



Title	Voltage effects in poly and single-crystal 3d ferromagnetic metal/MgO systems
Author(s)	Shukla Kumar, Amit
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/70775">https://doi.org/10.18910/70775</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name (Amit Kumar Shukla)	
Title	<b>Voltage effects in poly and single-crystal 3d ferromagnetic metal/MgO systems</b> (多結晶および単結晶 3d 強磁性金属/MgO 系における電圧効果)
<p><b>Abstract of Thesis</b></p> <p>Spintronics is a rapidly emerging and immensely promising research field. It enables us to develop future technology devices by exploiting the spin of electron. An MgO-based magnetic tunnel junction (MTJ) is of great interest as a non-volatile memory because of their application in magnetic random memories and magnetic sensor. Different successful approaches have been used to control the magnetization of MTJ, such as a current induced magnetic field and spin transfer torque. Although, these techniques still require Joule heating that remain too large to ignore. Further reduction in power consumption can be expected by voltage control of magnetization direction in MTJ. External voltage across ferrromagnetic and MgO layers controls the interfacial magnetic anisotropy of ferromagnetic material called voltage controlled magnetic anisotropy (VCMA). Although, VCMA effect is observed on different ferromagnetic material, yet we have observed in poly and single-crystal 3d ferromagnetic metal/MgO systems using different measurement technique. We studied the dependence of VCMA on 1) post annealing temperatures on poly deposited Ta/CoFeB/MgO/CoFeB system using static magnetoresistance measurement and 2) VCMA and Dzyaloshinskii-Moriya Interaction at single-crystal <math>\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x/\text{Pd}/\text{MgO}</math> interface using Magnetostatic surface spin wave</p> <p>1) In order to investigate VCMA on post annealing temperatures on poly deposited different annealing temperatures, Ta(5 nm)/Ru(20 nm)/Ta(5 nm)/CoFeB(1.1 nm)/MgO(1.9 nm)/CoFeB(5 nm)/Ta(5 nm)/Ru(5 nm) layers were deposited on a Si/SiO<sub>2</sub> substrate in a magnetron sputter system and an MTJ was fabricated in hexagonal shape with conventional microfabrication technique. Samples have been annealed at different temperatures after microfabrication: 200 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C for 1 hour. TMR measurements were carried out using a conventional two terminal technique under an in-plane magnetic field. VCMA has been characterized by bias-voltage dependence under a perpendicular magnetic field. Voltage controlled magnetic anisotropy and tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions with different annealing temperature have been investigated. We found that TMR and VCMA are increasing with increasing post annealing temperature from 200 °C to 300 °C and resistance of MTJ layer is decreasing with increasing post annealing temperature. Maximum VCMA and TMR of Ta/ CoFeB/ MgO sample are achieved 33fJ/Vm and 62%, respectively at 300 °C annealed sample.</p> <p>2) In order to investigate VCMA and interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction at <math>\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x/\text{Pd}/\text{MgO}</math> interface, we grow single-crystal 3d ferromagnetic metal/MgO epitaxial multilayers of MgO (5 nm)/V (20 nm)/Fe (20 nm)/<math>\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x</math> (0.3 nm)/Pd (0.2 nm)/MgO (5 nm) were deposited on a fcc-MgO(001) substrate using electron beam deposition under ultrahigh vacuum. An ultrathin <math>\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x</math> layer was prepared by alternatively depositing Fe and Co onto the bcc-Fe (001) layer. The surface crystal structure of <math>\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x</math> was characterized <i>in situ</i> by reflection high-energy electron diffraction (RHEED) and similar patterns were obtained for all three regions (i.e., <math>x = 0, 0.5, 1</math>). Subsequently, 50-nm-SiO<sub>2</sub> was added as an additional insulating layer by sputtering. The scanning transmission electron microscopy (STEM) and EDS energy-dispersive spectroscopy analysis of the sample have been done. The film was patterned into <math>100 \times 400 \mu\text{m}^2</math> rectangles. The longer edge of the rectangle is parallel to both Fe [100] and MgO [110] directions. Micro-sized antennas and an intermediate gate were fabricated with Cr (5 nm)/Au (200 nm) by a conventional microfabrication technique using electron beam lithography. We study the spin-wave property by measuring the scattering (<math>S</math>) parameter by a vector network analyzer by applying a dc voltage on the sample. The influence of ultrathin <math>\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x/\text{Pd}</math> insertion between Fe and MgO interface on the interfacial magnetic anisotropy and its voltage-induced change has been studied by spin-wave spectroscopy. We found that the origin of VCMA and the origin of the interfacial anisotropy are not the same. First-principles calculations would be helpful to study the origin of the observed behavior.</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　(Shukla Amit Kumar)		
論文審査担当者	（職）	氏　名
主　查	教授	鈴木 義茂
副　查	教授	畠田 博一
副　查	教授	小口 多美夫

