

## 光導波路中のナノスケール欠陥の観察に成功

- 光集積回路の検査がナノスケールで可能に -

平成17年 9月27日 独立行政法人物質・材料研究機構

## 概要

- 独立行政法人物質・材料研究機構(理事長:岸 輝雄)、ナノマテリアル研究所(所長: 青野 正和)のナノ物性グループ 木戸 義勇ディレクター、三井 正研究員らは、偏光を 利用する近接場光学顕微鏡用プローブの開発により、これまで観察することができなかった 微小欠陥や歪みが、光導波路中を伝播する光に与える影響を鮮明に観察することに成功し た。
- 2.これまで情報通信用の光集積回路の評価にはプリズムカプラーを試料に密着させることで 屈折率差を無くし、その光を取り出して汎用の光学顕微鏡で観察するという方法が用いられ ていた。しかしながら、この方法は光の回折限界に制約されるため、波長よりも小さい領域 を観察することはできなかった。一方、近接場光学顕微鏡(NSOM)法の一種である導波路 - 集 光モード NSOM 法は試料表面の近接場を用いるため、光の回折限界の制約を受けず、光の波 長よりも小さい領域の観察が可能である。
- 3. 導波路 集光モード NSOM 法は光ファイバープローブ先端の微小開口を極小のプリズムカ プラーとして用いる方法であるため、光ファイバー内を光が伝播している間に偏光度が劣化 してしまうという問題があった。このため、導波路 - 集光モードにおける偏光観察は困難で あり、ナノスケールの欠陥や歪みが生じる散乱や屈折率異常が、偏光特性に与える影響を調 べることは難しかった。
- 4.今回開発した偏光を利用したナノスケールの欠陥検査法は、情報通信用に使われる光集積 回路内部の損傷を探知する技術として応用が可能であり、これらの素子の評価・開発に寄与 できる。さらに、フォトニック結晶では偏光方向により伝播特性が変わることから、その基 礎研究における重要なツールとして利用できる。今後の検討では、光スイッチング素子や波 長変換材料中での光の伝播特性について調べる予定であり、能動的光集積回路や量子計算機 の実現への研究が大きく進むものと期待される。
- 5.本成果は特許出願済みであり、米科学誌 Applied Physics Letter に近日掲載予定である。

#### 研究の背景

光通信の分野では、光集積回路中を伝播する光の特性をナノ(メートル)スケール の空間分解能で観察・評価する手法が求められている。そのとき重要なのは、光導波 路等の伝送系内部に存在する光学的欠陥(散乱源、屈折率異常分布、等)<sup>1)</sup>が光の伝 播特性にどのような影響を与えるか、ということであり、単に外観をナノ精度で観察 するだけでは不十分である。これまでの光導波路の評価では、プリズムカプラーを試 料に密着させることで屈折率差を無くし、その光を取り出して汎用の光学顕微鏡で観 察する、という方法が用いられていた(図1(a))。しかしながらこの方法は光の回折 限界<sup>2)</sup>に制約されるため、波長よりも小さい領域を観察することはできない。

ナノ(メートル)スケールにおける光学特性を評価する手法として、近接場光学顕 微鏡(Near-field Scanning Optical Microscope: NSOM)法<sup>3)</sup>が注目されている。こ れまで NSOM 法の研究では、その高い空間分解能(~数 10nm)に主眼を置いた観察手 法として用いられてきた。ところが最近、光導波路やフォトニクス結晶<sup>4)</sup>の内部を伝 播する光そのものを直接観察する手段として用いられるようになってきた。これは光 ファイバープローブを極小のプリズムカプラーとして用いる方法である(図1(b))。 これは 導波路 集光モード NSOM 法と呼ばれ、光導波路中の微小な亀裂から漏れる光 の観察に成功している。しかしながら、汎用の光学顕微鏡では観察できない、ナノメ ートルスケールの欠陥や微弱な歪みが、光の伝播特性に与える影響を直接観察するこ とは誰も成功していなかった。

