

CMOS インバータを用いた残留キャリア引き抜きによる 可視光通信用 LED 高速駆動

7311629 岸 俊樹

1. まえがき

現在、我々の住む世界には様々な照明が溢れている。その多くは LED に置き換わりつつあり、部屋の明かりや信号機など様々なものがある。それら光源から発生する目に見える光（可視光）の LED を人の目では感知できない高速度で点滅させ通信するのが可視光通信である [1]。LED は蛍光灯などに比べ高速応答が可能であり、可視光通信の光源としては最適であるが、それでも動作速度が数十 Mb/s 以下である。さらに、蛍光体を用いた白色 LED については蛍光体の特性により数 Mb/s となっている [2]。そこで、伝送速度のさらなる向上に向けて個々の LED に別々の情報を載せて並列伝送させる方式が検討されている [3][4]。しかしこの方式では送信側・受信側共に装置の規模が大きくなり、消費電力およびコストが増加するため、個々の LED での伝送速度の向上により多重化の負担を軽減することが望ましい。

LED の伝送速度は LED 自身の接合容量により大きく制限されている [5]。これは LED が ON 状態から OFF 状態に変わる時に接合容量に残る残留キャリアの放電時定数が高く、消灯に時間がかかるためである。これに対し、著者ら [6][7] は、キャリア引き抜き回路を用いることにより残留キャリアを引き抜き、変調速度の向上を図った。しかし、このキャリア引き抜き回路はディスクリット素子で構成されており、実用的でない。また、キャリア引き抜き部分を駆動させるためにその分、消費電力が高くなってしまふ問題点がある。

本研究では LED 消灯時の残留キャリアを、CMOS プロセスを用いたインバータ回路のスイッチング動作により短絡させ強制的に引き抜く。これによりキャリア引き抜き機能付き LED ドライバを実用的な構成にするとともに、キャリア引き抜き部分での消費電力を発生させないようにする。

なお、本研究では駆動する LED として青色 LED を用いているが、白色 LED は、青色 LED と黄色に発光する蛍光体を組み合わせた方式が一般的である。蛍光体により白色 LED の動作速度は大幅に制限されるが、受信側にブルーフィルタを用いて青色 LED のスペクトルを抜き出すことにより高速化が図れる [8] [9]。このため、本稿では、蛍光体を除けば白色とほとんど同じ特性をもつ青色 LED を用いて、純粋なキャリア引き抜きの効果を調べた。

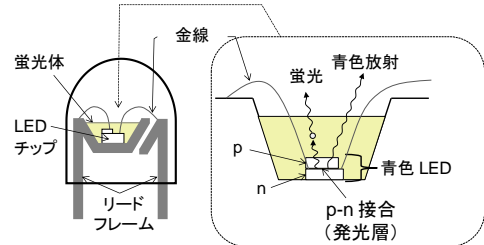


図 1 砲弾型白色 LED の基本構造

2. LED の構造と接合容量による伝送速度制限

本稿で使用した弾道型 LED の構造を図 1 に示す。LED チップに電流を流すと、電子は n 型 GaN 層から発光層へ、一方 p 型 GaN 層からは正孔（ホール）が発光層へ注入される。ここで、電子と正孔が再結合する際にエネルギーを放出し、発光層のバンドギャップエネルギーに相当する波長の光が、発光層から放出される。白色 LED の発光方式はいくつか提案されているが、発光効率の高さや構造の単純さから、青色 LED を用いて蛍光体を励起させ白色を実現する方式が広く普及している。

LED を高速変調する上で問題となるのは、p 型半導体層と n 型半導体層の間に現れる pn 接合の容量である。LED の立ち上がりおよび立下り時間は、この接合容量 C と直列抵抗 R で表される CR 時定数、およびキャリアの自然放出の再結合寿命により与えられる。この影響は LED の変調電流が ON 状態から OFF 状態に入る立下り時間において顕著である [5]。また、この立下り時間は大きな電圧依存性があり、これは発光層からのキャリアの掃出しが原因となっている。LED 電圧の振り幅が小さい場合、キャリアは再結合するまで発光層の中に残存する。その結果、キャリアが再結合し光強度が減衰するまでに自然放出の寿命分の時間がかかってしまう。