### 論文審査の結果の要旨

提出された論文はスピントロニクスと呼ばれる学問・技術分野に関するものである。スピントロニクスにおいては、高効率な磁化方向制御を可能にする物理機構の発見と解明が重要な課題の一つとなっている。従来、磁化方向の制御には電流が作る磁界やスピントロニクスの偏極した電流の直接的な注入が用いられてきた。しかし、どちらの方法も電流を必要とするためにジュール熱が発生し、電力を無駄に消費する。同様な問題を避けるために、半導体物理においては電流駆動型のバイポーラトランジスタから電圧駆動型の電界効果トランジスタへの転換が図られた。そこで、スピントロニクスの分野でも電圧駆動型の磁化制御機構を見出しその物理機構を解明することが求められている。本論文では、超薄膜強磁性金属素子を作製し、その磁気異方性とジャロシンスキー・守谷相互作用を界面への電界の印加により制御することを試みた結果が報告された。特に強磁性金属層と絶縁体層の界面に1原子層のPdを挿入すること、強磁性層としてCoを選ぶことにより、酸化などを伴わない電圧印加磁気異方性変化としてはこれまで得られたものの中で最大級の250 fJ/Vmという大きな効果を得ることに成功した。

論文の前半部分ではスパッタ法により作製したTa/CoFeB/MgO積層膜における電圧印加磁気異方性変化のアニール温度依存性が報告された。電圧印加磁気異方性変化は金属と絶縁層の界面に位置する金属層内約1原子層で発生する現象であるために界面の微視的な物理的・化学的構造に非常に敏感である可能性がある。そこで、アニールにより界面構造の改善を図り効果の増大を試みた。その結果、250°C程度のアニールから効果の増大がみられ、約300°Cにおいて最大値である約-25 fJ/Vmを得た。この値は、この物質系でこれまでに得られている値と同程度である。

論文の後半部分ではスピン波分光法により $Fe_xCo_{1-x}$ 合金/Pd/MgO積層構造における電圧効果を詳細に評価することを試みた。その結果、電圧による磁気異方性およびジャロシンスキー・守谷相互作用の変調を確認した。どちらの効果もCo組成が増大するに伴い単調に増大した。そこで、このことが3d強磁性金属中の電子数の変化に伴うものなのか、あるいは物理・化学的構造変化に伴うことなのかを明確にするために詳細な構造解析を走査型電子顕微鏡を用いて行った。その結果、 $Fe_xCo_{1-x}$ 合金層のFeの割合が大きな領域でPdの強磁性層中への拡散を確認した。従って、今回の実験結果のみでは明確に物理機構を決定することはできないが、拡散のない構造、もしくは、強磁性層中のd電子数の増大が電圧による磁気異方性およびジャロシンスキー・守谷相互作用を増大させるとの結果を得た。その結果、純粋なbcc-Co/Pd/MgO構造において250 fJ/Vmと非常に大きな電圧磁気異方性変化の値を得た。これは、酸化などを伴わない純粋に電子的な効果としては最大級の値である。また、ジャロシンスキー・守谷相互作用に対する電圧の効果についても、その大きさが $Fe_xCo_{1-x}$ 合金組成によって変化することを見出したが、このような研究はこれまでに例がなく界面における対称性の破れに起因するジャロシンスキー・守谷相互作用の物理の解明に寄与するものである。

これらの成果は国際的な英文学術誌に原著論文として発表されている。また、国外・国内の会議においてもいくつかの講演を行っており、その成果は国際的に高く評価されている。発表は明解であり、質問にも的確に答えており基礎物性をよく理解しているといえる。以上より本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。