

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.12 半導体光デバイス

2024年9月19日(木) 9:00 ~ 12:00 会場 A35 (朱鷺メッセ3F)

**[19a-A35-1~11] 3.12 半導体光デバイス**

石川 靖彦(豊橋技科大)、清水 大雅(農工大)、山田 友輝(NTT)

9:00 ~ 9:15

[19a-A35-1]

反転型構造InGaAs単一光子アバランシェダイオードの温度特性

○山田 友輝<sup>1</sup>、平岡 郁恵<sup>1</sup>、中島 史人<sup>1</sup> (1.NTT先デ研)

9:15 ~ 9:30

[19a-A35-2]

Siパターン基板上Geエピタキシャル層を用いた近赤外受光器

○堤 光輝<sup>1</sup>、Mohd Faiz Bin Amin<sup>1</sup>、Piedra-Lorenzana Jose A.<sup>1</sup>、飛沢 健<sup>1</sup>、山根 啓輔<sup>1</sup>、中井 哲弥<sup>2</sup>、石川 靖彦<sup>1</sup> (1.豊橋技科大、2.SUMCO)

9:30 ~ 9:45

[19a-A35-3]

超格子障壁によるT2SL赤外線検出器の低電圧動作実証

○田中 朋<sup>1,2</sup>、牛頭 信一郎<sup>2</sup>、佐野 雅彦<sup>1</sup>、金折 恵<sup>2</sup>、澁谷 泰蔵<sup>1,2</sup>、五十嵐 悠一<sup>1,2</sup>、小田 直樹<sup>1</sup>、弓削 亮太<sup>1,2</sup> (1.日本電気、2.産総研)

9:45 ~ 10:00

[19a-A35-4]

ZnSe系有機-無機ハイブリッド型紫外APDのSU-8を用いた有機窓層エッジ保護による素子特性向上

○坂口 悠太<sup>1</sup>、又野 陸哉<sup>1</sup>、近添 大輝<sup>1</sup>、古川 大和<sup>1</sup>、平田 安里紗<sup>1</sup>、阿部 友紀<sup>1</sup>、市野 邦男<sup>1</sup>、赤岩 和明<sup>1</sup> (1.鳥取大)

10:00 ~ 10:15

[19a-A35-5]

ZnSe系有機-無機ハイブリッド紫外APDアレイの開発

○平田 安里紗<sup>1</sup>、近添 大輝<sup>1</sup>、又野 陸哉<sup>1</sup>、坂口 悠太<sup>1</sup>、古川 大和<sup>1</sup>、阿部 友紀<sup>1</sup>、市野 邦男<sup>1</sup>、赤岩 和明<sup>1</sup> (1.鳥取大)

## ◆ 英語発表

10:15 ~ 10:30

[19a-A35-6]

Efficient Fabrication Method of Micro-Pyramid Structures for High-Speed Imaging

○Sota Oshima<sup>1</sup> (1.Ritsumei Univ.)

## ◆ 英語発表

10:45 ~ 11:00

[19a-A35-7]

Self-assembled monolayer as the surface passivator for efficient and stable ZnO-based perovskite solar cells

○Jannatul Ferdous<sup>1,2</sup>、Md. Emrul Kayesh<sup>1</sup>、Mostafa F. Abdelbar<sup>1</sup>、Wipakorn Jevasuwan<sup>1</sup>、Ashrafu Islam<sup>1</sup>、Naoki Fukata<sup>1</sup> (1.NIMS, 2.Tsukuba Univ.)

11:00 ~ 11:15

[19a-A35-8]

Low temperature operation of GaInP solar cells for underwater optical wireless power transmission

○(M1)JIKUN LI<sup>1</sup>, Takehiro Iida<sup>1</sup>, Ryusei Takahashi<sup>1</sup>, Junichi Suzuki<sup>1</sup>, Kosuke Watanabe<sup>1</sup>, Shiro Uchida<sup>1</sup> (1.Chiba Institute of Technology)

11:15 ~ 11:30

[19a-A35-9]

光無線給電用 CIGS 太陽電池の光電変換効率の温度依存性

○(M1)千葉 萌翔<sup>1</sup>、藤井 駿太郎<sup>1</sup>、佐藤 恭輔<sup>1</sup>、前野 陸<sup>1</sup>、渋井 駿昌<sup>1</sup>、小牧 弘典<sup>2</sup>、富田 仁<sup>2</sup>、中村 浩昭<sup>2</sup>、小田 雄介<sup>2</sup>、石内 隆鳳<sup>2</sup>、内田 史朗<sup>1</sup> (1.千葉工大、2.出光興産)

11:30 ~ 11:45

[19a-A35-10]

光無線給電におけるPVパネルのビーム走査による発電量の向上

○落合 夏葉<sup>1</sup>、烏海 陽平<sup>1</sup>、青貫 翔<sup>1</sup>、鈴木 優紀子<sup>1</sup>、柏倉 一斗<sup>1</sup>、高橋 円<sup>1</sup> (1.NTT宇宙環境研)

11:45 ~ 12:00

[19a-A35-11]

シリコンフォトニクス応用に向けた窒化ゲルマニウム薄膜の反応性スパッタ堆積

○(M1)岡垣 颯<sup>1</sup>、Piedra-Lorenzana Jose A.<sup>1</sup>、飛沢 健<sup>1</sup>、山根 啓輔<sup>1</sup>、石川 靖彦<sup>1</sup> (1.豊橋技科大)

## 反転型構造 InGaAs 単一光子アバランシェダイオードの温度特性

Temperature characteristics of InGaAs single-photon avalanche diode using inverted structure.

日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所<sup>1</sup> ○山田 友輝<sup>1</sup>, 平岡 郁恵<sup>1</sup>, 中島 史人<sup>1</sup>

NTT Device Technology Labs., NTT Corporation<sup>1</sup>, ○Yuki Yamada<sup>1</sup>, Ikue Hiraoka<sup>1</sup>, Fumito Nakajima<sup>1</sup>

E-mail: yukimv.yamada@ntt.com

### 1. 背景

単一光子アバランシェダイオード(SPAD)は、極低温の冷却機構を必要としない単一光子検出器であり、量子情報通信の実用に有望な技術である。SPAD では素子のリーク電流に起因する暗計数率の低減が課題であり、SPAD に反転型構造[1]を導入することで暗係数低減に有効であることを報告した[2]。SPAD の暗計数率低減には動作温度低減が有効であるが、低温ではアフターパルスが増加する課題も生じる。

### 2. 反転型 SPAD 構造

本研究では InGaAs 吸収層、InP の増倍層、InP エッジ電界緩和層を図 1 に示すメサ構造に加工した。電界狭窄により素子側面の電界強度を低減し、側面リーク電流を抑制することで、暗計数低減の効果が期待できる。これにより、動作温度を大幅に下げずとも低暗計数率かつ低アフターパルス動作が可能な SPAD を目指した。

### 3. 実験

図 2 に暗計数率と検出効率の温度依存性

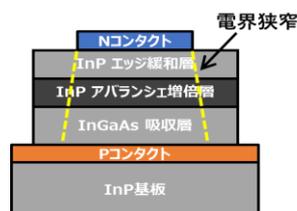


図 1 : IV 特性

を示す。SPAD は  $V_{pp}$  7.9V, 周波数 1.5 GHz のゲートモードで駆動し、波長 1.55  $\mu\text{m}$ 、周波数 10 MHz, パルス当たり 0.3 光子強度のパルス光を照射した。

