

令和 4 年 10 月 28 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02145

研究課題名(和文) 情報通信資源としての深紫外帯の再探索

研究課題名(英文) LED-based optical wireless communications in the solar-blind band

研究代表者

淡路 祥成 (Yoshinari, Awaji)

国立研究開発法人情報通信研究機構・ユニバーサルコミュニケーション研究所・研究統括

研究者番号：50358876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：波長280nm以下の深紫外波長帯は、地表において陽光の影響を受けない所謂ソーラーブラインド帯であり、日中屋外においても高速光無線通信を実現可能であると期待される。しかし、高速変調可能な光源の不足から、先行研究における伝送速度は数Mbps程度であり、5G以降の要件を満たしていなかった。本研究では、殺菌用途などで発展著しいAlGaIn系深紫外LEDを用い、日中屋外にてGbps級伝送を達成するとともに、高速変調を可能とするAlGaIn LED特有の発光メカニズムを解明した。さらに、広視野角と高速伝送を両立するソーラーブラインド帯波長多重伝送システムを提案し、Gbps級伝送実験に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

5G以降の無線アクセス網では、より広帯域なミリ波・テラヘルツ帯、そして"光"の活用が重要となる。光無線通信としては、LEDを用いた可視光通信(VLC)が知られるが、可視帯は陽光の影響が大きく、日中屋外での使用が制限される。本研究では、殺菌用途などで発展著しいAlGaIn系深紫外帯LEDを用い、陽光の影響を受けない深紫外帯で通信することで、VLCのコンセプトを陽光下でも実現可能であることを実証した。また、AlGaIn LEDが高速変調に好適な発光メカニズムを持ち、ギガビット級伝送が可能であることも明らかにした。以上により、深紫外帯の5G以降の新たな情報通信資源としての活用に端緒を得た。

研究成果の概要(英文)：Light in the deep ultraviolet (DUV) wavelength regime, with wavelengths below 280 nm, is known as the solar blind band, which is not affected by sunlight on the earth's surface. The solar-blind band is expected to allow high-speed optical wireless communications (OWC) even outdoors during the daytime. However, due to the lack of viable light sources, the achievable data rate in previous studies on DUV-OWC was only a few Mbps and did not meet the requirements for 5G and beyond.

In this work, we have investigated a high-speed OWC system using AlGaIn-based DUV LEDs, which have recently been developed for sterilization, measurement, and resin carving. We achieved >1 Gbps transmission outdoors under direct sunlight and revealed the unique emission mechanism of AlGaIn LEDs that enables high-speed modulation. Furthermore, a Gbps-class wide-field-of-view solar-blind wavelength division multiplexing transmission was demonstrated experimentally.

研究分野：光通信

キーワード：光無線通信 深紫外LED 光センシング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

波長 280nm 以下の深紫外帯は、地表において陽光の影響がほとんどなく、また短波長故に強い散乱の影響を受けることから、日中屋外での光無線通信（ソーラーブラインド通信）や光見通し外通信（NLoS 通信）が可能であるなど、情報通信資源として稀有な性質を持ち、その活用が 50 年以上前から検討されてきた。しかしながら、高速変調可能な深紫外帯光源の不足などから、伝送速度は数 Mbps 程度に留まっており、5G 以降の帯域要求を満たすものではなかった。一方、光無線通信としては、照明向け LED の高速変調性を用いた可視光通信（VLC）が知られ、5G 以降の無線周波数資源ひっ迫への方策として期待されている。しかしながら、可視帯は陽光の影響を強く受けることから、屋外での使用が制限されるなどの問題があった。

そこで我々は、先行研究において、殺菌用途などで近年発展著しい AlGaIn 系深紫外 LED の高速変調性を用いた、Gbps 級のソーラーブラインド通信を提案し、2Gbps の伝送実験に成功した[1]。この成果は、VLC の問題点を解決し、また紫外帯の情報通信資源として価値を再評価するものではあるが、実証実験は屋内に限られ、また送受信系の視野角が十分でないなど課題も多い。さらに、実証実験において使用した AlGaIn LED が、VLC で用いられる典型的な InGaIn LED と比較して、面積比で 1 桁以上の高速な応答を持つことがわかったが、その原理は十分には解明されていない。

