

平成22年4月7日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760214

研究課題名（和文）3次元積層型人工網膜チップ向け非接触インターフェースの開発

研究課題名（英文）Development of Wireless Interface for 3D Stacked Retinal Prosthesis.

研究代表者

清山 浩司(KIYOYAMA KOJI)

東北大学・大学院工学研究科・教育研究支援者

研究者番号：60412722

研究成果の概要（和文）：

眼球内埋込型、三次元積層人工網膜チップ向けのワイアレス・インターフェースを開発した。開発したインターフェース回路は電流モード復調回路および無線電力供給用の負帰還制御機能である。これらの回路は、眼球内に埋め込まれるLSIの過電圧保護回路に流れ、通常は熱として消費されるクランプ電流からデータ(変調信号)と受信電力情報を取り出すエナジー・ハーベストタイプの回路である。評価の結果、キャリア周波数13.56MHzにおいて106kbpsのデータ通信および過電圧保護回路の消費電力50%以上の削減が可能である事を確認した。

研究成果の概要（英文）：

A wireless communication system with a new current-mode demodulator and a closed-loop power control function for 3D stacked retinal chip is developed. In measurement results, the demodulator can be decoding 106kbps with 13.56MHz frequency carrier. The power dissipation in the clamp circuit can be reduced more than 50% using closed power control function.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：回路設計・CAD, 医用システム

### 1. 研究開始当初の背景

高齢化社会の進行に伴い、医学的治療法の確立されていない加齢黄斑変性症や網膜色素変性症が原因で失明に至る患者が増えている。これらの患者の網膜では、光を受光する視細胞が死滅しているが、視細胞以外の網膜細胞は高い確率で残存している事が報告されている。近年、電子工学を応用し、LSIを用いて死滅した細胞の代わりに光電変換を行い、残存する網膜細胞に電流刺激を与え視覚の回復を図る人工網膜システムに関する研究が世界各国で行われている。人工網膜システムは、受光素子の配置位置により眼球外撮像と眼球内撮像の2種類に大別される。世界各国で研究が行われている構成は、眼球外撮像システムであり、眼球内外に2対のアンテナを用いて画像情報と電力を無線で眼球内に供給している。一方、我々は唯一、眼球内撮像システムであり、受光素子を含めた全ての回路と刺激用電極を眼球内へ完全に埋め込む人工網膜システムを提案している。これは、撮像素子や回路を構成するLSIを積層化する技術により実現が可能である。眼球内に撮像素子を置くことにより、サッカーなど眼球が持つ機能を使う事が可能となり患者のQOL(Quality of Life)の向上が見込まれる。我々が提案するシステムでは、人工網膜チップの埋め込み手術後、眼球外部から刺激電流パルス患者に適した形状(振幅やパルス幅など)に設定する事および無線電力供給を行う必要がある。その為、完全埋め込み型人工網膜システムでは、眼球内外1対のアンテナを用いて無線データ通信および無線電力供給を同時に実行可能な回路方式および安定した無線電力供給に関する研究が必要であった。

### 2. 研究の目的

研究対象となる完全埋め込み型人工網膜は、眼球運動によりアンテナ(コイル)の結合状態が変化しても安定した無線データ通信が可能な事、また、バッテリーレスで動作する事(埋込後はバッテリー交換が出来ない。また、埋め込み後の安全性)が要求される。

本研究課題では、眼球内外1対のアンテナで無線データ通信と電力供給が行える電流振幅を信号として処理する電流モード復調回路(眼球内に埋め込む回路)およびアンテナの結合状態の影響を受けず安定した無線電力供給が行える電力の負帰還制御機能を提案し、CMOSテクノロジーを用いて実証する事を目的とした。

### 3. 研究の方法

図1に我々が研究を進めている三次元積層型人工網膜チップを有する眼球内完全埋め込み型人工網膜システムを示す。眼球内に埋め込まれる人工網膜は、電力およびデータ通信アンテナ(図中ではコイルとして示す: Primary coil, Secondary coil), フレキシブルケーブル, 刺激電極および受光素子(Photo-sensor layer), 信号処理回路(Image Processing layer), 無線回路(Tx/Rx)と刺激電流生成回路を積層した三次元積層型人工網膜チップで構成される。本研究課題では、図中の最下層に位置する無線送受信回路と受信電力モニタ回路の設計と検証を行った。

