

GaNデバイスを搭載した 高効率で小形のLED照明用点灯回路

High-Efficiency and Small-Form-Factor Control Gear for LED Lighting Using GaN Devices

大武 寛和 北村 紀之 高橋 雄治

■ OTAKE Hirokazu ■ KITAMURA Noriyuki ■ TAKAHASHI Yuji

次世代パワー半導体材料であるSiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）などのワイドバンドギャップ半導体は、電力変換器の高効率化と小形化に大きく貢献すると期待されている。なかでもGaNは、電気抵抗が小さく電子飽和速度が高いことから、高速かつ高効率のスイッチング動作が可能である。

東芝ライテック（株）は、GaNデバイスをLED（発光ダイオード）照明用点灯回路に応用することで、放熱機構や受動部品を小形化したGaN点灯回路とその周辺技術を開発した。更に、これらを適用した50W形のミニクリプトン形LED電球のプロトタイプを試作し、その効果を確認した。

Wide-bandgap semiconductors such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) are now attracting attention as a material for next-generation power semiconductors, and are expected to contribute to the development of power converters offering both high efficiency and compactness. In particular, GaN devices are capable of performing high-speed and highly efficient on/off switching operation due to their advantages of smaller impedance and higher saturation velocity of electrons compared with other power devices.

Toshiba Lighting & Technology Corporation has developed a built-in GaN control gear and peripheral circuit for light-emitting diode (LED) lighting applying GaN high electron mobility transistors (HEMTs) and an inductor optimized by the adoption of a magnetic material to downsize the dissipation structure and passive components. Experiments on a prototype 50 W mini-krypton replacement LED bulb with the newly developed high-efficiency and small-form-factor control gear and peripheral circuit have confirmed that its performance meets the requirements for practical application.

1 まえがき

2011年に発生した東日本大震災を契機に省エネ指向が高まり、従来の照明が高効率のLED照明に急速に置き換えられている。LED照明は従来の照明と比較して効率が長いことと長寿命であることが訴求点である。

そのため、東芝ライテック（株）は、省エネ性と光束維持率を競争基軸とした商品展開を進めてきた。しかし、近年はこれらに加え、色の再現性や見え方といった“光の品位”や、調光や調色といった“機能”、照明器具の“小形・軽量化”、点灯制御の容易性による“他機器との連動”など、要求が多様化している。これらの要求を満たすために、器具内部に搭載された点灯回路の果たす役割は大きく、その効率向上や小形化、多機能化が求められる。特に小形化及び高効率化は、他の電力変換器と共通の課題でもある。

現在、電力変換回路に使用されるパワーデバイスは、Si（シリコン）を用いたMOSFET（金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ）が主流である。一般に、回路方式や動作条件は、使用するパワーデバイスの電気定格や能力に合わせて設定されるため、回路の性能はパワーデバイスに依存するところが大きい。しかしSiパワーデバイスは、材料の持つ能力の限界に近づきつつあり、これを組み込む製品の性能も飽和傾向に

ある。したがって、更なる性能向上のためには、新たなパワーデバイスが不可欠である。

SiC（炭化ケイ素）やGaN（窒化ガリウム）などのワイドバンドギャップ半導体は、材料特性に優れるため、従来のSiに置き換わる革新的な半導体材料として注目されている。これらを用いたパワーデバイスは、研究段階から実用化のフェーズに移行している。このうちSiCパワーデバイスは、産業機器や車両など、取り扱う電力の比較的大きい電力変換機器で普及し始めている。また、エアコンなどの民生機器でも一部の機種に搭載が始まっている。

照明機器では、省エネ性能の向上に加え、LEDや有機ELの特長を生かして器具の小形・薄型化を実現するために、前述したように点灯回路を小形・高効率化する必要がある。今回、当社は、この手段として高周波動作が可能なGaNパワーデバイスを用いることにした。

2 GaNパワーデバイス

GaNは、次世代の高周波パワーデバイス用材料として有望視されている。現在は、多くのメーカーや研究機関で実用化に向けた研究開発が進められており、一部の産業機器では実験的な運用も開始されている。

