

氏名	小林潤也
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成11年10月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和63年3月 北海道大学大学院工学研究科合成化学工学専攻前期課程 修了
学位論文題目	一定複屈折フッ素化ポリイミド材料の開発と光回路応用に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 戒能 俊邦 東北大学教授 黒川 洋一 東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 宮下 徳治

論文内容要旨

第1章 序論

第1章では、本研究の背景と目的を述べる。高度情報社会の基盤確立のため、近赤外波長を用いた大容量光通信システムの構築が進められている。光通信システムの高性能化にあたり光ファイバ網だけでなく、光導波路を用いた様々な光回路が必要となる。現在、汎用的光導波路材料としては低損失性を有する石英ガラスが用いられているが、石英ガラス光導波路の作製法である火炎堆積法では高温(1000℃以上)熱処理が必要なため、電気配線や半導体光素子を一体化する光回路では熱によりこれらの配線、素子を破壊する。したがって、石英ガラス光導波路においては、作製可能な光機能素子の構成が限定される。

一方、低コスト性と加工の容易性に優れた高分子光導波路は低温作製が可能のため、あらゆる基板上、例えば銅ポリイミド配線板上へ受発光素子、駆動用電気回路、光回路が混載されたモジュール:OE-MCM上へ作製できる。一般的に、光導波路への電気部品の実装には300℃以上のはんだ工程が存在するため、光導波路に用いる高分子材料にはこれ以上の耐熱性が要求される。しかしながら、これまでに300℃以上の耐熱性を有する高分子光導波路は報告されていない。

近年、光通信波長での透明性に優れかつ300℃以上の耐熱性を有したフッ素化ポリイミド共重合体が開発され、光導波路応用が試みられている。この材料による単一モード光導波路は波長1.3 μmで0.3 dB/cmの低損失性を示すことが報告されているが、光学特性はTE偏波のみで評価されており、光通信応用にあたり重要な光学特性の偏波依存性が問題となっている。

以上のように、光通信システムの進展に伴って耐熱性のある高分子材料を用いた光導波路が求められており、光通信応用が可能な偏波依存性のない光導波路用ポリイミド材料が望まれている。本論文は、光通信応用に必要な諸特性(光通信波長での光透過性、はんだ耐熱性、低偏波依存性)を満足した単一モード光導波路を作製するための新規フッ素化ポリイミド材料の開発、及びこの材料の光回路応用を目的とする。

第2章 既存フッ素化ポリイミド材料の単一モード光導波路への適用性の検討

第2章では、既存フッ素化ポリイミド共重合体(図1)の材料特性、及びこの材料による単一モード光導波路の光学特性の偏波依存性を検討し、光導波路応用における問題点を明らかにした。

既存フッ素化ポリイミドはTMモードの屈折率制御範囲が狭いため光導波路適用時のコアとクラッドの屈折率差 Δn は最高0.37%であり、曲げ半径の小さな光導波路は作製困難であることが明らかになった。また、 Δn の偏波依存性により、光導波路の単一モード条件は複雑かつ厳しい制約を受けることが判明した。さらに、作製した光導波路は0.4dB/cmの大きな偏波依存損失(PDL)を有し、光通信応用には適さなかった。

これらの結果から、既存のフッ素化ポリイミドは光回

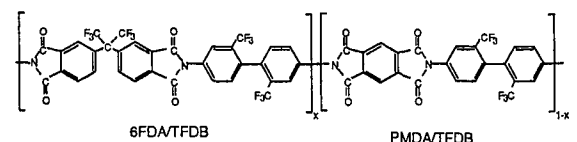


図1 既存フッ素化ポリイミド共重合体の構造式

路応用に必要な材料特性を有しておらず、新規フッ素化ポリイミド材料の開発が必要と判断した。

第3章 一定複屈折フッ素化ポリイミド共重合体の開発と光導波路への適用

第3章では、新規フッ素化ポリイミド材料を開発し、光導波路材料としての適用性を検討した。

Δn の偏波依存性がPDLの原因であることを見だし、光回路応用が可能な新規フッ素化ポリイミド材料の設計指針を明らかにした。フッ素誘導体の特性をふまえて様々なポリイミド材料の屈折率と複屈折を評価し、複屈折一定のまま広範囲で屈折率制御が可能な一定複屈折フッ素化ポリイミド共重合体（一定複屈折ポリイミド）として、図2に示す6FDA/ODAと6FDA/TFDBとの共重合体を開発した。このポリイミドは光導波路適用時の広範な Δn 制御性（ $\sim 3.0\%$ ）を有しており、曲げ半径の小さな光導波路が作製可能であった。また、 Δn の偏波依存性は小さく光導波路の単一モード条件は単純かつ広範になった。さらに、この材料の適用により従来のポリイミド光導波路で問題とされたPDLが0.1dB/cm以下に低減できた。

