

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 1月31日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2010

課題番号：19106006

研究課題名（和文） 高密度正孔ガスを利用したダイヤモンド高出力ミリ波トランジスタ

研究課題名（英文） Development of High Power and Millimeter-long Wave Diamond Transistors Using Two Dimensional Hole Gas

研究代表者

川原田 洋（KAWARADA HIROSHI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90161380

研究成果の概要（和文）：

ダイヤモンドは降伏電界が半導体中最も高く、物質中最高の熱伝導率をもち、従来の半導体で不可能であった高出力高周波デバイスや低損失電力素子が期待される。本研究では、ダイヤモンド電界効果トランジスタ（FET）の性能を表面やバルクでの異種原子制御より向上させ、ミリ波帯で動作する高周波デバイスや超伝導ダイヤモンドを利用した新機能デバイスの開発を行った。この結果、現在の半導体でのFETの最大級の電流密度1A/mmを達成し、ミリ波帯に入る50GHz近くでの動作およびSiおよびGaAs等の従来の半導体を越えるGHz帯での高い電力制御を可能とした。400°Cでの高温動作も可能とした。また、ダイヤモンド超伝導を利用したジョセフソン接合でテラヘルツ帯の特性振動数を得た。

研究成果の概要（英文）：

Metal oxide semiconductor field effect transistors (MOSFETs) have been fabricated on diamond exhibiting high current, high frequency and high temperature performance. The maximum drain current density is above 1 A/mm and the highest transconductance is 400 mS/mm. These values are comparable to those of modern FETs made of Si or III-V semiconductors. Regarding RF performance, the highest cutoff frequency reaches nearly 50 GHz. The power handling capability exceeds those of Si and GaAs at 1 GHz. The operation temperature of diamond MOSFETs increased to be 400°C indicating the stable operation of diamond transistor. Josephson junction devices composed of superconducting diamonds show the junction characteristic frequency in THz region.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	32,000,000	9,600,000	41,600,000
2008年度	22,700,000	6,810,000	29,510,000
2009年度	14,900,000	4,470,000	19,370,000
2010年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
年度			
総計	78,600,000	23,580,000	102,180,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：電子デバイス

1. 研究開始当初の背景

① 研究の学術的背景

移動体通信の基地局、光通信の中継、高速LAN、車載レーダーには高出力高周波送信用およびスイッチング用電界効果トランジスタ(FET)が不可欠である。これらは世界の単体市場で年間数千億円となり、数兆円におよぶ市場全体の成否を握る最重要デバイスである。ハイパワー送信およびスイッチングアンプなどの高周波高出力用途において近い将来SiやGaAsは、素子の微細化と破壊電界の関係から出力電力密度が限界(1W/mm程度)となるため、SiC、GaN、ダイヤモンドなどのワイドバンドギャップ半導体の実用化が急務である。SiC FETの遮断周波数は20GHzが最高で、AlGaN/GaN系FETでは遮断周波数が100GHz程度あるが、発熱の問題がある。これらはnチャンネルFETであり、pチャンネルFETの開発は進んでいない。従ってスイッチングアンプに必要なハイパワー相補型FETは実現されていない。ダイヤモンドは、正孔移動度が最も高く、pチャンネルFETとして優れ、ブレークダウン電界はSiCやGaNの数倍、熱伝導率はSiCの4倍、GaNの15倍である。化合物半導体で問題となる反位相境界やポリタイプがないため、ダイヤモンド・エピタキシャル層の欠陥密度は近年著しく減少している。ダイヤモンド半導体の研究は世界各国で行われているが、本研究開始時点で10-20GHzでのFET高周波動作は研究代表者のグループの他、ドイツ・ウルム大学、NTT物性科学基礎研究所の世界で三箇所であった。ウルム大学とNTTは、研究代表者らが独自開発したダイヤモンド2次元正孔表面チャンネルFETを元にデバイスを作製している。

