

氏 名 (本籍)	小 ^お 山 ^{やま} 和 ^{かず} 博 ^{ひろ} (茨 城 県)			
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)			
学 位 記 番 号	博 甲 第 5582 号			
学位授与年月日	平成 23 年 1 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	ダイヤモンド半導体の電子デバイスに関する研究			
主 査	筑波大学教授	理学博士	山 崎 聡	
副 査	筑波大学教授	工学博士	山 部 紀久夫	
副 査	筑波大学教授	Ph. D	佐 野 伸 行	
副 査	物質材料研究機構 主幹研究員	工学博士	小 泉 聡	

論 文 の 内 容 の 要 旨

博士論文は、ワイドギャップ半導体であるダイヤモンドの電子デバイスに応用への可能性を開くため、単体でのダイヤモンド層、 p^+i-n^+ ダイオード、pnp トランジスタをエピタキシャル成長によって試作し、評価した。本論文において得られた実験結果や知見を以下にまとめる。

・比較的低濃度 ($\sim 10^{18}\text{cm}^{-3}$) に不純物をドーブしたダイヤモンド半導体層と、比較的高濃度 ($\sim 10^{20}\text{cm}^{-3}$) にドーブしたダイヤモンド半導体層をエピタキシャル成長し、それらの抵抗率を評価した。低濃度の層ではバンド伝導を示し、高濃度ではホッピング伝導を示した。ホッピング伝導するとバンド伝導よりも効率よく、大幅に抵抗率が低減することを実験的に確認した。さらには、高濃度に不純物ドーブした場合のダイヤモンド半導体の状態密度の模式図を考えた。高濃度のホッピング伝導をするダイヤモンド半導体においては、電流は伝導バンドを流れる経路と、不純物準位を流れる経路の 2 つが別個に存在して、共存している。電流は両方の経路を伝って平行に流れるが、不純物準位を流れる経路の方が圧倒的に抵抗が小さく優勢であると考えた。

・ダイヤモンド半導体の p^+i-n^+ ダイオードを試作して、I-V、C-V 特性を評価し、輸送現象の詳細を調査した。 p^+ 、 n^+ 層はホッピング伝導を示し、現在、ダイヤモンド半導体で最も低抵抗率な層である。また、 p^+ 、 n^+ 層と電極の接合もまた、現在、最も低コンタクト抵抗なものである。このダイオードは、理想係数 n は 1.32、整流比は 10^8 、大電流を流せる上に破壊しない屈強さなどの非常に良好な特性を示した。他にも p^+n^+ ダイオードと電極/ n^+ 電極の構造を試作し、 p^+i-n^+ ダイオードと比較することで、以下の結論を得た。

1. p^+i-n^+ 接合はフリーキャリアが電流を輸送するバンド伝導で理解される。バルク p^+ 、 n^+ 層の輸送機構はホッピング伝導であるにもかかわらずである
2. ホッピング伝導は、 p^+ 、 n^+ 層の直列抵抗を低減するのに寄与する。しかしながら、 p^+i-n^+ 接合においては電流を輸送する直接的な役割は果たさない。
3. p^+i-n^+ 接合における i 層は、逆方向の漏れ電流を低減する層として機能する。しかし、順方向ではほとんど無視できるほど抵抗が小さくなる。キャリアが拡散して、 i 層に蓄積されて伝導度変調が起こるから

である。

4. n^+ /電極のコンタクトはP濃度を 10^{20}cm^{-3} のように非常に高くしたときでさえもオーミック性がない。この n^+ /電極のコンタクト抵抗は $p^+i\text{-}n^+$ ダイオードにおいて電圧降下を発生し、I-V 特性に影響を与える。

・pnp トランジスタを試作し、評価した。pnp トランジスタのベース抵抗を低減するために、ベースに不純物準位の比較的浅いPをドーピングして、さらに不純物濃度を上げることによって更なる低減を試みた。しかしながら、エミッタから注入されたホールがコレクタに流れず、全てベースに流れた。そのため、トランジスタが動作しなかった。これは、ベースでは少数キャリアであるホールの拡散長がベース幅より短いことを意味し、これが短いのはベースの不純物濃度が高いためであると解釈した。

次にホールの拡散長を長くするため、ベースの不純物濃度を下げた pnp トランジスタを試作した。これは、狙い通り、エミッタから注入されたホールがコレクタに流れ、拡散長が長くなったことが分かった。しかしながら、ベースのバルクの n 層と電極からなるコンタクト抵抗が高いために、電子の注入がベースに起こっていないと解釈できる結果が得られた。したがって、トランジスタ動作は見込めないと判断した。

次に、そのコンタクト抵抗低減のためにベースの n 層と電極の間に、Pを高濃度にドーピングした n^+ 層を形成した pnp トランジスタを試作した。その結果、エミッタ接地の電流増幅率が ~ 10 を示すなど、ダイヤモンド半導体のバイポーラトランジスタにおいて、エミッタ接地にて電流が増幅することを世界で初めて実証した。これによって、ダイヤモンドの電子デバイスの実用化の可能性を示した。

・ダイヤモンド半導体の電子デバイスを実用化するための課題について大まかに6項目を述べた。1つ目はホッピングするダイヤモンド層やそれを使った電子デバイスで起こっている物理を理解し、性能向上につなげることである。2つ目は n 型の層のバルクの抵抗を下げることである。特にオーミック性をもたないコンタクト抵抗を更に低減し、オーミック特性を得る必要がある。3つ目は現在限られている製造プロセスの選択肢を増やし、電子デバイス構造設計の自由度を大きくすることである。4つ目は本研究における試作と評価で判明した漏れ電流の増加である。5つ目は試作評価で判明した電極の剥がれやすさである。これら4、5は信頼性が低下につながるために原因を解明し対策しなければならない。6つ目は電子デバイスの製造原価の低減である。低減のためにはダイヤモンド基板を大型化すること、さらには安価で格子定数が比較的ダイヤモンドに近いシリコン上にヘテロエピタキシャル成長をするのが良策と思われる。

審 査 の 結 果 の 要 旨

審査の質疑応答は、ダイヤモンド半導体の作製から、金属との接合、PN 接合、 $p^+i\text{-}n^+$ 接合、バイポーラダイオードに関し広く行われた。特に、 n 型ダイヤモンドと金属との接合に関して、いまだに完全なオーミックが得られない理由についての議論を交わし、現在でも低抵抗な n 型ダイヤモンドが得られていないことが理由であり、さらなる n 型ダイヤモンドの低抵抗化の努力が必要であるという、著者の意見が現段階では妥当であると判断された。また、著者より、ダイヤモンド半導体の実用化に対する今後の課題が述べられ、その課題の設定が妥当であると判断した。

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