

フジサンケイ ビジネスアイ賞

ダイヤモンド半導体特有の負の電子親和力を利用した
超高耐圧高効率小型真空パワースイッチの研究開発

- 1: 独立行政法人産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門
- 2: 独立行政法人物質・材料研究機構ワイドバンドギャップ半導体
- 3: 東京大学大学院工学研究科

竹内 大輔¹ 小泉 聡² 八井 崇³ 牧野 俊晴¹
加藤 宙光¹ 小倉 政彦¹ 大串 秀世¹
大橋 弘通¹ 山崎 聡¹

1. 緒言

ダイヤモンド半導体の特長を利用した真空を用いた高耐圧パワースイッチを作製し、動作実証に世界で初めて成功した。これは、真空管で固体素子同様のパワースイッチングが可能であることを世界で初めて実証したことを意味している。実験結果から、理論的に従来の10分の1の大きさで、100kV以上で99.9%の効率が得られる大電力変換装置が可能になる。将来、日本近海の洋上風力エネルギー導入や日本列島間での効率的な送電などを行う際に、この技術を利用することで、新しいエネルギー戦略に貢献することが期待できる。

研究開発の背景

地球温暖化対策から端を発し、東日本大震災を契機に、日本のみならず世界の電力エネルギー戦略は、再生可能エネルギー利用に大転換し加速してきた。[1] 社会インフラを支えるベース電力の安定供給に資する再生可能エネルギーとして、洋上風力発電所を建設することが提案されている。

NEDO 平成20年度「洋上風力発電実証研究F/S評価」報告書(概要版)によれば、例えば沖合30km内の大陸棚(水深200m以内)に建設可能な洋上風力発電所の発電能力は1,200GWと報告されている。[2] 発電設備の年間稼働率が10%としても、1,020,000GWhの風力エネルギーが利用可能となる。これは、石油換算量26,000万kLに相当し、日本の年間石油輸入量25,000万kLに相当する。

しかし海底ケーブルで交流送電を実施すると、海水は大きな抵抗となり、損失が大きすぎる。[3] また、図1によれば、洋上風力発電に適した風況は、北海道・東北沖合と、九州南部沖合に集中し、消費地域から遠い。[2]

したがって、洋上の遠隔地で再生した電力を国内の消費地域に有効に送電するためには、高電圧で直流送電する必要がある。図2によれば、600~800kmを超えると経済性から、また300kmを超えると電力損失の点から交流送電よりも直

