

氏名	たか はし こう ろう 高 橋 幸 郎
授与学位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 ⁵⁶ 55年 5月 13日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	医用集積回路の試作に関する研究
指導教官	東北大学教授 松尾 正之
論文審査委員	東北大学教授 松尾 正之 東北大学教授 西澤 潤一 東北大学教授 柴田 幸男 東北大学助教授 星宮 望

論 文 内 容 要 旨

第1章 序 論

近年の半導体集積回路技術の進歩は極めて著しく、高集積化、高速動作、多機能化が目覚ましい。この集積回路特有の超小形という点は、生体への応用面において特に有効なものである。その例としては生体情報モニタのためのテレメータ装置や、生体機能補助装置がある。また半導体集積回路分野で発展してきた微細加工技術を用いて、生体の電位、温度、圧力、血流、pH、ガス濃度などの情報を in vivo で計測するための超小形センサの研究開発が行なわれるようになった。

これらのうち神経生理学では、生体の神経細胞活動電位の導出のために各種の微小電極が使われている。この目的に用いられる電極は通常1本毎に製作されるため、その形状、電極インピーダンス、絶縁材の被覆の再現性、制御性に乏しく、また多重化が困難であった。これに対しK. D. WiseやR.L.Whiteは、半導体加工技術の一つであるフォトリソグラフィを利用して、細胞外導出記録のための微小電極をシリコン基板を用いて形成した。この方法は電極形成や電極サイトの配置の再現性が良く、また電極の多重化が容易であり、電極間のクロストークが少ない。

本研究ではこれら電極より更に進んで、高度な機能を有する電極の実現をはかった。すなわち受動素子である微小電極と半導体能動素子とをシリコン基板上に一体化した集積化微小電極の形成

を行った。この電極構成により、微小電極のインピーダンス変換だけでなく、電極を多重化した場合の特定電極の選択や、出力信号の多重化伝送などの信号処理を電極上で行うことが可能となる。さらにこの電極により神経活動電位の急性記録だけでなく、テレメータ装置と組み合わせ、無拘束、非麻酔下での慢性記録のための埋め込み電極としても用いることができる。また多重化した電極による活動電位の同時多重記録は、空間的な分布結合を有する神経回路網を解析する上で有力な手段となり得る。

本論文ではこの集積化微小電極の実現のために、導出用電極材料の検討と、微小電極のための集積回路の設計、およびその試作を行っている。また導出電極と集積回路とを複合化するためのプロセス開発を行い、さらに実際に集積化微小電極を試作し、その評価を行っている。

第2章 ポリシリコン微小電極

生体用微小電極材料として従来から用いられてきたものには、ガラス、ステンレス、白金-イリジウムなどがあるが、集積化電極の場合にはこれらはプロセスの点から不相当である。このため新たに電極材料として、ポリシリコンの使用を試みた。ポリシリコンはすでにMOSFETのゲート電極材料として使用されてきているが、ポリシリコンは高温プロセスが可能であり、導体としての機能を有すると同時に、それ自身が酸化されることにより絶縁物となり、また他の無機材質との付着力が優れているなどのことから、集積化電極の電極材料としてもパッシベーションやプロセス上の面から特に有利であることがわかった。

ポリシリコンの形成は、モノシランの熱分解法を用い、導伝率を増すためにボロンを拡散している。この場合ポリシリコンのシート抵抗は金属より2桁程大きい、微小電極の溶液との界面インピーダンスに比較して問題とならない小さな値である。

一方ポリシリコン電極の生理食塩水中での電気的特性では、分極電圧が金属電極に比べ大きく、また表面に形成される酸化膜のために界面インピーダンスの再現性が悪く、さらにポリシリコンと溶液界面で光起電流が発生し、導出記録の際の大きな雑音となることが分った。しかしこれらの欠点はポリシリコンと電解液との直接の接触を避けるために、金をポリシリコン上に被覆することにより解決された。さらに金はポリシリコンとのオーミックコンタクトに優れ、かつ化学的に安定であるので好都合である。

第3章 微小電極用増幅素子としてのMOSFET

微小電極用増幅素子として、高入力インピーダンス、集積化の容易さの点からMOSFETを採用した。この場合、MOSFETの欠点である $1/f$ 雑音を低減する必要があるが、これには SiO_2/Si 界面準位の制御のみならず、ゲートの幾何学的効果を利用することが必要である。後者の場合特に低雑音化には、ゲート膜厚の低下が有効である。

ここで用いたMOSFETは、ポリシリコン微小電極との複合化プロセスのためにPチャンネルシリコンゲートを用い、ゲート絶縁膜へのボロンの拡散を防ぐために $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiO}_2$ の2層構造を採用した。一方低雑音化のために SiO_2 膜厚を低下した場合、オージェ電子分光分析

およびX線電子分光分析により、 SiO_2/Si 界面に窒素が検出され、 SiO_2/Si 界面で窒化が生じており、その結果電気的特性が変化することが判明した。この原因は Si_3N_4 のCVDにおいて使用される NH_3 ガスが SiO_2 中を拡散し、 SiO_2/Si 界面を窒化したためと判定された。またその程度は、 NH_3 ガスの SiO_2 中の拡散速度およびCVD時間に依存する。さらにこの拡散速度は、 NH_3 ガスと SiO_2 との反応の生成自由エネルギーの値からみて、 NH_3 ガスに含まれる水分に影響されるものと推測される。

