

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420246

研究課題名(和文) ワイドバンドギャップ・パワー半導体を用いた高速スイッチング電源の開発

研究課題名(英文) Development of the power supply with high-speed switching by wide band-gap semiconductor

研究代表者

佐藤 宣夫 (SATO, Nobuo)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70397602

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：高速スイッチング動作に基づく小型化を図った絶縁型フライバックコンバータを実証した。絶縁性を有する回路設計により、安心して安全な電源回路が実現される。また特に、回路実装された受動素子(トランス、コンデンサ)の評価を実施した。当該電力変換回路の設計および実製作により、高周スイッチング動作の達成を目指した。そしてメガヘルツ(MHz)周波数帯域における高速スイッチングに際して、回路内の入力電圧/出力電圧、入力電流/出力電流の実測による動作検証を行った。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated an isolated-type flyback converter circuit for high-speed switching operations. A reliable and safe power-supply circuit can be realized by circuit design for the ensuring insulation. We estimated the high-frequency characteristics of passive devices in the converter circuit. We experimentally developed the isolated-type flyback converter circuit and evaluated the frequency response properties. In order to verify the fast-switching operation beyond the several mega-hertz, the input voltages, output voltages, and currents of the converter were measured for both continuous and discontinuous operations.

研究分野：半導体電力変換工学

キーワード：パワー半導体デバイス 電力変換回路 フライバックコンバータ 高周波スイッチング

### 1. 研究開始当初の背景

電力変換回路におけるスイッチング動作および整流動作の機能を担うパワー半導体デバイスの開発は、情報技術 (IT) における Si 半導体の集積化に伴う微細加工技術に牽引されている。しかしながら、パワー半導体デバイスへの印加電圧、通電する電流は共に増大しており、扱われるエネルギー量、スイッチング動作に伴う発熱、さらに輻射ノイズの発生について等、これまでの微細加工技術の単なる拡充だけでは対応が難しい現状がある。

その解決策の1つとして、半導体デバイスの材料改良に基づく性能向上が挙げられる。実際に、ワイドバンドギャップ半導体であるシリコンカーバイド (SiC) やガリウムナイトライド (GaN) を用いたパワー半導体デバイスの開発、それらの高耐圧、大電流、耐熱特性、低オン抵抗、優れた高周波特性など、デバイス性能が顕著に向上することから、盛んに研究がなされている。

特にワイドギャップ半導体材料として注目されている SiC は、本研究開始時において、ショットキーバリアダイオード、接合型トランジスタ (JFET) は市場供与され、電界効果トランジスタ (MOSFET) も試験供与の段階にあった。安定供給には至っていないが、そのような状況は本研究期間において解決されつつあり、産業応用を見据えている段階にあったと云える。

一方、パワー半導体デバイスを用いたスイッチング回路を構築する際、従来のデバイス静特性評価では不十分であった。つまり、デバイス (および回路) が有する寄生インピーダンスにより、ON/OFF 切換時に大きな電圧・電流 (サージ電圧、テール電流) が発生し、リングング現象が発生する。

このような技術課題は、材料物性に依存するものではなく、素子構造と回路構成の両方に起因する問題であり、変換効率向上、長寿命化などの電力変換回路の設計手法を確立するために、解決すべき課題であった。

そこでスイッチング周波数を ISM (Industry-Science-Medical) バンドの1つである 13.56 MHz まで高周波化することを提案した。素子構造および回路構成、その両方の寄生成分を考慮した設計指針の蓄積、さらに回路内  $L \cdot C$  の共振現象の積極利用 (ソフトスイッチング技術の導入) と換言できる。

以上をまとめると、スイッチング周波数の高周波化による受動素子の小型化、SiC の優れた熱伝導度 (4.9 W/cm $\cdot$ K) を活かした放熱器の小型化、ソフトスイッチング動作による電磁妨害 (EMI) の抑制と電磁シールドを施す領域の小型化、これらの複合的な要素技術を集結させた電力変換回路の高効率化および小型・軽量化、長寿命化を達成するため、回路設計のための指針を確立していく必要があった。

