

Temperature Dependence of Bilinear Magnetoelectric Resistance (BMR) in Topological Insulator Bi_2Se_3

Seonghoon Jeong, Hyukjae Yang, and Sunjae Chung*

Department of Physics Education, Korea National University of Education, Cheongju 28173, Korea

Kyungjae Lee and Sanghoon Lee

Department of Physics, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received 18 January 2025, Received in final form 8 February 2025, Accepted 10 February 2025)

In this study, we investigate the Bilinear Magnetoelectric Resistance (BMR) phenomenon in the topological insulator Bi_2Se_3 grown on a (100) GaAs substrate. By varying the sample temperature from 10 K to 60 K, we measured the out-of-plane tilt angle of the spin texture induced by Rashba spin-orbit coupling (ROC). Through BMR measurements, we extracted the parameter λ , which quantifies the strength of hexagonal warping influencing the Rashba spin-orbit coupling. To examine the relationship between λ and the Fermi-level electron density, we calculated the two-dimensional electron density using Hall effect measurements over the same temperature range. A significant correlation between λ and electron density was observed at low temperatures. These experimental findings suggest that the spin-momentum locking phenomenon in topological insulators is strongly influenced by temperature-dependent variations in electron density.

Keywords : topological insulator, Rashba spin-orbit coupling (ROC), spin-momentum locking, Bilinear Magnetoelectric Resistance (BMR)

위상 절연체 Bi_2Se_3 의 Bilinear Magnetoelectric Resistance (BMR) 현상의 온도 의존성 탐구

정성훈 · 양혁재 · 정선재*

한국교육대학교 물리교육과, 충북 청주시 흥덕구 태성탑연로 250, 28173

이경재 · 이상훈

고려대학교 물리학과, 서울시 안암로 145, 02841

(2025년 1월 18일 받음, 2025년 2월 8일 최종수정본 받음, 2025년 2월 10일 게재확정)

본 연구에서는 (100) 결정 방향을 갖는 GaAs 기판 위에 증착된 위상 절연체 Bi_2Se_3 의 Bilinear Magnetoelectric Resistance (BMR) 현상을 측정하고, 이 결과로부터 라쉬바 궤도 결합에 의해 생긴 스핀이 수직 방향으로 기울어진 정도를 시료의 온도를 변화시키며(10~60 K) 측정해 보았다. 이 측정을 통해 라쉬바 궤도에 작용하는 hexagonal warping의 세기를 나타내는 상수인 λ 를 구할 수 있었고, 이 결과를 이용하여 시료의 방향에 따른 스핀의 수직 방향 편향 정도를 계산해 보았다. 또한 λ 와 페르미 전자 농도와의 관계를 알아보기 위해, 10~60 K 측정 온도 구간에서 홀 효과 측정에 의한 2차원 전자 농도를 계산하였고, 극저온에서 유의미한 관련성을 발견하였다. 이 실험 결과는 위상 절연체의 스핀-운동량 잠금(spine-momentum locking) 현상이 온도에 따른 전자 농도의 변화와 연관되어 있음을 시사한다.

주제어 : 위상절연체, 라쉬바 궤도 결합, 스핀-운동량 잠금, Bilinear Magnetoelectric Resistance (BMR)

