

小特集 半導体パルスパワー電源の現状と今後 ～プラズマ研究をささえる半導体パワーデバイス～

2. 半導体パルスパワー電源のプラズマ応用機器への適用

佐久川貴志, 浪平隆男, 勝木 淳, 秋山秀典, 長田俊宏¹⁾, 小金澤竹久¹⁾
(熊本大学, ¹⁾株明電舎)

Application of All Solid-State Pulsed Power Generators to Equipment Using Plasmas

SAKUGAWA Takashi, NAMIHIRA Takao, KATSUKI Sunao, AKIYAMA Hidenori,
OSADA Toshihiro¹⁾ and KOGANEZAWA Takehisa¹⁾

Kumamoto University, Kumamoto 860-8555 Japan

¹⁾*Meidensha Corporation, Numazu, 410-8588 Japan*

(Received 25 January 2005)

Recently, high-repetition-rate all-solid-state pulsed power generators with long lifetime and high reliability, have been developed for industrial applications with plasmas, such as high-repetition-rate pulsed gas lasers, high energy density plasma (EUV sources) and water discharges. Nowadays, power semiconductor device technology can improve the performance of fast and high-power switching devices. In practical systems, however, semiconductor switches are used with the assistance of magnetic switches because the semiconductor switches are not capable of driving the usual generators by themselves. These generators consist of semiconductor switches, step-up pulse transformers and magnetic switches. Progress of all-solid-state pulsed power generators is reviewed with particular emphasis on industrial applications with plasmas.

Keywords:

semiconductor switch, magnetic switch, magnetic pulse compressor, water discharge, extreme ultraviolet

2.1 はじめに

近年, IT産業をはじめとしてパルスパワー生成プラズマを用いた産業応用が広がりを見せている. プラズマの利用としては, プラズマからの放射光や電子・イオン等の荷電粒子を被処理物質に作用させる各種プロセス, パルスアーク放電やパルスストリーマ放電による衝撃波の発生を利用した殺菌や水処理[1], レーザー発振, 排気ガス浄化[2, 3], オゾン生成[4], さらに最近その実用化研究が注目されている高密度プラズマ放射による極端紫外 (EUV: Extreme Ultra-Violet) 光源[5-7]等がある.

従来高電圧パルスパワー電源のスイッチにはギャップスイッチやサイラトロンなどの気体放電を利用したものが多く用いられてきた. しかし産業分野にこれらの気体放電スイッチを適用するにはスイッチ寿命や安定動作において問題がある. 1980年代後半から1990年代前半にかけてパルス放電励起気体レーザーの励起電源回路に半導体スイッチを適用する研究開発が盛んに行われた[8-10].

現在, リソグラフィ光源の主流となっているエキシマレーザーの励起には立ち上がり数十 ns で 20~30 kV の高電圧を ~6 kpps (kilo pulses per second) の繰り返して発生させる必要がある. このときのパルス電流のピーク値は数 kA になる. 最近の半導体パワーデバイスの進歩には目を見張るものがあるが, 最新の半導体パワーデバイスを用い

てもこのような高速高電圧・大電流の仕様を直接満足させることは困難である. そのため半導体スイッチの後段に昇圧トランスや磁気スイッチを用いた磁気パルス圧縮回路 (MPC: Magnetic Pulse Compressor) を付加して高電圧・短パルス化を図っている. このような半導体パワーデバイスと磁気スイッチを組み合わせた回路がレーザーのみならず各種プラズマ発生機器に広く適用され, 最近のプラズマ研究を支えている.

本章では, 半導体パワーデバイスと磁気スイッチについてまとめた後, 水中ストリーマ状放電プラズマ生成, 極端紫外光源等, プラズマ応用機器への適用例を述べる.

2.2 半導体パワーデバイスと磁気スイッチ

パルスパワー発生装置に多く利用されている半導体パワーデバイスには高電圧のサイリスタ, GTO (Gate Turn Off) サイリスタ, SI (Static Induction) サイリスタなどのサイリスタ系のパワーデバイスのほかに, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 等がある[11].