室温付近の 25°C において、検出効率約 4% における暗計数率は約 150 cps であり、-20°C 以下への冷却により約 10 cps 以下まで低減した。一方で、解析されるアフターパルス確率は、-20°C から -40°C までの冷却により 1% から 5% まで増加する。これは、動作温度 -20°C に設計することで、暗計数率とアフターパルス確率を 12 cps、1% といずれも低く抑えることが可能であり、適切な温度選択の有効性を示す結果である。

### 4. 結論

反転型 SPAD は、比較的高い温度でも低暗計数動作が可能である。そのため、適切な動作温度を選ぶことで、低暗計数率かつ低アフターパルスの SPAD 動作が期待できることを示した。

[1] M. Nada, et al. JLT 33,984 (2014)

[2] 山田 他 春季応用物理学会(2024)

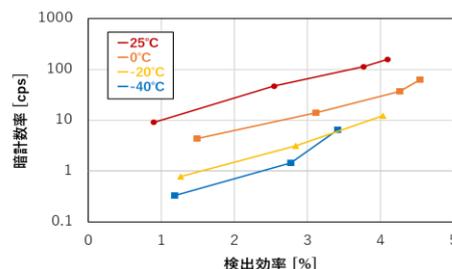


図 2: 暗計数率と検出効率の温度依存性

## Si パターン基板上 Ge エピタキシャル層を用いた近赤外受光器

### Near-infrared photodetector of Ge epitaxial layer on Si patterned substrate

豊橋技科大<sup>1</sup>, SUMCO<sup>2</sup>, °(M2)堤 光輝<sup>1</sup>, Mohd Faiz Bin Amin<sup>1</sup>, Jose A. Piedra-Lorenzana<sup>1</sup>,  
飛沢 健<sup>1</sup>, 山根 啓輔<sup>1</sup>, 中井 哲弥<sup>2</sup>, 石川 靖彦<sup>1</sup>  
Toyohashi Univ. Tech.<sup>1</sup>, SUMCO Corp.<sup>2</sup>, °(M2) Koki Tsutsumi<sup>1</sup>, Mohd Faiz Bin Amin<sup>1</sup>, Jose A.  
Piedra-Lorenzana<sup>1</sup>, Takeshi Hizawa<sup>1</sup>, Keisuke Yamane<sup>1</sup>, Tetsuya Nakai<sup>2</sup>, Yasuhiko Ishikawa<sup>1</sup>  
E-mail: tsutsumi.koki.fb@tut.jp, ishikawa@ee.tut.ac.jp

1. はじめに Si 上 Ge 層を用いた近赤外受光器はシリコンフォトニクスにおいて広く利用されている。Si と Ge は約 4%の大きな格子不整合があり、Ge 層中に高密度の貫通転位が発生する。貫通転位はリーク電流を増加させるなど受光器動作の妨げとなる。我々のグループでは、Ge 層を Si パターン基板上に成長させることで貫通転位密度を低減できることを報告している[1,2]。今回はパターン基板上 Ge 層を用いた受光器を作製し、特性評価を行った。

2. 実験方法 4 インチ p<sup>+</sup>-Si(001)ウェハ上に周期約 1.0 μm、幅約 0.5 μm のトレンチを[110]方向に沿って形成した。トレンチ深さは 100 nm および 200 nm の 2 種類とした。超高真空化学気相堆積(CVD)法により Ge 層(膜厚 500 nm: トレンチがない場合)および Si キャップ層(120 nm)をエピタキシャル成長した。さらにプラズマ CVD 法により SiO<sub>2</sub> 層を形成した。Fig. 1 に試料断面を走査電子顕微鏡(SEM)により観察した結果を示す。トレンチ深さによらず、表面が平坦な Ge 層が形成された。Ge の膜厚はトレンチ底部から約 470 nm であった。

部分的に SiO<sub>2</sub> を除去し、Si キャップ層および Ge 層の上部に P イオン注入によって n<sup>+</sup>領域を形成した。Al-Si(500 nm)/Ti(50 nm)電極を形成し、縦 pin 構造の受光器とした。トレンチのない構造も比較として作製した。電流-電圧(I-V)特性および受光感度を評価した。

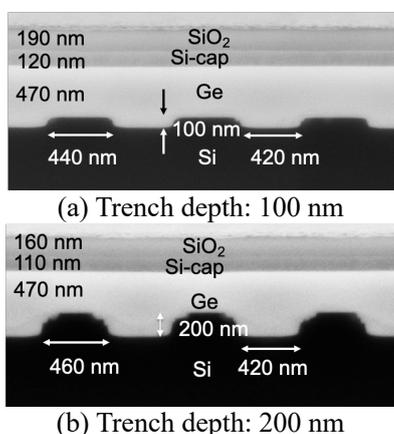


Fig.1. Typical cross-sectional SEM images

3. 実験結果と考察 Fig. 2 に暗状態での典型的な I-V 特性を示す(pin 接合の面内サイズ: 200 μm × 200 μm)。トレンチのない平坦膜と比較して、トレンチ深さ 100 nm では暗電流が低下した。貫通転位密度の低減[1,2]が寄与したものと考えられる。しかしトレンチ深さ 200 nm では暗電流が増加した。貫通転位密度の低減が不十分であったことや、トレンチ端部での強電界化などが考えられる。

トレンチ深さ 100 nm の場合、垂直光入射時の受光感度として約 0.11 A/W(逆バイアス 1 V, 1.55 μm)が得られた。トレンチのない平坦膜と同等の値である。一方、トレンチ深さ 200 nm では約 0.07 A/W の低い値となった。トレンチ形成により Ge 層の平均膜厚が小さくなり、光吸収が減少したことが要因として考えられる。今後、Ge 層の結晶性評価等を進め、トレンチ深さの影響を明確化する予定である。

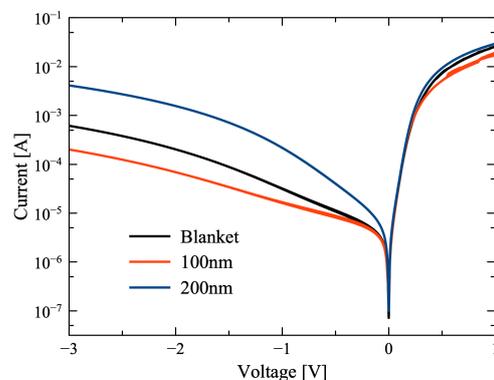


Fig.2. Typical I-V characteristics in dark

4. まとめ 表面にトレンチを形成した Si パターン基板上の Ge エピタキシャル層を用い、pin 受光器を作製した。トレンチ深さ 100 nm の場合、暗電流が低下した。貫通転位密度の低減を反映した結果と考えられる。受光感度も平坦膜と同様な値が得られた。一方、深さ 200 nm では暗電流が増加し、受光感度も低下した。

#### 参考文献

- [1] M. F. B. Amin et al., J. Electron. Mater. 52, 5059 (2023).  
[2] M. F. B. Amin et al., Jpn. J. Appl. Phys. 63, 02SP78 (2024).

