

超高感度広波長域量子細線フォトディテクタアレイの開発 (042203008)

Highly sensitive and wide spectra-range quantum wire Photodetector Array

研究代表者

小倉睦郎 独立行政法人産業技術総合研究所
Mutsuo Ogura Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

研究分担者

王 学論[†] 菅谷武芳[†] 樋口博文[†] 飯岡正行[†] 宮川俊哉^{††} 磯村尚友^{††} 本城和彦^{†††} 石川亮^{†††}
Xue-Lun Wang[†] Takeyoshi Sugaya[†] Hirofumi Higuchi[†] Masayuki Iioka[†] Tosiya Miyakawa^{††}
Takatomo Isomura^{††} Kazuhiko Honjo^{†††} Ryo Ishikawa^{†††}
[†]産業技術総合研究所 ^{††}京セミ株式会社 ^{†††}電気通信大学
[†]AIST ^{††}Kyosemi Corporation ^{†††}University of Electro-Communications

研究期間 平成 16 年度～平成 20 年度

概要

本研究では、高い感度と広範囲な波長域を持つ InGaAs/InP 系正孔注入型電界効果トランジスタ (HI-FET) と利得増強型ヘテロバイポーラフォトトランジスタ (GE-HPT) アレイを提案し、シミュレーションと実験結果を検証しながら開発した。これらのフォトトランジスタは、Zn 拡散を素子の端面に施すことで電流ブロック層を形成し、表面再結合電流を抑制することにより、室温において数十 fW レベル以下の高い検出感度と 6 桁におよぶダイナミックレンジを有している。また、従来のシリコン素子や化合物半導体素子単体では対応不可能である 0.5 μm から 1.6 μm の広範囲な波長域を単一素子で検出可能である。HI-FET は、ゲートによるスイッチ機能を有するため、従来の化合物半導体撮像素子で用いられている FPA(Focal Plane Array)構造で必要な、2 次元フォトダイオードアレイと 2 次元シリコンチャージアンプアレイとの貼り合わせの工程が不要となる。更に、フォトトランジスタからの μA レンジの電流出力をシリコン IC 上の限られたキャパシタンスで積分するために、 $\Delta\Sigma$ 型変調器を用いた電荷アンプアレイを試作した。

Abstract

A highly sensitive and wide wavelength range InGaAs/InP hole-injection photo-FET (HI-FET) and gain enhanced hetero-bipolar phototransistor (GE-HPT) arrays designed to reduce the surface recombination currents with a Zn-doped mesa sidewall are realized. These photo-transistors have a detection limit of several tens of femtowatts at room temperature and a wavelength range of 0.5 to 1.6 μm with a large dynamic range of 6 orders of magnitude. The HI-FET has a gate function for addresses the pixels and a 2D infrared camera is available without a focal plane array structure, which requires a wafer bonding technique between a PIN photodiode array and readout ICs. A $\Delta\Sigma$ charge amplifier array IC is also developed to integrate the large optical response of the phototransistors in the microampere range.

1. まえがき

高い感度と広範囲な波長域を持つ赤外光検出素子およびアレイは、赤外分光計測を始め、環境モニタ、防災、無侵襲医療など広い分野で求められている。しかし、従来のフォトダイオード、アバランシェフォトダイオードおよびフォトトランジスタには、それぞれ、増幅率や均一性、あるいは暗電流の問題があり、外部増幅器を含めた赤外光検出器アレイシステムとして十分な感度とダイナミックレンジが得られなかった。本研究では、メサ構造側面に電流ブロック層を設けて暗電流を抑制し、可視から近赤外波長までフェムトワットレベルの感度を持つフォトトランジスタアレイの開発に成功した。

2. 研究内容及び成果

図 1 に、フォトダイオード(PD)と電界効果トランジスタ(FET)を同一エピタキシャル上に集積した光 FET の模式図を示す。光 FET では、PD に発生した正孔を FET のチャンネルに注入し、チャンネル表面に形成した正孔バリアにより正孔を停留させることにより、正孔のライフタイムを電子の走行時間で割った値に相当する高い電流利得を得る。一方、ヘテロバイポーラフォトトランジスタ(HPT)では、トランジスタのベース・コレクタ接合を PD として用い、エミッタ・ベースヘテロ接合に正孔を停留させるが、いずれも、PD 相当部分で発生した微小電流をトランジスタ

