

論文内容の要旨

博士論文題目

人工視覚向け刺激電極材料・構造の高性能化に関する研究

氏名 藤澤 匠

(論文内容の要旨)

本論文は、人工視覚システムにおいて電極の表面材料および形状の両面から検討を行い、小型で高性能な刺激電極の実現を目的とするものである。

電極の表面材料の高性能化が電極性能に与える影響を解明することを目的として高性能材料を成膜した平面電極を作製した。本研究では既存の人工視覚デバイスに用いている半導体集積回路技術と親和性の高い反応性スパッタリングを用いて、高性能材料として注目されている TiN と IrOx を成膜した平面電極を作製した。さらに、スパッタリングによって Ir を成膜後に、電気化学的に活性化した活性化 IrOx の平面電極も作製した。作製した各電極に対して CV 測定及び電極電位測定などの電気化学測定を行うことで性能評価を行い、従来のデバイスで使用していた Pt 電極との性能比較を行った。測定結果より算出した電荷蓄積量 CSC (Charge Storage Capacity)及び電荷注入能力 CIC (Charge Injection Capability)により、従来の人工視覚用デバイスに用いていた Pt 電極と比較して IrOx 電極の高い電極性能が明らかになった。特に活性化 IrOx 電極は優れた電極性能を示し、8000 秒の活性化により大きな CSC を示した。また、TiN 電極は IrOx 電極には劣るものの従来の Pt 電極よりも高い電極性能を示した。SEM による観察の結果、TiN は微細な柱状構造から構成され、成膜条件により構造を制御可能であることが分かった。微細な柱状構造によってもたらされる実行表面積の増加は、電極性能を向上させることが判明した。

電極微細化では、単位面積当たりの電荷注入能力は材料の変更なしには影響を受けないので、電極表面積の減少に応じて電荷注入の総容量は減少する。一方、電極サイズと刺激の閾値との間に非線形の関係があるため、刺激電極が小型化されても閾値はわずかに低下するだけである。したがって CIC の低下は電極の微細化に起因することになる。その結果、網膜を安全に刺激することが困難となってしまう。そのため、電極の幾何学的及び有効表面積を拡大が、電極の微細化を達成しつつ CIC の低下を防ぐための有用な方法と考えられる。そのため、電極の有効表面積拡大による電極性能の向上を評価することを目的として Au バンプを用いた IrOx 立体電極を作製し、この電極に対し電気化学測定を行うことで、平面電極と電極性能を比較した。その結果、同材料を用いた平面電極と比較して立体構造導入により電荷注入能力が向上することが確認できた。

作製した電極について実際の生体組織埋植下での電極性能を調査することは実用を

目指す上で重要である。摘出した豚の眼球に IrOx 立体電極を埋植した ex vivo 実験を行い、実際の刺激と同様のパルス電流を用いて生体組織への電荷注入を実証した。PBS 中での測定と比較して、埋植されたデバイスのおかれる環境がより厳しいことから、豚眼埋植下での CSC および CIC 性能は低下したが、実用上での刺激に対しては十分な性能を維持しており、安全な刺激可能であることが確認できた。

次に立体構造による電極性能について調べた。微小なピラーおよびホールを作製可能なフォトリソグラフィ樹脂 SU-8 を使用して、サイズと表面積の異なるピラー及び直方体形状の微小 IrOx 立体電極を作製し、立体構造が電極性能に与える影響をより詳細に調査した。この結果、微小なピラー電極及び直方体電極では、平面電極と比して CSC が増加していることが分かり、電極表面積の増大に比例した電極性能の向上を確認した。また、Si 基板上に三角形、正方形、長方形、六角形、円形の 5 種類の形状の IrOx 平面電極を作製し、電極性能の電極形状依存性を評価した。その結果、同一の電極面積であれば電極形状によらず、ほぼ同一の電荷注入能力を示したことから、電極形状と電極性能の間に有意な関係性は見いだせなかった。しかし、電荷注入能力には電極の実行表面積が強い影響を及ぼしていることが分かった。

本研究により今後立体形状電極に高性能材料を組み合わせることにより、更に優れた刺激電極を作製可能であることが示唆され、これにより人工視覚システムの更なる高解像度化が期待できる。

