먼지 또는 기판결함이므로 반드시 clean room에서 제조해야 한다. 그림 11은 BER과 CNR의 관계를 도시한 것으로 BER이 $10^{-5}\sim 10^{-6}$ 선 이하가 되어야 CNR이 40 dB 이상으로 급격히 향상됨을 알 수 있는데 이러한 BER을 얻기 위해서는 청정도가 100 이하가 되어야 한다. 따라서 데이터 메모리용으로 광자기 디스크를 사용할 경우에는 error correction code를 적용하여 10^{-12} 이하로

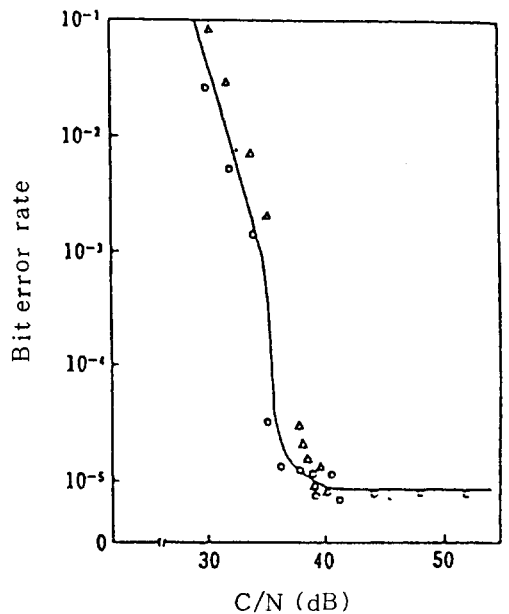


그림 11. BER과 CNR의 관계

정정할 필요가 있다.

매체의 산화나 부식은 표면산화에 따른 CNR 열화와 pin hole 발생에 의한 BER 증가를 유발하므로 부동태를 형성하는 원소의 소량 첨가와 함께 보호막으로 보호하여야 하는데 현재 10년 이상의 내용수명을 가지는 것으로 보고되고 있다. 그러나 수명 평가 방법이 확립되어 있지 않고 광자기디스크의 사용실적이 없어 신뢰성 보증문제가 광자기 디스크 보급에 큰 장애요소의 하나로 되어 있다.

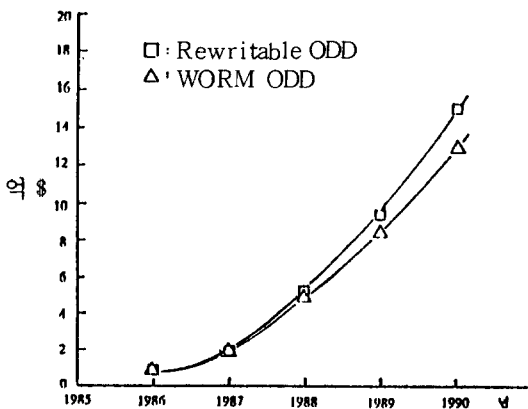
6. 장래 전망 및 과제

광자기디스크 응용상의 과제로서는 저가격화와 overwrite의 실현, 그리고 고속 기록재생 및 고속 access 성능을 들 수 있는데 현재 기록매체와 drive 공히 다방면으로 연구개발이 집중되고 있어 제 2, 제 3 세대 광자기디스크 장치가 속속 나타날 전망이다. 광자기 디스크의 수요예측은 예측시점이나 예측방법, 예측자에 따라 상당한 차이를 보이나 공통적으로

로 1990년대에는 20~30 억불 시장을 예상하고 있으며 수요증가추세는 2000년까지 기하급수적으로 늘어날 것으로 보고 있다. 광자기 디스크 장치의 수요 예측 결과의 일예를 그림 12에 소개한다.¹⁰⁾

참 고 문 헌

- 1) P.Chaudhari, J.J, Cuomo and R.J.Gambino: *Appl. Phys. Lett.* **23**, 337 (1973).
- 2) M.H.Kryder: *J. Appl. Phys.* **57**, 3913 (1985)
- 3) N Imamura: 光磁氣デイ 27, トリケツプス, 1(1986)
- 4) 桐野, 鈴木, 高山, 太田: 第 10 回 日本應用磁氣學會 學述講演概要集, 4pB-11, 41(1986)
- 5) 佐藤, 立川, 塚根, 三谷: 日本物理學講演會予稿集, 28a-ZM-8, 43(1987)
- 6) T.Nishihara, N.Ohta, K.Kneko, S.Horigane: paper HC-1 Intermag conference, Phoenix April (1986)
- 7) 納土, 小林, 網島, 内山: 日本應用磁氣學會誌, (6), 131(1982)
- 8) 内山晋: 固体物理, **20**, 8, 633(1985)
- 9) 今村修武: 金屬表面技術, **38**, 408(1987)
- 10) "Erasable optical disk technology and markets" OM-19 Rothchild consultants (1985)



ODD 시장예측 (금액)

그림 12. 광자기 디스크 장치의 수요 예측