一方電圧の振り幅が大きい場合には pn 接合に発生する電界のため、発光層から電界のかかっている n 型、p 型の領域に掃出される。このキャリア掃出し効果は発光層に大きな電界がかかる時、すなわち電圧の振り幅が大きい場合に効果的になる。この掃出し時間は自然放出の寿命よりもはるかに短いため、立下り時間は掃出し時間により決定される [5]。

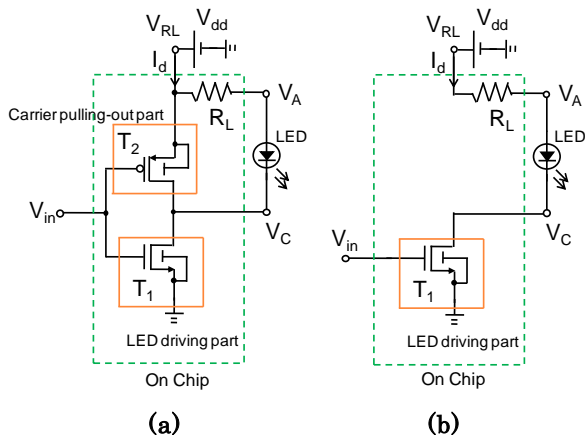


図 2 LED 駆動回路

(a) キャリア引き抜きあり (b) キャリア引き抜きなし

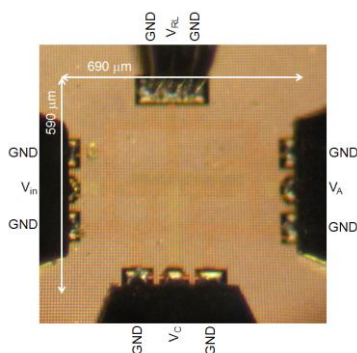


図 3 試作したキャリア引き抜き回路の顕微鏡写真

3. キャリア引き抜き LED 駆動回路の設計および試作

キャリア引き抜き回路により掃きだし時間の短縮を行う。本研究で設計したキャリア引き抜きありの LED 駆動回路の回路図を図 2(a) に、キャリア引き抜きなしの LED 駆動回路の回路図を図 2(b) に示す。図 2(a) の LED 駆動部分と図 2(b) の LED 駆動部分は同じ回路構成となっている。LED 駆動部分には T_1 によるソース接地を用いている。図 2(a) では LED 消灯時に NMOS はオフとなり PMOS はオンとなるため CR 時定数に関して LED に対する直列抵抗 (R) が小さくなり、キャリアを引き抜きその結果、掃きだし時間を短縮できる。しかし、図 2(b) では PMOS がいないので LED 消灯時に R は小さくならず、キャリアを引き抜かない。

提案した LED 駆動回路は 0.18- μm CMOS IC プロセスを使用している。試作したキャリア引き抜き回路のチップ顕微鏡写真を図 3 に示す。チップ面積は、0.41 mm^2 (0.69 mm \times 0.59 mm) である。

4. シミュレーション

回路シミュレーションで使用するパラメータを定義する。図 4 のように送信機 (LED 駆動回路) への入力電圧を V_{in} とし、LED 変調電流を i_d 、LED の接合容

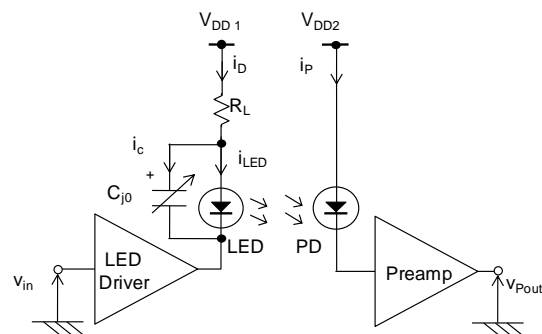


図 4 シミュレーションおよび測定における評価定義

表 1 シミュレーションおよび実験諸元

		With carrier pulling-out	Without carrier pulling-out
Transistor	T_1	Type	NMOS
		Gate length	0.36 μm
		Gate width	360 μm (4 $\mu\text{m} \times 90$)
	T_2	Type	PMOS
		Gate length	0.30 μm
		Gate width	2160 μm (24 $\mu\text{m} \times 90$)
LED		NSPB500AS (InGaN/GaN)	
Load	R_L	12 Ω	
DC power supply	V_{dd}	3.3 V	

