논문88 - 2 - 3

자기 가넷박막 동적특성의 컴퓨터 시뮬레이션에 관한 연구

A study on the computer simulation of dynamic properties of Magnetic Garnet Thin Films

*
김 길상, 이 윤석, 최 연봉, 한 은실, 오 민석, 조 순철 숭실대학교 전자공학과 자성재료 및 소자 연구실

Kil Sang Kim, Yun Seck Lee, Yeon Bong Choi, Eun Sil Han, Min Seck Oh, Soon Chul Jo Dept. of Electronics Eng., Magnetic Meterial and Device Lab. SoongSil University

Abstract

This paper discusses dynamic properties of bubble garnet thin films. The dynamic properties considered are Gilbert damping parameters, saturation velocity, and wall mobility. The parameters are evaluated to facilitate the search for desirable garnet thin film compositions. Given bubble diameter and Q-value, the computer prints out all compositions which meet the desired requirements. The computer model determines magnetization, anisotropy, damping, velocity, mobility among others from the film compositions. The computer modeling program is described by an algorithm detaling its operation.

I. 서 론

최근들어 자기 가넷 박막을 이용한 응용분야에 대해 관심도가 높아지고있으며, 그 응용분야는 자기 버블 기억소자, 수직 Bloch line 기억소자, 광자기 기억소자, 광자기 디스크, 광통신 소자등이 있다.[1,2] 이러한 자기 가넷 박막의 동적특성은자기 버블의 동적특성을 설명하는데 사용된다. 자기 가넷 박막의 동적 특성 측정을 구현하는데 액상성장법(Liquid Phase Epitaxy)으로 성장시키기 이전에 미리 원소 성분비에 따르는 동적 특성인 Gilbert Damping 파라메타, 포화속도, 자벽(magnetic domain wall)이동도 그리고 자화값, Anisotropy값등 자기적특성을 찾기 위해서 컴퓨터로 시뮬레이션 하였다.

II. 본 론

1. 동적 특성

버블의 동적인 특성을 설명하는데 중요한 파라메터는 Gyromagnetic 비례상수, Damping, 자벽이동도, 포화속도 이다.[3,4] Gyromagnetic 비례상수(γ)는 식 (1) 로 표현할 수 있다.

$$\gamma = \frac{ge}{2mc} \qquad \text{-------(1)}$$

여기서 e 는 전자의 전하량이며, c 는 광속도이다. γ 는 g 인자의 함수로서 실험함수 있으며 Exchange constant 가 2 - 4 [10^{-7}erg/cm] 범위와 Q 값이 1.5 - 6 사이값일때 γ는 보통 1.8 * 10 10^{6}S이다. Damping 값은 γ 를 사용하여 식 (2) 로 표현 된다.

$$\lambda' = \frac{\alpha M_s}{\gamma}. \qquad \text{--------(2)}$$

여기서 α 는 Gilbert damping 파라메터이며, Ms 는 포화 자화이다. 자벽이동도는 식(3)에 의해서 나타낼 수 있다.

$$\mu_w = \frac{M_s}{\lambda'}\sqrt{\frac{A}{K_u}} \qquad \text{----------(3)}$$

여기서 A 는 Exchange constant 이며, Ku는 Uniaxial anisotropy 이다. 자벽 이동도에 실제적인 영향을 미치는 파라메터는 λ' 값이다. Ms, Ku 값의 변화가 작아서 자벽 이동도에는 큰 영향을 미치지 못하며 실제적인 영향을 미치는 파라메터는 λ' 값이다.

이러한 이동도를 크게 하기 위해서는 λ' 값이 작은 희토류 원소에 Gd, Lu, Y (표 1 참조) 를 사용하여야 한다.
그렇지만 이러한 희토류원소의 선택은 Anisotrpy에 큰 영향을 준다.
포화속도는 식 (4)에 의해서 계산된다.[5]

$$V_0 = \frac{\gamma}{2}\sqrt{\frac{A}{Q}} \qquad (4)$$

여기서 Q는 Quility factor 이다.[6] 또한 여기서 Sm 과 Eu 의 damping 값을 보면, Eu 의 damping 값이 작아서 자벽 이동도의 향상을 위해서 좋지만 Sm 을 선호하는 이유는 버블 기억 소자에서는 magnetostriction(λ_{111}) 값이 마이너스값을 가져야 하므로 Eu 보다 Sm 을 사용한다.

