

論文の内容の要旨

論文題目 生体情報センシングに向けた高利得有機増幅器

(High gain organic amplifiers for sensing of biological information)

氏名 李 成薫

本研究では、生体情報の正確な計測に向け、極薄基板上に作製される有機増幅器の高ゲイン化のための研究を行った。トランジスタの閾値とインバータの反転位置を制御することにより、インバータ型増幅回路のフィードバックゲインが劇的に向上されることを実証し、極薄基板上で動作し、ポリマー絶縁膜を用いる有機増幅器の中で最も高いゲインを得ることに成功した。さらに、トップコンタクト型短チャネルトランジスタを用いることやインバータを多段化することによってインバータのゲインを向上できることを示した。生体情報を計測するために、極薄基板上の PVDF ナノファイバによる圧力・音響センサを検討し、基板の薄膜化とナノファイバ構造の採択によって、非常に柔らかいセンサを実現できることと、さらに基板の薄膜化に伴い、センサの性能が向上できることを実証した。最終的に PVDF センサと有機増幅器を用い、生体情報を計測し、その信号を増幅することで高品質の生体情報を得ることに成功した。

1. 研究背景

有機材料は、材料の特性より、フレキシブルなデバイス、軽量なデバイスを作製するのに適している。近年、技術の進歩に従い、有機光・電子デバイスを用い、生体情報を計測することが注目されている。極薄基板上に有機デバイスを作製することにより、生体の立体的な曲面に密着できるため、生体対象の情報を正確に計測できるようになる。さらに、極薄基板上の増幅器を実現することによって、信号源の増幅が可能となり、配線や接続部でのノイズの混入の最小化できるため、より正確、かつ、高品質な生体情報を計測できるようになる。一方、ゲート絶縁膜は有機トランジスタ及び回路の性能を定める非常に重要な要素であり、ポリマー絶縁膜はトランジスタの均一性に優れることや長期における安定した動作が可能なことから期待されている。しかし、ポリマー絶縁膜を用いる有機増幅回路においては、増幅回路の増幅率において難点があり、特に、インバータ型増幅回路の報告では、10 dB 以上のゲインの報告はなされていなかった。

2. 本研究の目的

本研究では、大きく分け、二つの目的で研究を進めた。まず一つ目として、生体情報への応用に向け、極薄基板上で動作する有機増幅回路の高利得化である。有機トランジスタのゲート絶縁膜としてはポリマー絶縁膜を用い、有機増幅回路の周波数領域として生体情報の数 kHz 領域をカバーするようにしながら高ゲイン化のための研究を行った。二つ目として、実際の生体情報を計測し、有機増幅器を用いてその信号を増幅することである。そのために、生体対象に密着可能なフレキシブルなセンサも同時に開発し、センサによって得られた生体情報を有機増幅器によって増幅することを目的とした。

3. 実験結果 (第3章、第4章、第5章)

3章では、短チャネルトランジスタにおける閾値制御に関する結果を紹介する。トライゲート構造と容量カップリングを用いる有機トランジスタの閾値制御に関して報告し、PFBT処理を用いるボトムコンタクト型トランジスタにダブルゲートを導入し、閾値制御した結果を紹介する。そして、Auエッチングを用いるトップコンタクト型短チャネルトランジスタの閾値制御に関する結果について紹介する。

まず、ポリマー絶縁膜を用いるインバータ型有機増幅回路の低いゲインの理由としてインバータの低いノイズマージン(高い反転位置)とトランジスタの閾値に着目した。同時に、生体情報の周波数領域での動作のために、チャンネル長を数 μm のオーダーに保つために、フォトリソグラフィ法によるソース・ドレインの形成を行った。トライゲート構造と容量カップリングによる閾値制御を検討し、半導体を覆う絶縁膜を用いることなく、閾値を変調できる

新しい構造を提案した。新しい構造により、半導体への影響を最小化しながら、連続的な閾値制御性制御を得ることに成功した。一方、トップゲート電極の影響が大きくなるにつれてボトムゲートの支配力が弱まり、実効的な容量が低下することは確認され、トライゲート構造の短所といえる。

次に、ボトムコンタクト型短チャネルトランジスタにダブルゲートを導入し、短チャネル化プロセスとダブルゲート構造とのプロセス適合性を調べた。短チャネルトランジスタでもダブルゲート動作することを実証でき、ボトムゲートによる閾値の制御幅は、トップゲートとボトムゲートからのチャネルまでの容量比(~ 0.627)は理想値(~ 0.630)とほぼ一致しており、界面や絶縁膜中にトラップを形成することなく、閾値を制御することに成功した。トライゲート構造の長所として半導体層へのダメージを排除できることであるが、CVD法によるパリレン膜においては大きい問題とならなかったため、本研究の増幅回路ではダブルゲート構造のトランジスタを用い、閾値制御することにした。さらに、トップコンタクト型の短チャネル化と閾値制御を検討し、ソース・ドレインのエッチングによる短チャネル化を行った。その結果、接触抵抗を通常のトップコンタクト型と同レベルに保ちながら (~ 0.51 k Ω)、トップゲート電極によって閾値を制御することに成功した。トップコンタクト型短チャネルトランジスタにおけるダブルゲート動作と閾値変調は初めての報告である。