これらの結果から、一定複屈折ポリイミドは優れた光導波路材料であり、この材料を用いることで光回路応用が可能な光導波路が作製できることを明らかにした。

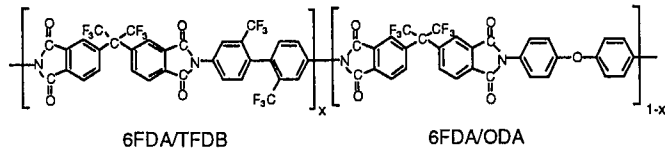


図2 一定複屈折フッ素化ポリイミド共重合体の構造式

第4章 放射光照射による屈折率制御と導波路回折格子の作製への応用

第4章では、放射光照射による一定複屈折ポリイミドの屈折率制御性と照射後の化学状態を検討した。また、一定複屈折ポリイミド光導波路に放射光を照射するだけの導波路回折格子作製法を提案した。

一定複屈折ポリイミドは高 T_g ($>300^\circ\text{C}$)を有するため放射光照射による材料劣化は起こらず屈折率だけが增加了。屈折率変化量はUV照射による石英より10倍大きく、照射量の変化によって $\sim 10^{-2}$ までの制御が可能であった（図3）。また、XPSの結果から、この屈折率変化がフッ素脱離に伴う分子容の減少に起因することを明らかにした。

本現象と放射光の直進性により、一定複屈折ポリイミド光導波路に回折格子パターンを有するX線マスクを介して放射光を照射するだけで屈折率変調型の導波路回折格子（反射率60%、半値幅0.25 nm）が簡便に作製できることを明らかにした。

このように、放射光照射が一定複屈折ポリイミドの屈折率制御法として有効であり、導波路回折格子の作製法に応用できることを明らかにした。本結果によりポリイミド導波路回折格子がTO効果を利用した波長可変フィルタへ応用できる見通しを得た。

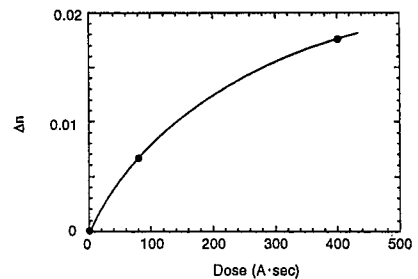


図3 屈折率変化量の放射光照射量依存性

第5章 一定複屈折ポリイミド光導波路の光回路への応用

第5章では、一定複屈折ポリイミドを用いて基本光回路である光分岐回路、光スイッチ、波長分波回路を作製し、光学特性評価からこの材料の光回路への適用性を評価した。

光分岐回路 作製した光分岐回路の過剰損失は石英ガラス光導波路と同等の0.3dBであり、この材料の適用で分波特性に優れた光分岐回路が作製できた。ここで、ビーム伝搬法（BPM）を用いて分波特性を解析したところ計算結果（図4：破線）は実測値（図4：実線）とほとんど一致し、BPMが一定複屈折ポリイミドを用いた光回路の設計に適用できる事が判明した。

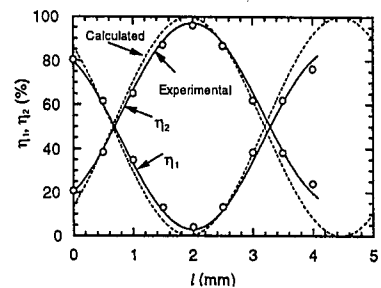


図4 光分岐回路の分波特性

すなわち、複屈折性が大きい既存のポリイミドでは回路設計ができなかったが、本材料を用いた場合設計通りの光回路作製が可能となった。
光スイッチ 複屈折性の大きな既存ポリイミド光導波路では Δn がTEとTMモードで異なるため、低PDLの光スイッチ作製は困難であったが、一定複屈折ポリイミドの適用により、PDLが0.4 dBと小さなデジタル型光スイッチの作製が可能となった(図5)。この光スイッチの消費電力は160 mWと小さく、石英ガラス光スイッチ(400 mW)の半分以下であった。

波長分波回路 既存ポリイミドは曲げ半径の小さな光導波路を作製できないためアレイ導波路格子(AWG)波長分波回路の作製は困難であったが、一定複屈折ポリイミドの適用で石英AWGと同等の特性(チャネル間隔、3dBバンド幅、消光比)を有するAWGが作製できることを明らかにした(図6)。