2. 研究の目的

深紫外 LED を用いた屋外 Gbps 級ソーラーブラインド通信の実現可能性をより定量的に明らかにするとともに、AlGaIn LED の高速変調性の原理を解明し、ポスト 5G 時代における新たな Gbps 級情報通信資源として深紫外帯を再評価する。

3. 研究の方法

屋外送送実験を中心として、深紫外帯 LED によるソーラーブラインド通信の伝送特性を評価し、また実現に向けた課題を抽出する。実験結果をもとに送受信系を最適化し、また波長多重や MIMO 伝送技術の採用することで、5G 以降の要件に足るソーラーブラインド帯無線通信システムの要素技術の確立を目指す。一方、時間分解エレクトロルミネセンスなどにより、AlGaIn LED の発光メカニズムを評価し、その高速変調性の原理を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 日中屋外における 1Gbps ソーラーブラインド通信の実証[2]

真夏炎天下において、屋外送送実験を実施した。図 1 は実験系の様子である。実験系は情報通信研究機構仙台支部の建屋屋上に設置された。送信機は AlGaIn LED とし、受信機にはシリコン APD (avalanche photodiode) を用いた。陽光の影響を最大化するため、受信機は鉛直上向きに設置された。変調方式は 1.25Gbaud OOK とし、受信機側で判定帰還型等化器による歪補償を行った。図 2 は、実験当日の測定時刻ごとの太陽放射スペクトルである。雲などにより 10dB 近い変動がみられる一方で、波長 300nm 以下では終日ほとんど放射が確認されなかった。図 3 は観測時刻ごとのビット誤り率 (BER) 特性である。受信に用いたシリコン APD は、可視帯にも感度を持つため、BER 特性は太陽放射の影響を強く受けるものの、紫外帯バンドパスフィルタを用いることで、日中において常時、7%冗長度の誤り訂正符号を前提としたエラーフリー伝送を実現することができている。このとき実効伝送レートは 1.16Gbps であり、深紫外 LED を用いたソーラーブラインド通信により、日中屋外でも Gbps 級光無線通信が可能であることが示された。

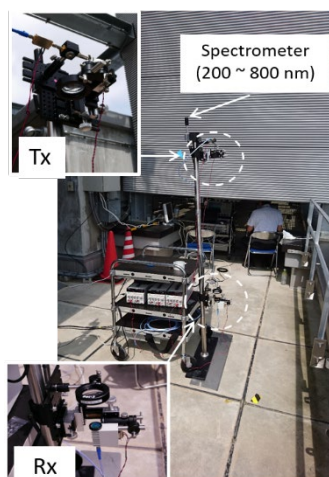


図 1 屋外送送実験系の様子

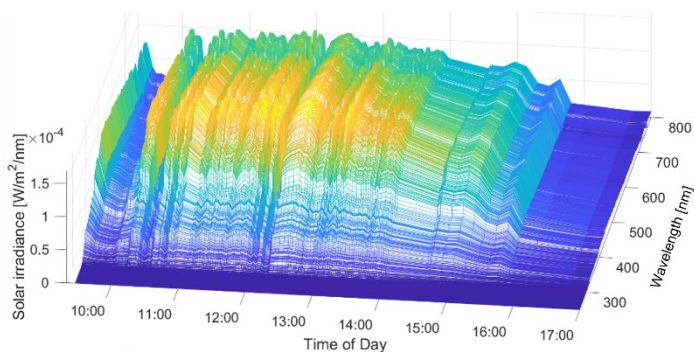


図 2 実験当日日中の太陽放射スペクトル

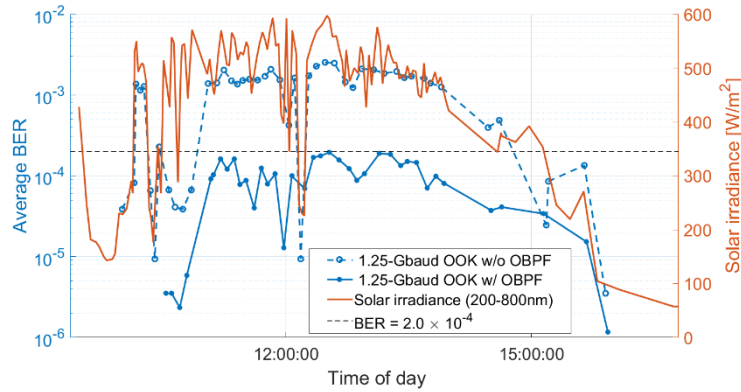


図 3 測定時刻毎の BER 特性

(2) 広視野角と高速伝送を両立するソーラブラインド受信機の検討[3]

