

令和 4 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02187

研究課題名(和文)革新的高速分光による高感度リアルタイム分光イメージングの構築と非侵襲診断への展開

研究課題名(英文) Construction of High-Sensitivity Real-Time Spectroscopic Imaging by Innovative High-Speed Spectroscopy and its Application to Non-Invasive Diagnostics

研究代表者

石鍋 隆宏 (Ishinabe, Takahiro)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30361132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、小型リアルタイム分光イメージングの実現に向けて、液晶中に形成したナノサイズの高分子ネットワークの構造制御を基に液晶の屈折率を偏光無依存でかつ高速に制御する手法を確立し、液晶ファブリ・ペローエタロンを用いた高速波長可変分光フィルタを実現した。また、画素内に形成した容量密度キャパシタに光電荷を蓄積する横型オーバーフロー蓄積容量と画素信号を一時保持するアナログメモリを用いることで、近赤外域における高光感度とグローバルシャッター機能を両立する技術を確立し、高感度・高速分光イメージングシステムの構築に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、液晶中に形成した高分子ネットワークの構造制御により、偏光無依存でかつ高速な屈折率制御技術を確立し、液晶ファブリ・ペローエタロンによる高速波長可変分光フィルタを実現した。更に、CMOSセンサにおいて、全画素が一斉に露光期間を設けるグローバルシャッター方式を実現する画素構造を構築し、その高速撮像を達成した。本研究成果は、液晶による精密な光制御において重要な知見であり、CMOSセンサの応用工学についての学理構築に資するものである。高精細な分光画像をリアルタイムで取得する高感度・高速分光イメージングシステムの構築は、運転者の生体情報の取得など新たな応用の創出等、様々な分野への波及が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, a polarization-independent and high-speed control method of the refractive index of liquid crystals by controlling the nano-sized polymer network structure formed in the liquid crystal was established and a high-speed wavelength tunable spectral filter using liquid crystal Fabry-Perot etalons was realized to achieve compact real-time spectral imaging system. In addition, by using a horizontal overflow storage capacitor that stores light charge in a capacitance density capacitor formed in the pixel and an analog memory that temporarily holds pixel signals, we established a technique that combines high light sensitivity in the near-infrared region with a global shutter function, and successfully developed a high-sensitivity, high-speed spectral imaging system.

研究分野：電子光学

キーワード：分光イメージング 液晶バンドパスフィルタ 高感度CMOSイメージセンサ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

分光イメージングとは、画像を構成する各画素のスペクトル情報を取得することで、通常のカメラでは評価が困難であった対象や現象を非接触で可視化できる技術である。このことから近年、医療応用をはじめとして農作物の生育状態や土壌の観測等、様々な分野への応用が進んでいる。特に、小型で高速な分光システムは、ウェアラブル端末を用いて血液中の血糖値の変化や運転者の生体情報を、環境によらずリアルタイムで高精度に取得できることから、疾患の早期診断をはじめとした新たな分野へ波及する重要な技術として実現が強く期待されている。このためには、分光フィルタの小型化、高速化と撮像素子の高感度化が必要であるが、これまで分光画像を取得するために用いられてきた分光フィルタは、波長フィルタを搭載したフィルタホイールや回折格子を機械的に動かして波長を切り替える方式が主であったことから、装置が大きく、また耐久性や環境の変化に対する測定精度の信頼性にも課題を有していた。一方、撮像素子である CMOS イメージセンサは、時分割で高速に波長が切り替わる分光フィルタと組み合わせた場合、光露光のタイミングがずれて光利用効率が低下するという課題があり、高精細な分光画像を高速に取得する小型のシステムは確立されていなかった。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでに小型化が可能な分光フィルタとして液晶リオフィルタを考案し、可視域から近赤外域までの範囲を電氣的に走査する液晶波長可変分光フィルタの開発と、その実用化に世界に先駆けて成功し、小型人工衛星への実装を通じてその有効性を実証してきた。しかし、液晶リオフィルタは、偏光干渉と液晶のリターダンスの波長依存性を利用することから透過率が低く、分光能を向上させるためにリターダンスを大きくすると、液晶の応答が遅くなることから、液晶素子の高速化と光利用効率の向上が小型リアルタイム分光イメージングの実現に向けた課題として残されていた。

