

残留キャリアの引き抜きによる可視光通信用 LED の高速駆動

j7310641 田中 拓行

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]。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。本研究は LED 消灯時の残留キャリアを、FET スイッチを用いて短絡させ強制的に引き抜く。これにより LED 端子間電圧を降下させ、LED 光出力応答の改善を図る。

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ているが、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 [6] [7]。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確認した。

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。

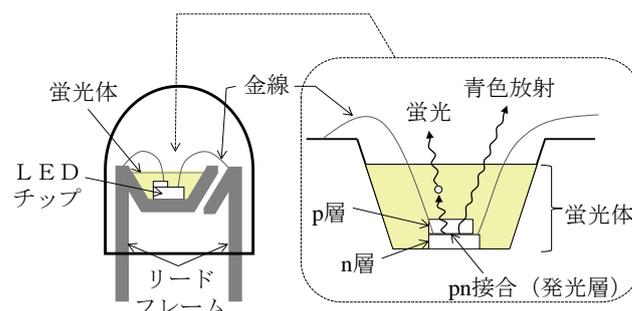


図 1：砲弾型白色 LED の基本構造

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ため、発光層から電界のかかっていない 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]。

3. キャリア引き抜き LED 駆動回路の設計

図 2 に設計した回路図を示す。破線で囲まれている部分が LED 駆動回路部、実線で囲まれている部分がキャリア引き抜き部となっている。LED の駆動には T_1 による単純なソース接地を用いている。 T_3 は T_2 を制御し、 T_1 とは逆相の信号を T_2 に送る。これにより T_2 は LED 消灯時に ON となり、LED 間を短絡させ残留キャリアを引き抜く。LED 点灯時には、 T_2 は OFF となり引き抜きは動作しない。

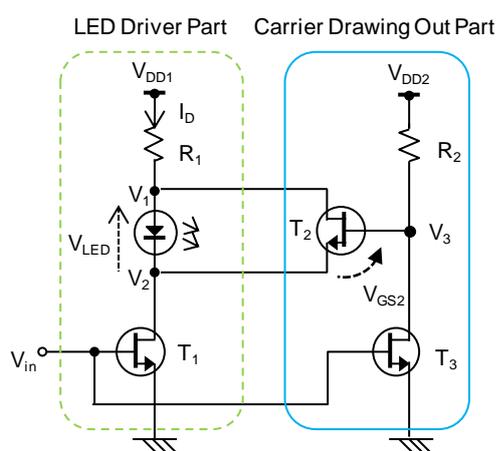


図 2 : 残留キャリア引き抜き回路

4. 回路試作と評価定義

4.1. LED 駆動回路の試作

作成した LED 駆動回路の写真、回路のパラメータ、及びトランジスタ・LED の型式名を図 3、表 1、表 2 に示す。信号は写真左側にある BNC コネクタより入力され、中央の LED を駆動する。

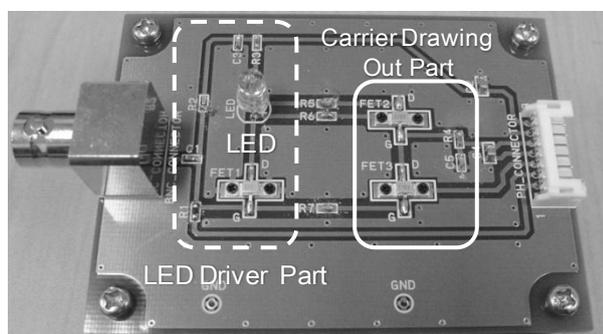


図 3 : 試作回路

表 1 : 試作回路諸元

パラメータ	値
V_{in}	-4.5/-2.0V, (2.5 V _{p-p})
V_{DD1}	12V
V_{DD2}	12V
V_{SS}	-4.88V
R_1	51Ω
R_2	1500Ω

表 2 : トランジスタと LED の型式名

パラメータ	値
T_1, T_2, T_3	MGF2407A (三菱電機製)
LED	NSPB500AS (日亜化学製)

4.2. 評価系と評価パラメータの定義

作成した LED 駆動回路の伝送特性を測定する為の評価系を図 4 に示す。入力信号は信号発生器 (Anritsu MP1630B) より入力し、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。

次に測定パラメータを定義する。図 5 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 の接合容量を C_{j0} とする。さらに、接合容量の充放電電流と 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 5 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。受信機の実出力電圧を V_{Pout} とする。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。

