

有機薄膜光集積回路

東京工業大学

雨宮智宏, 金澤 徹, 平谷拓生, 荒井滋久

三井化学(株)

浦上達宣

1 はじめに

光集積回路 (PICs: Photonic Integrated Circuits) とは、光通信で必須とされる種々の機能をワンチップ上に一括集積したものである。単一機能の光デバイスに比べて、実装コスト・消費電力・サイズなどの低減が可能なことから、数多くのモジュールが実用化されており、現在の光市場を席巻している。

光集積回路の歴史はベル研究所に端を発しており、1969年に、当時の研究所の広報誌であったThe Bell System Technical Journalにて特集を組む形で大々的に紹介されたのが、その始まりである¹⁾。スチュアート・ミラー (Stewart E. Miller) やエンリク・マーカティリ (Enrique A. J. Marcatili) らによる伝送路における伝搬モード解析をはじめとして、光集積回路で必須とされる概念のほとんどはこのときに形作られたと言っても過言ではない²⁾。その2年後の1971年に、東京工業大学の末松安晴によって、我が国でも初めて光集積回路の論文が発表されている³⁾。このときは、上記ミラーらの論文の内容に加えて、光源である半導体レーザや光パラメトリック発振器の集積化や、波長多重などについても言及されており、より現在の形に近い提案となっている。

光集積回路はその歴史上、光通信用途を前提に研究開発が進められた経緯もあり、化合物半導体であるInPをベースとしたものが、現在の主流となっている^{4,5)}。ここで、材料としてInPが選択されているのは、光源であ

る半導体レーザをはじめとして、種々の機能を容易に一括集積できるためである。しかし、光源が必要とされない回路においては、低損失かつ高密度集積の可能なSi系材料の方が、性能・コストの両面で優位性があるため、近年、多くの機関が開発を行っている^{6,7)}。鬼門であった光源についても、InP系半導体レーザのハイブリッド接合技術の発展に伴って集積化が可能となり^{8,9)}、InP系光集積回路の市場を脅かす存在になりつつある。上記の背景からも、2000年代中頃まではInP一辺倒であった光集積回路に、材料変革の波が訪れているといえるだろう。

そのような材料変革の時流を受けて、当グループでは、光集積回路の新しいプラットフォームとして、有機薄膜フィルムに着目している。有機薄膜は、近年、電子デバイスの分野に導入されつつあり、ウェアラブルデバイスや医療デバイスとしての応用が注目を集めている^{10~12)}。これは光デバイスについても同じことが言え、チップ形状であった従来の光集積回路をフレキシブル化することで、センシングや医療応用などを目的としたウェアラブルで高速な光信号処理が可能となる。

有機材料を用いた光伝送技術については、有機材料の低損失性および柔軟性を活かして、既に多くの研究が行われている^{13~15)}。しかし、有機材料はInP、Siと同等の機能性を持たせることは極めて難しく、その多くがパッシブな光伝送路としての研究に留まっている。近年になってようやく、有機材料上にリング共振器などの機能デバイスを集積した報告などが行われるようになってきてはいるものの¹⁶⁾、未だ試作段階の域を出ておらず、デバ

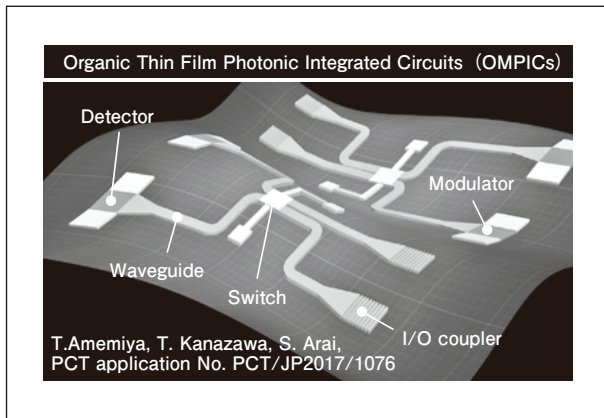


図1 有機薄膜光集積回路 (OMPICs: Organic Membrane Photonic Integrated Circuits) の概念図

イスの集積度・多機能性という観点からはInPやSiに遠く及ばないのが現状である。

本稿では、有機薄膜光集積回路 (OMPICs: Organic Membrane Photonic Integrated Circuits)¹⁷⁾ の提案を行う。回路の概観は図1に示すとおりであり、厚さ数10 μmの有機薄膜フィルム内に、光集積回路において必須とされる機能全てをモノリシックに一括集積することを考える。まず2節では、有機薄膜光集積回路に機能性を持たせるための材料について言及し、その集積手法や材料特性について議論する。次に3節では、有機薄膜光集積回路の代表的な構成とモノリシック集積技術について述べる (あくまでも一例であり、実際には、これを拡張する形で様々な構成が考えられる)。また4節では、3節で述べた構成における各機能デバイスの性能限界を理論解析とともに議論する。最後に5節において、回路内の最も基本的な要素である‘光伝送路’と‘入出力カプラ’を集積した実験について言及した上で、まとめとする。

2 有機薄膜光集積回路における機能性発現

一般的に、高分子ポリマーは要求性能に応じて幅広い設計が可能であり、光導波路用途として現在までに様々な種類の材料が合成されている^{18, 19)}。これらは、伝搬損失や耐熱性などの面において優れた特性を有するが、機能性という観点からは、InPやSiなどの半導体材料と比べると極めて限定される。そのため、有機薄膜光集積回

路においては、高分子ポリマーの薄膜フィルム内に別の機能性材料を埋め込むことで、この問題をクリアする。このとき、埋め込む機能性材料の特性として以下の二点が要求される。

- A. 光通信帯から可視帯までの光に対して、屈折率変調や吸収変調、キャリア生成などの機能性をもつこと
 - B. 薄膜フィルムの湾曲によって、損傷が起きないこと
- 本節では、これらを満たす二つの手法を提案し、薄膜フィルム内への実装も含めて議論する。

2.1 グラフェンによる機能性発現

グラフェンを代表とする2次元系層状物質は、揺らぎの無い分子層膜を形成しやすく、極薄膜においても良好な移動度を有することから、近年、電子デバイスと光デバイスの両面から様々な研究が行われている^{20~23)}。特にグラフェンは、化学ポテンシャルの位置を制御することによって、光特性をダイナミックに切り替えることができるため、受光や変調をはじめとした様々な光機能の発現が可能である。また、その強固な力学的特性により、湾曲によって損傷が起きることもない。そのため、前述のAとBの特長を併せ持った適当な材料であるといえる。

グラフェンの光学特性 (複素誘電率 ϵ) は、以下の式で与えられる。

$$\epsilon = 1 + \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0 d_g} \quad (1)$$

