

## Brillouin Light Scattering을 이용한 GaAs/Fe/Au 구조의 자기이방성

하승석 · 유천열\* · 이석목

인하대학교 물리학과, 인천 남구 용현동 253, 인천 402-751

Kenta Ohta · Takayuk Nozaki · Yoshishige Suzuki  
Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Japan

W. Van Roy

IMEC, Kapeldreef 75, B-3001 Leuven, Belgium

(2008년 7월 31일 받음, 2008년 8월 18일 최종수정본 받음)

GaAs 기판위에 Fe을 성장시킨 이중 접합 구조는 두 물질의 lattice mismatch가 1.4 % 정도로 작기 때문에 결정 상태가 매우 좋은 Fe층을 성장시킬 수 있는 것으로 알려져있다. GaAs/Fe의 계면에서는 많은 흥미로운 현상이 관찰되며, 또한 스핀주입을 이용한 산업적 응용 면으로 가치가 있는 구조로서 활발한 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 GaAs (100) 표면에 Fe층을 썬기 모양으로 두께를 0~3.4 nm로 바꾸어 성장시키고 5 nm 두께의 Au층을 추가 증착시킨 시료를 Brillouin light scattering(BLS) 측정 방법을 이용, 자기이방성에 대해 조사하였다. Fe층 두께를 변화시켜가며 자화 용이축과 곤란축 방향으로 외부자기장의 세기에 대한 스핀과 들뜸의 의존도와 외부자기장의 방위각에 대한 스핀과 들뜸의 의존도를 조사하였다. 측정된 결과의 정량적 분석을 통해 Fe층의 두께에 따라 일축 자기이방성 상수와 이축 자기이방성 상수를 구하였다. GaAs층 위에서 성장된 Fe층의 자기이방성은 GaAs 기판에 영향을 받아 Fe층의 두께가 얇을수록 큰 일축 자기이방성을 가지고 박막의 두께가 증가함에 따라서 Fe 본래의 이축 이방성의 크기가 증가함을 확인하였다.

주제어 : GaAs/Fe/Au, 자기이방성, Brillouin light scattering

### I. 서 론

반도체 기판 위에 자성박막을 증착한 구조는 스핀트로닉스 응용과 관련하여 꾸준히 연구되어 온 이중 접합구조이다[1]. 그 중에 GaAs 기판 위에 성장한 Fe 박막의 경우 두 물질의 격자 불일치 정도가 1.4 %로서 잘 맞아 떨어지기 때문에 결정성이 매우 좋은 Fe층을 얻을 수 있으며, 스핀주입과 관련된 자성소자로서의 흥미로운 전기적, 자기적 특성을 갖고 있으므로 많은 관심을 받고 있다[2-5]. GaAs/Fe 구조의 주목할 만한 특성은 GaAs/Fe 계면 근처의 Fe층이 자성을 잃게 되는 점과, Fe층의 두께가 10 단원자 층 이하로 매우 얇을 경우, Fe 본연의 자기이방성인 이축 이방성 외에 추가로 일축 이방성을 갖게 된다는 점이다[6]. 아직까지 자기이방성이 변하는 근본적인 원인은 불확실하지만[7, 8] GaAs과 Fe층의 계면에서 발견되는 것이라고 추정되고 있다[9, 10].

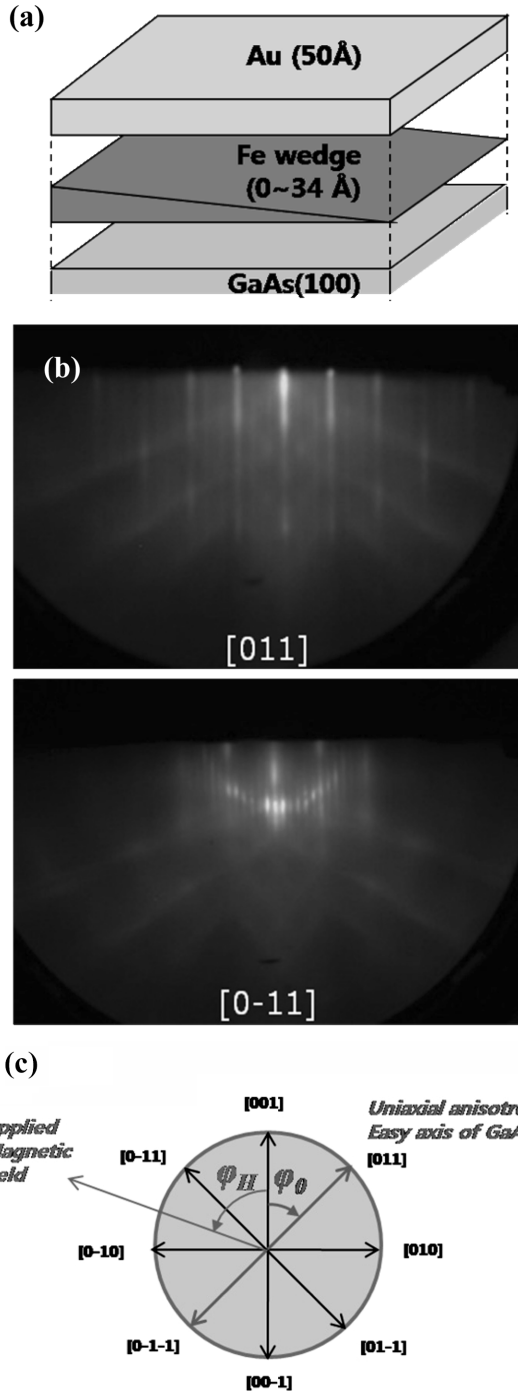
GaAs/Fe 구조는 다양한 측정방법을 통해 많은 연구가 되고 있으며, 그 중 비 접촉, 비 파괴 측정이 가능하고 수 단원자 층 두께에 대한 정확한 측정이 가능한 감도를 가진 광학적 측정 방법인 magneto-optical Kerr effect(MOKE)[10-

