

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05356

研究課題名（和文）赤外領域光重合性樹脂の創成と光通信デバイス適用の研究

研究課題名（英文）Research on photopolymerizable resin for infrared region and application of optical communication device

研究代表者

杉原 興浩 (Sugihara, Okihiro)

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：30222053

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：アミン系光重合開始剤を付加した4成分系（モノマー、色素、ボレート系開始剤、アミン系開始剤）とすることにより、赤外光重合しきい値を3桁低減できた。また、本しきい値低減のメカニズムを解明し、アミン系材料を付加したことによる酸素重合阻害が低減されたことが主要因であることが明らかとなった。開発した樹脂組成物を用いて、光通信波長でのLISW光導波路の成長を観測し、重合しきい値は10  $\mu$ W以下と高感度であった。1.31  $\mu$ mおよび1.55  $\mu$ mのVCSEL光源の出射光から、直接LISW光導波路成長を実現した。また、VCSEL光源とSMF自動接続が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

赤外光通信波長帯において、mW以下の連続光で重合する光硬化性樹脂組成物を開発し、赤外光源からの出射光で初めて自己形成光導波路を成長させたこと、また光源とシングルモード光ファイバー間の自動光接続を実施した。これらの成果は、赤外光硬化性樹脂という新たな光材料研究開発の分野を開拓したため、学術的に価値がある。また、赤外光硬化性樹脂を用いて自己形成光導波路および光接続を実現したことにより、光通信部品間の自動接続という新たな社会的価値を見出したことや、シリコンの透明波長で光硬化が実現できるため、シリコンフォトニクスで課題になっている光接続に新たな展開を切り拓いたものである。

研究成果の概要（英文）：The light-induced self-written (LISW) waveguide technique is a promising candidate for the demonstration of a passive alignment between telecommunication and silicon photonics devices. In this study, LISW waveguide fabrication at telecommunication wavelengths are demonstrated by using near-infrared photopolymerizing resin. The LISW waveguide fabrication threshold values are on the order of micro watt. LISW waveguides are fabricated from a single-mode fiber and a vertical-cavity surface-emitting laser. By using this technique, fiber-to-laser self-coupling are demonstrated. The results demonstrate the potential of the LISW technique for optical self-coupling of telecommunication and silicon photonics devices.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：赤外光硬化 樹脂組成物 光通信デバイス 光接続 自己形成光導波路 赤外光接続 シリコンフォトニクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光重合硬化は、これまで光子エネルギーの大きさや樹脂の重合感度(しきい値)の問題から、赤外光照射(特に光通信帯波長 1.31  $\mu\text{m}$  や 1.55  $\mu\text{m}$ )で光重合を行った事例はほとんどなく、樹脂研究の観点や光通信部品接続適用の観点から学術的な課題となっていた。

### 2. 研究の目的

最近申請者らは波長 1.07  $\mu\text{m}$  の連続光で従来より3桁重合しきい値を低減できる樹脂組成物を見出した。そこで、本研究では、赤外領域での光重合性樹脂研究開発と光通信部品接続への適用を目的として、

(1)赤外光重合性樹脂の重合メカニズム解明と低しきい値組成物の創成

(2)光通信帯波長での光源と光ファイバ間の自己形成(LISW)接続(光ハンダ)への適用を実現する。本樹脂および赤外自己形成光接続技術が確立できれば、シリコンフォトリソグラフィにおける細線導波路の自動接続にも展開できる。

### 3. 研究の方法

以下の3点を主要な検討項目として研究を遂行する。

#### (1) 赤外光重合性樹脂の探索と最適化

現在赤外光重合を実現している材料組成物は、以下の通りである。当初3成分系(モノマー、色素、ポレート系開始剤)を用いて波長 1.07  $\mu\text{m}$  での光重合を実施していたが、最近アミン系光重合開始剤を付加した4成分系とすることにより、光重合しきい値を3桁低減できた。本しきい値低減のメカニズムとして、現在のところ以下の2点を考えている。

・アミン系材料を付加したことによる酸素重合阻害が低減された

・複合開始剤を用いることによる、ドナー・アクセプタ効果により、色素を介した循環的な分子間電子移動経路が確立された

上記のメカニズムを確認するために、本研究では、複合材料系を調査し、メカニズム解明を行う。

#### (2) 赤外 LISW 光導波路実現

(1)で開発した組成物を用いて、1.31~1.55  $\mu\text{m}$  の光通信波長での LISW 光導波路作製を試みる。所有している 1.31 および 1.55  $\mu\text{m}$  の連続波(CW)ファイバ光源を用いて、LISW 光導波路の成長を観測する。また成長しきい値や成長条件の最適化を行い、樹脂組成物開発にフィードバックする。

#### (3) 半導体レーザー光源と光ファイバとの光ハンダ接続

赤外半導体レーザーからの出射光(mW以下)で LISW 光導波路を実現するとともに、半導体レーザーとシングルモード光ファイバ(コア系 10  $\mu\text{m}$  以下)との光ハンダ接続を実現する。

### 4. 研究成果

上記(1)~(3)の3項目を実施した。

(1) 赤外光重合性樹脂の探索と最適化: アミン系光重合開始剤を付加した4成分系(モノマー、色素、ポレート系開始剤、アミン系開始剤)とすることにより、光重合しきい値を3桁低減できた。また、本しきい値低減のメカニズムを解明し、アミン系材料を付加したことによる酸素重合阻害が低減されたことが主要因であることが明らかとなった。本成分系の組成を変化させることにより、重合しきい値の低減を行なった。