ここで、 ω は光の周波数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 $d_g=0.7$ nmはグラフェンの有効膜厚である。また、 σ はグラフェンの複素導電率であり、以下の久保公式により求めることができる。

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_1 + \sigma_2 \\ \sigma_1 &= \sigma_0 \frac{4\mu}{\pi} \frac{1}{\hbar(\tau_1 - i\omega)} \\ \sigma_2 &= \sigma_0 \left(1 + \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar\omega - 2\mu}{\hbar\tau_2} - \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar\omega + 2\mu}{\hbar\tau_2} \right) \\ &\quad - i\sigma_0 \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(2\mu + \hbar\omega)^2 + \hbar^2\tau_2^2}{(2\mu - \hbar\omega)^2 + \hbar^2\tau_2^2} \end{aligned} \quad (2)$$

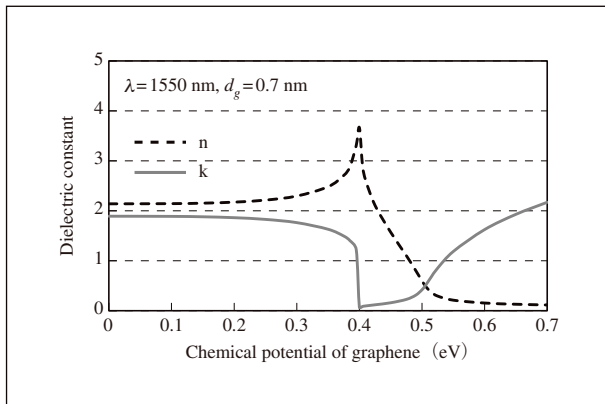


図2 グラフェンの屈折率および消衰係数の化学ポテンシャル依存性

ここで、 μ はグラフェンの化学ポテンシャル、 $\sigma_0=60.8 \mu\text{S}$ はグラフェンのユニバーサル導電率、 $\tau_1=1.2 \text{ ps}$ はバンド間遷移の緩和時間、 $\tau_2=10 \text{ fs}$ はバンド内遷移の緩和時間である。式(1)および式(2)に従って、光通信帯（波長 $1550 \mu\text{m}$ ）におけるグラフェンの屈折率および消衰係数の化学ポテンシャル依存性を計算した結果を図2に示す。図2からも分かるように、グラフェンの光学特性は、バンド間吸収に起因する誘電体的特性 ($0 \text{ eV} < \mu < 0.4 \text{ eV}$) からバンド内吸収に起因する金属的特性 ($\mu > 0.51 \text{ eV}$) へと変化させることが可能であり、これを利用することで様々な光機能が発現可能となる（詳細については4節で述べる）。

有機薄膜回路内にグラフェンを実装する場合、グラフェンの成長、転写ともに汎用的に用いられている手法を用いることができる。図3 (a) に、実際にグラフェンを内包した薄膜フィルムの写真を示す（フィルムの中央に $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ のグラフェンが転写されている）。フィルムの形成方法は以下のとおりである。まず、支持基板（InP など）上に、剥離用ポリイミドである ECRIOS[®]（三井化学）²⁴⁾ を塗布・硬化（ 260°C の N_2 雰囲気）した後、水中で基板上に PMMA / グラフェンを転写する。その後、アセトン中で PMMA 膜を除去し、グラフェンが転写されたポリイミドを基板表面から剥離する。支持基板からのフィルム剥離については、InP を裏面から劈開することで行う。

実際の有機薄膜光集積回路においては、剥離用ポリイミド上に任意のポリマーを何層にもわたって塗布するこ

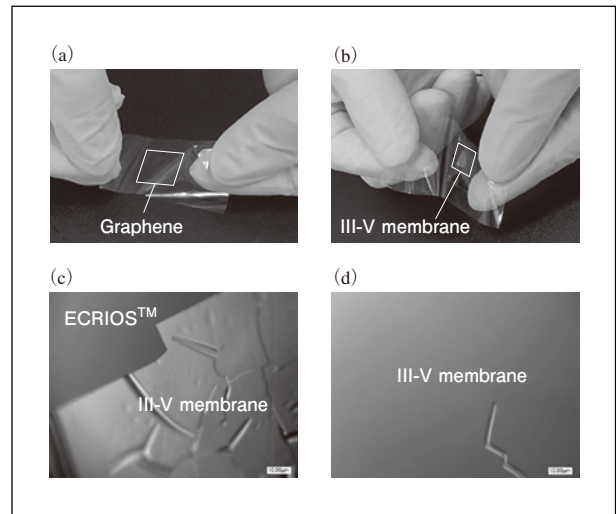


図3 (a) グラフェンを内包した有機薄膜フィルムの写真 (b) 半導体薄膜を内包した有機薄膜フィルムの写真 (c) 半導体薄膜の端部の光学顕微鏡画像 (d) 半導体薄膜の中央部の光学顕微鏡画像

とになり、任意のポリマー層において任意形状のグラフェンが必要となる（詳細は3節を参照のこと）。剥離用ポリイミド上に任意の多層ポリマーを塗布した上で上記手法を用いれば、有機薄膜光集積回路の所望の層にグラフェンを内包することができる。また、そのときに露光・アッシングプロセスを経ることで、グラフェンのパターンニングも可能である。

2.2 半導体薄膜による機能性発現

機能性発現のためのもう一つの手法として、半導体薄膜を用いることも有効である。特に InP 系半導体は、従来の光集積回路のメインプラットフォームであることから、前述のグラフェンに比べて各機能を発現するためのノウハウが豊富に揃っている（つまり、前述の特長 A を無条件で満たす）。一方の特長 B については、薄膜フィルム内に埋め込んだ半導体薄膜の膜厚と密接に関係している。たとえば InP 系化合物半導体では、格子緩和などを考慮した場合、1%（10000 ppm）程度の格子歪みしか許されない。これは例えば、薄膜フィルムに曲率半径 $100 \mu\text{m}$ の湾曲（マクロな視点では非常に急峻な曲げである）がかかった場合、半導体薄膜の膜厚が 200 nm 程度以下であれば損傷しないことを意味する。光回路内で機能性を得るといった目的においては、これは十分妥当な値

であるといえる。

我々のグループではこれまで、ベンゾシクロブテン (Benzocyclobutene: BCB) を用いて Si 基板上に InP 系半導体薄膜を形成する手法を提案し、それを用いた各種光素子の実現を行ってきた²⁵⁻²⁷⁾。本構造では、InP 系半導体薄膜の上下方向が低屈折率材料に埋め込まれることから、高屈折率差による強光閉じ込めが実現でき、素子の小型化及び低消費電力化が可能となる。本技術は、BCB に限らず様々なポリマーで代用できることから、有機薄膜光集積回路にもそのまま応用が可能である。