16]와 Brillouin light scattering(BLS)[17-22] 측정방법을 동원하여 자기적 특성에 대한 분석이 이루어져 왔다. BLS 측정방법은 열적으로 들뜬 스핀파의 수 GHz 영역대인 주파수를 측정함으로써 교환강성, 포화자화, 자기이방성 등의 자기적 성질을 비 접촉방식으로 국소적으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이를 활용하여 Fe층의 다양한 두께에 대해 자화 용이축과 곤란축 방향으로 외부자기장 의존도를 측정했으며, 방위각 의존도를 측정함으로써 GaAs/Fe 구조의 자기이방성을 조사하였다.

### II. 실험 방법

본 실험에서는 n<sup>+</sup>-GaAs(100) 상용 웨이퍼 위에 Si이 5 × 10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>의 농도로 포함된 n-GaAs층을 1000 nm 두께로 추가 성장시킨 기판을 사용하였다. 진공챔버 안에서 이 기판을 열처리하여 n-GaAs 표면의 대칭성을 재배열시켰다. 재배열된 웨이퍼 표면은 뒤에 논의된 바와 같이 실시간 reflection high-energy electron diffraction(RHEED)를 이용해 4 × 1과 2 × 6의 대칭성의 혼합된 상태임을 확인하였다. 이렇게 준비된 GaAs 기판 위에 MBE(molecular beam epitaxy) 장비를 이용해 electron beam evaporation 방법으로 Fig.

\*Tel: (032) 860-7667, E-mail: cyyou@inha.ac.kr



**Fig. 1.** (a) The Fe wedge layer was grown on  $n^+$ -GaAs(100) surface and was capped with a 5-nm thick Au layer by molecular beam epitaxy (MBE) system. The thickness of the Fe wedge layer was 0 to 3.2 nm. The direction of the thickness gradient is [011]. (b) The upper picture shows RHEED images of the GaAs surface along direction and the lower picture represents GaAs surface along [011] direction after the annealing process.

1(a)와 같이 썩기모양으로 Fe층을  $[0\bar{1}1]$  방향으로 0~3.2 nm의 두께를 가지도록 성장시켰다. Fe층의 위에는 챔버 외부에서

자성측정 시 Fe층의 산화나 오염을 막기 위해 보호 층으로서 Au층을 Fe층의 성장과 같은 증착 방법으로 5 nm의 균일한 두께로 성장시켰다. Fe층과 Au층의 성장은 GaAs 기판의 재배열을 위한 열처리 후 기판의 온도가 100 °C로 측정되었을 때 이루어졌다. 금속박막을 성장시키는 동안 진공도는  $7 \times 10^{-8}$  Pa로 유지하였으며, 증착율은 0.01 nm/s로 유지하였고 이는 quartz microbalance 모니터로 확인할 수 있었다.

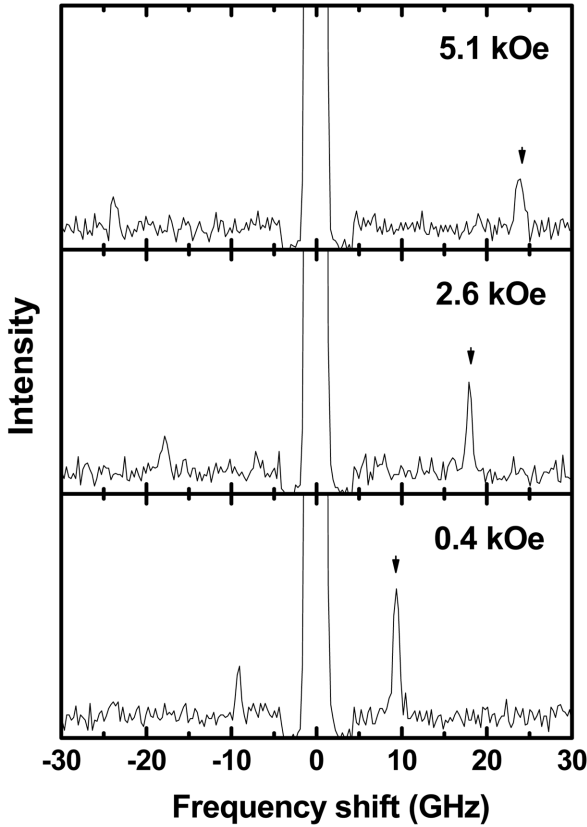
성장된 썩기모양의 자성박막의 자기적 특성을 BLS (Brillouin Light Scattering) 측정을 통해 조사하였다. 스핀파의 Fe층의 두께 의존성과 방위각 의존성 측정을 위해 자기장을 5.1 kOe 크기로 박막의 면내에서 방향을 바꾸어 가면서 인가하였으며, 자화용이축과 자화곤란축에 대한 외부 자기장 세기 의존성 측정 시에는 0~5.1 kOe 범위의 자기장을 인가하여 측정하였다. Fe층의 두께 의존성, 자화용이축에 대한 자기장 의존성 측정 시에는  $[011]$  방향으로 자기장을 인가하였으며, 자화곤란축에 대한 자기장 의존성 측정을 위해서는  $[0\bar{1}1]$  방향으로 자기장을 인가하였다. 스핀파의 방위각 측정은 15° 이내의 방위각 변화를 주어 0°~360° 범위에서 측정하였다. 자기장과 결정방향의 관계는 Fig. 1(c)에 나타내었다.