磁気スイッチはアモルファス合金やナノ結晶合金等でできた強磁性体の急激な透磁率変化 (透磁率の高い状態で通電を阻止し, 飽和後の低透磁率状態で一気に通電する) を利用する. 回路の中では可飽和インダクタや可飽和トラン

Corresponding author's e-mail: sakugawa@kcr.kumamoto-u.ac.jp

スとして用いる。MPCは磁気スイッチとキャパシタを用いたLC共振回路である。磁気スイッチを含む共振ループのインダクタンスを小さくすることで共振周波数が高くなり、結果的にパルス圧縮が行われる。

一般的にサイリスタ系の素子はサージ電流耐量を高くできるため、素子の並列数を低減できるがスイッチング速度が遅い。そのためゲート電流を高速化してスイッチングを高速化したり多段のMPCを用いたりすることで高速パルスを得る必要がある。IGBTは比較的高速スイッチングができ、MOSFETより電流密度が高く、高耐圧である。スイッチングを制御するゲート回路も絶縁ゲートを持つため駆動電力が小さい。MOSFETはそのスイッチングの高速性においてはこれらパワーデバイスの中でも最速でMPCを不要とするほどであるが1素子あたりの容量が小さいために多数個直並列接続したスイッチバルブを構成する必要がある。

2.3 パワーデバイスを用いたプラズマ発生装置

2.3.1 水中ストリーマ状放電プラズマ発生装置

気体中のストリーマ放電利用研究はオゾン生成、排ガス処理、殺菌等で広く行われている。近年水中においてもストリーマ状放電プラズマ生成の研究が進展してきている。その水中放電プラズマの研究と並行してそのパルスパワー発生装置への半導体パワーデバイスの適用研究がある[6]。Fig. 1はアオコ処理用の水中放電用パルスパワー発生装置である。アオコは夏季に湖沼や池等で大量発生して水質汚染を引き起こす。そのため発生現場でのパルスパワー処理が必要となるため可搬型の装置にする必要がある。Fig. 1

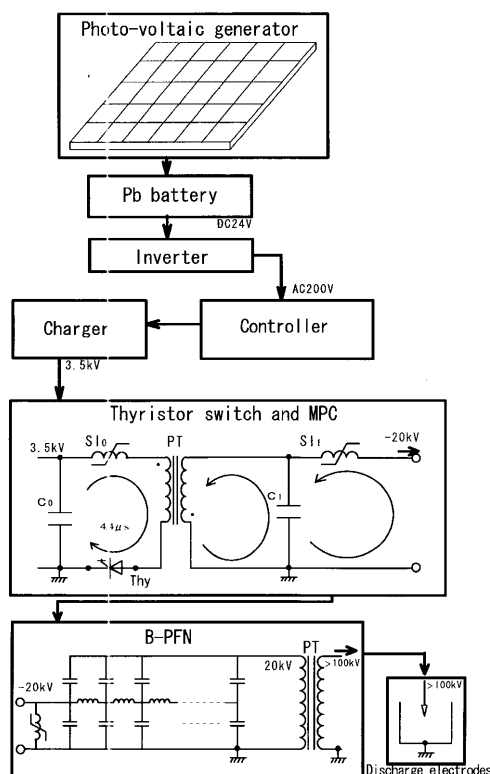


Fig. 1 Block diagram of pulsed power system for water discharge.

では電力供給は太陽光発電で行っている。通常のパルス発生の繰り返しは10 ppsであるが供給電力によっては最大40 ppsの繰り返しまで対応できる。パルス発生用の半導体スイッチは4.5 kV耐圧の高速サイリスタ素子1個でスイッチングし、可飽和インダクタによる磁気アシストを行っている。スイッチング電圧は3.5 kVで行っている。パルス幅は4.4 μ sである。パルストランスにより20 kVに昇圧後、MPCでパルス圧縮する。さらにブルームライン型パルスフォーミングネットワーク (B-PFN) を用いて、立ち上がりの速い矩形波に成形してパルストランスで100 kV以上に昇圧後、水中の電極に印加している。Fig. 2は出力電圧電流波形を示している。立ち上がりは0.3 μ s、最大電圧130 kV、最大電流20 Aに達している。水中放電の様子をFig. 3に示す。広がりのあるストリーマ放電が観測されている。ストリーマの進展長は72 mmに達している。