## 超格子障壁による T2SL 赤外線検出器の低電圧動作実証

## Demonstration of Low-voltage Operation of T2SL Photodetector with a SL Barrier

日本電気<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup> ○田中 朋<sup>1,2</sup>, 牛頭 信一郎<sup>2</sup>, 佐野 雅彦<sup>1</sup>, 金折 恵<sup>2</sup>,澁谷 泰蔵<sup>1,2</sup>, 五十嵐 悠一<sup>1,2</sup>, 小田 直樹<sup>1</sup>, 弓削 亮太<sup>1,2</sup>NEC<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>, Tomo Tanaka<sup>1,2</sup>, Shin-ichiro Gozu<sup>2</sup>, Masahiko Sano<sup>1</sup>, Megumi Kanaori<sup>2</sup>,Taizo Shibuya<sup>1,2</sup>, Yuichi Igarashi<sup>1,2</sup>, Naoki Oda<sup>1</sup>, Ryota Yuge<sup>1,2</sup>

E-mail: tomotanaka@nec.com

Type-II Super Lattice (T2SL)は2種の半導体薄膜を交互に積層することで異なる半導体層に電子と正孔の井戸を持つ超格子で、電子と正孔のミニバンド間遷移により赤外線を検出できる。その組成・膜厚により検出波長を制御でき、波長 2.5  $\mu\text{m}$  程度までの Extended Short Wave Infrared (eSWIR)と呼ばれる帯域向け検出器としても有望な構造である。半導体バンド間遷移を用いる赤外線検出器は暗電流抑制のため素子の冷却が必要となり、検出器のサイズ・コスト増大を招く。そのため暗電流低減による冷却機構簡略化が望まれている。

T2SL 向け暗電流低減技術の一つに、ミニバンドの電子準位に対応する電子障壁層の導入があるが、その際正孔準位側にも僅かながら障壁が発生する<sup>[1]</sup>。これにより光電流を担う正孔の取り出しに一定以上の電圧印加が必要となり、消費電力増大を招く。そこで我々は電子障壁層に Type-I Super Lattice (T1SL)構造を用いることで電子障壁層と吸収層の正孔基底準位を揃え、暗電流を抑制しつつ低電圧動作可能な構造を提案・設計してきた<sup>[2]</sup>。今回この設計に基づき GaAsSb/InGaAs の T2SL 構造を吸収層、AlAsSb/GaAsSb の T1SL 構造を電子障壁層とした eSWIR 検出器を作製し、T1SL 障壁層の機能を検証したので報告する。

作製した素子の断面構造を Fig. 1 内に示す。

InP 基板の上に吸収層、電子障壁層などを MBE により成膜した。同時に AlAsSb を障壁層とした素子も作製し、その特性を比較した。成膜層は全て InP 基板と格子整合させた。FT-IR で測定した素子温度 160 K、印加電圧-0.4 V での分光量子効率を Fig. 1 に示す。T1SL 障壁層の素子では光応答が確認されたが、AlAsSb 障壁層の素子ではさらに高い電圧を印加しなければ光応答を確認できなかった。これにより、T1SL 障壁層の低電圧動作を実証できた。また電流電圧特性から暗電流低減効果も確認され、T1SL 障壁層の有用性を示すことが出来た。

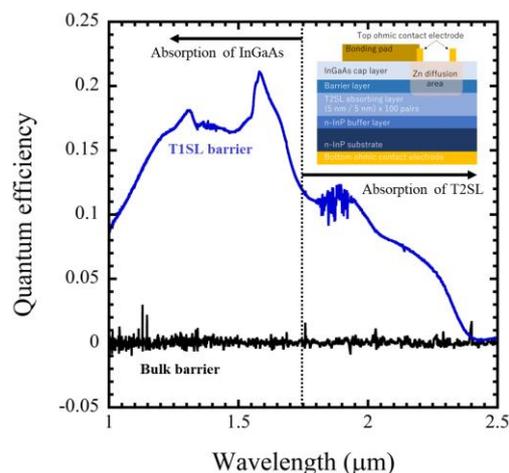


Fig. 1 Spectral QE at 160K and device structure.

参考文献

- [1] J. B. Rodriguez, et. al., Appl. Phys. Lett. 91, 043514 (2007).
- [2] 五十嵐他, 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 18p-232-6 (2018).

## ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型紫外 APD の SU-8 を用いた 有機窓層エッジ保護による素子特性向上

Improvement of Device Characteristics of ZnSe-based Organic-Inorganic Hybrid UV APDs  
by Organic Window Layer Edge Protection Using SU-8

鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科

Graduate School of Sustainability Science, Tottori University

○坂口悠太, 又野陸哉, 近添大輝, 古川大和, 平田安里紗, 阿部友紀, 市野邦男, 赤岩和明  
○Y. Sakaguchi, R. Matano, T. Chikazoe Y. Furukawa, A. Hirata, T. Abe, K. Ichino, and K. Akaiwa  
E-mail: m24j4028a@edu.tottori-u.ac.jp

### [背景]

近年, 紫外光検出器は医療, 天文学などの多くの分野で応用が期待されている. 現在, 紫外光検出器として広く利用されている光電子増倍管は主流であるが応答速度が遅い, 大型で集積化が困難であるという欠点がある. これらの問題を解決するために光電子増倍管に変わる紫外光検出器として紫外アバランシェフォトダイオード (APD) の開発が進められている. 本研究で作製する APD の特徴は, ZnSe を増倍層とし正孔輸送材料の PEDOT:PSS を窓層に使用した有機-無機ハイブリッド構造で, 他材料の紫外 APD と比較して動作電圧が約 30V と低く, ブレークダウン直前の暗電流が $\sim 10\text{pA}/\text{nm}^2$  と低暗電流であることが挙げられる. [1]

本研究では, 従来の窓層構造において窓層のエッジ部の乱れによって発生するリーク電流を防ぐため, 窓層のエッジ部を SU-8 絶縁膜で保護することによってリーク電流の低減を図り, その特性評価を行った.

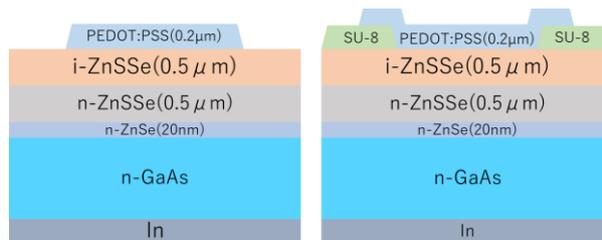
### [窓層エッジ保護構造の素子特性評価]

従来の窓層構造を持つ APD の素子構造と作製した SU-8 保護膜を有する APD の素子構造を図 1 に示す. n-GaAs 基板上に MBE 法を用いて i-ZnSSe/n-ZnSSe/n-ZnSe 層を成長させ, フォトリソグラフィ及びスピコート法により有機窓層構造を形成した.

図 2 に本研究で作製した APD 各素子の暗電流特性結果とブレークダウン直前の暗電流特性の従来構造との比較図を示す. 従来構造の APD 素子ではブレークダウン直前の平均暗電流値は  $6.08 \times 10^{-10}\text{A}$ , 窓層エッジ保護構造では  $8.72 \times 10^{-11}\text{A}$  となり, 窓層エッジ保護構造 APD でブレークダウン直前の平均暗電流が 1 桁程度低減したことを確認できた.