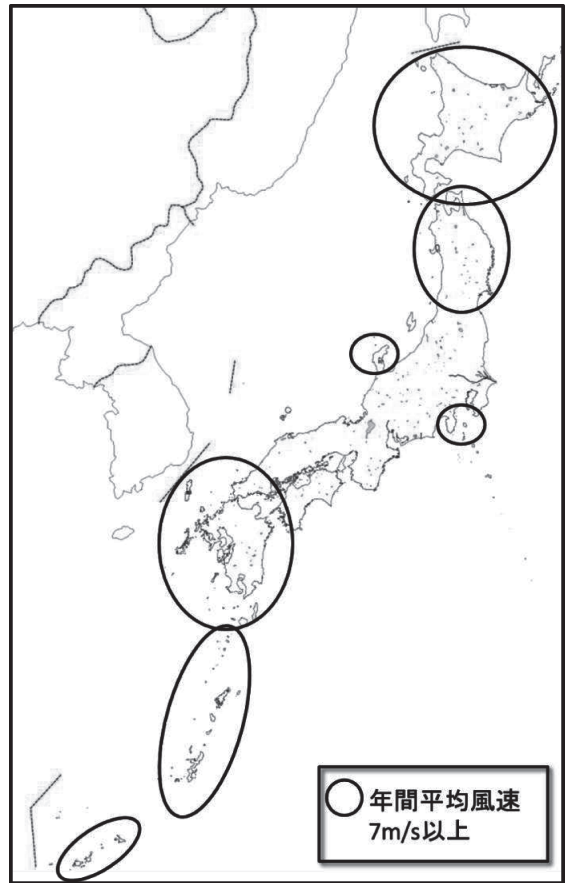


図1 日本周辺沖合30km内の風況マップ(文献[2]より著者らが作製) ○は、周辺沖合30kmで年間平均風速7m/s以上の水域がある地域

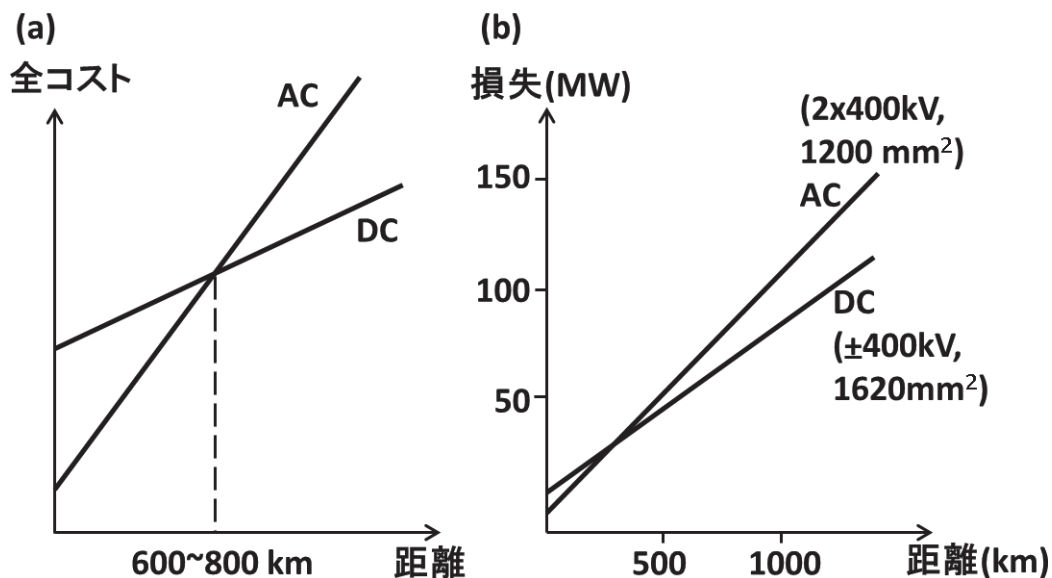


図2 (a) 直流送電(DC)と交流送電(AC)の設備費用と(b) 電力損失の距離依存(文献 [3] から著者らが作製) 縦軸の切片は、送電端の設備に要する値

流送電が有利になると見積もられている。[3]

このため、洋上風力発電所周囲や海底送電ケーブル端、さらに日本全体で電力を有効に利用(電力融通)できる新しい送配電網のいたる所に、100kV以上の直流を自在に扱える遮断器を含む超高耐圧小型大電力変換装置(パワースイッチの組み合わせ)が多数必要となる。

従来このような超高圧直流電力を扱うパワースイッチとして、図3のようなシリコン光サイリスタバルブが稼働しているが、空気絶縁破壊を避け、多数の素子を直列接続するため3~5階建てビルのような巨大な装置となり、また冷却設備も同様の巨大な建屋が必要であり、本格的な普及の障害になっている。空気絶縁破壊に対する課題は技術的に本質的な課題であり、材料物性の枠を超えた問題である。

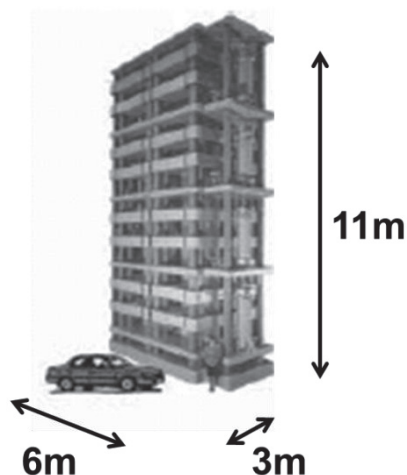


図3 電力融通用に用いられている 250kV シリコン光サイリスタバルブ(文献 [4] より著者らが作製)

2. 超高耐圧高効率小型真空パワースイッチ

真空は優れた絶縁体であるため、図3の高さを10分の1以下にコンパクトに設計可能である。[4,5] また、電子の動きを邪魔しないため、電子源から十分な電子放出が自由に得られれば、わずかな電圧でも電流がよく流れる。そのため、電子放出をしない「オフ」状態と、電子放出を伴った「オン」状態を利用してアクティブスイッチを構成することができ(図4)、さらに真空中では電子を固体内よりも速く動かせるため、高速でのオン・オフが期待できる。