I. 서 론

위상 절연체(Topological Insulator; TI)의 발견은 새로운 전자 상태의 물리적 특성을 연구하는 분야 뿐만 아니라, 최근에는 그 특성들을 응용하고자 하는 스핀트로닉스 소자 연구 분야로도 확대되고 있다[1-6]. 특히, 전자의 스핀 방향과 운동량 사이의 긴밀한 상관관계로 인해 발생하는 스핀-운동량 잠금(spin-momentum locking) 특성은 위상 절연체 표면 상태에서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다[1-4]. 이 독특한 표면 스핀 분포 형태는 스핀 및 각도 분해 광방출 분광법(Spin-Resolved Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy; SR-ARPES)을 통해 처음 관찰되었으며[7-9], 후에 이러한 스핀 분포가 육각형 형태로 변형된 것도 관찰되었다[10-12]. 이러한 육각형 모양의 뒤틀림은 라쉬바 궤도 결합에 의한 스핀-운동량 잠금 현상에 의한 스핀 방향 분포에 평면 외(out-of-plane) 성분을 추가하여, 다양한 위상 절연체 물질들에서 흥미로운 스핀 분포 구조를 보여준다. 이러한 특징적인 스핀 구조를 전자기적 측정 방법으로 스핀 분포를 측정하고자 하는 연구도 수행된 적이 있다[13-17]. 그러나 이 방법은 평면 내 스핀 성분만 측정할 수 있다는 단점이 있었다. 이후, 위상 절연체에서 다양한 자기 저항 효과, 특히 약한 반국소화에 기인한 자기 저항 변화 및 이방성 자기 저항 등의 특성을 이용하여 스핀 방향 분포를 알아내기 위해 많은 노력이 있었다[18-22]. 최근 위상 절연체와 자성 물질로 이뤄진 이중 박막 구조에서 단방향 자기 저항(Unidirectional Magnetoresistance; UMR) 현상이 이뤄졌고, 이를 통해 스핀 구조를 측정하는 방법이 보고되었지만, 이때 자성 물질이 위상 절연체의 밴드 구조에 영향을 줌으로써 위상절연체의 표면 스핀 구조를 정확히 알수 없다는 한계점이 있었다[23]. Bi_2Se_3 기반의 위상 절연체와 강자성체의 이중 구조에서 스핀-궤도 효과에 의해 자기 감쇠가 크게 증가하는 것이 관찰되었으며, 이는 위상 절연체를 활용한 스핀 전류 발생 및 제어에 중요한 영향을 미칠 수 있음이 보고되었다[25]. 흥미롭게도 자성 물질 층이 없는 위상절연체 만으로 이뤄진 시료 구조에서 새로운 형태의 자기저항인, Bilinear Magnetoelectric Resistance(BMR) 현상이 최근 보고 되었으며, 이 현상을 분석하면, 평면 외 스핀을 포함한 스핀 방향 분포를 알 수 있다[24]. BMR은 외부 전기장의 2차에 비례하는 전자 분포의 변화(비선형 스핀 전류)로부터 기인한다. 전자의 운동 방향과 자기장의 방향에 따라 스핀-운동량 잠금에 영향을 주어 비선형 전하 전류가 생성되면서 BMR 저항 성분이 유도되는 것이다. 즉 특정 자기장 하에서 비선형 스핀 전류가 비선형 전하 전류로 변환되며 나타나는 현상이다[24]. 이는 기존의 단방향 자기 저항(UMR)과 달리 강자성 물질에 의존하지 않으면서도 위상 절연체의

결정 방향과 자기장의 각도 따라 그 크기가 사인 그래프 형태로 변하는 특징을 보인다[24]. 본 연구에서는 위상 절연체의 전자기 수송 현상 측정을 통해 얻은 자기장 방향 및 세기, 그리고 전류 세기에 따른 BMR 현상과 그로부터 계산한 스핀 텍스처의 상관관계를 이해하고, 시료 온도 변화에 따른 위상 절연체 표면의 2차원 스핀 분포의 변화를 실험적으로 측정하였다.

II. 실험 방법

이 연구에서 사용한 Bi_2Se_3 샘플은 분자빔 증착법(Molecular Beam Epitaxy; MBE) 방법을 이용하여 제작하였다. (100) GaAs 기판위에 20 nm 두께의 Bi_2Se_3 의 시료를 증착하였으며, 시료의 산화를 방지하기 위해 5 nm 두께의 Se 층을 증착하였다. 이 시료를 포토리소그래피와 이온 밀링 공정 방법을 이용하여 길이 100 μm , 폭 20 μm 크기의 홀바 형태로 패터닝 하였다(Fig. 1 참조). 이때 홀 바의 전류 채널이(x축 방향)이 시료의 [100] 결정축과 30의 각도를 이루도록 주의하여 패터닝 하였다. 최종적으로 Ti/Au 전극을 포토리소그래피 공정과 이빔 증착 방법을 이용하여 만들었다. 장치에 교류 전류 I_{ac} 를 인가하고, 1st 하모닉 신호인 R_{ω} 와 2nd 하모닉 신호인 $R_{2\omega}$ 를 측정하였다. R_{ω} 는 시료의 일반적인 저