前述の屋外伝送実験においては、受光面積の小さい高速の APD を使用し、送信光もコリメート光としたため、光無線システムとしては視野角が十分ではない。また、受信機フィルタにより、可視～金紫外帯に及ぶ太陽放射全体を十分に除去することは容易ではない。そこで、広視野角と高速性を両立するソーラブラインド受信機の検討を行った。1) AlGaIn LED そのものを受光デバイスとして用いる手法、2) ガイガーモード APD アレー (MPPC) を用いる手法、3) 紫外帯高速光増倍管 (PMT) を用いる手法の 3 つについて実験系を構築し、伝送実験を行った。ここでは主に 2 について報告する。(3 については、成果 (4) の波長多重伝送において併せて報告する。)

MPPC は、シリコン APD をベースとした比較的安価なフォトンカウンティングデバイスであり、一般的なシリコン APD の 10^3 倍程度の増幅度を持つ。深紫外帯通信は、暴露限界以下の微弱光での通信が基本であり、また遮光のため透過率の低い多層フィルタを使用する必要があることから、こうした高感度デバイスの採用が望ましい。図 4 は、実験系である。実験系は一般的なオフィス照明下の屋内で実施された。送信機は AlGaIn LED とし、変調方式は OOK 及び PAM4 とした。ビーム形成のためのレンズは用いておらず、視野角は 60 度程度 (ランバertian 配光) と考えられる。MPPC は可視帯にまで応答を持つため、低域通過多層膜フィルタにより照明光の影響を低減した。図 5 はフィルタ前後での屋内照明のスペクトラムである。MPPC としては、サイズの異なる 5 種類のデバイスを用いた (#XXYY: XX = デバイスサイズ [0.1*mm], YY = ピクセルサイズ [um])。MPPC のアフターパルスやクエンチングに起因する非線形信号歪は 2 次の Volterra フィルタ及び判定帰還フィルタによって補償している。図 6 は伝送距離 23cm の場合のデバイス毎の BER 特性である。ピクセルやデバイスサイズにより、MPPC の応答速度や実効的な受光感度が異なるが、この場合、最小デバイス (#1325) において、292Mbps の実効伝送レートが達成され

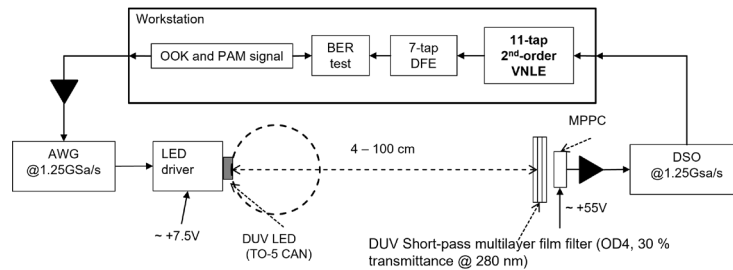


図 4 MPPC を用いたソーラブラインド受信実験系

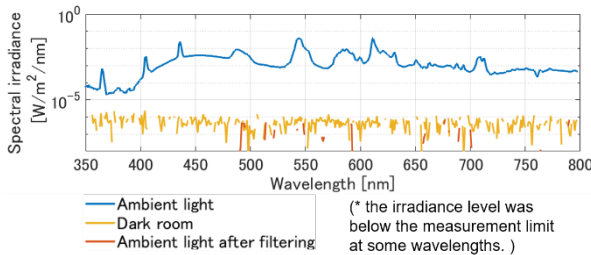


図 5 フィルタ前後での室内照明スペクトラム

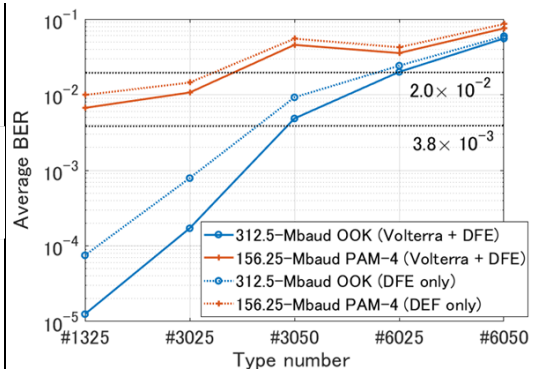


図 6 MPPC のデバイスサイズ毎の BER 特性 (23cm 伝送時)

