

1-Gb/s CMOS POF 응용 광수신기 설계

이준협 · 이수영 · 장규복 · 유종근

인천대학교 전자공학과

Design of a 1-Gb/s CMOS Optical Receiver for POF Applications

Jun-hyup Lee · Soo-young Lee · Kyu-bok Jang · Chong-gun Yu

Dept. of Electronics Engineering, University of Incheon

E-mail : asurada0312@naver.com

요 약

본 논문에서는 CMOS 0.35- μm 공정을 이용하여 Plastic Optical Fiber (POF) 응용분야에 적용할 수 있는 세 종류의 shunt-feedback 구조의 1-Gb/s 광 수신기를 설계하고 비교분석하였다. 기본적인 common-source transimpedance amplifier (CS-TIA), common-gate TIA (CG-TIA), 그리고 regulated-cascode TIA (RGC-TIA)를 최적화 설계하여 이득, 대역폭, 잡음특성 등을 비교분석 하였다. 시뮬레이션 테스트 결과 RGC-TIA가 CS-TIA, CG-TIA 보다 이득, 대역폭 측면에서 가장 좋은 성능을 보였으며, 잡음특성 측면에서는 CS-TIA가 가장 좋은 성능을 보였다. 각 광 수신기의 칩 사이즈는 bonding Pad를 포함하여 0.35mm² 이다.

ABSTRACT

In this paper, three types of optical receivers are designed using a 0.35- μm standard CMOS technology for plastic optical fiber (POF) applications. Basic common-source transimpedance amplifier (CS-TIA), common-gate TIA (CG-TIA), and regulated-cascode TIA (RGC-TIA) are optimally designed, and their transimpedance gain (TZ gain), 3-dB bandwidth, and noise characteristics are compared and analyzed. As a result of simulations, the RGC-TIA indicates better TZ gain and 3-dB bandwidth than other topologies, and CS-TIA has the best noise performance. Each optical receiver occupies area of 0.35mm².

키워드

Plastic optical fiber, Optical receiver, Transimpedance amplifier, Limiting Amplifier, CMOS

I. 서 론

Plastic optical fiber (POF)는 glass optical fiber에 비해 적은 제조비용 및 설치비용이 들고 배선이 쉽고 효율적이며 기존의 UTP 케이블과 같은 구리선에 비해 넓은 대역폭을 제공하고 전자파간섭이 없다는 장점을 가진다. 이러한 장점으로 인해 최근 자동차 네트워크나 홈 네트워크 등 저가의 근거리 네트워크에서 널리 이용되고 있다.

최근 POF 네트워크의 속도가 1Gb/s까지 증가하면서 광 수신기의 기본적인 구조인 CS-TIA에 대역폭 한계가 발생하고 있다. 본 논문에서는 포토다이오드의 기생 커패시턴스 성분을 충분히 차단하여 넓은 대역폭을 확보할 수 있는 CG-TIA와 RGC-TIA 구조를 설계하여 비교분석을 수행함으로써 고속 POF 네트워크에 최적화된 광 수신기의 구조에 대해 고찰하였다 [1]

본 논문은 IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음

II. 본 론

2.1 POF link system

그림 1에 POF link system을 제시하였다. POF link system은 digital framers, LED driver, RC-LED, PMMA POF, 핀 포토다이오드(PIN PD), pre amplifier, post amplifier등으로 구성이 된다. RC-LED는 광원으로 PIN PD는 광원 탐지기 역할을 한다.

PMMA POF를 전송매체로 사용하면 650nm 파장에서 0.2dB/m의 신호 손실이 발생한다. POF application에서는 50m의 전송거리가 요구되기 때문에 10dB의 손실이 발생하고 광수신기의 connector에서도 2dB의 손실이 발생한다.

RC LED의 driving current가 약 20mA이면 광파워는 0dBm이다. 하지만 온도와 노쇠화에 따라 변한다. 온도변화에 따라 2.34dB 이고 노쇠화도 2.34dB으로 비슷하다고 가정하면 약 4.7dB을 얻게

된다. 따라서 최소 광수신기에 요구되는 sensitivity는 -16.7dBm 이다. 본 논문에서는 PVT (process, voltage, temperature) variation에 따른 성능변화를 감안하여 -20dBm 의 sensitivity를 목표로 설정하였고 이에 맞는 receiver단(pre amp, post amp)을 설계하였다.