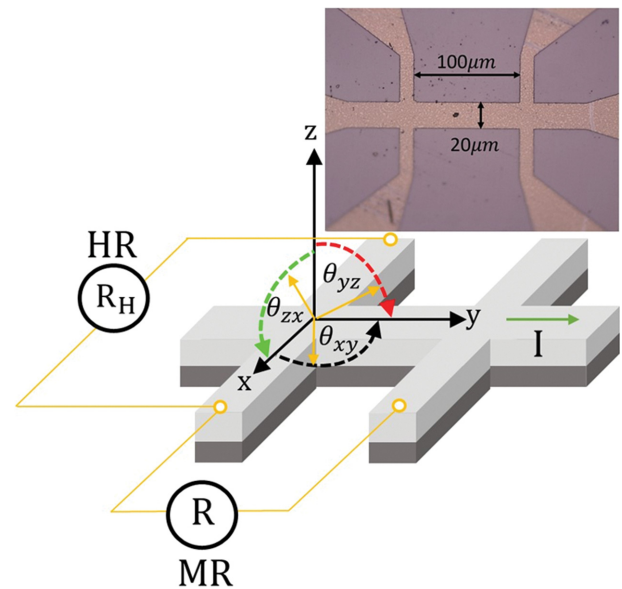


Fig. 1. (Color online) Schematic representation of the Hall bar device configuration. The coordinate axes (x, y, z) and the corresponding planes (xy, yz, zx) are defined as shown in the figure. The electrical current flows along the y-axis as described in figure. The angular orientation of the magnetic field, along with the definitions of Hall resistance (HR) and magnetoresistance (MR), are also indicated in the figure. The inset displays the patterned device, which was fabricated with a width of 20 μm and a length of 100 μm .

향으로서 전류와 무관하며, $R_{2\omega}$ 는 전류의 세기 뿐만 아니라, 자기장의 세기에도 선형적으로 증가한다. 이러한 측정은 Fig. 1과 같이 외부 자기장 H 을 x-y, z-y 및 z-x 평면 내에서 회전시키면서 수행되었다. 또한, 동일한 측정을 시료의 온도를 10~60 K 사이에서 반복하여, 온도 변화에 따른 시료의 특성을 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)와 (b)는 온도 60 K에서 자기장을 xy 평면상에서 자기장의 방향을 회전시키면서, Fig. 1에 나와 있는 것처럼 장비들을 연결하여 $R_{2\omega}$ 를 측정한 결과이다. Fig. 2(a)는 전류 세기를 200~1,000 μ A로 변화 시키면서 측정한 실험 결과이고, Fig. 2(c)에는 자기장의 세기를 1~9 T로 변화시키며 측정한 실험 결과가 나타나 있다. 실험 sine 함수로 회귀분석을 하여 각각의 경우에 대한 최대 진폭을 구했으며, 이 값을 $\Delta R_{2\omega}$ 로 정의하였다. 이렇게 구한 최대 변화량을, 전류와 자기장의 세기의 함수로 나타낸 것이 Fig. 2(b)와 (d)에 각각 나

타나 있다. 잘 알려진 것처럼 자기장과 전류에 따라 $\Delta R_{2\omega}$ 이 선형적으로 증가하는 BMR 현상이 관찰되었다[24]. Fig. 2(b)와 (d)의 실험 결과에서 선형 회귀 분석으로 각각의 기울기를 구했으며, 그 값은 각각 1.026×10^{-2} mohm/ μ A, 9.34×10^{-1} mohm/T이다. 참고문헌[24]에 비슷한 온도에서 측정된 결과와 비교해 보았을 때, 약 전류의 경우 약 1/7배 작으며, 자기장의 경우에는 1/5.5배 작은 값을 얻었다. 이러한 이유는 기관의 차이나 MBE 증착 조건의 차이로 온 것으로 이해된다.

Fig. 3(a)은 온도 60 K에서 자기장 9 T, 전류 800 mA에서, Fig. 1에서 정의한 것처럼 xy 및 yz, zx 평면 내에서 자기장의 방향을 회전시키면서 측정한 BMR 실험 결과이다. 참고문헌 [24]에 나온 것처럼, 2nd 하모닉 신호인 $R_{2\omega}$ 은 다음과 같은 식(1)로 표현된다.

$$R_{2\omega} = E \frac{I}{w} (a_{IP} H_y + a_{OP} H_z \cos 3 \Phi_{TK}) \quad (1)$$

