

神経信号センシングシステムの研究

吉田 毅 (先端研量子物質科学専攻 D3),
岩田 穆 (先端研半導体集積科学専攻 教授)

1. 研究目的

先端医療や生体情報検出のためのインプラントブルな神経センシングシステムが, CMOS-LSI によって試作されている[1-2]. しかし LSI を構成する CMOS デバイスはフリッカ雑音や閾値のばらつきを持つため, 一般的な演算増幅回路では微小な神経信号を増幅することができない. したがってこれらの雑音を低減できる低雑音増幅回路を実現する必要がある. またインプラントブルなシステムを実現するには, 無線による情報の送受信が必要である.

本研究の目的は, CMOS プロセス技術によって構成した低雑音増幅回路と無線送受信回路を有する神経信号センシングシステムを提案することである. また本研究は, 広島大学 21 世紀 COE プログラムの RF・アナログ回路技術に関する研究である.

2. これまでの研究成果

2.1 神経信号センシングシステムの構成

提案する神経信号センシングシステムをFig.1に示す. システムは, マルチプレクサ(MUX)と低雑音増幅回路を備えるMUX/AMPブロック, 10bit分解能ADC, 送受信回路を含むTX/RXブロック, およびシステム全体を制御する制御ブロックによって構成される. 神経細胞からの信号を検出するためのプローブおよび無線用のアンテナは, ディスクリットデバイスによって実現される.

MUX/AMPブロックは極めて微小な神経信号(数十 μV , 数kHz)を検出するため, 増幅器の雑音およびオフセット電圧の低減, および約80dBの電圧ゲインを実現する必要がある. さらに複数の神経信号を同時に観測するため, MUXはマルチチャネル・プローブからの入力信号を5つ選択し, 約20 μs のパルス幅で多重化する構成とした. ADCはその多重化された各チャネルの信号を分解能10bit, サンプルングレート10kspsでAD変換する. したがって, システムは神経ネットワーク内の信号の伝播状況等も解析することができる. TX/RXブロックは, 神経信号の観測結果を外部に送信するTXブロック, MUX/AMPブロックの選択チャネル等のシステム制御信号を受信するRXブロック, TX/RXのキャリア信号を供給するVCOによって構成される. システムの最大データ伝送レートは, 分解能10bit, サンプルングレート10ksps, 多重化数5より, 500kbpsとなる. システムの高いデータ伝送レートを実現するため, TX/RXのキャリア周波数は100MHzとした.

2.2 回路設計およびテストチップ評価結果

提案した神経信号センシングシステムは, 0.35- μm , 2層poly-Siキャパシタ, 3層メタルのCMOSプロセスで設計・試作を行った. MUX/AMPの回路構成をFig.2に示す. MUX/AMPの増幅部は, CMOSデバイスのフリッカノイズおよびDCオフセット電圧を低減できるチョッパ増幅回路で構成した. またMUX/AMPの入力部は, 測定プローブと細胞液界面に存在する分極電荷を介して神経細胞からの信号を検出できるダイレクトチョッパ入力構成とした. SPICEシミュレーションの結果より, 設計したMUX/AMPの入力換算雑音電圧はチョッパ周波数400kHzにおいて23nV/root-Hzである. したがってMUX/AMPの100kHzまでの帯域内トータル雑音は7.2 μV である. TX/RXのブロック構成をFig.3に示す. TX/RXブロックのRF変調方式には回路構成の単純なBPSK(Binary Phase Shift Keying)方式を用いた. また伝送データのマーク率を約50%にするため, ブロックにはMFM(Modified Frequency Modulation)エンコーダも備えている.

試作したテストチップの写真を Fig.4 に示す. テストチップでは MUX/AMP ブロック, ADC, VCO および出力バッファで構成される TX ブロックを設計した. チップ面積は 5mm 角である. BPSK 変調時における TX ブロックの出力スペクトルを Fig.5 に示す. キャリア信号の周波数は 110.6MHz であり, TX ブロックは 1Mbps のデータ伝送を実現した. 電源電圧 3V 時の TX ブロックの消費電力は 0.6mW である. 次に実際のコオロギの足の神経信号を試作チップにより測定した. Fig.6(a)にディスクリットオペアンプで構成した増幅器の測定波形, Fig.6(b)に試作した MUX/AMP ブロックの測定波形を示す. それぞれの神経信号の形状はほぼ一致しており, 提案した神経信号センシングシステムが神経信号を測定できることを示した. ディスクリットオペアンプで構成した増幅器の DC ゲインは 66dB であり, 20Hz~5kHz の通過帯域を持つ BPF を備えている. 試作した MUX/AMP の DC ゲインは約 66dB, 100kHz までの帯域内入力雑音電圧は 3.2 μV , 消費電力は 0.6mW である.

3. COE プログラムと成果の関連

無線インタコネクタを用いた三次元集積による学習機能を持った認識システムを実現する際に, 生体情報検出と無線インタフェースは不可欠な要素技術であり, 今後のプロトシステムのアーキテクチャおよび回路設計に適用する.

4. まとめと今後の予定

CMOS プロセス技術によって構成した低雑音増幅回路と無線送受信回路を有する神経信号センシングシステムを提案した。提案したシステムは、実際の神経信号を検出、および 1Mbps の無線データ伝送を実現できる。今後はプロセスの微細化およびシステムの低雑音化について検討を行う。

参考文献

- [1] K. D. Wise, Symp. on VLSI Circuits Dig. of Tech. Papers, pp.106-109, 2002.
- [2] J. A. V. Arx, et al., ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp.214-215, 1999.

