発光ダイオードを用いた超高速紫外線パルス光源の開発と応用

正会員 荒 木 勉 (徳島大学)

Design and Performance of High-speed, Ultra-violet Pulsed Light Source Using a Light Emitting Diode

Member Tsutomu Araki (Univ. of Tokushima)

KEYWORDS : light emitting diode, ultraviolet light, nanosecond pulse, photodetector, blue LED

1. はじめに

ナノ秒領域の高速光測定は高分子構造変化検出、エネルギー移動追跡などに利用できる重要な手法である。そのための装置応答の校正には時間制御ができるインパルス光源が必要となる。その光源を青色発光ダイオード(LED)で実現することが本研究の目的である。一般に、LEDパルス光源の特長は(1)安価で供給が安定、(2)外部トリガーが可能、(3)小型、(4)長寿命、(5)低電圧、低電力のため安全である。特に応答性については適切な素子と駆動回路を用いればナノ秒オーダーのパルス光を発生させることができる。カタログや仕様書記載の推奨回路では、パルス駆動として定格電流の高々数倍から10倍の電流が注入されている。これに対して筆者らはLEDに定格電流の100倍以上のピーク電流を注入してパルス駆動し、高速の紫外線パルス光を得る方法を提案してきた^{1,2)}。しかし高速大電流で青色LEDをパルス駆動したときの光波形、発光スペクトル、放射束、耐久性などについてはこれまでほとんど知られていない。また、パルス幅の短縮化が十分でない。そこで本研究ではこれらを詳細に調査し、その結果をもとに光パルス幅の短縮化を図った。また、そのようにして得られた紫外パルス光源を用いて、高速光検出器の応答特性を測定した。

2. 装置と測定方法

青色LEDは日亜化学工業のNLPB300を用いた。図1にLEDパルス駆動回路を示す。ここでは高速スイッチング素子として、アバランシェトランジスタ(ZETEX社ZTX415)を使用した。この素子はコレクターエミッタ間に高電圧を印加し、トリガーパルス(波高5V、パルス幅50ns以上)を入力するとアバランシェ(なだれ)効果が起こり、トランジスタが高速で“ON”状態となる。このとき、コンデンサ(Cd)に充電された電荷がLEDを介して放電され、順方向のパルス電流によって発光する。外部抵抗Rはパルス電流の測定用端子(Rの両端の電圧波形をモニタする)として用いるほか、過大電流制限用として用いている。R=10Ωを挿入することによる時定数の増加は高だか1nsとなるが、半値幅が1ns前後となるような極短パルス発光の場合にはRの値を適宜低減する必要がある。インダクタL(0.53μH)はパルス電流に対して負のオーバーシュートをつくり、LED発光時間を短くする役割

図1 LEDパルス駆動回路

Fig. 1 Circuit diagram of the pulsed current driver for LED

をはたしている。ここに示した回路の上限電圧は $V_a=350V$ 、放電の繰り返し上限周波数は100kHzであるが、今回の基礎実験では平均電流があまり大きくならないように電圧を $V_a=300V$ 、周波数を20kHzに設定した。

放射束の測定は、検出器に光電子増倍管(浜松ホトニクス R5600-01)を用いて出力電流から算出した。パルス発光波形はサンプリング型光オシロスコープ(浜松ホトニクス OOS-01/VIS 時間分解能:10ps)を用いて測定した。発光スペクトルは、分光器(島津MAF型1200lines/mm、焦点距離:50cm)と光電子増倍管(浜松ホトニクス製1P28)の組み合わせで測定した。時間分解発光スペクトルはストリークカメラ(浜松ホトニクス C-4334、時間分解能:5ps)と分光器(Oriel Multispec 257)を用いて測定した。

3. 結果と考察

図2に青色LEDの発光スペクトルと直流順電流の関係を示す。標準電流値20mAでのスペクトルは440.9nmにピークを持ち、384.3nmにも弱い発光が観測されるが、順電流が増加するにつれ紫外光成分の強度が大きくなる。電流値を110mAにして測定を行ったところ、発光スペクトルの紫外光成分が可視光成分の強度を超えていた。この現象は本実験で用いた青色LEDがZnとSiを同時添加したInGaN/AlGaNダブルヘテロ構造であるために起こる³⁾。440.9nmの光は、不純物として添加されているZnの不純物準位に関係する発光であり、この光を青色として利用している。しかしZnの濃度が低い大電流領域では不純物準位間発光の440.9nmの光は飽和し、本来のバンド間発光(InGaN)の紫外光成分が急激に増加すると考えられる。このことから、本実験に用

図2 青色LED発光スペクトル
Fig. 2 Emission spectra of blue-LED driven by dc current

図3 パルス発光時の青色LEDの時間分解発光スペクトル
Fig. 3 Time-resolved emission spectra of the blue-LED under pulsed operation

