



ショートパルス TOF イメージセンサの最新技術

静岡大学 電子工学研究所
川人祥二

1. はじめに

半導体イメージセンサのピクセルに、変調光の位相あるいは光パルスの遅れ時間に依存した信号検出を行う機能を備え、光飛行時間 (Time of flight; TOF) により、距離画像を獲得するイメージセンサは、TOF 距離画像センサ、あるいは TOF イメージセンサ等と呼ばれ、仮想現実 (VR) / 拡張現実 (AR) システム、ロボット、セキュリティシステム、ドローン、車載用等多方面での応用が期待されている。TOF 計測の方法としては、直接 TOF (dTOF) 法と間接 TOF (iTOF) 法がある。dTOF 法は、送信パルス光 (TX) と、測定対象物で反射して戻ってきた受信パルス光 (RX) との間の時間差 (TOF) を直接時間計測回路で測る方式であり、ピクセル内の検出素子には SPAD (Single Photon Avalanche Diode) を用いてガイバーモードで動作させ、単一光子単位で、その到来タイミングを計ることで高精度に TOF 計測が行える¹⁻³⁾。一方、iTOF 法は、変調光を測定対象物に放ち、戻ってきた変調光を復調することによって、反射光の位相の変化 (あるいは反射パルス光の遅れ時間) をピクセル毎に求め、距離画像を生成する⁴⁻¹⁰⁾。iTOF 法は、ピクセル構成が単純であることから、多画素化、すなわち空間解像度の高い距離画像センサを実現する上で有利である。iTOF 法の光信号変調方式には、連続波 (CW; Continuous wave) 変調法とショートパルス (SP; Short pulse) 変調法があるが、SP 変調方式の方が特に背景光に対する SN 比の点で有利となる特徴があり、長距離での屋外の測距に対しては有望であると考えられる⁸⁾。本稿では、SP 変調法に基づく iTOF イメージセンサの原理や特徴について解説し、その最新の開発動向と今後の展望について述べる。

2. ショートパルス間接 TOF (iTOF) 法の基本原理

iTOF イメージセンサのピクセルには、図 1(a)に示す光検波素子 (Photonic Mixing Device)、または光復調素子 (Photonic Demodulator) 等と呼ばれる半導体素子が用いられる。この素子は、光で発生した電子の流れを電界制御によって変化させ、複数の電荷蓄積部に振り分けられる電荷の比を変調することができる素子であることから、著者は光電荷変調素子 (Photonic charge modulator)、または単に電荷変調素子 (Charge modulator) と呼んでいる。図 1 では、受光素子部に埋込フォトダイオード (Pinned Photodiode) を用い、その内部に光電子を走行させる空乏化したチャンネルを形成して、そのチャンネルの電位分布を接触した MOS ゲートで変調する。MOS ゲートは、光電子の走行方向と直交する方向に設け、2 つのゲート電極に与える電位を変化させることで、チャンネルの電位を走行方向と直交する横方向電界の差によって制御している。このような光電子の走行チャンネルの電位変調は、横方向電界制御変調 (Lateral electric field modulation; LEFM) と呼ばれる。光電子の走行路にゲート構造がないため、電荷蓄積部からの戻り電荷の発生が殆どなく、高い変調率が得られる。2 つの MOS ゲート G_1 , G_2 に図 1(b)に示すようなタイミングで交互にパルス電圧を与えたとき、もし変調された光パルスが、図の破線のタイミングでピクセルに到来すると、 G_1 が High (H) のタイミングと一致するために、すべての光電子は、左側のノードに転送され、蓄積される。もし対象物からの反射によって、TOF だけ遅れたタイミ