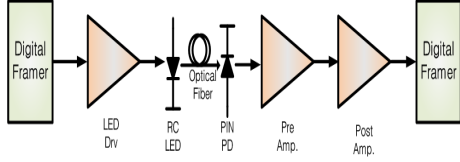


그림 1. POF link system

2.2 광수신기 개요

본 논문에서 제안하는 광수신기의 블록을 그림 2에 보였다. 공급전압과 기판노이즈를 제거하기 위해 차동 구조로 모든 block을 설계하였다. 포토다이오드의 기생 커패시턴스 성분이 optical receiver 전체 대역폭이나 이득에 크게 영향을 끼친다. 따라서 receiver 블록 앞단에 common gate(CG), regulated cascode buffer (RGC)등을 배치해 기생 커패시턴스의 영향을 감소시켰다 DC-offset buffer는 gain stage를 통과한 두 차동 출력의 DC 레벨을 맞춰주는 역할이다. TIA에서 생성된 신호는 매우 작기 때문에 CDR에 인식 할 수 있게 하기 위해 큰 전압으로 증폭 할 수 있는 limiting amplifier (LA)회로가 필요하다. POF application에서 고속 동작을 하는 전기적인 인터페이스인 low-voltage differential signaling (LVDS)에 맞는 LVDS output buffer를 출력단에 달았다.[2]

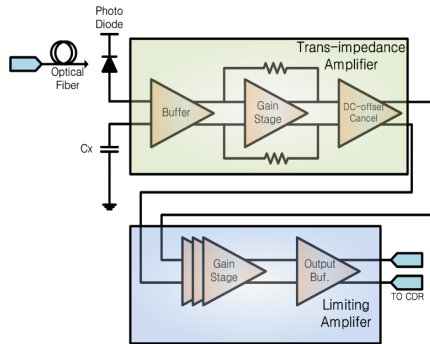


그림 2. 광수신기 block diagram

2.3 Common-Gate current buffer (CG)

CG의 입력저항은 42.86Ω 으로 매우 작은 값을 가진다. 따라서 dominant pole은 입력노드에 존재하지 않고 다른 노드에 존재하게 된다. 따라서 쉽게 넓은 대역폭 또는 큰 transimpedance gain(TZ gain)을 얻을 수가 있다.

short channel CMOS 공정에서는 g_m 값이 작을 수 있는데 $0.35\mu\text{m}$ 공정이므로 어느 정도 큰 g_m 인 23.33mA/V 를 얻을 수 있어서 사용하였다

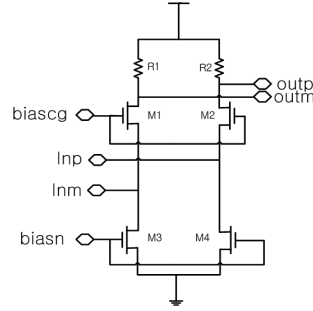


그림 3. Common-Gate current buffer 회로도

2.4 Regulated-Cascode Buffer (RGC)

RGC buffer도 CG buffer와 마찬가지로 dominant pole을 입력노드가 아닌 다른 노드에 존재하게 하는 역할을 한다. RGC의 입력저항은 아래와 같다.

$$R_{IN} = \frac{1}{g_{m1}(1 + g_{mb}R_B)} \quad (1)$$

식 (1)에서 보는 바와 같이, RGC 입력 저항은 CG의 입력에 비해 전압이득이 $(1 + g_{mb}R_B)$ 만큼 작아지게 되지만, 따라서 대역폭을 결정하는 광다이오드의 큰 기생 capacitance를 더 효과적으로 제거 할 수 있다.

$$f_{peak} = \frac{1}{2\pi R_B(C_{gs1} + C_{gdB})} \quad (2)$$

식 (2)를 보면 R_B 또는 W_1 값을 조절함으로써 peaking이 일어나는 주파수를 대역폭보다 높은 주파수로 옮길 수 있다. R_B 를 줄이면 입력 저항이 커지기 때문에 전압이득이 작아진다. 따라서 R_B 를 키우면서 전압 이득을 유지하기 위해서는 M_B 의 드레인 전류가 증가해야 하고 따라서 전력소모가 커지게 된다. 그래서 M_1 의 width을 줄이는 것이 효과적이거나 g_{m1} 값이 감소되면서 노이즈 특성이 악화된다. 이처럼 대역폭과 이득 그리고 전력소모 등의 trade-off관계로 인해 R_B 와 MOS의 width 신중하게 결정해야 하는 어려움이 있다.[3]

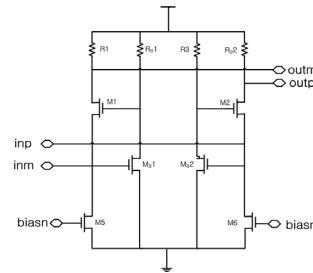


그림 4. Regulated-Cascode Buffer 회로도

2.5 Transimpedance Amplifier (TIA)

포토다이오드를 통과한 전류 신호를 전압신호로 변환하는 역할을 한다. feedback network로

구성된 TIA는 피드백 저항을 조절함으로써 이득을 결정할 수 있다. 이득과 노이즈는 대역폭과 trade-off 관계이기 때문에 적절한 피드백 저항과 MOS의 width를 선택해야 한다.