負の電子親和力

真空をパワースイッチに利用するには、真空中に高効率かつ低電圧で大電流を流すための理想的な電子源を実現する材料が必要である。従来の真空管の電子源であるフィラメントは、大電流を素早くオン・オフすると切れてしまい、信頼性、効率、応答性の面から、真空パワースイッチに使用できない。この問題を解決するために、我々は真空への電子源の材料にダイヤモンド半導体を採用した。

まずダイヤモンドの表面を水素原子で覆うと、外の真空よりもダイヤモンド中の自由電子のエネルギー位置が高くなり、真空中に自由に電子が飛び出すことができる「負の電子親和力」を持つ面となることを、実験で実証した。[6,7] 図5に光を照射した際に出てくる光電子放出の強度を照射した光の強度で規格化したスペクトル(全光電子放出率分光スペクトル)を示す。試料はCVD法で作製した単結晶P形およびN形ダイヤモンド半導体薄膜試料で、表面を水素終端したものをを用いた。いずれの試料からも、4.4eVからほぼ一致したスペクトルが観測された。一方、ダイヤモンド半導体のバンドギャップ5.5eV近傍では、P形は光電子放出率の強度が桁で上昇していく一方、N形ではそれが観測されなかった。

この結果は、単純化すれば図6のエネルギーバンド構造で説明できる。実験結果より、水素終端したダイヤモンド薄膜表面では、4.4eV以上の光励起による価電子帯からの遷移およ

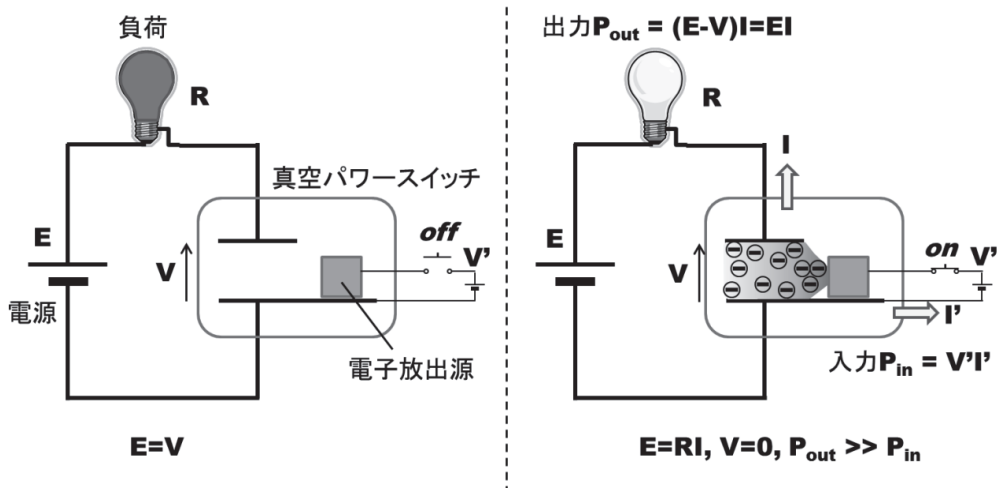


図4 アクティブな真空パワースイッチの動作原理概念図

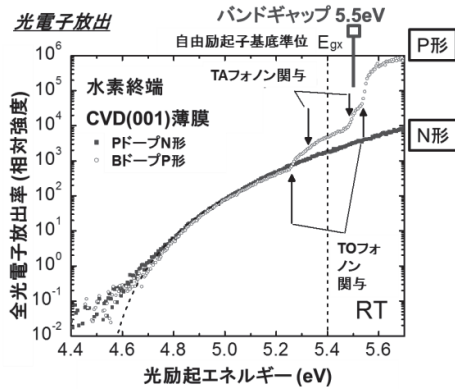


図5 水素終端した単結晶 P 形および N 形ダイヤモンド半導体薄膜試料表面からの全光電子放出率分光スペクトル

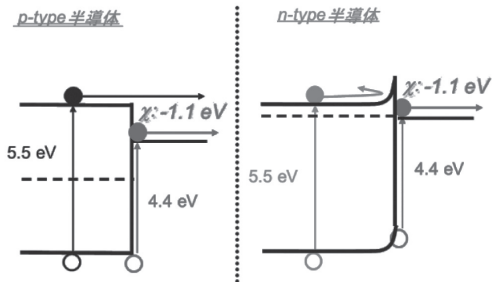


図6 図5の結果から得られたエネルギーバンド図。水素終端ダイヤモンド半導体表面は負の電子親和力($\chi = -1.1\text{eV}$)を持つ

び光電子放出が可能である。つまり、表面準位の伝導帯がバンドギャップ中に下がっており、真空準位から結晶の伝導帯を差し引いた電子親和力は -1.1eV で負の値となった。したがって P 形の場合、結晶内部でバンドギャップ (間接遷移型: 5.5eV) あるいはそれ以上のエネルギーで励起された自由電子は、数 μm 以上の深さから真空中にそのまま出ることができる。[8]