代表的な半導体材料の物性特性を表1に示す⁽¹⁾。この表から、GaNは絶縁破壊電界強度がSiと比較して10倍以上高く、したがって、オン抵抗の材料限界は最適設計によってSiの1/1,000となる。また、バリガー性能指数が極めて高く、高周波デバイスへの適用が有望である。

GaNパワーデバイスは、一般的にHEMT (High Electron Mobility Transistor) 構造が採用されている。ノーマリオン型のGaNパワーデバイスの断面構造を図1に示す。層構造はエピタキシャル成長で形成される。また、ドレイン、ゲート、及びソースが同一の面に配置される横型構造である。電子の走行層はバンドギャップの異なるAlGaIn (窒化アルミニウムガリウム) 層とGaN層のヘテロ接合界面に発生する2DEG (2次元電子ガス) 層を利用する。ノーマリオン型デバイスは、ゲートバイアスがゼロであっても導通し、負バイアスを印加することで電流を遮断する。

一般に、スイッチングデバイスにはゲートに正バイアスを印加することで導通するノーマリオフ型デバイスが使用される。これは、電源投入から起動までの過程など、ゲートがゼロバイアスとなる期間にパワーデバイスの主電流を遮断しておくためである。しかし、GaNを用いたノーマリオフ型デバイスは、技術的に実現が困難で、現時点では特性面や信頼性などにも多くの課題があり、普及するには今後の技術確立を待たなくてはならない。

表1. 半導体の物性定数

Physical properties of semiconductor materials

項目	GaN	SiC (4H)	Si
バンドギャップ (eV)	3.39	3.26	1.12
電子移動度 μ_e ($\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)	2,000	900	1,400
誘電率 ϵ	9	9.7	11.8
絶縁破壊電界強度 E_c (V/cm)	3.3×10^6	2.2×10^6	3.0×10^5
熱伝導率 λ (W/(cm·K))	2.0	4.9	1.5
飽和速度 V_{sat} (cm/s)	2.7×10^7	2.2×10^7	1.0×10^7
高周波バリガー性能指数 (対Si)	179	39	1

高周波バリガー性能指数 (BHF_M) = $\mu_e \times E_c^2$
4H: 4回周期, 六方晶

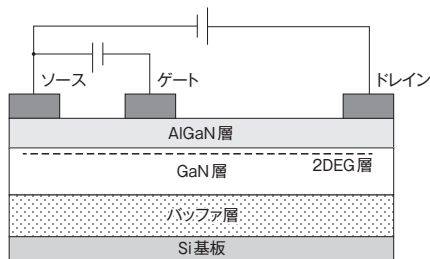


図1. GaNデバイスの断面構造 — GaNデバイスはHEMT構造で構成され、ヘテロ接合界面の2DEG層を電子走行層とする。

Cross-sectional structure of GaN power device

そこで、比較的早期に実用化が可能なノーマリオン型のGaNパワーデバイスを活用し、高周波動作による小形化と、高効率を両立させる点灯回路の実現を目指した。

3 プロトタイプ試作

GaN点灯回路の応用効果の大きい商品イメージとして、“位相制御調光対応ミニクリプトン形LED電球50W形相当”を選び、そのプロトタイプを試作した。

ミニクリプトン電球は小形の白熱電球である。小形ながらも効率が高く、これを取り付ける器具も小形化できるため、住宅や店舗、ホテルなどで広く普及している。LED化も進められているが、従来どおりの小形ランプ形状を継承することが困難で、照明器具への装着や光学特性が犠牲となる場合がある。形状の継承を阻害する要因は、点灯回路の小形化が物理的に難しいことと、LEDと回路部品から発生する熱に対し、ランプ筐体 (きょうたい) に要求される非常に高い放熱能力である。

また、位相制御調光点灯回路は、調光器との電氣的整合が難しく、ちらつきや点滅が発生しやすい。これは、この商品群に共通の課題である。位相制御調光に対応するには、専用の回路を付加し、これを適切に制御する必要がある。

そこで、プロトタイプでは、GaNパワーデバイスを用いて点灯回路部分を小形化し、調光回路を同一基板上に実装することを目標にした。これによって電球のフォルムを継承するとともに品位の高い調光性能を提供することができる。

