レーザーダイオード駆動用 短パルス大電流電源の開発

DEVELOPMENT OF SHORT-PULSE HIGH-CURRENT POWER SUPPLY FOR DRIVING LASER DIODES

下田　悠太・飯島　瑞樹・松月　　豊・増田　　正

Yuta SHIMODA, Mizuki IIJIMA, Yutaka MATSUZUKI and Tadashi MASUDA

高出力パルスレーザーダイオードの直接駆動を目的とし，LTD（Linear Transformer Driver）回路技術を用いた短パルス大電流電源を開発した 。加工や環境モニタリング分野で求められる，急峻な立ち上がりと高速繰返し動作を実現するため，次世代高性能 MOSFET と低インピーダンス回路モジュールを組み合わせた半導体パルス電源を設計した 。配線レイアウトの最適化により寄生インダクタンスを極限まで抑制し，一次試作機において，パルス幅 400ns，繰返し周波数 10kHz の条件で出力電流 1,003Apeak を達成し，目標である 1,000A をクリアした。

To directly drive high-power pulsed laser diodes, a short-pulse, high-current power supply was developed using Linear Transformer Driver (LTD) circuit technology. To achieve the steep rise time and high repetition rate required in laser machining and environmental monitoring applications, a solid-state pulse power supply was designed by combining next-generation high-performance MOSFETs with low-impedance circuit modules. By optimizing the wiring layout to minimize parasitic inductance, the initial prototype achieved a peak output current of 1,003 A at a pulse width of 400 ns and a repetition frequency of 10 kHz, successfully meeting the 1,000 A target.

1．まえがき

近年のレーザーダイオード（LD）技術における高出力化と高効率化の進展は目覚ましく，従来，固体レーザーやガスレーザーが担ってきた高ピーク出力パルスレーザーの領域を，LD の直接駆動方式によって代替することが可能となりつつある。この直接駆動型パルス LD システムを実現するためには，LD チップのポテンシャルを最大限に引き出す，急峻な立ち上がり特性を持つ大電流パルス電源の実現が不可欠となっている。

特に加工用途のレーザーを出力するパルス電源においては，あらゆる材料への加工性と熱影響の低減を両立するために，大電流かつ短いパルス幅の出力特性が強く求められている。具体的には数 kA クラスの大電流かつ，数百 ns 程度の短いパルス幅に加え，加工効率を考慮した場合，10kHz 以上の高速繰返し動作の実現が必要とされている[(1)]。このような機能によって実現した直接駆動型パルス LD は，一般的な固体レーザーやガスレーザーと比べ，エネルギー効率に極めて優れ，装置の小型化，軽量化にも貢献する。また，レーザーの出力やパルスパラメーターの制御性に優れ，産業分野における加工精度や処理速度の向上にも寄与することから，社会的意義も大きい。

これらの用途に要求される，大電流かつ急峻な立ち上がりの短パルス電流を駆動するために，複数の低インピーダンス回路をモジュールとして組み合わせることで，高速スイッチングを実現しながら大電流パルスを発生する LTD（Linear Transformer Driver）回路技術[(2) (3) (4)]と，高速スイッチングが可能な次世代高性能 MOSFET を活用した半導体パルス電源の設計・開発に取り組んだ。開発にあたり，株式会社パルスパワー技術研究所からは技術提携により LTD 回

路技術の提供を受け，回路と負荷との間の接続回路や配線レイアウトの見直し，LD 素子のマウント方法等について独自に開発を行った。

本稿では，試作機の開発にあたり，検討した技術課題の解説と，試作結果を報告する。また，第 6 節では，今後取り組むべき，さらなる出力向上を目指した二次試作の構想と，加工用途以外の環境モニタリング分野等の用途を展望する。

2．回路構成と機能

2.1　主回路構成

今回開発した短パルス電源は，複数の MOSFET とコンデンサを組み合わせた LTD 基板を主回路としており，信号発生器からの周波数・パルス幅設定に連動して 1,000A 以上の大電流パルスを生成する。LD 実装基板，LTD 基板，高調波対策のためのノイズカットトランス，保護用ダイオード，直流電源との組み合わせで構成される。回路全体の配線長を極力短縮し，またインダクタンス成分の均等化を実現することでパルス波形安定性と，MOSFET に流れる電流バランスを確保している。**図 1** に電源総合ブロック図を示す。