た。一方、伝送距離を 60cm とした場合には、大型 (#6025) において 104Mbps が達成された。高速通信用途ではないため、MPPC の帯域は後段の電気回路により制限されているが、MPPC を複数配し、空間あるいは波長で多重することができれば、広視野角の Gpbs 級ソーラーブラインド通信が十分に実現可能であると考えられる。

(3) AlGaIn 系深紫外 LED の高速変調性の解明 [4]

一方、深紫外 LED 高速変調性の起源を調べるため、実際の使用環境下(電流注入条件下)にて駆動した時の、発光層におけるエレクトロルミネセンス(EL)像の顕微測定を行った。実験には、発光ピーク波長が 280 nm 帯の AlGaIn LED を用いた。試料となる LED は 2 つ (LED A および B) あり、それぞれ [1010] 方向にオフ角 1.0° および 0.3° を持つサファイア基板上に作製されたものである。LED A および B の顕微 EL 像 (図 7(a) および (b)) にはサブマイクロスケールの不均一な発光が観測された。このことは、我々が先行研究にて見出した、キャリアおよび電流の共局在構造 [5] によく対応している。特に、オフ角の大きな LED A の輝点密度は LED B のそれと比べて大きく、局在構造がより積極的に形成されている状況も明らかとなった。

近年、VLC においても、高速化のためマイクロ (微小) LED の採用が盛んに検討されているが、サファイア基板の深紫外 AlGaIn LED が持つこの自己組織的な微小構造が、あたかもマイクロ LED のようにふるまうことで、デバイスサイズ比にして格段に高速な変調を可能にしていると考えられる。

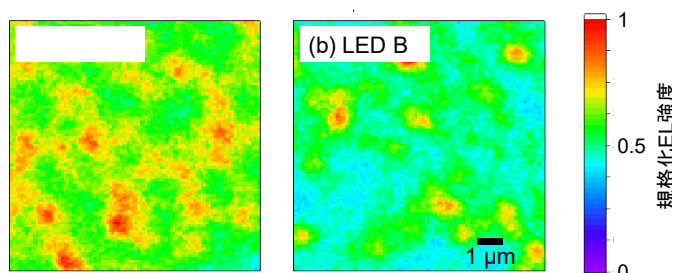


図 7 顕微 EL イメージ : (a) LED A、(b) LED B

(4) Gpbs 級ソーラーブラインド帯波長多重伝送の実証

広視野角と Gpbs 級の伝送容量を両立するため、波長多重 (WDM) 伝送方式を用いた Gpbs 級ソーラーブラインド光無線システムの実証実験を行った。

図 8 は実験系である。送信側には、サファイア基板のピーク波長 264nm、274nm、282nm の AlGaIn LED を用いた。一方、受信側では、CsTe (Cesium Telluride) 製フォトカソードを持つ小型光電子増倍管 (PMT) を採用した。CsTe-PMT の感度波長は 160nm から 320nm であるため、前述の MPPC と異なり、陽光を遮断するためのソーラーブラインドフィルタを必要としない。また、接合容量による制約を受ける半導体光検出器と異なり、比較的大きな受光面積であっても高速応答を実現できる。伝送路は、2m の見通し内通信とした。送信機側ビームの発散角はおおよそ 8° であり、受信機側におけるビームスポットサイズは 30cm 程度であった。WDM チャネルの分離には、深紫外帯多層膜フィルタを用いた。