여기서 H_y 및 H_z 는 자기장의 y 및 z 성분이고, Φ_{TK} 는 x

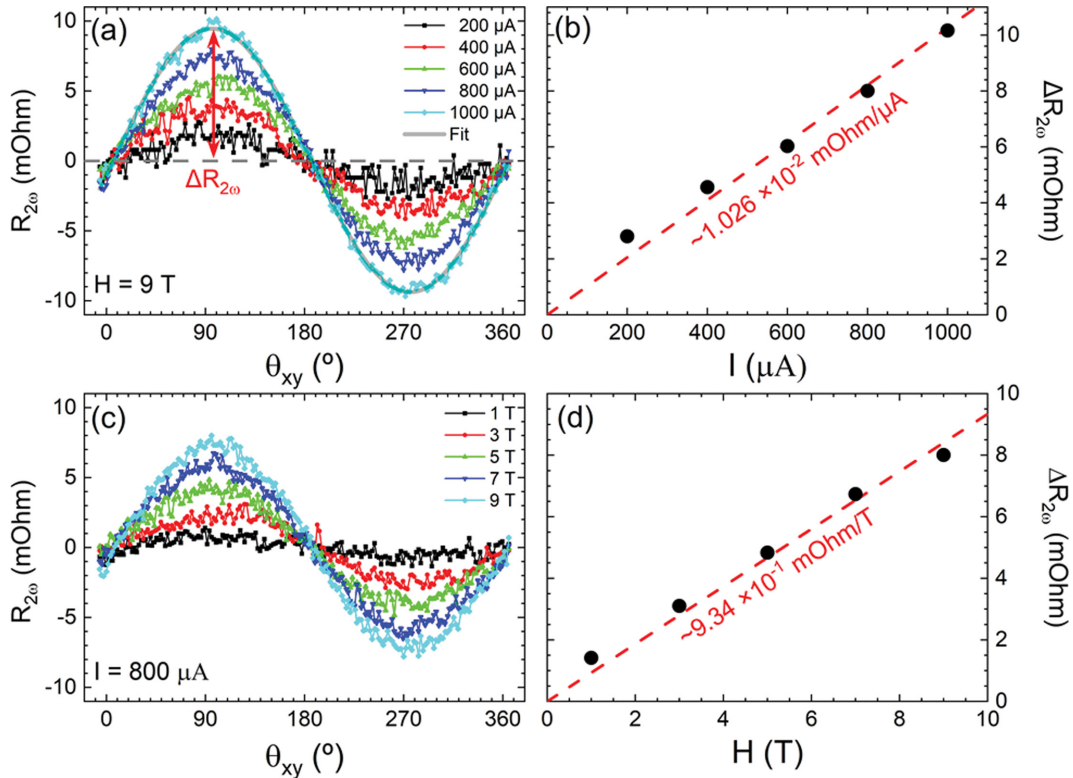


Fig. 2. (Color online) Presents the experimental results of Bilinear Magnetoelectric Resistance (BMR) measured as a function of the magnetic field direction in the xy-plane. In (a), the results are shown for varying magnitude of electric current applied to the sample while the direction of a 9 T magnetic field is rotated. The data in (a) were fitted using a sine function, as indicated in the figure, and the extracted $\Delta R_{2\omega}$ values are displayed in (b). The data in (b) were fitted with a linear function, showing a slope of 1.026×10^{-2} mohm/ μ A. Similarly, (c) and (d) show the results obtained by varying the magnetic field strength. The slope derived from the relationship between the magnetic field strength and $\Delta R_{2\omega}$, using the same fitting process, is 9.34×10^{-1} mohm/T.

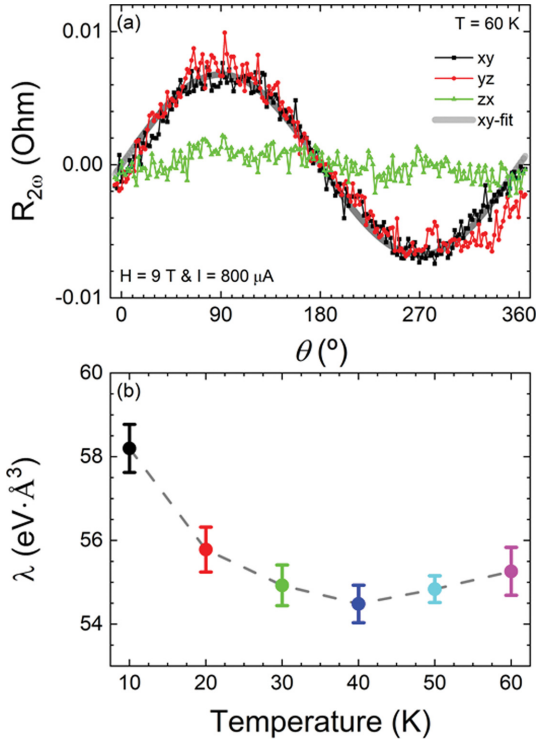


Fig. 3. (Color online) Presents $R_{2\omega}$ results obtained by varying the magnetic field direction within xy , yz , and zx planes. (a) Shows the $R_{2\omega}$ data acquired under $H = 9$ T and $I = 800$ μ A at 60 K. (b) Displays the hexagonal warping constants derived from the analysis of the results in (a), obtained by varying the sample temperature from 10 K to 60 K.