図3 (b) に、実際に InP 系半導体を内包した薄膜フィルムの写真を示す (白い点線で囲った領域に GaInAs 薄膜が内包されている)。フィルムの形成方法は以下のとおりである。まず、有機金属気相成長により InP 基板上に $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ を 250 nm を成長する。一方、支持基板 (InP など) 上に、剥離用ポリイミドである ECRIO[®] を塗布し、170°C の N_2 雰囲気中で前熱処理した後、両基板を貼り付ける。その後、後熱処理 (260°C の N_2 雰囲気) を介して、ECRIO[®] を完全に固化させた後、ウェットエッチングを用いて薄膜 GaInAs 層を形成する。最後に、支持基板からのフィルム剥離を行うことで完成となる。薄膜 GaInAs 層の中心部の光学顕微鏡画像からも、クラックフリーな半導体薄膜をフィルム上に実現できていることが分かる (図3 (c), (d) 参照)。

実際の有機薄膜光集積回路においては、任意のポリマー層において任意形状の半導体薄膜が必要となることは、グラフェンの場合と同様である。これについても、剥離用ポリイミド上に任意の多層ポリマーを塗布した上で上記手法を用いればよい。また併せて、そのときに露光・エッチングプロセスによる半導体薄膜のパターニングも可能である。

3 有機薄膜光集積回路におけるモノリシック集積手法

「モノリシック集積」とは、同時プロセスで、一基板上に全ての多機能素子を一括集積させることであり、光集積回路においては必須とされる技術である。従来型の光集積回路においては、単結晶の再成長や選択成長、OQW (Offset quantum well), QWI (Quantum well intermixing)

などの様々な技術を用いることで、異なる機能を同一基板上に実現している⁴⁾。しかし、有機薄膜材料にはそのような光集積技術のノウハウが存在せず、モノリシック集積に向けた画一的なプロセス手法を作り上げることが必要不可欠となる。

上記を踏まえて、本節では、有機薄膜光集積回路におけるモノリシック集積手法について言及する。本プロセスでは、剥離用のポリイミドを支持基板 (Glass, Si, InP など) に塗布したものを初期基板とし、その後、基板上に適当なポリマーを塗布しながら、各ポリマー層に対して素子作製プロセスを行っていく。

図4に、光伝送路・入出力カップラ・スイッチ・受光器・変調器の各機能を一括で作りに上げるプロセスフローの一例を示す。本プロセスでは、コア材料として PMMA、クラッド材料としてサイトップ (AGC 旭硝子) を用いて、下記 a から f のプロセスを経ることで、上記機能全てを一括で実現することを考える。各プロセスの詳細は各々以下のとおりである。

- a. バッファ層としてサイトップを塗布し、熱処理による硬化を行った後、変調器用の下部電極パッドをリフトオフにより作製する。その後、サイトップを塗布、硬化を行うことで、クラッド層 I を形成する。
- b. 基板表面に、受光器、変調器用の機能材料を貼り付けた上で、所望の形状にパターニングする (グラフェンの転写・パターニングプロセスについては、2.1 節を参照のこと。同様に、半導体薄膜の貼り付け・パターニングプロセスについては、2.2 節を参照のこと)。
- c. 受光器、変調器用の電極パッドおよび、入出力カップラ用の金属グレーティングをリフトオフで一括作製する。
- d. PMMA を表面に塗布し、露光プロセスにより、コア層となる領域を形成。その後、サイトップを塗布、硬化を行うことで、クラッド層 II を形成する。
- e. 光スイッチ用の上部電極パッドをリフトオフにより作製した後、サイトップを塗布、硬化を行うことで、クラッド層 III を形成する。
- f. ドライエッチングによりホールを形成した後、各