図 9 は、受信端における受信スペクトル及び波長分離に用いた深紫外帯光フィルタの通過特性である。3 つの WDM チャネルは確かにソーラーブラインド帯にあることがわかる。また暴露限界を考慮し、それらのピーク波長は、屋内照明 (蛍光灯、作業台上において 1,000 lux 程度) より 2 桁以上低く設計されている。PMT は LED と同程度の応答速度を持ち、(LED、PMT を含む) システム全体の 3-dB 帯域幅は、72~102 MHz であった。応答帯域のばらつきは、実験に使用した AlGaIn LED デバイスのサイズの違いに起因していると考えられる。ソーラーブラインドフィルタを採用していないため、PMT は屋内照明光も受光するが、可視帯に不感であることから、伝送特性への影響は見られなかった。図 10 に、伝送速度 (Baud rate) 対平均 BER 特性を示す。ここでは変調方式として、3 階調の強度パターンを用いる PAM-3 方式を採用している。PMT は、アフターパルスなどの非線形応答を持つ。さらに、図 9 からわかるように、波長 274nm のチャネルは、送信電力が低く、また光フィルタの通過帯域のずれから、他チャネルからの強いキャリ

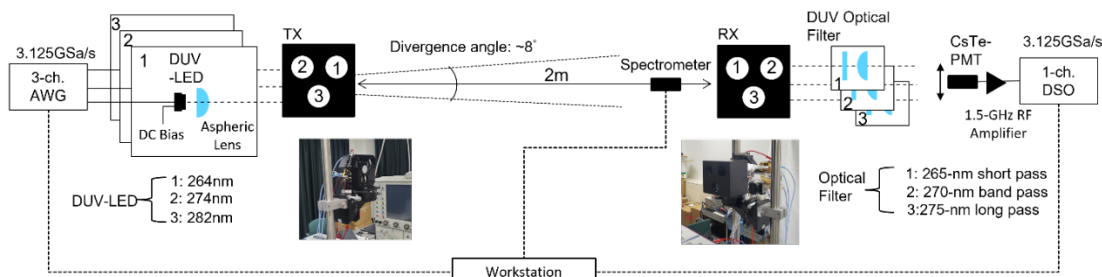


図 8 Gpbs 級ソーラーブラインド帯 WDM 伝送実験系

ア間干渉 (ICI) を受ける。そこで、多入力 Volterra 型判定帰還等化器を用いた逐次干渉キャンセラを受信側において採用し、非線形性及び ICI による信号歪を除去した。結果、図 10 に示す通り、SIC を採用した場合において (図中、紫の実線)、最大 300Mbaud、誤り訂正符号を考慮したビットレート換算で、1.12Gbps の伝送に成功した。

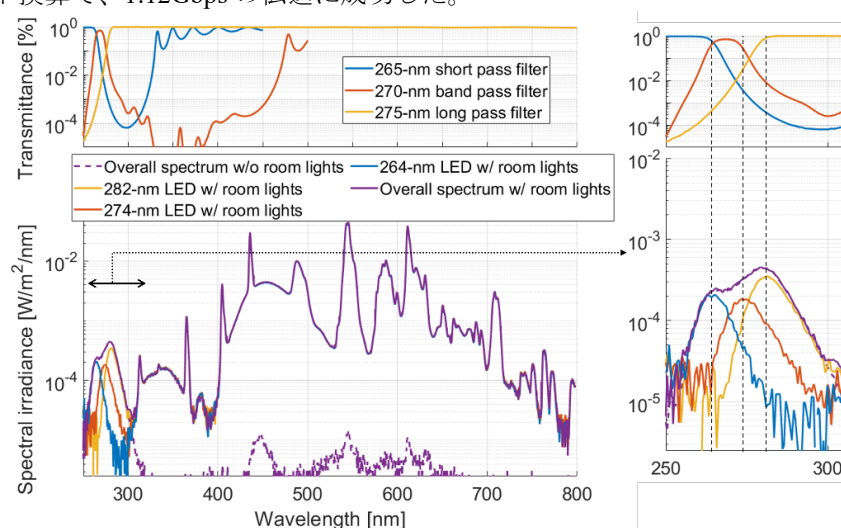


図 9 受信光スペクトラム (264nm-, 274nm-, 282nm-WDM チャンネル及び屋内照明)