このように、一定複屈折ポリイミドの適用で基本光回路が設計通りに作製でき、フッ素化ポリイミド材料を用いた光導波路の応用範囲を広げることができた。

第6章 結論

第6章では、各章の結果を総括し本論文の結論を述べた。

- (1) 既存のフッ素化ポリイミドは光通信応用に必要な材料特性を有しておらず、新規フッ素化ポリイミド材料の開発が必要なことを明らかにした。
- (2) 材料設計を行い新規に開発した一定複屈折ポリイミド共重合体は光通信応用に必要な材料特性を有すること、この材料の適用で偏波依存性の小さな低損失単一モード光導波路の作製が可能であることを明らかにした。
- (3) 放射光照射が一定複屈折ポリイミドの屈折率制御法として有効であり、導波路回折格子の作製法に適用できることを明らかにした。
- (4) 一定複屈折ポリイミドを用いることによって、光分岐回路、光スイッチ、波長分波回路など様々な光回路が作製できることを明らかにした。

本研究で開発した一定複屈折ポリイミドを用いて作製した光導波路や光回路は、他の高分子光導波路よりも高い耐熱性を有し、さらに低温作製が可能であるため石英ガラス光導波路に比べ適用領域が広い。今後、光-電気混載実装方式に用いられるOE-MCM上、及び半導体チップ上への作製により、将来の光通信システムにおける有用な光回路として用いられると予想される。

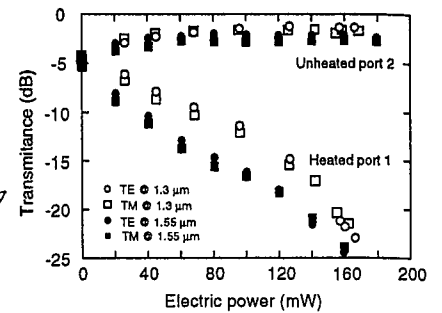


図5 光スイッチのスイッチング特性

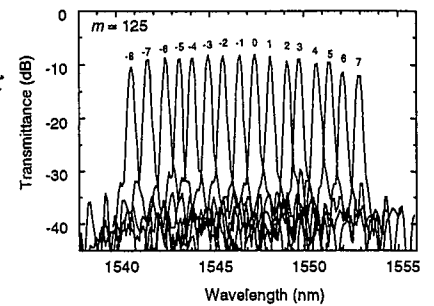


図6 AWG波長分波回路の16出力ポートからの透過スペクトル

審査結果の要旨

光通信が加入者系や宅内系まで普及し始めた昨今、加工の容易性と高密度実装性に優れ、かつ低コストの高分子光導波路開発への期待が大きい。このためには安定した性能を有し、信頼性に優れた材料の開発が不可欠である。本論文は、光通信用光学材料として耐熱性高分子材料であるポリイミドに着目し、新規フッ素化ポリイミド材料の開発とその光回路への応用を目的として諸課題にとりくんだ研究成果についてまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では既存のフッ素化ポリイミド共重合体の光導波路材料としての問題点を明らかにしている。既存材料の諸特性及びこれを用いた単一モード光導波路の光学特性の偏波依存性を検討したところ、既存のフッ素化ポリイミドは光通信应用到に必要な材料特性を有しておらず、新規なフッ素化ポリイミド材料の開発が必要なことを明らかにしている。

第3章では光回路応用にあたり必要な新規フッ素化ポリイミド材料の開発を目的とし、分子構造の設計と新規材料の合成、さらにこの材料を用いて作製した光導波路の光学特性を検討している。開発した一定複屈折フッ素化ポリイミドは光通信用材料として優れていることを見出すと共に、本材料を用いて作製した光導波路は、他の高分子光導波路より高い耐熱性を有し、さらに低温作製が可能であるため石英ガラス光導波路に比べ適用領域が広いことを明らかにしている。この材料の適用で偏波依存性の小さな低損失単一モード光導波路の作製が可能であることを実証した重要な成果である。

第4章では放射光照射による一定複屈折フッ素化ポリイミドの屈折率および化学構造の変化を検討し、さらにこの方法を用いた新規な導波路素子の作製の可能性を検討している。放射光照射によって一定複屈折フッ素化ポリイミドの屈折率が設計通り制御できることを明らかにし、また、波長多重通信システムにおいて重要部品である導波路回折格子の作製法として適用できることを実証している。

第5章では一定複屈折フッ素化ポリイミドの光通信応用を目的とし、基本光回路である光分岐回路、光スイッチ、波長分波回路への適合性と汎用的な光回路設計法であるビーム伝搬法による光回路設計の可能性を検討している。一定複屈折フッ素化ポリイミドを用いることによって、これらの基本光回路が寸法精度良く作製できること、従来のフッ素化ポリイミドでは不可能であったビーム伝搬法の適用が可能であり、設計通り光回路が作製できることを明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、一定複屈折フッ素化ポリイミド材料の開発に関し重要な諸問題に対処し、これを用い将来の光通信システムにおいて有用な光回路の開発に貢献した研究成果を得たものであり、材料化学ならびに光通信の発展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。