축에 대한 주어진 $\bar{\Gamma}\bar{K}$ 방향의 각도(즉, 전기장 E 의 방향)이며, $a_{IP} = 36\pi\lambda^2\varepsilon_F g\mu_B/e\alpha^5\hbar^4$, $a_{OP} = 6\pi\lambda g\mu_B/e\alpha^2\hbar^4\varepsilon_F$ 는 각각 자기장의 평면 내 및 평면 외 구성 요소에서 $R_{2\omega}$ 에 기여하는 계수이다. 본 논문에서는 참고 문헌[24]를 참조하여, $\varepsilon_F = 0.2560$ eV 및 $\alpha = 5.000 \times 10^5$ m/s, $g = 2$, $\mu_B = 5.788 \times 10^{-5}$ eV/T 등을 사용하였다. 식(1)을 이용하여 Fig. 3(a)의 실험 결과를 회귀 분석하면, 육각왜곡상수 λ 를 구할 수 있으며, 본 연구에서 얻은 λ 는 55.43 ± 0.573 $\text{eV}\cdot\text{\AA}^3$ 이다. 선행 연구 결과에 따르면 λ 는 50~180 $\text{eV}\cdot\text{\AA}^3$ 의 범위 내의 값을 가지는 것으로 알려져 있다[11,24]. 위와 같은 실험을 10~60 K의 온도에서 각각 수행하였으며, 이 실험 결과로부터 구한 λ 값들이 Fig. 3(b)에 제시되어 있다. Fig. 3(b)에서 볼 수 있는 것처럼, 10 K에서 값은 40 K에서의 값에 비해 상대적으로 약 5% 정도의 큰 값을 보이며, 온도 증가에 따라 점차적으로 작아진다. 이 실험 결과를 보다 명확히 이해하기 위해서, 홀 효과 측정을 통해 2차원 전자 농도를 측정하였으며, 이 실험 결과는 Fig. 4에 제시되어 있다. 자기장 세기에 따른 홀 저항 측정 결과, 시료에서 다수 전하 운반자가 전자임을 확인 할 수 있었으며, 그 전자 농도를 계산한 결과는 Fig. 4(b)에 제시

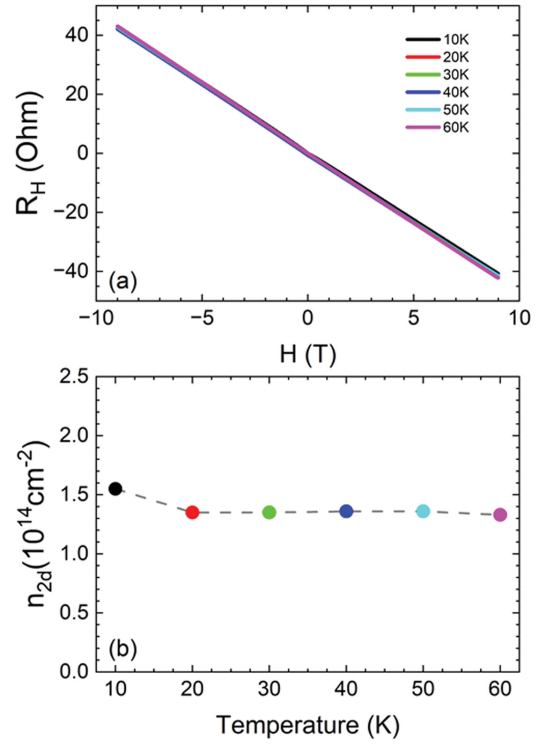


Fig. 4. (Color online) (a) and (b) show the Hall measurement results and the corresponding temperature-dependent two-dimensional electron density (n_{2d}) derived from these results.