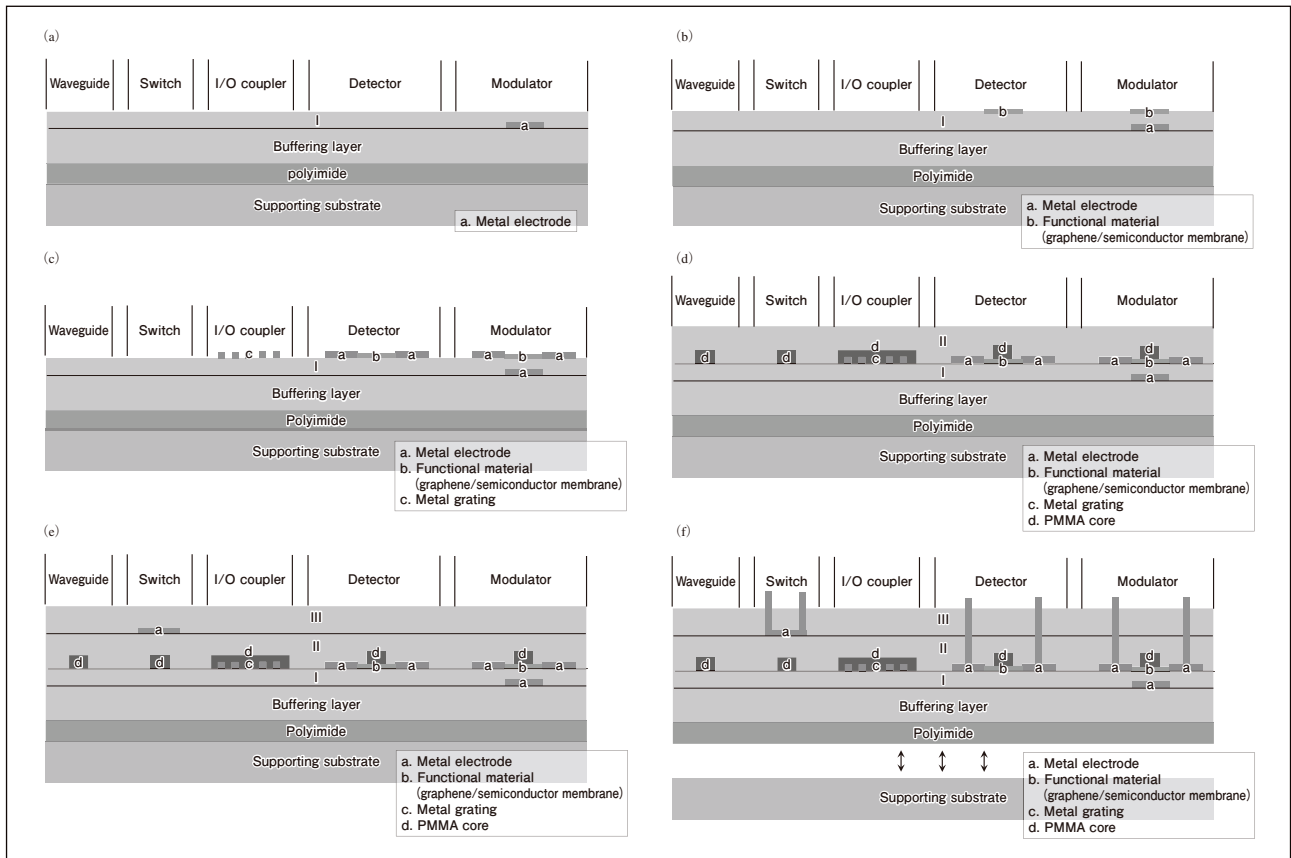


図4 有機薄膜光集積回路におけるモノリシック集積手法（入出力カプラのみ伝搬方向の断面図を表している）

電極パッドから貫通電極を作製し、最後に支持基板からの剥離を行うことで、有機薄膜光集積回路の完成となる。

上記はあくまでも一例であり、実際には、これを拡張する形で様々なプロセス手法が考えられる。特に、剥離用のポリイミドとして対象波長に対して透明なものを選択すれば、それをそのままクラッド層として利用することもできる（例えば、ECRIOS[®]は波長400 - 2000 nmの光に対して透明である）。その場合、より屈折率の高いSU-8（MicroChem）などをコア材料として用いることが望ましい。

4 有機薄膜光集積回路における各素子の理論解析

本節では、実際に3節のプロセスを経ることで得られる有機薄膜光集積回路の各素子について理論解析を行

い、その性能限界について言及する。なお、機能材料としてはグラフェンを選択し、入射光の波長および偏光は1550 nmのTEモードとする。計算された各素子の理論限界は、予め表1にまとめておくので、それも参照されたい。

4.1 伝送路

図5 (a) に、有機薄膜光集積回路における伝送路の断面図を示す。PMMAコア厚を1 μm 、サイトップ上下クラッド厚を2 μm に固定し、波長1550 nmの入射光に対して、有限要素法（Finite Element Method ; FEM）によりモード解析を行った結果を図5 (b) に示す。本結果を踏まえて、適当なシングルモード伝送を得るためには、導波路幅を2 μm に設定した。

次に、時間領域差分法（Finite-difference time-domain method ; FDTD method）を用いて、伝送路の曲げ損失を計算した。有機薄膜光回路では、通常の回路面内の曲げ

表1 機能材料としてグラフェンを用いたときの、有機薄膜光集積回路における各素子の理論性能限界

Device	Waveguide	I/O coupler	Switch	Photodetector	Modulator
Core material	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA
Clad material	Cytop	Cytop	Cytop	Cytop	Cytop
Functional material	-	-	-	Graphene	Graphene
Other features	-	Metal grating	Heat electrode	-	Gate electrode
Calculated characteristics for TE mode *	< 0.2 dB/bend (R > 100 μm)	7.5 dB @Λ = 1140 nm	Δn ~ 0.007 (< 3 μW)	100/cm @ 1550 nm (μ ~ 0 eV)	25 → 100 /cm (μ ~ 0.4 eV)
Calculated characteristics for TM mode †	< 0.2 dB/bend (R > 100 μm)	7.5 dB @Λ = 1100 nm	Δn ~ 0.007 (< 3 μW)	88/cm @ 1550 nm (μ ~ 0.505 eV)	175 → 275/cm (μ ~ 0.505 eV)

* These values for TE mode are discussed in this paper.
† These values for TM mode are not mentioned in this paper.

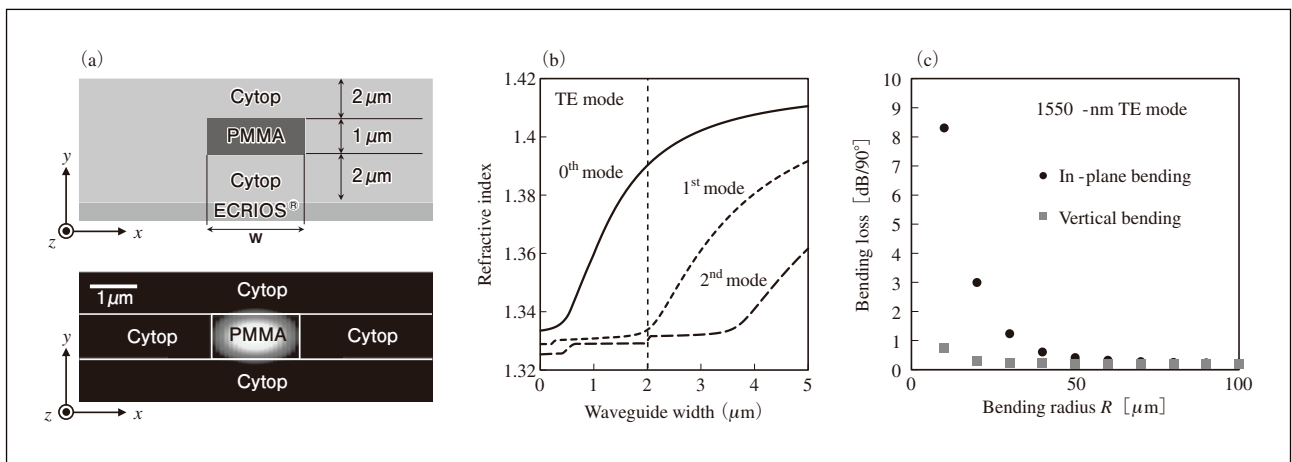


図5 伝送路の解析結果 (a) 素子の断面構造と典型的なモード分布 (b) FEMによるモード解析によって求められた有効屈折率の導波路幅依存性 (c) FDTDによる各方向の曲げ損失 (90°の曲げ一つあたりの伝搬損失)

損失に加えて、フィルム曲げに伴う面直方向の曲げ損失も考慮する必要がある。図5 (c) に各曲げ方向に対する伝搬損失の解析結果を示す。これにより、曲率半径 100 μm 以上であれば、0.2 dB 以下で伝送可能であることが見て取れた。また、本回路において、コアの垂直方向は空気挟まれており、高屈折率差が実現されている。そのため、面直方向は極めて強い曲げ耐性を有する。

4.2 入出力カップラ

有機薄膜光回路では、通常の光回路で用いられるような導波路端面からの入出力は困難となる。そのため、垂直方向からグレーティングカップラを用いるアプローチが有効となる。しかしながら、有機材料系では、シリコンフォトニクス (Si/SiO₂) のような系と異なり、グレーティングカップラに必要な高屈折率差 (高い結合係数 κ) をもつ材料分布を得ることが極めて難しい。そのため、本

