

電子・情報工学専攻	学籍番号	049303
申請者氏名	Md. Shofiqul Islam	

指導教員氏名	石田 誠 澤田 和明
--------	---------------

論文要旨 (博士)

論文題目	Doped Si Microprobe Arrays by Vapor Liquid Solid Growth Using In-Situ Doping and Their Device Application 不純物ドーピングを用いたVLS成長法によるSiマイクロプローブアレイとデバイス応用
------	---

さまざまな微小構造の実現やそれらの応用探索に向けて活発に研究がされている。その中でも針状の微小構造は、電極等さまざまな応用分野で用いることが可能なことから、特に注目されている。実際、他研究機関より、すでにいくつかの金属性マイクロ電極アレイについて報告されている。また半導体デバイスとしては、MEMSやセンサ、又は神経細胞からの信号検出用に刺入型電極などの応用に、Siを用いたマイクロ電極の提案・開発がされている。これら報告されている金属やSi電極アレイのほとんどは、エッチング技術やダイシング技術、またはこれらの融合技術によって形成されている。そこで我々は、新たな形成方法としてエッチングやダイシング技術を必要としないVapor-Liquid-Solid (VLS) 成長技術によってSi表面に垂直方向且つ単結晶で成長するSiマイクロプローブの形成に注目してきた。そこで本論文は、VLS成長技術を適用したSiマイクロプローブの実現と応用を検討するものである。

これまで報告されているVLS成長法によるSiマイクロプローブのほとんど全ては、真性半導体のSiマイクロプローブであるため、プローブ抵抗が高く、応用デバイスへの展開へ大きな障壁となっていた。そこでVLS成長後1100°Cで熱拡散することによりプローブ中へ不純物拡散させ低抵抗化することが提案されていた。しかしながらプローブを回路と同一基板上へ集積化させる場合、高温での熱拡散はチップ上のデバイスに大きな問題をもちたしてしまう。一方、低温での熱拡散は、十分にプローブに不純物拡散することが出来ない。よって報告されているSiマイクロプローブの応用は、受動素子として用いられている。これらの理由より能動素子へのVLS成長Siマイクロプローブの利用は、未だ実現されていない。従って、本研究では、集積回路との一体化を可能にするため低温度でのVLS成長による高伝導不純物ドーブSiマイクロプローブの形成、さらに高伝導Siプローブを用いた新規デバイスの応用を目的とする。

初めに、VLS成長による真性半導体Siマイクロプローブの研究を、不純物ドーブSiマイクロプローブの理解のための基礎として行った。本実験では、VLS成長のために金属触媒としてAuドット、SiソースとしてSi₂H₆ガスによるガスソース分子線エピタキシー装置を用いた。真性半導体Siマイクロプローブアレイは、500°C~700°Cで、温度の低下に伴い成長レートが減少するといった特性で成長することがわかった。またプローブの直径は、Auドットの直径サイズ及びAuの膜厚によって1~5μmのレンジで制御が可能である。プローブ成長の場所は、目的とする場所にSiO₂ウィンドウを形成し、そこにAuを成膜することにより選択的に制御が出来る。これらの実験結果よりVLS成長Siプローブは、0.81eVの活性エネルギーをもち、μm/minレベルの成長速度で成長することが明らかになった。またプローブの伝導率は、抵抗率で10⁴Ω·cmであることもわかった。

不純物ドーブSiマイクロプローブ実現のため、VLS成長システムにin-situドーピング装置を導入している。in-situドーピングVLS成長の研究では、n形SiマイクロプローブアレイがSi₂H₆とPH₃を用いて成長が可能であることを確認してきた。n形の不純物ドーピングの影響として、成長レートがPH₃/Si₂H₆比の増加に伴い減少することがわかった。Si₂H₆中のPH₃のガス比を変化させることにより、抵抗率、不純物濃度、電子移動度といったn形Siマイクロプローブの特性を制御できることが判明した。次に応用デバイスに向け、n形Si(111)基板上に形成されたp層上に700°Cでのin-situドーピングVLS成長により、n形シリコンプローブを形成し、Si基板界面にpn接合をもつn形Siマイクロプローブについて検討した。このpn接合は、0.7Vの拡散電位、-11Vでの破壊逆電圧を持った標準のSi基板のpn接合によく似た特性を示した。

次に、Si₂H₆とB₂H₆ガスを用いたin-situドーピングによる成長温度700°C以下のVLS成長によって実現される高成長歩留まりp型Siマイクロプローブアレイについて研究した。p形シリコンマイクロプローブでは、ボロン濃度が低い状態では成長レートが増加し、ボロン濃度が高い状態になると成長レートが減少するといった特性が得られた。p形Siマイクロプローブの抵抗率、不純物濃度、正孔移動度はB₂H₆/Si₂H₆比の変化によって制御される。n型プローブと同様にp形Siマイクロプローブの応用について考察した。2段階in-situドーピングVLS成長を用いることによって、n型Siマイクロプローブを、p-Si(111)基板上に成長させたp型Siマイクロプローブ上に成長させた。つまりpn接合をプローブの中間でp形プローブとn形プローブの界面に形成した。縦型構造のSiプローブ接合は、0.7~0.8Vの拡散電位、5~8Vの破壊逆電圧をもった標準のダイオード特性を示した。この接合は、成長条件と成長時間を変えることにより基板表面からのどんな高さの場所にも形成が可能である。

in-situドーピングVLS成長の研究により、熱拡散(1100°C)での形成と比べ、低温度(700°C)で高伝導率n形及びp形Siマイクロプローブの実現が可能となり、本方法によりスマートチップ開発に向け集積回路と高伝導率Siマイクロプローブアレイの一体化実現を示唆出来た。さらに、縦型針状pn接合構造は、pn接合特性が変化することによる物理パラメータ(温度や圧力)のセンサとして刺入電極デバイス応用の一つの候補として考えられる。また低温度プロセスによるSiプローブpn接合アレイは、センサ応用としてスマートチップを目指したICとの一体化が可能であると考えられる。