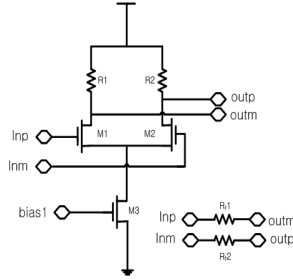


그림 5. Transimpedance amplifier 회로도

2.6 DC-offset cancellation buffer

low pass filter를 통과한 DC신호가 각각의 반대 AC신호와 결합해서 약 10us이후에 DC offset을 감소시키는 역할을 한다.

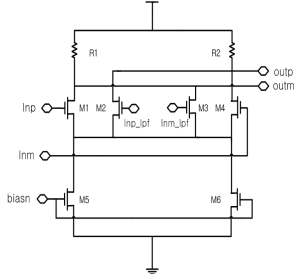


그림 6. DC-offset buffer 회로도

2.7 Limiting Amplifier (LA)

LA는 TIA에서 생성된 작은 입력 전압을 디지털 블록에서 사용할 수 있는 수백 mV 대로 증폭하는 역할을 한다. TIA에서 바로 수백 mV 대로 증폭할 경우 노이즈가 심하고 광 민감도가 좋지 않기 때문에 적절한 LA가 필요하다. LA는 높은 전압이득과 넓은 대역폭을 동시에 제공해야 한다 전체를 4단으로 구성하고 마지막 1단은 capacitive degeneration technique 사용해서 구성하였다. 마지막 단은 $1+g_m R_s/2$ 만큼 대역폭을 확장하였다. 4단 LA의 대역폭을 873.7MHz에서 1.11GHz로 확장하였다.

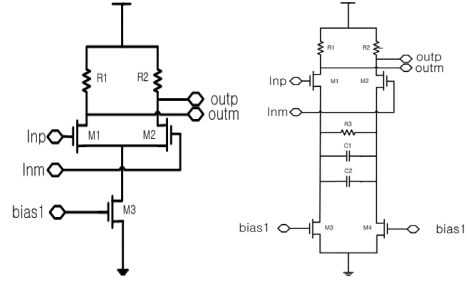


그림 7. (a)LA Unit 회로도 (b)Capacitive degeneration technique을 이용한 LA Unit 회로도

2.8 LVDS Output buffer

LVDS 인터페이스의 외부 100Ω과 정합하기 위해 쓰인다. output buffer에 흐르는 전류는 출력 전압 스윙을 조절 할 수 있다.[4]

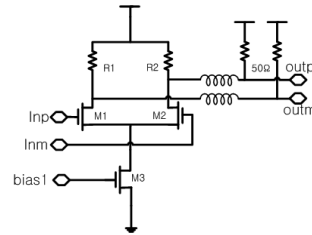


그림 8. LVDS Output buffer 회로도

III. 모의실험 결과 및 구현

그림 9은 각 구조의 eye diagram을 나타냈다. CS에서는 노이즈가 심하게 나타났지만 CG, RGC에서는 좋은 eye Pattern을 얻어내었다.

그림 10은 TZ gain과 대역폭을 나타낸 그래프이다.