量を C_{j0} とする。さらに、接合容量の充放電電流 i_c と接合を縦断して流れる真性 LED 電流 i_{LED} に分けて考える。この為、図 4 の LED に接合容量は無いものとする。光受信器のフォトダイオード電流を i_p とする。受信機出力電圧を V_{Pout} とする。

シミュレーション諸元を表 1 に、LED 電流の最小値の周波数特性 (シミュレーション値) を図 5 にそれぞれ示す。入力信号には小信号振幅の正弦波を用いる。図 5 から、キャリア引き抜きなしの LED 駆動回路では、LED 消灯時の接合容量に溜まった残留キャリアの放電電流により LED が点灯していると言える。一方、キャリア引き抜きありの LED 駆動回路では、放電電流はキャリア引き抜き部分の流れ、その結果 LED 電流 i_{LED} は 0.1~100 MHz の全範囲で 0 mA まで降下しており、LED は消灯していると言える。

5. オンウェハ測定

5.1. 正弦波入力における LED 駆動回路の応答特性

試作した LED 駆動回路における LED 駆動電流の周波数特性評価系を図 6 に、実験諸元を表 1 にそれぞれ示す。破線で囲まれている部分が CMOS 駆動回路および LED を使用している回路である。小信号振幅の正弦波による入力信号が信号発生器 (Anritsu MP1630B) よ

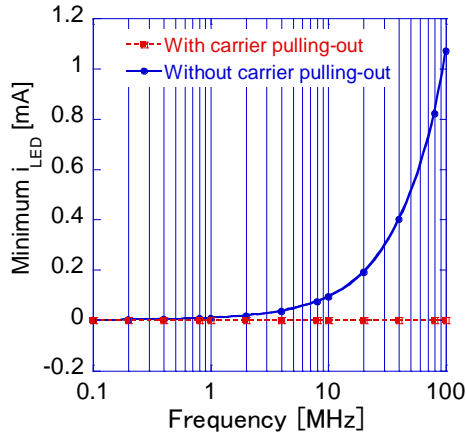


図 5 LED 電流の最小値における周波数特性(シミュレーション)

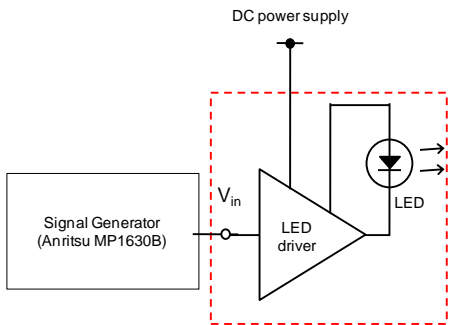


図 6 正弦波入力における評価系

り入力される。

一定の入力信号を入力した時の LED 変調電流の大きさは相互コンダクタンス $G_m(f)$ を用いて以下の式で示される。これを dB 表示したものを相互コンダクタンス利得 $A(f)$ とする。LED 変調電流の遮断周波数は $G_m(100\text{kHz})$ を基準として 3 dB 下がった時とする。

$$G_m(f) = \frac{i_D}{v_{in}} \quad (1)$$

$$A(f) = 20 \log \left(\frac{G_m(f)}{G_m(100\text{kHz})} \right) \quad (2)$$

正弦波入力における LED 変調電流の周波数特性を評価する。LED 駆動電流の周波数特性を図 7 に示す。相互コンダクタンス利得を求めるための i_D は、図 2(a), (b)における R_L の両端の電圧を測定することにより求めた。この評価における LED 駆動回路への入力信号振幅は小信号振幅とした。図 7 から遮断周波数は 60 MHz であることが分かる。