一方 N 形の場合、上記の表面準位の伝導帯がバンドギャップ中に存在し、熱平衡状態で電子が表面に捕獲され、イオン化したリンドナーが残るため、表面に上向きのバンド湾曲が生じ、結晶内部からの自由電子の放出が妨げられる。この結果は、第一原理計算によっても支持されている。[9]

同様の実験から、ダイヤモンド半導体の水素終端による負の電子親和力は、水素原子と炭素原子の強い共有結合で安定化しており、大気中でも安定であり、真空中では 800°C の高温まで安定していることも確認できた。[10,11]

負の電子親和力を利用した P(I)N ダイオード形電子源

先の実験から、水素終端 N 形ダイヤモンド半導体は負の電子親和力を持つが、そのままでは結晶内部からの自由電子の放出が得られないことがわかった。一方、P 形には自由電子がほとんど存在しない。そこで、共同研究者の小泉は N 形から P 形へ電子を注入できる PN ダイオードを作製し、全体を水素処理しオンすると、電子放出が起こる現象を発見した。[12] しかし、N 形ダイヤモンドの室温での自由電子の量が少なく電流はわずかであり、この段階では高耐圧真空スイッチとしての動作の検証は困難であった。[13,14]

そこで、ホウ素を添加した P 層とリンを高濃度に添加した N+ 層との間に、不純物の混入を極力低くした真性形の層 (I 層) を入れた PIN 接合形のダイヤモンドダイオードを開発し、電子放出源を作製した。N+ 層からは室温でも多くの電子を I 層に注入でき、電気的に中性となることから正孔も多く入り、抵抗がほぼゼロになるので、全体として大電流を流せるダ

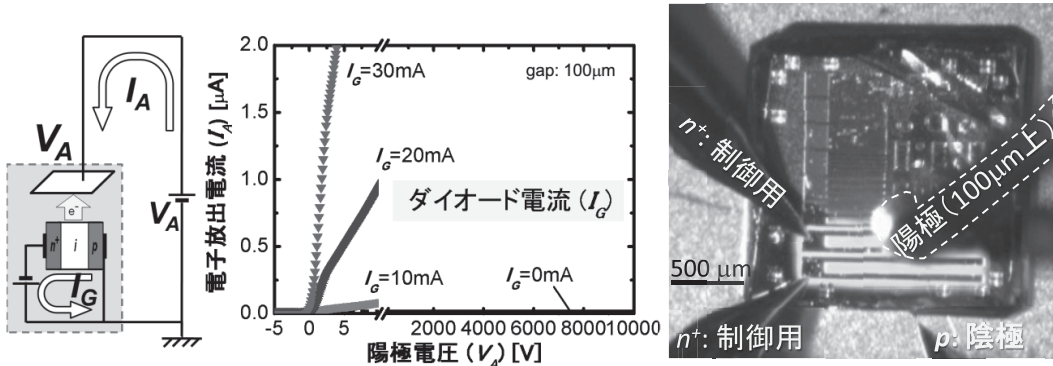


図7 真空パワースイッチの電子放出特性(左)と動作の様子(右)

イオード形電子放出源が開発できた。[15-17]

そして、このダイオードの真上から約 $100\mu\text{m}$ 離れたところに陽極を置いて、真空パワースイッチとしての検証を行った(図7)。ダイオードがオフ($I_G=0\text{mA}$)のままであれば、真空は絶縁体として働くため、真空パワースイッチはオフ状態となって、陽極電圧を 10kV までかけても全く電流は流れない。一方、ダイオードに電圧をかけてオンにすると、ほぼ 0V 付近から電子放出電流が立ち上がって真空パワースイッチがオン状態になることを確認した。[18]