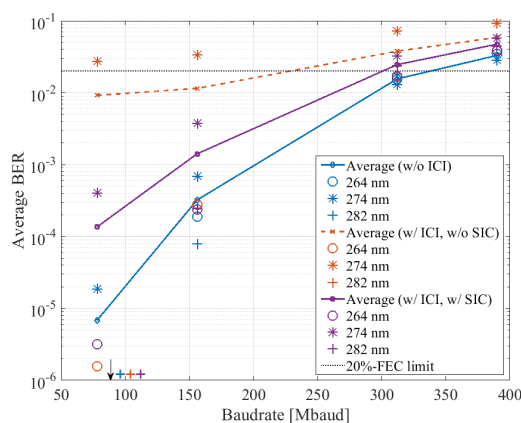


図 10 伝送レート対 BER 特性 (橙: WDM 伝送 (SIC なし), 青: 単チャンネル伝送, 紫: WDM 伝送 (SIC あり))

参考文献:

- [1] K. Kojima, Y. Yoshida, M. Shiraiwa, Y. Awaji, A. Kanno, N. Yamamoto, and S. Chichibu, "1.6-Gbps LED-Based Ultraviolet Communication at 280 nm in Direct Sunlight," in 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC) (2018), pp. 1-3.
- [2] Y. Yoshida, K. Kojima, M. Shiraiwa, Y. Awaji, A. Kanno, N. Yamamoto, S. F. Chichibu, A. Hirano, and M. Ippommatsu, "An Outdoor Evaluation of 1-Gbps Optical Wireless Communication using AlGaIn-based LED in 280-nm Band," in 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (2019), pp. 1-2.
- [3] Y. Yoshida, K. Kojima, M. Shiraiwa, A. Kanno, A. Hirano, Y. Nagasawa, M. Ippommatsu, N. Yamamoto, S. F. Chichibu, and Y. Awaji, "Up-to 292-Mbps Deep-UV Communication over a Diffuse-Line-of-Sight Link Based on Silicon Photo Multiplier Array," in 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC) (2020), pp. 1-4.
- [4] K. Kojima, Y. Yoshida, M. Shiraiwa, Y. Awaji, A. Kanno, N. Yamamoto, A. Hirano, Y. Nagasawa, M. Ippommatsu, and S. F. Chichibu, "Self-organized micro-light-emitting diode structure for high-speed solar-blind optical wireless communications," Appl. Phys. Lett. 117(3), 031103 (2020).
- [5] K. Kojima, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ippommatsu, Y. Honda, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu, "Carrier localization structure combined with current micropaths in AlGaIn quantum wells grown on an AlN template with macrosteps," Appl. Phys. Lett. 114(1), 011102 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 0件）