2.2　LTD 回路

LTD 回路は，主に高エネルギー物理学や加速器技術の分野で発展してきた技術であり，短い時間幅の大電流パルスを発生させることを目指して設計された回路構造である。一般的な等価回路を**図 2** に示す[(5) (6)]。その基本的な動作原理は，複数の素子を並列に接続した低インピーダンスのパルスモジュールをさらに複数段直列に接続し，各モジュールが同期して動作することで，全体として高精度かつ高出力のパルスを生成する点にある（**図 3**）。この構造により，従来の回路では困難であった超高速・大電流のパルス動作を効率的かつ安定して実現することが可能となる。

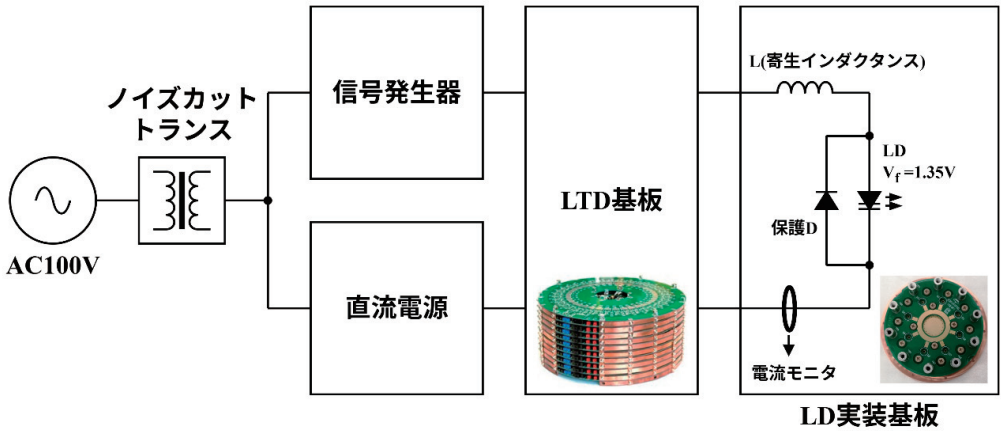


図 1　電源総合ブロック図
Overall Power Supply Block Diagram

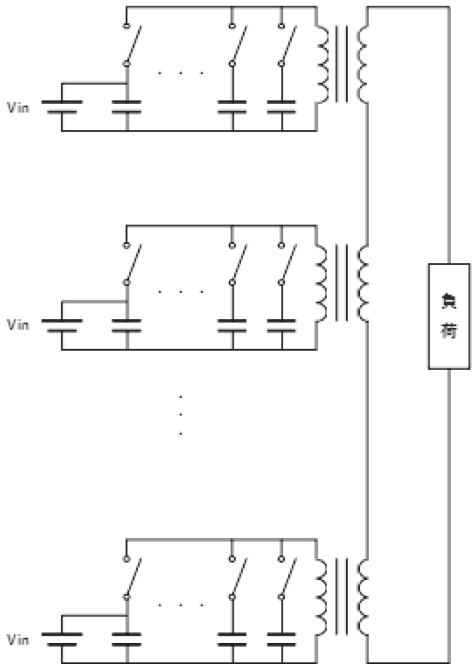


図２　LTD（Linear Transformer Driver）等価回路
Equivalent Circuit of LTD (Linear Transformer Driver)

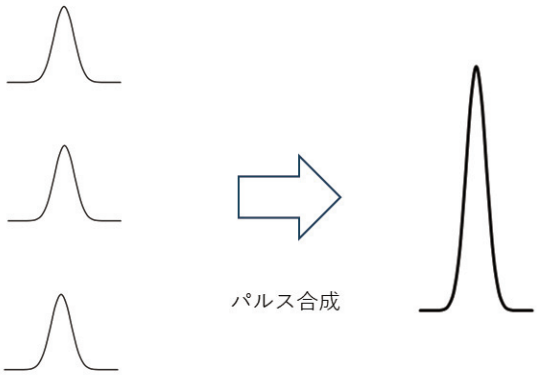


図３　パルスを合成し，高出力のパルスを生成
High-Power Pulse Generation by Pulse Combining

また，この回路は，各モジュールが独立した構成を持つため，動作の制御や出力の調整が柔軟であり，応用先に応じて設計を容易にカスタマイズできる特徴を備えている。さらに，コンパクトな設計が可能でありながら，大容量出力を実現できる点も大きな利点となる。そのため，近年では高出力レーザーダイオード駆動への応用が注目を集めており，加工用レーザーや環境モニタリング，センサー技術など，多様な分野への展開が期待される。