研究では金属グレーティングカップラ²⁸⁾を用いることで、その問題をクリアする。

図6 (a) に、有機薄膜光集積回路における入出力カップラの構造を示す。金属グレーティングはPMMAコアの直下に埋め込まれており、そこからテーパを介して伝送路に繋ぐことで、適当なシングルモード伝送を得られるようにしている。まず初めに、FDTDによる解析により、金属グレーティングにおける結合効率の見積もり、およびモード解析を行った。計算したグレーティングカップラ (Ti 10 nm/Au 30 nm) の結合効率の波長依存性を図6 (b) に示す。ここで、グレーティングピッチ Λ をパラメータとし、入射光の角度は 94°, duty 比は 50% で固定した。このとき、Λ = 1120 nm の金属グレーティングにおいて最大の結合効率を得られ、対象波長の近傍では、およそ -7.5 dB の結合効率となることを確認した。

4.3 スイッチ (温度センサー)

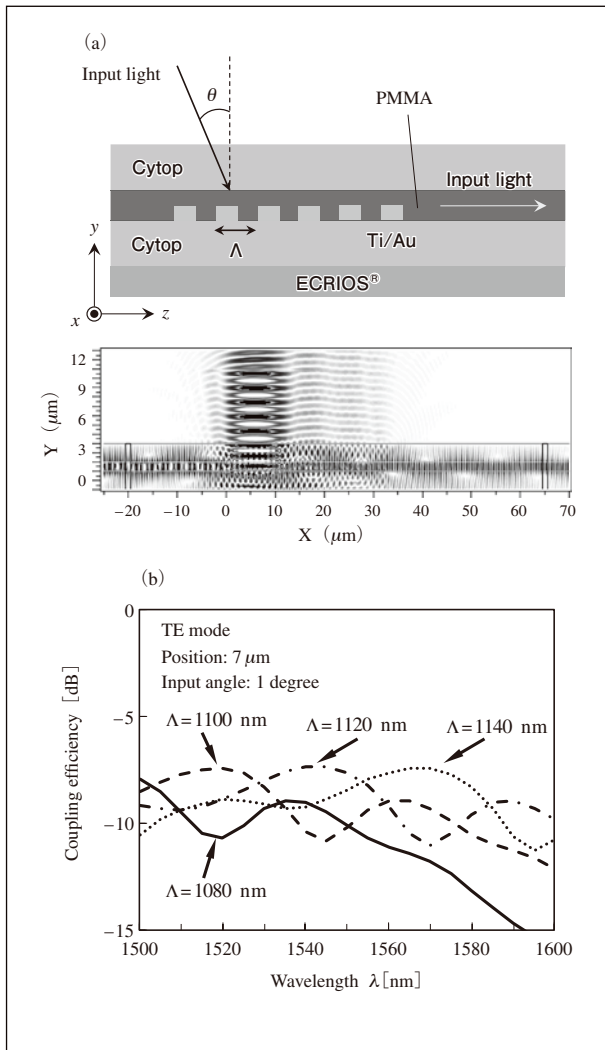


図6 入出力カプラの解析結果 (a) 素子の断面構造と典型的なモード分布 (b) グレーティングピッチをパラメータとしてFDTDにより計算された、結合損失の波長依存性

有機薄膜光回路内での経路切り替えを行うスイッチについては、機能性材料を用いることなく、ポリマーの熱光学効果を利用するのみで構成可能である。スイッチの構成要素は図7 (a) に示すとおりであり、伝送路の上部に、Tiヒータや電極パッド、その間の配線を形成する。

有機薄膜光回路は、周囲を空気に囲まれていることから熱の逃げ場がなく、低電力で極めて大きな温度変化を得ることが可能となる。FEMにより、ヒータを通電したときの温度分布を解析した後、それを用いて伝送路の屈折率変化 (波長 1550 nm) を計算した結果を図7 (b) に

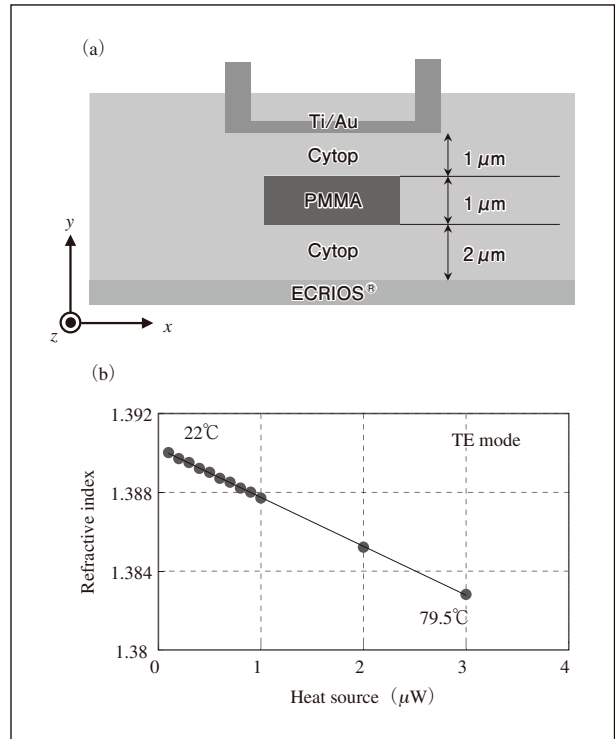


図7 光スイッチの解析結果 (a) 素子の断面構造 (b) FEMにより計算された伝送路の屈折率変化

示す。ヒータを通電し加熱することで、周囲の温度上昇に応じてポリマーの屈折率が低下しており、およそ3 μW の消費電力で0.007程度の屈折率変化が得られることが見て取れた。これを用いてマッハツェンダー導波路やリング共振器内の位相をコントロールすることでスイッチングを行うことが可能となるのは、通常の熱光学スイッチと同じである。

また、「周囲を空気に囲まれていることから熱の逃げ場がない」という特性を生かして、温度センサーの集積も可能である。例えば、有機薄膜光集積回路内にリング共振器をアレイ状に配置し、それらの一部分が熱源に触れたときの位相差を読み取るというような構成が考えられる。

4.4 受光器

受光器の性能を決める要因は、素子を構成する材料の光吸収効率、光吸収により生成されたフォトキャリアの移動時間、などが挙げられる。これらを鑑みて、本研究

では、受光器の光吸収層として2次元系材料であるグラフェンを用いる。本研究で用いる受光器の構造を図8 (a) に示す。コア層の直下にグラフェンが配置されており、そこで生成したフォトキャリアを左右の電極から横方向に引き抜く構造とする。