4 回路方式と動作

点灯回路に採用した回路の構成を図2に示す。回路方式はハイサイドスイッチ降圧型コンバータを構成し、スイッチング素子は2個のノーマリオン型パワーデバイス (HEMT1及びHEMT2) をカスコード接続している。この方式にすることで、ノーマリオン型パワーデバイスであっても電源投入時に電流を制御できる。

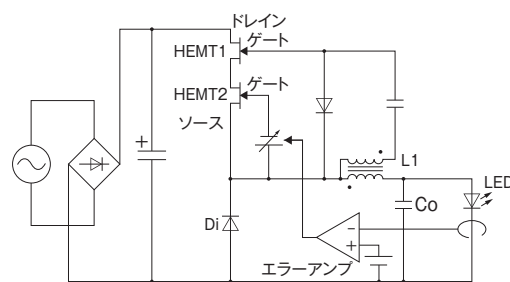
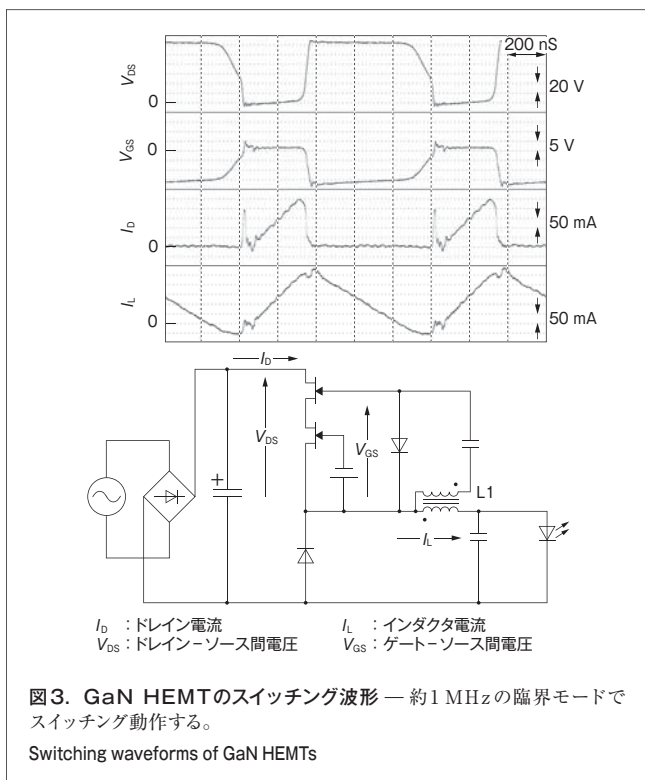


図2. 点灯回路の回路構成 — 2個のGaN HEMTをカスコード接続したデバイスを用いて、自動式の降圧型コンバータを構成している。

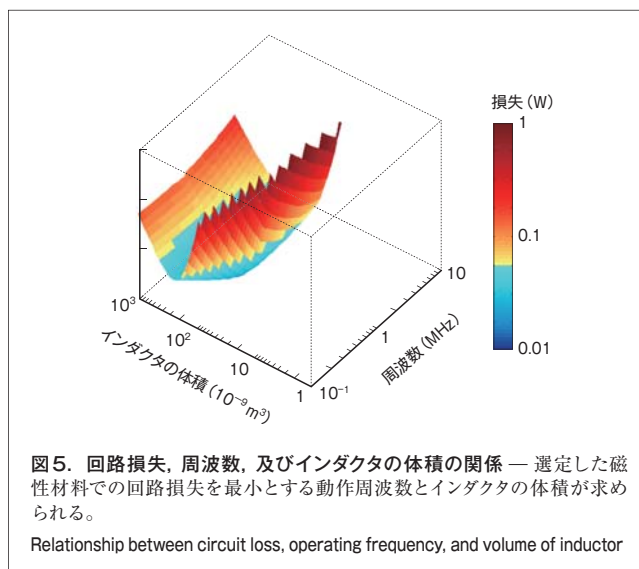
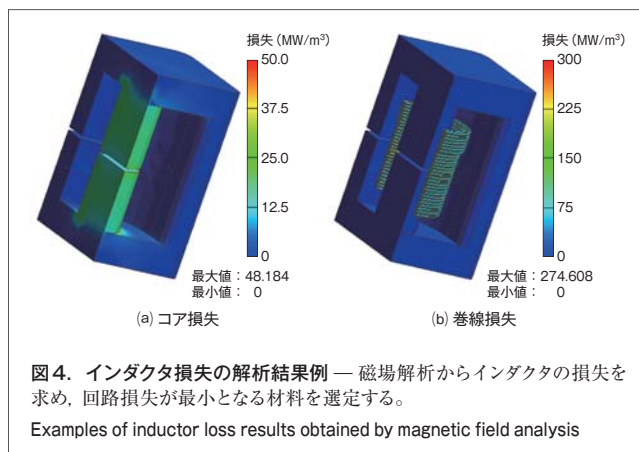
Schematic circuit diagram of LED control gear