BLS 측정에는 514.5 nm 단일 파장을 가지고 p 파로 편광된  $Ar^+$  레이저를 160 mW의 크기로 유지하여 사용하였으며, 이를 시료 표면에 45°로 입사하여 측정하였다. 이렇게 시료 표면에 입사된 빛의 후면 산란광을 Sandercock type(3+3)-pass tandem Fabry-Pérot 간섭계를 통해 분석하여 스핀 파를 측정하였다[23].

### III. 실험결과 및 고찰

Fig. 1(b)는 실험에 사용된 GaAs 웨이퍼를 550 °C 온도로 10분 동안 열처리하여 재배열시킨 표면의 RHEED 이미지이다. 이는  $4 \times 6$  대칭성을 가지는 이미지와 동일하나 D. K. Biegelsen 연구팀에서 연구한 결과를 고려하면  $4 \times 6$  대칭성은 550 °C 보다 높은 온도에서 열처리한 후에 얻어질 수 있는 것으로 알려져 있으므로, 본 실험에서 열처리를 한 후의 GaAs 표면은  $4 \times 1$ 과  $2 \times 6$  대칭성이 섞여 있는 상태로 추측된다[24].

Fig. 2(a)는 각각 다른 세기의 자기장을 시료에 인가하였을 때 얻어진 BLS 스펙트럼의 대표적인 예이다. Fig. 2(a)에서 21~34 GHz 진동수 범위에서 볼 수 있는 peak은 Stokes 영역과 anti-Stokes 영역의 비대칭성을 갖는 Damon-Eshbach 모드를 확연하게 보여주는 것이다. Fig. 3(a)와 같이 Fe층의 두께 감소에 따라 DE 모드의 진동수가 감소함을 볼 수 있다. 만약 Fe층의 자기이방성이 부피에만 의존한다고 하면 두께가 감소함에 따라 스핀파의 진동수 역시 선형적으로 감소하게 된다. 그런데, Fe층이 약 1.6 nm 보다 얇은 영역에서 스핀파의



**Fig. 2.** Representative Brillouin spectra taken from a 2-nm-thick Fe layer for different values of the applied magnetic fields. The external field is applied along the [011] direction. (c) For investigation of in-plane angle dependence of spin wave, the  $\phi$  which is angle between direction of magnetic field and crystal direction [011] was varied. The  $\phi_0$  is angle between [011] and easy axis of uniaxial anisotropy which is determined with MOKE measurement.

진동수가 Fig. 2(a)에 나타내어진 점선과 같은 선형적인 경향성을 따르지 않고 급격하게 감소하는 것으로부터 표면에서 기인한 자기이방성이 존재함을 알 수 있다[25].

BLS 측정 결과의 정량적 분석을 위해서 Fe층의 두께  $d$ 와 스핀파의 자기박막 표면에 평행한 성분  $q_{\parallel}$ 이 매우 작은 조건 ( $dq_{\parallel} \ll 1$ ; ultrathin film approximation)이 성립하는 범위에서 스핀파를 잘 설명하는 식 (1)을 사용하였다[26-28].