되어 있다. 10 K에서 조금 큰 값을 보여주며, 20 K 부터는 거의 비슷한 값을 보여준다. 이러한 경향성은 Fig. 3(b)에 나와 있는 λ 크기의 경향성과 유사하다.

참고문헌[28]에 설명된 것처럼, k-p 섭동 이론에서 도출된 평면 외 스핀 편광은 다음과 같이 주어진다.

$$s_z(\Phi_k) = \frac{\cos 3\Phi_k}{\sqrt{(\cos 3\Phi_k)^2 + (\alpha\hbar/\lambda k_F^2)^2}} \quad (2)$$

여기서 Φ_k 는 $\bar{\Gamma}\bar{K}$ 방향과 전자의 이동 방향인 k 사이의 각도, k_F 는 페르미 파동 벡터의 크기, α 는 디랙 속도, λ 는 육각 뒤틀림의 세기를 나타낸다. 여기서는 앞에서 언급한 값들과 Fig. 4에서 구한 λ 를 이용하여 기울기 각도 $\psi_{sc} = \arcsin(s_z)$ 를 계산할 수 있었다. 이렇게 계산된 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 대부분의 온도에서 평면 외 방향으로 기울어진 스핀의 각도는 -6° 와 6° 사이였으며, 10 K에서의 기울어짐 정도가 다른 온도들에 비해 약 7% 정도 더 크게 나왔다. 참고문헌[24]와 비교해 보면, 약 1/5배 정도 작은 값으로 나왔다. 이 값 또한 시료의 차이에서 기인한 것으로 추정된다. Fig. 5는 식(2)를 이용하여 구한 ψ_{sc} 의 결과를 온도별로 나타낸 것이다. 또한, 60° 마다 최대, 최소가 반복적으로 나타나는 것을 볼 수 있었다.

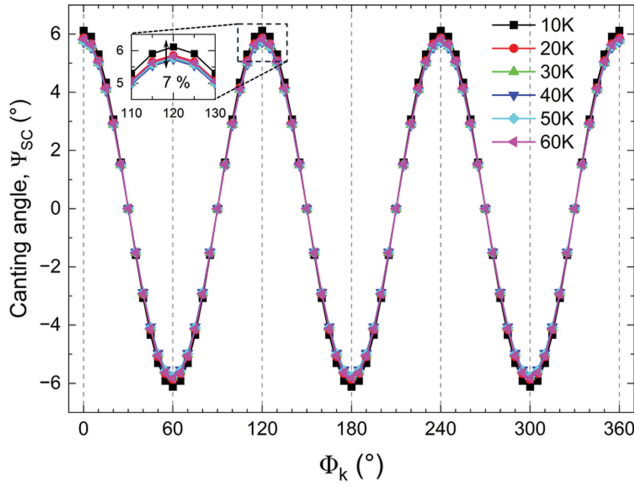


Fig. 5. (Color online) The canting angle angle (Ψ_{sc}) of the spin calculated using Eq. (2) is presented. The results are shown for each temperature.

IV. 결 론

본 연구에서는 위상 절연체 Bi_2Se_3 에서 발생하는 Bilinear Magnetoelectric Resistance(BMR) 현상을 측정하고 이해하고자 하였으며, BMR 현상의 분석을 통해 시료에서 측정된 $\Delta R_{2\omega}$ 값이 자기장과 전류의 세기에 선형적으로 비례하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 이 현상을 분석하여 육각 왜곡 상수 λ 값을 계산하였다. 시료의 온도를 변화시키며 λ 를 얻었고, 각 온도별로 λ 값의 크기와 시료의 2차원 전자 농도 n_{2d} 를 비교하여 그 상관 관계를 알아보하고자 하였다. 또한, 육각 왜곡 현상으로 인해 전자 스핀이 평면의 방향으로 $5\sim 6^\circ$ 정도 기울어진 것도 알아낼 수 있었다.

