

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686008

研究課題名(和文)共役 電子系有機ナノフォトニック構造によるアクティブ光制御デバイスの創製

研究課題名(英文)Studies on the organic active nanophotonic devices

研究代表者

井上 振一郎(Inoue, Shin-ichiro)

独立行政法人情報通信研究機構・未来ICT研究所ナノICT研究室・主任研究員

研究者番号：20391865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円、(間接経費) 5,880,000円

研究成果の概要(和文)：共役 電子系有機分子・高分子は、無機・半導体材料を凌駕する優れた非線形光学特性や超高速応答性を併せ持つものの、その低屈折率性や加工ダメージ等の問題により、本質的なナノ光学応用への展開が制限されてきた。本研究では、この問題を有機材料と異種材料(半導体)とをナノスケールで多次元的に組み合わせた独自の有機ナノ・ヘテロ格子構造の創製によって解決し、有機分子・高分子内の非線形光学機能や光位相をナノ光空間において操作することで、超小型・低消費電力な電気光学変調デバイスなどの有機アクティブ光制御素子を開発することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Organic EO polymers can provide extremely high modulation speeds in excess of 100 GHz, and very high EO coefficients that are much higher than that of lithium niobate. In this study, we show experimental evidence that the performance of nonlinear optical applications such as the electro-optic modulators are dramatically improved by controlling the matter-radiation nonlinear interaction in the nonlinear optical polymer two-dimensional photonic crystals fabricated by organic/silicon nano-hybrid technology. The results will open up possibilities in unprecedented applications such as highly efficient and ultrafast optical data processing systems in organic nanophotonic architectures.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：有機非線形光学材料 フォトニック結晶 光ナノデバイス 光スイッチ 光位相制御 電気光学効果  
ナノ微細加工 光変調デバイス

## 1. 研究開始当初の背景

共役 $\pi$ 電子系有機分子・高分子は、ミクロ領域における $\pi$ 電子の非局在化により、無機・半導体とは根本的に異なった光・電子物性を持ち、光デバイスにおいて、この特性は、極めて大きな非線形光学定数や超高速な非線形応答速度などの優れた特徴をもたらす。よって、これら有機 $\pi$ 電子系材料のポテンシャルを極限まで利用し尽くすことは、将来の情報通信処理における爆発的な大容量化、高密度化、高速化の問題を解決していくうえで必要不可欠な重要課題である。しかしながらこれまで、波長オーダーの光閉じ込めを困難とする低屈折率性や、ナノ微細加工ダメージの問題など、有機特有の極めてソフトな物理・化学特性が原因で、ナノ微細領域でのアクティブな光機能性を内含した、新機能、有機ナノフォトニックデバイスへの自由な研究展開が阻まれていた。

## 2. 研究の目的

ここで本研究は、共役 $\pi$ 電子系有機分子・高分子と異種材料である半導体とを、光波長スケールで多次的に組み合わせた有機ナノ・ヘテロ格子 (ON-HeL と略す) 構造を独自のプロセス技術によって作製することにより、機能性分子への微細加工ダメージを防ぎ、且つ低い屈折率の有機材料でも十分な屈折率差を誘起させることによって、一様有機媒質中では起こり得ない特異な光状態を意図的に造り出し、光と有機分子との間の相互作用自身を積極的に操作する。このような有機ナノフォトニック構造の中では、光子 (フォトン) に対するバンド構造が形成されるため、その特異な光分散関係を精密に制御することで、極端に遅い光の群速度 (スローライト) と高密度なナノ光空間を利用し、電場増強や非線形相互作用の増大を誘起することが可能となる。

本研究は、有機ナノ・ヘテロ格子 (ON-HeL) 構造の創製を基軸として、共役 $\pi$ 電子系有機分子・高分子に対する光ナノ領域での「制約を解消」し、有機光非線形機能の新たな高度制御技術を開拓することにより、これまで材料固有の物性定数とデバイス長によって制限されていた従来素子性能の「限界を打破」し、現在主流である無機・半導体系光電子デバイスとは異なった光科学技術領域を新たに切り拓くものである。