2.3.2 極端紫外光源用パルスパワー発生装置

次世代の最有カリソグラフィ光源として波長13.5 nmを利用する極端紫外 (EUV) 光源があり、その研究開発が日米欧を中心に国際的にも活発に行われている。EUV光発生にはレーザーをXeやSn、Liターゲットに照射し、その生成プラズマからの放射EUVを利用するレーザー生成プラズマ (LPP: Laser Produced Plasma) 方式と、パルスパワーによって直接Xe等を高温高密度のプラズマにする放

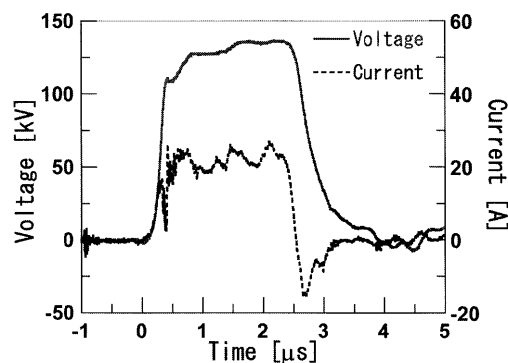


Fig. 2 Output voltage and current waveforms.

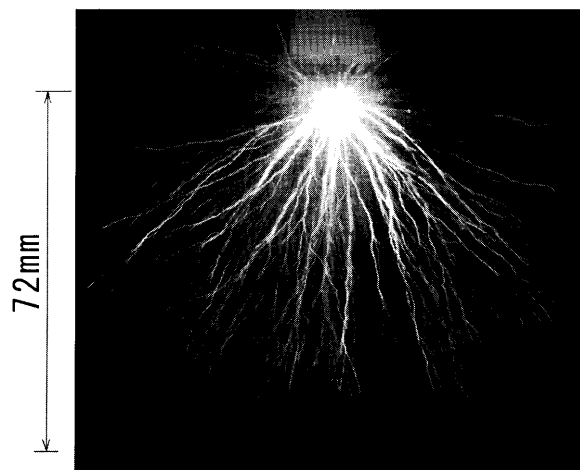


Fig. 3 Photograph of streamer discharges in water [Conductivity: 0.1 mS/m].

電生成プラズマ (DPP: Discharge Produced Plasma) 方式がある。ここでは DPP 方式のパルスパワー発生装置について述べる。

Fig. 4 に SI サイリスタを用いた EUV 光発生用パルスパワー発生装置を示す。SI サイリスタスイッチは耐電圧 4.5 kV の素子を 1 個で構成している。最大スイッチング電圧は 3.8 kV で設計され、パルストランス PT と可飽和トランス ST で 30 kV まで昇圧し、ST と可飽和インダクタ SI 2 の磁気スイッチ動作でパルス圧縮を行っている。この出力パルスパワーで高エネルギー密度の Z-pinch プラズマを生成する。Fig. 5 に SI サイリスタのスイッチング電圧電流波形、Fig. 6 に SI 2 の出力電流波形をそれぞれ示す。Fig. 5 では、SI サイリスタのスイッチ動作により入力電圧 3.8 kV でピーク値約 6 kA、パルス幅 3.3 μ s の電流を発生している。EUV 光を効率良く発生させるための高エネルギー密度プラズマ生成には高速大電流が不可欠である。Fig. 6 より SI 2 の磁気スイッチ動作で立上がり約 60 ns の高速大電流パルスが発生しているのがわかる。Fig. 7 に負荷であるアルミナ放電管内で発生した高エネルギー密度 Z-pinch プラズマを示す。アルミナ放電管の内径は 5 mm、長さは 10 mm である。ピンチプラズマの外径は約 350 μ m になっている。EUV 光発生のためにはこの狭い領域に大電流パルスパワーが印加されなければならない。

他にも SI サイリスタと PFN (Pulse Forming Network) を用いた EUV 光源用パルスパワー発生回路[12] がある。回路中の磁気アシスト用可飽和インダクタの磁化電流

が負荷に流れ、生成プラズマの予備電離に寄与している。

Fig. 8 に IGBT と MPC を用いた EUV 発生用パルスパワー発生装置の回路[5] の概略を示す。この回路の負荷は Dense Plasma Focus (DPF) である。高繰り返しに対応するために共振充電器を用いている。入力電圧は 1.3 kV で IGBT を直列接続せずに 8 並列接続でスイッチを構成している。SI 0 を用いて IGBT の磁気アシスト回路になっている。スイッチング時の電圧と電流の位相をずらして IGBT の損失を低減できる磁気アシストであるが、このような複数並列の半導体スイッチの電流バランスにも有効と考えられる。この回路では、出力電圧は 4 ~ 5 kV と低電圧である。