#### 成果の内容

当機構では、偏光保持型光ファイバーを用いた近接場光学顕微鏡用プローブの開発 を行い、それを用いた光導波路の研究を進めてきた。今回、偏光保持型ファイバープ ローブを用いることで、ナノ(メートル)スケールの欠陥や微弱な歪みが、光の伝播 特性に与える影響を観察することに成功した。

本研究では、応力、及び欠陥が光導波路中を伝播する光の偏光状態に与える影響に ついて調べるため、有機光導波路の近傍にマイクロビッカース硬度計のダイヤモンド 圧子を用いて圧痕を打ち込み、その周囲の偏光状態を調べた。圧痕の打ち込みと光導 波路の位置関係を図2(a)に示す。圧子はその菱面が光導波路の伝播方向に平行になる ようにセットし、圧痕自体は導波路にかからないように打ち込みを行った。つまり外 観的には、光導波路に影響が無い状態で観察を行った。この状態で、光導波路に水平 (TE)もしくは垂直(TM)偏光の光を導入し、偏光保持型ファイバープロープで光を取り 出して観察を行った(図2(b))

図3に圧痕が無い部分の観察結果を示す。図3(a)は汎用光学顕微鏡像であり、観察 領域の全体像を示している。図中、赤で示された部分を拡大した表面高さ像と偏光 NSOM 像を、それぞれ、図3(b)と図3(c)(d)に示す。二つの偏光 NSOM 像は垂直偏光入 射で測定し、取り込み光の偏光はそれぞれ0°、90°で図に示したとおりである。 図3(c)(d)の二つの図から、圧痕が無く、垂直偏光の入射条件下では、取り込み偏光 の方向を変えても伝播光強度の空間分布は変わらないことがわかる。

一方、図4は圧痕がある部分の観察結果を示している。図4(a)は汎用光学顕微鏡像 であり、観察領域の全体像を示している。圧痕の一辺の大きさは約40μmであり、外 観からは圧痕は導波路に損傷を与えていないように観察される(実際には微小欠陥が 発生している(後述) )。 圧痕と導波路の間の部分を拡大した表面高さ像と偏光 NSOM 像 が、図4(b)と図4(c)~(f)であり、偏光NSOM像のそれぞれの図における入射光の偏 光と取り込み光の偏光は図に示したとおりである。各偏光条件における光導波路を伝 播する光の強度に注目し、光導波路内の圧痕に近い側と遠い側の強度に注目すると、 図4(c)(d)に示された水平入射偏光ではほとんど変化が見られないのに対して、垂直 入射偏光ではその強度分布が大きく変わっている。例えば、図4(e)で圧痕に近い側の 強度は非常に強いのに対して、図4(f)では逆に弱くなっている。 つまり強度分布が反 転している。 図4(e)の条件は、光の伝播方向、入射偏光の方向、 取り込み偏光の方向 のそれぞれが直交しており、本来は検出される光の強度は非常に弱くなるはずである。 ところが導波路中の圧痕近傍では光の強度が強くなっていることから、光の散乱が生 じていると考えられる。実際には応力により印加された有機分子鎖のナノスケールの 乱れと考えられる。注目すべき点は、これらの違いが取り込みの偏光方向を変えるこ とによりはじめて明らかになったことである。

従来のように、シングルモードの光ファイバーを使ったプローブで観察した場合を 考えれば、図4(e)と図4(f)で表される二つの偏光成分は混合されてしまい、図4 (c)(d)同様、圧痕に近い側と遠い側でその強度がほぼ同じとして観察され、圧痕から の影響を鮮明に観察することができない。今回得られた結果は、圧痕により生じるナ ノスケールの欠陥や微弱な歪などが光導波路を伝播する光に与える影響を評価する上 で、偏光 NSOM 法が有効であることを示している。