３．要 素 技 術

主な要素技術としては，下記が挙げられる。

(a)　信号発生器入力による繰返し周波数・パルス幅の設定
(b)　回路レイアウト最適化による寄生インダクタンス抑制
(c)　回路毎に寄生インダクタンスを揃えて電流バランス確保
(d)　実測ベースの寄生インダクタンス評価
(e)　大電流化に伴う基板・FET 等の抵抗成分影響の顕在化と，抵抗成分低減基板の検討
(f)　温度上昇の評価と冷却の設計課題
(g)　ns オーダー，kA オーダーの電流計測技術

(h)　ワイヤボンディング設計課題：
　　パルス電流による電磁力と，電流ピーク増加時の要検証事項

パルスパワー技術研究所との共同開発により，LTD 基板を用いた大電流・高速パルス生成の実現を試みた。**図 4** の左図の灰色部分がパルスパワー技術研究所の LTD 回路で，右図が LD 実装基板となる。今回製作した一次試作電源の外観を**図 5** に示す。中央の円形開口部よりレーザーが出力される構造ではあるが，写真では素子部保護のため，板金により閉塞されている。

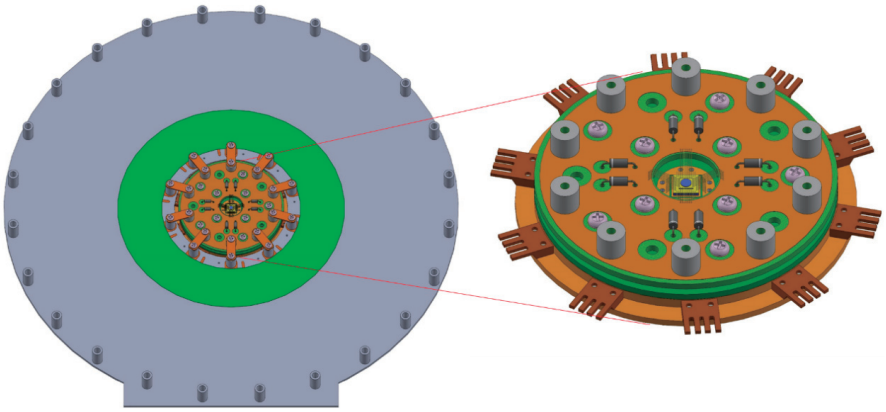


図 4　試作基板
Prototype Board

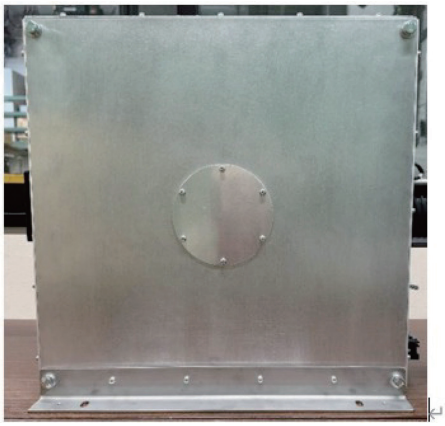


図 5　一次試作電源の外観
Exterior View of First Prototype

この内，本項においては，(b)回路レイアウト最適化による寄生インダクタンス抑制および，(h)ワイヤボンディング設計課題について，詳細を述べる。

3.1　回路レイアウト最適化による寄生インダクタンス抑制

目標とするピーク電流 1,000A，パルス幅 500ns 以下のパルス波形を実現するためには，初期の電流の立ち上がり勾配を 1×10^{10}A/s 程度にする必要がある。この時の電流勾配 (di/dt) と回路に必要とされる電圧 (V) には，回路の寄生インダクタンスを (L_P) とした時に，式 (1) に示す関係がある。電圧 (V) は回路に用いられるデバイスに制限され，現実的な値を取るとすれば，上記目標仕様の達成のために，回路の寄生インダクタンス (L_P) は極めて小さい値である必要がある。

$$V = L_P \cdot \frac{di}{dt} \qquad \cdots (1)$$

本稿の試作機の放電コンデンサに充電する最大電圧は，パルス OFF 時に回路に加算される電流遮断電圧も考慮して，350V 以下とする設計であり，式 (1) より，スイッチング素子から負荷までの回路全体の寄生インダクタンスは 35nH 以下であることが求められる。

