

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2008

課題番号：19023012

研究課題名（和文） ナノチューブ含有非線形導波路デバイスの新構築法の開拓と高機能化

研究課題名（英文） Developing new fabrication methods of nanotube-contained waveguides and improving device functionalities

研究代表者

榊原 陽一 (SAKAKIBARA YOUICHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・光技術研究部門・主任研究員

研究者番号：40357091

研究成果の概要：カーボンナノチューブの可飽和吸収効果を利用する光通信用超高速非線形導波路デバイスを作製するために、ナノチューブがポリイミド中に分散された材料をコア形状に加工する新規の技術を開発した。高精細フォトリソグラフィと酸素ドライエッチングによる方法、感光性ポリイミドの露光と現像による方法、細い溝にポリイミドを流しこむ方法により、それぞれに特色ある埋め込み型導波路を作製でき、可飽和吸収機能の発現を確認した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,200,000	0	4,200,000
2008年度	4,200,000	0	4,200,000
年度			
年度			
年度			
総計	8,400,000	0	8,400,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：ナノチューブ・フラーレン，先端機能デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

近年通信ネットワークを流通する情報量は増大し続けており、次世代の光通信システムに向けて時分割多重化方式による 100～160Gbit/s の超高速伝送技術の開発が期待されている。時分割多重化伝送は、複数の信号パルス列の時間タイミングをずらして重ねて伝送容量を増やす方式である。この方式では、信号を多重化するのは光学結合器を用いれば容易であるが、多重化した信号を元の信号パルス列に分離する（DEMUX という）のは容易ではない。従来技術では、光パルス信号を一旦電気信号に変換して分離している

が、100～160Gbit/s 超高速伝送では電子デバイスの応答速度の限界を超えてしまうため、光信号のまま DEMUX できる全光型 DEMUX スイッチデバイスの開発が必要とされている。

全光型 DEMUX スイッチを実現するには、取り出したい光パルス列と同じタイミングで制御光パルス列をデバイスに入れ、なんらかの非線形光学効果を利用して信号光の振幅や位相を変化させる必要がある。これまでに数種類の非線形光学効果の利用が提案されているが、なかでも可飽和吸収効果は、信号光の振幅と位相の両方を大きく変化させるので、デバイスを小型化することができ、

この効果を用いたデバイスの開発が期待されている。可飽和吸収効果は、物質が光強励起されている間は光吸収係数が減少(飽和)する現象であるが、100~160Gbit/s 伝送システム用 DEMUX スイッチへの応用では、可飽和吸収材料には1~数ピコ秒程度の超高速の励起状態の飽和回復時間が、1.55 $\mu$ m 光通信波長帯で起きるような特殊な電子準位構造をもつ材料が求められる。ところが、このような条件を満たす材料は少なく、新しい材料の開発が期待されていた。

研究代表者らは、単層カーボンナノチューブ(CNT)が上記の条件を満たす有望な材料であることを2001年に独自に見出し、その応用研究を進めてきた。当初は、入手できるCNTの材料形態は、極めて凝集力の強い粉末あるいはそれを無理やり薄膜化した非常に光学的品質の劣るものであった。そこで、高度な光デバイスを作製するために有望な、CNTが透明母材中に均質に分散され微細加工が可能なナノハイブリッド材料の開発を進めた結果、光通信用ポリマーとして実績のあるポリイミド中に均質に分散する技術を開発することができた。

さらに研究代表者らは、科研費特定領域「新世代光通信」の公募研究(平成18年度)によりこの材料の微細構造化に取り組み、導波路デバイスの試作を進めた結果、この材料はi線ステッパによるフォトリソグラフィと酸素ドライエッチングにより導波路用コア形状に加工できることが明らかになり、埋め込み型導波路デバイスを試作することにも成功した。試作した導波路はマルチモードではあったが、光入射用ファイバーの適切な入射アライメントにより基本モードのみを選択的に励振することが可能であることがわかった。また、作製した導波路が実際に可飽和吸収効果を示すことを確認できた。

## 2. 研究の目的

上記のようにナノチューブが含有されたポリマーをコアとする埋め込み型の導波路デバイスを初めて作製することができたが、コア径が大きなマルチモードであったために、コアへの強い光閉じ込めが望ましい可飽和吸収デバイスには不利であった。そこで本研究では、微細加工技術の高度化によるシングルモード導波路の作製技術の開発を目指した。また、ポリマー材料特有の成型加工性を利用したいろいろな作製手法を新たに開発することを目指した。