図 3 に本研究で作製した APD 各素子の増倍率と各素子における最大増倍率の従来構造との比較図を示す. 従来構造の APD 素子では最大増倍率が 2790 倍, 平均増倍率が 1120 倍であったのに対し, 窓層エッジ保護構造の最大増倍率が 5960 倍, 平均増倍率が 1710 倍と向上した.

これらより暗電流, 増倍率特性において窓層エッジ保護構造の APD 素子でそれぞれ特徴の向上が確認できた.



(a)従来の窓層構造を持つAPD (PEDOT:PSSのみ)  
(b)作製したAPD (SU-8を有するPEDOT:PSS窓層)  
図 1(a):従来の窓層構造を持つ APD の素子構造  
(b):作製した SU-8 を有する APD の素子構造

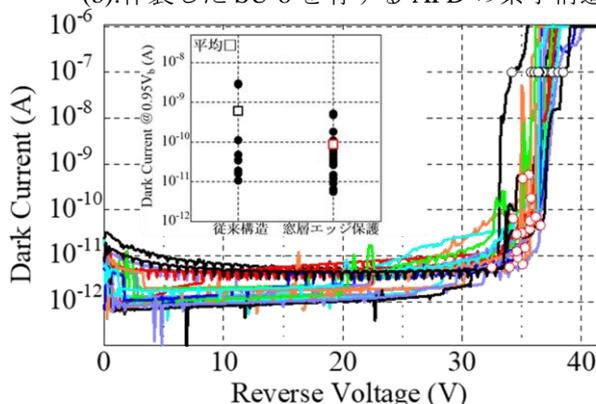


図 2:暗電流測定結果と従来構造との比較

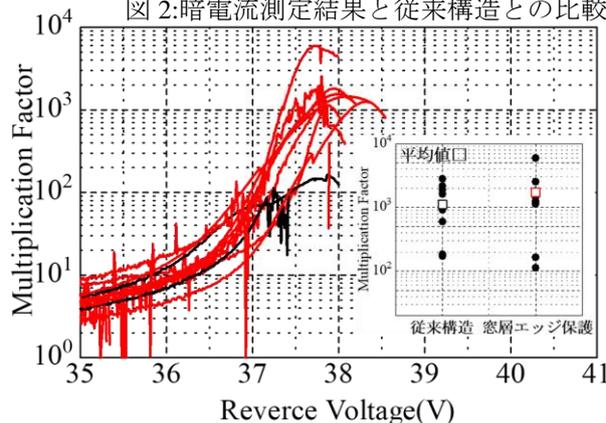


図 3:増倍率測定結果と従来構造との比較

### [謝辞]

本研究は鳥取大学ベンチャービジネスラボラトリーの協力のもとで行った.

本研究は日本板硝子材料工学助成会の助成を受けたものである.

### [参考文献]

[1] Y. Ichikawa, et al., J. Electronic Materials 49, 4589 (2020).

## ZnSe 系有機-無機ハイブリッド紫外 APD アレイの開発

## Development of ZnSe-based organic-inorganic hybrid ultraviolet APD arrays

鳥取大学院持続性社会創生科学研究科

Tottori University Graduate School of Sustainable Society Creation Science

平田安里紗, 近添大輝, 又野陸哉, 坂口悠太, 古川大和, 阿部友紀,  
市野邦男, 赤岩和明A. Hirata, T. Chikazoe, R. Matano, Y. Sakaguti, Y. Hurukawa, T. Abe,  
K. Ichino, K. Akaiwa

E-mail:m24j4052c@edu.tottori-u.ac.jp

## [背景]

現在, 紫外線検出器は医療や天文観測の分野で期待されているが, 光電子増倍管(PMT)は動作電圧が高く, 集積化が困難であるため, 低動作電圧で集積化可能な紫外アバランシェフォトダイオード(APD)の開発が進められている。

本研究では, ZnSe 系半導体を無機層に, PEDOT:PSS を有機層窓層として使用する有機無機ハイブリッド型 APD を作製した。

今回, PEDOT:PSS 窓層エッジ部に対する SU-8 保護膜を有し Ti/Au 外部電極を形成した 1 次元 APD アレイの素子特性の均一化および低暗電流化に成功したので報告する。

## [デバイスプロセスおよび評価・検討]

今回作製した APD の素子断面図とアレイ化した構造を図 1 に示す。無機層上にスピノコーティングおよびフォトリソグラフィで PEDOT:PSS 窓層等を形成した。暗電流の抑制, 素子特性の均一性の向上のために PEDOT:PSS 窓層のエッジ部を SU-8 絶縁膜で保護し, その上に, 外部電極形成のための保護膜として SU-8 絶縁膜を形成し, Ti/Au 電極を形成した。

作製した APD アレイの表面顕微鏡写真と暗電流特性の一例を図 2(a) と図 2(b) に示す。全てマスクパターン通りに作製でき, 4 アレイの歩留まりは平均約 94% であった。次に, 図 3(a) に Ti/Au 電極形成前後でブレイクダウン電圧のばらつきを示す。Ti/Au 電極形成後はブレイクダウン電圧が 38.4~39V に抑えられた。さらに, 図 3(b) に Ti/Au 電極形成前後のブレイクダウン直前の暗電流を示す。Ti/Au 電極形成後は暗電流が  $10^{11}$  A に集中し均一化され, 平均値は 2 桁低減した。

## [謝辞]

鳥取大学ベンチャービジネスラボラトリーの協力と日本板硝子材料工学助成会の助成の元で行った。

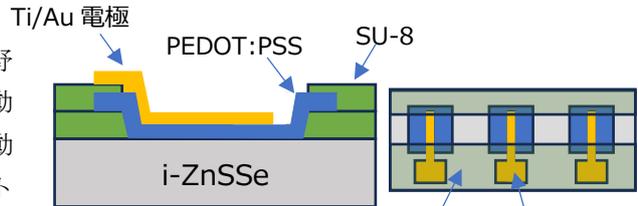
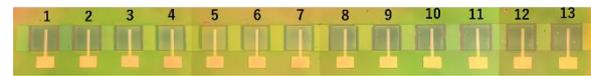
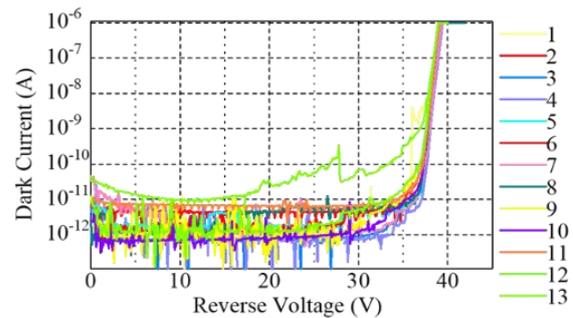


Figure 1: Device structure with SU-8 insulating film.

