

こうだ やすまさ
氏 名 幸田 安真
授 与 学 位 博士 (工学)
学位授与年月日 平成 29 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規 学位規則第 4 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) 技術社会システム専攻
学位論文題目 オンチップ光学フィルターを有する広光波長帯域・高感度シリコン
分光センサとその応用に関する研究
指 導 教 員 東北大学教授 須川 成利
論文審査委員 主査 東北大学教授 須川 成利
東北大学教授 長平 彰夫 東北大学教授 中村 健二
東北大学教授 寺本 章伸 東北大学准教授 黒田 理人
(未来科学技術共同研究センター)

論文内容要旨

分光分析・分光センシングは科学計測、医療、環境測定、農業や工業などの幅広い分野で、成分分析・異物検査・品質管理等の様々な用途で使用されている。分光分析・分光センシング機器には紫外光を含む可視・近赤外光の広い光波長帯域において測定対象の光波長に対して高感度であり、かつ高い長期信頼性を有する受光素子が求められている。本論文では、こうした背景に鑑み、紫外・可視・近赤外光の広光波長帯域で所望の透過特性を有するオンチップ光学フィルターの設計・製造手法を確立し、急峻な不純物濃度プロファイルを有する表面高濃度層を用いた高感度・高紫外光照射耐性 Si フォトダイオード pn 接合技術と融合させて広光波長帯域・高感度分光センサを実証し、構築した技術を低加速電圧電子線検出器の高感度化に応用した成果をまとめたものであり、全 5 章からなる。

第 1 章は、分光イメージングに用いられているフォトダイオードに求められる特性や各光波長における感度とフォトダイオードの材料である Si の光学的物性の関係性について述べた。先行技術として、紫外光帯域でも高い内部量子効率・信頼性を持つ pn 接合形成技術やオンチップ光学フィルターの課題について述べた。本研究では、課題であった紫外光帯域でも使用可能なオンチップ光学フィルターを開発し、紫外光帯域でも高い内部量子効率・信頼性をもつ pn 接合技術と組み合わせることにより、これまで困難であった紫外光帯域を含む広光波長帯域で高感度化・高感度紫外光センサの実現を行いイメージンセンサの性能向上を実証する。

第 2 章では、紫外・可視・近赤外光の広光波長帯域で所望の透過特性を有するオンチップ光学フィルターの材料選定・設計・製造手法について論じている。エネルギーの高い紫外光帯域においても損失なく透過させるために広バンドギャップ材料の中から低屈折材料としてシリコン酸化膜、高屈折材料としてシリコン窒化膜と酸化アルミニウムを選択し、単膜にて光学特性の性能評価を行っている。atmosphere pressure chemical vapor deposition (APCVD)・マグネツトスパッタ法にて理想的な光学定数を有するシリコン酸化膜、紫外光帯域においても光吸収

が起こらない低消費係数シリコン窒化膜、紫外光帯域でも消費係数のない酸化アルミニウムの成膜手法を明らかにした。また酸化アルミニウムにおいては、metal-insulator-semiconductor (MIS)や metal-insulator-metal (MIM)キャパシタを用いた電気的特性の評価を行い、atomic layer deposition (ALD)法にて酸化アルミニウム成膜後に酸化雰囲気中でアニールを行うことで低リーク電流を維持したまま高容量化が可能なことを示した。半導体LSIにすでに幅広く使用されており、エッチングなどの加工しやすいシリコン酸化膜とシリコン窒化膜において交互に積層時にシリコン酸化膜、シリコン窒化膜の光学定数に変化のない成膜条件を求め、オンチップ光学フィルターの製造のための手法を明らかにした。開発した膜、基板、膜構成を自由に設定することができる等価アドミタンス軌道法を利用したプログラムを作製し、任意の反射・透過特性を得るための設計手法を構築した。分光分析機向けのリニアアレイセンサでは、分光された光がリニアアレイセンサの各画素に照射されるという特徴を利用し、画素領域を複数に分割し照射される各光波長帯域に対して高透過となるバンドパス型オンチップ光学フィルター構造を提案した。光波長 200-1000nm で最低透過率が 70%以上を最低限の数で達成できるように設計を行った結果、7種類のバンドパス型のオンチップ光学フィルターで光波長 200-1000nm で平均 89%を達成する構造を見出した。またシリコン上のシリコン酸化膜表面における凹凸形状の膜厚差と光波長の透過率変化量の低減効果の関係を明らかにし、透過率変化量が大きい紫外光帯域でも可視光帯域と同程度まで低減し、光波長 200-1000nm において透過率変化量 0.2%以下を達成する 4種類の膜厚差のある凹凸形状構造を見出した。さらに太陽光中の紫外光を検出することを目的とし、シリコンを用いた分光差分型紫外光センサ用のオンチップ光学フィルターの設計を行っている。カットしたいある光波長に対して高・低屈折材料の光学膜厚を交互に4分の1波長にすることで、その波長を中心としたある波長帯域の反射率を高くすることができ、また複数の中心波長を設定し組み合わせることで、反射率を高くする光波長帯域を広げることができる。光波長帯域 300~520nm をカットするため、3種類の中心波長を設定し、各中心波長に対して4分の1波長となる光学膜厚をした高・低屈折率材料を交互に7ペア積層したオンチップ光学フィルター構造を提案した。これにより、光波長 300nm で急峻に感度が低下し光波長 320nm で感度がほぼない、光波長 200~300nm にもみ高い感度を有する紫外光センサの構造を見出した。