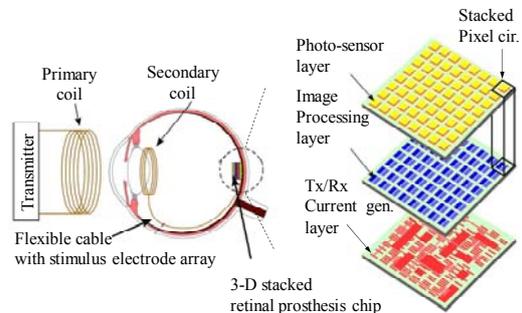


図1. 眼球内完全埋め込み型人工網膜システム。

図2は、提案するシステムの構成ブロックを示す。眼球外(Extraocular)は、変調器(Mod.), コントローラ(Controller), 供給電力制御回路(Supply Power Controller), 刺激電流パラメータを格納したメモリおよびバッテリーで構成される。供給電力制御回路は、眼球内でモニタした受信電力情報を用いて、眼球外から供給する電力制御を行う。眼球内(Intraocular)には、図1で示した受光素子、信号処理回路の他、クランプ電流(チップ内の過剰電圧保護回路に流れる電流)を用いた電流モード復調器(De-Mod.)および人工網膜チップが受信した電力をモニタする回路(Current Det.)により構成される。

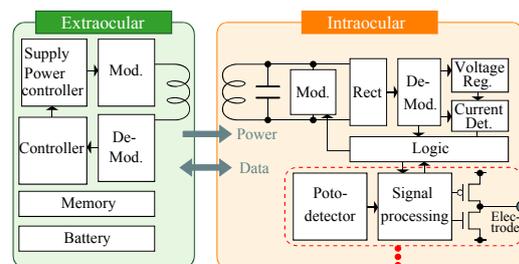


図2. 人工網膜システムのブロック図。

人工網膜チップで患者の網膜を刺激する電流パルス波形を図3に示す。刺激電流パルスには、正負極のパルス幅(Duration)、正負極のパルス振幅(Amplitude)、パルス周期(Period)などのパラメータがある。これらのパラメータの最適値は患者によって異なり、人工網膜の埋め込み手術後に眼球外から無線で調整する必要がある。

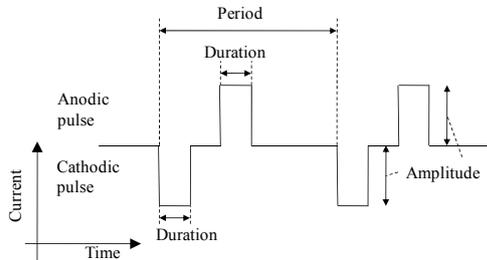


図3. 刺激電流パルス.

人工網膜チップは、眼球内に埋め込まれる為、小面積、低消費電力な変復調回路で構成する事を目的として変調方式にASK(Amplitude Shift Keying)を採用した。通常のASKでは、電圧振幅を信号とする電圧モード復調回路が用いられる。電圧モード復調回路では、変調波の電圧差からデータを読み出して復調を行う為、最小でも変調率10%以上程度が必要とされる。本用途では1対のアンテナを用いたデータ通信を行う。変調波は整流後、電源電圧にも使用する為、変調率を高くする事は好ましくない。本研究課題では、数%の変調率の変調波からでもデータ復調と安定電力を得る為、過剰電圧制限回路に流れる電流振幅を利用しデータの復調を行う電流モード復調器を設計した。

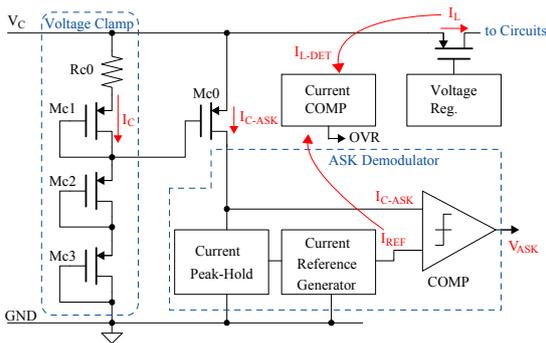


図4. 復調器・受電モニタの概略図.