### 2. 研究の目的

電源回路に求められる性能の指標は、必要となる電力生成とその安定性に集約される。具体的には、出力電圧の生成、電力量制御、安定化、高効率化、小型化である。

リニア方式やスイッチング方式が考案されている中で、数十 W クラスの比較的小容量の電源回路には、部品点数の少なさから、スイッチング方式の1つであるフライバックコンバータ回路形式が一般的には採用されている。

その際のスイッチング周波数の高速化に伴って、一周期あたりに扱うエネルギー量が減少し、インダクタやキャパシタのサイズを縮小することで、電源回路全体の小型化と軽量化が達成されることになる。

本研究における具体的に達成すべき項目は、同期整流 (位相) 制御、昇降圧制御、双方向制御、そしてソフトスイッチング技術による低ノイズ化である (図 1 参照)。これらを満たす電源回路の設計指針の確立されることにより、高い汎用性を有する電源システムの実現が本研究の目的である。

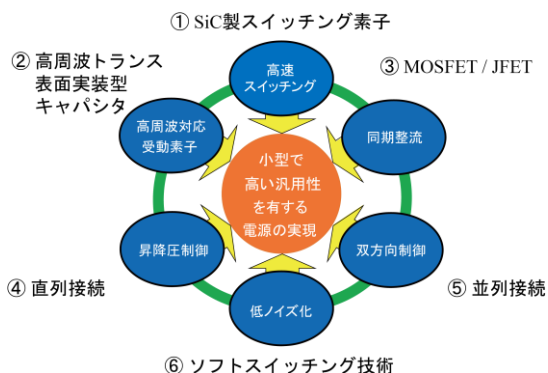


図 1. 研究の目的とその戦略。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、小容量スイッチング電源回路において、スイッチング素子には、高耐圧性能と低コスト化を両立させ、さらに安定供給が見込まれる SiC-JFET と Si-MOSFET をカスコード接続させた素子 (以下、Cascode と表記) を採用するに至った。

また整流素子には、後ほど述べる周波数特性の観点から、ダイオードではなく SiC 製 JFET (以下、JFET と表記) を採用することに至った。さらに Cascode 素子と JFET 素子とを対構成した同期整流型フライバックコンバータ回路を提案、設計、作製し、その回路各部における電圧および電流の検出によって詳細に評価した。

回路稼働における動作検証として、汎用的な小容量スイッチング回路における動作周波数が約 1 kHz であるのに対して、まずはその 10 倍の 1 MHz とした。その際の実出力電圧 5 V および出力電流 0.35 A より 1.8 W 出力 (換算) のフライバックコンバータ回路による電源を製作した (図 2 参照)。

本回路の特徴は、整流素子にはダイオードではなく **JFET** を採用し、スイッチング素子には **Cascode** を採用することで、1つの単体の制御信号で、同期整流する回路構成を考案していることである。その結果、同期整流を実現するための位相制御においては、特別な制御回路を必要としないことが挙げられ、より小型化を図ることができる。

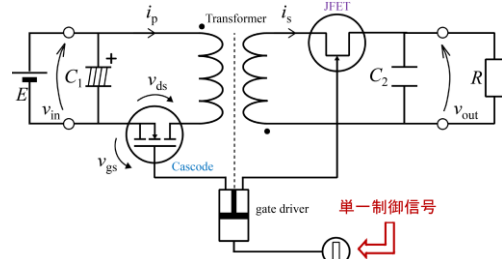


図 2. 同期整流型フライバックコンバータの回路模式図。

本研究で作製したフライバックコンバータ回路において、入力（1次）側および出力（2次）側のほか、絶縁ゲートドライバ、トランス、スイッチング素子および整流素子について、以下に項目別に述べる。