3. これまでの研究発表, 特許等

① 原著論文

1. T. Yoshida, T. Mashimo, M. Akagi, A. Iwata, M. Yoshida and K. Uematsu, "A Design of Neural Signal Sensing LSI with Multi-Input Channels", IEICE Trans. Fundamentals., vol.E87-A, pp.376-383, Feb. 2004.

② 国際会議プロシーディング等

1. T. Yoshida, T. Mashimo, M. Akagi, A. Iwata, M. Yoshida and K. Uematsu, "A Design of Neural Signal Sensing LSI with Multi-Input Channels", Proc. of Workshop on SASIMI, pp. 206-210, 2003.
2. T. Yoshida, T. Mashimo, M. Akagi, A. Iwata, "Neural-Sensing LSI with Wireless Interface", Proc. of the 2nd Hiroshima International Workshop on Nanoelectronics for tera bit Information Processing, pp.22-23, Hiroshima, 2004.1.

③ その他

1. 吉田毅, 真下隆行, 赤木美穂, 岩田穆, 吉田将之, 植松一真, 1チップ無線・神経信号センシング LSI の設計, 電子情報通信学会 信学技報, ICD2003-86, 2003年9月, (豊橋).

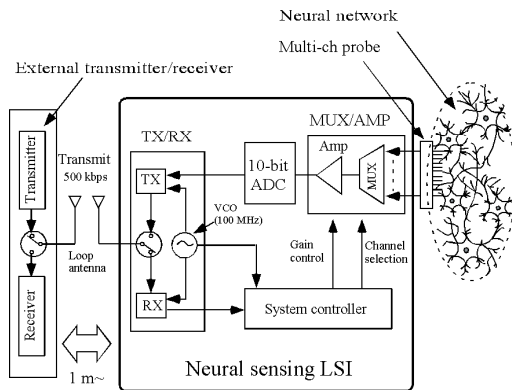


Fig.1 Proposed system architecture.

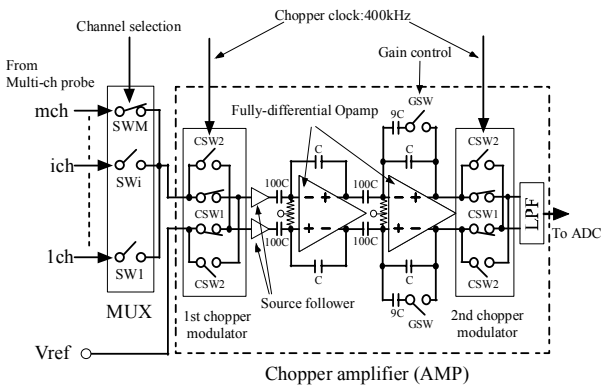


Fig.2 Schematic of the MUX/AMP block.

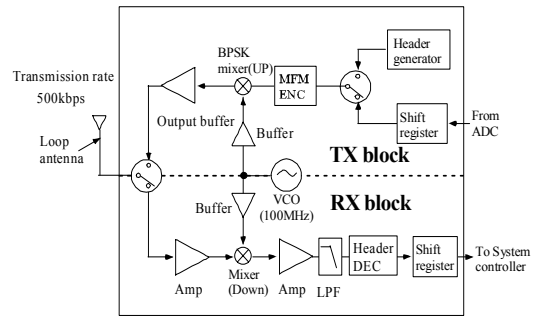


Fig.3 TX/RX block diagram.

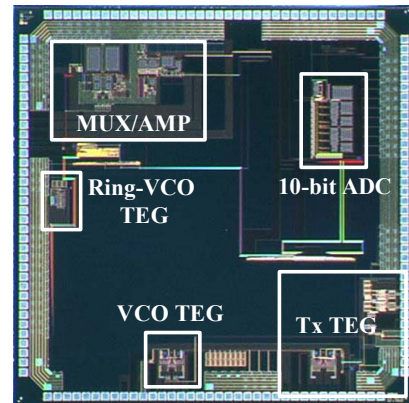


Fig.4 Microphotograph of the test chip.

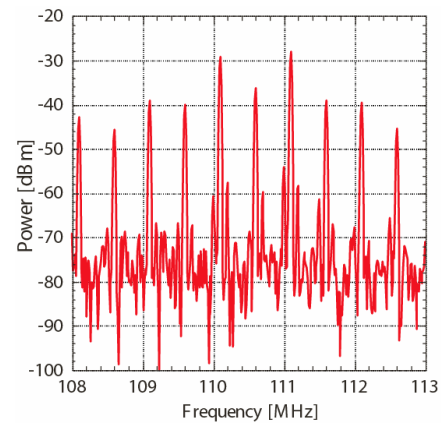


Fig.5 Measured output spectra of TX block.

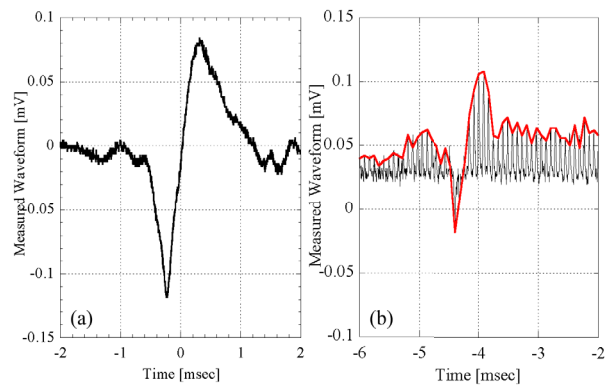


Fig.6 Measured nerve facile waveform of (a) the amplifier implemented by the discrete Opamps and (b) the proposed MUX/AMP.