

論文の要旨

氏名 工藤 貴史

論文題目 Silicon Functional Nanoscale Structures and Bio/Ion-Sensor

(シリコンナノ機能構造及びバイオイオンセンサーの研究)

ナノ構造を利用することは、半導体素子の低消費電力動作や集積化など、集積回路分野への大きな利点がある。また、医療分野においても、その極めて微細な構造を利用した薬物輸送システムや人体に悪影響を及ぼす細菌・ウイルス等の低濃度からの早期検出が期待されている。本研究では成熟した半導体加工技術を利用して、高い機能デバイスとしての応用が期待できるシリコンナノ構造を作製し、その作製方法を確立した。更に、作製したシリコンナノ構造を含む機能デバイスとして集積回路における低消費電力ロジック動作のための機能ゲートトランジスタ及び生体分子・イオン検出のためのバイオイオンセンサーを作製した。

低消費電力で動作する CMOS ロジックアプリケーションのためのデバイスとして、トラップ電荷の注入・放出を利用して閾値の自己調整を可能とする機能ゲートトランジスタの研究を行った。ゲートに正電圧を印加した場合、電荷トラップ層からのゲートへの電子放出により閾値電圧は負方向へ、負電圧を印加した場合は逆にゲートからの電子の注入により閾値電圧は正方向にシフトすることを確認した。この閾値の自己調整機能により作製した機能ゲートトランジスタは off 電流を増加させずに on 電流を増加させることが可能である。また、電荷注入・放出に対するデバイスのエンデュランス特性やパーコレーションモデルを用いたトンネル酸化膜の劣化機構の解明など、デバイスの信頼性についても研究を行った。デバイスのトラップ層の面積の縮小、トンネル酸化膜の薄膜化により、高信頼性機能ゲートトランジスタの CMOS ロジックへの応用が可能だと考えられる。

バイオセンサーに関しては、生体分子検出のために他研究と比較しても膜厚の薄い高信頼性 Si_3N_4 絶縁膜を有するシリコンナノワイヤトランジスタを作製した。作製したナノワイヤトランジスタは溶液中の水素イオン濃度に反応して、チャンネル上の Si_3N_4 絶縁膜表面の電荷の変化を検出する水素イオンセンサー(pH センサー)として機能した。また、生体分子 Si-tag の持つ電荷を電氣的に検出できることを実証した。ナノワイヤトランジスタを利用した場合、蛍光標識が不要になるため、ラベルフリーな生体分子の検出が可能となる。続けて、イオン種及び生体分子の高感度検出のためにシリコン単一電子トランジスタを利用したバイオセンサーの作製を行った。イオン種及び生体分子の検出は室温付近で行う必要があるために、単一電子トランジスタには、クーロン島の実効容量を減らす方法として、クーロン島を直列に接続したチャンネル構造が取り入れられている。作製した単一電子トランジスタは室温において明確なクーロン振動を確認できた。クーロン振動はドレイン電流-ゲート電圧のトランスコンダクタンスを増加させるので、イオン種や生体分子の高感度検出に繋がる。クーロン振動を利用することにより明確なイオン応答特性(水素イオン検出)を得ることができた。更に、ビオチン-ストレプトアビジンの特異的結合を利用した 1ng/ml のストレプトアビジンの電荷検出を行った。ビオチン-ストレプトアビジンの結合により、単一電子トランジスタのクーロン振動はゲート電圧に対して約 90mV シフトした。1ng/ml という検出濃度は他研究と比較した場合大きいため、更なる低濃度の検出測定を試みる。また、前立腺特異抗原(PSA)の 4ng/ml 検出測定を行った結果、クーロン振動はゲート電圧に対して約 30mV シフトした。4ng/ml という濃度は、実用化レベルの濃度である。

以下に本論文の要旨を述べる。

第 1 章では、高機能シリコン構造及びそれを利用した機能ゲートトランジスタ及びバイオ・イオンセンサーについて背景・目的を述べる。

第 2 章では、本研究における基礎事項及び基礎的な背景について述べる

第 3 章では、各デバイスにおける共通した作製プロセスについて述べる。

第 4 章では、各シリコンナノ構造の作製プロセス及び、その一つを利用した低消費電力ロジック動作可能な機能ゲートトランジスタについて述べる。

第 5 章では、薄膜ゲート絶縁膜を有するシリコンナノワイヤトランジスタを利用した、pH 測定及び生体分子 Si-tag の検出測定を行った。

第 6 章では、高感度検出のためのシリコン単一電子トランジスタを利用したバイオセンサーの作製、及びそれを利用した pH 測定及び生体分子ストレプトアビジン・前立腺特異抗原(PSA) の検出について述べる。

第 7 章では、結論を述べる。

結論として、薄膜ゲート絶縁膜、ナノワイヤ、ナノドットなどのシリコンナノ構造を作製した。シリコンナノ機能構造を利用したデバイスの一つとして、低消費電力 CMOS ロジック動作可能な機能ゲートトランジスタを作製した。作製したトランジスタはトラップ電荷層とゲート間における電子の注入・放出により、閾値電圧がシフトする。この閾値の自己調整機能により off 電流を増加させずに on 電流を増加させられる可能性がある。また、シリコンナノ機能構造を利用したイオン/バイオセンサーの作製を行った。他研究と比較して薄い $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 絶縁膜(最少膜厚が 19nm/8nm)を有するシリコンナノワイヤトランジスタを用いた pH 測定及び生体分子 Si-tag の非標識の検出に成功した。さらにシリコン単一電子トランジスタを用いた高感度検出のためのバイオセンサーを作製した。作製した単一電子トランジスタは室温において明確なクーロン振動を確認できた。クーロン振動を利用することにより、明確な pH 応答特性が得られた。更に、ビオチン-ストレプトアビジンの特異的結合を利用した 1 ng/ml ストレプトアビジンの検出を試み、ストレプトアビジンの電荷によるクーロン振動のゲート電圧に対するシフトを確認できた。更にバイオセンサーの実用的使用として、4ng/ml の前立腺特異抗原の検出を行い、PSA の検出に成功した。以上、単一電子トランジスタによる pH 測定及び生体分子(ストレプトアビジン・PSA)の検出に世界で最初に成功した。

最後に本研究で得られた工学的意義と学術的意義を述べる。

工学的意義

- (1) 感度向上のために膜厚の薄い Si_3N_4 ゲート絶縁膜を有するシリコンナノワイヤトランジスタの作製方法を確立。
- (2) イオン種・生体分子の高感度検出のために、シリコン単一電子トランジスタを用いたバイオセンサーの作製を行い、実用化への見通しをつけた。
- (3) 低消費電力で動作する CMOS ロジックアプリケーションのために機能ゲートトランジスタを作製し、閾値の自己調整の実現、及びトラップ層の面積縮小による信頼性向上の見通しを得た。

学術的意義

- (1) イオン種・生体分子の高感度検出のために、シリコン単一電子トランジスタを用いたバイオセンサーの作製を行い、pH 測定及び生体分子(ストレプトアビジン・PSA) の電荷検出を世界で初めて実現した。
- (2) 低消費電力で動作する CMOS ロジックアプリケーションのための機能ゲートトランジスタの絶縁膜破壊機構を明らかにした。