#### (1) 入力（1次）側

入力に相当する1次側は高電圧側に対応する。電源 ( $E$ ) には、シリーズレギュレータ方式の直流安定化電源（高砂製作所製、GP0110-3）を用い、直流  $20\sim 70\text{V}$ 、 $0.3\text{A}$  に設定した。また1次側コンデンサ ( $C_1$ ) は、平滑コンデンサに加わる最大電圧とディレーティングを考慮して  $82\mu\text{F}$ （ニチコン社製、耐圧  $400\text{V}$ ）を用いた。

#### (2) 出力（2次）側

出力となる2次側は低電圧側に対応する。将来的な設計値としては、直流  $15\text{V}$ 、 $3\text{A}$  の ( $45\text{W}$ ) 出力を要求性能としている。ただし本研究段階では、動作検証を主目的とするため、出力電圧  $5\text{V}$  および出力電流  $0.35\text{A}$  よとして  $1.8\text{W}$  出力（換算）を設定している。

また繰り返しになるが、整流素子にはダイオード素子を使用せず、**SiC** 製 **JFET** を採用した。その理由として、動作周波数を  $1\text{MHz}$ （あるいはそれ以上）とした場合、ダイオード素子が有する寄生容量の影響により、整流作用が発現されないことが確認されたためである。以上、メガヘルツ (MHz) 帯の動作を達成するための同期整流を提案、採用した。

さらに平滑コンデンサには、電解コンデンサ（ラジアル型）ではなく、積層セラミックコンデンサ（表面実装型）を選定した。積層セラミックコンデンサは電解コンデンサと比較して、素子サイズが小さい、大きな許容リップル電流を有する、等価直列抵抗 (ESR: Equivalent Series Resistance) が小さい、良好な周波数特性から、スイッチング周波数の上昇に伴うメリット享受を期待した。

#### (3) 絶縁ゲートドライバ

高い汎用性を有するスイッチング電源には、供給電源に依存しない安定出力、素子の動作電位レベルが保たれた制御回路、以上の2点が重要となる。これらの課題克服のためには、絶縁ゲートドライブ動作が不可欠となる。加えて、高速動作 ( $1\text{MHz}$  あるいはそれ以上) を実現するため、フォトカプラ、磁気カプラなどの絶縁ゲートドライバの周波数特性を精査した上で、高速スイッチング電源を実現するためのデバイス駆動ドライバとして **Si8235** (Silicon Lab. 社製) を採用した。

**Si8235** は  $20\text{MHz}$  程度までの周波数帯域において、絶縁ゲートドライブ動作していることを実験的に確認して使用を決定した。しかしながら、利得に関しては概ね良好であったが、位相については遅れ要素を示していた。ただし、このような位相遅れは、高速スイッチング動作の検証時に限っては、位相調整により支障無く対処できると判断し、同期整流型フライバックコンバータ回路の絶縁ゲートドライバとして実装した。

#### (4) トランス

電源回路の絶縁性の確保ならびにリアクトルとして機能するトランスの設計については、低鉄損ならびに飽和磁束密度が高いとされている新素材磁性材料 (Liquialloy™) を採用した。またその形状として、トロイダルコア形状 (外径  $15.8\text{mm}$ 、内径  $5.8\text{mm}$ 、厚さ  $7.1\text{mm}$ ) を採用することで、インダクタンス値の設計を容易にした。加えて、線材には直径  $0.4\text{mm}$  (1次巻線) と直径  $0.8\text{mm}$  (2次巻線) をそれぞれ電流容量に応じて使用することとした。

試作したトランスをインピーダンスアナライザ (E4990A, Keysight 社製) により周波数特性を評価した。測定周波数範囲を  $20\text{Hz}\sim 30\text{MHz}$  として設定し、高周波動作への適正を検証した。