## 3. 研究の方法

### (1)シングルモード導波路の作製技術の開発

まず数値解析によりコア材料の屈折率が1.58、クラッド材料の屈折率が1.45の場合に、埋め込み型正方形導波路がシングルモード

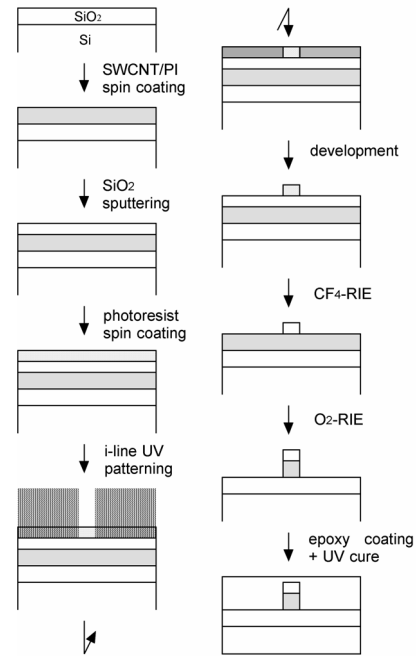


図1 加工プロセスの概要

になる条件を調べたところ、コア径が1.7 $\mu$ m以下でシングルモードとなることがわかった。しかし、マルチモード導波路を作製したときに利用したフォトレジストではこれだけの微細パターンを加工するのは困難なため、i線ステッパ用高解像度フォトレジストを用いることにした。しかしこのフォトレジストは酸素ドライエッチングに対する耐性が低いので、コア材料薄膜の上にシリカを薄くスパッタで積層し、まずこのシリカ層にレジストパターンをドライエッチングで転写して転写マスクとし、次にポリイミドを酸素ドライエッチングで加工した。

### (2)感光性ポリイミドを用いた作製技術の開発

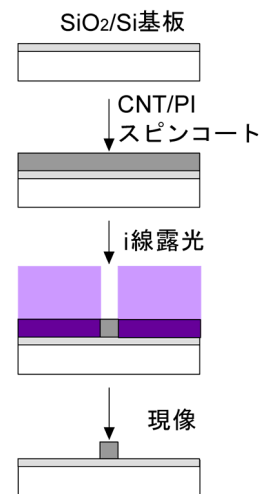


図2 感光性ポリイミドによる加工プロセス

これまで導波路を作製する際に用いていたポリイミドは、本来高解像度のポジ型感光性ポリイミドとして開発されてきたものである。リソグラフィ露光と現像のみで微細なコア構造を形成することにより、プロセスを大幅に簡便化できる可能性がある。そこで図2に示すようなプロセスでコア構造を形成し、さらに埋め込み導波路を作製することを試みた。

### (3) 溝流し込み型プロセスによる作製技術の開発

これまで述べてきた導波路の作製方法は、まずナノチューブを分散したポリイミド薄膜をスピコートにより形成し、次にコア構造に加工するというものであった。この場合、TE 偏光の方が TM 偏光に比べて遙かにナノチューブの吸収が大きいという現象が見られた。これは、図3上図のようにポリイミド高分子鎖の基板に平行な配向に引きずられてナノチューブも基板に平行に配向したためと考えられる。しかし、応用上デバイスに偏光依存性がない方が望ましい場合もあるため、偏光依存性を低減させるため、図3下図のような作製プロセスの開発を試みた。基板に予め溝を形成し、その中にナノチューブを分散したポリイミドを流しこむものである。この場合には、溝に埋まったポリイミドの領域は、その周囲に比べて屈折率が高くなるので、コアとして光を導波できると期待できる。また、溝にポリイミドが流れ込む過程で、ポリイミドの配向が低下し、導波路の偏光依存性も緩和される可能性がある。

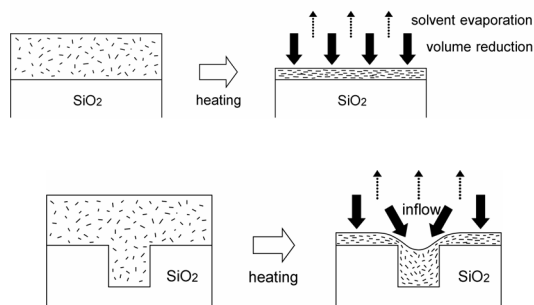


図3 上：CNTの配向モデル

下：溝流し込み型プロセス

## 4. 研究成果

### (1) シングルモード導波路の作製技術の開発

コア径  $1.7\mu\text{m} \times 1.7\mu\text{m}$  の形状加工を目標として、酸素ドライエッチングの諸条件（RFパワー・酸素量・圧力）をいろいろ変えて、側壁の形状がどのようになるかを調べた。多くの場合、柱状の構造が縦に走る凹凸が現れたが、良い条件の場合には図4のように滑らかなものが得られた。この構造を屈折