本研究では、液晶中に形成したナノサイズの高分子ネットワーク構造制御による液晶の屈折率を高速に制御する手法を確立し、液晶ファブリ・ペローエタロンを用いた高速波長可変分光フィルタを実現すると共に、画素内に形成した容量密度キャパシタに光電荷を蓄積する横型オーバーフロー蓄積容量と画素信号を一時保持するアナログメモリを用いることで、近赤外域における高光感度とグローバルシャッタ機能を両立する技術を確立し、高感度・高速分光イメージングシステムの構築を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、液晶・高分子複合材料の相分離構造の制御に向けた平行露光型 UV 装置と高分子ネットワーク構造および液晶配向分布を高精度に評価するシステムを構築し、液晶分光素子の光学特性を精密にかつ効果的に評価する体制を整える。高分子の構造制御による高速液晶素子の作製プロセスの探索、グローバルシャッタに向けたトレンチ型キャパシタの集積プロセスの探索、高速分光素子の作製、高感度 CMOS イメージセンサの試作をもとに高速分光イメージングシステムを構築し、有効性の実証を通じて基盤技術を学術的に体系化することを目的として以下のことを行う。

(1) 高分子の構造制御による高速液晶素子の作製プロセスの探索

液晶中に形成するナノサイズの高分子ネットワーク構造を制御することで、高速に屈折率を制御可能な液晶素子を実現する。

(2) グローバルシャッタに向けたトレンチ型キャパシタの集積プロセスの探索

画素内に光信号を保持するメモリを集積し、全画素が一斉に露光期間を設けるグローバルシャッタ方式を導入する。高光感度が得られる低不純物濃度シリコン基板上に高容量密度を有するトレンチ型キャパシタを搭載するためのプロセスを探索する。グローバルシャッタ機能、広波長帯域、広ダイナミックレンジ性能を両立する最適な画素構成を明らかにする。

(3) 高速分光素子の作製

高速液晶素子を用いて液晶ファブリ・ペローエタロンを作製する。2枚のガラス基板の間に配置した液晶の屈折率を電氣的に制御することで、透過波長スペクトルを変化させ、マルチバンドパスフィルタを通過する光波長を選択する。液晶分光素子を作製し、光学特性の評価より最適な作製条件を明らかにする。

(4) 高感度 CMOS イメージセンサの試作

前年度に明らかにした画素構成を有する CMOS イメージセンサのプロトタイプを設計・試作し、

最適な駆動条件を導出する。

(5) 光学系および駆動回路の設計と分光イメージングシステムの有効性の実証

高感度・高速分光イメージングシステムを試作する。平行レンズ光学系と液晶分光素子の駆動回路を設計し、液晶分光素子と CMOS センサを同期させ、分光イメージング性能の評価を通じて本システムの有効性を実証する。

4. 研究成果

(1) 高分子の構造制御による高速液晶素子の作製プロセスの探索

本研究における液晶エタロンを用いた波長可変フィルタの構造を図1に示す。干渉フィルタにより必要な複数の波長を透過し、液晶エタロンによりその中から一つの波長のみを選択して透過することで単一波長の透過光を得る。本研究では、血液中のグルコース濃度を示す血糖値評価を想定して、960nm および 1050nm を設計波長とした。