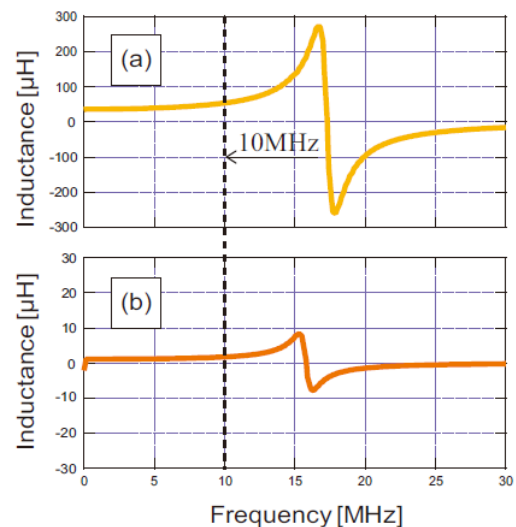


図 3. 特製トランスの周波数特性  
(a) 1次巻線, (b) 2次巻線。

本研究で試作した特製トランスの周波数特性を図3に示す. また図3(a)は1次巻線( $L_1$ )であり, 図3(b)は2次巻線( $L_2$ )である. 図3(a)より, 1次側の共振周波数 $f_{L1}$ は16.8 MHz, 共振時のインダクタンス値は269  $\mu$ Hであることから, 寄生容量は0.33 pFと算出される.

同様に図3(b)より, 2次側の共振周波数 $f_{L2}$ は15.3 MHz, 共振時のインダクタンス値は8.33  $\mu$ Hであることから, 寄生容量は13.0 pFであると算出された. 加えて, 短絡-開放試験により求められる結合係数 $k$ は0.98であり, 以上の結果から, 相互インダクタンス $M$ は46.4  $\mu$ Hと概算された.

#### (5) Cascode 素子および JFET 素子の静特性

本報告のフライバックコンバータ回路のスイッチング素子には Cascode (UJN1206, USCi 社製)素子, 整流素子には JFET(UJN1205, USCi 社製)素子を採用している. これら Cascode 素子と JFET 素子の対構成により1つの制御信号での同期整流を達成している. スwitching素子として使用した Cascode 素子の静特性を図4に示す.

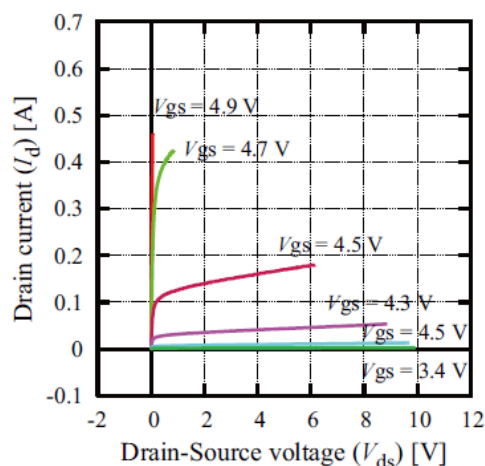


図4. Cascode 素子の静特性.

また, 整流素子として使用した JFET 素子の静特性を図5に示す.

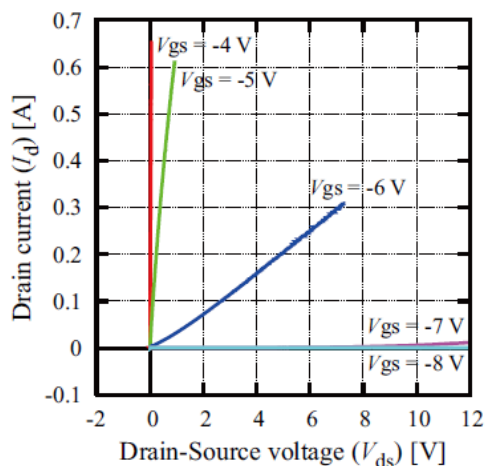


図5. JFET 素子の静特性.

#### (6) 回路挙動評価について

メガヘルツ (MHz) 動作時の回路挙動の観測および解析のために, スwitching素子である Cascode 素子のゲート-ソース間電圧 ( $v_{gs}$ ), ドレイン-ソース電圧 ( $v_{ds}$ ) のほか, 入力電圧 ( $v_{in}$ ) と1次側電流 ( $i_1$ ), 出力電圧 ( $v_{out}$ ) と2次側電流 ( $i_2$ ) を, 絶縁型オシロスコープ (Tektronix 社製, TDS2024B) と電流プローブ (Tektronix 社製, TCP305) により, それぞれを同時観測した. また制御信号の生成には, パルスジェネレータ (tektronix 社製: AFG3022) を用いることとした.