## 3. 研究の方法

爆発的に増大する情報インフラの大容量・高速化と低消費電力化の要請に対応するためには、情報処理の光化が不可欠であり、それを進めるためには、複雑な論理処理に優れた電子集積回路と、高速化・省エネルギー化に優れた光集積回路とを融合する技術の開発が求められている。電気信号を光信号へ変換するデバイスとして、電気光学 (EO) 変調器があるが、現在、ニオブ酸リチウム (LN)

結晶を用いた変調器が実用化されている。しかしながら素子サイズは数 cm 以上あり、小型・集積化には適していない。そこで近年、シリコンフォトニクスによる光変調器の研究開発が世界的に本格化している。CMOS ベースのシリコンフォトニクスにおいて集積化、低コスト化に適した各種のモノリシック光変調器が既に開発されているが、その動作原理にキャリアプラズマ効果を用いるため、キャリアダイナミクスにより変調帯域が数十 GHz 以下に制限される問題があり、デバイスサイズ (~数 mm)、高速動作 (< 数十 GHz)、ともに更なる高性能化が求められている。このため、単チャネルあたり 100GHz 以上の超高速な新世代光集積ネットワークを実現しようとした場合、全く新しい光デバイスのデザインが必要となる。

超高速性 (> 100 GHz) や高い EO 係数を併せ持つ有機 EO ポリマーと、シリコンフォトニクスとのハイブリッド技術は、そのような高集積化・低消費電力化された超高速 EO 変調デバイスを実現する上で、極めて有望な技術と考えられる。EO ポリマーは LN より遥かに大きな電気光学係数を有しており、素子の低電圧化が可能で、さらに LN、半導体と比較し、光波-高周波帯間の屈折率分散が極めて小さいため、100GHz~THz に亘る超高速な光変調が可能となる。さらに、シリコンとのハイブリッド構造を実現することで、屈折率の小さな有機材料でも十分な屈折率差を確保できるため、ナノ微小領域での光閉じ込め、光伝搬も可能となる。したがって、本研究では、有機材料とシリコンフォトニクスとのハイブリッド技術による有機ナノ・ヘテロ格子 (ON-HeL) 構造の開発や、有機フォトニック結晶構造によるスローライト効果を駆使したナノフォトニックデバイスの研究開発を進めることで、無機・半導体デバイスでは達成不可能な性能を有する EO 変調デバイスなどの、共役 $\pi$ 電子系有機ナノフォトニック構造によるアクティブ光制御デバイスの開発を行った。

## 4. 研究成果

一般的に光は屈折率の高いコア領域を伝搬するため、Si に対し屈折率の低い有機材料はクラッド領域となり、伝搬モードの電界分布は Si 領域に集中してしまう。よって、有機・Si ハイブリッド構造では、有機 $\pi$ 共役材料の光機能性を活用するために、有機クラッド中を光が伝搬するように工夫する必要がある。そのような構造として最も典型的な構造は、スロット導波路である。Si 導波路の中央に極めて狭い溝 (スロット) を掘り、その中に有機材料を充填することで、屈折率の低い有機領域でも、伝搬モードの主要電界を局所的に閉じ込めることができる。これをより発展させた構造が、Si スロット 2 次元フォトニック結晶がある。2 次元フォトニック結晶内の線欠陥導波路の中央にスロット部を設

け、その中に有機材料を充填し光を局所的に伝搬させるものである。素子の模式図と実際に作製した構造を図 1 に示す。50~250nm 幅程度のスロット内に光が局在して伝搬するだけでなく、フォトニック結晶の効果で群速度を遅延させることが可能となる。このスローライト効果により、EO 変調に伴う位相変化が大幅に増大されるため、EO 変調効率が飛躍的に向上できる。

