

識別番号 P 6 2010 年度完了学内共同研究
 研究課題 共鳴トンネルダイオードを用いた光アナログ/デジタル変換回路に関する研究

研究代表者 下村和彦 (理工学部機能創造理工学科)

共同研究者 和保孝夫 (理工学部情報理工学科)

Summary An ultrahigh-speed quantizer using resonant-tunneling diodes (RTDs) and a continuous-time delta-sigma analog-to-digital converter based on the quantizer have been investigated. GaInAs/AlAs RTD structure has been successfully grown by metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE) on InP substrate. The negative-differential-resistance of RTDs enhanced the quantizer operation speed, which resulted in an improved performance of the converter.

1. 本研究の目的及び背景

近年の高速大容量情報通信システムでは、半導体を用いた大規模集積回路 (LSI) に代表されるデジタル技術が駆使されている。一方でデジタル機器間の情報伝達には、光や電波、電気信号のような物理現象が用いられ、情報は電界や磁界の強度などのアナログ量で表現される。従って、情報通信システムの構築にはアナログ (A) 量をデジタル (D) 値に変換する A/D 変換回路が必要不可欠であり、その高性能化が次世代情報通信システム実現の鍵を握っていると言っても過言でない。本研究では、従来技術より高速動作が期待できる化合物半導体デバイスを用いた量子化回路に着目し、新しい回路提案と性能評価を行う一方、それを利用した A/D 変換回路を構成し、回路シミュレーションにより超高速動作の可能性を見出した。また実際に有機金属気相成長法を用いて GaInAs/AlAs 共鳴トンネル構造を成長した。

2. 研究内容および成果

本研究で提案する量子化回路を図 1 に示す。従来と異なる点は 2 つの共鳴トンネルダイオード (RTD) を用いて高速化を図ったことである。RTD は印加電圧の増加に対して電流が減少する負性微分抵抗特性を有する。このため、Vclk 信号により量子化回路がトラック状態からラッチ状態に移行するとき RTD の高速スイッチが起こり、量子化動作を加速する効果がある。回路シミュレータでその効果を確認した結果を図 2 に示す。トラックからラッチに変化する時の出力波形変化に要する時間 (再生時間) T_{reg} が 1/2 以下に短縮化されていることが分かった。ここで T_{reg} は、Vclk が切り替わりラッチフェーズに移行してから、最終的なデジタル振幅の 90% まで出力電圧が変化するまでに必要な時間と定義した。

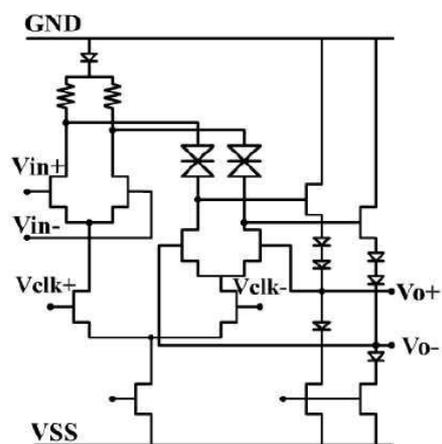


図 1: 提案した RTD/HEM 量子化回路の回路図

従来から様々な種類の A/D 変換回路が研究されているが、本研究で着目したのは $\Delta \Sigma$ 型 A/D 変換回路である。この方式では、アナログ回路のかなりの部分を、微細化による高性能化が著しいデジタル回路に置き換えることが可能で、情報通信に必要な広帯域高分解能変換に適しているためである。今回設計した連続時間 2 次 $\Delta \Sigma$ 変調器のブロック図を図 3 に示す。量子化回路（コンパレータ）には RTD

量子化回路を採用した。評価指標としては、A/D 変換回路の分解に相当する信号対雑音比(SNR)に着目した。今回シミュレーションで想定したのは $0.1 \mu\text{m}$ InP 系 HEMT 技術で、最大カットオフ周波数 $f_T = 150 \text{ GHz}$ 、最大発振周波数 $f_{\text{max}} = 220 \text{ GHz}$ であった。また RTD のピーク電流密度 J_{rtd} は $5.0 \times 10^5 [\text{A}/\text{cm}^2]$ であった。比較のため RTD 量子化回路の他に、2 種類の HEMT 量子化回路を用いた $\Delta \Sigma$ 変調器の SNR - オーバーサンプリングレート (OSR) 依存性を図 4 に示す。入力周波数 100 MHz 、サンプリング周波数は 2 GHz から 13.5 GHz とした。再生時間が短い高速 RTD/HEMT 型および電流源負荷型量子化回路を用いた場合は、抵抗負荷型（従来型）を用いた場合と比較して 10dB 以上高いピーク SNR が得られ、量子化回路高速化により $\Delta \Sigma$ 変調器の性能が改善できることを明らかにした。