試作機の LTD 回路基板の出力端子までの寄生インダクタンスを差し引くと，基板の出力端子からダイオード素子までの配線はさらに小さな配線インダクタンスしか許容しない。このため，モジュールとして構成した LD デバイスへ電線や配線パターンを引き回して結線すること自体が現実的ではなくなる。そこで，試作機では LTD 基板内側の円周状に配置された出力端子に直接接続される LD 実装基板を構成し，この LD 実装基板に直接 LD 素子を実装し，多数のワイヤーボンディングにより結線する方法を採用した (図 4)。LD 実装基板は，LD 素子がダイボンディングされる面を銅板として，導電と放熱を兼ねている。またもう一方の面は銅張のガラスエポキシ基板とした。両導電面間には，LD 素子保護用のダイオードを電流が基板上で均一になるように 8 素子を円周状に配置した。

LD 実装基板を単純化したものとして，**図 6** に示すような，外周 D_{OUT}，内周 D_{IN} の中空導電円板を距離 d で平行に配置し，一方は外側から内側，もう一方は内側から外側に通電する回路を想定する。具体的には図 6 は図 4 の LD 実装基板のパターン層となり，D_{OUT}=85mm，D_{IN}=18mm となる。回路に構成されるインダクタンス L は，式(2)で表すことができる。ただし，μ_0 は真空の透磁率である。

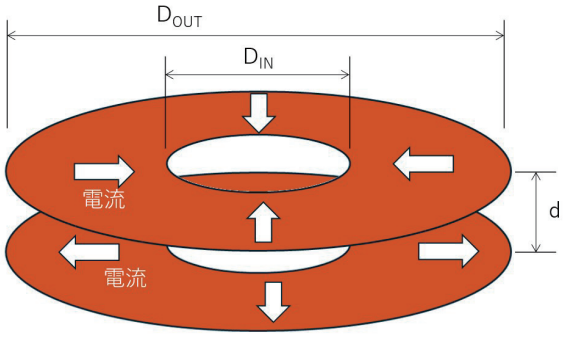


図 6　LD 実装基板構成回路の単純化モデル
Simplified Circuit Model of LD Mounted Board

$$L = \frac{\mu_0 d}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{OUT}}{D_{IN}}\right) \quad \cdots (2)$$

本試作の図 6 単純化モデルにおける，LD 実装基板のワイヤーボンディング部と LD 素子を除く寄生インダクタンスは，式(2)により，約 2nH と見積もられている。

3.2　ワイヤボンディング設計課題

3.1 項で述べた通り，LD 実装基板上に配置した LD 素子の結線は，基板と LD 素子を直接ワイヤーボンディングにより接続している。LD 実装基板の上面のガラエポ基板は，絶縁のための厚さと，LD 素子ダイボンディングのための空間確保のために，LD 素子からは距離があり，基板と LD 素子の間のワイヤーボンディングのワイヤー長を大きく取らざるを得ない。このため，1,000A の電流を流した時，電流の作る磁界とワイヤ自身の電流によるローレンツ力により，ワイヤーループが振動し，最悪の場合，周辺の部材と接触し短絡に至る懸念があった。

そこで，ワイヤーボンディングのループに，絶縁性の高い RTV 樹脂を充填しワイヤーの変形を抑制することで，電流，振動，疲労断線によるワイヤーの短絡を防止する構造とした (**図 7**)。この結果，1,000A の実仕様において短絡や断線等の事象の発生を防止できた。