2. 研究の目的

本研究では、申請代表者が先駆的に開発した2次元正孔ガスによる表面p型蓄積層を利用したダイヤモンドpチャンネルFETを基礎に、以下の目的で研究を実施した。

- (1)新たなヘテロ界面創出による2次元正孔ガスのキャリア密度および移動度を向上させる。
- (2)FET構造最適化により高耐圧、高周波、耐環境における性能の向上等を行い、実用に耐える高出力・高周波でのデバイス動作を検討する。
- (3)高濃度ボロンドーパ層での超伝導を利用したジョセフソン接合やゼロ抵抗ソース・ドレインFET等の斬新なデバイス開発を行う。

具体的には

(1-1) 解明されつつある水素終端表面の正孔蓄積層の生成機構を基に、表面吸着イオンによるキャリア散乱を抑制する表面処理技術およびヘテロ構造を提案し、高移動度、高速2次元正孔ガス層を形成する。移動度とキャリア密度の向上技術を開発し、 $3k\Omega/\text{sq}$ 以下の低抵抗領域を形成する。

(1-2) ダイヤモンド上への高品質ゲート絶縁膜(高誘電率・高耐圧)形成技術を確認し、各種ゲート絶縁膜とダイヤモンド界面におけるダイヤモンドチャンネル移動度の相関を明らかにする。

(2-1) ゲート長 $0.1\mu\text{m}$ のセルフアライン・ダイヤモンドMOSFET作製プロセスを開発し、トランジスタの性能指標である相互コンダクタンスを $200\text{mS}/\text{mm}$ 以上、最大ドレイン電流を $1\text{A}/\text{mm}$ 以上にまで上昇させる。これにより数10GHzの高周波において動作するダイヤモンドFETを開発する。

(2-2) ダイヤモンドへの不純物ドーピングで問題となる高い活性化エネルギーの回避のため、デルタドーピング技術を開発し、デルタドーパチャンネルによるFET構造を開発する。

(2-3) フィールドプレート耐圧構造等を利用し、数100V以上のソース・ドレイン耐圧を得る。以上より高出力高周波ダイヤモンドFETのプロトタイプを作製する。

(3-1) ダイヤモンドはボロン濃度 10^{21}cm^{-3} 以上で(10K付近)超伝導状態になるため、超伝導層(S)と常伝導層(N)で挟んだSNS構造とそれをソース・ドレイン領域に適用したダイヤモンドFETを開発する。

3. 研究の方法

本研究は、結晶成長、ドーピング、トランジスタ作製、トランジスタ評価、高周波測定と、一連の高周波トランジスタ作製評価を一貫して行い。同時に、超伝導測定および超伝導デバイス評価を行い、連携して、新型ミリ波デバイスや超伝導トランジスタに発展させている。各研究者、大学院学生の努力と貢献により、研究は全体として順調に進捗した。

4. 研究成果

(1) **新たなヘテロ界面創出による2次元正孔ガスのキャリア密度および移動度の向上**

① **水素終端(110)面および(111)面での高キャリア密度と低いシート抵抗の達成**

ダイヤモンドは本来絶縁体であるが、高純度結晶を水素原子で終端すると表面近傍に正孔が蓄積する。(001)面ではキャリア面密度で 5×10^{12} - $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ あり、Si MOSFETの反転層($\sim 10^{12} \text{cm}^{-2}$)より高く、AlGaA/GaN界面の二次元電子ガス(2DEG)と同程度である。高周波ダイヤモンドFETはこの正孔蓄積層をソース、ドレイン、チャネルに利用している(図1左側)。我々は表面キャリア誘起がC-H双極子の分極から生じるモデルを提唱している(図1右側)。今回、(110)面および(111)面の利用で、チャネル表面のC-H双極子モーメント密度を20-30%、(001)に比べ上昇させたところ、キャリア面密度が2倍以上($2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上)増加し、シート抵抗が3-4k Ω/sq (目標値3k Ω/sq)と50%以上減少した(論文2,10,18,20)。期待以上のシート抵抗減少で、高性能FET開発に結びついた(論文2,10,18,20)。