で増幅するため、PD での暗電流を抑制することが、検出感度を確保するポイントとなる。そこで、選択 Zn 拡散を用いて、電流ブロック層を形成し、表面に露出する PN 接合を比較的バンドギャップの大きな InP とすることにより、暗電流の大幅な抑制を達成した。PD と FET を集積した HI-FET では、数百、HPT の端面に電流ブロック層を設けた GE-HPT では、数千の内部利得を有するので、増幅作用の無い PD に比べて数十倍の検出感度の向上が確認できた(図 2)。また、PD の上部をエピタキシャル成長により薄く形成することにより、可視から赤外まで広い波長範囲をカバーすることができる(図 3)。

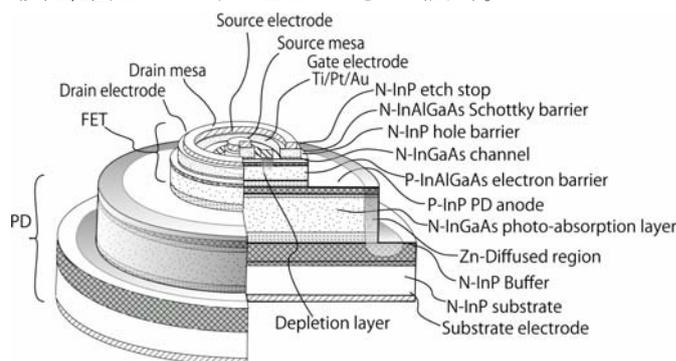


図 1 正孔注入型光 FET (HI-FET) の模式図

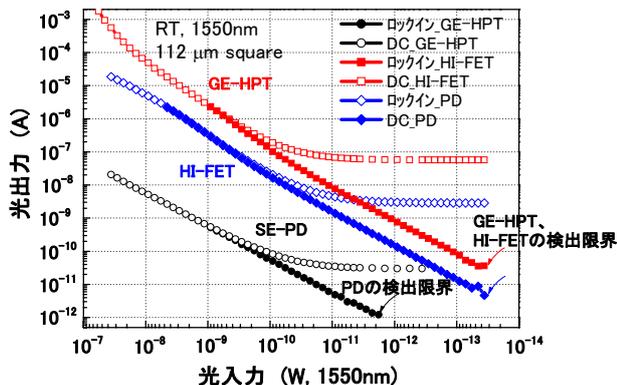


図2 GE-HPT, SE-PD および HI-FET の光量-光出力特性

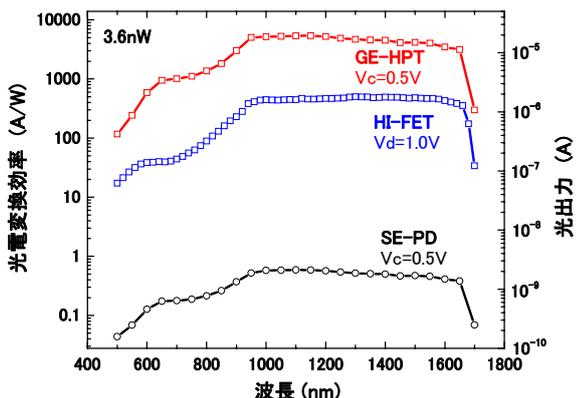


図3 利得増強型ヘテロバイポーラフォトトランジスタ (GE-HPT) 正孔注入型光 FET (HI-FET) および スペクトラ拡張型フォトダイオード (SE-PD) の分光スペクトラム