第3章では、第2章で述べたオンチップ光学フィルターの施策とその性能を測定した結果について論じている。紫外光に対して高い内部量子効率・信頼性を持ったpn接合を有するフォトダイオード上にシリコン酸化膜と消費係数の小さいシリコン窒化膜からなるバンドパス型のオンチップ光学フィルターを組み合わせたフォトダイオードの作製を行った。開発した各7種類のフォトダイオードの分光感度特性を組み合わせることで光波長 200-320nm で平均量子効率 84%、光波長 200-1000nm で平均量子効率 79%を実証した。このバンドパス型のオンチップ光学フィルターとpn接合技術をCMOSイメージセンサプロセスに応用することで、分光分析機向けリニアアレイセンサに広光波長帯域・高紫外光照射耐性Siフォトダイオードを用いた画素領域を7つに分割し、そ

それぞれの領域に入射する光波長帯域に対して高透過率を有するバンドパス型のオンチップ光学フィルターを作り込み、光波長帯域 200-320nm における平均量子効率 80%、光波長帯域 200-800nm における平均量子効率 70% を得られることを実証した。従来のシリコン酸化膜のみのものよりすべての光波長で高感度化を達成し、高感度化が困難であった紫外光で大きく感度が向上している。また光が入射するシリコン酸化膜表面に光波長の 4 分の 1 程度の凹凸形状をエッチングにより形成したデバイスを作製し、光の干渉に起因する光波長の微小な差による透過率変化量低減効果の評価を行った。測定した反射特性から光波長による分光リップルが低減していることを確認した。また光波長帯域 220-350nm で平均透過率変化量が 0.235% から 0.084% にまで低減でき、光波長 220-800nm における最大透過率変化量は 0.735% から 0.300% に低減した。これにより凹凸形状により分光リップルを抑え、透過率変化量を低減する効果を明らかにしている。また分光差分型紫外光センサ用に設計したバンドストップ型オンチップ光学フィルターについては、シリコン酸化膜とシリコン窒化膜を提案した 42 層をシリコン上に形成し評価を行った。得られた反射特性から各光波長を中心とした光波長帯域を遮断する 3 種類の膜構成を組み合わせることで、広光波長帯域 300-520nm を反射させる特性が得られた。また得られた特性から、分光差分型のセンサ上に形成することで光波長 200-300nm で選択的に高い感度を有する紫外光センサが得られることを明らかにしている。

第 4 章では、第 2 章、第 3 章で述べた技術を応用した電子線検出器の設計・試作・性能を測定し評価した結果について論じている。走査型電子顕微鏡は数 k~数十 kV と加速された電子を測定試料に照射し、反射した電子を検出器で検出することで像を得ることができる。走査型電子顕微鏡において、照射電子によるダメージや試料へのチャージアップを減らし、より詳細な表面構造を観測するため低加速電圧条件下での観測が、また観察者の操作に対して像に反映されるまでにタイムラグが生じており測定時間を短縮するため高速読み出しが可能な電子線検出器が求められている。これまで述べて紫外光の Si への侵入用と加速電圧 1kV 以下の低加速電圧時の電子の Si の侵入長がほぼ同等であることから、電子線入射領域上の配線層間絶縁膜を選択的に除去した急峻な不純物濃度プロファイルを有する pn 接合ダイオードを用いることで低加速電圧時の高感度化を行った。また読み出し速度を律速する要因は、素子面積が大きいためによる PD 容量であることから低不純物濃度 Si 基板上と電子線入射領域を複数に分割した構成を適用することで、1 出力あたりの容量を低減した。試作した電子線検出器の評価により、入射電子線の加速電圧 1kV における感度を従来比約 8 倍に向上し、信号読み出し速度向上に資する素子容量を 1/3 以下にするとともに、走査型電子顕微鏡に適用して低加速電条件下で鮮明な反射電子線像が得られることを実証している。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は紫外・可視・近赤外光帯域で所望の透過特性を有するオンチップ光学フィルターの設計・製造手法を明らかにし、試作した広光波長帯域・高感度分光センサの性能を実証し、低加速電圧電子線検出器へ

