

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)	氏名	工藤 貴史
学位授与の要件	学位規則第4条第1・②項該当		
論文題目			
<p style="text-align: center;">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)</p>			
論文審査担当者			
主 査	准 教 授	中 島 安 理	印
審査委員	教 授	吉 川 公 麿	印
審査委員	教 授	横 山 新	印
審査委員	教 授	東 清 一 郎	印
〔論文審査の要旨〕			
<p>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シリコンナノ機能構造を作製し、それらを生体分子検出のための高感度バイオセンサー及び集積回路における超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の実現に応用した。どちらのデバイスについても電界効果トランジスタを基本構造として用いた。研究内容及び結果は以下のとおりである。</p>			
<p>① 高感度化の為に他研究と比較しても極めて薄い $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 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。作製したセンサーはイオンセンサー(ここでは水素イオンに感応する pH センサー)として機能し、イオンの濃度変化によって正しく電気特性(閾値及びドレイン電流値)を変化させた。また Si に結合する生体分子 Silica-binding protein (Si-tag) の検出を行い、Si-tag の電荷によるドレイン電流量の増加を確認した。</p>			
<p>② 室温動作可能な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、実測及びシミュレーションからその有効性を示した。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示した。作製したセンサーを pH センサーとして使用した結果、溶液中の水素イオン濃度変化に応答してクーロン振動特性がゲート電圧に対してシフトした。更に、生体分子 biotin-streptavidin の特異的結合を利用した streptavidin の検出を試みた。本センサーのゲート絶縁膜上に化学修飾により配置された biotin に対する streptavidin の特異的結合によって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。これは即ち streptavidin の電荷を検出したことを意味する。更なる実用化に向けた試みとして、前立腺特異抗原(PSA)の検出を行った。結果として、</p>			

最少濃度 4ng/ml の PSA の検出に成功した。4ng/ml という検出濃度は前立腺ガンを判断するのに必要な検出レベルを満たしており、本センサーは実用的機能を有していることを示している。以上、単一電子トランジスタによるイオン種(水素イオン)及び生体分子(streptavidin、PSA)の電氣的検出に初めて成功した。

- 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はこの機能ゲートトランジスタが off 電流を増加させずに on 電流を増加させることができることを示している。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メカニズムの解明など、デバイスの信頼性についても研究を行った。これらの信頼性の研究から、この機能ゲートトランジスタの CMOS ロジックアプリケーションへの適用には、デバイスのチャネルサイズの縮小、トンネル酸化膜の薄膜化が有効であることを示した。

以上、本研究における応用的意義は以下の通りである。1 つは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したことである。更にイオン種・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ことである。ま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、及びチャネルサイズ縮小による信頼性向上の見通しをつけたことである。学術的意義としては、将来的に必要なイオン種・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、イオン種(水素イオン濃度)及び生体分子(streptavidin・PSA)の電荷検出を初めて実現したことである。ま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機能ゲートトランジスタの電気特性・信頼性(絶縁膜破壊メカニズム)を説明するモデルを提案したことである。