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

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

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 20%-80%、立ち下がり時間 t_f はピーク値の 80%-20% の時間である。また、以降本文中に出てくる ON, OFF はキャリア引き抜き回路の動作を示している。OFF 時はキャリア引き抜き部の印加電圧 V_{DD2} を 0 V にし、引き抜きを動作させないようにする。方形波信号入力においては、受光器の低域遮断周波数が 50 kHz のため、入力信号としては 5 MHz を基準としている。

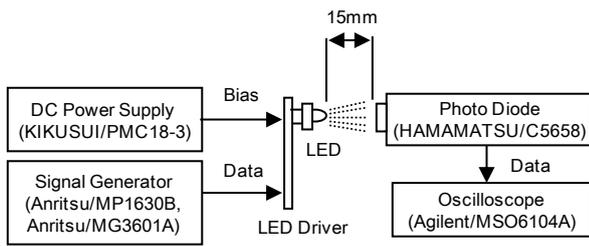


図 4 : LED 駆動回路の評価系

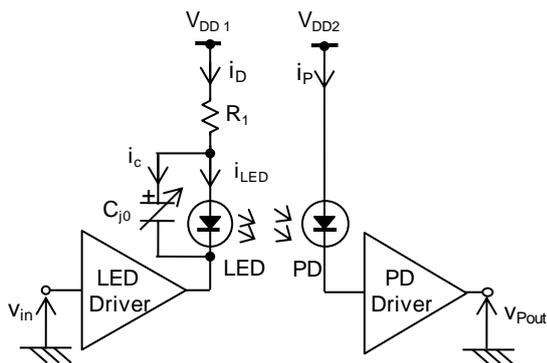


図 5 : 入出力の定義

5. 試作回路周波数特性評価

正弦波信号入力における LED 変調電流の周波数特性、及び LED 変調電圧について評価する。

5.1. LED 変調電流周波数特性評価

図 6 に LED 駆動電流の周波数特性を示す。相互コンダクタンス利得を求めるための i_D は、図 2 における R_1 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 $v_{in}=2.5$ V 一定とし、100 kHz における LED 変調電流が 50 mA_{p-p} となるようにした。図 6 から遮断周波数は 470 MHz であり、LED の応答特性を見るためには十分な周波数帯域があることがわかる。

5.2. LED 電流 i_{LED} の周波数特性評価

図 7 に LED 電流の最小値の周波数特性 (シミュレーション値) を示す。この図から、引き抜き回路 OFF の時、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、引き抜き回路 ON の時、放電電流は引き抜き回路を流れ、その結果 LED 電流 i_{LED} は 0.1~1000 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。

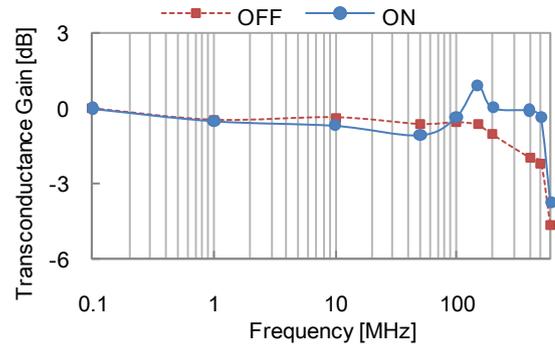


図 6 : LED 変調電流 i_D の周波数特性(実測)

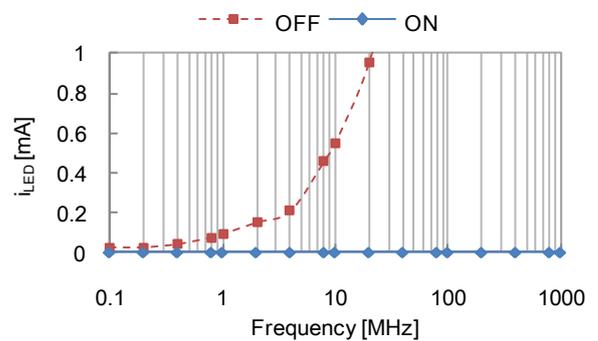


図 7 : LED 電流 i_{LED} の周波数特性 (シミュレーション)

6. LED の端子間電圧波形と光出力特性

6.1. LED 電圧波形

図 8 に入力信号 5 MHz 方形波における LED の端子間電圧 V_{LED} (図 2 参照) を示す。引き抜き ON の時 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。