電圧制限回路(Voltage Clamp)は、眼球運動によってアンテナ間の距離が狭くなった時、チップに過大電圧が発生しないよう保護することを目的とした回路である。全波整流されたASK変調波の電圧が制限電圧以上になると、電圧制限回路にクランプ電流が流れ、電圧が一定値に保たれる。MOSFETの電圧-電

流特性から、電圧制限回路に流れるクランプ電流の変化は順方向バイアス電圧の2乗で変化する。従って、クランプ電流を利用する事により、変調率低減とS/N向上が可能となる

図4に設計した電流モード復調器および受電モニタの概略を示す。電流モード復調器は、全波整流回路の後段に接続され、電圧制限回路、クランプ電流モニタ用カレントミラ、参照電流生成回路(Current Peak-hold, Current Reference Generator)、電流比較器(COMP)で構成される。電圧制限回路(Rc0, Mc1, Mc2, Mc3)はPMOSを多段接続して構成される。Mc0は、Mc1に流れる電流を転写する回路である。参照電流生成回路は、ASK変調電流振幅 $I_{C-ASK}$ の2分の1の参照電流 $I_{REF}$ を生成する回路である。電流比較器は、 $I_{C-ASK}$ と $I_{REF}$ の比較結果を電圧データ $V_{ASK}$ として出力する。

電力の負帰還制御機能は、上記の $I_{REF}$ と電圧安定化回路(Voltage Reg.)が処理回路に供給する消費電流のモニタ結果 $I_{L-DET}$ との比較を行う。提案するシステムでは、クランプ電流の平均値 $I_{REF}$ と回路が消費する電流のモニタ結果が以下の関係となるように供給電力を制御した。

$$I_{REF} < I_{L-DET} \quad (1)$$

眼球内からの受電モニタ結果は、1ビットのデジタルデータとして眼球外に伝えられる。眼球外の供給電力制御回路では、この1ビットデータを用いて供給する電力の調整を行う(負帰還制御)。

図5には、CMOS 0.18 $\mu$ mテクノロジーで試作したLSIの顕微鏡撮影写真を示す。この写真では、全波整流回路(Rectifier)、過剰電圧制限回路(Voltage Clamp)および電流モード復調器(De-Mod.)を示している。

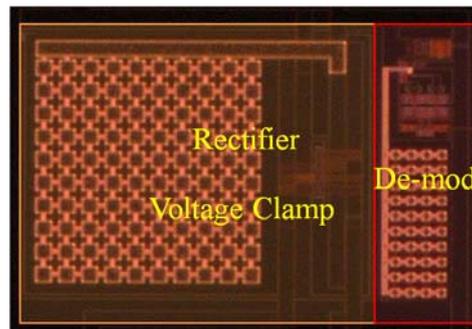


図5. 試作LSIの顕微鏡撮影写真.

図6は、電流モード復調器の検証結果を示す。この図では、眼球外システムに用いる回路から伝送したデータ(DATA)、眼球内を模倣したアンテナで受信した変調波(RF received voltage)、復調回路の各電流 $I_{C-ASK}$ 、 $I_{C-REF}$ および復調結果の出力 $V_{ASK}$ を示す。図に示す条件は、キャリア周波数13.56MHz、変調率5%である。

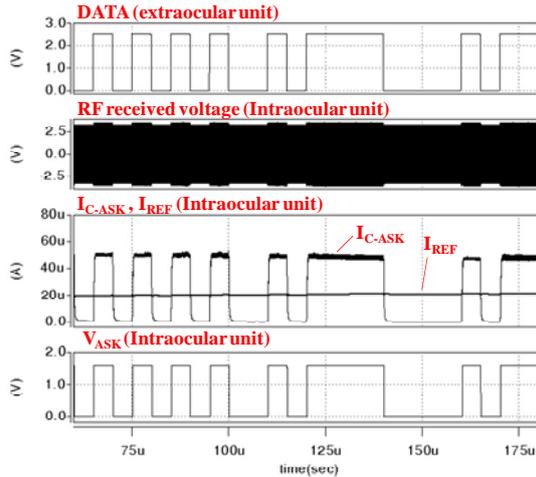
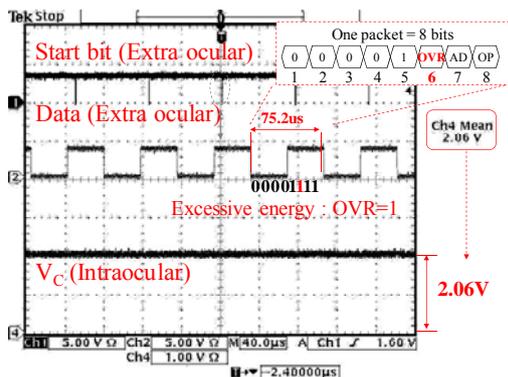
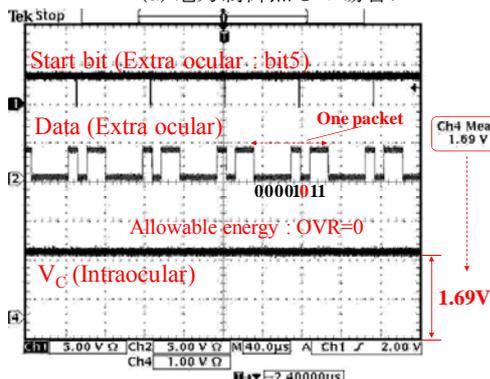


図 6. 復調器の検証結果.