率が石英ガラスと等しいエポキシ樹脂でカバーし、断面を切り出し、導波路デバイスを完成させた。図5に示すように、入射光のパルスエネルギーが増大するにつれて透過率が増大することが観察され、可飽和吸収デバイスとして機能することが確認された。

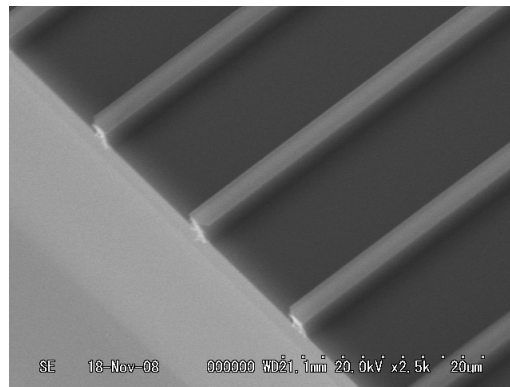


図4 酸素ドライエッチングにより形成されたコア構造

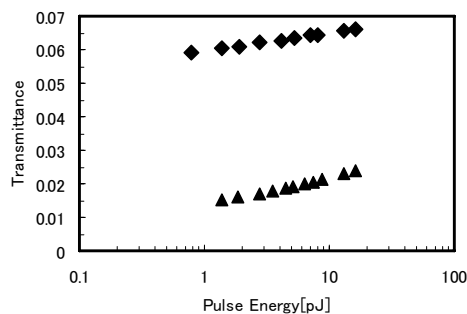


図5 可飽和吸収特性

### (2) 感光性ポリイミドを用いた作製技術の開発

まずCNTを含まないポリイミドのみで微細加工の加工性を評価した。ポリイミドは感光剤があらかじめ調査されているものを、そのまま使用した。図6のように、ドライエッチングを用いた場合のような垂直性の良い側壁は得られず、テーパ状となったものの、シングルモードになるような微小なコア径でも形成が期待できるレベルであることがわかった。一方、ドライエッチングの場合に多く見られるような縦方向の荒れはほとんどみられず、非常に滑らかであり、導波路の側壁の荒れによる散乱損失が少ないデバイスの作製が期待できることが明らかになった。

次にCNTを分散したポリイミドで同様の加工を試みたが、大きな問題に直面した。CNTをポリイミドに分散させる際に通常分散剤を添加するが、そのために基板との付着力が低下し、現像するとパターンが流れて

しまうのである。この流れはシングルモードのような細いパターンの場合に顕著であった。この問題は分散剤を添加せずにポリイミド中にCNTを分散する材料技術を新たに開発することにより克服できた。さらに現像液の組成を工夫することにより、細いパターンでの側壁のテーパ性を抑えることに成功し、シングルモードの導波路を作製することができた。また、この導波路は良好な可飽和吸収特性を示すことが確認された。