### 4. 研究成果

同期整流型フライバックコンバータにおいて, 制御信号が単体1つであることに対して, スwitching動作および整流動作を Cascode 素子と JFET 素子の対構成により実現している動作検証を行った.

またその際, 回路の各箇所におけるサージ電圧およびリングング (オーバシュート, アンダーシュートを繰り返して減少していく振動) 現象を実験的観測に基づいて評価する. これらにより, メガヘルツ (MHz) オーダで動作する絶縁型フライバックコンバータ回路挙動を明らかにした.

#### (1) 同期整流の達成

1つのゲートドライブ信号に対して, 「Normally-Off 型の Cascode 素子」と 「Normally-On 型の JFET 素子」とを組み合わせることで, 特別な位相制御回路を必要としない同期整流が達成された.

図6に, ゲートドライブ信号 ( $v_g$ ), Cascode 素子のゲート-ソース間電圧 ( $v_{gs}(\text{Cascode})$ ), JFET 素子のゲート-ソース間電圧 ( $v_{gs}(\text{JFET})$ ) を示す.

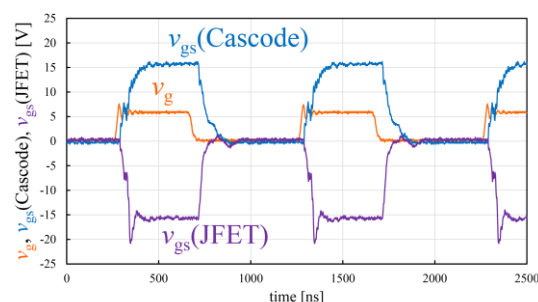


図6. 素子対の動作波形 (1MHz 動作時).

単一のゲートドライブ信号 ( $v_g$ ) に対して, それぞれの駆動電圧 (ここでは15Vに設定) として, Cascode 素子には正バイアス, 一方の JFET 素子には負バイアスが, 同時に印加されていることが確認される.

また JFET 素子は, Cascode 素子と比較して入力容量 ( $C_{iss}$ ) が約半分であることに起因 (記載なし, データシート参照のこと) して, 急峻な電圧の立ち上がり特性を有していることが合わせて確認される.

## (2) 1 MHz 動作の達成

1 MHz 動作時におけるフライバックコンバータ回路内の各電圧、各電流波形を図7に示す。ゲート信号(1 MHz, 0-5 V)の矩形波制御信号は図示せず)に応じて、ゲート-ソース間電圧( $v_{gs}$ )は、12 Vが印加されている。続いて、ドレイン-ソース間電圧( $v_{ds}$ )に着目すると、尖頭値として213 Vに達するサージ電圧が発生している。

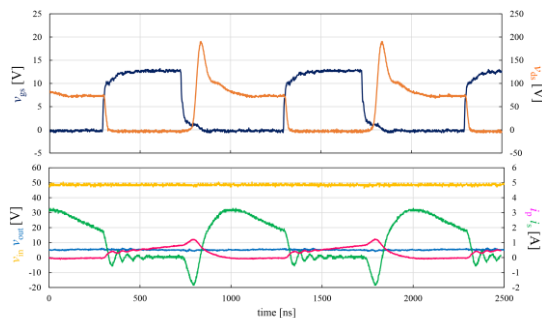


図7. フライバックコンバータ回路の動作波形(1 MHz動作時).