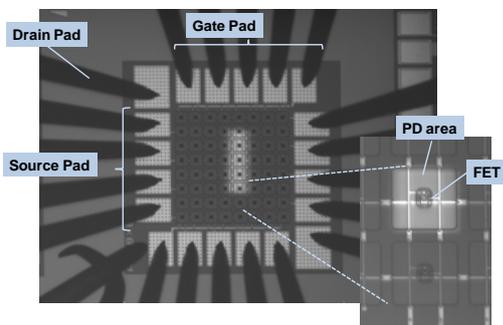


図4 分光顕微鏡装置下でプロービングテスト中の 8x8 HI-FET アレイ。 矩形スリットを通過した光を試料上に選択投影する。

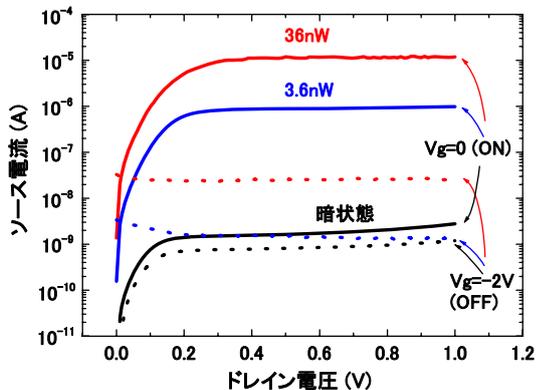


図5 8x8 マトリックスの (3, 3) 画素におけるドレイン電圧-ソース電流の入射光量依存性。ゲート ON ($V_g=0V$ 、実線)、ゲート OFF ($V_g=-2V$ 、点線)

HI-FET は、ゲートバイアスにより画素選択が可能である。8x8 光 FET アレイでのゲート電圧による光応答の ON、OFF 機能を確認した (図 4, 5)。

3. むすび

本プロジェクトにより、PD とあまり変わらない製造プロセスで、単一エピタキシャル上にモノリシックに 1,000 倍以上の増幅率を持つ GE-HPT が実現できた。歩留まりもフォトダイオードと特に変わらないので集積化も容易である。更に、HI-FET の場合は、上部に設けた FET により感度の調節やマトリクススイッチの機能を付加することができるため、従来は、2 次元の PIN フォトダイオードと 2 次元のシリコン読み出し IC との貼り合わせ工程が必要であった撮像デバイスを、簡単なハイブリッドモジュールにより実現することができる。

本プロジェクトにより、アレイ検出システムとしての検出感度は、PIN フォトダイオードに比べてリニア増幅モードで数十倍以上、アバランシェモードでは、マイナス数十°C までのペルチェ冷却によりフォトンカウンティングレベルに達することが予想され、集積度および感度において、世界的にも類を見ない光検出システムが実現した。

更に、Sb を含んだ材料系を採用することにより、5 μ m までの中赤外波長領域に拡張することができる。ペルチェ冷却方式の可搬性に富む超高感度赤外線検出器アレイにより、従来は、液体窒素や機械式冷凍機を必要としていた超高感度赤外計測分野を中心に利用分野の拡大と新規な応用の創生が見込まれる。

【誌上発表リスト】

- [1] Mutsuo Ogura and Takeyoshi Sugaya, "Highly sensitive InGaAs/InAlAs quantum wire photo-FET" Electronics Letter vol.42 issue7, Mar. 2006. P.413-414.
- [2] Sung Woo Choi, Shigenori Furue, Nobuyuki Hayama, Katsuhiko Nishida and Mutsuo Ogura, "Gain Enhanced InGaAs/InP Heterojunction Phototransistor with Zn-doped Mesa Sidewall", accepted by IEEE photonic technology letter, Mar. 2009.
- [3] Mutsuo Ogura, "Hole injection type InGaAs/InP near infrared photo-FET (HI-FET)", submitted to IEEE Journal of Quantum Electronics, Mar. 2009.

【申請特許リスト】

- [1] 小倉睦郎 飯岡正行「光検出素子の出力検出回路」特願 2009-075596 日本 平成 21 年 3 月 26 日
- [2] 小倉睦郎「高感度光電界効果トランジスタ」PCT/JP2009/053117 WIPO 平成 21 年 2 月 17 日
- [3] 小倉睦郎「光電界効果トランジスタ、及びそれを用いた集積型フォトディテクタ」PCT/JP2007/052913 WIPO (米国、日本、米国、英国および中国に移行手続き中。) 2007 年 2 月 13 日

【登録特許リスト】

- [1] Mutsuo Ogura, Yasushi Nagamune, Takeyoshi Sugaya, "Photodetector", United States, Jan.13 2004, Mar.21,2006, US 7,015,453 B2.
- [2] 小倉睦郎、永宗靖、菅谷武芳、「光検出素子」、日本、特開 2005-203428、(2004.1.13) (許諾査定受理)

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://staff.aist.go.jp/ogura-m/>