この回路の動作について説明する。まず、電源投入直後から導通状態のHEMT1及びHEMT2が出力コンデンサ C_o を充電するが、HEMT2のソースの電位も同様に上昇する。このとき、HEMT2のゲート端子からみた整流器の負極端子が負電位となる。この電位差をHEMT2のゲート端子に印加してデバイスの電流を遮断する。ノーマリオン型パワーデバイスを高速で駆動制御する汎用ICは一般に流通していないため、独自の自励ドライブ方式を採用している。この方式は、図2に示すようにHEMT1のゲート端子がインダクタ $L1$ の2次巻線に接続されており、ターンオンのタイミングを決定する。一方、HEMT2はターンオフのタイミングを決定するように動作する。HEMT2のゲート端子は、LED電流をモニタするエラーアンプの出力に接続され、ゲート電圧値が制御される。この作用によって、HEMT1及びHEMT2に流れる電流ピーク値が決まり、この結果として、LED電流が制御される。動作周波数は約1 MHzであり、臨界モードで動作し、環流ダイオード Di のリカバリ電流と $L1$ のピーク電流が抑えられるため、高効率で動作できる。このときのスイッチング波形の例を図3に示す。

5 インダクタの設計

一般に、スイッチング電源回路の動作周波数と、インダクタやコンデンサなどの受動部品のサイズは反比例する。しかし実際には、インダクタ用の磁性材料やコンデンサ用の誘電材料の周波数特性と寄生素子の影響で、使用できる周波数が制



限される。近年、高周波特性に優れるセラミックコンデンサが流通しているが、インダクタは、高周波域での効率が高い磁性材料を選定し、動作条件に合わせて設計する必要がある。

磁性材料の選定に際しては、動作周波数及びインダクタの体積に対する回路損失を算出し、これが最小となる材料を選定した。ここで、回路損失とは、スイッチング素子で発生するスイッチング損失と、インダクタで発生するインダクタ損失(コア損失及び巻線損失)とを加算したもので、電源回路損失の大半を占めている。

図2に示した回路の入力電圧と出力であるLEDの電気特性、更に動作周波数を設定してインダクタンスを算出し、ここから求めた条件から回路解析でスイッチング損失を算出した。

インダクタ損失は、磁性体の材料特性や、インダクタ形状、巻線仕様などのパラメータを設定し、磁場解析より算出した。インダクタ損失の解析結果の例を図4に示す。

動作周波数とインダクタの体積をパラメータとしてこれらの損失解析を繰り返すことで、回路損失を最小とするインダクタの体積と動作周波数を求めた。図5は、試作した点灯回路に

適用した磁性材料における計算結果である。動作周波数が1MHz付近で回路損失が最小となり、この条件でのインダクタの体積も求められる。

解析結果から求めたインダクタを点灯回路に実装し、インダクタ損失の測定値は解析の結果とおおむね一致することを確認した。これらの結果、試作した点灯回路に搭載したインダクタは、当社の従来品と比較すると体積比が20%以下で、インダクタ損失を35%削減できた(図6)。

6 プロトタイプの特性

試作した位相制御調光対応ミニクリプトン形LED電球50W形相当のプロトタイプ用基板と、同等の電力出力を持つ現行のE26口金60W電球の基板との比較を図7に示す。プロトタイプ用基板は、回路部品の小形化によって基板面積を約60%削減できており、ミニクリプトン形LED電球のサイズに収納可能である。