② 水素終端FETの400°C高温動作

原子層堆積法(ALD)法にてダイヤモンド表面でのゲート絶縁膜 Al_2O_3 形成技術を開発した。トリメチルアルミ(TMA)分子と水分子との交互供給にて、 Al_2O_3 が水素終端ダイヤモンド上に形成された。450°Cと高温成膜にも関わらず、ダイヤモンド表面チャネルとなるC-H結合で形成される表面を維持出来た。C-H結合は、C-C結合、C-O結合よりも結合エネルギーが高く、安定と言える。この結果、550°Cでも二次元正孔蓄積層が維持され、10k Ω/sq 以下の低いシート抵抗と移動度100 cm^2Vsec を得た(論文1)。このような高温での正孔蓄積層は初めてで、自動車等で実用価値のある400°CでのパワーMOSFET高温動作に成功した(図2、新聞発表1)。

③ TiC浅オーミック接合の形成と最終工程での水素化

熱的に安定なオーミック接合形成に浅い($\sim 3\text{nm}$)TiC形成を行い、 $10^{-7} \Omega\text{cm}^2$ 台の低コンタクト抵抗を実現した。この浅い接合は、International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 2012-2016を十分に満たすナノデバイス技術である(論文8)。また、ソース・ドレインをTiCで形成後にゲートを形成し、最後に水素終端表面を作成する全く新しいダイヤモンドMOSFET製造プロセスを開発した(論文8)。これよりデバイスプロセスの設計マージンが大幅に向上した。

④ ダイヤモンド水素終端表面のショットキー障壁形成機構の解明

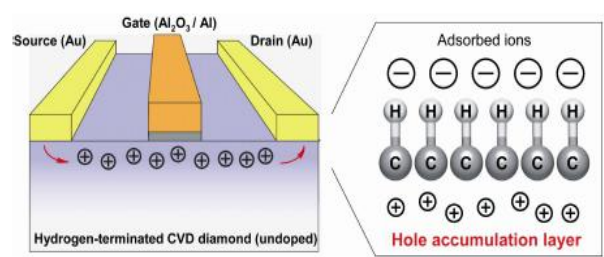


図1 水素終端ダイヤモンド表面チャネル(p型蓄積層) MOSFET (左側)とC-H双極子によるキャリア誘起モデル(右側)。

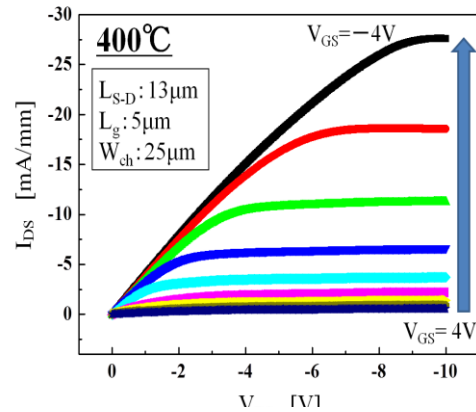


図2 保護膜とゲート絶縁膜を Al_2O_3 で形成した水素終端ダイヤモンドFETの400°C動作。

水素終端ダイヤモンド表面のp型蓄積層は、金属/半導体界面の形成により、面キャリア密度が変動し、実効的な接触面積が変化し、真のショットキー接合高さの測定が困難であった。即ち、金属/ダイヤモンド界面の正確なモデルが不明のままであった。今回、接触面積情報なしで正確な障壁を求める測定法にて、各種金属で精密測定した(論文11)。この結果を基に界面双極子、負性電子親和力、界面電荷の影響を定量的考慮した金属誘起準位モデルにて、金属/水素終端ダイヤモンド界面の精密な障壁モデル形成に成功している(論文11)。金属半導体(MES)FETやMOSFETの性能向上に重要な指針となった。