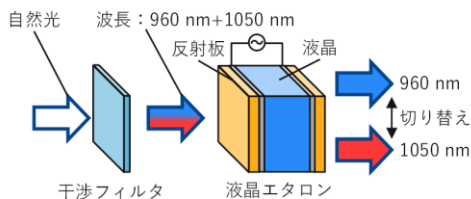


図1 液晶エタロンを用いた波長可変フィルタの構造

液晶エタロンの設計において、透過スペクトルのピーク間隔と、電圧印加によるピークシフト量の最適化が重要となる。これらの値は液晶の位相差 δ に依存し、液晶素子の厚さ d に依存する。一方、反射膜はピーク透過率を高く、遮断波長帯域が広がるように設計する必要がある。これらの関係より、高反射率かつ吸収による透過率の低下が小さい反射膜を用いることで、高いピーク透過率かつ高コントラスト比となる透過スペクトルが得られることを明らかにした。

次に、液晶層の膜厚の最適化を行った。液晶として高分子安定化ブルー層液晶を用い、膜厚の設計に必要な液晶材料の屈折率の測定を行った。(1)式に示す電圧印加時におけるブルー層液晶の屈折率の式を導出し、波長と印加電界に対する測定値との数値フィッティングを行うことで、ブルー相液晶の屈折率を測定した。

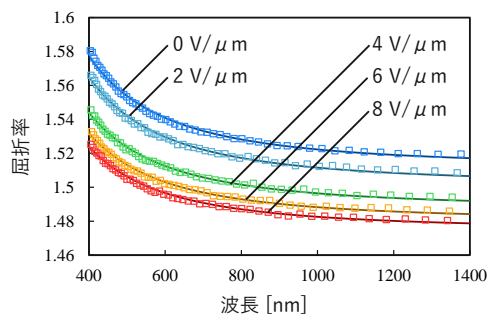


図2 屈折率の波長分散のフィッティング結果

$$n = A_{\text{iso}} + \frac{B_{\text{iso}}}{\lambda^2} - \left(\Delta A_{\text{sat}} + \frac{\Delta B_{\text{sat}}}{\lambda^2} \right) \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{E}{E_s} \right)^2 \right] \right] \quad (1)$$

フィッティング結果を図2に示す。この結果より、(1)式における係数の導出に成功した。

液晶材料の屈折率の測定結果をもとに液晶の厚さの設計を行った。960 nm と 1050 nm における δ の差と、 π との関係について示した結果を図3に示す。この結果より、液晶の厚さを $9.2 \mu\text{m}$ とすることで位相差が π の奇数倍となり、また、ピークシフト量が π 以上となり、透過波長の制御が可能となることを明らかにした。

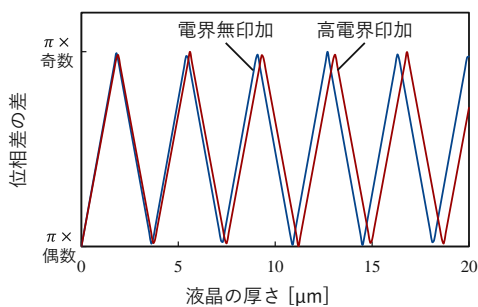


図3 波長 960 nm と 1050 nm の位相差における差と π の関係性

(2) グローバルシャッタに向けたトレンチ型キャパシタの集積プロセスの探索

画素内に光信号を保持するアナログメモリを集積し、全画素が一斉に露光期間を設けるグローバルシャッタ方式を導入するための画素構造の構築を行った。

従来のプレーナ型の信号保持容量と比べて 5 倍強の高密度容量を有するトレンチ型キャパシタを高感度を得られる低不純物濃度シリコン基板上の画素内に搭載するための構造及びプロセス条件を探索し、図4に示す画素サイズ $22.4 \mu\text{m}$ 角、開口率 52.8% でグローバルシャッタ機能、広光波長帯域・高感度性能、広ダイナミックレンジ性能を両立する画素構造及びその形成条件を見出した。対照的なレイアウトで高密度容量でかつ低リーク電流特性を有するトレンチキャパシタを画素周辺に配置することで、光感度の上下左右の画素間ばらつきを低減すると共に、熱雑音を低く抑えた電圧保持型のグローバルシャッタ用アナログメモリの集積に成功した。