(論文審査結果の要旨)

本論文は、人工視覚システムにおいて電極の表面材料および形状の両面から検討を行い、小型で高性能な刺激電極の実現を目的とするものである。

電極の表面材料の高性能化が電極性能に与える影響を解明することを目的として高性能材料を成膜した平面電極を作製した。本研究では既存の人工視覚デバイスに用いている半導体集積回路技術と親和性の高い反応性スパッタリングを用いて、高性能材料として注目されている TiN と IrOx を成膜した平面電極を作製した。さらに、スパッタリングによって Ir を成膜後に、電気化学的に活性化した活性化 IrOx の平面電極も作製した。作製した各電極に対して CV 測定及び電極電位測定などの電気化学測定を行うことで性能評価を行い、従来のデバイスで使用していた Pt 電極との性能比較を行った。測定結果より算出した電荷蓄積量 CSC (Charge Storage Capacity)及び電荷注入能力 CIC (Charge Injection Capability)により、従来の人工視覚用デバイスに用いていた Pt 電極と比較して IrOx 電極の高い電極性能が明らかになった。特に活性化 IrOx 電極は優れた電極性能を示し、8000 秒の活性化により大きな CSC を示した。また、TiN 電極は IrOx 電極には劣るものの従来の Pt 電極よりも高い電極性能を示した。SEM による観察の結果、TiN は微細な柱状構造から構成され、成膜条件により構造を制御可能であることが分かった。微細な柱状構造によってもたらされる実行表面積の増加は、電極性能を向上させることが判明した。

電極微細化では、単位面積当たりの電荷注入能力は材料の変更なしには影響を受けないので、電極表面積の減少に応じて電荷注入の総容量は減少する。一方、電極サイズと刺激の閾値との間に非線形の関係があるため、刺激電極が小型化されても閾値はわずかに低下するだけである。したがって CIC の低下は電極の微細化に起因することになる。その結果、網膜を安全に刺激することが困難となってしまう。そのため、電極の幾何学的及び有効表面積を拡大が、電極の微細化を達成しつつ CIC の低下を防ぐための有用な方法と考えられる。そのため、電極の有効表面積拡大による電極性能の向上を評価することを目的として Au バンプを用いた IrOx 立体電極を作製し、この電極に対し電気化学測定を行うことで、平面電極と電極性能を比較した。その結果、同材料を用いた平面電極と比較して立体構造導入により電荷注入能力が向上することが確認できた。

作製した電極について実際の生体組織埋植下での電極性能を調査することは実用を目指す上で重要である。摘出した豚の眼球に IrOx 立体電極を埋植した ex vivo 実験を行い、実際の刺激と同様のパルス電流を用いて生体組織への電荷注入を実証した。PBS 中での測定と比較して、埋植されたデバイスのおかれる環境がより厳しいことから、豚眼埋植下での CSC および CIC 性能は低下したが、実用上での刺激に対しては十分な性能を維持しており、安全な刺激可能であることが確認できた。

次に立体構造による電極性能について調べた。微小なピラーおよびホールを作製可能なフォトリソグラフィ樹脂 SU-8 を使用して、サイズと表面積の異なるピラー及び直方体形状の微小 IrOx 立体電極を作製し、立体構造が電極性能に与える影響をより詳細

に調査した。この結果、微小なピラー電極及び直方体電極では、平面電極と比して CSC が増加していることが分かり、電極表面積の増大に比例した電極性能の向上を確認した。また、Si 基板上に三角形、正方形、長方形、六角形、円形の 5 種類の形状の IrOx 平面電極を作製し、電極性能の電極形状依存性を評価した。その結果、同一の電極面積であれば電極形状によらず、ほぼ同一の電荷注入能力を示したことから、電極形状と電極性能の間に有意な関係性は見いだせなかった。しかし、電荷注入能力には電極の実行表面積が強い影響を及ぼしていることが分かった。

本研究により今後立体形状電極に高性能材料を組み合わせることにより、更に優れた刺激電極を作製可能であることが示唆され、これにより人工視覚システムの更なる高解像度化が期待できる。その成果は、学術的に新しい知見を見出していると判断され、審査委員一同は、本論文が博士（工学）の学位論文として価値あるものと認めた。