パルスパワー電源の出力エネルギーを EUV 光に変換する効率は 0.5% と低い。パルスパワー出力はプラズマには

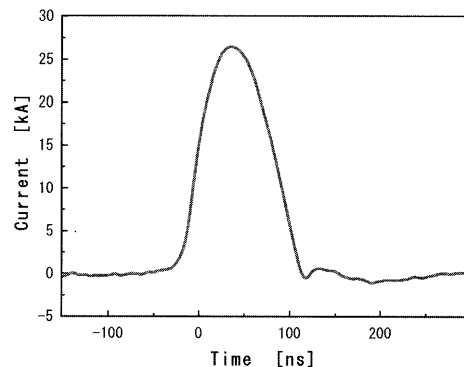


Fig. 6 Output current waveform of MPC for EUV source.

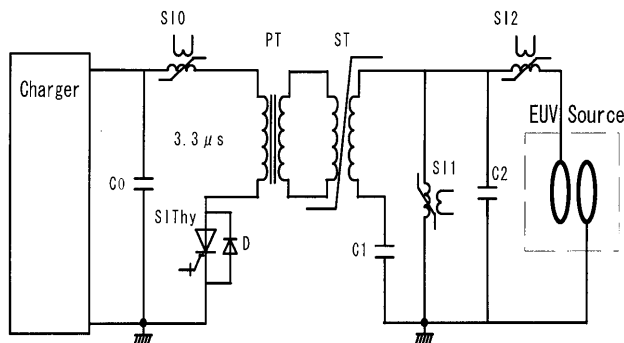


Fig. 4 Schematic pulsed power circuit using SI thyristor and MPC for EUV source.

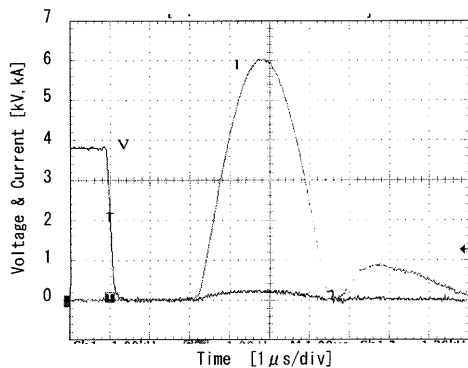


Fig. 5 Switching waveforms of SI thyristor.

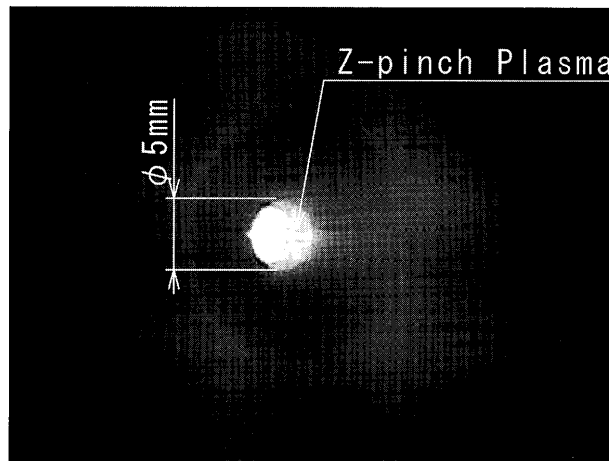


Fig. 7 Photograph of high energy density Z-pinch plasma for EUV source [Gas:Xe].

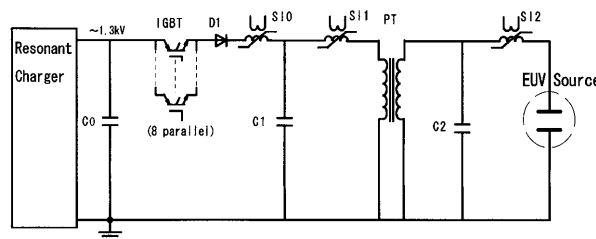


Fig. 8 Schematic pulsed power circuit using IGBT and MPC for DPF.