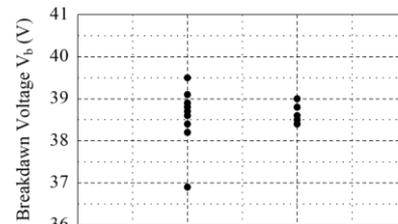


(a)

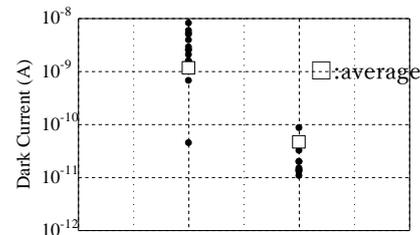


(b)

Figure 2: (a) Surface micrograph and (b) dark current characteristics of APD array.



(a)



(b)

Figure 3: (a) Breakdown voltage and (b) dark current before breakdown, before and after electrode formation.

# Efficient Fabrication Method of Micro-Pyramid Structures for High-Speed Imaging

Sota Oshima, T Goji Etoh, Taeko Ando

Ritsumeikan University  
E-mail: rm0180ix@ed.ritsumei.ac.jp

## 1. Introduction

High-speed imaging is demanded in the consumer market as well as in the experimental observation in various research fields. Theoretical limitation of 11.1 ps was suggested for Si photodiode[1]. Toward the goal, some charge collection structures were proposed such as p-well that was already realized and used for recording light-flight[1] and guide-pipe that is reported to be the highest speed of 49.0 ps in the simulation[2]. However, pyramid structure is a good candidate that can accomplish a temporal resolution and light-collection ratio at the same time. Additionally, germanium (Ge) is suitable material for achieving higher temporal resolution, for example 10.1 ps for NIR light[3].

In this paper, we propose fabrication method of the Si concave pyramid structures with SiO<sub>2</sub> film on the sidewalls without SiO<sub>2</sub> patterning process.

## 2. Ge in Si concave pyramid structure

Charge collection structure we use is concave pyramid as shown in Figure 1. The pyramid charge collector is the most promising method to effectively suppress the horizontal motion of generated electrons, which achieves the temporal resolution of 100 ps with the 100% aperture ratio. The penetration depth of light to Ge is 1/50 to 1/90 of that to Si and the saturation drift velocity in Ge is about 2/3 of that in Si. Therefore, it is expected that the temporal resolution limit of the Ge PD is less than 1/30 of the theoretical limit of the Si PD. Therefore, our target is Ge-filled concave-pyramid structure as a charge collection layer.

## 3. Fabrication method and results

To fabricate the concave pyramid structure, an oxide film mask with a square shape of 10 μm was formed on a silicon wafer and etched with a 20 wt% TMAH solution. The etching temperature was 80 °C, and etching was performed from 100 sec to 113 sec to etch 0.5 μm depth.

Then we developed a new method to form the oxide film on the sidewalls without a second lithography step, which requires precise alignment. The oxide film is thermally oxidized followed by RIE etching to achieve the sidewall

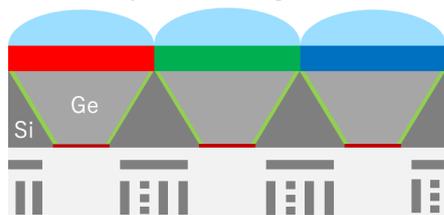


Fig.1 Concave-pyramid Ge-photodiode structure

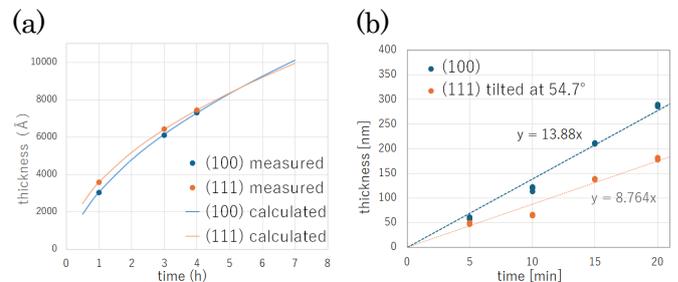


Fig.2 Comparison of fabrication velocity between (100) and (111) plane; (a) Oxidation, (b) SiO<sub>2</sub> etching

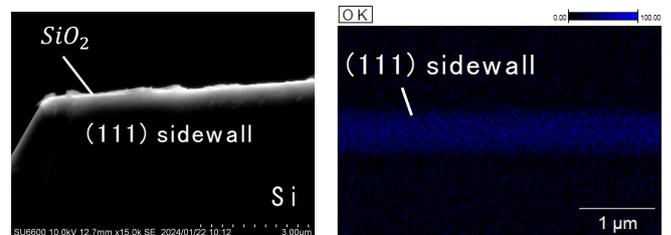


Fig.3 SEM image of concave pyramid structure with SiO<sub>2</sub> film on inclined (111) wall.

oxide film without a second photolithography.

Using the difference in oxide film thickness between (100) and (111) due to thermal oxidation as shown Fig. 2(a), SiO<sub>2</sub> on (111) plane is thick at appropriate oxidation times. In addition, etching depth depends on the angle between the etching source flux and the substrate. Figure 2(b) shows the etching depth of (100) and (111), which has lower etching rate due to the crystallographic angle of 54.7°.

Figure 3 shows a cross-sectional SEM image and EDS of the fabricated structure. EDS mapping shows the distribution of oxygen on the sidewall. It was confirmed that SiO<sub>2</sub> film was left on the inclined wall.

## 5. Conclusions

We successfully fabricated pyramid structure with SiO<sub>2</sub> sidewalls with efficient fabrication method. The next step will be to epitaxially growth Ge inside the structure.

## Acknowledgements

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP22K18797.

## References

- [1] T.G. Etoh et al., Sensors, **19**(10), (2019) 2247.
- [2] Ngo, N.H., Sensors, **20**, (2020) 6895.
- [3] T.G. Etoh et al., Sensors, **17**(3), (2017) 483.

## Self-assembled monolayer as the surface passivator for efficient and stable ZnO-based perovskite solar cells

Jannatul Ferdous<sup>1,2,3</sup>, Md. Emrul Kayesh<sup>2</sup>, Mostafa F. Abdelbar<sup>1</sup>, Wipakorn Jevasuwan<sup>1</sup>, Ashraful Islam<sup>2</sup>, Naoki Fukata<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Centre for Materials Nanoarchitectonics, National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba, Ibaraki 305-0044, Japan

<sup>2</sup>Photovoltaic Materials Group, Center for Green Research on Energy and Environmental Materials, National Institute for Materials Science (NIMS), 1-2-1 Sengen, Tsukuba 305-0047, Japan

<sup>3</sup>Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

**E-mail address:** fukata.naoki@nims.go.jp; islam.ashraful@nims.go.jp

Organic-inorganic perovskite solar cells (PSCs) have emerged as exciting prospects for renewable energy technology because of their high performance and low fabrication cost. An essential component of these highly efficient solar cells is the electron transport layer (ETL), which ensures selective electron contact and reduces recombination phenomena to improve device performance. Zinc oxide (ZnO) is highly regarded as a promising ETL in solar cells because of its exceptional transparency, superior electron mobility, advantageous energy level, and versatile structural properties (Figure 1).<sup>1-2</sup> However, the application of ZnO is currently restricted due to the adverse reverse decomposition reaction at ZnO/perovskite interfaces. The presence of surface hydroxyl groups accelerates the decomposition process.<sup>3</sup> This reaction greatly diminishes the efficiency of charge collection and stability of PSCs. Here we introduced a simple yet effective technique for passivating the ZnO surface using a chelating agent (polydentate ligand). The integration of the chelating agent resulted in the formation of Zinc-Polydentate ligand complex on the ZnO surface. This metal complex served as a self-assembled monolayer (SAM) and effectively passivated the ZnO surface. The utilization of chelation-processed to passivated ZnO results in the fabrication of thermally stable perovskite film with enhanced crystallinity and increased grain size (Figure 2). Consequently, the performance of the ZnO as ETL based PSC experienced a significant improvement in power conversion efficiency up to 17%.