応用した効果を実証した成果をまとめたものである。

論文審査結果の要旨

分光分析・分光センシングは科学計測，医療，環境測定，農業などの幅広い分野で，成分分析・異物検査・品質管理等の様々な用途に使用されている．分光分析・分光センシング機器には紫外光を含む広光波長帯域において測定対象の光波長に対して高感度であり，かつ高い長期信頼性を有する受光素子が求められている．本論文は，こうした背景に鑑み，紫外・可視・近赤外光の広光波長帯域で所望の透過特性を有するオンチップ光学フィルターの設計・製造手法を確立し，急峻な不純物濃度プロファイルを有する表面高濃度層を用いた高感度・高紫外光照射耐性 Si フォトダイオード pn 接合技術と融合させて広光波長帯域・高感度分光センサを実証し，構築した技術を低加速電圧電子線検出器の高感度化に応用した成果をまとめたものであり，全文 5 章からなる．

第 1 章は，序論である．

第 2 章では，紫外・可視・近赤外光の広光波長帯域で所望の透過特性を有するオンチップ光学フィルターの材料選定，設計・製造手法について論じている．紫外光帯域においても光吸収が起こらない低消衰係数シリコン窒化膜の成膜手法を明らかにし，シリコン酸化膜とシリコン窒化膜とを交互に積層するオンチップ光学フィルターの設計手法を構築し，分光分析機向けのリニアアレイセンサ及び紫外光センサ用のオンチップ光学フィルターを設計した結果をまとめている．これは重要な成果である．

第 3 章では，第 2 章で述べたオンチップ光学フィルターの試作とその性能を測定した結果について論じている．分光分析機向けリニアアレイセンサ用には広光波長帯域・高紫外光照射耐性 Si フォトダイオードを用いた画素領域を 7 つに分割し，それぞれの領域に入射する光波長帯域に対して高透過率となるバンドパス型フィルターを作りこみ，光波長帯域 200-320nm における平均量子効率 80%，光波長帯域 200-800nm における平均量子効率 70% が得られることを実証している．また，光の干渉に起因する光波長の微小な差による透過率変化量を抑制するため，光が入射するシリコン酸化膜表面に光波長の 4 分の 1 程度の凹凸形状を形成することで光波長帯域 220-800nm における透過率変化量を 0.3% に低減できることを明らかにしている．また，分光差分型紫外光センサ用に設計した光波長帯域 300-520nm のバンドストップ型光学フィルターを試作，製造して，光波長帯域 200-300nm で選択的に高い感度を有する紫外光センサが得られることを明らかにしている．これは極めて重要かつ有用な成果である．

第 4 章では，第 2 章，第 3 章で述べた技術を応用した電子線検出器の設計，試作，性能測定評価した結果について論じている．電子線入射領域上の配線層間絶縁膜を選択的に除去した急峻な不純物濃度プロファイルを有する pn 接合ダイオードを低不純物濃度 Si 基板上に形成し，電子線入射領域を複数に分割した構成を適用することで，入射電子線の加速電圧 1kV における感度を従来比約 8 倍に向上し，信号読出し速度向上に資する素子容量を 1/3 以下にすると共に，走査型電子顕微鏡に適用して低加速電圧条件下で鮮明な反射電子線像が得られることを実証している．これは極めて重要かつ有用な結果である．

第 5 章は結論である．

以上要するに本論文は紫外・可視・近赤外帯域で所望の透過特性を有するオンチップ光学フィルターの設計・製造手法を明らかにし，試作した広光波長帯域・高感度分光センサの性能を実証し，低加速電圧電子線検出器へ応用した効果を実証した成果をまとめたものであり，半導体工学，集積回路工学に寄与するところが少なくない．

よって，本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める．