消費されず反射電圧としてパルス電源に戻ってくる割合も多い。負荷であるプラズマで消費されなかったエネルギーは放っておくと熱損失となる。EUVリソグラフィーにおいては2009年頃には115 Wの光源が期待されており、パルス電源へも高繰り返し高出力化が要求されている。パルス電源としては自らの効率向上の他に負荷で消費されなかったエネルギーの有効利用を考えなければならない。Fig. 9にエネルギー回収回路を備えたパルス電源を示す。半導体スイッチには3.3 kV耐圧のIGBTを3並列で使用している。パルストランスPTで昇圧後、多段MPCによりパルス圧縮を行って、負荷へパルス電源を供給している。また、PTの1次側にエネルギー回生の巻線を施し、余剰となる負荷からの反射電圧を初段エネルギー蓄積用のキャパシタC0に戻すようにしている。この場合、IGBTのOFF性能が重要になる。Fig. 10に負荷短絡状態でのC0へのエネルギー回生を行っているC0充電電圧波形を示す。2 kVの入力電圧に対して負荷で消費されなかったエネルギーが約1.3 kVの電圧としてC0に戻ってくる。その前にIGBTをOFFすることでC0に余剰エネルギーを蓄積する。繰り返しは7 kppsである。エネルギー回収回路を設けることで繰り返し動作において第2パルス以降は残りのエネルギーを充電器から供給すればよく、電力節約と冷却装置の負担を低減できる。

2.3.3 その他のパルス電源発生装置

その他の半導体パワーデバイスを用いた装置応用として

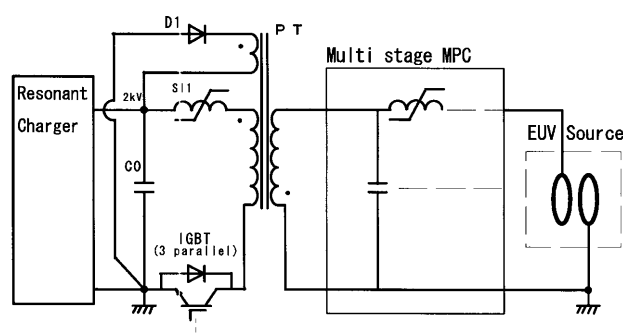


Fig. 9 Schematic pulsed power circuit using IGBT and MPC with energy recovery circuit.

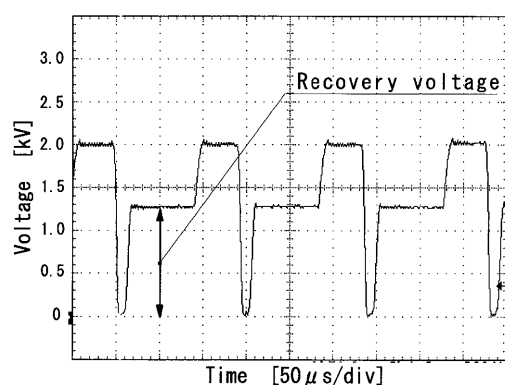


Fig. 10 C0 voltage waveform from 7 kpps demonstrating energy recovery.

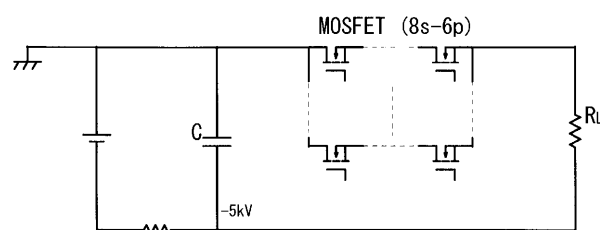


Fig. 11 Schematic circuit using MOSFET.

はオゾン生成[4]や排気ガス浄化[3]等がある。Fig. 11はMPCを付加せずMOSFETのスイッチ動作だけでパルス電源発生を行う回路[13]である。MOSFETスイッチは耐電圧900 V、許容パルス電流27 Aの素子を8直列×6並列でスイッチスタックを構成している。負荷抵抗への出力電圧は5 kV、電流80 A、パルス幅240 nsで繰り返しは2.1 Mppsである。

