

Title	超柔軟シート型光センサの創出に向けた有機・無機複合材料とフレキシブル実装の研究開発
Author(s)	川端, 玲
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/96048
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (川 端 玲)

論文題名

超柔軟シート型光センサの創出に向けた有機・無機複合材料とフレキシブル実装の研究開発

論文内容の要旨

光は、情報伝達や物性分析など、様々なデバイスや検査技術において中核となる役割を担っている。光センサは、これらの光学技術の基盤であり、光を電気信号へ変換することで記録と分析を可能にする。中でも近年、シート型光センサの開発に注目が集まっている。シート型光センサは、測定対象の形状に適合・追従できるため、対象物内部や表面の高感度イメージングに適している。本論文では、シート型光センサの構成要素として、機械的柔軟性を有する光検出器、有機回路、配線基板に着目した。一方で、これらの構成要素には、検出帯域と感度、光照射下での動作安定性、プロセス温度と伸縮耐久性に関する課題があった。そこで、超柔軟なシート型光センサの創出に向け、これらの課題を解決するための技術開発を行った。

第1章では、本研究の基盤技術である光センサ、有機回路、配線基板の基本原理と性能指数をまとめた。さらに、現行技術と関連研究の課題を整理することで、本研究の方向性を示した。

第2章では、配線基板技術として、Ag化合物の分解反応を用いた接合技術を開発した。分解反応の低温化に向け、Ag化合物と有機還元剤の反応分析を行った。この分析によって見出したAgと有機酸の反応に基づき、還元剤フリーで分解する銀化合物を用いた接合材料、および銀・有機酸からなる接合材料の2つの新たな接合材料を提案した。この結果、いずれの開発材料を用いても、金属-Si系材料間の異種材料接合が可能であった。これらの接合は、大気中、被接合材への表面処理無し、230 °C（従来プロセスと比較し60 °C以上低温化）の接合条件で達成した。

第3章では、ストレッチャブル印刷配線板と超柔軟な有機回路の開発を行った。伸縮配線として、Agマイクロ粒子、ポリマー、Agナノワイヤからなる複合材料型配線を開発した。伸縮配線は、Agナノワイヤを含むことで、100 °Cの低温形成および3.6倍の導電率向上が可能になった。さらに、Agナノワイヤの添加によって耐久性が向上し、繰り返し伸縮に耐え得るひずみが10%から75%に向上した。配線の破壊挙動や機械的特性の観点から、これらの伸縮配線の電気的特性および耐久性の向上機構を明らかにした。次に、開発した伸縮配線を用いてストレッチャブル印刷配線板を作製し、伸縮性を有する有機電圧増幅回路を実装した。この増幅回路は、0%および75%のひずみ下においても、14倍の電圧増幅率と200 Hz以上の遮断周波数を有していた。また、開発した配線板を用いることで、伸長下における増幅回路の信号雑音特性および信号伝達特性が向上することを明らかにした。

第4章では、カーボンナノチューブ光検出器と有機トランジスタからなる超柔軟なシート型光センサの開発を行った。はじめに、可視光からテラヘルツに及ぶ広帯域の光を検出できるカーボンナノチューブ光検出器を作製した。超薄膜基板上への形成プロセス構築により、この光検出器の応答性は21倍へ向上、応答速度は15倍へ向上した。次に、カーボンナノチューブ光検出器の信号を制御する有機トランジスタの開発を行った。この有機トランジスタは、遮光構造の導入により、光照射下における安定動作が可能になった。有機トランジスタを用いることで、インピーダンス変換回路を搭載した電圧増幅回路を開発した。この増幅回路は、カーボンナノチューブ光検出器の出力信号を、信号雑音比の低下を抑制しながら10倍に増幅した。さらに、カーボンナノチューブ光検出器と有機トランジスタをセンサセルとして集積実装したシート型光センサを開発した。このシート型光センサは、センサセルが8行8列で配列形成されたアクティブマトリックスを搭載した。その機能として、赤外光および熱放射の連続イメージングおよび定量評価が実証された。

第5章では、シート型光センサのストレッチャブル化および高感度化に関する技術開発を行った。はじめに、伸縮可能なシート型光センサの実現に向けたストレッチャブル印刷配線板を開発した。応力集中緩和に向けたデザインを導入により、配線板の伸長性は約2倍改善した。次に、シート型光センサの高感度化に向けた有機増幅回路を開発した。この回路は、2組の有機増幅回路から構成され、38 dBの同相信号除去比を示した。

最後に、本論文の結論と将来展望を示した。本論文は、超柔軟なシート型光センサの創出に貢献する一連の基盤技術を実証した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (川 端 玲)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	関谷 毅
	副 査	教授	小林 慶裕
	副 査	教授	高原 淳一
	副 査	教授	西川 宏

論文審査の結果の要旨

本学位論文では、超柔軟シート型光センサを実現するための有機・無機複合材料とフレキシブル実装技術の基礎研究に関する成果が示されている。シート型光センサは、任意の対象物の形状表面に合わせて変形・追従することで、その表面や内部の特性を、複数視野から高感度でイメージング・分析できるデバイスである。本論文では、シート型光センサの構成要素として光センサ、有機回路、配線基板に焦点を当て、それぞれの取り組みが第 1 章から第 5 章にわたって記述されている。