電流源負荷型量子化回路は回路が複雑で設計の難易度も高いが、RTD を導入することで簡素な回路で同等の性能を実現できる可能性を示した。また、将来的には RTD 構造の最適化により一層の高性能化が期待できる。

また実際に有機金属気相成長法を用いて図 5 に示す GaInAs/AlAs 共鳴トンネルダイオード構造を成長した。新たに DTBSi を N 型ドーパントして用いることにより、エミッタ層、コレクタ層の高濃度化が可能となった。

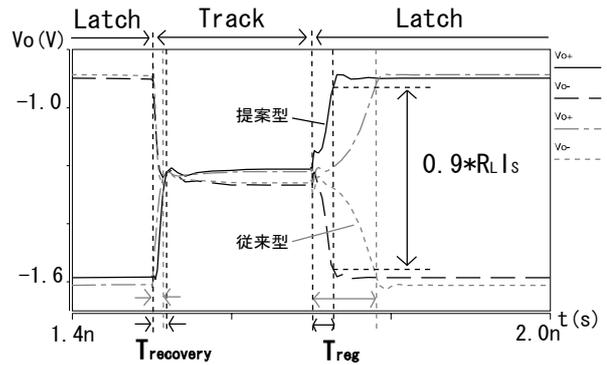


図 2: 回路シミュレーションによって得られた出力波形

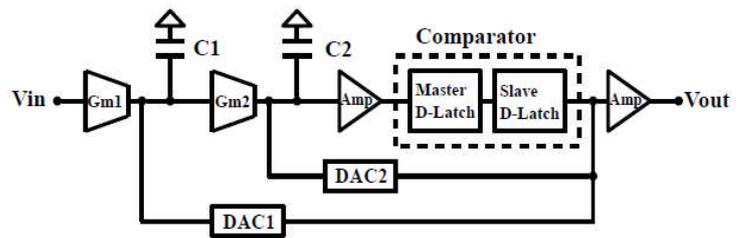


図 3: 連続時間 2 次 $\Delta \Sigma$ 変調器ブロック図

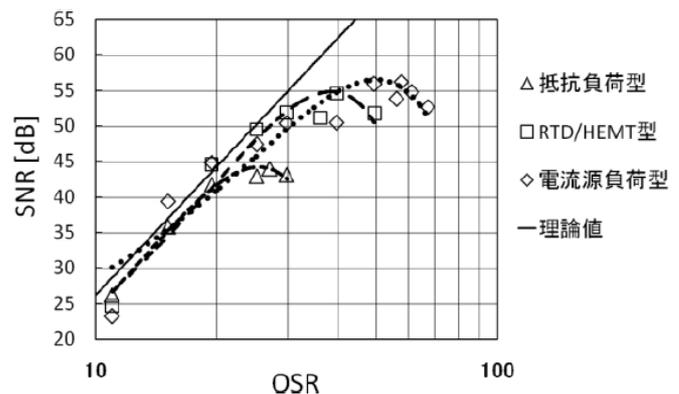


図 4: 3 種類の異なる量子化回路を用いた $\Delta \Sigma$ 型 A/D 変換回路の比較

cap	$n^{\text{-}}\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.7}\text{As}$	30nm	$2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
cap	$n^{\text{-}}\text{GaInAs}$	15nm	$1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
collector	$n\text{-GaInAs}$	200nm	$1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
spacer	GaInAs	5nm	} N.I.D
barrier	AlAs	2nm	
well	GaInAs	6nm	
barrier	AlAs	2nm	
spacer	GaInAs	5nm	
emitter	$n\text{-GaInAs}$	250nm	$1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
	$n^{\text{-}}\text{InP Subs.}$		

図 5: MOVPE 成長共鳴トンネル構造