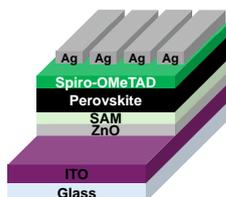


Figure 1: Schematic diagram of PSC

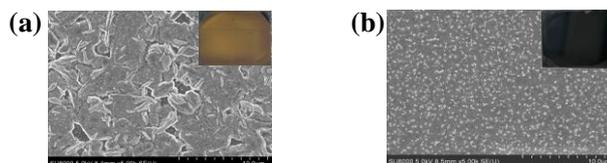


Figure 2: SEM images of perovskite film on (a) ZnO and (b) ZnO/SAM. The inset images of panels (a) and (b) show the optical images of perovskite films on ZnO and ZnO/SAM films.

### References

1. Q. Zhang, C. S. Dandeneau, X. Zhou, G. Cao, *Adv. Mater.* 2009, 21, 4087.
2. D. Liu, T. L. Kelly, *Nat. Photonics* 2014, 8, 133.
3. J. Yang, B. D. Siempelkamp, E. Mosconi, F. De Angelis, T. L. Kelly, *Chem. Mater.* 2015, 27, 4229

## 水中光無線給電用 GaInP 太陽電池の低温特性

Low temperature operation of GaInP solar cells for underwater optical wireless power transmission

千葉工業大学 (M1)李紀コン, 飯田健寛, 高橋 龍成, 鈴木淳一, 渡邊 康祐, 内田 史朗

Chiba Institute of Technology, Li Jikun, Takehiro Iida, Ryusei Takahashi, Junichi Suzuki,

Kosuke Watanabe, Shiro Uchida

E-mail: s20a3123gb@s.chibakoudai.jp

[背景]現状では、水中探査機などへの電力供給は有線ケーブルで行われている。その電源がバッテリーに依存している場合、持続的な運用が困難な場合もある。そこで、水中における光無線給電伝送が注目されている。深海水の温度は  $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$  と非常に低いことから、海中探査機への光無線電力伝送の応用を考え、受光素子である GaInP 太陽電池の低温での光電変換効率を調査した。

[実験方法]Fig.1.に実験の概要図を示す。本実験ではバンドギャップエネルギーが  $1.89\text{ eV}$ 、 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$  の GaInP 太陽電池を用いた。短絡電流  $I_{sc}$ 、開放電圧  $V_{oc}$ 、曲線因子  $FF$ 、光電変換効率  $\eta_{pv}$  を測定するために、波長  $450$ 、 $532$ 、 $635\text{ nm}$  の 3 種類のファイバレーザ光を平凸レンズで集光し GaInP 太陽電池に照射した。温度の調整にはペルチェ素子を用い太陽電池の温度測定にはデジタル指示計とシース熱電対を用いた。

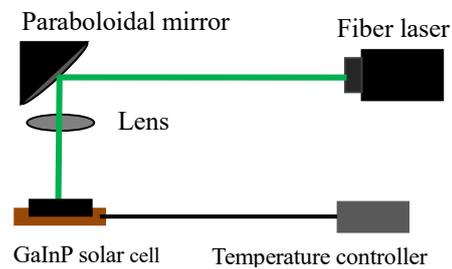


Fig.1. Experimental configuration

[結果および考察]Fig.2.に GaInP 太陽電池の光電変換効率の温度依存性を  $5^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$  の範囲で示した。532 nm レーザが最も高い光電変換効率を示し、次いで、635 nm、450 nm の順に効率が高かった。450nm, 532 nm レーザ照射の場合は温度が低下するにつれて、変換効率が上昇した。635 nm レーザ照射では低温化するにつれて  $20^{\circ}\text{C}$  までは効率は上昇したが、 $5^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$  付近では一定の値となった。これは、450, 532 nm の場合は、短絡電流は温度が低下すると上昇する傾向が見られたが、635 nm の場合は短絡電流が低下したことがその原因である。これらの現象は低温時に EQE が短波長化する為だと考えられる[1]。

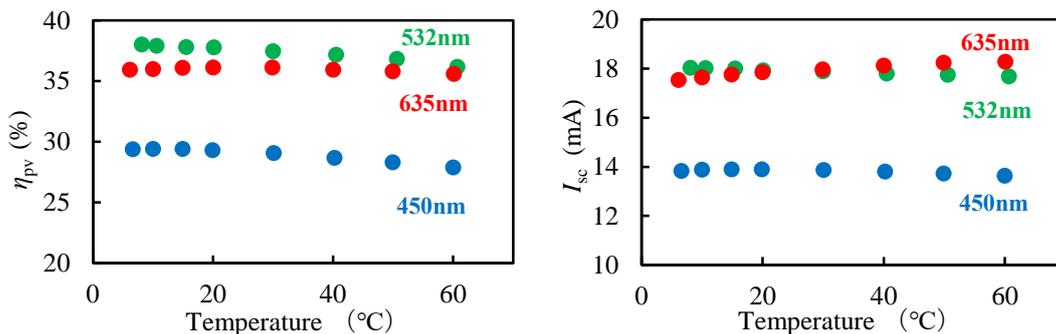


Fig.2. Temperature Dependence of GaInP Solar Cell Characteristics

[謝辞]本研究の一部は JSPS 科研費 JP21K03982 の助成を受けたものです。

[参考文献]

- [1]. Takahashi, R.; Hayashi, S.; Watanabe, K.; Jikun, L.; Iida, T.; Suzuki, J.; Uchida, S. Optical Wireless Power Transmission under Deep Seawater Using GaInP Solar Cells. *Energies* 2024, 17, 1572.