図 7 には、供給電力の負帰還制御の検証結果を示す。この検証では、コイル間の距離を 10mm としている。



(a) 電力制御無しの場合.



(b) 電力制御有りの場合.

図 7. 供給電力の負帰還制御の検証結果.

上段の信号はデータパケットのスタートビットを眼球外回路で取り出した結果、中段は眼球外回路で再生した Data, 下段は眼球内回路の受信電圧(電圧制限回路の電圧)を示す。提案するシステムでは、眼球内から眼球外に下記に示す 8 ビットのパケットを基本単位と

して送信している。

bit1-4	:0	同期 bit
bit5	:1	スタート bit
bit6	:OVR	受電情報
bit7,8	:AD, OP	生体モニタ情報

受電情報の受電モニタ結果は、過剰状態を 1(High)とした。

図 7(a)は、供給電力の負帰還機能をオフとした場合である。この場合、8 ビットパケットの OVR(bit6)は常に High となり、眼球内回路の受信電圧が 2.06V となり電力の過剰供給状態である(図では bit7, 8 が共に High となっている)。図 7(b)は供給電力の負帰還制御をオンさせた場合の結果である(制御有り)。この時、OVR は Low で眼球内回路の電力が最適な状態となり、受信電圧は 1.69V である事がわかる。

#### 4. 研究成果

電流モード復調器および電力の負帰還制御機能を CMOS テクノロジで試作・評価を行い、目的とする無線データ通信および電力制御が行える事を確認した。設計した回路は、搬送波の周波数 13.56MHz, データレート 106kbps において負荷変調の変調度が 4%まで低下しても復調が可能であることを確認した。また、電力制御機能を用いる事により過剰な電力供給の回避(56%の消費電力削減)が可能であることを実証した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. K.Kiyoyama, T.Tanaka. "A Telemetry System for Body Implantable Applications.", SMART / Tohoku GCOE joint Workshop on Micro & Nano Bioengineering : MIT, NUS, NTU and Tohoku., pp.55-57., Jan. 2010. 査読無
2. Y. Kaiho, Y. Ohara, H. Takeshita, K. Kiyoyama, K-W Lee, T. Tanaka, and M. Koyanagi., "3D Integration Technology for 3D Stacked Retinal Chip", Proceedings of the IEEE 3D System Integration Conference., pp.1-4 Sept. 2009. 査読有
3. K.Kiyoyama, Y.Ohara, K-W Lee, Y.Yang, T.Fukushima, T.Tanka and M.Koyanagi., "A Paralle ADC for High-Speed CMOS Image Processing System with 3D Structure.",

Proceedings of the IEEE 3D System Integration Conference,, pp.1-4 Sept. 2009.査読有

4. K.Kiyoyama, K.Sato, Y.Kaiho, H.Tomita, E.Sugano, T.Fukushima, H.Kurino, T.Tanaka, and M.Koyanagi, "A PHOTORECEPTIVE STIMULATOR FOR A RETINAL PROSTHESIS WITH 3D STACKED LSI", Proceedings of the Tohoku University, Global Centre of Excellence Programme, Nano-Biomedical Engineering 2009, pp.289-295, 2009.査読無

〔学会発表〕(計1件)

1. 海法克享, 大原悠希, 清山浩司, 李康旭, 福島誉史, 小柳光正, 田中徹, "三次元積層型人工網膜チップのための三次元積層技術の開発", 第57回応用物理学会.2010年3月17日. 東海大学湘南キャンパス. 神奈川県平塚市.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称: -

発明者: -

権利者: -

種類: -

番号: -

出願年月日: -

国内外の別: -

○取得状況(計0件)

名称: -

発明者: -

権利者: -

種類: -

番号: -

取得年月日: -

国内外の別: -

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sd.mech.tohoku.ac.jp/Site/Home.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

清山 浩司 (KIYOYAMA KOJI)

東北大学・大学院工学研究科・教育研究  
支援者

研究者番号: 60412722

### (2) 研究分担者

無し

( )

研究者番号: -

### (3) 連携研究者

無し

( )

研究者番号: -