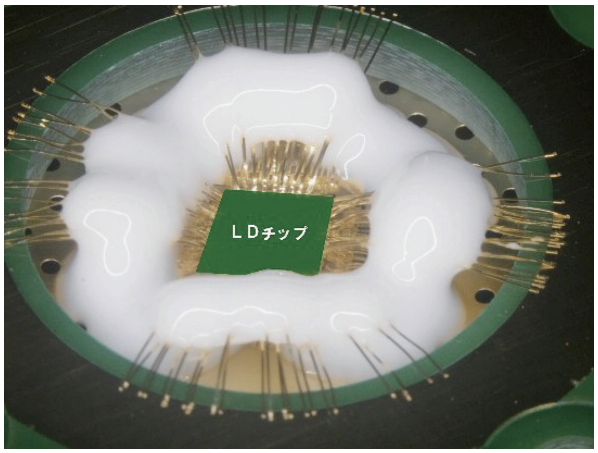


図７　ワイヤーボンディングの RTV 樹脂による固定
Fixing Wire Bonds with RTV Resin

４．実験方法及び結果

一次試作では，波形形状は DC パルスとし，周波数は 1～10kHz，パルス幅は約 400ns，電流目標は 900～1,000Apeak 級として検討･試験を行った。評価は，LD 素子，および同等のインピーダンス特性を持つダミー抵抗の両方で行い，両者が同等の結果となることを確認した。電流値はダミー抵抗の電圧および，直近に設置した電流プローブの比較により，いずれの測定方法でも同等の値であることを確認した。

電流波形の確認の結果，パルス幅 400ns，繰り返し 10kHz の条件で出力電流 1,003Apeak（一次試作目標：1,000A/500ns）を確認し目標を達成した（**表 1**，**図 8**）。この時，電流の立ち上がり波形及び式（1）より，回路のインダクタンス成分は，約 33nH であることが確認できる。

また連続動作試験においては，サーモグラフィーカメラによる LD 素子および，回路基板上の素子の温度上昇評価を行ったところ，10kHz 動作時に最大で素子の温度が約 80℃まで上昇し飽和したため，LD 素子およびパルス発生回路の連続動作における温度上昇が規定範囲内であることを確認した。

表 1　一次試作機の仕様目標と実験結果
Target Specifications and Experimental Results of First Prototype

	一次試作目標値	実験結果
波形形状	DC パルス	図 8 参照
出力電流	1,000Apeak	1,003Apeak
パルス幅	500ns 以下	400ns
繰返し周波数	1～10kHz	10kHz にて，規定温度内で動作

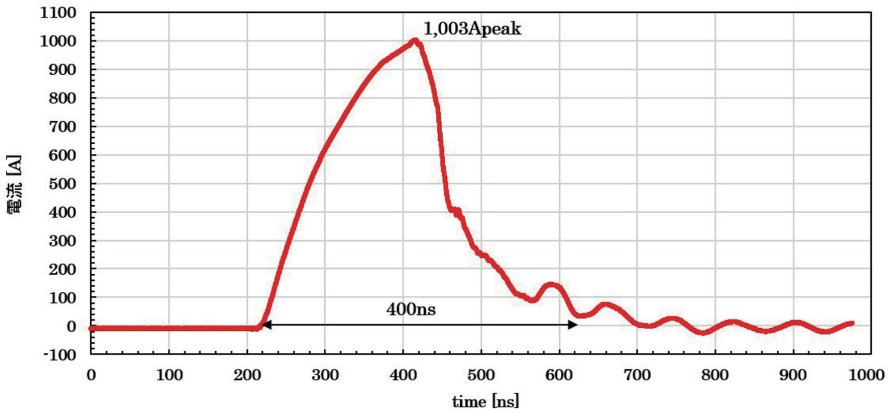


図８　出力電流測定波形
Measured Waveform

5．大電流化への対応

今後は，更なる大電流化として一次試作で達成した 1,000Apeak，1～10kHz の仕様からの大出力化を進め，電流 10,000Apeak，周波数 100kHz 級を目標に検討する。10,000A 級を考慮して構造を平面から立体的へ発展させ，回路モジュールの増加と低インダクタンスを両立させる。さらに電流増加で顕在化した基板・MOSFET の抵抗成分の低減を目的とした，基板レイアウトと素子選定を検討する。また，LD 基板の冷却など冷却技術の適用も進める。一次試作の結果と比較した二次試作の目標仕様を**表 2** に，構想中の二次試作の立体構造図を**図 9** に，それぞれ示す。

表 2　二次試作機の仕様目標
Target Specifications of Second Prototype

	一次試作 実績値	二次試作 目標値
波形形状	DC パルス	DC パルス
出力電流	1,003Apeak	10,000Apeak
パルス幅	400ns	TBD
繰返し周波数	10kHz	100kHz