## 波及効果と今後の展開

今回開発した偏光を利用した近接場光学顕微鏡用プローブによる検査法は、情報通 信用に使われる光集積回路内部の損傷を探知する技術として応用が可能であり、これ らの素子の評価・開発に寄与できる可能性がある。さらに、フォトニック結晶では偏 光方向により伝播特性が変わることから、その基礎研究における重要なツールとして 利用できる可能性がある。今後の検討では、光スイッチング素子や波長変換材料中で の伝播特性について調べる予定であり、能動的光集積回路や量子計算機の実現へ大き く道を拓くものと思われる。

## 用語解説

1) 伝送系内部に存在する光学的欠陥

外観からは知ることができない、光ファイバーや光導波路内部に存在する欠陥。主 に、散乱源や屈折率異常など。散乱源は伝送損失を発生させ、屈折率異常は内部で発 生する光路差から信号波形の乱れを生じさせる。

2)回折限界

回折と呼ばれる効果のために光を凸レンズで集光してもそのスポット径は波長程度 以下にはならず、したがって波長程度以下の寸法の小さな領域に光を閉じ込めること ができない。この閉じ込めの下限を回折限界という。そのため従来の光学顕微鏡の空 間分解能はこの回折限界によって決まり、光の波長より小さな物体を観察することは できなかった。

3)近接場光学顕微鏡(Near-field Scanning Optical Microscope: NSOM)法

走査型プローブ顕微鏡の一種。トンネル電子の代わりに光(光子)を用いて画像化 する。先鋭化した光ファイバーの先端に形成した微小開口や金属プローブを試料表面 に近づけ(~10 nm)、全反射条件等で試料表面にまとわりついている近接場(エバネッ セント場)を取り出して測定を行う。光の回折限界を超えた空間分解能での観察が可 能である。

4)フォトニクス結晶

屈折率の異なる誘電体を用いて周期構造を作ることにより、この構造と同程度の波 長を持つ電磁波に対して、特定の方向から完全に反射され、その方向からずれるに従 い透過するようにした結晶。一般の結晶材料が電子波に対して分散特性をもつことに 対比して、光の禁制帯を有する結晶という意味で名づけられた。 問い合わせ先:

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1 独立行政法人物質・材料研究機構 広報室 TEL:029-859-2026

# 研究内容に関すること:

独立行政法人物質・材料研究機構 ナノマテリアル研究所 ナノ物性グループ 研究員 三井 正 TEL:029-860-4722、FAX:029-860-4795 E-mail:MITSUI.Tadashi@nims.go.jp



- 図1 導波路 集光モード近接場光学顕微鏡法の概念図
- (a) プリズムカプラーを用いたこれまでの光導波路評価法
- (b) 偏光保持ファイバープローブを用いた近接場光学顕微鏡による 評価法





- 図2 圧痕の打ち込みと伝播光の偏光特性の観察
- (a) 圧痕と光導波路の位置関係
- (b) 偏光保持型ファイバープローブを用いた偏光強度分布の観察



- 図3 圧痕が無い場合の有機光導波路伝播光の観察
- (a)汎用光学顕微鏡像、
- (b)表面高さ像(原子間力顕微鏡像)、
- (c) 偏光近接場光学顕微鏡像(垂直入射、0°取り込み)、
- (d) 偏光近接場光学顕微鏡像(垂直入射、90°取り込み)。



図4 圧痕がある場合の有機光導波路伝播光の観察

- (a)汎用光学顕微鏡像、
- (b)表面高さ像(原子間力顕微鏡像)、
- (c) 偏光近接場光学顕微鏡像(水平入射、0°取り込み)、
- (d) 偏光近接場光学顕微鏡像(水平入射、90°取り込み)、
- (e) 偏光近接場光学顕微鏡像(垂直入射、0°取り込み)、
- (f)偏光近接場光学顕微鏡像(垂直入射、90°取り込み)。