(3) 高速分光素子の作製

液晶エタロンの高透過率化を実現するためには、導電性がありかつ光吸収が少ない反射膜が必要である。このことから、ITO, TiO_2 , SiO_2 から構成される反射膜構造を提案し、各層の膜厚の最適化を行った。この結果、誘電体多層膜の層数を 6 層とし、 SiO_2 の厚さを 170.4nm, TiO_2 の厚さを 108.1nm, ITO の厚さを 100 nm とすることで、図 5 に示すようにピーク透過率が 1050 nm において 63%以上を実現できることを明らかにした。

次に、液晶エタロンにはセル厚(液晶の厚さ)の均一性が求められることから、ビーズスペーサ(直径:9.1 μm)を混合した紫外線硬化性樹脂(TB3035B, Three Bond 社)をディスペンサを用いて反射膜に塗布し、対向基板を重ね合わせて紫外線を照射することで、均一なセル厚を有する空セルを作製した。ブルー層液晶を注入後、反射膜における紫外線強度の変化を考慮し、紫外線強度 23.5 mW/cm^2 で重合を行うことで液晶中の高分子構造を制御し、ブルー層液晶の高分子安定化を行った。試作した液晶素子のセル厚の誤差は 20nm 以下であり、これはピーク波長のずれに換算して 2nm と極めて均一な透過特性を有する光学フィルタを実現した。

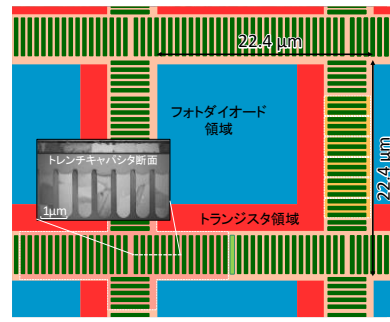


図 4 構築した 22.4 μm ピッチ画素レイアウト概略図とトレンチキャパシタ断面図

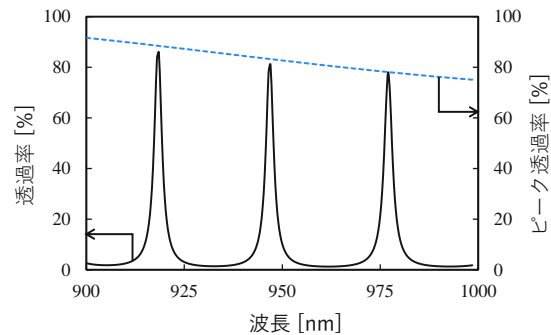


図 5 誘電体多層膜を用いた液晶エタロンの透過スペクトル

(4) 高感度 CMOS イメージセンサの試作

前年度に明らかにした画素構成を有する、画素サイズ 22.4 μm 角、画素数 140 \times 140 の CMOS イメージセンサのプロトタイプチップを最小加工寸法 0.18 μm の CMOS イメージセンサプロセステクノロジーを用いて設計・試作してその特性を計測した。高容量密度シリコントレンチ型キャパシタを用いた画素内信号保持容量を適用することで、図 6 に示すように、全面素同時露光動作を行うグローバルシャッターモードにて 1000 コマ/秒の撮像性能を達成した。