解析によって得られたグラフェンの光学定数 (図2参照) を用いて、本構造に対してFEMによる2次元モード解析を行った。図8 (b) に、受光器の有効屈折率と吸収係数のグラフェンの化学ポテンシャル依存性を示す (入射波長は1550 nm)。2節でも述べたように、グラフェンの光学特性は、化学ポテンシャルの位置を制御することによって様々に変化する。ここでは、グラフェンを受光器の吸収層として利用する目的から、化学ポテンシャルは0 eV近傍を用いることとする。このとき、素子の吸収係数は100/cm程度になることが見て取れた。これは、素子長230 μm で90%以上の光吸収を得ることができることを意味しており、有機薄膜光集積回路用途として十分妥当なものであると言える。

併せて、グラフェンの化学ポテンシャルを0 eV近傍と仮定して、受光器の波長依存性を計算した結果を図8 (c) に示す。波長帯域1300 – 1700 nmの範囲において、吸収係数は80 – 120/cmとなり、大きな変化がないことが見て取れる。

4.5 変調器

変調器についてもグラフェンを用いることで機能性を実現する。変調器の概要は図9 (a) に示すとおりである。受光器の構造と酷似しているが、グラフェンの下部にサイトップクラッド層を介して金属電極が配置されているのが相違点である。本電極から電圧印加を行うことで、グラフェンの化学ポテンシャルの位置を制御し、バンド間吸収に起因する誘電体的特性からバンド内吸収に起因する金属的特性へと変化させることが可能になる。サイトップは耐圧性に優れた有機材料 (1 – 3 MV/cm) であり、変調器においては、光伝送路のクラッド層としての効果に加えて有効な絶縁膜としての役割も担う。

FEMによる2次元モード解析により得られた、変調器の有効屈折率と吸収係数のグラフェンの化学ポテンシャル依存性を図9 (b) に示す (入射波長は1550 nm)。これにより、グラフェンを吸収変調層として利用する目的から、化学ポテンシャルは0.4 eV近傍で制御することが有効であることが見て取れる。このとき、素子の吸収係数は100/cmから25/cmに変化することから、これによって強度変調を行うことができる (素子長を230 μm とした場合、-10 dBから-2.5 dBの強度変化に相当)。

併せて、グラフェンの化学ポテンシャルを0.385 eVから0.405 eVで変化させると仮定して、変調器の波長依存

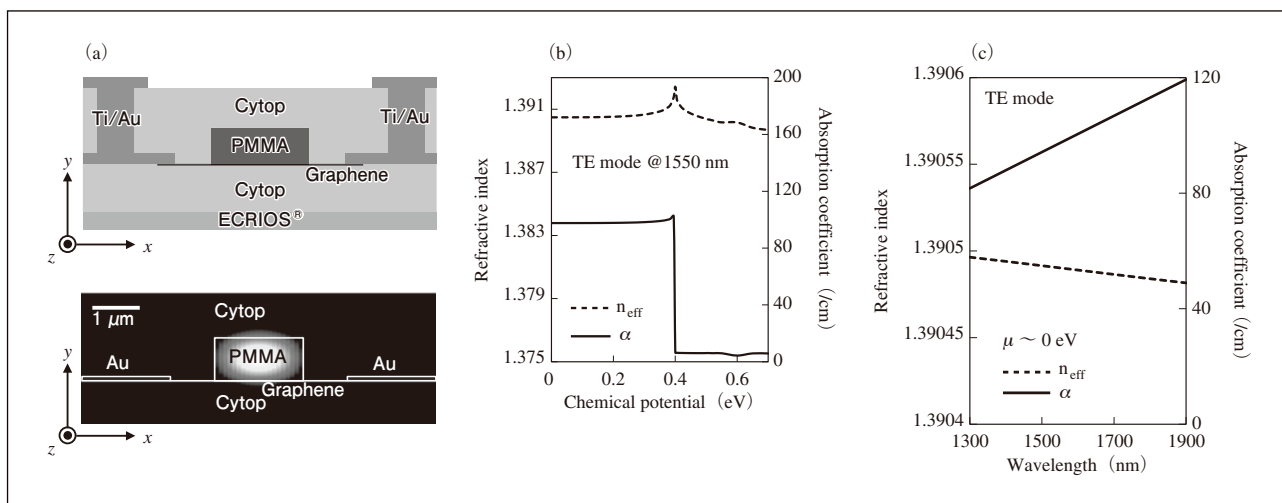


図8 受光器の解析結果 (a) 素子の断面構造と典型的なモード分布 (b) FEMにより計算された、受光器の有効屈折率と吸収係数のグラフェンの化学ポテンシャル依存性 (入射波長は1550 nm) (c) 受光器の有効屈折率と吸収係数の波長依存性 (グラフェンの化学ポテンシャルは0 eV近傍)

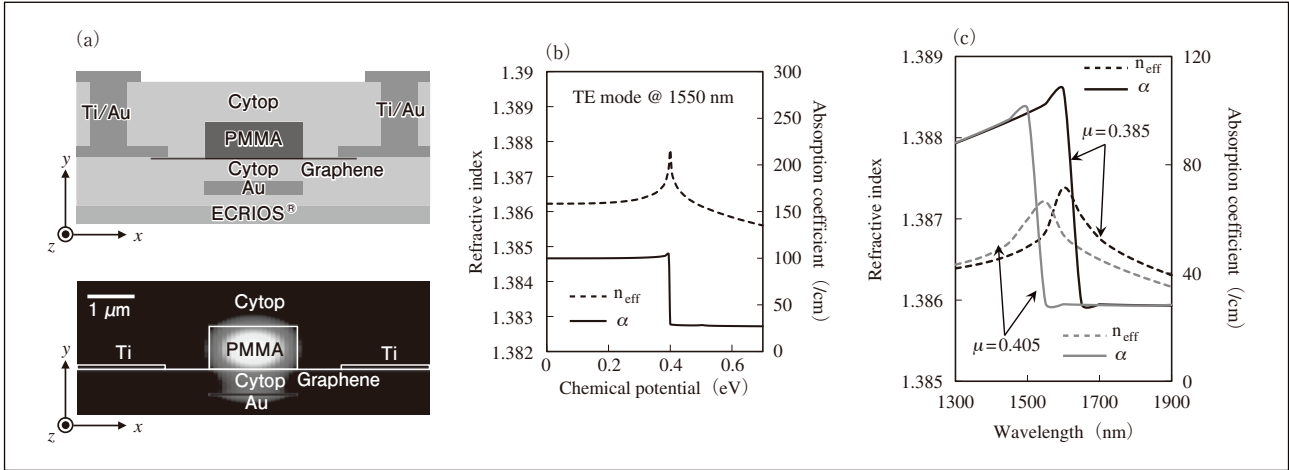


図9 変調器の解析結果 (a) 素子の断面構造とモード分布 (b) FEMにより計算された、変調器の有効屈折率と吸収係数のグラフェンの化学ポテンシャル依存性 (入射波長は1550 nm) (c) 変調器の有効屈折率と吸収係数の波長依存性 (グラフェンの化学ポテンシャルを0.385 eVから0.405 eVに変化させたと仮定)