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \left[ H \cos(\phi - \phi_H) + \frac{2A}{M_S} q_{\parallel}^2 + H_{\alpha} + 4\pi D M_S \left(1 - \frac{q_{\parallel} d}{2}\right) \right] \times \left[ H \cos(\phi - \phi_H) + \frac{2A}{M_S} q_{\parallel}^2 + H_{\beta} + 2\pi D M_S q_{\parallel} d \right] \quad (1)$$

여기서  $H_{\alpha}$ 와  $H_{\beta}$ 는 각각 아래와 같이 정의된 이방성 자기장이며,

$$H_{\alpha} = \frac{K_C}{M_S} (2 - 4 \sin^2 \phi + 4 \sin^4 \phi) - \frac{2K_U}{M_S} \cos^2(\phi - \phi_0)$$

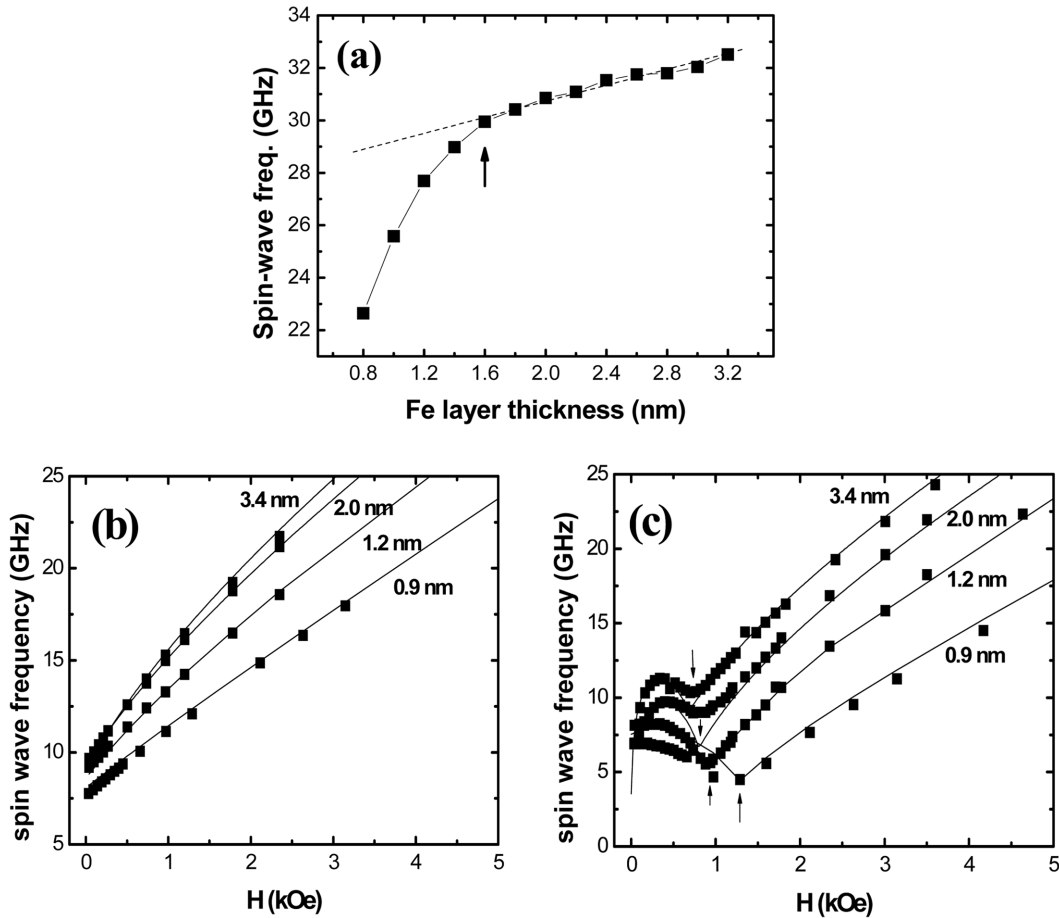
$$H_{\beta} = \frac{K_C}{M_S} (2 - 16 \sin^2 \phi + 16 \sin^4 \phi) - \frac{2K_U}{M_S} (1 - 2 \sin^2(\phi - \phi_0)) \quad (2)$$

$\gamma$ ,  $A$ ,  $D$ 는 각각 gyromagnetic ratio ( $\gamma = \gamma_e g/2$ ,  $\gamma_e = 1.759 \times 10^7$  Hz/Oe,  $g = 2.1$ ), stiffness 상수 ( $A = 2.0 \times 10^{-6}$  erg/cm), demagnetizing factor ( $D = 1 - 0.2338/n$ ,  $n$ 은 monolayer 수)이며 [29],  $\phi$ ,  $\phi_H$ ,  $\phi_0$ 은 각각 [001]축과 자화방향, 외부자기장, 자화용이축의 사이각을 나타낸다.  $K_C$ ,  $K_U$ 은 본 연구의 주 관심사인 자성층의 이축 및 일축 자기이방성 상수들이다.

Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)는 스핀파 진동수의 외부자기장 의존성을 보여주는 결과로서 그림의 점들과 실선은 각각 측정 결과와 식 (1)을 이용해 계산된 결과를 나타낸다. 외부자기장이 [011]과 평행한 방향으로 인가하였을 때의 결과인 Fig. 3(b)의 경우, 스핀파 진동수는 외부자기장에 대해 단조감소 경향성을 보이며, Fig. 3(a)에서 보인 결과와 마찬가지로 Fe층의 두께에 대해 비례하여 감소한다. 이것은 전형적인 스핀파의 자화용이축방향 의존성을 나타내며, 선행 연구로써 측정된 MOKE 결과와도 일치한다. 반면에 외부자기장을 [0 $\bar{1}$ 1] 방향으로 평행하게 인가하고 측정한 스핀파 진동수는 (Fig. 3(c)) 외부자기장 변화에 대해 Fig. 3(b)와 다른 경향성을 보인다. 스핀파의 변화율이 바뀌는 critical field보다 작은 자기장 이하에서의 스핀파 진동수는 다소 복잡한 양상을 보이지만 Fig. 3(c)에서와 같이 일반적인 자화곤란축에 대한 외부자기장 의존성과 일치한다 [19, 21]. 이 결과 또한 선행실험 결과인 MOKE 측정 결과와 일치한다. 외부자기장 방향에 따른 스핀파의 경향성을 통해 본 연구에서 측정된 GaAs/Fe/Au 구조는 일반적인 Fe 결정이 가지고 있는 이축 자기이방성과는 다른 이방성을 갖고 있음을 예측할 수 있으며, 이는 외부자기장의 방위각을 변화시켜 측정된 스핀 파의 경향성을 통해 정성적, 정량적으로 분석할 수 있다.

Fig. 4는 Fe 층의 두께 변화에 따른 인가 자기장의 방위각 의존성을 측정된 결과이다. Fe층이 3.2 nm인 경우 4극 대칭성이 확연히 보이며 Fe층의 두께가 감소함에 따라 4극 대칭성이 감소함을 볼 수 있다. 또한 Fe층의 두께가 얇아질수록 스핀파 진동수의 변화가 Fe층의 두께가 두꺼운 경우보다 훨씬 급격하므로 0.9 nm 두께의 Fe층은 2극 대칭성이 더 우세하다고 볼 수 있다. 이러한 경향성은 식 (1)을 이용한 정량적 분석을 통해 이해할 수 있다.

Fig. 5에 식 (1)로 수치해석을 통해 구한 자기이방성 상수의 Fe층 두께에 따른 변화를 나타내었다. 예상한 바와 마찬가지로 Fe층의 두께가 감소함에 따라 이축 자기이방성 상수  $K_C$ 는 감소하는 경향성을 갖는데 반해, 일축 자기이방성 상수  $K_U$ 의 크기는 상대적으로 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Fe층의 두께가 1.2 nm 이하의 두께에서  $K_C$ 의 값이 선



**Fig. 3.** (a) The behavior of the DE mode frequency as a function of the Fe film thickness with magnetic field of 5.1 kOe. In the thin Fe layer (less than 1.6 nm) the DE surface mode becomes an interface-anisotropy-dominated mode as expected from  $1/d$  dependence of the interface anisotropy contribution. The dashed line represents thickness dependence of spin wave without interface anisotropy, and the solid line is for eyes guideline. (b) and (c) represent experimental (points) and calculated (curves) spin-wave frequencies for Fe films of different thicknesses as a function of the applied magnetic field along (b) [011] direction and (c) [01 $\bar{1}$ ] direction. These directions correspond to easy- and hard-axes of GaAs/Fe/Au system, respectively. In the both cases, spin wave frequency has proportional relation with Fe thickness above the critical field represented by arrow.

형적인 경향성에서 벗어난 것을 볼 수 있는데 이는 Justin M. Shaw 팀에서 분석한 바와 같이[21] Fe층이 얇을 경우에 보호 층인 Au층이 Fe층의 격자에 변형을 야기시켜  $K_C$ 의 선형 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다. 여기서 수치해석을 통해 얻어진  $K_U$ 는 음수이며 이는 단위 부피당 자기 에너지 밀도의 일반적인 표현인 아래와 같은 식을 통해 이해할 수 있다.

$$E = K_C \cos^2 \phi \sin^2 \phi + K_U \cos^2(\phi - \phi_0) - M_s H \cos(\phi_H - \phi) \quad (3)$$

식 (3)은 수직 자기이방성 에너지를 고려하지 않은 표현식이며, 이방성 자기장은 이 식으로부터 얻어진다. 고려하는 자성 박막이 일축 자기이방성과 이축 자기이방성을 모두 갖고 있다고 가정하고 자화방향이 일축 자기이방성의 자화용이축과 평행할 때 즉,  $\phi = \phi_0$ 일 때 자성박막의 일축 자기이방성 에너지는 최소가 되어야 함으로  $K_U$ 가 음수인 것은 타당하다. 자

기이방성에 대한 분석은 식 (4)와 같이 자기이방성을 자성박막의 표면에서 기인된 것과 부피에서 기인된 것으로 나누어 고려해 볼 수 있다[19].

$$K_C = K_C^V + \frac{2}{d} k_C^S, \quad K_U = K_U^V + \frac{2}{d} k_U^S \quad (4)$$

Fig. 6과 같이 선형 fitting을 통해 각각의 상수들을 구해보면 각각 다음과 같다.

$$K_C^V = (0.80 \pm 0.1) 10^5 \text{ erg/cm}^3, \quad K_U^V = -(0.26 \pm 0.06) 10^5 \text{ erg/cm}^3 \\ K_C^S = -(0.19 \pm 0.06) 10^{-2} \text{ erg/cm}^2, \quad K_U^S = (0.84 \pm 0.04) 10^{-2} \text{ erg/cm}^2$$