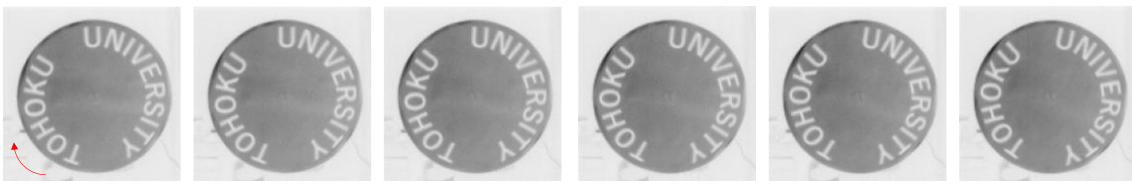


図 6 1000 コマ/秒で撮像した約 540rpm で回転する撮像対称の動画像

(5) 光学系および駆動回路の設計と分光イメージングシステムの有効性の実証

作製した液晶エタロンの応答特性を評価した。ブルー層液晶に対してオーバードライブ駆動適用し、高電圧印加時には 100V、低電圧印加時には 0V のパルス波を印加した。液晶の応答時間はオーバードライブ電圧の印加時間に依存し、図 7 に示すように高電圧側を 0.1ms、低電圧側を 0.6ms とすることが最適であることを確認した。応答時間は、960nm から 1050nm への切り替えが 0.88ms、1050nm から 960nm への切り替えが 1.42ms となり 2 波長の切り替えに必要な時間は合計で 2.30ms であった。この結果より、撮像の周波数を 60Hz とすると 1 フレーム(16.6ms)の中で 85%以上の時間を撮像に利用でき、十分な速さの応答が実現されたことを確認した。

カメラレンズ、マルチバンドパスフィルタ、液晶フィルタ、CMOS イメージセンサから構成される光学系を構築し、駆動回路を設計した。図 8 に液晶エタロンの駆動電圧、および CMOS イメージセンサのタイミングチャートを示す。液晶の応答が完了することを待つため、オーバードライブ電圧の印加後、1.5ms 後に CMOS イメージセンサのシャッターが切れるように設計した。CMOS イメージセンサのフレームレートを 120fps、蓄積時間を 2.31ms とし、トリガー信号の周波数を 30Hz とした。

作製した分光システムによりリアルタイム分光イメージングを行った結果を図 9 に示す。図から、高分子安定化ブルー相液晶エタロンによる分光フィルタと CMOS イメージセンサを同期駆動させることにより、動画での分光画像の取得が可能であることを確認した。

(6) 結論

本研究では、リアルタイム分光イメージングに向けた高速・小型波長可変フィルタの実現に向けて、高分子安定化ブルー相液晶を用いた液晶ファブリ・ペローエタロンを提案し、その設計、試作条件の明確化、試作による有効性の実証を行った。この結果、液晶エタロンを波長可変フィルタとして用いるために必要となる液晶と反射膜の設計条件を明らかにし、透過スペクトルのピーク間隔と電圧印加によるピークシフト量は液晶層の厚さに依存することを明らかにした。また、ガラス基板表面に誘電体多層膜、および ITO からなる反射膜を形成することで、60%以上の高いピーク透過率が得られることを示した。オーバードライブ方式を用いた駆動方法を高分子安定化ブルー層液晶に適用することで、応答時間 2.3ms が実現できることを示し、高い光利用効率を有し、かつ毎秒 60 枚のリアルタイム分光イメージングを可能とする、高速・小型液晶エタロンを実現した。

また CMOS センサにおいては、従来のプレナー型の信号保持容量と比べて 5 倍強の高密度容量を有するトレンチ型キャパシタを高光感度が得られる低不純物濃度シリコン基板上的の画素内に搭載するための構造及びプロセス条件を明らかにし、対照的なレイアウトで高密度容量でかつ低リーク電流特性を有するトレンチキャパシタを画素周辺に配置することで、光感度の上下左右の画素間ばらつきを低減すると共に、熱雑音を低く抑えた電圧保持型のグローバルシャッター用アナログメモリを集積することに成功した。画素サイズ 22.4 μm 角、画素数 140 \times 140 の CMOS イメージセンサのプロトタイプチップを設計・試作し、全画素同時露光動作を行うグローバルシャッターモードにて 1000 コマ/秒の撮像性能を達成した。

以上の結果を基に、分光イメージングシステムを構築し、高感度 CMOS センサのシャッターと分光フィルタの駆動の最適な制御手法を明らかにすると共に、同期駆動により毎秒 60 フレームでリアルタイムでの分光画像の取得が可能であることを実証した。