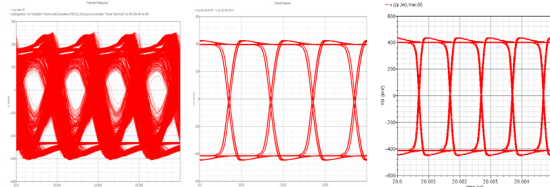


그림 9. 입력 전류 15uA 일 때 1Gb/s 에서의 eye diagram (a) CS (b) CG (c) RGC

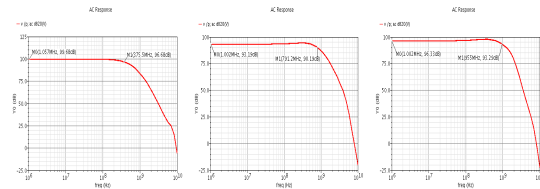


그림 10. TZ gain과 대역폭을 나타내는 AC 파형 (a) CS (b) CG (c) RGC

표 1은 위에서 설계한 CS, CG, RGC buffer를 이용한 광수신기의 성능을 각각 요약한다. 포토다이오드의 1pF 기생 커패시터에 대하여 CS-TIA에서 99.68dBΩ의 TZ gain과 375.5MHz의 대역폭을 얻었다. 10^{-12} BER과 9dB extinction ratio 및 0.6A/W responsivity를 예상할 경우에 -28.28dBm의 광 민감도를 얻었다. CS-TIA의 앞단에 CG buffer를 달아서 만든 CG-TIA에서는 90.19dBΩ의 TZ gain과 791.1MHz 대역폭, -20.74dBm 광 민감도를 얻었다. CS-TIA의 앞단에 RGC buffer를 달아서 만든 RGC-TIA에서는 93.33 dBΩ의 TZ gain과 955MHz대역폭, -21.51dBm 광 민감도를 얻었다. 설계한 광수신기 중에서 RGC-TIA가 가장 우수한 성능을 보였다. CG-TIA에 비해 TZ gain은 3.14dBΩ, 대역폭은 163.9MHz, Sensitivity는 0.77dBm, 전력소모는 8.85mW의 성능 차이를 나타냈다. CS-TIA의 경우 포토다이오드의 기생 커패시터 1pF 성분의 영향을 그대로 받기 때문에 대역폭이 375.5MHz로 나왔고 eye diagram에서도 선명한 eye pattern을 보이지 않았다. 그림 11은 구조별 layout이다. 각 칩 사이즈는 bonding Pad를 포함하여 0.35mm^2 이다.

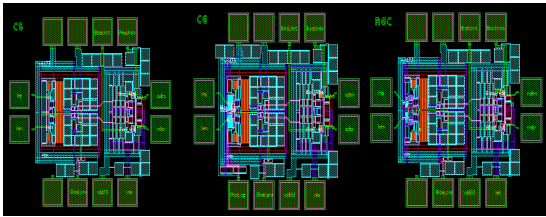


그림 11. 각 구조별 layout (PAD 포함)
(a)CS (b)CG (c)RGC

표 1. 각 구조별 성능 요약

Topology	CS-TIA	CG-TIA	RGC-TIA
Technology	CMOS 0.35μm		
VDD	3.3V		
Bit-Rate	1Gb/s		
TZ Gain	99.68	90.19	93.33
Bandwidth	375.5MHz	791.1MHz	955MHz
Input Noise Spectral Density	5.78pA/sqrt(Hz)	22.64pA/sqrt(Hz)	17.26pA/sqrt(Hz)
Sensitivity (BER)	-28.28dBm(10^{-12})	-20.74dBm(10^{-12})	-21.51dBm(10^{-12})
Power Consumption	69.17mW	86.76mW	77.91mW

표 2. POF system 수신기 성능 비교

	[1]	[5]	This Work (RGC)
Technology	CMOS 0.35μm	BiCMOS 0.6μm	CMOS 0.35μm
VDD	3.3V	3.3V	3.3V
Bit-Rate	250Mb/s	1Gb/s	1Gb/s
TZ Gain	60	85	93.33
Bandwidth	230MHz	650MHz	955MHz
Input Noise Spectral Density	N/A	6.307fA/sqrt(Hz)	17.26pA/sqrt(Hz)
Sensitivity (BER)	-22.6dBm(10^{-12})	-13dBm(10^{-9})	-21.51dBm(10^{-12})
Power Consumption	39.6mW	102.3mW	77.91mW

IV. 결 론

본 논문에서는 POF application에서 사용 할 수 있는 세 종류의 1Gb/s급 광수신기를 설계 및 비교를 하였다. 비교결과 RGC-TIA가 가장 우수한 성능을 나타냈다. POF application에 맞는 광수신기를 표 2.에 나타난 다른 논문들과 비교한 결과 TZ gain, 대역폭에서 가장 우수한 성능을 나타냈다. sensitivity와 전력소모가 [1]의 수신기보다 좋지 않지만 target bit-rate가 RGC-TIA는 1Gb/s이기 때문에 전체적으로 더 나은 수신기를 설계하였다. 이로써 저가의 공정으로도 GHz 대역의 광통신을 위한 수신기를 보급 할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] K. Y. Park, W. S. Oh, "Design of 250Mb/s Low-Power Fiber optical Transmitter and Receiver ICs for POF Applications," *Journal of Semiconductor Technology and science*, Vol. 11, No. 3, pp221-228, Sep. 2011.
- [2] B. Razavi, *Design of Integrated Circuits for Optical Communications*, 1st.ed, New York:McGraw-Hill Inc., 2002.
- [3] S. M. Park and H. J. Yoo, "1.25 Gbps Regulated Cascode CMOS Transimpedance Amplifier for Gigabit Ethernet Applications," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.39, no.1, pp.112-121, Jan. 2004.
- [4] W. S. Oh, K. Park, K. W. Min, H. S. Son, Y. S. Lee "1.2V 10Gb/s Highly Cpd Isolated and Bandwidth Enhanced Optical Receiver in 0.35um CMOS Technology," *ICACT2009. Advanced Communication Technology*, vol.03, pp.1586-1590, Feb. 2009.
- [5] M. Atef, R. Swoboda, H. Zimmermann "A Gigabit Fully Integrated Plastic Optical Fiber Receiver for a RC-LED Source," *2012 IEEE 15th international symposium. Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems*, pp.74-78, Apr. 2012.