

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	デルモ マイケル ピカゾ Delmo Michael Picazo
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 22 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科化学専攻
(学位論文題目) Large Magnetoresistance Effect in Silicon in Non-Ohmic Transport Regimes (シリコンにおける非オーミック伝導領域における 大きな磁気抵抗効果)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 小林 研介 准教授 小野 輝男 教授 宗林 由樹 教授

京都大学	博士（理 学）	氏名	Delmo Michael Picazo
論文題目	Large Magnetoresistance Effect in Silicon in Non-Ohmic Transport Regimes (シリコンにおける非オーミック伝導領域における大きな磁気抵抗効果)		
(論文内容の要旨)			
The space-charge effect in semiconductors like silicon (Si) is caused by the breaking of the charge quasi-neutrality due to the accumulation of injected charges (n) inside the solid. This charge accumulation occurs to generate an electric field ($\mathbf{E}$) unevenly distributed inside the solid, where the absence of compensating background charges makes the injected charges correlate with each other via the unscreened Coulomb interaction. Analyzing the current-voltage (I-V) characteristics of the solid have been an important method for investigating the space-charge effect because it provides information on the transition of the charge transport from Ohmic to space-charge-limited (SCL). Here, he presents the experimental study on the transport properties of silicon devices in space-charge regime under an applied magnetic field. He fabricated the Si devices consisting of metal/Si/metal and measured the I-V characteristics and the magnetotransport properties in current-in-plane geometry. The Si substrate is lightly phosphorus-doped n-type Si (n-Si) and the metal is Indium (In). The In/n-Si/In ohmic devices were fabricated by soldering and alloying the In contact electrodes to the n-Si substrates at 350°C for five minutes. He measured the magnetotransport properties via two-terminal and multi-terminal methods. The magnetic field is applied either perpendicular or parallel to the current direction. The ohmic device made of n-Si shows the typical characteristic of current injection in semiconductor, where the I-V curve is divided into ohmic and SCL transport regimes and that the transport in the latter regime obeys the Mott-Gurney law ($I \propto V^2$), which indicates unipolar space-charge effect. The application of magnetic field to the device shifts the I-V curves downward to the right of the graph, which indicates the resistance increase. The current change is larger in the SCL transport regime than in the Ohmic regime, which indicates the enhancement of magnetoresistance (MR) effect by the space-charge effect. I-H measurement results reveal that the MR ratio in the SCL transport regime is much larger than that in the ohmic regime, which confirms the magnetoresistance enhancement by the space-charge effect. Based on the above observation he proposed that the dynamics of correlated charges in magnetic field is responsible for the large magnetoresistance effect. In the SCL transport regime, the injected charge density is much larger than the background charges, thus the injected charges are not effectively screened and therefore correlated. This correlation induces local inhomogeneity in n and $\mathbf{E}$ in magnetic field just like the large positive magnetoresistance effect in solids. Similarly, it is also observed that the large magnetoresistance is induced at room temperature (300°C) for In/i-Si/In, where i-Si is intrinsic silicon. It is found that the MR ratio is enhanced in the space-charge effect, where it is about in order of $\sim 1000\%$. This may be used to develop novel magnetoelectronics technologies.			

(論文審査の結果の要旨)

磁気抵抗効果とは物質の電気抵抗が磁場中によって変化する現象である。その研究は 100 年以上もの長い歴史を持つだけでなく、ハードディスクの読み取り装置や磁気センサーなど、現代の高度情報化社会を支える基幹技術に直結しているため、工学的にも極めて重要である。例えば、金属人工格子における巨大磁気抵抗効果の発見 (1988 年) はハードディスクの革新的な向上に貢献し、2007 年のノーベル物理学賞に輝いた。しかしながら、シリコンに代表されるような通常の半導体において磁気抵抗効果がほとんど起きないことは、古くからの常識だった。

本研究では、シリコンに高電場を印加した時に生じる空間電荷効果に注目し半導体における磁気抵抗効果を検証した。実験方法としては、キャリア密度の低いシリコンを用いて「金属/シリコン/金属」構造を持つデバイスを作製し、磁気伝導特性を測定した。空間電荷効果とは、半導体のような自由に動ける電子が少ない物質に大量の電子が注入された場合、内部に一様でない電場が生じ、電子が互いにクーロン斥力を及ぼしあって伝導するようになる現象である。空間電荷効果では、通常のオームの法則とは異なる電気伝導現象が起こり、電流が電圧の二乗に比例する。これをモットーガーネーの法則という。このような状況下においては、シリコンの電気抵抗が磁場によって大きく増大することを発見した。例えば、磁場 3 テスラにおけるシリコンの抵抗は、磁場が無い状態に比べて、25 ケルビンにおいて約 100 倍、室温においても約 10 倍以上になる。しかも、その磁気抵抗は印加磁場に対して線形的な依存性を示す。つまり、磁気抵抗は高磁場領域において飽和しない。さらに、この研究では、観測された大きな磁気抵抗効果は、空間電荷効果をもたらす準中性の破れによって説明できることを提唱した。この場合、シリコンに注入された電子を補償するのに十分な量の伝導電子が存在しないため、注入電子が蓄積する。その結果、シリコン中のキャリア密度と電場に不均一性が導入される。この伝導領域において、電子の運動は互いに相関するようになり、磁場に依存するようになる。この場合、磁場によるローレンツ力が電子の軌道に大きく影響を与えるため、これによって生じるホール電場は自由電子モデルが記述するホール電場と異なる。このように、本研究では、空間電荷効果によって誘起される大きな磁気抵抗効果を検証することにより、半導体において生じる大きな磁気抵抗効果に新しい伝導メカニズムが導入された。そのため、この実験研究は、基礎研究として非常に重要であり高く評価される。

このことはまた、今回検証された「空間電荷効果によって誘起される大きな磁気抵抗効果」が、高純度の半導体において普遍的に生じる可能性を意味している。

シリコンは、現代の半導体産業の中核を担う物質であり、過去 50 年以上にもわたって最もよく研究されてきた物質の一つであるが、このような大きな磁気抵抗効果は本研究によって初めて明らかとなったものである。特に、室温においてもこの効果が顕著に生じることは、半導体の主役であるシリコンに注目すべき新機能が付与されたものと言え、実用面においても大きなインパクトが期待される。

以上のように、本研究の成果は学術的、技術的に大きな意味を持っており、半導体物性の研究分野に多大な貢献をしたものである。よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 22 年 1 月 19 日に論文内容とそれに関連した事項について口答試問を行なった結果、合格と認めた。