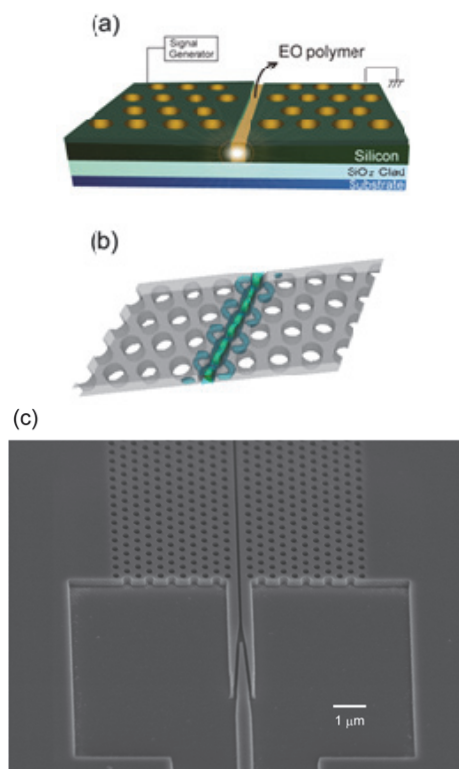


図 1 (a) 有機 EO ポリマーと Si スロット 2 次元フォトニック結晶の融合デバイスの模式図、(b) 光伝搬モード分布、(c) 作製素子の SEM 像

SOI 基板を用いた Si スロット 2 次元フォトニック結晶中のナノスロット空隙内に有機 EO ポリマーを充填したマッシュツェンダ (MZ) 型 EO 変調器を設計し、ナノスロット内を局所的に伝搬するスロットモード特性を 3 次元光バンド構造計算と 3D-FDTD 計算により理論的に評価した。その結果、スローライトによる位相差 ( $\Delta\Phi \propto \Delta k$ ) 増大効果と、ナノスロット (すなわち Si ナノ電極ギャップ) による電界集中効果を適切に利用することによって、MZ 干渉アーム長  $50\mu\text{m}$  という極めて短い素子長ながら、低動作電圧 (半波長電圧  $V\pi=0.75\text{V}$ )、超高速動作 (動作帯域  $f_{3\text{dB}}=121\text{GHz}$ ) の EO 変調を理論的に実証した。このように Si スロット 2 次元フォトニック結晶は、EO 変調デバイスの高性能化に極めて有効であるが、Si ナノ電極ギャップを介して有機 EO ポリマーの電界ポーリング (分子配向処理) を行う必要がある。この際、ナノ Si 電極間のリーク電流などが原因で、スロット内の有機 EO ポリマーの分子配向特性が大き

く低下する問題があった。

このような問題を解決するため、我々は、研究を進める中で、有機 EO ポリマーとシリコン 1 次元フォトニック結晶導波路とをハイブリッドしたマッシュツェンダ (MZ) 型 EO 光変調器を提案した。図 2 に提案デバイス構造と断面 SEM 像を示すが、EO ポリマー/Si 融合型 1 次元フォトニック結晶は、一般的な導波路構造に近い、EO ポリマーの配向制御に適した構造であることが特徴であり、Si プラットフォームにおいて、バルク状態と遜色ない優れたポーリング配向特性を示す。このような手法によって、有機 EO ポリマーとシリコンフォトニクスを高い精度で融合するプロセス技術を確立した。図 3 に非対称 MZI 素子 ( $L=100\mu\text{m}$ ) において得られた EO 変調特性を示すが、スローライト効果による変調効率の向上、 $0.73\text{V}\pi\text{-cm}$  という低駆動電圧、及び実デバイス内における極めて大きな電気光学係数 ( $r_{33}=343\text{ pm/V}$ ) を達成した。これは現在実用化されているニオブ酸リチウム (LN) 光変調器の約 1/1000 の素子サイズ、10 倍以上に相当する性能 ( $r_{33}$  値) であり、本デバイスの高い優位性を示す結果であると言える (2013 年応用物理学会春季学術講演会 Poster Award 受賞) (2013 年 10 月 23 日付: 日経産業新聞、他多数掲載)。