# 光無線給電用 CIGS 太陽電池の光電変換効率の温度依存性

## Temperature dependence of photoelectric conversion efficiency of CIGS solar cells for OWPT

千葉工業大学<sup>1</sup>, 出光興産<sup>2</sup> ◯(M1)千葉 萌翔<sup>1</sup>, 藤井 駿太郎<sup>1</sup>, 佐藤 恭輔<sup>1</sup>, 前野 陸<sup>1</sup>,

渋井 駿昌<sup>1</sup>, 小牧 弘典<sup>2</sup>, 富田 仁<sup>2</sup>, 中村 浩昭<sup>2</sup>, 小田 雄介<sup>2</sup>, 石内 隆鳳<sup>2</sup>, 内田 史朗<sup>1</sup>

Chiba Institute of Technology.<sup>1</sup>, Idemitsu Kosan Co., Ltd.<sup>2</sup>, ◯(M1) Moeka Chiba<sup>1</sup>, Shuntaro Fujii<sup>1</sup>,

Kyosuke Sato<sup>1</sup>, Riku Maeno<sup>1</sup>, Shunsuke Shibui<sup>1</sup>, Hironori Komaki<sup>2</sup>, Hiroshi Tomita<sup>2</sup>,

Hiroaki Nakamura<sup>2</sup>, Yusuke Oda<sup>2</sup>, Takato Ishiuchi<sup>2</sup>, Shiro Uchida<sup>1</sup>

E-mail: s20A3084MY@s.chibakoudai.jp

### 1. 背景

情報通信技術の無線化が進み、スマートフォンなどのデバイスの無線給電技術が発展している中でレーザと受光デバイスを用いる光無線給電(Optical Wireless Power Transmission; OWPT) が注目されている。CIGS 太陽電池は直接遷移型半導体であり、高効率化と低コスト化を両立できる可能性がある為、光無線給電用受光デバイスとして期待されている。本研究では、過去に報告した 1064 nm[1]に加えて、635 nm と 1208 nm のレーザ光を CIGS 太陽電池照射し、その光電変換効率の温度依存性を調査したので報告する。

### 2. 実験方法

図 1 に実験概要図を示す。635nm, 1208 nm のレーザ光を 15 mm×15 mm の開口マスクを通して CIGS 太陽電池に照射した。このとき、CIGS 太陽電池の温度を 20 °C から 60 °C の間で変化させ、照射パワー強度  $P_{in}$  を 635 nm では 500 mW、1208 nm では 200 mW に固定し太陽電池の最大出力電力  $P_{out}$  を測定することで、光電変換効率  $\eta_{pv} = P_{out} / P_{in}$  を算出した。

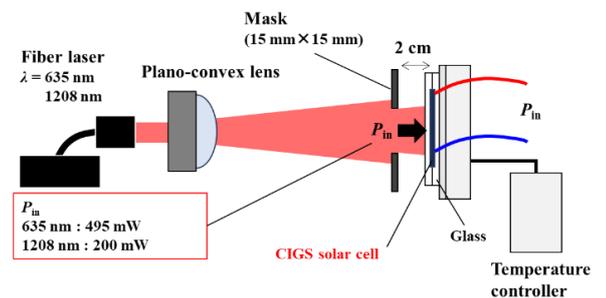


Fig.1. Experimental configuration

### 3. 結果と考察

図 2 に CIGS 太陽電池の光電変換効率  $\eta_{pv}$  の温度による変化率を示す。20°C から 60°C にかけての  $\eta_{pv}$  の低下率が 635 nm レーザ光照射では 20%程度となったが、1208 nm や 1064nm 照射では約 10%に留まった。真夏の太陽光下ではシリコン太陽電池の変換効率が 20-30%低下する事を考えると、CIGS 太陽電池は近赤外レーザ光照射下で  $\eta_{pv}$  の高温時の低下は少なく、光無線給電システムへの応用が期待される。

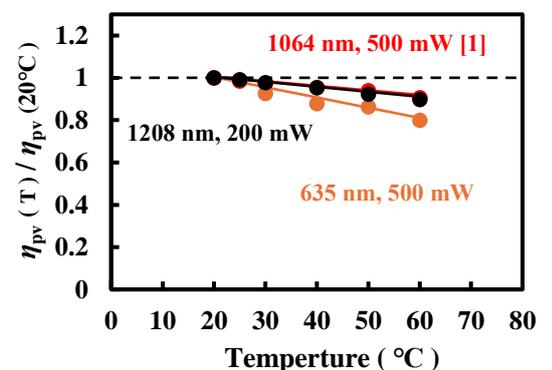


Fig.2.  $\eta_{pv}$  vs. Temperature

### 参考文献

[1] M. Chiba et al, "Photoelectric conversion characteristics of CIGS solar cells under 1064nm laser light irradiation", The 6th Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference, OWPT7-03 (2024).

## 光無線給電における PV パネルのビーム走査による発電量の向上

### Improvement of power generation by beam scanning of PV panel in optical wireless power transmission

NTT 宇宙環境研<sup>1</sup>, °落合 夏葉<sup>1</sup>, 鳥海 陽平<sup>1</sup>, 青貫 翔<sup>1</sup>, 鈴木 優紀子<sup>1</sup>, 柏倉 一斗<sup>1</sup>,  
高橋 円<sup>1</sup>

NTT Space Environment and Energy Lab.<sup>1</sup>, °Natsuha Ochiai<sup>1</sup>, Yohei Toriumi<sup>1</sup>, Sho Aonuki<sup>1</sup>,  
Yukiko Suzuki<sup>1</sup>, Kazuto Kashiwakura<sup>1</sup>, Madoka Takahashi<sup>1</sup>

E-mail: natsuha.ochiai@ntt.com

光無線給電において、光を電力に変換する光電変換効率の向上が課題である[1]。一般的に、ハイパワーのレーザを電力に変換する際は、PV パネル(Photovoltaic パネル)後段での内部抵抗損失を抑えるため、セルを複数直列化し、取り出す電圧を大きくする。しかし、セルを複数直列すると、セルごとに取り出せる電流にばらつきがあった場合、直列化による電流制限が大きくなり、光電変換効率が悪化してしまう[2]。本研究では、複数のセルを直列化した PV パネル上をビーム走査することで、電圧値を大きくしたまま、光電変換効率を向上させたので報告する。

実験系を Fig. 1 (a)に示す。波長 1064 nm のファイバレーザから射出されたビームを焦点距離 75 mm の Lens1 でスカンナに集光する。焦点距離 200 mm の Lens2 でビームをコリメートし、550 mm 角の単結晶 SiPV セルを 3 つ横方向に直列接続した PV パネルに照射する。PV パネルに照射するビーム径は 1 つのセルに収まるよう調整する。各セルには 1 mF のコンデンサを並列に接続し、セルにレーザが照射されていなくてもコンデンサから電流が供給され、電流制限を受けずに発電を行うことができる。2W のレーザを照射した際の発電特性を Fig.1 (b), (c)に示す。発電特性は PV パネルに電子負荷を接続し、電圧を変化させて電流を計測し、発電量を得た。ビーム走査をせず、単セルにレーザを照射した時の結果が Fig.1 (b)、周波数 300 Hz、ビームの中心が両端のセルの中心に到達するようビームを走査した時の結果が Fig.1 (c)である。最大発電量は、単セルでは電圧 0.4 V の時、87.2 mW、ビーム走査した PV パネルでは電圧 1.1 V の時、133.1 mW となった。

このように、各セルにコンデンサを並列に接続し、PV パネルをビーム走査することで、電圧値を約 3 倍にして電流値を抑えつつ、発電量を 1.5 向上させることができた。本手法により、PV パネルに均一にビームが照射することができなくても光電変換効率を向上することができる。

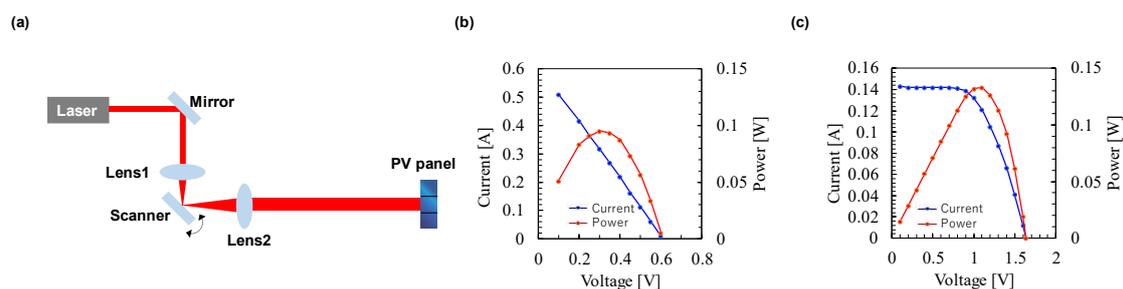


Fig. 1 (a) Schematic of PV scanning optics. (b), (c) I-V curves and P-V curves with single cell and scanned panel (three cells are connected in one series). Blue line: I-V curve, red line: P-V curve.

