

2019年度 新産業創出研究会「研究成果報告書」

「ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型紫外高感度集積 APD の開発」

[鳥取大学 ・ 准教授] [阿部 友紀]

1. はじめに

近年、高速 PET システムの実現に大きな期待が寄せられており、そのキーデバイスとなる紫外線変換型の高速シンチレータと紫外アバランシェフォトダイオード(APD) の性能が次世代高速 PET システム実用化を決定づける。そこで本研究では、従来の光電子増倍管を紫外 APD に置き換えて次世代高速・高精細 PET システムに導入するために ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型紫外高感度集積 APD の開発を目指した。

2. 概要

本研究では、ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型 APD により紫外 APD のもつ感度および暗電流などの課題を打破して、紫外線領域で初めて実用的な集積型 APD を実現することを目的とする。光検出器の性能で最も重要なものは、高い感度(外部量子効率) および低い暗電流であり、この両立により高い光検出能 D^* が実現される。本研究は、図 1 に示すように無機層として ZnSSe を、有機層として PEDOT:PSS を用いた ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型 APD において、低暗電流化・安定動作化、および集積化を目指し、実用に供しうる紫外線領域の全固体高感度集積型光検出器を実現しようとするものである。

本研究では、高密度集積化 APD アレイの実現を目的とする。そのために、均一な素子形状が求められる。まず、均一な窓層形成にフォトリソグラフィの導入を検討する。フォトリソグラフィによって作製された素子の特性を評価し、従来のインクジェット法を用いた素子との比較を行なう。また、窓層形成後の電極について、Ag ペーストを用いた手作業によるボンディングの代わりに、金属薄膜電極を形成することで、電極形状の均一化を図った。