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 小島一信, 秩父重英, 吉田悠来, 白岩雅輝, 菅野敦史, 山本直克, 淡路祥成, 平野光, 長澤陽祐, 一本松正道 | 4. 巻 342 |
| 2. 論文標題 東北大学グリーンネストICT LEDを用いたノイズに強い光無線通信技術の研究- 真夏の直射日光下において毎秒1ギガビット以上の通信速度を実現- | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 電波技術協会報FORN | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kojima K., Yoshida Y., Shiraiwa M., Awaji Y., Kanno A., Yamamoto N., Hirano A., Nagasawa Y., Ippommatsu M., Chichibu S. F. | 4. 巻 117 |
| 2. 論文標題 Self-organized micro-light-emitting diode structure for high-speed solar-blind optical wireless communications | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Applied Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 031103 ~ 031103 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0013112 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 小島一信, 秩父重英, 吉田悠来, 白岩雅輝, 淡路祥成, 菅野敦史, 山本直克, 平野光 | 4. 巻 83 |
| 2. 論文標題 窒化アルミニウムガリウム深紫外発光ダイオードを用いたギガビット級 ソーラーブラインド光無線通信 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 月刊OPTRONICS (6月号) | 6. 最初と最後の頁 1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 5件/うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuki Yoshida, Kazunobu Kojima, Masaki Shiraiwa, Atsushi Kanno, Akira Hirano, Yosuke Nagasawa, Masamichi Ippommatsu, Naokatsu Yamamoto, Shigefusa F. Chichibu, and Yoshinari Awaji |
| 2. 発表標題 High-speed solar-blind optical wireless communication enabled by DUV LED |
| 3. 学会等名 Photonics West 2022 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Kojima, A. Hirano, Y. Nagasawa, Y. Honda, H. Amano, Y. Yoshida, M. Shiraiwa, Y. Awaji, A. Kanno, N. Yamamoto, and S. F. Chichibu |
| 2. 発表標題 Characterization of AlGaIn deep-ultraviolet light-emitting diodes grown on AlN/sapphire templates with dense macro-steps and its application of high-speed solar-blind optical wireless communications |
| 3. 学会等名 The International Conference on UV LED Technologies & Applications (ICULTA 2021) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小島一信, 吉田悠来, 白岩雅輝, 淡路祥成, 菅野敦史, 山本直克, 平野光, 長澤 陽祐, 一本松正道, 秩父重英 |
| 2. 発表標題 深紫外AlGaIn LEDを用いたギガビット級ソーラブラインド光無線通信 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会 2021年3月 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Kojima, Y. Yoshida, M. Shiraiwa, Y. Awaji, A. Kanno, N. Yamamoto, A. Hirano, Y. Nagasawa, M. Ippommatsu, and S. F. Chichibu |
| 2. 発表標題 Characterization of a self-organized deep-ultraviolet micro-light-emitting diode structure for high-speed solar-blind optical wireless communications |
| 3. 学会等名 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Yoshida, K. Kojima, M. Shiraiwa, Y. Awaji, A. Kanno, N. Yamamoto, and S. F. Chichibu |
| 2. 発表標題 Up-to 292-Mbps deep-UV communication over a diffuse-line-of-sight link based on silicon photo multiplier array |
| 3. 学会等名 2020 European Conference on Optical Communication (ECOC) (2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 吉田悠来, 小島一信, 白岩雅輝, 菅野敦史, 平野光, 長澤陽祐, 一本松正道, 山本直克, 秩父重英, 淡路祥成 |
| 2. 発表標題 AlGaN LEDとBeyond 5G |
| 3. 学会等名 応用物理学会 応用電子物性分科会 応用電子物性分科会研究例会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yuki Yoshida, Kazunobu Kojima, Masaki Shiraiwa, Yoshinari Awaji, Atsushi Kanno, Naokatsu Yamamoto, Shigefusa F. Chichibu, Akira Hirano, Masamichi Ippommatsu |
| 2. 発表標題 An Outdoor Evaluation of 1-Gbps Optical Wireless Communication using AlGaN-based LED in 280-nm Band |
| 3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小島一信, 吉田悠来, 白岩雅輝, 淡路祥成, 菅野敦史, 山本直克, 平野光, 長澤陽祐, 一本松正道, 秩父重英 |
| 2. 発表標題 深紫外AlGaN発光ダイオードの顕微エレクトロルミネセンス測定 |
| 3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 吉田悠来, 小島一信, 白岩雅輝, 淡路祥成, 菅野敦史, 山本直克, 秩父重英, 平野光, 一本松正道 |
| 2. 発表標題 深紫外 AlGaN 発光ダイオードを用いたギガビット級光無線通信 |
| 3. 学会等名 日本学術振興会 ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会 第115回研究会 研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小島 一信、吉田 悠来、白岩 雅輝、淡路 祥成、菅野 敦史、山本 直克、平野 光、長澤 陽祐、一本松 正道、秩父 重英 |
| 2. 発表標題 自己組織的に形成された深紫外 マイクロ発光ダイオード構造の変調特性 |
| 3. 学会等名 レーザー学会第40回年次大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学プレスリリース（2020.8.3）：ギガビット級高速光無線通信を実現した深紫外LEDの高速変調メカニズムを解明 -自己組織化微小LED集合体がもたらす、高発光効率と高速変調の両立-
URL: http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/news_press/20200803/

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 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 小島 一信 (Kojima Kazunobu) (30534250) | 東北大学・多元物質科学研究所・准教授 (11301) | |
| 研究分担者 | 吉田 悠来 (Yoshida Yuki) (50573036) | 国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワーク研究所 フォトリソICT研究センター・主任研究員 (82636) | |
| 研究分担者 | 秩父 重英 (Chichibu Shigefusa) (80266907) | 東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|