$K_C^V$ 의 절대값의 크기가  $K_U^V$ 의 절대값보다 크며, 반면에  $k_U^S$ 의 크기가  $k_C^S$ 보다 더 큰 것은 본 실험에서 고려하는 자성박막의 이축 자기이방성은 부피에서 기인한 것이며, 일축 자기이방성은 표면에서부터 기인된 것임을 알 수 있다. 참고로 Fe의

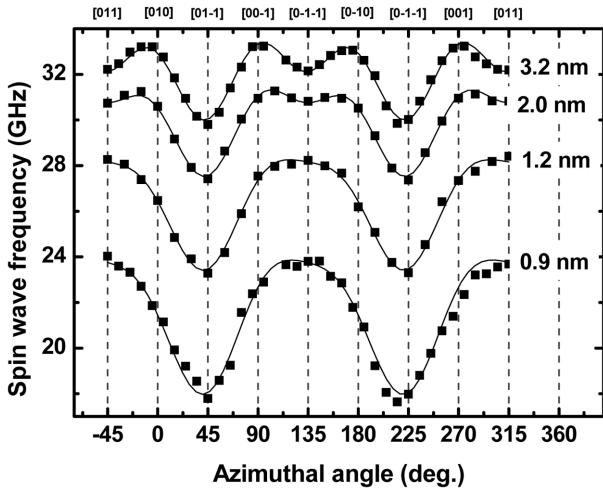


Fig. 4. Experimental (points) and calculated (curves) spin-wave frequencies for Fe films of different thicknesses as a function of the in-plane direction of the applied magnetic field relative to the [001] reference direction. The field intensity is 5.1 kOe, and the incident angle of light is 45°.

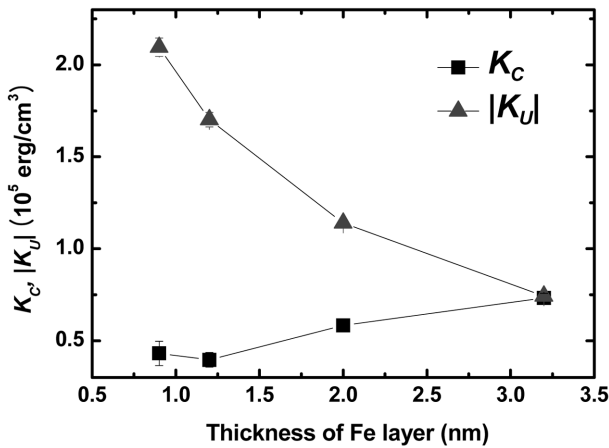


Fig. 5. The anisotropy constants behaviors as a function of the Fe layer thickness. The biaxial anisotropy reduces with decreasing the film thickness while the uniaxial anisotropy increases monotonically.

bulk의 이방성 상수의 값은  $K_C(bulk) = 4.8 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ 으로 알려져 있다. 다른 연구 팀에서 얻은 각각의 자기이방성 상수는 Table I에 잘 나타내었다. 일축 자기이방성 상수를 먼저 살펴보면 부피에서 기인한  $K_U$  값이 다른 연구 팀에 비해 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이것은 다른 연구 팀과는 다른 GaAs 표면 대칭성에서 기인한 것으로 판단된다. 또한 일축 자기이방성 상수의 부피 항  $K_C^V$ 도 마찬가지로 다른 연구 팀에 비해 작은 값을 나타내고 있는데 이는 Fe층의 증착 온도가 다른 연구 팀에 비해 다소 높고 증착 시 높은 온도는 GaAs 기판의 As이 Fe층으로 더 많이 확산되게 한다[5]. As의 확산은 Fe층에 부분적으로 Fe-As 합금을 만들며, 이는