また入力電圧( $v_{in}$ )が38 V、入力電流( $i_p$ )が0.3 Aであることから、入力電力は11.4 Wと算出される。ここで、出力側に無誘導負荷15  $\Omega$ を接続しているため、その出力電圧( $v_{out}$ )が4 Vであることから、出力されている電力は1.1 Wである。以上のことから、変換効率は9.3%であることが明らかになった。

## (3) 10 MHz 以上における高速動作への展開

本研究に於けるフライバックコンバータ回路内の受動素子の全てが10 MHzを超える周波数帯域に於いても充分に対応していることから、耐圧および電流容量を抑えて、高速動作が期待されるSi製の半導体素子(スイッチング、整流)に換装した上で、フライバックコンバータ動作の検証も実施している。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① N. Satoh, K. Kobayashi, S. Watanabe, T. Fujii, K. Matsushige, H. Yamada, “Optical and mechanical detection of near-field light by atomic force microscopy using a piezoelectric cantilever”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55, 08NB04 (2016) 【査読有り】 [http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.55.08NB04]
- ② N. Satoh, M. Yamaki, K. Noda, S. Katori, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, “Surface Potential Measurement of Fullerene Derivative/Copper Phthalocyanine on Indium Tin Oxide Electrode by Kelvin Probe Force Microscopy”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, 08KF06 (2015) 【査読有り】 [doi:10.7567/JJAP.54.08KF06]

- ③ T. Uruma, N. Satoh, H. Yamamoto, “Investigation of the depletion layer by scanning capacitance force microscopy with Kelvin probe force microscopy”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55, 08NB10 (2016) 【査読有り】 [http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.55.08NB10]
- ④ T. Uruma, N. Satoh, and H. Ishikawa, “Surface Potential and Topography Measurements of Gallium Nitride on Sapphire by Scanning Probe Microscopy”, IEEJ Trans. on Sens. and Micro., Vol. 136, pp. 96-101 (2016) [in Japanese] 【査読有り】 [http://doi.org/10.1541/ieejsmas.136.96]
- ⑤ N. Satoh, E. Tsunemi, K. Kobayashi, T. Komatsubara, S. Higuchi, K. Matsushige, H. Yamada, “Twin-probe atomic force microscopy with optical beam deflection using vertically incident lasers by two beam splitter”, IEEJ Trans. on Sens. and Micro., Vol. 135, pp.135-141 (2015) [in Japanese] 【査読有り】 [http://dx.doi.org/10.1541/ieejsmas.135.135]
- ⑥ N. Satoh, S. Katori, K. Kobayashi, S. Watanabe, T. Fujii, K. Matsushige, H. Yamada, “Surface Potential Investigation of Fullerene Derivative Film on Platinum Electrode under UV Irradiation by Kelvin Probe Force Microscopy Using a Piezoelectric Cantilever”, e-J. Surf. Sci. Nanotech. Vol. 13, pp.102-106 (2015) 【査読有り】 [DOI http://dx.doi.org/10.1380/ejsnt.2015.102]
- ⑦ N. Satoh, S. Katori, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, “Surface Potential Measurement of Organic Multi-layered Films on Electrodes by Kelvin Probe Force Microscopy”, IEICE TRANSACTIONS on Electronics Vol.E98-C, pp.91-97 (2015) [Online ISSN: 1745-1353]
- ⑧ N. Satoh, K. Kobayashi, S. Watanabe, T. Fujii, K. Matsushige, H. Yamada, “Scanning near-field optical microscopy system based on frequency-modulation atomic force microscopy using a piezoelectric cantilever”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 53, 125201 (2014) 【査読有り】 [doi:10.7567/JJAP.53.125201]
- ⑨ N. Satoh, S. Katori, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, “Surface Potential Measurement of Fullerene/Copper Phthalocyanine Films on Indium Tin Oxide Electrode by Kelvin Probe Force Microscopy”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 53 05FY03 (2014) 【査読有り】 [doi:10.7567/JJAP.53.05FY03]

[学会発表] (計16件)