⑤ 電気2重層容量によるFET評価

固体液体界面の電気2重層容量(5-10 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$)は高く、この環境下でのFET特性から新しい表面終端でのMOSFETの評価を行えることがわかった(論文6,16)。これを基に水素終端の代替となる表面終端構造の探索が可能となった。窒素やカルボキシル基で終端した表面にDNA等を安定に固定し、高感度のFET型DNAセンサ(論文16,17)およびタンパク質センサ(論文6,9)等も本研究の副産物として開発した(新聞発表4,5)。

(2) FET構造最適化による高耐圧、高周波、耐環境性能向上

ドレイン電流密度 1.2A/mm
チャネル抵抗 4 Ω mm

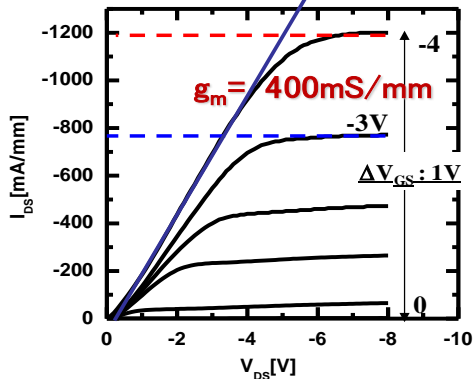


図3 ダイヤモンド p (111) チャネル MOSFET の静特性。ドレイン電流密度 1.2A/mm、最大相互コンダクタンス g_m 400mS/mm。最先端 FET レベル。

① (110)及び(111)面での高性能FET

水素終端(110)面および(111)面での高キャリア密度をソース・ドレイン・チャネルに利用したMOSFETでは最大ドレイン電流密度1.2A/mm (目標値1A/mm)、最大相互コンダクタンス400mS/mm (目標値200mS/mm) とダイヤモンドで最高で、シリコンや化合物半導体の先端FETに匹敵する値を記録した (図3、論文2、新聞発表2)。電流駆動能力の上昇を、高電界下での軽い正孔から重い正孔への遷移が(111)面では抑制され、移動度低下が起きないことで説明した (論文10)。

② 遮断周波数の向上 上記の高いドレイン電流密度、相互コンダクタンスより、

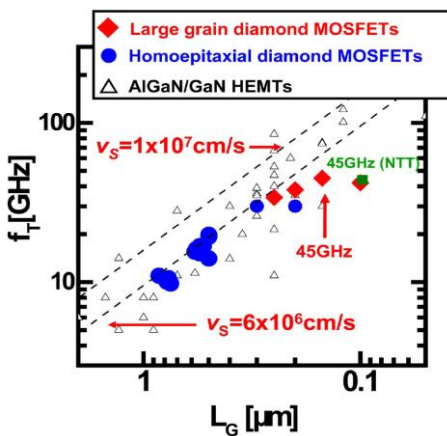


図4 ダイヤモンド p チャネル MOSFET の遮断周波数のゲート長依存性。飽和速度は 6×10^6 cm/sec。最大遮断周波数 45GHz。

(001)面では最高20GHzで止まっていた遮断周波数が (110)面において45GHzまで上昇した (論文2,18,20)。ダイヤモンドMOSFETでは最高値である。飽和速度は 6×10^6 cm/secであり、ダイヤモンドの正孔飽和速度の理論値 1×10^7 cm/secに近づいた (図4、論文2)。

③ デルタ(δ)ドーピング構造 ボロンδドーピングチャネル(厚み1-3nm)を(111)面で作製し、駆動能力の高いδドーピングFETを開発した (論文4,5)。

④ Al₂O₃フィールドプレート 高耐圧化用フィールドプレートの基礎となる安定なAl₂O₃/ダイヤモンド界面の形成に成功し (論文1)、MOSFETで耐圧300Vが得られ、高出力高速FETへの見通しを得た (投稿中、新聞発表1,2)。