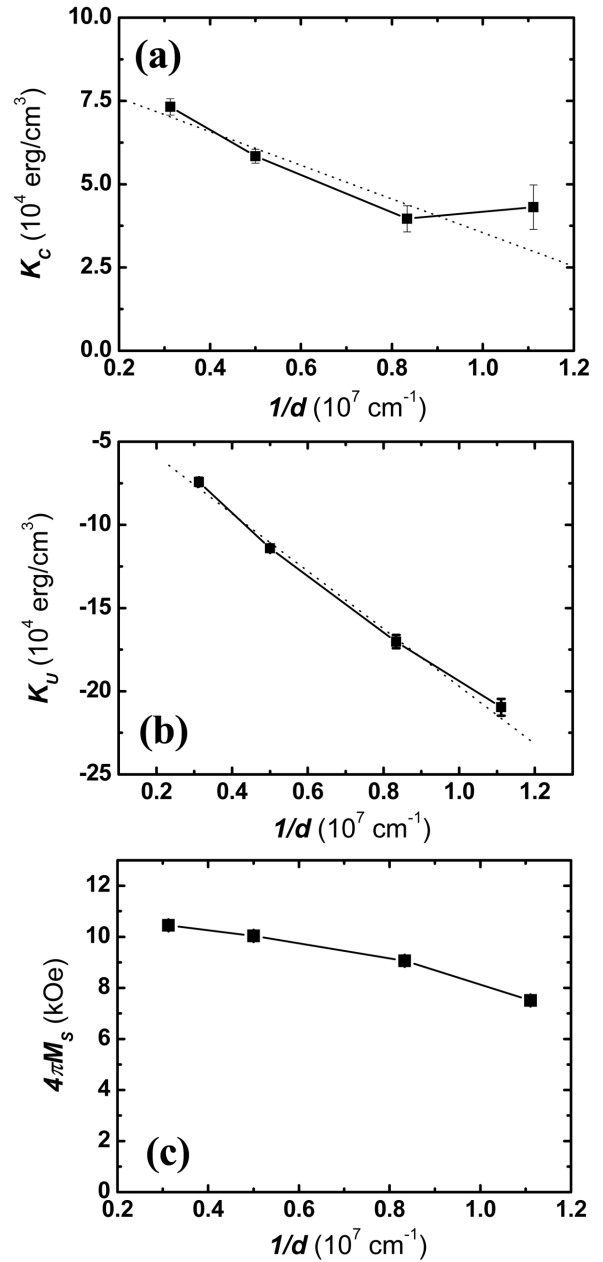


Fig. 6. Evolution of The biaxial ( $K_C$ ) uniaxial ( $K_U$ ) and the effective magnetization as a function of the reciprocal Fe thickness. The points are the values obtained data, while the dotted lines result from a linear fit of the data points using Eq. (4).

Fe층의 자기적 성질에 영향을 미치게 되므로 본 연구결과에서 얻은 결과와 같이 일축 자기이방성의 저하를 가져온 것으로 판단할 수 있다. GaAs 웨이퍼를 사용해 증착된 Fe층은 GaAs 표면의 대칭성의 특성에 따라 일축 자기이방성을 가질 수 있으며, 이는 GaAs의 표면이 Ga-rich이나 As-rich 상태에 따라 매달링 본드의 방향성에서도 기인된다고 볼 수 있다[5].

본 연구에서 수행된 수치해석을 통해 유효 자화율  $4\pi M_{eff}$  ( $= 4\pi DM_S - 2K_{out}/M_S$ ) 또한 얻어질 수 있으며 그 경향은

**Table I.** Comparison of measured values of the surface and volume components in  $K_U$  and  $K_C$  from other published reports respected to GaAs surface reconstruction, materials of overlayer and deposition temperature. All values were obtained by BLS measurement.

Anisotropy	Surface of GaAs	Over-layer	Deposition temperature	Volume component ( $10^5$ erg/cm <sup>3</sup> )	Surface component ( $10^{-2}$ erg/cm <sup>2</sup> )	Reference
Uniaxial ( $K_U$ )	(4×1)+(2×6)	Au	100 °C	-0.24±0.03	1.7±0.06	This work
	(4×6)	Al	20~40 °C	-2.5±0.2	-1.9±0.2	[21]
	(4×6)	-	RT	-0.05±0.1	2.2±0.1	[19]
	(4×6) or (4×1)+(2×6)	Au	RT	0	-10±1.0	[9]
Biaxial ( $K_C$ )	(4×1)+(2×6)	Au	100 °C	0.86±0.3	-0.5±0.06	This work
	(4×6)	Al	20~40 °C	3.8±0.3	-0.2±0.2	[21]
	(4×6)	-	RT	3.4±0.3	-1.2±0.4	[19]
	(4×6) or (4×1)+(2×6)	Au	RT	3.7±0.3	-3.2±0.5	[9]

Fig. 6(c)와 같은 변화를 보인다. Fig. 6(c)는 Fe층 두께의 역수에 대해 표현되었으며,  $4\pi M_{eff}$ 은 알려진 Fe의 값인 21 kOe 보다 작은 값을 가지며 그 두께가 얇을수록 감소함을 볼 수 있다. 하지만 본 실험에서는 수직 자기이방성에 대한 고려를 하지 않은 관계로 그 경향성만 언급하고자 한다.

#### IV. 결 론

열처리를 통해 재배열된 표면을 가진 GaAs 웨이퍼 위에 Fe을 그 두께가 0~3.4 nm인 췌기 모양으로 성장시키고 보호층으로 Au층을 5 nm로 증착시킨 시료를 BLS 측정을 통해 자기이방성에 대해 조사하였다. GaAs/Fe/Au 구조의 스핀파는 각각의 Fe층의 두께에 대해 외부자기장의 세기와 방향, 방위 각에 대해 측정되었으며, 정량적인 분석을 통해 Fe 본연의 이축 자기이방성과 일축 자기이방성 또한 가지고 있음을 알 수 있었다. 분석된 각각의 자기이방성 상수는 Fe층의 두께에 대한 의존성을 가지고 있었으며, Fe층의 두께가 얇을수록 이축 자기이방성은 감소하는 반면 일축 자기이방성은 증가하는 경향을 알아내었다. 이러한 결과로부터 GaAs/Fe/Au 구조의 일축 자기이방성은 GaAs 표면과 Fe층 사이의 계면에서 발현됨을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2006-2006-312-C00529).