2. 동적특성 계산을 위한 자기특성

가넷 박막의 자기적 특성은 희토류 금속에 의해 크게 좌우되며 철 Site 는 magnetization 과 exchange 계수를 결정한다.[3] 한 종류 이상의 희토류 금속을 가진 가넷 (복합 희토류 가넷) 의 특성은 한 종류의 희토류 금속으로 구성되어있는 가넷 (순수 희토류 가넷) 의 특성들을 linear extrapolation 함으로 얻어진다. 표 1 은 순수 희토류 가넷들의 특성을 나타낸다. 따라서 복합 희토류 가넷의 특성은, 복합 희토류 가넷을 구성하는 각각의 희토류 원소들을 포함한 순수 희토류 가넷들의 특성을 그들의 구성비율에따라 weight 를 주어 합한 값으로 나타내어진다.
즉,

$(RE_3Fe_5O_{12})$

RE	$4\pi M_s$ Gauss	T_{curie} °C	A_o 10^{-12}m	λ_{111} 10^{-6}	λ_{100} 10^{-10}	λ' Oe/sec	K_{1j}Eu	K_{1j}Sm
Sm	1675	576	12.529	-8.50	21.00	12.00	0.00	0.00
Eu	1172	566	12.497	1.80	21.00	2.10	0.00	0.00
Gd	84	564	12.470	-3.10	0.00	0.52	0.00	0.00
Y	1757	533	12.375	-2.40	-1.40	0.52	1.00	3.33
Lu	1815	549	12.283	-2.40	-1.40	0.52	10.50	14.00
Tm	1397	549	12.322	-5.20	1.40	1.20	6.00	10.00
Dy	376	563	12.405	-5.90	-12.60	26.00	0.00	0.00
Tb	200	568	12.436	12.00	-3.50	48.00	0.00	0.00
Ho	880	553	12.374	-4.00	-3.40	42.00	0.00	0.00
Yb	1560	548	12.302	-4.50	1.40	4.20	0.00	0.00
Er	1240	566	12.346	-4.90	2.00	7.00	0.00	0.00
Bi	2170	--	12.621	-1.50	-2.20	1.00	0.00	0.00

표 1. 순수 희토류 가넷 특성

Table 1. Pure Rare - Earth Garnet properties

$$\epsilon'_{mixed} = \Sigma \epsilon_{RE} X_{RE}/3.0 \qquad (5)$$

여기서 ϵ 는 Property, RE 는 희토류 금속의 Property, X 는 희토류 구성물의 단위구조식 당 함유질량이다.

Magnetostriction 계수(111 과 100),Magnetization, Damping 들은 비례방법에 의해서 Exchange 에너지 계수를 계산하여 구해진다. 철은 Octahedral 과 Tetrahedral site 에 분포되어 있는데 Exchange 계수는 철 원소의 site 선호도로 부터 계산된다. Ge는 98% Tetrahedral site 에, Sm 은 100% Octahedral, Ga은 90% Tetrahedral, 10% Octahedral site에 분포되는 것으로 가정한다. Exchange 계수는 식 (2)에 의해서 결정된다.

$$A\,[10^{-7}] = 3.7 - 1.7X_{tetrahedral} - 3.9X_{octahedral} \qquad (6)$$

$$\epsilon_{mixed} = \epsilon'_{mixed} \times (A[10^{-7}]/3.7) \qquad (7)$$

식 (7)에서의 ϵ' 는 식 (5)에서, A는 식 (6)에서 구할 수 있다. GGG ($\{Gd3\}$ $[Ga5]$ $(O12)$)의 Lattice 간격은 12.384 Å 이다. Iron Garnet Lattice Mismatch 는 식 (5)에 의해서 weight를 가하는 방법을 이용하여 계산된다. Iron site 가 Ga, Ge 으로 치환된 lattice 상수의 변화는 식 (8)와 (9)에 의해 구해진다.

$$\Delta a_{iron\text{-}sites} = -[0.01352 * X_{Ga} - 0.001083 * X_{Ga}^2] + [0.008917 * X_{Ge} - 0.012197 * X_{Ge}^2] \qquad (8)$$

$$\Delta a = 12.3764 + \Delta a_{iron\text{-}sites} + [(a_{RE} - 12.376) X_{RE}/3.0] \qquad (9)$$

식 (8)와 (9)는 출판된 Data 값으로 부터 Curve Fitting에 의해구해진 식이다.