#### 参考文献

[1] K. Jin and W. Zhou, "Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress," IEEE Trans. Power Electron., **34**, 4, 3842-3859 (2019).

[2] N. Ochiai, Y. Toriumi, Y. Suzuki, K. Kashiwakura, and T. Tanaka, "Optical wireless power transmission for space solar power systems," The 44th Annual Meeting of The Laser Society of Japan (2024).

# シリコンフォトニクス応用に向けた窒化ゲルマニウム薄膜の反応性スパッタ堆積 Reactive Sputtering Deposition of Germanium Nitride Thin Films for Silicon Photonics Applications

豊橋技科大, °(M1)岡垣 颯, Jose A. Piedra-Lorenzana, 飛沢 健, 山根 啓輔, 石川 靖彦  
Toyohashi Univ. Tech. °(M1) So Okagaki, Jose A. Piedra-Lorenzana, Takeshi Hizawa,  
Keisuke Yamane, Yasuhiko Ishikawa,  
E-mail: okagaki.so.nd@tut.jp, ishikawa@ee.tut.ac.jp

## 1. はじめに

シリコンフォトニクスにおいて、 $\text{SiN}_x$  リング光共振器が波長変換・光周波数コム発生に広く利用されている。 $\text{SiN}_x$ は、(1) 線形屈折率  $n_0$  が約 2.0 と大きく強い光閉じ込めが可能 ( $\text{SiO}_2$  クラッド: 約 1.5)、(2) バンドギャップ  $E_g$  が約 5.0 eV であるため光通信波長 1.31/1.55  $\mu\text{m}$  において二光子吸収がない、といった特長がある。一方、(3) 3 次非線形光学効果が小さく (非線形屈折率  $n_2 = 0.25 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ) 高 Q 値のリング共振器 (高い加工精度) が必要、である。シリコンフォトニクスで利用でき、より高い非線形光学効果を有する材料が望ましい。 $n_2$  の大きさは  $E_g^{-4}$  に依存することが報告されている[1]。二光子吸収の抑止を考慮すると、 $E_g$  が 2.0 eV 程度の材料が効果的と考えられる。本研究では、手始めとして  $\text{GeN}_x$  を検討した。理想的な  $\gamma\text{-Ge}_3\text{N}_4$  の  $E_g$  は 2.3 eV [2]、 $n_0$  は 2.4 程度 (可視域) [3] であるが、 $n_2$  は不明である。今回は、 $\text{GeN}_x$  薄膜を反応性スパッタリングにより堆積し、分光エリプソメトリーにより  $n_0$  および光吸収係数  $\alpha$  を評価した。

## 2. 実験方法

4 インチ  $\text{Si}(100)$  基板上に高周波反応性スパッタリングを用いて  $\text{GeN}_x$  を堆積した。 $\text{Ge}$  をターゲットとし、 $\text{Ar}$  および  $\text{N}_2$  をガスに用いた。堆積温度は 200°C、圧力は 0.5 Pa である。RF パワーおよび  $\text{Ar}/\text{N}_2$  ガス流量比をパラメータとした。分光エリプソメトリーを用いて、波長範囲 190 ~ 2000 nm における  $n_0$  および消衰係数  $\kappa$  を測定した。 $\kappa$  から吸収係数  $\alpha = 4\pi\kappa/\lambda$  を求めた。参照試料に  $\text{SiN}_x$  反応性スパッタ膜[4]および  $\text{Si}(100)$  基板上  $\text{Ge}$  エピタキシャル層を用いた。

## 3. 実験結果と考察

Fig. 1 に  $\text{GeN}_x$  反応性スパッタ膜の  $n_0$  および  $\alpha$  の波長依存性を示す (RF パワー 100 W、 $\text{Ar}/\text{N}_2$  ガス流量比 1 および 2)。 $\text{N}_2$  ガスの割合を増加することで  $n_0$  が減少した。 $\text{Ar}/\text{N}_2$  ガス流量比 1 における光通信波長 1.31/1.55  $\mu\text{m}$  (可視域) での  $n_0$  は約 2.2 であり (可視域: 2.2 ~ 2.5)、 $\text{SiN}_x$  の約 2.0 よりも高い値であった。また、 $n_0$  の減少に伴って  $\alpha$  も減少した。しかし、バンドギャップの理想値  $E_g = 2.3 \text{ eV}$  に対応する波長 540

nm 近辺において光吸収を抑えられていない。 $\text{Ge}$  過剰の  $\text{GeN}_x$  ( $x < 4/3$ ) が形成されていると考えられる。スパッタ中の  $\text{N}_2$  ガスの割合をさらに増加することが効果的と考えられる。

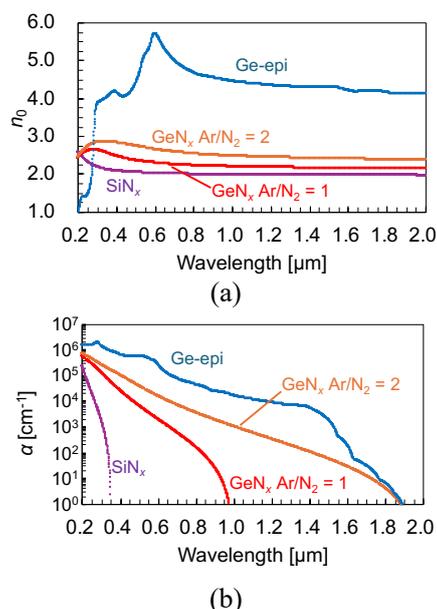


Fig. 1. Spectra of (a)  $n_0$  and (b)  $\alpha$  for  $\text{GeN}_x$ .

## 4. まとめ

シリコンフォトニクスで利用でき、 $\text{SiN}_x$  よりも高い非線形光学効果を有する可能性のある  $\text{GeN}_x$  の反応性スパッタ堆積を検討した。ほぼ想定通りの線形屈折率が得られたが、さらなる光吸収の低減が必要である。

## 謝辞

分光エリプソメトリーの測定に協力いただいた堀場テクノサービス・和才容子様に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] M. Sheik-Bahae et al., Phys. Rev. Lett. 65, 96 (1990).
- [2] M. Yang et al., J. Appl. Phys. 102, 013507 (2007).
- [3] C.-H. Li et al., Phil. Trans. R. Soc. A 381, 20230016 (2023).
- [4] R. Tsuchiya et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 22, 4400109 (2022).