4章では、3章で検討したトランジスタをインバータ回路に導入した結果を紹介する。短チャネルトランジスタを用いるインバータ回路の高ゲイン化と反転位置制御に関する結果を報告する。続いて、反転位置制御によるインバータ型自己バイアス増幅器のゲイン向上に関して報告し、Anodized AlO_x キャパシタと集積した上で、極薄基板上で動作させた結果を報告する。さらに、インバータの多段化による増幅器のゲイン向上と、トップコンタクト型トランジスタを導入し、増幅器のゲインを向上するための結果を紹介する。

まず、閾値制御可能な短チャネルトランジスタを用いることで、インバータの増幅率 (open loop gain) に大きな影響を与えることなく、インバータの反転位置を制御できることを示した。その結果、ポリマー絶縁膜の短チャネルトランジスタを用いるインバータにおいて世界で最も高いノイズマージンを達成した (3Vの駆動電圧において 1.34V, 2Vの駆動電圧において 0.9V)。そして、トップコンタクト型トランジスタを用いることにより、ボトムコンタクト型トランジスタを用いた場合より、インバータのゲインを高くすることに成功し、短チャネルトランジスタを用いる有機インバータ回路においてもっとも高いゲインと得ることに成功した (最高ゲイン: 99.8倍)。さらなる高ゲイン化のために、インバータ回路の多段化を試み、直列につないだ奇数個のインバータを用いることでゲインを劇的に向上させることに成功し、1段で 15.1 dB であったゲインが 39.2 dB まで向上することを確認した。

そして、インバータの反転位置を制御することで、インバータ型増幅回路のフィードバックゲインが劇的に向上できることを確認し、ほぼ開ループゲインに近づけることが可能

であることを示した。ダブルゲート構造を用いないインバータ回路のフィードバックゲインがほぼ 0 dB であったことに対して、ダブルゲート構造を用いることでフィードバックゲインが 18.89 dB と劇的に向上し、ほぼ開ループゲイン (19.93 dB) と同程度となった。そして、インバータ回路とのプロセス適合性を考慮し、陽極酸化法による AlO_x キャパシタと集積し、極薄基板上で動作し、高ゲインを持つ有機増幅回路を実現することに成功した。

5 章では、生体情報センシングのために、PVDF ナノファイバを用いる歪み・音響センサの結果を紹介し、極薄基板によるセンサ性能向上に関する内容を報告する。そして増幅器と集積し、生体情報をセンシングし、その信号を増幅することによって本研究で実現した有機増幅器と PVDF センサの有用性を実証した結果を報告する。

生体応用に向け、conformable なセンサの作製のために、PVDF の piezo 特性に着目し、electrospinning 法による PVDF のナノファイバ (直径:約 600~800 nm) 構造のシートを作製し、極薄基板に積層することにより、非常に柔らかい圧力・音響センサを実現することに成功した。音響センサにおいては、基板を薄くしていくことによって音響センサの性能が向上することを示し、極薄基板を用いることで、センサを柔らかくするだけでなく、高性能の音響センサを得ることができることを初めて示した。最後に、作製したセンサを用いて生体の情報を得ることに成功した。腕に貼り付けることで脈拍の測定に成功した。また有機増幅器により脈拍の信号が 92 倍 (0.235 → 21.7 mV) 増幅され、SNR も 12.8 dB から 24.2 dB に向上することを確認した。そして、センサを首に貼りつけることによって声や嚥下のための飲み込みを計測することに成功し、開発したセンサと有機増幅器が生体情報の計測において有用であることを実証した。

4. まとめ

本研究では、生体情報計測への応用に向け、極薄基板上で動作する有機増幅回路の高利得化を図った。より具体的には、1.反転位置制御・高ノイズマージン化によるフィードバックゲイン向上、2.トップコンタクト型短チャネルトランジスタの作製による高ゲイン化、3.インバータの多段化による高ゲイン化を実現した。さらに、極薄基板上の PVDF ナノファイバを用いることで、非常に軽く、かつ、非常に柔らかいセンサの開発に成功し、同時に、基板の厚さがセンサの性能において重要であることを示した。実際開発したセンサを用い、生体情報 (脈拍、声、飲み込み) の計測と、有機増幅器と繋げ、得られた信号の増幅を行った。有機増幅器により、実際の生体信号において高い増幅率 (39.2 dB) と、SNR の向上 (12.8 → 24.2 dB) が確認され、ポリマー絶縁膜を用いる極薄有機増幅器の高利得化と、実際の生体情報の増幅に有用であることを示すことができた。本研究の結果により生体情報の常時モニタリングが可能となり、有機増幅器の医療・ヘルスケア分野への応用が期待される。