

審査の結果の要旨

氏名 西村 知紀

シリコン(Si) CMOS デバイスの高性能化は主にサイズの微細化によって進められてきたが、今後も永遠にそれが可能であることは物理的にありえない。そこで次の世代に向けて有望な半導体電子デバイスに対する研究が世界中で始まっており、ゲルマニウム (Ge) は Si よりも電子、正孔ともに移動度が高いという観点から有力な候補材料として検討されつつある。しかしながら、問題は半導体の移動度だけではなく、微細領域では寄生効果、特にコンタクト抵抗の増大は単純な意味での比例縮小則では無視されているという観点から急激に重要な課題になりつつある。特に n 型 Ge と金属とのコンタクトでは非常に強い Fermi-level pinning (FLP) によって、金属の仕事関数を変化させてもショットキーダイオード特性がほとんど変わらないという大きな問題点が報告されてきた。この FLP という現象は Ge デバイスにとってだけでなく、金属/半導体界面における物性的な興味からも昔から多くの研究者によって調べられてきており、いまだに議論され続けている基本的な課題でもある。

上記背景のもと、Ge 界面における FLP を理解・制御し、それによって高性能な Ge デバイスの本質的課題を解決するとともに、長く議論されてきた FLP に新たな考え方を加えることを本研究の目的としている。実験的側面からの研究ではあるが、常に物性物理の原点に戻りながら上記課題に挑戦し、「金属/ゲルマニウム界面におけるフェルミレベルピンニングの研究」という題目の下、Ge 技術と FLP の理解を大きく前進させた論文になっている。本論文は7章から構成されている。

第1章は序論であり、トランジスタの微細化、高移動度チャンネル材料の必要性、さらに従来議論されてきた金属/半導体界面の一般論を整理し本研究の目的と位置づけを明確化している。

第2章は、金属/Ge 界面の FLP の先行研究を示したあとに著者みずから多数の異なる金属を用いた FLP の実験結果を報告している。その際に Ge と Si を対比させながら、金属の超高真空中蒸着という統一化された条件のもとで実験を行うことによって、ばらつきが抑えられた信頼性の高い結果を報告している。実際 3 eV 以上の幅で金属の仕事関数を変化させた接合を形成し、そのすべての場合においてほとんど変わらないショットキー特性を報告している。この結果は大変衝撃的であり、その後多くの文献において引用されている。その結果に基づいて FLP のメカニズムを考察し、“金属の波動関数が半導体エネルギーギャップ中へ染み出すことによって形成されるダイポールが FLP の起源である”とする

metal-induced gap states (MIGS)モデルが Ge の場合にはもっとも適していると推測している。

第3章は上記の MIGS モデルに基づいて FLP 制御機構について考察し、金属と Ge の間に極薄絶縁膜を挿入することによって金属の波動関数の染みだしを抑制するという考えに基づく FLP 緩和実験を報告している。実際、Ge 基板上に形成された GeO₂ 膜厚とともに Ge 界面における FLP が緩和されていくことを初めて観測した。これによって n 型 Ge 基板に完全なオーミック接触がとれることを実証している。

第4章は、さらに上記の考え方を検証するために別の方法を試みている。FLP が起こらない場合には、金属/半導体界面におけるショットキー障壁は金属の仕事関数と半導体の電子親和力の差で決まるはずである。そこで金属の仕事関数に関する理解が本質的に重要であると考えた。その際に、仕事関数の起源の一部が表面における波動関数の真空中への染みだしによる表面ダイポール形成にある事に注目し、界面における MIGS 制御にこの考え方が適用できるのではないかという考えに至った。上記考え方に基づいて、電子濃度が約一桁小さい金属・Ge 間化合物を用いることによって実際に FLP が大きく緩和されることを実験的に示した。

第5章では、上記の二種類の方法によって Ge 上で FLP が緩和されたあとも完全には FLP がなくなることに着目し、複数の界面ダイポール起源が関与している場合について考察している。つまり半導体側の詳細にも目を向け、第4章の方法を用いて Ge 表面の基板面方位依存性について調べた結果、Ge(111)面上で完全なオーミック接触がとれることを示した。Ge(111)面上で FET の電子移動度は最も高くなるという事実は知られており、Ge 電子デバイス技術にとって画期的な結果といえる。

第6章では、上記の仕事関数とMIGSの関係をさらに一般的に考察し、仕事関数という概念の再考察の必要性を議論している。つまり、通常仕事関数は真空中における物理量として考えられているが、真空ではなく半導体（絶縁体を含めて）と接触した時には仕事関数の界面成分は変調されるはずである。この物理モデルに基づいて仕事関数の再構築の必要性を議論している。この考え方は微視的理論に基づいて今後もさらに考察すべき部分も含まれているが、金属/半導体界面の理解に一般的に適用されるべきであり、電子デバイス一般の理解に対しても考慮すべき部分を含む重要な考え方である。

第7章は、全体を総括した後にGe技術に関して将来展望を述べている。

以上を要するに、本研究はGeが潜在的に持つ高い能力を引き出すべく電子デバイスにおいてもっとも重要な項目の一つである金属とのコンタクトに関して、その理解・制御に対する新しいコンセプトを提案し、それを明瞭に実証している点に高い意義がある。これらはいずれも本研究において世界で初めて実証された成果であり、Geデバイス分野のみならず材料工学の観点からも意義はきわめて大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。