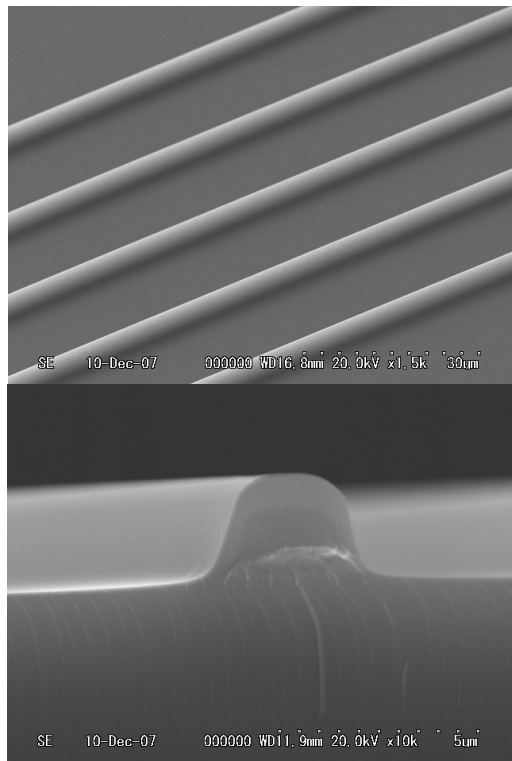


図6 現像後に形成されたコア構造

### (3) 溝流し込み型プロセスによる作製技術の開発

まず石英基板に溝を加工する技術の開発を行った。 $WSi_2$ をドライエッチング用マスクとする方法を採用した。 $WSi_2$ のパターニングは、i線ステッパにより形成されたフォトレジストのパターンをRIEで転写することにより行った。次に、RIE装置で $WSi_2$ と $SiO_2$ で大きな選択比が得られる条件を探索し、それを採用した。形成された溝の表面のラフネスを減じるために、フッ酸処理を更に行った。図7に形成された溝構造を示す。

次に溝の形成された基板の上に、ナノチューブ分散ポリイミドワニススをスピコートし、いろいろな条件でキュアした。その結果、溝が埋まらずにポリイミド層が浮かび上がってしまったりすることも多いが、条件によっては、図8のように溝の内部にポリイミドが埋まり込み、両側の基板上のポリイミドとは

分離性の良い構造が得られることがわかった。この構造にさらにエポキシ樹脂を塗布して埋め込み導波路を形成した。この導波路の可飽和吸収特性は従来に比べて遙かに偏光依存性が低減していることが確認された。

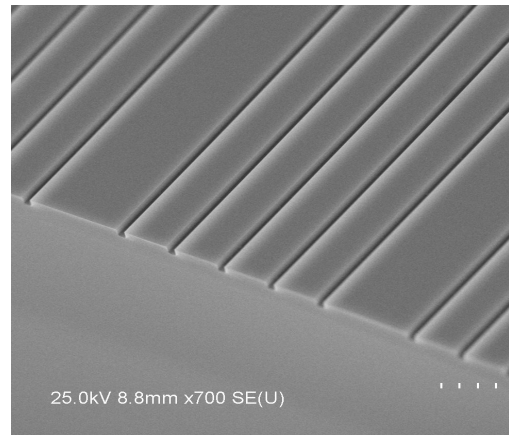


図7 溝加工の結果

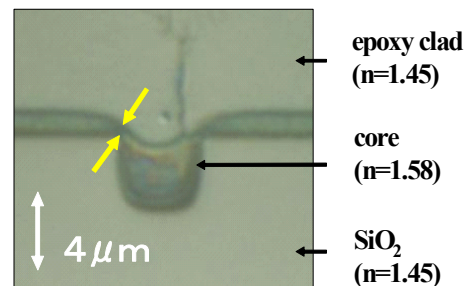


図8 導波路の断面

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計8件)

影山徳典、単層カーボンナノチューブ分散ポリイミドを用いたシングルモード光導波路の導波特性、第56回応用物理学関係連合講演会、2009年3月31日、筑波大学

市村直也、酸素RIE高耐性フォトレジストを用いたカーボンナノチューブ含有非線形光導波路の作製、第56回応用物理学関係連合講演会、2009年3月31日、筑波大学

影山徳典、感光性ポリイミドによるカーボンナノチューブ含有非線形光導波路の作製技術の改善、第69回応用物理学学会学術講演会、2008年9月2日、中部大学

大室俊之、偏光依存性の小さいカーボンナノチューブ含有非線形光導波路の作製、第55回応用物理学関係連合講演会、2008年3月30日、日本大学(船橋)

影山徳典、高精度フォトレジストを用いた  
カーボンナノチューブ含有光導波路作製、第  
55回応用物理学関係連合講演会、2008  
年3月30日、日本大学（船橋）

大室俊之、感光性ポリイミドによるカーボ  
ンナノチューブ含有非線形光導波路の作製、  
第68回応用物理学学会学術講演会、2007  
年9月4日、北海道工業大学

Y. Sakakibara, Nonlinear Carbon-  
Nanotube Photonics, OSA Topical Meeting on  
Nonlinear Photonics, 2007年9月4日,  
Quebec (Canada)

T. Oomuro, Carbon Nanotube-Polyimide  
Saturable Absorbing Waveguide Made by  
Simple Photolithography, Conference on  
Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2007, 2  
007年5月10日, Baltimore (USA)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

榊原 陽一 (SAKAKIBARA YOUICHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・光技術研  
究部門・主任研究員

研究者番号：40357091

### (2) 研究分担者

鍛冶 良作 (KAJI RYOSAKU)

独立行政法人産業技術総合研究所・情報技術  
研究部門・研究員

研究者番号：70356765

### (3) 連携研究者