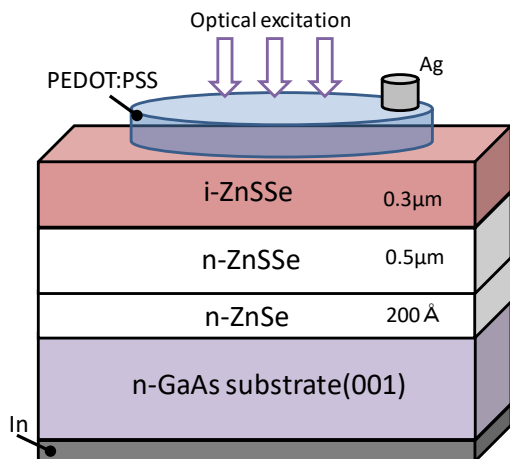


図 1: 単一 ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型光検出器

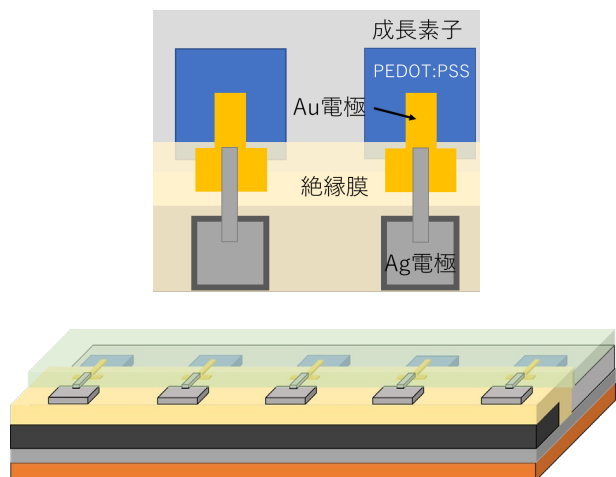


図 2: ZnSe 系有機-無機ハイブリッド型集積 APD

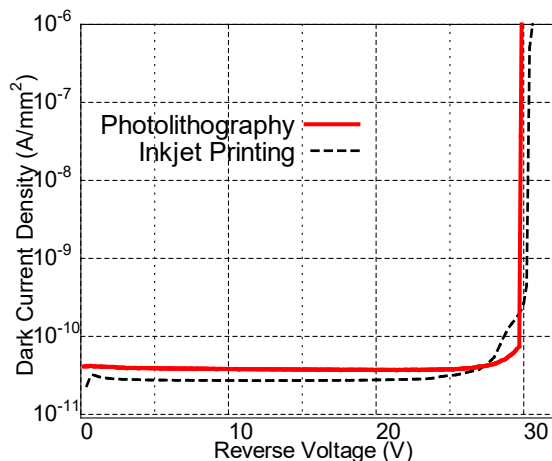


図 3：暗電流特性の比較

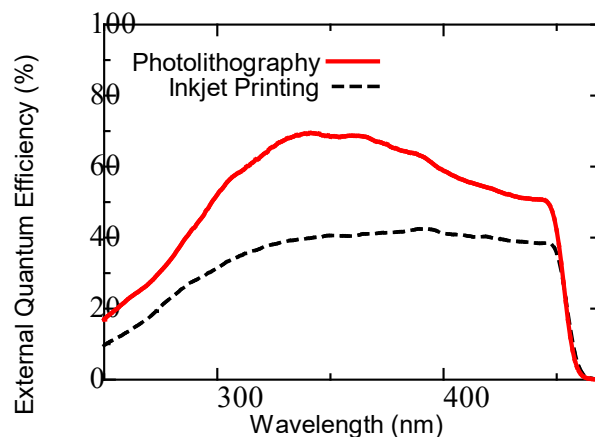


図 4：外部量子効率の比較

3. 研究成果および今後の課題

本研究で最適化したフォトリソグラフィプロセスで作製した ZnSe 系有機-無機ハイブリッド構造 APD の諸特性について述べる。特に、これまで有機-無機ハイブリッド APD の作製に主に用いてきたインクジェット法で作製した APD の素子特性と比較して、新規プロセスが実用的であるか評価した。その後、外部電極プロセスを行い、その有効性を検証した。

3.1 暗電流特性

フォトリソグラフィとインクジェット法による作製素子の暗電流特性の比較を図 3 に示す。ブレークダウン電圧は約 30V であり、インクジェット法作製素子と同程度であった。また、ブレークダウン直前での暗電流密度も $\sim 10^{-10} \text{ A/mm}^2$ 以下と低暗電流の素子が作製できていることが確認できた。この結果から、フォトリソグラフィによる窓層形成においてもインクジェット法と同様に、良好な PEDOT : PSS/i-ZnSSe ショットキー界面が形成されることが示された。

3.2 外部量子効率

次に、外部量子効率の特性比較を図 4 に示す。図 4 より、フォトリソグラフィ素子では 300～440nm の波長帯において 50%以上の量子効率を達成され、最大量子効率は波長 340nm における 70%であった。量子効率向上の要因として、窓層の薄膜化による吸収損失の低減が考えられる。

3.3 分光感度スペクトル

スピコート法で作製した APD 素子の分光感度スペクトルを図 5 に示す。ゼロバイアス状態 ($M=1$), 29.34 V, 29.85 V, 29.98 V, 30.15 V, 30.26 V ($M=10, 20, 30, 60, 110$) でのバイアス状態の計 6 通りで測定を行った。印加電圧が上昇するにつれて吸収端がレッドシフトしているが、これは Franz-Keldysh 効果と呼ばれ、高バイアス時に電子と正孔の波動関数が染み出すことで起こる現象である。図より、波長 338 nm において 30.15 V のバイアス状態で最大受光感度約 6.5 A/W, 30.26 V のバイアス状態で最大受光感度約 10 A/W が得られた。また、Pr:LuAG の対応波長である 310 nm においては 30.26 V で受光感度約 8.4 A/W の値が得られた。