(3)高濃度ボロンドープp型層での超伝導を利用したダイヤモンド超伝導FET等の斬新なデバイス開発

① SNSジョセフソン接合

超伝導層/非超伝導層/超伝導層(SNS)を縦型 (論文3) あるいはプレーナ構造 (図5) で形成し、ダイヤモンドジョセフソン接合形成に世界で初めて成功した (論文3)。マイクロ波応答でのシャピロステップの観測よりジョセフソン接合形成を確認した。プレーナ構造 (図5) では臨界電流 I_C と常伝導接合抵抗 R_N の積 ($I_C R_N$ 積, 16mV@2K) がMgB₂よりも高く、特性振動数 ($2eI_C R_N/h$) は数THzとなり、超高周波受信素子として期待される。

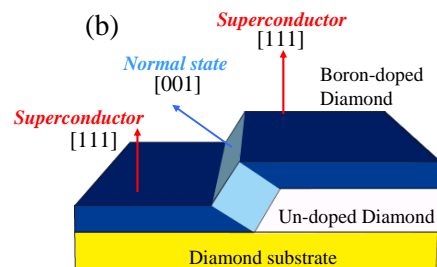
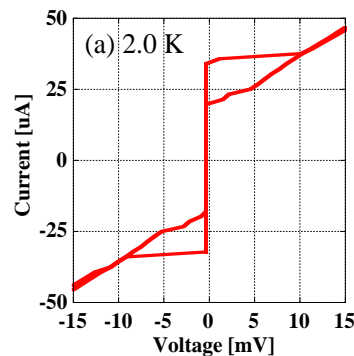


図5 プレーナ構造ジョセフソン接合。(a)接合特性。 $I_C R_N$ 積 16mV。(b) [111]方向と[001]方向の成長時のボロン導入比 10:1 を利用し、SNS 接合を形成。

③ 超伝導基礎物性と超伝導FETの基本構造

ボロンドープダイヤモンド超伝導の基礎物性に関し、超伝導転移の臨界ボロン濃度 ($3 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$) と臨界キャリア濃度 ($4 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$) (論文 7)、価電子帯構造 (論文 12,15)、超伝導ギャップ (論文 13,19)、ボロンの結合状態 (論文 15) 等に関する基礎データを集積した。ホモエピタキシャル層 200nm 以下は、圧縮面応力下の無欠陥領域であり (論文 7)、この領域で再現性よくゼロ抵抗温度 $T_c 10\text{K}$ が観測されることが分かった。この層を利用して、ジョセフソン接合技術を組み合わせ、超伝導 FET の基本構造が形成された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (総計 41 件から 20 件抜粋)