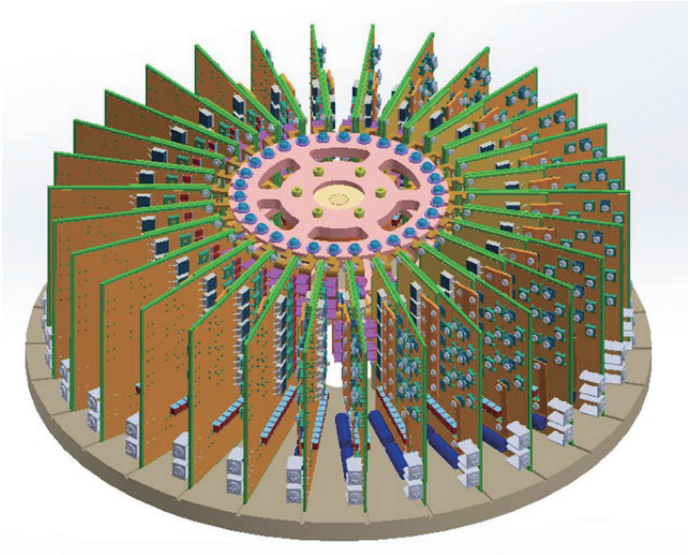


図 9　二次試作機の立体構造図
3D Structure of Second Prototype

6．む　す　び

本研究では，高出力パルスレーザーダイオードの駆動に資する大電流・高速パルス電源の構築手法を確立した。一次試作の結果，周波数 10kHz，パルス幅 400ns の条件下においてピーク電流 1,003A を確認し，当初の目標（1,000A / 500ns）を達成することができた。また，連続動作時の LD 温度が約 80℃で飽和することを明らかにし，熱設計における重要な知見を得るに至った。

開発した LD の直接駆動によるパルスレーザー技術は加工用途だけに留まらず，その特徴を活かして環境モニタリング分野への応用可能性も有している。高出力レーザーパルスを用いることで，特定の分子に対する吸収特性を高精度に測定できるほか，大気中の微量成分の分析などにも寄与するものと期待される。

研究の成果は，LD のより高効率かつ高精度な駆動を可能にするだけでなく，産業から環境モニタリング分野まで幅広い応用が期待される。本研究を通じて得られた知見を基に，さらに LTD 回路の設計や信頼性向上を目指し，今後も研究を推進していく。

今回の開発にあたっては，株式会社パルスパワー技術研究所との共同開発により，既存のLTD基板に関する知見や設計を有効に活用したことで，短期間での試作・評価を実現した。今後は，本研究で得られた設計指針の妥当性を基盤とし，さらなる回路の最適化や実装技術の高度化を推進する。次期開発においては，10,000A級の大電流化や100kHzの高繰り返し化といった，より高負荷な仕様に対する本技術の有効性を実証し，次世代デバイスへの適用を目指す。

末筆ながら，本研究の遂行にあたり多大なるご支援とご協力をいただいた株式会社パルスパワー技術研究所の皆様，ならびにご指導をいただいた関係各位に，厚く御礼申し上げる。

参考文献

(1) M. Traub,et al.: Novel high peak current pulsed diode laser sources for direct material processing, Proc. of SPIE Vol. 6456, p. 64560J, 2007

(2) W. Jiang.: Solid-State LTD Module Using Power MOSFETs, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 38, no. 10, pp. 2730–2733, Jul. 2010.

(3) W. Jiang,et al.: Pulsed power generation by solid-state LTD, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 42, no. 11,pp. 3603–3608, Nov. 2014.

(4) M. R. Kazemi,et al.: Waveform control of pulsed-power generator based on solid-state LTD,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 45, no. 2, pp. 247–251, Feb. 2017.

(5) パルスパワー―技術研究所：半導体LTD高電圧パルス電源（スマートパルスパワー電源）. https://www.myppj.com/products/ 半導体ltd高電圧パルス電源ｽﾏｰﾄﾊﾟﾙｽﾊﾟ.html，（参照 2026-07-01）

(6) 江偉華ほか：Linear Transformer Driver を用いた波形重畳型パルスパワー発生方法とその応用，プラズマ・核融合学会誌，Vol.94，No.4，192-196（2018）

◇◇◇

下田　悠太

エレクトロニクス事業部
2014年入社，主に高電圧電源の開発に従事。

飯島　瑞樹

エレクトロニクス事業部
2023年入社，主に高電圧電源の開発に従事。

松月　　豊

経営企画本部
2001年入社，主に開発戦略，製品企画に従事。

増田　　正

エレクトロニクス事業部
1995年入社，主に高電圧電源の開発に従事。