2.4 おわりに

現在、プラズマ応用機器の駆動電源として半導体パルス電源が幅広く利用されている。本章で取り上げた半導体パルス電源はほんの一部にすぎない。

最近のEUV光源の激しい研究開発競争を見ていると過去にリソグラフィー光源がg線やi線からKrFエキシマレーザーに移行した頃を思い起こす。当時はレーザー駆動用パルス電源を半導体スイッチ化すること[14, 15]が研究課題であった。10年が経過した今日では半導体パワーデバイスの搭載は当然のことになっている。前述のエネルギー回収[16]や安定性向上や低ジッター化等のプラズマ発生タイミング制御などはリソグラフィー光源エキシマレーザー用パルス電源で培ってきた技術である。それまでの半導体パワーデバイスの性能向上と、パルス電源の半導体化の研究開発の成果により、放電スイッチに比べ繰り返し安定性やスイッチ寿命、制御性が桁違いに優れていることを検証した結果だと思う。

これからのプラズマ応用機器は実用化の方向として安定性や高繰り返し化はもちろん、エネルギー回生や必要ときに必要なだけプラズマ発生を任意に制御できる等のインテリジェント化も求められていくように思われる。

パワーデバイスの耐電圧や高速性等の性能向上には目を見張るものがある。パルス電源に利用できるパワーデバイスも少し高価だが市販品があり、入手しやすくなった。そのことは幅広いプラズマ応用機器への適用に大きく寄与したと考える。一方ではシリコンパワーデバイスの性能限界が近づいているとの議論がある[17, 18]。パワーデバイスがさらに進化するにはSiC等の新材料に性能限界のブレイクスルーに期待が寄せられる。

本章で紹介した資料の一部は21世紀COEプログラム(衝撃エネルギー科学の深化と応用)、NEDOの支援による極端紫外線露光システム技術開発機構(EUVA)の再委託研究、株式会社明電舎から提供されたものを利用させていただきました。また章末に示す文献を参考にさせていただきましたのでここに謝意を表します。

参考文献

- [1] H. Akiyama, S. Katsuki, T. Namihira, K. Ishibashi and N. Kiyosaki, *J. Plasma Fusion Res.* **79**, 26 (2003) *in Japanese*.
- [2] T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, Y. Uchida and M. Koike, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28**, No.2, 434 (2000).
- [3] K. Takaki, M. Shimizu, T. Sasaki, S. Kato, S. Mukaigawa and T. Fujiwara, *Proc. 14th IEEE Pulsed Power Conf.* (2003) p.571.
- [4] T. Sakugawa, D. Wang, K. Shinozaki, T. Namihira, S. Katsuki and H. Akiyama, *Proc. 14th IEEE Pulsed Power Conf.* (2003) p.657.
- [5] R.M. Ness and W. N. Partlo, *Proc. 13th IEEE Pulsed Power Conf.* (2001) p.1268.
- [6] 佐久川貴志：明電時報 **296**, 10 (2004).
- [7] 遠藤 彰：レーザー研究 **32**, 757 (2004).
- [8] T. Hatakeyama, E. Murata, E. Fujiwara and H. Deguchi, *Proc. of IPEC Tokyo* (1990) p.312.
- [9] H. Hatanaka, H. Tanaka, M. Obara, K. Midorikawa and H. Tashiro, *J. Appl. Phys.* **68**, 1456 (1990)
- [10] 岩田明彦, 鈴木弘一, 殖栗成夫：電気学会論文誌 D, **113**, No1, 23 (1993).
- [11] T. Sakugawa, *J. Plasma Fusion Res.* **79**, 15 (2003) *in Japanese*.
- [12] 堀田栄喜, 宋 仁皓, 岡本光男, 北出恵太, 林 靖, 渡辺正人, 沖野晃俊, 安岡康一, 堀岡一彦：SI デバイスシンポジウム, SSID-03-6 (2003).
- [13] W. Jiang, K. Yatsui, N. Shimizu, K. Iida and A. Tokuchi, *Proc. 14th IEEE Pulsed Power Conf.* (2003) p.261.
- [14] W. Partlo, R. Sandstrom and I. Fomenkov, *Proc. SPIE* **2440**, 90 (1995).
- [15] H. Mizoguchi, O. Wakabayashi, T. Aruga, T. Sakugawa and T. Koganezawa, *Proc. SPIE*, **2726**, 831 (1996).
- [16] 長田俊宏, 小金澤竹久, 片岡康夫：電気学会基礎・材料・共通部門大会予稿集 (2003) p.352.
- [17] マジウムダール グーラブ：応用物理 **74**, 66 (2005).
- [18] 菅原良孝：電気学会誌 **125**, 25 (2005).