5.2. 方形波入力における LED 駆動回路の応答特性

LED 端子間電圧、光出力周波数特性および消費電力の評価系を図 8 に、実験諸元を表 1 にそれぞれ示す。

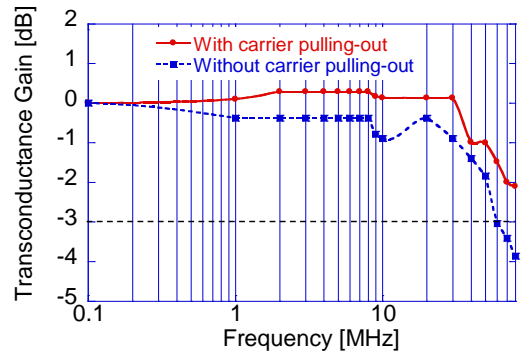


図 7 測定によるトランスコンダクタンスゲインの周波数特性

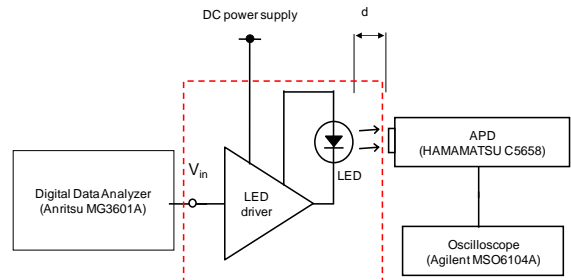


図 8 方形波入力における評価系 ($d = 5 \text{ mm}$)

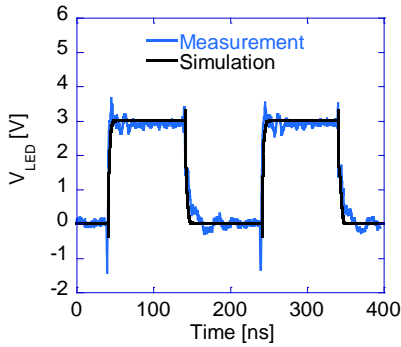
方形波の入力信号がデジタルデータアナライザ (Anritsu MG3601A)より入力され、光信号を電気信号に変換する光受信器には、遮断周波数 50 kHz-1 GHz のアバランシェフォトダイオード(APD)モジュール(浜松ホトニクス C5658)を使用した。入力信号 V_{in} の最大値および最小値はそれぞれ 3.3 V および 0 V ($3.3 V_{p-p}$)である。図 4 より光出力は V_{pout} で示される。立ち上がり時間 t_r はピーク値の 10%-90%、立ち下がり時間 t_f はピーク値の 90%-10%の時間である。方形波入力においては、受光器の低域遮断周波数が 50 kHz のため、方形波入力としては 5MHz を基準としている。

5.2.1. LED 駆動回路の消費電力

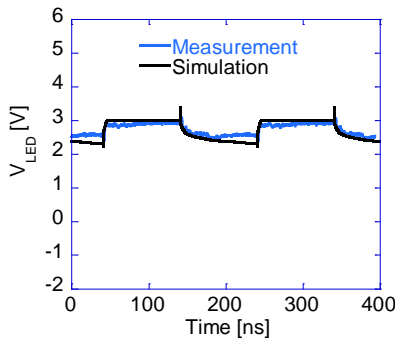
提案した CMOS インバータ構成による LED 駆動回路の低消費電力構成を検証するために、5MHz の方形波入力に対するキャリア引き抜きありおよびなしの LED 駆動回路における消費電力を評価する。オンウェハ測定におけるキャリア引き抜きありおよびなしの消費電力を表 2 に示す。ここで、図 2 に示すように I_d および V_{dd} はそれぞれ直流電流および直流電圧を示す。表 2 に示すように、提案した LED 駆動回路ではキャリア引き抜き部を加えることによって、消費電力は増加しないことが分かる。これは、キャリア引き抜きを用いた LED 駆動回路を使用することにより LED の消灯時間を短くするために余分な消費電力の増加が必要ないということを示している。

表 2 5 MHz の方形波入力に対するキャリア引き抜きありおよびなしの消費電力の測定結果

LED drive circuits	I_d [mA]	V_{dd} [V]	Power consumption [mW]
With carrier pulling-out	10.0	3.3	33.0
Without carrier pulling-out	10.0	3.3	33.0



(a)



(b)

図 9 方形波入力による LED 駆動回路の LED 端子間電圧波形 (5 MHz) (a)キャリア引き抜きあり (b)キャリア引き抜きなし

5.2.2. LED 端子間電圧波形

方形波入力 5MHz におけるキャリア引き抜きありの LED 駆動回路の LED 端子間電圧波形を図 9(a)に、キャリア引き抜きなしの LED 駆動回路の LED 端子間電圧波形を図 9(b)に示す。図 9(a), (b)それぞれを見ると分かるように測定波形とシミュレーション波形はほぼ等しいことが分かる。また、図 9(a), (b)のそれぞれの測定波形を比較するとキャリア引き抜きありの LED 駆動回路では LED 端子間電圧 V_{LED} は 0V まで下がり、キャリア引き抜き回路の効果が確認できる。