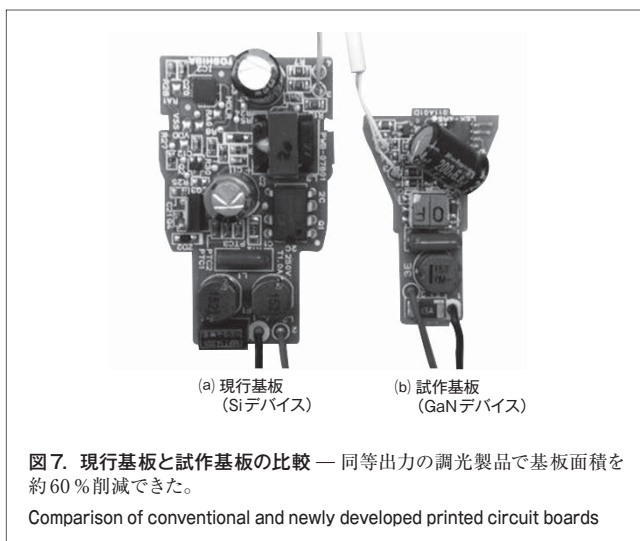
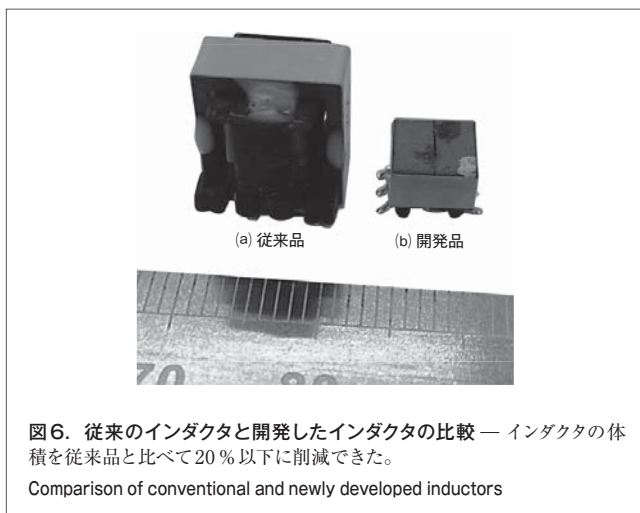


表2. LED電球プロトタイプと従来電球の比較

Comparison of specifications of prototype LED and conventional bulbs

項目	LED電球50W形相当 (プロトタイプ)	ミニクリプトン電球40W形 (白熱電球)
全光束 (lm)	600	490
色温度 (K)	2,700	2,800
消費電力 (W)	5.9	36
ランプ全長 (mm)	67	67
定格寿命 (h)	40,000	2,000
調光	対応	対応
断熱施工天井	対応	—

また、表2に示すように、プロトタイプの全光束は、同形の白熱電球50W形相当の600lmを確保しており、この白熱電球製品群の80%をLEDに置き換えることが可能である。

調光機能は独自の制御方式を採用しており、種々の調光器に適合することが可能で、高品位な調光機能を提供できる。更に、断熱施工天井や密閉器具などにも対応でき、従来の白熱電球以上に適用範囲の拡大が期待できる。

7 あとがき

GaNパワーデバイスを用いて、LED電球の点灯回路を小形化した。GaNパワーデバイスの性能や信頼性が向上し、ラインアップが拡充されると、このデバイスの照明製品への活用範囲は更に拡大していくと考えられる。LED電球への適用はもちろん、オフィスや住宅、屋外照明製品など、様々な用途への応用を検討している。

文献

- (1) 高田賢治 他. AlGaIn/GaN HEMT パワーデバイス. 東芝レビュー. 59, 7, 2004, p.35-38.



大武 寛和 OTAKE Hirokazu

東芝ライテック(株) 技術本部 照明研究開発センター長附。照明学会会員。点灯回路の研究・開発と推進に従事。Toshiba Lighting & Technology Corp.



北村 紀之 KITAMURA Noriyuki

東芝ライテック(株) 技術本部 照明研究開発センター参事。照明学会会員。点灯回路の研究・開発に従事。Toshiba Lighting & Technology Corp.



高橋 雄治 TAKAHASHI Yuji

東芝ライテック(株) 技術本部 照明研究開発センター主務。照明学会会員。点灯回路の研究・開発に従事。Toshiba Lighting & Technology Corp.