さらに詳細に動作を確認するために 10kV 高圧回路に組み込んでダイオード入力のオン・オフを行い、出力となる高圧回路側の電流と、負荷にかかる電圧の変化を測定した(図8)。ダイオードをオンにすると、負荷にほぼ 10kV の電圧が加わるまで 10kV 高圧回路に電流が流れ、 73.7% の電力伝達効率が確認できた。[19] これは、真空管で固体素子同様のパワースwitchングが可能であることを世界で初めて実証したことを意味している。

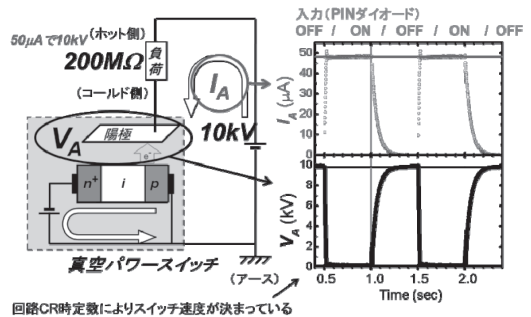
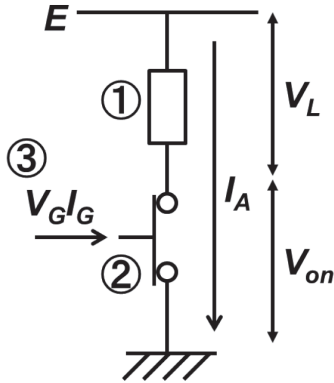


図8 出力となる 10kV 高圧回路側の電流 (I_A) と負荷の低電圧側電圧 (V_A) の変化。PINダイオードのオン・オフによって 10kV 回路のオン・オフが制御ができ、真空パワースイッチの動作実証(効率 73.7%)に世界で初めて成功した。[18]

真空パワースイッチの可能性

真空パワースイッチの電力伝達効率(ξ)は、①負荷で消費される電力、②スイッチでの損失電力、③スイッチを駆動するための電力、が関与し、図9の式で与えられる。ここで、 E は電源電圧、 I_A は高圧主回路を流れる電流、 V_L は負荷での電圧降下、 V_{on} は真空ギャップに残るオン電圧、 V_G はダイオード駆動電圧、そして I_G は駆動電流である。なお、MOSFETやIGBTなどでは③がほぼ無視できるため、 V_{on} と E の比だけで効率が議論できる。



$$\begin{aligned} \text{効率}\xi &= \frac{\text{①}}{\text{①}+\text{②}+\text{③}} \\ &= \frac{V_L I_A}{(V_L + V_{on})I_A + V_G I_G} \\ &= \frac{V_L \eta}{(V_L + V_{on})\eta + V_G} \\ &= \frac{1 - A_{lr}}{1 + \frac{1}{\eta g_v}} \end{aligned}$$

$$\text{電子放出効率}\eta = \frac{I_A}{I_G}$$

$$\text{電圧利得}g_v = \frac{E}{V_G}$$

$$\text{陽極損失比}A_{lr} = \frac{V_{on}}{E}$$

図9 真空パワースイッチの効率の定義

実験で $V_{on} \sim V_G$ と近似でき、図9の式から計算して得られた効率のカウンタープロットが図10である。横軸は電力利得を、縦軸は電子放出効率を、それぞれ対数でプロットしている。○が今回の実験結果であり、今後の可能性を星印(☆)で表している。今回10kVであったが、同じ電子源を100kVで使用すれば、電圧利得が一桁上がり、○から右にある☆となって、効率は94%を超える。

さらに、現在、実験で得られている個々の変数の最適値が同時に得られる電子源を100kVで使用すれば、右上方の☆に到達し電力伝達効率99.9%を超える設計が可能であることを示している。[18] 真空を用いることで、多段直列接続を用いることなく、このような100kV以上の耐圧設計が十分可能であることは、従来の固体素子のパワースイッチに比べて大きな優位性になっている。

発熱対策の要請を考慮してオン時の電流密度が $0.1 \sim 1\text{A}/\text{cm}^2$ であっても、1m角で100kV以上で使用したならば $0.1 \sim 1\text{GW}$ の能力となり、発電所レベルの電力規模が扱える。今後、効率の確認、並列化による電流の大電流化を進め、フィールド実験を目指す。