本研究の成果は、ウェアラブル端末による運転者の生体情報の取得など高速分光イメージングならではの新たな応用の創出と、電子ディスプレイやセキュリティ用高感度センサ等、様々な分野への波及が期待される。

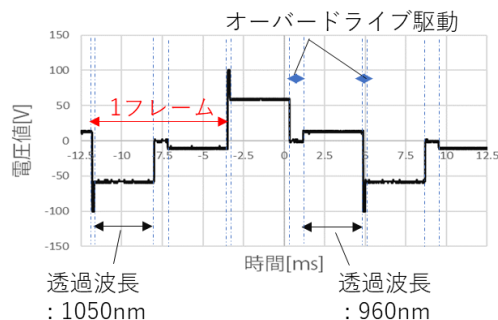


図 7 液晶エタロンに印加する電圧波形

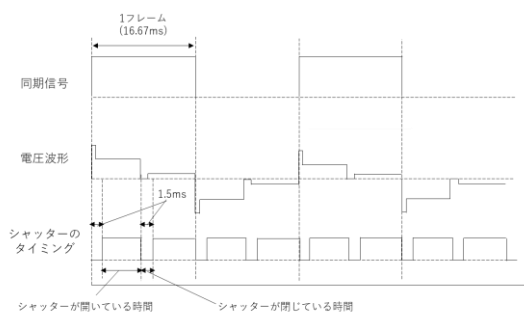


図 8 液晶エタロンの駆動電圧と CMOS センサの同期信号およびシャッターのタイミングチャート

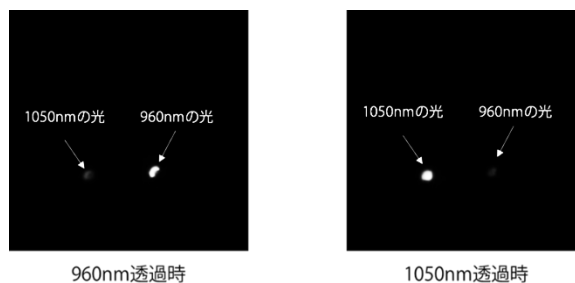


図 9 それぞれの波長透過時における分光画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shinatake Kosuke, Ishinabe Takahiro, Shibata Yosei, Fujikake Hideo	4. 巻 8
2. 論文標題 High-speed Tunable Multi-Bandpass Filter for Real-time Spectral Imaging using Blue Phase Liquid Crystal Etalon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications	6. 最初と最後の頁 202 ~ 209
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3169/mta.8.202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 品竹洸佑、石鍋隆宏、柴田陽生、藤掛英夫
2. 発表標題 ブルー相液晶エタロンと干渉フィルタを用いたリアルタイム分光撮像用バンドパスフィルタ
3. 学会等名 2019年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosuke Shinatake, Takahiro Ishinabe, Yosei Shibata, Hideo Fujikake
2. 発表標題 Tunable Narrow-Bandpass Filter Using Blue Phase Liquid Crystal Etalon for Real-Time Multi-Spectral Imaging Systems
3. 学会等名 International Display Workshops（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Ishinabe, Kosuke Shinatake, Rihito Kuroda, Kazuhiro Wako, Yosei Shibata, Shigetoshi Sugawa, Hideo Fujikake
2. 発表標題 Real-time Multi-spectral Imaging System using Bluephase Liquid Crystal Fabry-Perot Tunable Filter
3. 学会等名 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

撮像機能を拡張する液晶フィルタ
<https://www.ecei.tohoku.ac.jp/fujikake/index.htm>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	黒田 理人 (Kuroda Rihito) (40581294)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	柴田 陽生 (Shibata Yosei) (70771880)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	若生 一広 (Wako Kazuhiro) (90500893)	仙台高等専門学校・総合工学科・教授 (51303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------