여기서 RE는 순수한 희토류 garnet의 Lattice 간격이다. 결정성장에 의한 Anisotropy는 작은 이온과 큰 이온의 상호관계에의한 pair ordering model 을 이용하여 계산한다.[10] 계수 Kij 는 각 쌍의 희토류에 의한 Anisotropy를 나타낸다. ($K_g = \Sigma K_{ij} * X_i * X_j$) Sm과 Eu 와 다른 희토류 원소에 의한 Aisotropy 는 pair ordering model로 정확히 예측된다. 그러나 Bi의 Anisotropy는 크고 작은 이온 모델을 사용하여 설명할 수 없다. 왜냐하면 Bi의 충망에 직접적으로 비례하기 때문이다. Lattice Mismatch와 Magnetostriction 계수를 이용하여 Stress에 의한 Anisotropy 를 계산할 수 있으며 결정 성장에 의한 Anisotropy와 Stress에 의한 Anisotropy의 합이 총 Uniaxial Anisotropy (Ku) 이다. Q와 버블 직경이 주어지면 필요한 Ku와 4π Ms 를 다음 두 식으로부터 구할 수 있다.

$$Q = Ku / 2\pi Ms^2 \qquad (10)$$

$$l = 16\pi(A\,Ku)/(4\pi Ms) = (\text{버블직경})/9 \qquad (11)$$

여기서 l 은 물질의 특성 길이이다.
본 모델은 Q 값과 버블직경 및 박막구성 원소들이 주어지면 컴퓨터로 박막의 제반 특성을 시뮬레이션하여 주어진 조건에 적합한 박막구성 결과를 알려준다.

III. 실험 및 고찰

가넷 필름에 대한 각각의 Prameter 들을 효율적으로 컴퓨터 시뮬레이션 하기 위하여 PASCAL로써 프로그램을 작성하였다.

이 프로그램은 버블직경과 Q가 주어지면 Exchange Constant, Saturation Magnetization, Uniaxial Anisotrpy, Damping 값을 구하여 Bubble 속도와 Mobility 그리고 Gilbert damping값을 계산한다. 이 시뮬레이션 프로그램의 Flow Chart는 그림1과 같다.

표2는 Bi,Dy,Sm,Lu,Y 를 희토류 원소로 사용하고 Ga 으로 Fe Site 를 치환하였을때 주어진 조건들 (Q(=1.5),d(=0.5um)등)을 만족하는 동적특성 Uw, a,Vo 를 본 프로그램으로 시뮬레이션한 값과이다. 사용자는 얻어진 동적특성들 중 가장 만족스러운 결과를 제공하는 박막구성원소 조성비를 사용하여 실제 박막을 성장하게 된다.