いた青色LEDに大電流を注入すれば、紫外光源として用いることができることがわかった。

次にLEDをパルス点灯させた場合の時間分解スペクトルを測定した。図3には、コンデンサ容量 $C_d = 100\text{pF}$ の場合の発光につ

いて、パルス光の立ち上がり部分から減衰部分へ向かって2 ns 間隔のスペクトルが示されている。パルス電流（ピーク値）は約2 A である。パルスの立ち上がり部では380nm にピークを持つ分布であるが、時間の経過に伴い430nm にピークがシフトしていくのがわかる。380nm の発光の後に、不純物準位間 (Zn) の発光が起こるために、このように電流の注入が終わった後も青色の発光が続いている。以上から紫外 (UV) 成分が高速応答を示すことが確認できたので光学フィルターを用いて紫外パルス波形の分離を行った。紫外光パルスは立ち上がりの鋭い、裾を引かない波形（半値全幅：4.0ns、ピーク光出力約20mW）であった。一方、可視光パルスはブロードな波形（半値全幅：6.4ns）であった。耐久試験として20kHzの繰り返し数でパルス点灯を継続させたところ、発光回数にして 10^{10} 回まで一定の放射束を維持した。

パルス光源として利用するのであれば、パルス幅は短く、放射束は大きいことが理想である。しかし図1に示す回路ではアバランシェトランジスタの耐圧によって印加電圧が制限されるため、パルス幅を1 ns にまで短縮する目的で C_d を減少させた場合、十分な光出力が得られない。そこでアバランシェトランジスタの直列接続による V_a 許容値の増大をはかった。同時に、 $R = 0$ 、 $L = 0.25\mu\text{H}$ に素子値を修正し、パルスの短縮化をはかった。図4に $V_a = 600\text{V}$ に設定し、 C_d を変化させた場合のUV 光パルス波形例を示す。リングングやテイリングの無いパルス発光が得られている。この回路では、最小1 ns のパルス幅を持つ光が得られた。また、幅4 ns のパルス ($C_d = 40\text{pF}$) では170mW の出力が得られ、回路の改良によって8 倍の強度の紫外パルス光が発生できた。

このようにして得られた短時間パルス光を、光電子増倍管の応答測定に応用した。そのために同じLEDパルス光源回路を2つ製作した。それぞれの発光タイミングをずらせ、光パルスを半透鏡を用いて重ね合わせるとベアパルスができる。2つのパルスの間隔は電氣的に制御できる。図5に高速の光電子増倍管（浜松ホトニクス R5600）と汎用の光電子増倍管（同1 P28）の応答を示す。R5600は1 P28に比べて高速応答であることが出力パルス波形からわかった。

以上、市販の発光ダイオードの高速大電流パルス駆動に対する

図4 コンデンサ容量 C_d 値変化による青色LEDの紫外光成分のパルス波形。アバランシェトランジスタは2段直列接続、 $V_a = 600\text{V}$
Fig. 4 The typical wave forms of UV-light component emitted from the blue LED under $V_a = 600\text{V}$.

図5 ペアー光パルスに対する光電子増倍管の出力波形
(a)入射波形, (b)1 P28 (汎用サイドウィンドタイプ), (c) R-5600 (高速タイプ)

Fig. 5 Comparison of output signal waveforms between the (b) conventional and (c) fast response photomultiplier tube for (a) the incidence of pair pulse light

応答性, 耐久性, 放射束の評価を行った。本研究ではアバランシェトランジスタをスイッチング素子として用いることで, ナノ秒のパルス光を発生させることができた。青色LEDは電流の増加に伴って発光スペクトルが大きく変化し, 大電流領域では紫外に

発光があらわれることが確認された。また, パルス電流注入回路を工夫することでパルス幅を増加させずに光出力を増加させることができた。

参考文献

- (1) T. Araki and H. Misawa : "Light emitting diode-based nanosecond ultraviolet light source for fluorescence lifetime measurements," Rev. Sci. Instrum., 66-12, pp. 5469-5472 (1995)
- (2) 藤澤, 荒木 : 「青色LEDを用いたナノ秒紫外パルス光源」, 第56回応用物理学会学術講演会, p.794 (1995)
- (3) 中村修二 : "InGaN/AlGaN 発光ダイオードの現状と性能向上," 光学, 23-11, pp.701-708 (1994)

成果の発表

- 1) T. Araki, Y. Fujisawa and M. Hashimoto : An ultraviolet nanosecond light pulse generator using a light emitting diode for test of photodetectors, Rev. Sci. Instrum., 68-3 (1997 in press)
- 2) 藤沢泰充, 橋本 守, 荒木 勉 : 発光ダイオードの高速パルス電流に対する応答特性, 照学誌 (査読中)

徳島大学工学部機械工学科,
(現)大阪大学基礎工学部機械工学科,