5.2.3. 光出力波形

キャリア引き抜きありの LED 駆動回路およびキャリア引き抜きなしの LED 駆動回路の方形波入力 5 MHz における光出力波形を図 10 に示す。これより求

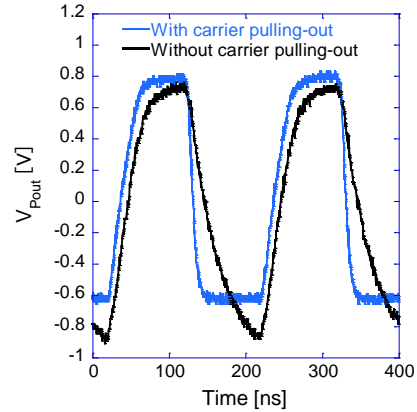


図 10 方形波入力による測定した光出力波形 (5 MHz)

表 3 立ち上がり時間 (t_r), 立ち下がり時間 (t_f), デューティ比

LED driver	t_r	t_f	Duty cycle
With carrier pulling-out	32.8 ns	13.6 ns	45.9%
Without carrier pulling-out	42.0 ns	61.6 ns	53.5%

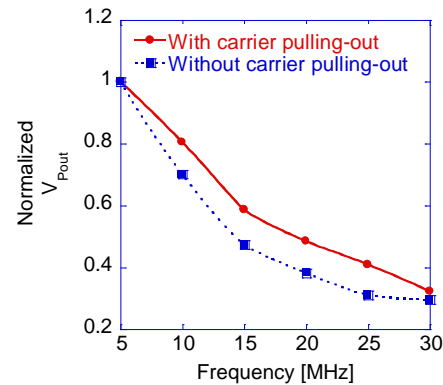


図 11 測定による 5 MHz の方形波入力時における光出力で規格化した平均光出力電圧の周波数特性

めた立ち上がり時間 t_r , 立ち下がり時間 t_f , デューティ比を表 3 に示す。キャリア引き抜き部分を動作させることにより、立ち下がり時間が 61.6 ns から 13.6 ns へと約 1/5 に減少した。

5.2.4. 光出力周波数特性

キャリア引き抜きありの LED 駆動回路およびキャリア引き抜きなしの LED 駆動回路ともに 5MHz の方形波入力時における光出力で規格化した平均光出力電圧の周波数特性を図 11 に示す。図 11 を見ると分かるようにキャリア引き抜きありの LED 駆動回路およびキャリア引き抜きなしの LED 駆動回路ともに周波数に対し反比例であることが分かる。キャリア引き抜きありおよびなしの LED 駆動回路において規格化した V_{Pout} に大きな差はない。

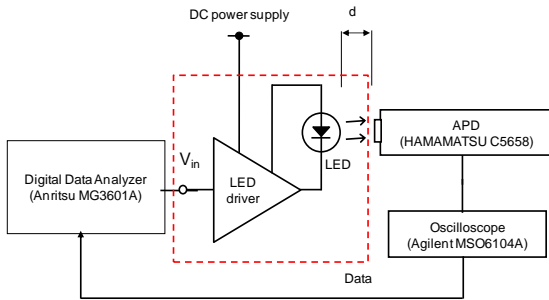


図 12 光伝送特性評価系 ($d = 5 \text{ mm}$)

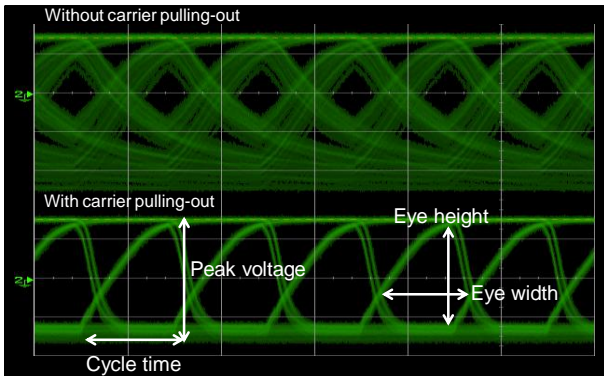


図 13 NRZ PRBS 信号を入力した時の測定したアイパターン (20 Mb/s)