References

- [1] L. Fu, C. L. Kane, and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. **98**, 106803 (2007).
- [2] M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
- [3] X.-L. Qi and S.-C. Zhang, Phys. Today **63**, 33 (2010).
- [4] O. V. Yazyev, J. E. Moore, and S. G. Louie, Phys. Rev. Lett. **105**, 266806 (2010).
- [5] I. Garate and M. I. Franz, Phys. Rev. Lett. **104**, 146802 (2010).
- [6] D. Pesin and A. H. MacDonald, Nat. Mater. **11**, 409 (2012).
- [7] D. Hsieh, Y. Xia, D. Qian, L. Wray, J. H. Dil, F. Meier, J. Osterwalder, L. Patthey, J. G. Checkelsky, N. P. Ong, A. V. Fedorov, H. Lin, A. Bansil, D. Grauer, Y. S. Hor, R. J. Cava, and M. Z. Hasan, Nature **460**, 1101 (2009).
- [8] D. Hsieh, Y. Xia, L. Wray, D. Qian, A. Pal, J. H. Dil, J. Osterwalder, F. Meier, G. Bihlmayer, C. L. Kane, Y. S. Hor, R. J. Cava, and M. Z. Hasan, Science. **323**, 919 (2009).
- [9] A. Nishide, A. A. Taskin, Y. Takeichi, T. Okuda, A. Kakizaki, T. Hirahara, K. Nakatsuji, F. Komori, Y. Ando, and I. Matsuda, Phys. Rev. B. **81**, 041309 (2010).
- [10] L. Fu, Phys. Rev. Lett. **103**, 266801 (2009).
- [11] K. Kuroda, M. Arita, K. Miyamoto, M. Ye, J. Jiang, A. Kimura, E. E. Krasovskii, E. V. Chulkov, H. Iwasawa, T. Okuda, K. Shimada, Y. Ueda, H. Namatame, and M. Taniguchi, Phys. Rev. Lett. **105**, 076802 (2010).
- [12] Z. Alpichshev, J. G. Analytis, J.-H. Chu, I. R. Fisher, Y. L. Chen, Z. X. Shen, A. Fang, and A. Kapitulnik, Phys. Rev. Lett. **104**, 016401 (2010).
- [13] C. H. Li, O. M. J. van't Erve, J. T. Robinson, Y. Liu, L. Li, and B. T. Jonker, Nat. Nanotech. **9**, 218 (2014).
- [14] Y. Ando, T. Hamasaki, T. Kurokawa, K. Ichiba, F. Yang, M. Novak, S. Sasaki, K. Segawa, Y. Ando, and M. Shiraishi, Nano Lett. **14**, 6226 (2014).
- [15] J. Tang, L.-T. Chang, X. Kou, K. Murata, E. S. Choi, M. Lang, Y. Fan, Y. Jiang, M. Montazeri, W. Jiang, Y. Wang, L. He, and K. L. Wang, Nano Lett. **14**, 5423 (2014).
- [16] J. Tian, I. Miotkowski, S. Hong, and Y. P. Chen, Sci. Rep. **5**, 14293 (2015).
- [17] A. Dankert, J. Geurs, M. V. Kamalakar, S. Charpentier, and S. P. Dash, Nano Lett. **15**, 7976 (2015).
- [18] J. Chen, H. J. Qin, F. Yang, J. Liu, T. Guan, F. M. Qu, G. H. Zhang, J. R. Shi, X. C. Xie, C. L. Yang, K. H. Wu, Y. Q. Li, and L. Lu, Phys. Rev. Lett. **105**, 176602 (2010).
- [19] H. Steinberg, J.-B. Laloë, V. Fatemi, J. S. Moodera, and P. Jarillo-Herrero, Phys. Rev. B. **84**, 233101 (2011).
- [20] K. Banerjee, J. Son, P. Deorani, P. Ren, L. Wang, and H. Yang, Phys. Rev. B **90**, 235427 (2014).
- [21] J. Wang, H. Li, C. Chang, K. He, J. S. Lee, H. Lu, Y. Sun, X. Ma, N. Samarth, S. Shen, Q. Xue, M. Xie, and Moses H. W. Chan, Nano Res. **5**, 739 (2012).
- [22] A. Sulaev, M. Zeng, S.-Q. Shen, S. K. Cho, W. G. Zhu, Y. P. Feng, S. V. Eremeev, Y. Kawazoe, L. Shen, and L. Wang, Nano Lett. **15**, 2061 (2015).
- [23] K. Yasuda, A. Tsukazaki, R. Yoshimi, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, Phys. Rev. Lett. **117**, 127202 (2016).
- [24] P. He, S. S.-L. Zhang, D. Zhu, Y. Liu, Y. Wang, J. Yu, G. Vignale, and H. Yang, Nature Physics. **14**, 495 (2018).
- [25] Y. Kim, S. Kim, S. Chung, J. Åkerman, and S. Lee, J. Kor. Magn. Soc. **33**, 44 (2023).