- ① A. Hiraiwa, A. Daicho, S. Kurihara, Y. Yokoyama, and H. Kawarada, "Refractory two-dimensional hole gas on hydrogenated diamond surface," J. Appl. Phys. 査読有 **112**, 124504/1-6 (2012).
- ② H. Kawarada, "High Current MOSFETs on H-terminated Diamond Surfaces and Their High Frequency Operation" Jpn. J. Appl. Phys. 査読有 **51**, 090111/1-6 (2012).
- ③ M. Watanabe, R. Nomura, R. Kanomata, S. Kurihara, A. Kawano, S. Kitagoh, T. Yamaguchi, Y. Takano, H. Kawarada, "Vertical SNS Weak-Link Josephson Junction Fabricated from Only Boron-Doped Diamond", Phys. Rev. B 査読有, **85**, 184516/1-5 (2012).
- ④ R. Edgington, S. Sato, Y. Ishiyama, R. Morris, R. B. Jackman and H. Kawarada, "Growth and electrical characterization of δ -doped boron layers on (111) diamond surfaces," J. Appl. Phys. 査読有, **111**, 033710/1-7 (2012).
- ⑤ R. Edgington, A. R. Ruslinda, S. Sato, Y. Ishiyama, K. Tsuge, T. Ono, H. Kawarada, and R. B. Jackman, "Boron δ -doped (111) diamond solution gate field effect transistors.," Biosensors and Bioelectronics 査読有, **33**, 152-157 (2012).
- ⑥ H. Kawarada and A. R. Ruslinda "Diamond electrolyte solution gate FETs for DNA and protein sensors using DNA/RNA aptamers" Phys. Status. Solidi A 査読有, **208**, 9, 2005-2016 (2011).
- ⑦ A. Kawano, H. Ishiwata, S. Iriyama, R. Okada, T. Yamaguchi, Y. Takano, and H. Kawarada, "Superconductor-to-insulator transition in boron-doped diamond" Phys. Rev. B 査読有, **81**, 085318/1-8 (2010).
- ⑧ Y. Jingu, K. Hiram, H. Kawarada, "Ultrashallow TiC source/drain contacts in diamond MOSFETs formed by hydrogenation-last approach" IEEE Trans. Electron Device 査読有, **57**, 966-972 (2010).
- ⑨ A. Rahim Ruslinda, S. Tajima, Y. Ishi, Y. Ishiyama, R. Edgington, H. Kawarada, "Aptamer-based biosensor for sensitive PDGF detection using diamond transistor" Biosensors and Bioelectronics 査読有, **26**, 1599-1604 (2010).
- ⑩ K. Hiram, K. Tsuge, S. Sato, T. Tsuno, Y. Jingu, S. Yamauchi, H. Kawarada, "High-performance P-channel diamond metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on H-terminated (111) surface", Appl. Phys. Express 査読有, **3**, 044001/1-3 (2010).
- ⑪ K. Tsugawa, H. Noda, K. Hirose, H. Kawarada, "Schottky barrier heights, carrier density, and negative electron affinity of hydrogen-terminated diamond" Phys. Rev. B 査読有, **81**, 045303/1-11 (2010).
- ⑫ H. Okazaki, R. Yoshida, T. Muro, T. Wakita, M. Hirai, Y. Muraoka, Y. Takano, S. Iriyama, H. Kawarada, T. Oguchi, T. Yokoya "Soft X-ray core-level photoemission study of boron sites in heavily boron-doped diamond films source", J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, **78**, 034703 (2009).
- ⑬ K. Ishizaka, R. Eguchi, S. Tsuda, A. Chainani, T. Yokoya, T. Kiss, T. Shimajima, T. Togashi, S. Watanabe, C.-T. Chen, Y. Takano, M. Nagao, I. Sakaguchi, T. Takenouchi, H. Kawarada, S. Shin, "Temperature-dependent localized excitations of doped carriers in superconducting diamond" Phys. Rev. Lett. 査読有, **100**, 166402/1-3 (2008).
- ⑭ S. Kuga, S. Tajima, J. H. Yang, K. Hiram, H. Kawarada, "Precise detection of singly mismatched DNA with functionalized diamond electrolyte solution gate FET.", IEEE IEDM 2008 (International Electron Devices Meeting) 査読有, San Francisco, December 2008 p.483-486.
- ⑮ J. Nakamura, N. Yamada, K. Kuroki, T. Oguchi, K. Okada, Y. Takano, M. Nagao, I. Sakaguchi, T. Takenouchi, H. Kawarada, R. C. C. Perera, D. L. Ederer, "Holes in the valence band of superconducting boron-doped diamond film studied by soft X-ray absorption and emission spectroscopy" J. Phys. Soc. Jpn. 査読有, **77**, 054711/1-6 (2008).
- ⑯ S. Kuga, J. H. Yang, H. Takahashi, K. Hiram, T. Iwasaki, H. Kawarada, "Detection of mismatched DNA on partially negatively charged diamond surface by optical and potentiometric methods", J. Am. Chem. Soc. 査読有, **130**, 13251-13263 (2008).
- ⑰ J. H. Yang, S. Kuga, K. S. Song, H. Kawarada, "Characterization of hybridization on diamond solution-gate field-effect transistors for detecting single mismatched oligonucleotides", Appl. Phys. Express 査読有, **1**, 11801/1-3, (2008).
- ⑱ K. Hiram, H. Takayanagi, S. Yamauchi, J. H. Yang, H. Umezawa, H. Kawarada, "Spontaneous polarization model for surface orientation dependence of diamond hole accumulation layer and its transistor performance", Appl. Phys. Lett. 査読有, **92**, 11,