表 4 測定したアイ開口率 (20 Mb/s)

Eye opening	With carrier pulling-out	Without carrier pulling-out	Improvement
Vertical (Eye height)/(Peak voltage)	75%	28%	268%
Horizontal (Eye width)/(Cycle time)	88%	46%	191%

5.3. 光伝送特性

ランダム信号を入力した際のキャリア引き抜きありおよびキャリア引き抜きなしの LED 駆動回路のビット誤り率(BER:Bit Error Rate)評価系を図 12 に、実験諸元を表 1 にそれぞれ示す。デジタルデータアナライザ (Anritsu MG3601A) により発生した PRBS(pseudo-random bit stream)信号 (パターン長 2^7-1) を入力し、フォトダイオードにより受信した光信号を、再びデジタルデータアナライザの誤り検出部に入力して誤り率の測定を行った。PRBS 信号 V_{in} の最大値および最小値はそれぞれ 3.3 V および 0 V (3.3 V_{p-p}) である。受光器より受け取られた光信号はデジタルデータアナライザのエラー検出部に入力され、BER が評価される。

20 Mb/s の NRZ PRBS 信号を入力したアイパターンを図 13 に示す。この図より求めたアイ開口率を表 4 に示す。アイ開口の垂直方向は 268%増加し、水平方向は 191%増加した。キャリア引き抜きなしの LED 駆

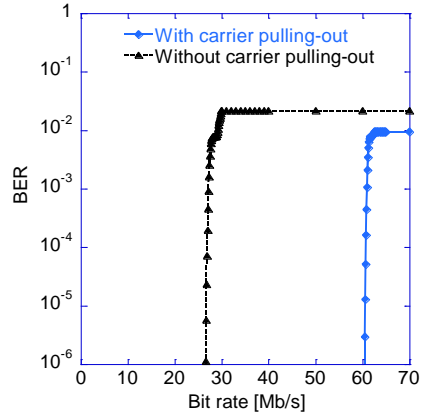


図 14 測定によるビット誤り率のビットレート特性

表 5 ビット誤り率が 10^{-6} 以下となる最大ビットレート

LED drive circuits	Bit rate	Improvement
With carrier pulling-out	60.3 Mb/s	228%
Without carrier pulling-out	26.4 Mb/s	Reference

動回路ではほとんどアイは開いていない。しかし、キャリア引き抜きありの LED 駆動回路ではアイ開口が改善されていることが分かる。これはキャリア引き抜きありの LED 駆動回路においてキャリア引き抜きなしの LED 駆動回路よりも立ち下り時間が減少したためである。

ビット誤り率のビットレート特性を図 14 に示す。図 14 より求めたビット誤り率が 10^{-6} 以下となる最大ビットレートを表 5 に示す。キャリア引き抜きなしの LED 駆動回路では 26.4 Mb/s を超えると急激に誤り率が増加している。キャリア引き抜きありの LED 駆動回路では 60.3 Mb/s まで低誤り率を維持しており、最大ビットレートが 228%増加することが示される。これにより青色 LED におけるキャリア引き抜きありの LED 駆動回路の有効性が確認された。

6. まとめ

本研究では、キャリア引き抜き回路を実用的な回路構成にするとともに、キャリア引き抜き部分での消費電力を発生させないようにするために CMOS インバータを用いた LED 駆動回路を提案した。本回路では、LED 高速化の妨げとなる残留キャリアを、LED のカソードと負荷抵抗の電源側の端子の間を短絡させることにより強制的に引き抜く。これにより、LED 端子間電圧振幅を 0 V まで下げ、光出力応答の高速化を図った。0.18- μm CMOS プロセスを用いて試作した LED 駆動回路を用いて LED 電圧の周波数特性を測定し、キャリア引き抜きありの回路が設計どおりキャリアを引き抜くことを検証した。その結果、青色 LED を使い、5 MHz の方形波を入力した時、キャリア引き抜きを行わない回路と比べ、立ち下り時間が 61.6 ns から 13.6 ns に