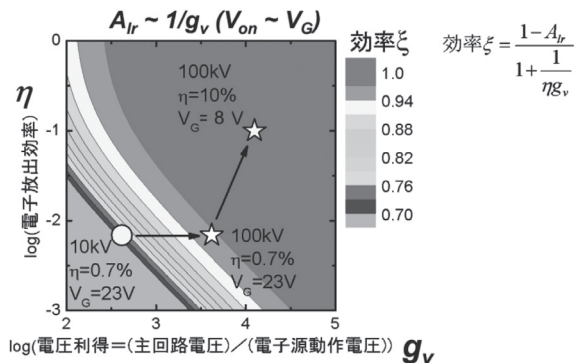


図10 真空パワースイッチの効率の計算結果と目標。
○今回得られた結果、☆今後の可能性

新しいダイヤモンド半導体加工技術

今後さらなる高効率を実現するためには、ダイヤモンドの電子放出面の表面平滑化が重要となる。ダイヤモンドは最も硬く、電子デバイスとするためにドライエッチングにより立体構造とする必要があるため、平滑化が不可能である。上記問題を解決するために、共同研究

者の八井は、近接場光とナノ材料との相互作用において、光子エネルギーの上方変換が可能となる独自の技術を基に原子オーダーで平坦化が可能な近接場エッチング技術を開発した。本技術を用い、ダイヤモンド研磨基板の原子レベルでの平坦化に成功した。これまでに、平面基板の表面平坦化のみならず、メサ構造側面に対しても平坦化が可能であることを見出した(図11) [20,21]。これら世界に先駆けた独自の技術を組み合わせ、半導体グレードの加工プロセスが前進している。

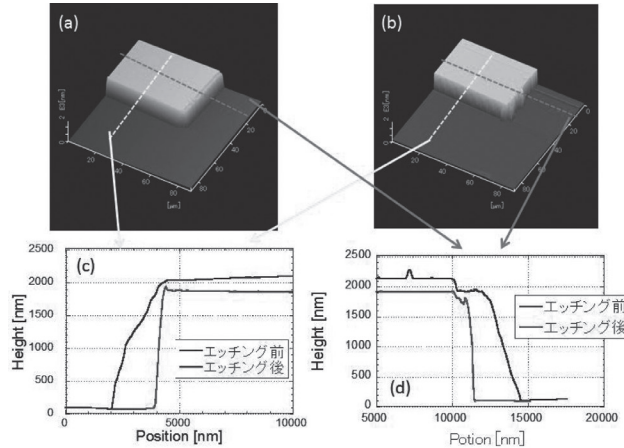


図11 ダイアモンドメサ構造の近接場光エッチング結果。AFM像:エッチング(a)前、(b)後。(c),(d)断面図

4. まとめと今後の展開

ダイヤモンド半導体の特長を利用した真空を用いた高耐圧パワースイッチを作製し、10kVの電圧でパワースイッチとして機能することに世界で初めて成功した。これは、真空管で固体素子同様のパワースイッチングが可能であることを世界で初めて実証したことを意味している。今回の実験結果から100kV耐圧以上の真空パワースイッチを作れば、理論的に従来の10分の1の大きさの大電力変換装置が可能になる。