窒化を生じた SiO_2/Si 界面特性は、その窒素量とその後の熱処理条件により変化する。窒素量の増加とともに固定電荷、界面準位、雑音とも増加するが単調ではなく、特定の窒素量に対し最小値を示す。さらにBTストレス試験からは、 SiO_2/Si 界面に電荷トラップが形成されていることが示された。これによるフラットバンド電圧変化の大きさは、窒素量に関係するが一樣ではなく、熱処理の有無、バイアス極性によっても変化する。またこの試験により界面準位の増加がみられ、その大きさに関しても、窒素量、熱処理法によっても異なる。

このように SiO_2/Si 界面での窒素の存在は、その量と熱処理条件により、界面特性のある程度の改善が得られるが、同時にトラップの生成や、BT処理による界面準位の増加といった新たな不安定性が生ずる。従って、 Si_3N_4 のCVD時において、 SiO_2/Si 界面の窒化を防止することが必要であり、このためには NH_3 ガスの無水化処理が必要と思われる。

第4章 集積化微小電極の試作

本章においては集積化電極のための集積回路設計および、多重微小電極と集積回路の複合プロセス設計とその具体的製法手順について述べている。

回路設計では、まず入力段で要求されるMOSFETの雑音に対する検討から、必要なゲート寸法の設計を行ない、また各製造パラメータに基づき、増幅度および直流動作点解析による各FETのパターン設計と、微小電極のインピーダンスを考慮した入力段での周波数特性からの結合コンデンサの容量決定を行っている。次に回路のテストパターンにより、動作試験、周波数特性、雑音についての評価を行った結果では、製造条件の不均一、各ウエハー毎の履歴の差に起因すると思われるゲート膜厚および閾値電圧のバラつきに基づく増幅度の分布がみられ、さらに同一ロットであっても、その分布パターンに差がみられた。周波数特性はほぼ設計値通りの性能が得られたが、雑音レベルは設計値を上回り、この原因として、新たに集積回路プロセスに電極形成プロセスが導入されたためと思われる。

プロセス設計では、シリコンのケミカルエッチングによる三次元加工と、フォトリソグラフィ、およびパッシベーション、光の影響、電極への結線法について検討を行い、集積化電極形成に最適なプロセスの選択とその組み合わせを行った。ここでのプロセスの特徴としては、(1)異方性エッチング液と等方性エッチング液とにより、マスクパターンに忠実なシリコン電極プローブの形成が可能なこと。(2)三次元体へのフォトリソグラフィの困難さを、プローブ形成工程の変更、選択酸化法の採用により解決し、(3)集積回路および電極ラインが Si_3N_4 によりパッシベーションされており、(4)電極サイトへの金の被覆がフォトリソグラフィを用いずに行い得る点などである。また

当然のことながら、集積回路技術一般の特徴であるパッチ処理により、多数の電極が同時に形成できる利点を有する。

これらのプロセス法に基づき、8チャンネルの集積化電極を試作した結果では、(1)チャンネル間のクロストークは -40 dB前後と実用に際し十分小さな値である、(2)入力換算雑音は $40\mu\text{V} \sim 400\mu\text{V}_{\text{pp}}$ ($0.7\text{KHz} \sim 10\text{KHz}$) に分布した。ラットを用いた急性動物実験では、導出された信号レベルに比べこの雑音レベルが大きく、実用上更に低雑音化をはかる必要がある。(3)エッチングによって形成されたシリコンプローブの先端形状は鋭い刃状を有するため、電極プローブの組織への挿入は極めて容易である。(4)残された点として、電極の実用的なマウント法および結線法の検討、パッシベーション法、生理学的実験から電極の数およびその配置についてデータの蓄積が必要である。

第5章 結 論

結論として本論文を要約し、第2章から第4章までの総括を行なった。

審査結果の要旨

近年半導体集積回路技術の発展に伴い、センサとその信号処理回路とを一体化することが可能になり、センサ機能の高度化多様化の面での進歩は著しい。著者は、神経生理学の研究に不可欠な微小電極とその前置増幅器とを一体化することにより格段に性能が向上すること、ならびに生体内埋め込み慢性実験が可能となることなどに注目し、新しい集積化微小電極の開発研究を行った。本論文はその成果をまとめたもので全編5章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的とを述べている。第2章では、微小電極材料として、高温CVD（気相成長法）によるパッシベーションが可能で、集積化前置増幅器製作のプロセスと両立性のあるポリシリコンを選び、その形成条件を明らかにしている。また誘導電極面に金を蒸着したポリシリコン微小電極は実用に堪える性能を有することを実験的に確かめている。

第3章では、微小電極用集積化増幅素子としての必要条件を種々検討した結果、MOSFETが適しているとし、その低雑音化について詳細に検討している。ついでその考察に基づき、 Si_3N_4 - SiO_2 膜を用いたPチャネルシリコンゲートMOSFETを試作し、その雑音特性の評価を行っている。なお、シリコンゲートは、その一部を鋭く加工するとそのまま微小電極となる。著者の提案するこのプロセスによって集積化微小電極が初めて製作可能となった。

第4章では、集積化微小電極を試作した結果について述べている。まず、神経インパルスの細胞外誘導を目的とした微小電極用増幅器回路の設計と試作を行い、ほぼ満足する結果を得ている。ついで、同一シリコン板を基板とした8チャネルのポリシリコン多重微小電極と前置増幅器とを一体化する新しい複合プロセスを工夫し、集積化微小電極の試作に成功している。試作した電極は、利得約15倍、帯域幅0.7~10 KHz、入力換算雑音電圧40~400 $\mu\text{Vp-p}$ 、電極間クロストーク量約-40 dBを示している。同時に動物実験により、この電極の有効性とその適用限界も確かめている。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文は集積回路技術を応用し、微小電極とその前置増幅器を一体化した多重集積化微小電極の試作に成功し、生体内埋め込み用集積回路の可能性を確めたものであり、半導体デバイス工学ならびに医用電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。