減少した。また、ランダム信号入力において、ビット誤り率が 10^{-6} 以下となる最大ビットレートが 26.4 Mb/s から 60.3 Mb/s へと改善された。これらの結果から、集積化により実用的で、消費電力の増加を伴わないキャリア引き抜き機能付き CMOS インバータ回路による LED 駆動高速化の効果が示された。

謝辞

本研究は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、日本ケイデンス株式会社、メンター株式会社、アジレント・テクノロジー株式会社の協力で行われたものである。また、本チップ試作は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、ローム㈱および凸版印刷㈱の協力で行われたものである。また、本研究は科研費基盤研究(C)(225640392)の助成を受けたものであり、一部は東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究により行われた。

文 献

- [1] S. Haruyama, "Visible light communication," IEICE Trans. A, Vol. J86-A, No. 12, pp. 1284-1291, Dec. 2003.
- [2] S. Miyahara, S. Aono, Y. Matsumoto, "Preproduction of LED driver for visible light communications and evaluation of response performance of visible LED," Technical report of IEICE, ICD2005-44, Vol. 105, No. 184, pp. 25-30, Jul. 2005.
- [3] M. Ishida, S. Miyauchi, T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa "A high speed design for parallel wireless visible light communication using 2D transceiver," Technical report of IEICE, OCS2005-20, Vol. 105, No. 76, pp. 49-54, May. 2005.
- [4] M. Ishida, S. Haruyama, M. Nakagawa, "An analysis of transmission speed limitation in parallel wireless visible light communication systems," Technical report of IEICE, CS2006-76, Vol. 106, No. 450, pp. 37-41, Jan. 2007.
- [5] E. Fred Schubert, "Light-Emitting Diodes," pp. 280-337, Cambridge University Press, 2006.
- [6] H. Tanaka, Y. Umeda, O. Takyu, "High speed LED driver for visible light communications with drawing-out of remaining carrier" Technical report of IEICE, CS2010-109, Vol. 110, No. 439, pp. 43-48, Mar. 2011
- [7] H. Tanaka, Y. Umeda, O. Takyu, "High-speed LED driver for visible light communications with drawing-out of remaining carrier," Radio and Wireless Symposium (RWS), 2011 IEEE pp. 295-298, Jan. 16-19, 2011.
- [8] H. Le-Minh, O'Brien, G. Faulkner, Lee, K., D. Jung, and O. YunJe, "80 Mb/s visible light communications using pre-equalized white LEDs" Submitted to ECOC 2008.
- [9] H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, and E. T. Won, "100 Mbit/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 21, no.15, pp. 1063-1065, Aug. 1, 2009.

本研究に対する学会発表など

- (A) 査読付き論文
なし
- (B) 査読付き小論文
Toshiki Kishi, Hiroyuki Tanaka, O Yohtaro Umeda 「A High Speed LED Driver for Visible Light Communications with Drawing out Remaining Carriers by a CMOS Inverter」 Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference 2011, pp. 1234-1237 (計 4 頁), 2011 年 12 月 8 日
- (C) 査読なし論文
岸 俊樹, O 榎田洋太郎, O 田久 修 「CMOS プロセスを用いた直列均等分圧回路における基板バイアス効果補正法の試作および小信号等価回路解析による検証」 電気学会電子回路研究会資料 ECT-11-28, pp. 13-18 (計 6 頁), 2011 年 3 月 24 日
岸 俊樹, 田中拓行, O 榎田洋太郎 「CMOS インバータを用いた残留キャリア引き抜きによる可視光通信用 LED 高速駆動の検討」 電子情報通信学会集積回路研究会技術報告 ICD2011-38, pp. 137-142 (計 6 頁), 2011 年 7 月 22 日
岸 俊樹, O 榎田洋太郎 「分圧モニターを用いた直列均等分圧回路の分圧不均等の補正」 電子情報通信学会回路とシステム研究会技術報告 CAS2011-55, NLP2011-82, pp. 129-134 (計 6 頁), 2011 年 10 月 21 日
- (D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表
小山 雅史, 岸 俊樹, 藤岡 翔太, O 榎田 洋太郎 「InGaAs HEMT を用いた高効率スイッチング動作型電力増幅器の設計」 東北大学電気通信研究所平成 23 年度共同プロジェクト研究発表会, 2012 年 3 月