- ① T. Ohsato, N. Satoh and H. Sekiya, “A Flyback Converter using power-MOSFET

- s to Achieve High Frequency Operation beyond 10 MHz”, 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), #1460 (2017/06/07) Kaohsiung · TAIWAN.
- ② 大里辰希, 佐藤宣夫, 「位相制御されたフライバックコンバータ回路の挙動解析」, 平成 29 年電気学会全国大会, 4-118 (2017/03/15) 富山市 · 富山県.
- ③ N. Satoh, K. Kobayashi, K. Matsushige and H. Yamada, “Near-field Light Detection as photo-induced force by Atomic Force Microscopy with Frequency Modulation”, 24th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM24) S4-8 (2016/12/14) Hawaii · USA.
- ④ T. Ohsato and N. Satoh, “A Study of Passive Elements for Isolated Flyback Converter”, The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2016), DS1G-2-9 (2016/11/14) Chiba · CHIBA.
- ⑤ N. Satoh, K. Kobayashi, S. Watanabe, T. Fujii, K. Matsushige, H. Yamada, “Optical and Mechanical Detection of Near-field Light by Atomic Force Microscopy using a Piezoelectric Cantilever”, 23rd International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM23), S4-43 (2015/12/10) Niseko · Hokkaido.
- ⑥ N. Satoh, Y. Nishida, “Flyback Converter Using SiC Power-MOSFET to Achieve High Frequency Operation Over 10MHz”, 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2016), 1083 (2016/11/28) Yugawara · KANAGAWA.
- ⑦ 小村裕作, 佐藤宣夫, 舟木 剛, 「SiC power-MOSFET における温度特性評価の一検討」, 平成 28 年電気学会 産業応用部門大会, Y-67 (2016/08/30) 前橋市 · 群馬県.
- ⑧ 大里辰希, 佐藤宣夫, 「SiC-JFET を用いた位相制御によるフライバックコンバータの実験的検討」, 平成 28 年電気学会 産業応用部門大会, Y-67 (2016/08/30) 前橋市 · 群馬県.
- ⑨ 佐藤宣夫, 牛崎 拓, 新井浩志, 木村建次郎, 「リチウムイオン二次電池の等価回路モデルの一検討」, 平成 28 年電気学会全国大会, 4-131 (2016/03/16) 仙台市 · 宮城県.
- ⑩ N. Satoh, “Development of Multi-Probe Atomic Force Microscope and Probe Interaction”, 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2015) 6184 (2015/12/03) Hong Kong · CHINA.
- ⑪ N. Satoh, S. Katori, K. Kobayashi, K. Matsushige and H. Yamada, “Surface Potential Measurement of Fullerene Derivative / Copper Phthalocyanine on Indium Tin Oxide Electrode by Kelvin Probe Force Microscopy”, The 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6WePo.2.28 (2014/11/26) Kyoto · KYOTO.
- ⑫ N. Satoh, H. Otake, T. Nakamura, T. Hikiyama, “A Flyback Converter using Power MOSFET to Achieve High Frequency Operation beyond 13.56MHz”, The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2015), YF-006262 (2015/11/10) Yokohama · KANAGAWA.
- ⑬ N. Satoh, S. Katori, K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, “Surface potential investigation of fullerene derivative film on platinum electrode under UV irradiation by Kelvin probe force microscopy using a piezoelectric cantilever”, The 7th International Symposium on Surface Science (ISSS-7) 3PN-31 (2014/11/03) Matsue · SHIMANE.
- ⑭ N. Satoh, T. Uruma, A. Odaka and S. Katori, “Surface Potential Measurement of p-type Organic Semiconductor Thin Films by Mist-vapor Deposition”, Korea-Japan Joint Forum 2014 Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICO MEP2014) PB075 (2014/09/23) Tukuba · IBARAKI.
- ⑮ N. Satoh, “High-speed switching operation of wide band-gap semiconductor and its circuit application”, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2014) Short Course A (3) (2014/09/08) Tukuba · IBARAKI.
- ⑯ N. Satoh, S. Katori, K. Kobayashi, K. Matsushige and H. Yamada, “Surface Potential Measurement of Organic Multi-layered Thin Films on Electrodes by Kelvin Probe Force Microscopy”, The 8th International Symposium on Organic Molecular Electronics (ISOME2014) (2014/05/15) Hutyuu · TOKYO.

[その他]

ホームページ等

<http://www.orange.it-chiba.ac.jp/jpn/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 宣夫 (SATOH NOBUO)

千葉工業大学 · 工学部 · 教授

研究者番号 : 70397602