3.4 増倍率特性

フォトリソグラフィとインクジェット法による作製素子の増倍率特性を図 6 に示す。測定時の光源には He-Cd レーザ ($\lambda=325 \text{ nm}$) を用いた。これまでインクジェット法で作製した素子で得られていた最大増倍率が、増倍層膜厚が同じ $0.3 \mu\text{m}$ の素子において 90 倍であったのに対し、フォ

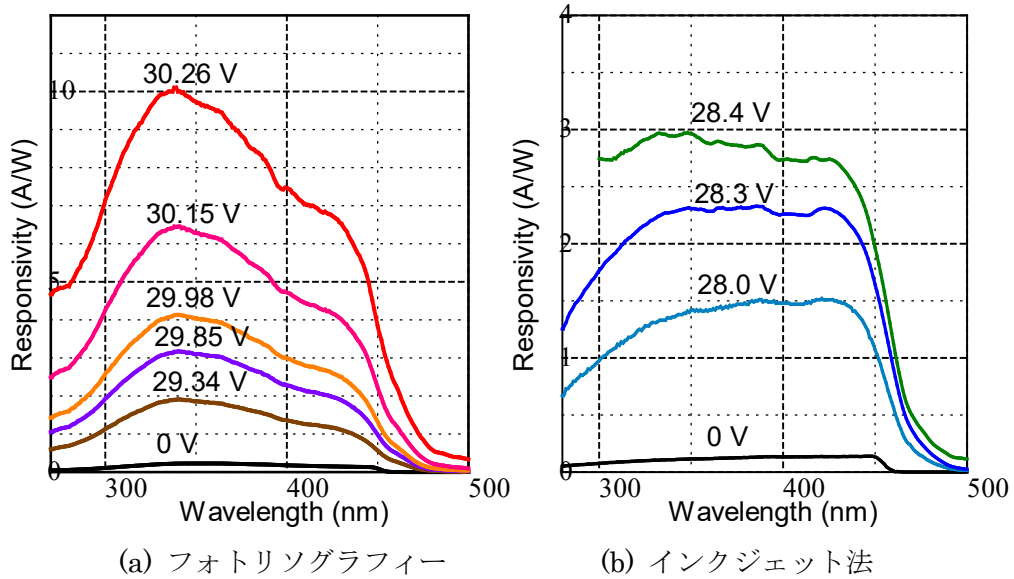


図 5 分光感度特性の比較

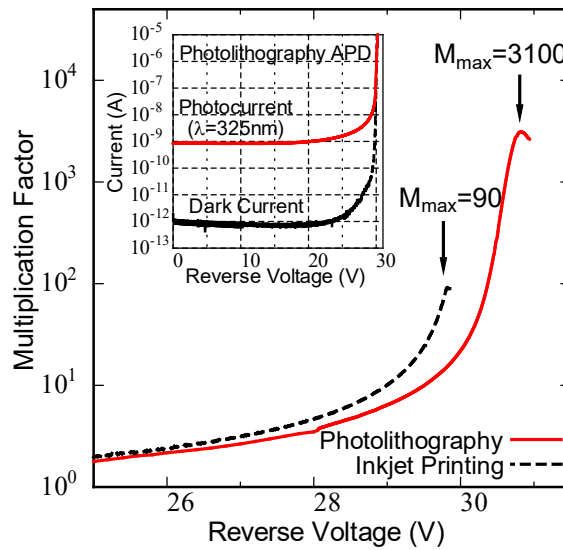


図 6 増倍率の比較およびフォトリソグラフィ素子の光電流特性と暗電流特性(挿入図)

トリソグラフィでの作製素子は最大増倍率が印加電圧 30.83 V において約 3100 倍という結果を示した。

3.5 SU-8 保護膜と薄膜電極の形成

次に、SU-8 絶縁膜の形成と外部電極形成を行った。まず、SU-8 絶縁膜をフォトリソグラフィにより APD 基板上に形成する。その上に電極用フォトレジストをパターンニングし、Au/Ti 薄膜を電子ビーム(EB)蒸着により蒸着した。フォトレジストをリフトオフすることで薄膜電極を形成した。形成後の素子表面顕微鏡画像を図 7 に示す。図 7 に示すように、絶縁膜上から窓層上にわたって想定通りに薄膜電極が形成されていることがわかる。次に、薄膜電極が形成された素子の I-V 特性を図 8 に示す。図 8 より、電圧値 28V において急峻なブレークダウンが確認された。これにより、絶縁膜および薄膜電極の形成によって APD 動作が損なわれないことが示された。

