

電子・情報 工学専攻	学籍番号	973315	指導教官氏名	石田 誠
申請者氏名	河野 剛士			澤田 和明

論文要旨(博士)

論文題目	マルチチャンネルSiマイクロプローブ電極アレイチップに関する研究
------	----------------------------------

(要旨 1, 200字程度)

脳、及びそれを構成する神経細胞集団の情報処理能力は、私達の想像を遥かに上回っている。脳は数百億個の神経細胞で構成されており、神経活動を媒体としてそれぞれの細胞が相関しあっている。しかし、脳神経系機能の本質的な解明には、これらの細胞活動のパターン性及び細胞集団の相関を把握することが重要であり、これより、近年では、細胞集団の活動記録を可能とする、マルチ(多重)電極アレイを用いる測定方法が重要視されるようになった。しかしながら、現在市販されているマルチ電極アレイの電極サイズは、直径数百マイクロであり、単一の細胞体直径が $10\ \mu\text{m}$ であることを考慮すると、これらの電極サイズは大きい。更に電極間隔においても、このような電極サイズの高密度化が困難であり、細胞集団記録が行えたとしても、十分な空間分解能が得られず細胞活動の分布記録の詳細な結果を示すまでには至っていない。臨床の分野においては、神経細胞との信号伝達を可能とするこのような電極デバイスは、人工器官への応用が有る。更に、これらのマルチ電極の応用を考えると、電極アレイに信号処理機能を搭載する、機能化電極技術も必要となってくる。本研究では、生体内挿入型マイクロ電極アレイの製作に、Si(シリコン)の選択結晶成長である Vapor-Liquid-Solid (VLS) 結晶成長を提案し、更に同一基板上に集積回路(IC)を搭載する、これまでに無い全く新しいタイプのマルチ電極アレイチップの実現に取り組んだ。

挿入型電極の Si マイクロプローブは、触媒金属の Au(金)とガスソース MBE(分子線エピタキシー)法による Si_2H_6 (ジシラン)供給を用いる VLS 成長により構築出来る。この Si プローブは $500\sim 700^\circ\text{C}$ で成長可能であり、これより、工程においては IC 製作後に行える。Si マイクロプローブは、Au の位置とサイズを制御することで、成長するプローブの位置とサイズも制御出来る。また、プローブ長においても、VLS 成長において所望の長さを制御することが出来る。電気的特性においては、成長した Si プローブに不純拡散を行うことで、その導電性を自在に制御することが出来る。また、プローブの結晶構造が Si 単結晶体であることより、直径数ミクロンの微細な形状にも関わらず優れた強度特性を示す。

高密度挿入型マルチ電極として、電極間隔 $40\ \mu\text{m}$ 、 5×5 アレイの配線型 Si マイクロプローブ電極アレイチップを設計した。この電極間隔は、既存の電極と比較して $1/10$ と十分小さく、高い分解能での細胞集団の活動記録が行える電極として期待出来る。VLS 成長条件には、 Si_2H_6 ガス圧力 $3\times 10^{-3}\ \text{Pa}$ 、成長温度 600°C を用い、その成長時間のみを $30\ \text{min}$ 、 $2\ \text{hour}$ と変更することで、 $15\ \mu\text{m}$ 長と $60\ \mu\text{m}$ 長の長さの異なる Si プローブをそれぞれのチップ上に構築した。後述した $60\ \mu\text{m}$ 長の Si プローブは、眼杯網膜内の神経細胞測定用の電極として長さを制御した。このように構築した Si プローブアレイを挿入用電極として実現するため、プローブ低抵抗化、プローブ側面絶縁、先端においては細胞電位記録に効果的な Au 膜を皮膜した。

一方、Si プローブと一体化する MOSFET は、Si プローブの成長方向より、Si(111)基板上での製作技術が望まれた。Si(111)基板上に製作する MOSFET の特性は、通常の Si(100)基板上の MOSFET と比較して、しきい値のシフトが問題となるが、これを MOSFET チャンネル部の不純物濃度を制御することで解決した。VLS 成長用として、Au ドットを MOSFET と近接して形成する必要があるが、VLS 成長時には、この Au の MOSFET 中への熱拡散、及びこれに伴う MOSFET 特性の劣化が懸念された。しかし、 700°C による Au 拡散後の MOSFET より、Au 拡散長及び拡散有無における MOSFET 特性の劣化は確認されなかった。成長温度 700°C において、Si 中に拡散する Au 濃度は $10^{13}\ \text{cm}^{-3}$ 程度であり、MOSFET チャンネル部の不純物濃度に用いた $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ と比較して十分に低い。そのため、MOSFET 特性に変化を及ぼさなかった。

Si プローブと MOSFET を一体化出来る利点を生かし、位置選択回路、及び出力段にバッファ回路を搭載する IC 一体型のマルチチャンネル Si マイクロプローブ電極アレイチップを製作した。各 Si プローブは、MOSFET のドレイン上に配置し、これを $100\ \mu\text{m}$ の電極間隔で 10×10 でアレイ化した。この MOSFET の各ドレイン部に、温度 600°C 、 $2\ \text{hour}$ の VLS 条件を用いて、直径 $2\ \mu\text{m}$ 、 $60\ \mu\text{m}$ 長の Si マイクロプローブアレイを構築した。プローブ電極化(低抵抗化、側面絶縁等)プロセスに伴い、MOSFET の特性の劣化が確認されるが、水素アニール処理を用いて回復した。回復処理後の特性は、一体化 MOSFET として十分な特性結果を示しており、これより VLS 成長 Si プローブと IC との一体化に目処が立った。

本研究では、実際の生理実験を視野に入れ、これらの Si プローブ電極チップを実装した。Si プローブを細胞測定用電極として用いる場合には、生理溶液中における Si プローブの電気的特性が把握しておく必要がある。これより、Si プローブを生理溶液中で評価したところ、 $10^5\ \Omega$ 程度 ($1\ \text{kHz}$) のインピーダンス値を示し、細胞電位記録用として適用可能であることを確認した。更に、Si プローブの実用性を示すことを目的とし、コイ(鯉)眼杯網膜を用いた細胞電位記録実験を行った。記録実験には、網膜を光刺激しその光刺激に対応した細胞光応答記録する方法を用いた。これより、コイの眼球より単離した網膜を Si プローブ電極上に設置し、網膜細胞の光応答記録を行った。結果として、可視光領域の光照射時において、各 Si プローブより光反応した網膜細胞の光応答電位が確認され、これより、本研究で初めて VLS 結晶成長で製作した Si マイクロプローブにより、神経細胞電位が記録できることを明らかにした。