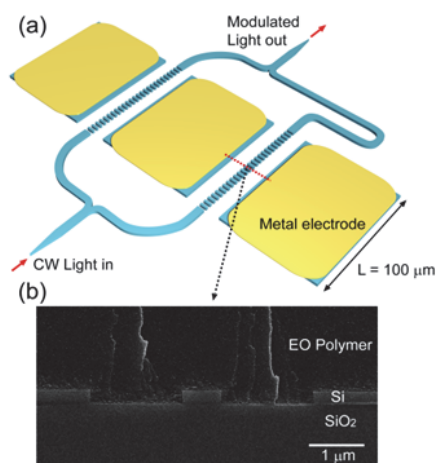


図 2 (a) 有機 EO ポリマーとシリコン 1 次元スロット 2 次元フォトニック結晶導波路とをハイブリッドした MZ 型 EO 光変調器の概要図、(b) 作製素子の断面 SEM 像

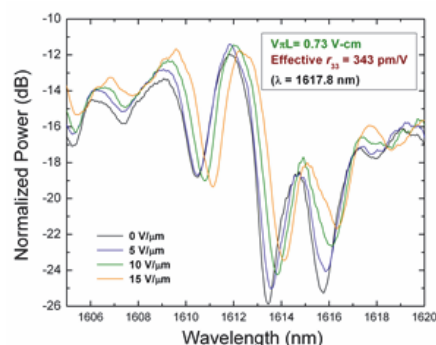


図 3 有機・Si 融合型光変調器の EO 変調特性

今回開発した EO 変調デバイスは、非常にシンプルな構造で、既存のシリコン CMOS プロセス、シリコンフォトニクスとの整合性も高く、低コスト化や実用性に配慮した構造でありながら、従来の LN やシリコン CMOS フォトニクスでは、決して同時に実現できない (1) 超高速性、(2) 超小型、(3) 低消費電力という 3 つの潜在的デバイス特性を併せ持つ。これは、100GHz を超える超高速・低消費電力なオンチップ光配線やチップ間光通信の実現といった光・電子融合領域の新たな発展可能性を切り拓くものと期待される。

本研究は、有機  $\pi$  共役材料とシリコンフォトニクスやフォトニック結晶との融合技術が、非線形光学デバイスの性能向上や小型・集積化、低消費電力化に直結する有望な技術であることを実証した。有機材料やシリコンの融合フォトニクスは、従来の無機もしくは有機単体の光素子では不可能だった、新しい光学技術への展開を可能にするもので、様々な光アクティブデバイス分野や、超高速・省エネルギー光 ICT 領域への波及効果が見込まれる。今後、さらなる高性能化、高機能化に向けた研究や、実用化を目指した安定性、信頼性などの検証も含め、本分野の更なる発展に期待したい。

#### 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)

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① S. Inoue and A. Otomo, 「Electro-optic polymers/silicon hybrid slow light modulator based on one-dimensional photonic crystal waveguides」、Applied Physics Letters, Vol. 103, p 171101-1~4, 2013,  
[<http://dx.doi.org/10.1063/1.4824421>]
- ② 井上 振一郎、「有機・シリコン集積型フォトニクス」(招待論文)、Electrochemistry, Vol. 81, p 484~489, 2013,  
<http://dx.doi.org/10.5796/electrochemistry.81.484>

[学会発表] (計 36 件)

- ① 井上 振一郎、「電気光学ポリマーを用いた有機・シリコン融合集積フォトニクス」(招待講演)、電子情報通信学会ポリマー光回路(POC)研究会、2014年3月3日、回路会館(東京都杉並区)
- ② S. Inoue and A. Otomo, 「Electro-optic polymer/silicon hybrid slow light modulator based on photonic crystal nanobeam waveguides」、SPIE Photonics West 2014, 2014年2月3日、The Moscone Center (San Francisco, USA)

[図書] (計 3 件)

- ① 井上 振一郎、技術情報協会、「光の制御技術とその応用事例集」第4章 第11節 有機フォトニック結晶による光制御、光利用効率の向上、2014年、601(395-402)
- ② S. Inoue、Springer Berlin Heidelberg、「Optical Properties of Advanced Materials」Chapter 2 Photonic Crystals: Manipulating Light with Periodic Structures、2013年、187(39-63)

[その他]

ホームページ等

報道発表:

<http://www.nict.go.jp/press/2013/10/21-1.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

井上 振一郎 (INOUE, Shin-ichiro)

独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所・主任研究員

研究者番号: 20391865