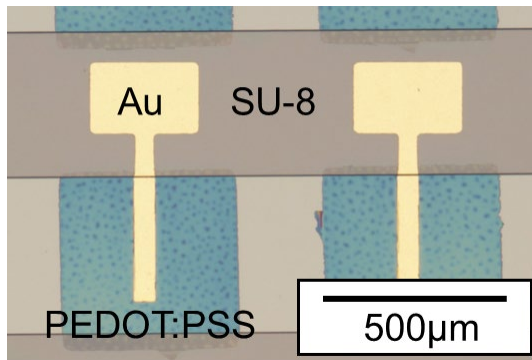


図 7 : 絶縁膜と Au/Ti 電極を有する APD 素子

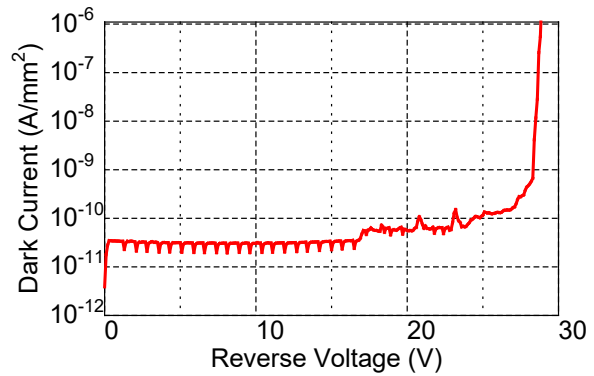


図 8 : Au/Ti 電極形成後の I-V 特性

4. おわりに

本研究では、フォトリソグラフィによって窓層形成された素子の諸特性を解析し、インクジェット素子との比較を行なった。逆方向 I-V 特性ではブレイクダウン直前のリーク電流が 10^{-10}A/mm^2 以下でインクジェット素子と同様に高品質であり、外部量子効率 は波長 340nm で最大 70% となった。また、最大増倍率は 3100 倍とインクジェット素子と比べて大きく向上した。

次に、APD 基板上にフォトリソグラフィで SU-8 絶縁膜を形成し、EB 蒸着で Au/Ti 薄膜電極を形成した。これにより、窓層表面に直接ボンディングしない均一な電極が形成され、電極形成後の素子で APD 動作が確認された。

5. 本研究の今後の計画

フォトリソグラフィ素子における増倍率向上の要因を特定し、素子品質の歩留まり向上を目指す。また、フォトリソグラフィによる窓層形成、および Au/Ti 薄膜電極の設置後、外部基板と Ag スクリーン電極を設置することで集積化一次元アレイの作製を試みる。作製された一次元アレイの素子特性の評価を行なう。

6. その他

(1) 出願特許(タイトル・出願番号・発明者・特許権者など)
なし

(2) 投稿論文(タイトル・学会名等)

Y. Ichikawa, K. Tanaka, K. Nakagawa, Y. Fujii, K. Yoshida, K. Nakamura, R. Miyazaki, T. Abe, H. Kasada, K. Ichino, and K. Akaiwa, "High gain ultraviolet avalanche photodiodes using ZnSe-based organic-inorganic hybrid structure", J. Electronic Materials, DOI: 10.1007/s11664-020-07970-w (2020).

(3) 本研究会の参加企業・団体名

鳥取大学, 協同電子株式会社, 中国経済産業局, 中国地域創造研究センター



競輪の補助事業

この事業は、競輪の補助を受けて実施しました。

<https://www.jka-cycle.jp/>