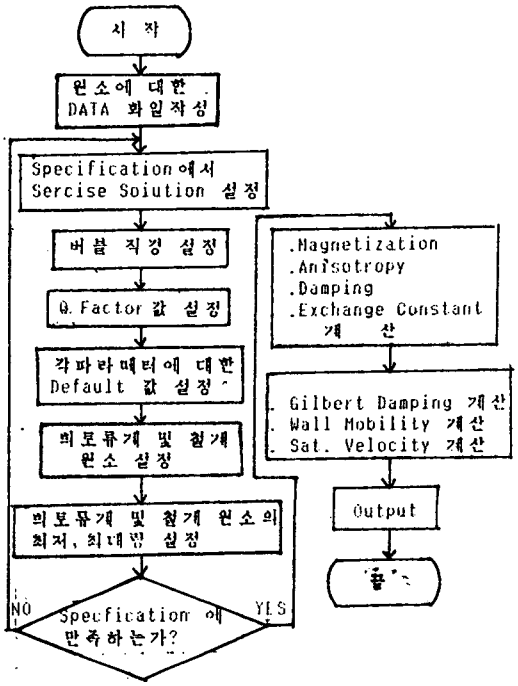

그림1.가넷 박막 시뮬레이션 흐름도
Fig 1.Flow chart of the garnet film simulation

IV. 결 론

본 논문에서 GGG 기판위에 LPE로 자기 가넷필름을 성장시키는데 있어서, 각종 응용에 가장 적합한 가넷필름을 찾기 위하여 동적 특성을 컴퓨터를 이용하여 구성성분비를 시뮬레이션 하였다. 본 시뮬레이션에 의해 원하는 특성을 가진 박막을 성장하는데 필요한 실계, 성장, 측정의 반복 회수를 감소시켜 시간 과 재료의 절약을 가져오리라 기대된다.

```
User requirements:
Bubble diameter: 0.50microns, "Q" value:1.50
Computed requirements:
Film thickness:  0.60microns,"q" value:0.06
Required 4piMs:  1341.0G, required Ku: 10.5
Assuming exchange =3.7
Calculated results:
Composition
          damping Alpha     Uw      Vo
           [E-7]  [Oe/G][Cm/S*Oe][Cm/S]
Bi0.20 Dy0.70 Sm0.20 Lu0.90 Y 1.00 Fe4.87 Ga0.13 012
          7.263¦0.0101¦204.747¦3211.947
Bi0.20 Dy0.70 Sm0.20 Lu1.00 Y 0.90 Fe4.87 Ga0.13 012
          7.263¦0.0101¦209.710¦3289.792
Bi0.20 Dy0.70 Sm0.20 Lu1.10 Y 0.80 Fe4.87 Ga0.13 012
          7.263¦0.0101¦215.036¦3373.346
Bi0.20 Dy0.70 Sm0.20 Lu1.20 Y 0.70 Fe4.87 Ga0.13 012
          7.263¦0.0101¦220.768¦3463.268
Bi0.20 Dy0.70 Sm0.20 Lu1.30 Y 0.60 Fe4.87 Ga0.13 012
          7.263¦0.0101¦226.972¦3560.586
Bi0.20 Dy0.70 Sm0.20 Lu1.40 Y 0.50 Fe4.86 Ga0.14 012
          7.263¦0.0101¦234.554¦3679.538
Bi0.20 Dy0.70 Sm0.20 Lu1.50 Y 0.40 Fe4.86 Ga0.14 012
          7.263¦0.0101¦241.991¦3796.200
Bi0.20 Dy0.80 Sm0.20 Lu0.80 Y 1.00 Fe4.92 Ga0.08 012
          8.112¦0.0111¦177.336¦3107.272
Bi0.20 Dy0.80 Sm0.20 Lu0.90 Y 0.90 Fe4.92 Ga0.08 012
          8.112¦0.0111¦181.885¦3186.981
Bi0.20 Dy0.80 Sm0.20 Lu1.00 Y 0.80 Fe4.91 Ga0.09 012
          8.112¦0.0111¦187.354¦3282.809
Bi0.20 Dy0.90 Sm0.20 Lu1.50 Y 0.20 Fe4.95 Ga0.05 012
          8.361¦0.0122¦201.676¦3903.740
Bi0.20 Dy1.00 Sm0.20 Lu1.00 Y 0.60 Fe5.00 Ga0.00 012
          9.811¦0.0132¦152.286¦3227.109
Bi0.30 Dy0.70 Sm0.20 Lu0.80 Y 1.00 Fe4.86 Ga0.14 012
          7.279¦0.0102¦175.541¦2759.835
```

표2.$\{BiDySmLuY\}_3[FeGa]_5(O)_{12}$ 원소들의 컴퓨터 분석
Table 2.Computer Analysis of $\{BiDySmLuY\}_3[FeGa]_5(O)_{12}$ Materials

참 고 문 헌

[1] Robert.O.Campbell," Magnetic Bubble Material with Isotropic Magnetostriction ", Carnegie-Mallon Univ. 1985
[2] 김 길상, 반도체, 재료및 부품연구회 CAD 연구회 합동 발표회 pp.172 , 1988, 전자공학회
[3] A.H. Eschenfelder, Magnetic Bubble Technology,N.Y. pp.195-203
[4] James W.N, "Bubble Domain Memory Materials" IEEE Trans. MAG-12, pp.327 345, 1976
[5] R.C. Lecraw, J.APPL.Phys.vol.36, pp.901-905, 1965
[6] E.B. Moore, J.APPL.Phys.vol.49, pp.1879-1881, 1965
[7] Andrew H. Eschenfelder,J.APPL.Phys.vol.49,