| | |
|---|---|
| 氏　　名 | 笹間陽介 |
| 学　位　の　種　類 | 博　士　（　工　学　） |
| 学　位　記　番　号 | 博　甲　第　9386　号 |
| 学位授与年月日 | 令和2年3月25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 | |

h-BN ヘテロ界面を利用した高移動度ダイヤモンドトランジスタの電荷輸送特性の研究

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 主　　査 | 筑波大学 | 教授（連係大学院） | 理学博士 | 宇治進也 |
| 副　　査 | 筑波大学 | 教授（連係大学院） | 博士（工学） | 深田直樹 |
| 副　　査 | 筑波大学 | 教授 | 博士（理学） | 神田晶申 |
| 副　　査 | 筑波大学 | 准教授（連係大学院） | 博士（理学） | 山口尚秀 |

## 論　文　の　要　旨


本論文は、ダイヤモンド電界効果トランジスタ（FET）の電荷キャリアの高移動度化と量子輸送特性の研究について記述したものである。高移動度化のために、ゲート絶縁体として六方晶窒化ホウ素（h－BN）単結晶を用いたダイヤモンドFETをはじめて実現したことを報告している。リソグラフィーと蒸着によるソース・ドレイン電極の作製や、h－BN単結晶の劈開と水素終端されたダイヤモンド表面への転写、ゲート電極の作製など、FETの作製手法を詳しく記述している。h－BN/ダイヤモンド界面の透過型電子顕微鏡を示したあと、FETの出力特性および伝達特性を示している。ゲート電圧印加時の最少の面抵抗は2．6 kΩと、$NO_2$ガスに暴露したダイヤモンド表面を有するFETを除けば、ダイヤモンドFETでもっとも低い値になったことが示されている。さらにホール効果測定の結果、$10^{12}$　$cm^{-2}$台後半の比較的高いキャリア密度において過去最高の300　$cm^2V^{-1}s^{-1}$という高い移動度を観測したことを報告している。

上記のFETの低温・強磁場下での特性評価についても報告している。金属・絶縁体転移について述べたあと、量子振動（シュブニコフ・ドハース振動）の観測結果について記述している。縦抵抗 $\rho_{xx}$ およびホール抵抗 $\rho_{yx}$ の磁場依存性に、明瞭な振動が見られたことを報告している。その振動数から見積もられるキャリア密度は、ホール効果から見積もられるものに比べると小さかった。これに関して、ダイヤモンド表面近傍のサブバンドの中でスプリットオフホールに由来するサブバンドのホールの面内移動度が高く、それによる量子振動のみが現れているという解釈を示している。振動の温度依存性、磁場方位依存性、磁場依存性をもとにそれぞれ行った有効質量、次元性、量子寿命についての評価について記述している。

さらに、このFETの移動度を制限する要因を探るため、音響フォノン、表面ラフネス、荷電不純物による

散乱レートを計算している。まず、シュレーディンガー方程式とポアソン方程式を自己無撞着に解くことで、ダイヤモンド表面近傍のそれぞれのサブバンドへのキャリア密度の分布を求めている。その後、それぞれのサブバンドのホールに対して、音響フォノン散乱、表面ラフネス散乱、荷電不純物散乱による散乱頻度を計算し、最後にホール効果測定によって観測されるべきキャリア密度と移動度を求めている。この計算結果と実験との比較によって、移動度を制限する主要因がダイヤモンドとh－BNの界面に存在する荷電不純物であると論じている。そして、このような界面荷電不純物密度を現在の1/10程度に低減できれば、室温で1000　$cm^2V^{-1}s^{-1}$を超える移動度が可能であることを明らかにしている。

## 審　　査　　の　　要　　旨

〔批評〕

ダイヤモンドは、ワイドバンドギャップや高熱伝導率などの際立った特徴から、次世代半導体材料として期待されている。とくに、ダイヤモンド電界効果トランジスタ（FET）は、パワーエレクトロニクスや高周波高出力増幅などの用途で有望である。これまでに、ダイヤモンドFETの高温動作、高絶縁破壊電界、高電荷キャリア密度、ノーマリオフなどの特性に関して多くの研究報告がある。一方、低損失や高速動作のために電荷キャリアの移動度が高いことが望まれるが、高移動度化を目指す研究はほとんど行われてこなかった。

本論文では、そのようなこれまでほとんど未開拓であったダイヤモンドFETの移動度の向上について取り組んでいる。グラフェンなどの二次元物質の研究で近年多く用いられている六方晶窒化ホウ素（h－BN）単結晶の優れた絶縁体特性に着目し、これをダイヤモンドFETのゲート絶縁体として用いることで、これまでにない高い移動度を実現できることを報告している。高移動度化の達成のみならず、単結晶ゲート絶縁体を用いたことや貼り合わせによる作製手法も本論文独自のもので、ダイヤモンドFETの研究に大きなインパクトを与えたものとして評価できる。

また、このFETを低温・強磁場中で測定することによって観測された量子振動（シュブニコフ・ドハース振動）についても報告している。量子振動の観測には高い移動度が必要であり、ダイヤモンドについてはこれまでに一例しか報告がない。ゲート電圧によって系統的に量子振動の振動数が変化することや、縦抵抗（$\rho_{xx}$）とホール抵抗（$\rho_{yx}$）の両方に量子振動が見られることは、今回はじめて示されており、より質の高いチャネルが形成されていることが示唆される。ダイヤモンドの量子振動現象についてのはじめての詳細な解析からキャリア輸送に関する新しい知見を得ており、学術的意義が大きい。

さらに、荷電不純物、フォノン、および表面ラフネスによる散乱頻度を計算し、実験結果と比較することで、ダイヤモンドFETの移動度を制限している要因を明らかにしている。これは、ダイヤモンドFETの移動度のキャリア密度依存性をはじめて計算から定量的に評価したものである。この結果から更なる高移動度化への指針を与えており、今後のダイヤモンド半導体デバイスの研究の進展に大きく寄与するものと評価できる。

〔最終試験結果〕

令和2年2月14日、数理物質科学研究科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。