将来、日本近海の洋上風力エネルギー導入や日本列島間での効率的な送電などを行う際に、この技術を利用することで、新しいエネルギー戦略に貢献することが期待できる。

謝辞

本研究の一部は、戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発(ALCA) 開発課題名:「超高耐圧高効率小型真空パワースイッチ」、平成20年度 NEDO 産業技術助成事業、科研費21360174、および(独) 産業技術総合研究所 IBEC の助成、補助、および支援を受けて実施された。また、本研究のPIN 接合ダイオード製作の一部は、JST 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究(CREST)における研究課題「超低損失パワーデバイス実現のための基盤構築」(研究代表者:山崎 聡 産業技術総合研究所 総括研究主幹)らの協力を受けた。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁エネルギー白書2012 第3部第3章第1節 <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2012energyhtml/3-3-1.html>
- [2] NEDO「平成20年度洋上風力発電実証研究 FS 評価 (概要版)」, https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/koubo/FF/nedokouboplace.2008-04-04.6171450844/nedokoubo.2009-05-19.6002628242/5e736210205e745ea6FS5831544a66f8_698289817248.pdf
- [3] L. Paris, G. Zini, M. Valtorta, G. Manzoni, A. Invernizzi, N. de Franco, A. Vian, CIGRE 1984 Session 37-12.
- [4] M. Nakamoto, K. Fukuda, " Highly Integrated Field Emitter Arrays Fabricated by Transfer Mold Technique" , Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 3611.
- [5] T. Ono, T. Sakai, N. Sakuma, K. Nakayama, and H. Ohashi, Proc. ISPSD'98 (1998) 151.
- [6] D. Takeuchi, H. Kato, G. S. Ri, T. Yamada, P. R. Vinod, D. Hwang, C. E. Nebel, H. Okushi, and S. Yamasaki, Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 152103.
- [7] D. Takeuchi, C. E. Nebel, and S. Yamasaki, Phys. Stat. Sol. A **203** (2006) 3100.
- [8] T. Teraji, S. Yoshizaki, S. Mitani, T. Watanabe, T. Ito, J. Appl. Phys. **96** (2004) 7300.
- [9] S. J. Sque, R. Jones, and P. R. Briddon, Phys. Rev. B **73** (2006) 85313.
- [10] D. Takeuchi, M. Riedel, J. Ristein, and L. Ley, Phys. Rev. B **68** (2003) 041304(R).
- [11] D. Takeuchi, C.E. Nebel, and S. Yamasaki, Diamond Relat. Mater. **16** (2007) 823.
- [12] S. Kono and S. Koizumi: e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. **7** (2009) 660.
- [13] S. Koizumi, M. Kamo, Y. Sato, H. Ozaki, and T. Inuzuka, Appl. Phys. Lett. **71** (1997) 1065.
- [14] H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, and H. Okushi, J. Phys. D: Appl. Phys. **40** (2007) 6189.
- [15] T. Makino, K. Yoshino, N. Sakai, K. Uchida, S. Koizumi, H. Kato, D. Takeuchi, M. Ogura, K. Oyama, T. Matsumoto, H. Okushi, and S. Yamasaki, Appl. Phys. Lett. **99** (2011) 061110.
- [16] D. Takeuchi, T. Makino, H. Kato, H. Okushi, and S. Yamasaki: Phys. Stat. Sol. A **208** (2011) 2073.
- [17] K. Oyama, S-Gi Ri, H. Kato, M. Ogura, T. Makino, D. Takeuchi, N. Tokuda, H. Okushi, and S. Yamasaki, Appl. Phys. Lett. **94** (2009) 152109.
- [18] D. Takeuchi, T. Makino, H. Kato, M. Ogura, H. Okushi, H. Ohashi, and S. Yamasaki, Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 090113.
- [19] D. Takeuchi, S. Koizumi, IEDM2012, IEDM Technical Digest 7-6 (2012) 167.
- [20] T. Yatsui, K. Hirata, Y. Tabata, Y. Miyake, Y. Akita, M. Yoshimoto, W. Nomura, T. Kawazoe, M. Naruse, and M. Ohtsu, Appl. Phys. B- Lasers and Optics, **103** (2011) 527.
- [21] T. Yatsui, W. Nomura, M. Naruse, and M. Ohtsu, J. Phys. D, **45**, (2012) 475302.

関連の報道事例

1. IEDM2012 press kit, tip sheet (highlight) pp.5-6, 電子版
http://www.btbmarketing.com/iedm/releases/2012_tip-sheet.pdf
2. プレスリリース「真空を利用したパワースイッチを開発 - ダイヤモンド半導体を使うことにより世界で初めて成功 -」((独) 科学技術振興機構) <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20121209-2/index.html>, ((独) 産業技術総合研究所) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20121210/pr20121210.html, ((独) 物質・材料研究機構) <http://www.nims.go.jp/news/press/2012/12/p201212090.html>
3. 化学工業日報「パワースイッチ 真空用い高耐圧実現 ダイヤモンド半導体利用」(2012年12月11日)
4. マイナビニュース「IEDM 2012 - NIMS など、ダイヤモンド半導体を利用したパワースイッチを開発」電子版
<http://news.mynavi.jp/news/2012/12/11/083/index.html>
5. 日刊工業新聞「真空パワースイッチ ダイヤ半導体利用 10キロボルト動作実証」(2012年12月12日)
6. 日経産業新聞「産総研が真空スイッチ 電力変換装置を小型化」(2012年12月14日)
7. (独) 科学技術振興機構(JST) 事業成果 電子版(トップページリンク)
<http://www.jst.go.jp/seika/index.html>