(2) 赤外 LISW 光導波路実験: 開発した樹脂組成物を用いて、波長 1.07、1.31 および 1.55  $\mu\text{m}$  の光通信波長での自己形成光導波路作製を試みた。1.07、1.31、1.55  $\mu\text{m}$  の CW ファイバー光源を用いて、いずれもシングルモード光ファイバー(SMF)端からの LISW 光導波路の成長を観測し(図1)、1.07、1.31、1.55  $\mu\text{m}$  での重合しきい値は、それぞれ 1  $\mu\text{W}$  以下、5  $\mu\text{W}$ 、10  $\mu\text{W}$  と高感度な赤外光硬化性樹脂が得られ、赤外光通信波長での LISW 光導波路を初めて実現した。

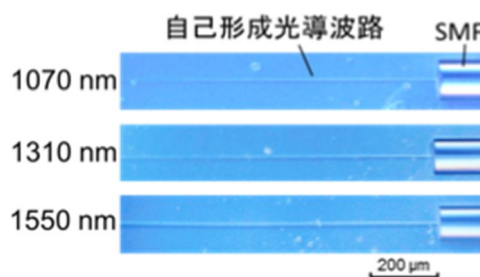


図1 赤外光によるシングルモード光ファイバーから成長した LISW 光導波路

(3) 半導体レーザー光源からのアライメントフリー光ピン作製:上記の結果を踏まえて、 $1.31\ \mu\text{m}$ および $1.55\ \mu\text{m}$ のVCSEL光源の出射光から、直接LISW光導波路成長を実現した(図2)。光源からの出射光で光ピンが成長しているのので、光源と光ピンの光軸は自動的にアライメントされている。また、VCSEL光源とSMF自動接続が得られた(図3)。VCSEL光源からの出射光のうちSMFに結合した成分は、SMF出射端面に設置したミラーによって反射されるため、樹脂中で双方向照射となる。そのため、LISW自動光接続が実現した。

以上のごとく、本成果について、(1)、(2)、(3)ともには当初計画を実現した。

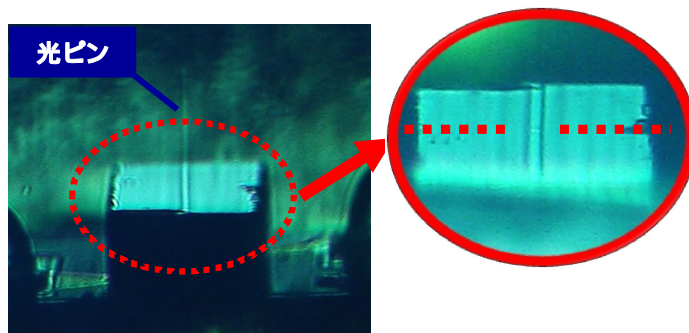


図2 VCSEL光源からの出射光で成長したアライメントフリー光ピン

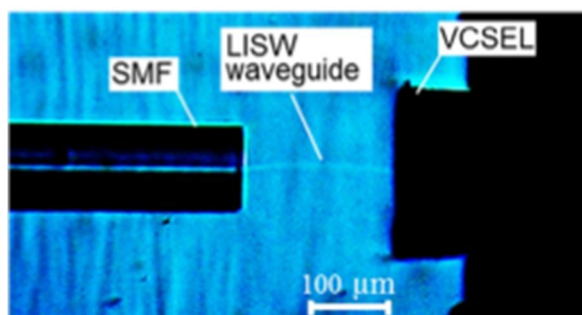


図3 VCSELと光ファイバ間のLISW自動光接続

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Terasawa Hidetaka, Sugihara Okihiro	4. 巻 39
2. 論文標題 Near-Infrared Self-Written Optical Waveguides for Fiber-to-Chip Self-Coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 7472-7478
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2021.3115237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 寺澤英孝、杉原興浩
2. 発表標題 赤外光励起自己形成光導波路の作製とシリコンフォトニクスへの応用
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Okihiro Sugihara and Hidetaka Terasawa
2. 発表標題 Ultralow threshold near-infrared photopolymerization for light-induced self-written optical waveguides
3. 学会等名 The 29th International Conference on Plastic Optical Fibers（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Okihiro Sugihara, Hidetaka Terasawa, Keisuke Kondo, and Hidehiko Yoda,
2. 発表標題 Chip-to-fiber self-coupling based on near-infrared self-written waveguide effect
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺澤英孝、杉原興浩
2. 発表標題 近赤外光励起自己形成光導波路の作製とシリコンフォトニクスへの応用
3. 学会等名 第36回エレクトロニクス実装学会春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺澤英孝、杉原興浩
2. 発表標題 マイクロワット出力近赤外連続波光源による自己形成光導波路の作製
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hidetaka Terasawa and Okihiro Sugihara
2. 発表標題 Near infrared light induced photopolymerizable resins and optical waveguide device applications
3. 学会等名 International Workshop on Optics, Biology, and Related Technologies 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺澤英孝、杉原興浩
2. 発表標題 高感度赤外光重合材料と自己形成光導波路の作製
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	寺澤 英孝  (Terasawa Hidetaka)	宇都宮大学・工学部・研究員  (12201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------