第 1 章では、光センサ、有機回路、配線基板に関する先行研究の調査が行われ、これらの基本原理が記述されている。従来の代表的なフレキシブル光検出器の検出原理が整理され、それらの検出波長が可視光や近赤外光などの短波長の光に制限されていることを課題として指摘している。有機回路は、その動作原理と先行研究が解説され、光センサへ実装される際に求められるデバイス構造や特性が整理されている。また、配線基板に関しては、関連技術の調査に基づき、プロセス低温化や伸縮耐久性向上に関する課題に言及している。

第 2 章では、配線基板の接合技術に着目し、Ag 化合物の分解反応を活用した接合技術に関する研究成果を記述している。本接合技術では、Ag 化合物の分解反応によって生じる Ag 粒子の焼結を利用する。この Ag 粒子の高い焼結性が、金属や Si 系材料をはじめとする様々な異種材料間の大気中・表面処理フリーの接合を可能にする。本章では、Ag 化合物の分解反応の機序解明に向け、熱・化学分析に基づく反応分析を行っている。これらの分析を通して、Ag 化合物と還元剤の間で生じる反応の機構と焼結接合に与える影響を示している。この反応を誘起する新たな接合材料として、Ag 化合物からなる接合材料および Ag 粒子と有機酸からなる接合材料を提案している。これらの接合材料によって形成された接合部の詳細な組織観察および強度試験を通して、Ag と Si 系材料の直接接合の特性を評価している。結果として、先行研究のプロセスと比較し、接合温度の 60 °C 以上の低減を達成している。

第 3 章では、伸縮配線の開発およびストレッチャブル印刷配線板への有機回路実装に関する成果について詳述している。伸縮配線は、シート型光センサを含むフレキシブルデバイス実装における基盤材料の 1 つである。本章では、Ag マイクロ粒子と Ag ナノワイヤを導電性粒子として用いた伸縮配線を提案している。この伸縮配線は、Ag ナノワイヤの微量添加によって、形成温度の低温化と伸縮耐久性の向上を達成している。これらの特性向上機構は、伸縮配線の電気的・機械的特性の評価ならびに微細構造観察に基づき考察されている。次に、伸縮配線を用いたストレッチャブル印刷配線板の開発と有機回路の実装に関する結果を示している。ストレッチャブル印刷配線板は、機械的特性の局所的な制御に基づき、硬質素子からなる回路の伸長性を向上させられる。本章では、有機トランジスタや硬質素子からなる素子をストレッチャブル配線板上に実装することで、伸縮可能な有機電圧増幅回路を作製している。さらに、この増幅回路の動作特性は、75%ひずみの伸長下においても維持できている。また、ノイズ特性および周波数特性の観点から、伸縮配線の抵抗が増幅回路の特性に与える影響を詳細に評価している。

第 4 章では、カーボンナノチューブ光検出器と有機トランジスタを用いたシート型光センサの開発に取り組んでいる。カーボンナノチューブ光検出器を用いることで、3 桁以上波長が異なる可視光からテラヘルツの光検出に成功している。さらに、薄さ数 μm の薄膜基板上へのカーボンナノチューブ光検出器の形成プロセス構築に基づき、感度および応答速度の向上を達成している。次に、この光検出器の信号増幅・集積実装を行うための有機トランジスタの開発について詳述している。この有機トランジスタは、光照射下での動作安定性を向上させるための遮光構造を有しており、光照射による特性変動の抑制に成功している。また、有機トランジスタは、光検出信号の増幅回路に応用されている。この増幅回路は、増幅部分とインピーダンス変換部分から構成されており、外来ノイズの重畳を抑制しながらカーボンナノチューブ光検出器の出力信号増幅に成功している。さらに、カーボンナノチューブ光検出器と有機トランジスタが集積実装されたシート型光センサの開発を行っている。このシート型光センサの基本特性の評価に基づき、赤外光源や熱源の定量的な連続イメージングを実証している。また、熱放射検出を利用することで、生体や化学物質の検出を実証している。

第 5 章では、シート型光センサのストレッチャブル化および高感度化の取り組みについて示されている。シート型光センサの伸長性を向上させるため、前章までに開発された技術の統合に基づき、光センサを集積実装するためのストレッチャブル印刷配線版が新たに開発されている。この配線板は、硬軟界面において応力緩和構造を導入することで、伸長性が約 2 倍へ向上している。また、シート型光センサの信号雑音比向上に向けた有機増幅回路の開発を行っており、同相信号減衰および位相信号増幅を実証している。

以上のように、本論文は、超柔軟なシート型光センサの創出に資する有機・無機複合材料およびフレキシブル実装技術の包括的な研究結果を示している。前例が少ないシート型光センサの開発において、各構成要素に求められる特性を体系的に整理および実証することで、その技術開発の原理を示している。開発された材料の特性は、化学的および物理的な手法による物性分析に基づき明らかにされている。また、デバイスの機能は、エレクトロニクスおよび光学的な理論によって裏付けられている。以上より、本研究は応用物理学、特に広範な科学・産業への貢献を志向する光センシング技術の発展に、大きく寄与するものと評価できる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。