

氏名	上村 浩司
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博 甲 第 9313 号
学位授与年月日	令和元年10月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	微細加工による微小冷電子源を利用した磁気センサに関する研究

主査	筑波大学教授	博士(工学)	末益 崇
副査	筑波大学教授	理学博士	関口 隆史
副査	筑波大学教授	理学博士	黒田 眞司
副査	筑波大学教授	博士(工学)	大野 裕三

## 論 文 の 要 旨

審査対象論文は、高感度磁気センサの候補として、真空中の電子放出を利用する微小冷電子源の可能性を追求するものである。第1章では、本論文の背景として磁気センサの現状と課題が述べられ、任意方向の磁場を高感度に検出するという課題に対して、微小冷電子源が他の磁気センサに比べて、どのような点で優れているか説明され、本論文の目的が示されている。本論文で対象とする磁気センサは、工作機械等に設置することを想定しており、200℃程度の高温度下においても、任意方向の磁場を高感度に検出することが要求されていて、現在使われているホール素子や磁気抵抗素子の使用は難しい。このため、真空中の電子放出を利用する微小冷電子源に着目したと説明されている。

第2章では、ピックアップコイルやホール素子、さらに、磁気抵抗素子などの種々の磁気センサが取り上げられ、動作原理が説明されている。また、同じ磁気センサにおいても、半導体を使う場合と真空中の放出電子を使う場合で磁場に対する感度の違いが述べられている。半導体の場合には、電子の移動度により半導体中のドリフト速度が制限され、磁場(T)に対する感度が約10/T(%)に制限されること、一方、真空中においては、格段に大きな電子速度が利用できるため、感度が高くなると説明されている。

第3章では、これまでに報告されている微小冷電子源についての説明がなされている。基板に堆積した金属のエミッタから、基板表面に平行方向に電界放出現象により放出された電子が、磁場によるローレンツ力を受けて、基板上に形成されたアノード電極に到達する。このとき、2つに分離したアノード電極に入射する電流の大きさの差が磁場に比例するとの原理により、磁場を検出する方法である。磁場に対する感度は、約 $10^3$ /T(%)と、半導体の検出器よりも格段に大きい、この方法では、電子線に垂直かつ分離電極列の方向にも垂直な磁場しか検出できない点が問題であると説明されている。

第4章では、微小冷電子源を用いた磁気センサで、任意方向の磁場を検出するための分離したアノード電極の形状と、電子線を収束するための電極形状など、デバイスの設計原理が述べられている。任意方向の磁場を検出するために、電子線を基板に垂直方向に放出する形式を採用し、電子線を検出するためのアノード電極を放射状に8つに分離する方法である。電子線に垂直方向の磁場については、ローレンツ力を受けて電子線の軌道がズレて、8つに分けたアノード電極に到達する電流の大きさに差が生じる。この差を利用して、電子線と垂直方向の磁場を検出する。一方、電子線に平行な磁場については、電子線を回転する方向に作用する。アノードに到達する電子線の形状を円状から十字形状になるよう、収束用の電極を設計することで、8つに分離した電極間で、隣接する電極間に到達する電流に差が生じる。この差を利用して、電子線に平行方向の磁場を検出すると述べられている。デバイスの設計を行い、デバイスシミュレータにより、任意の磁場方向について、磁場感度があることを確認している。

第5章では、最先端の微細加工技術を用いて、結晶 Si 基板を用いた縦型コーン状の微小冷電子源の作製と電子放出特性が述べられている。酸化膜形成や電子線リソグラフィおよびフォトリソグラフィを用いて、エミッタ先端の曲率半径が約 10nm、エミッタの開口部が約 2 $\mu$ m の微小冷電子源の作製プロセスが説明されている。電子放出特性については、作製した微小冷電子源を真空槽内に設置し、電子放出特性や収束特性を計測している。その結果、以下のことを明らかにしている。

- ①真空磁気センサ用に試作した収束電極付き縦型コーン状の微小冷電子源は、Folwer-Nordheim 型の電界放出現象により電子放出する。
- ②微小冷電子源周囲に作製している収束電極を用いることで、真空磁気センサに必要な十字形状の電子線が得られる。
- ③十字形状の電子線は、収束電極の電圧を 0V に近づけることで形状を調節できる。
- ④微小冷電子源から放出された十字形状に収束した電子線に外部から磁界を加えることで、アノード電極上で電子線の位置や回転による移動が発生することがわかり、電子線の位置の移動量は、シミュレーションでの予想と良く合い、現象をよく説明できる。
- ⑤分離したアノード電極を用いて真空磁気センサを構成し、外部磁界を加えて計測を行った結果、電子線の進行方向に垂直の磁界および平行な磁界に対して、いずれも出力は線形であり、垂直方向の感度は  $10^4$ /T(%), 平行方向の感度は  $1.5 \times 10^3$ /T(%)であり、固体からなる分離電極型磁気センサの感度より 2~3 桁高い。

第6章では、n-Si 基板よりも p-Si 基板を使った方が、放出電流の大きさが格段に安定することが述べられている。n-Si 基板の場合、収束電極/SiO<sub>2</sub>/n-Si のヘテロ界面において、SiO<sub>2</sub>/n-Si 界面に多数キャリアである電子が蓄積され、それがエミッタに供給される。一方、p-Si においては、SiO<sub>2</sub>/p-Si 界面に熱励起された少数キャリアである電子が蓄積され、p-Si 表面が n 型に反転した状態になっていて、反転層内の電子がエミッタに供給される。このため、p-Si では、エミッタに供給される電子量が温度により制限される。n-Si 基板を用いた場合においても、エミッタに隣接して MOSFET を作製し、エミッタに供給する電子量を制限することで、放出電流が安定化することが知られており、エミッタに電子がどのように供給されるかにより、放出電流の安定性が決まると説明されている。この結果を受けて、p-Si 基板を用いて微小冷電子源を作製し、n-Si よりも格段に安定した放出電流が得られることを実験で明らかにしている。

以上より、従来は 1 方向のみであった磁場の検出を、任意方向の磁場を従来よりも 2 桁以上の

高感度で検出する微小冷電子源の作製に成功したと結論付けられている。

## 審 査 の 要 旨

### 〔批評〕

アノード電極の形状と配置を工夫して、さらに、アノード電極に到達する電流の差をとることで、任意方向の磁場を従来よりも格段に高感度に検出する方法を見出し、さらに、最先端の微細加工技術を用いてデバイスを形成し、磁気センサとしての性能を実証したことは高く評価できる。

一方、本センサは、高温等の耐環境下での動作を想定しているため、単に室温での動作特性ではなく、高温下でも磁場を高感度かつ安定に検出できるかどうか検証すべきであり、今後の研究の進展が待たれる。

### 〔最終試験結果〕

令和元年9月2日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

### 〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。