#### 참고문헌

[1] J. F. Gregg, I. Petej, E. Jouguelet, and C Dennis, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35**, R121 (2002).  
 [2] S. Datta and B. Das, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 665 (1990).  
 [3] G. A. Prinz, *Phys. Today*, **48**, 58 (1995).

[4] F. J. Jedema, A. T. Filip and B. J. van Wees, *Nature*, **410**, 345 (2001).  
 [5] G. Wastlbauer and J. A. C. Bland, *Adv. Phys.*, **54**, 137 (2005).  
 [6] F. Bensch, R. Moosbuhler, and G. Bayreuther, *J. Appl. Phys.*, **91**, 8754 (2002).  
 [7] A. Filipe, A. Schuhl, and P. Galtier, *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 129 (1996).  
 [8] D. Sander, *Rep. Prog. Phys.*, **62**, 809 (1999).  
 [9] S. McPhail, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **67**, 024409 (2003).  
 [10] M. Brockmann, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **198-199**, 384 (1999).  
 [11] M. Gester, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **80**, 347 (1996).  
 [12] Y. B. Xu, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **58**, 890 (1998).  
 [13] T. L. Monchesky, B. Heinrich, R. Urban, and K. Myrtle, *Phys. Rev. B*, **60**, 10242 (1999).  
 [14] N. A. Morley, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **300**, 436 (2006).  
 [15] N. A. Morley, *et al.*, *J. Phys: Condens. Matter*, **17**, 1201 (2005).  
 [16] N. Lei, *et al.*, *Thin Solid Films*, **515**, 7290 (2007).  
 [17] R. J. Hicken, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.*, **145**, 278 (1995).  
 [18] A. Yoshihara, *et al.*, *J. Magn. Soc. Japan*, **23**, 161 (1999).  
 [19] N. Madami, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **69**, 144408 (2004).  
 [20] K. H. Han, Y. P. Lee, J. G. Kim, and S. Lee, *J. Korean Phys. Soc.*, **46**, S146 (2005).  
 [21] J. M. Shaw, S. Lee, and C. M. Falco, *Phys. Rev. B*, **73**, 094417 (2006).  
 [22] S. Tacchi, *et al.*, *Surf. Sci.*, **601**, 4311 (2007).  
 [23] K. H. Han, J. H. Cho, and S. Lee, *J. of Magnetism*, **12**, 27 (2007).  
 [24] D. K. Biegelsen, R. D. Bringans, J. E. Northrup, and L.-E. Swartz, *Phys. Rev. B*, **41** 5701 (1990).  
 [25] G. Gubbiotti, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **60**, 17150 (1999).  
 [26] G. Gubbiotti, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **56**, 11073 (1997).  
 [27] G. Carlotti and G. Gubbiotti, *J. Phys: Condens. Matter*, **14**, 8199 (2002).  
 [28] B. Hillebrands, *Light Scattering in Solids vol 7*, edited by M Cardona and G Guntherodt (Berlin: Springer) (2000).  
 [29] B. Heinrich, Z. F. Celinski, J. F. Cochran, A. S. Arrott, and K. Myrtle, *Phys. Rev. B*, **44** 530 (1990).

## Brillouin Light Scattering Study of Magnetic Anisotropy in GaAs/Fe/Au System

**Seung-Seok Ha, Chun-Yeol You<sup>\*</sup>, and Sukmock Lee**

*Department of Physics, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

**Kenta Ohta, Takayuk Nozaki, and Yoshishige Suzuki**

*Graduate School of Engineering Science, Osaka University, Japan*

**W. Van Roy**

*IMEC, Kapeldreef 75, B-3001 Leuven, Belgium*

(Received 31 July 2008, in final form 18 August 2008)

It has been well-known that the Fe/GaAs heterostructure has a small lattice mismatch of 1.4 % between Fe and GaAs, and the Fe layer is grown epitaxially on the GaAs substrate. There are rich physics are observed in the GaAs/Fe interface, and the spin-injection is actively studied due to its potential applications for spintronics devices. We fabricated Fe wedge layer in the thickness range 0~3.4 nm on the GaAs (100) surface with 5-nm thick Au capping layer. The magnetic anisotropy of the Fe/GaAs system was investigated by employing Brillouin light scattering (BLS) measurements in this study. The spin wave excitation of Fe layer was studied as the function of intensity and the in-plane angle of external magnetic field, and thickness of Fe layer. Also these various dependences were analyzed with analytic expression of spin wave surface mode in order to determine the magnetic anisotropies. It has been found that the GaAs/Fe/Au system has additional uniaxial magnetic anisotropy, while the bulk Fe has biaxial anisotropy. The uniaxial anisotropy shows increasing dependency respected to decreasing thickness of Fe layer while biaxial anisotropy is reduced with Fe film thickness. This result allows the analysis that the uniaxial anisotropy is originated from interface between GaAs surface and Fe layer.

**Keywords :** GaAs/Fe/Au, magnetic anisotropy, Brillouin light scattering