

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 栗原 一徳

本研究においては、次世代の埋め込み型生体電気信号計測を目指し、生体埋め込みが可能な大面積有機センシングアレイの作製を目的とした研究を進めた。その目的を達成するため、医療デバイスとして滅菌可能な有機トランジスタを実現し、長期測定する際に問題となる炎症作用を軽減化するためのゲル素材の電極応用を進め、さらに、測定精度向上のため信号雑音比の改善することによって、有機トランジスタ集積回路の有用性を示している。

まず、埋め込み型デバイスの実現に向けて、2 V駆動の低電圧駆動かつ滅菌処理条件に耐えられる有機トランジスタを実現した。加熱滅菌可能な有機トランジスタを実現するためには、耐熱性と耐水性の両立が必要である。本研究で使用したDNTT有機トランジスタは、約100°Cの加熱後から移動度の低下が見られ150°Cの加熱後ではトランジスタ特性が消失した。100°CはX線回折実験調べたDNTT半導体の格子定数変化や、原子間力顕微鏡によるDNTT薄膜の表面形状変化が現れる温度と非常に近い値であった。そこで、パリレン高分子の封止膜をこの有機半導体上に製膜することで表面形状の変化を抑制したところ耐熱温度が約20°C向上し、150°C20秒の加熱殺菌後でも移動度 $0.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ でのトランジスタ駆動が確認された。さらに封止膜層をパリレンと不活性金属のAuハイブリッド封止膜にすることで耐水性の改善も行った。その結果、30分間の煮沸を3度行う間欠滅菌後でも移動度 $0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ で動作することを確認した。

また、有機トランジスタの駆動電圧を低減するため、ゲート絶縁膜に酸化アルミニウムと自己組織化単分子膜によるハイブリッド絶縁膜を用いて2 Vの低電圧駆動を実現している。X線吸収端近傍吸収微細構造解析により自己組織化単分子膜（厚さ2 nm）の構造の観察を行った。その結果、およそ200°Cまで安定した構造を保持して、分子の配向度が安定して高いことが分かった。熱安定性に優れる材料をゲート絶縁膜に利用したことによって、滅菌可能な低電圧駆動の有機トランジスタが実現できた。

次に、環動ゲルを用いることで、電気計測を阻害せずに低ヤング率な抗炎症バッファ層を作製できることを示した。長期埋め込みデバイスの課題の一つは、デバイスと生体の接触による炎症作用である。そのため長期測定では信号強度の低下や、測定部位のズレなどが起きてしまう。この炎症はデバイスによる生化学的、力学的な刺激が原因である。そこでデバイスと生体の間に抗炎症性のバッファ層を導入することでこの炎症作用を大きく抑制できると考えられる。生化学的・力学的刺激はパリレンやポリイミドなどの生体適合性の材料でコーティングすることで解決できる。一方、応力集中による生体の炎症を抑えるためには、生体と同程度のヤング率と伸縮性を持った材料を利用する方法が考えられる。本研究では生体適合性で低ヤング率を実現できる新規材料の環動ゲルに着目し、このゲルで

のバッファ層作製を目指した。まず、架橋開始剤量を変化させてヤング率の最適化を行った結果、架橋開始剤が0.1-1wt%程度の濃度で柔らかく、丈夫な試料が得られた。このときヤング率は40-70 kPaであり、伸長率は60-100%という生体組織と比較して十分高い伸長度が得られた。さらに、生体電気信号取得の為にバッファ層に伝導性があることが必須である。ゲルの導電性は内部の電解質の濃度やポリマーの分極の有無などにより影響を受ける。実際に含水率が50%程度と低いゲルでは導電性は1ケタ以上低下してしまう。そこで、環動ゲルを20 Hz-1 MHzの範囲で交流インピーダンス測定した結果、環動ゲルには分極などによる誘電分散は見られず、体積伝導率が確認できる100 kHz以上の高周波では9 mS/cmと生理食塩水の16 mS/cmに比較しても比較的良好な伝導率が得られた。

さらに、大面積センシングマトリックスを試作した際に最大の課題となるクロストークを低減した。大面積に渡って高空間分解能で生体情報を計測するニーズが増えている。多チャンネル化を進めるためには、配線での信号送信中でのクロストークやノイズの混入により信号雑音比が低減する必要がある。まず、抗炎症性のゲルのバッファ層を介したクロストークを低減するために、絶縁ゲルをUVでパターンニングして各電極を素子分離したバンク構造を形成した。7×7 mm²の電極セルのアレイに対して縦横に電極を分離するように1 mm幅のシリコンによるバンクを作製した。その後、セルの開口部に前述の環動ゲルを満たしバッファ層を作製した。バンク構造を持つ電極マトリックスでは電荷の分散が低減できるために、バンクなしの構造と比較して96%の信号強度改善であった。さらに、配線間でのクロストークに関しては配線への送信前に信号取得時にすぐに増幅回路で信号を増幅することで信号雑音比を改善した。

以上のように、本研究においては、生体との親和性の視点から有機デバイスに検討を加えることによって、滅菌できる有機トランジスタを実現し、生体親和性に優れるゲルの電極応用を進め、さらに大面積センシングマトリックスを試作してクロストークの低減することに成功した。本研究における技術は将来的な低電圧駆動体内埋め込み型フレキシブル有機デバイスの応用に十分可能な性能を有していることを示す結果であり、物理工学における貢献は大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格であると認められる。