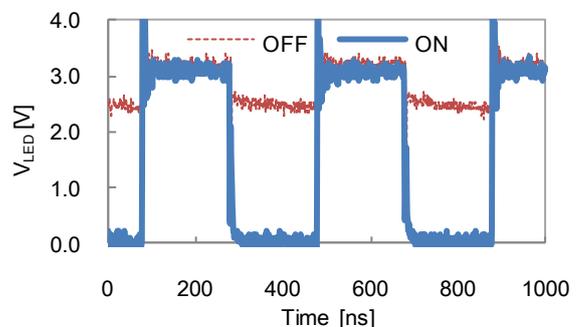


図 8 : LED 電圧 引き抜き OFF-ON (実測)

6.2. 立ち上がり時間と立ち下がり時間

図9にキャリア引き抜き OFF, および ON 時の入力信号 5 MHz 方形波における光出力波形を示す. これより求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. キャリア引き抜きを動作させることにより, 立ち下がり時間が 56 ns から 10 ns へと約 1/5 に減少した. しかし, キャリア引き抜きを行いつつ, LED 点灯のための接合容量への充電時間が増える. その結果, 点灯が遅くなる現象が発生し, LED の立ち上がり時間が増加する. それでもなお, デューティ比は立ち下がり時間の改善により 53% から 49% となることがわかる.

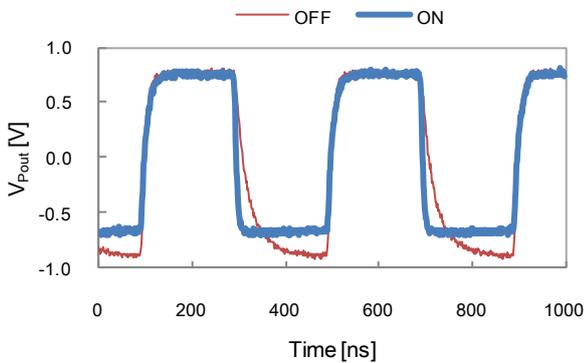


図9：5 MHzにおける光出力波形（実測）

表3： t_r , t_f , デューティ比

引き抜き	t_r	t_f	デューティ比
OFF	18 ns	56 ns	53%
ON	22 ns	10 ns	49%

7. ビット誤り率の評価

7.1. ビット誤り率測定の評価系

ランダム信号を入力した際に得られるビット誤り率(BER:Bit Error Rate)の評価系を図11に示す. デジタルデータアナライザ (Anritsu MG3601A) により発生した PRBS (Pseudorandom 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.

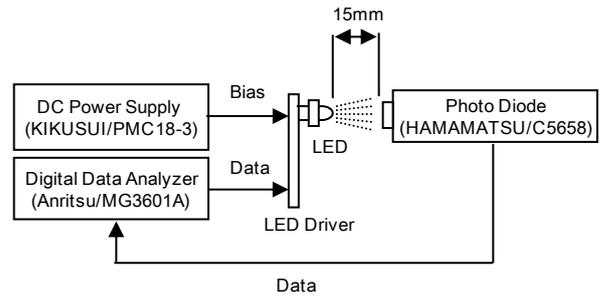


図11 BERの評価系

7.2. キャリア引き抜き回路の BER 評価

図12に入力信号 70 Mb/s, 信号長 2^7-1 の PRBS 信号を入力したアイパターンを示す. この図より求めたアイ開口率を表4に示す. アイ開口の水平方向は 285% 増加し, 垂直方向は 486% 増加した. 引き抜き OFF ではほとんどアイは開いていない. しかし, キャリア引き抜きを動作させることにより, アイ開口が改善されていることがわかる.

図13にビット誤り率の帯域特性を示す. この図より求めた, 誤り率が 10^{-7} 以下となるビットレートを表5に示す. 引き抜き OFF の時は 69 Mb/s を超えると急激に誤り率が増加している. 引き抜き ON 時は 95 Mb/s まで低誤り率を維持しており, 138% 高速化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回路の有効性が確認された.