性を計算した結果を図9 (c) に示す。波長1550 – 1600 nmの範囲において、大きな吸収係数の変化が見て取れる。

5 有機薄膜光集積回路における伝送路と入出力カプラの作製および評価

本節では、有機薄膜回路において最も基本的な構成要素である、光伝送路と入出力カプラをモノリシック集積した素子について、実際に作製および評価を行う。

図10 (a) に作製した素子概要を示す。本素子において、コア材料とクラッド材料は各々PMMAとサイトップを用いており、伝送路と入出力カプラの構造パラメータについては、それぞれ4.1節および4.2節の解析結果にもとづいて決定した。作製プロセスについては以下のとおりである (3節で述べたプロセスフローをベースとしているので、併せて参照のこと)。まず、InP基板上に剥離用ポリイミドとしてECRIOS® (~3 μm) を形成し、その上にサイトップ (~3 μm) を塗布、熱処理による硬化を行った。次に、電子ビーム露光およびリフトオフを用いて、入出力カプラ用の金属グレーティングを作製した。その後、基板表面にPMMA (~1 μm) を塗布し、電子ビーム露光により導波路構造を形成した後、上部クラッド用のサイトップを塗布・硬化することで素子を作製した。支持基板からのフィルム剥離については、InP基板を裏面から劈開することで行った。

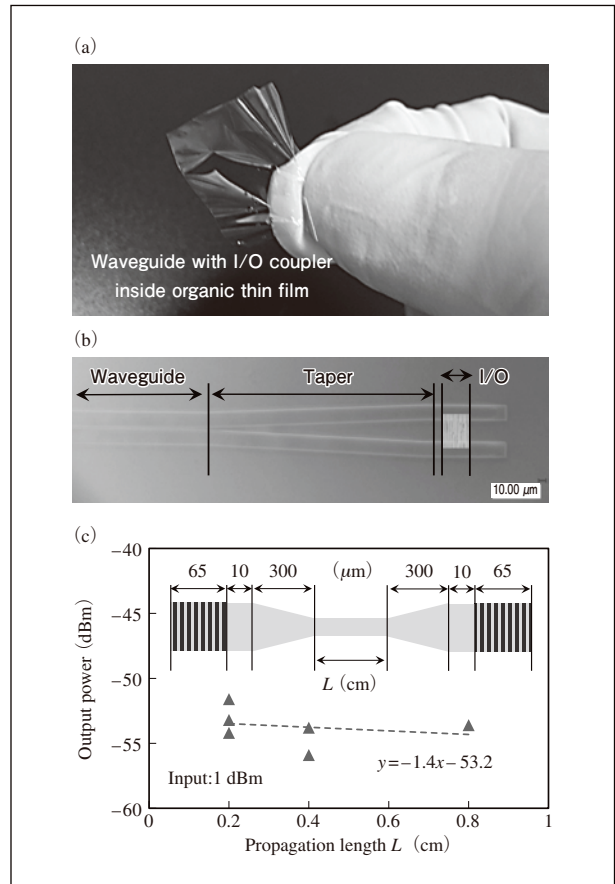


図10 (a) 試作した素子の外観 (b) 光伝送路と入出力カプラで構成された素子の光学顕微鏡画像 (c) 伝送路の長さを変化させたときの素子の伝搬特性

図10 (b) に作製した素子の光学顕微鏡画像を示す。厚さ10 μm 程度の有機薄膜フィルム内に、光集積回路の基本構成である伝送路と入出力カップラが一括集積されている。図10 (b) の素子を用いて、波長1550 nmの入射光に対する伝搬特性を評価した結果を図10 (c) に示す。本素子では、伝送路の長さを2 mmから8 mmまで変化させており、それらの伝搬特性を比較することで、伝送路自体の伝搬損失と入出力カップラ（金属グレーティングとテーパ）の結合損失を見積もった。図10 (c) の近似直線の傾きおよび切片から、伝送路の伝搬損失は1.4 dB/cm、入出力カップラの結合損失は約27 dB/couplerと見積もられた。入出力カップラの結合損失については、現時点では非常に大きいですが、グレーティング構造および作製プロセスの最適化を行うことで、理論値の7.5 dB/couplerまで近づけることが出来ると考えている。

6 まとめ

本稿で提案している有機薄膜光集積回路の特長は、「フレキシブルである（膜厚数10 μm ）」という一点に尽きる。これは単純なようでいて、光集積回路の活躍の場を広げることにより大きく寄与し、従来の用途である光通信はもちろんのこと、医療・ヘルスケア・環境・センシングなど、様々な分野への応用が期待される。

有機薄膜光集積回路は、従来の光集積回路の延長上にあるものの、技術面においては一線を画している。そのため本稿では、機能化・集積化の技術（2, 3節）、各素子の理論限界（4節）、基本素子の作製および評価（5節）などをとおして、その技術を通観してきたが、著者らの意図を多少なりともお伝えできたとすれば幸いである。本稿で紹介した素子については実用化レベルにはまだ程遠いが、より汎用性のある作製プロセスなどをとおして、十分な性能が得られるようになる日が来ることを期待したい。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST）「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス

基盤技術」およびJSPS科研費（#15H05763, #16H06082, #16K18087, #15J04654）の援助により行われた。

参考文献

- 1) S. E. Miller, "Integrated Optics: An Introduction", Bell Labs Technical Journal **48**, 2059 (1969).
- 2) E. A. J. Marcatili, "Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics", Bell Labs Technical Journal **48**, 2071 (1969).
- 3) 末松安晴, "光集積回路", 電気四学会連合大会講演論文集 1223, 430 (1971).
- 4) L. A. Coldren, "High performance InP-based photonic ICs—A tutorial", IEEE J. Lightwave Technol. **29**, 554 (2011).
- 5) R. Nagarajan, M. Kato, D. Lambert, P. Evans, S. Corzine, V. Lal, J. Rahn, A. Nilsson, M. Fisher, M. Kuntz, J. Pleumeekers, A. Dentai, H.-S. Tsai, D. Krause, H. Sun, K.-T. Wu, M. Ziari, T. Butrie, M. Reffle, M. Mitchell, F. Kish and D. Welch, "Terabit/s class InP photonic integrated circuits", Semicond. Sci. Technol. **27**, 094003 (2012).
- 6) J. K. Doylend, A. P. Knights, "The evolution of silicon photonics as an enabling technology for optical interconnection," Laser Photon. Rev. **6**, 504 (2012).
- 7) P. P. Absil, P. Verheyen, P. De Heyn, M. Pantouvaki, G. Lepage, J. De Coster, J. Van Campenhout, "Silicon photonics integrated circuits: a manufacturing platform for high density, low power optical I/Os," Optics Express **23**, 9369 (2015).
- 8) M. J. R. Heck, H.-W. Chen, A. W. Fang, B. R. Koch, D. Liang, H. Park, M. Sysak, J. E. Bowers, "Hybrid silicon photonics for optical Interconnects," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **17**, 333 (2011).
- 9) Z. Zhou, B. Yin, J. Michel, "On-chip light sources for silicon photonics," Light: Science & Applications **4**, e358 (2015).
- 10) D.-H. Kim, J.-H. Ahn, W. M. Choi, H.-S. Kim, T.-H. Kim, J. Song, Y. Y. Huang, Z. Liu, C. Lu, J. A. Rogers, "Stretchable and Foldable Silicon Integrated Circuits," Science **320**, 507 (2008).
- 11) J. Lee, J. Wu, M. Shi, J. Yoon, S. Park, M. Li, Z. Liu, Y. Huang, J. A. Rogers, "Stretchable GaAs Photovoltaics with Designs That Enable High Areal Coverage," Adv. Mater. **23**, 986 (2011).
- 12) M. Kaltenbrunner, T. Sekitani, J. Reeder, T. Yokota, K. Kuribara, T. Tokuhara, M. Drack, R. Schwödiauer, I. Graz, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, T. Someya, "An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics," Nature **499**, 458 (2013).
- 13) R. T. Chen, "Polymer-based photonic integrated circuits," Optics & Laser Technology **25**, 347 (1993).
- 14) L. Eldada, L. W. Shacklette, "Advances in polymer integrated optics," IEEE J. Quantum Electron. **6**, 54 (2000).
- 15) Z. Zhang, D. Felipe, V. Katopodis, P. Groumas, C. Kouloumentas, H. Avramopoulos, J.-Y. Dupuy, A. Konczykowska, A. Dede, A. Beretta, A. Vannucci, G. Cangini, R. Dinu, D. Schmidt, M. Moehrl, P. Runge, J.-H. Choi, H.-G. Bach, N. Grote, N. Keil, M. Schell, "Hybrid Photonic Integration on a Polymer Platform," Photonics **2**, 1005 (2015).
- 16) L. Li, H. Lin, S. Qiao, Y. Zou, S. Danto, K. Richardson, J. D. Musgraves, N. Lu, J. Hu, "Integrated flexible chalcogenide glass photonic devices," Nature Photon. **8**, 643 (2014).
- 17) T. Amemiya, T. Kanazawa, S. Arai, "Organic Membrane Photonic

Integrated Circuits,” PCT application No. PCT/JP2017/1076.

18) R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomaru, S. Imamura, “Low-loss polymeric optical waveguides fabricated with deuterated polyfluoromethacrylate,” *J. Lightwave Technol.* **16**, 1030 (1998).

19) T. Watanabe, N. Ooba, S. Hayashida, T. Kurihara, S. Imamura, “Polymeric optical waveguide circuits formed using silicone resin,” *J. Lightwave Technol.* **16**, 1049 (1998).

20) Q. Bao, K. P. Loh, “Graphene Photonics, Plasmonics, and Broadband Optoelectronic Devices,” *ACS Nano* **6**, 3677 (2012).

21) F. Xia, H. Wang, D. Xiao, M. Dubey, A. Ramasubramaniam, “Two-dimensional material nanophotonics,” *Nature Photon.* **8**, 899 (2014).

22) T. Kanazawa, T. Amemiya, A. Ishikawa, V. Upadhyaya, K. Tsuruta, T. Tanaka, Y. Miyamoto, “Few-layer HfS₂ Transistor,” *Sci. Rep.* **6**, 22277 (2016).

23) M. Chhowalla, D. Jena, H. Zhang, “Two-dimensional semiconductors for transistors,” *Nature Reviews Materials* **1**, 16052 (2016).

24) K. Fukukawa, M. Okazaki, Y. Sakata, T. Urakami, A. Okubo, “Transparent Polyimide and Precursor Thereof,” PCT application No. PCT/JP2014/062474.

25) T. Okamoto, N. Nunoya, Y. Onodera, S. Tamura, S. Arai, “Continuous wave operation of optically pumped membrane DFB laser,” *Electron. Lett.* **37**, 1455 (2001).

26) S. Arai, N. Nishiyama, T. Maruyama, T. Okumura, “GaInAsP/InP membrane lasers for optical interconnects,” *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **17**, 1381 (2011).

27) D. Inoue, J. Lee, T. Hiratani, Y. Atsuji, T. Amemiya, N. Nishiyama, S. Arai, “Sub-milliamper threshold operation of butt-jointed built-in membrane DFB laser bonded on Si substrate,” *Opt. Express* **23**, 7771 (2015).

28) V. Dolores-Calzadilla, D. Heiss, M. Smit, “Highly efficient metal grating coupler for membrane-based integrated photonics,” *Optics Lett.* **39**, 2786 (2014).

■ Organic membrane photonic integrated circuits (OMPICs)

- ①Tomohiro Amemiya ②Toru Kanazawa ③Takuo Hiratani
④Shigehisa Arai ⑤Tatsuhiko Urakami
- ①④ Institute of Innovative Research (IIR), Tokyo Institute of Technology ②③④ Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Institute of Technology ⑤ Functional Materials Laboratory, Mitsui Chemicals, Inc.

①アメリヤ トモヒロ

所属：東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所

②カナザワ トオル

所属：東京工業大学 工学院 電気電子系

③ヒラタニ タクオ

所属：東京工業大学 工学院 電気電子系

④アライ シゲヒサ

所属：東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 / 工学院 電気電子系

⑤ウラカミ タツヒロ

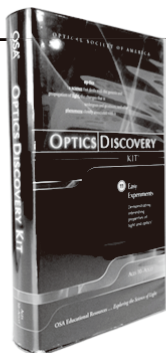
所属：三井化学(株) 機能材料研究所

このコーナーの研究は技術移転を目指すものが中心で、実用化に向けた共同研究パートナーを求めています。掲載した研究に興味があり、執筆者とコンタクトを希望される方は編集部までご連絡ください。

また、このコーナーへの掲載を希望する研究をお持ちの若手研究者^{注)}も随時募集しております。こちらまでご連絡をお待ちしております。

月刊OPTRONICS編集部メールアドレス：editor@optronics.co.jp

注) 若手研究者とは概ね40歳くらいまでを想定していますが、まずはお問い合わせください。



OPTICS DISCOVERY KIT

11 Easy Experiments

光学教育用実験キット
光学に関する基礎的な実験を行えます。
販売元：Optical Society of America

★光のオンライン書店で販売中！

3,240 円(税込)