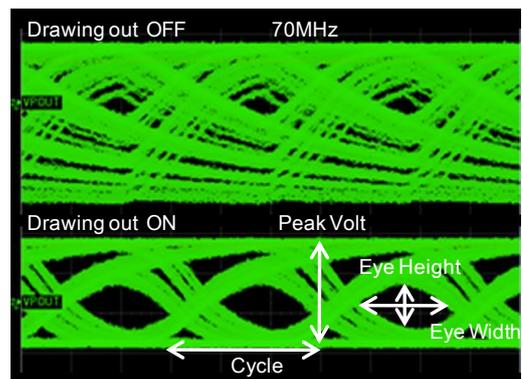


図12：70Mb/sにおけるアイパターン（実測）

表4：アイ開口率

アイ開口率	OFF	ON	改善率
Vertical (Eye Height) / (Peak Volts)	20%	57%	285%
Horizontal (Eye Width) / (Cycle)	8%	39%	486%

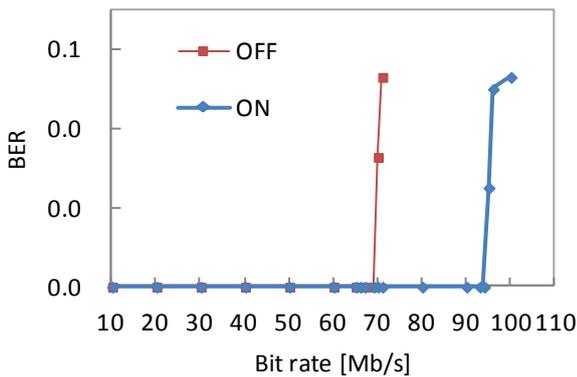


図 13 : ビット誤り率のビットレート特性 (実測)

表 5 : 低誤り率ビットレート

引き抜き	ビットレート	改善率
OFF	69 Mb/s	基準
ON	95 Mb/s	138%

8. まとめ

本稿では LED 高速化の妨げとなっている残留キャリアを LED の両端を短絡させ強制的に引き抜き, LED 端子間電圧振幅を 0 V まで下げることによる光出力応答の高速化を検討した. また, 残留キャリア引抜機能を持つソース接地型可視光通信用 LED 駆動回路を設計, 試作した. この駆動回路を用いて LED 電圧の周波数特性を調べ, キャリア引き抜き回路が設計通りキャリアを引き抜くことを確認した. その結果, 青色 LED において, 5 MHz の方形波信号を入力した時, 立ち下がり時間が 56 ns から 10 ns に減少し, 立ち上がり時間は 18 ns から 22 ns へ増加した. また, ランダム信号入力において, ビット誤り率が 10^{-7} 以下となるビットレートが 69 Mb/s から 95 Mb/s へと改善され, キャリア引抜回路の有効性が示される. 今後は引き抜き条件の最適化, およびブルーフィルタを用いた白色 LED の評価を行う.

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, 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, 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ものである.

文 献

[1] 春山 真一郎, “可視光通信,” 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J86-A, No.12, pp1284-1291, 2003 年

12 月.

- [2] 宮原 晋平, 青野 聖, 松本 佳宣, “可視光通信用 LED ドライバーの試作と可視光 LED の応答性能の評価,” 信学技報, ICD2005-44, pp25-30, 2005 年 7 月.
- [3] 石田 正徳, 宮内 聡, 小峯 敏彦, 春山 真一郎, 中川 正雄, “2 次元送受信機による高速な並列空間可視光通信システムの設計,” 信学技報, OCS2005-20, pp49-54, 2005 年 5 月.
- [4] 石田 正徳, 春山 真一郎, 中川 正雄, “並列可視光無線通信方式における通信速度限界の検討,” 信学技法, CS2006-76, pp37-41, 2007 年 1 月.
- [5] E. Fred Schubert, “Light-Emitting Diode” pp. 281-337, Cambridge University Press, 2006
- [6] H. Le-Minh, O'Brien, G. Faulkner, Lee, K., D. Jung, and Oh, Y.: “80 Mb/s Visible Light Communications Using Pre-Equalized White LEDs” Submitted to ECOC 2008.
- [7] 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
Hiroyuki Tanaka, ○Yohtaro Umeda, ○Osamu Takyu 「High-Speed LED Driver for Visible Light Communications with Drawing-Out of Remaining Carrier」2011 IEEE Radio & Wireless Symposium, pp. 295-298, 2011 年 1 月 19 日
- (C) 査読なし論文
田中拓行, ○榎田洋太郎, ○田久 修「残留キャリア引き抜きによる可視光通信用 LED の高速駆動の検討」通信方式研究会 (CS) 信学技報, vol. 110, no. 441, CS2010-79, pp. 43-48, 2011 年 3 月 3 日
- (D) 学会大会等の口頭発表・ポスター発表
田中拓行「可視光通信」The 7th IEEE Tokyo Young Researchers Workshop, 発表番号 11 番, 2010 年 11 月 22 日
田中拓行, 下垣勇介, ○榎田洋太郎, ○田久修「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」2010 年 電子情報通信学会総合大会, A-1-6, 2010 年 3 月 16 日