- 112107/1-3 (2008).
- ⑱ T. Nishizaki, Y. Takano, M. Nagao, T. Takenouchi, H. Kawarada, N. Kobayashi "Low-temperature STM/STS studies on boron-doped (111) diamond films", J. Phy. Chem. Solids 査読有, **69**, 3027-3030 (2008).
- ⑳ K. Hirama, H. Takayanagi, S. Yamauchi, Y. Jingu, H. Umezawa, H. Kawarada, "High-performance p-channel diamond MOSFETs with alumina gate insulator", 2007 IEEE IEDM (International Electron Devices Meeting) 査読有, Washington DC, December 2007 p.873-876.

〔学会発表〕 (計 127 件)

国際会議 58 件、国内会議 69 件 (うち招待講演 13 件 (国際)、7 件 (国内))。招待講演から抜粋。

- ① H. Kawarada, (invited) "Heavily boron-doped diamond and its application to electron devices in harsh environment" International Conference on New Diamond & Nano Carbons (NDNC 2012) Puerto Rico, USA, May 20-24, 2012.
- ② H. Kawarada, (invited) "Superconducting diamond is still in progress", 22nd European Conference on Diamond, Garmisch-Partenkirchen, Germany, Sept. 3-7, 2011.
- ③ H. Kawarada (invited) "Mechanism of DNA and RNA sensing by diamond surface channel device", International Symposium on Surface Science and Nanotechnology, Japan November 9-13, 2008.
- ④ H. Kawarada (plenary) "On the mechanism of DNA and RNA precise sensing using diamond devices", 2nd conference on New Diamond & Nano Carbons, Taipei, Taiwan, May 25-30, 2008.

〔図書〕 (分担執筆 3 件から 2 件抜粋)

- ① 川原田 洋 電子情報通信学会 「知識ベース」 S2 群 2 編 ダイヤモンドデバイス (電子情報通信学会 2010)
- ② H. Kawarada 4.1.3 Diamond p. 243-248 (2007 in Wide Bandgap Semiconductors, edited by K. Takahashi, A. Yoshikawa, A. Sandhu (Springer 2007))

〔受賞〕

川原田 洋 第 11 回超伝導科学技術賞 (未踏科学技術協会) 2007 年

〔産業財産権〕

特許出願状況 (計 3 件)

- ①名称: 電力素子、電力制御機器、電力素子の製造方法
発明者: 川原田 洋、平岩 篤
権利者: 早稲田大学

出願番号: 2012-185180
出願日: 平成 24 年 8 月 24 日

- ②名称: ジョセフソン素子
発明者: 川原田 洋、高野義彦 他
権利者: 早稲田大学、(独) 物質材料研究機構
出願番号: 2009-204864
出願日: 平成 21 年 9 月 4 日
- ③名称: ダイヤモンド薄膜およびダイヤモンド電界効果トランジスタ
発明者: 川原田 洋、嘉数 誠 他
権利者: 早稲田大学、NTT 物性科学研究所
出願番号: 2009-17305
出願日平成 21 年 7 月 24 日

〔新聞報道等〕

- ① 日経産業新聞 2012 年 10 月 3 日 「人工ダイヤモンド 使い 400℃耐熱トランジスタ」
- ② 半導体産業新聞 2012 年 1 月 25 日号 p. 10 「究極の半導体」を目指して 「世界最高性能のダイヤモンド FET 開発」
- ③ 電子ジャーナル 2011 年 8 月号 p. 90-91 超低損失電力トランジスタの研究開発
- ④ 日経産業新聞 2008 年 4 月 2 日 「新センサで安価に検出、ダイヤモンド FET センサ」
- ⑤ 日刊工業新聞 2008 年 12 月 17 日 「ダイヤモンドの電界効果トランジスタを利用、DNA や RNA の一塩基多型検出に成功」

ホームページ

<http://www.kawarada-lab.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川原田 洋 (KAWARADA Hiroshi)
早稲田大学 理工学術院
研究者番号: 90161380

(2) 研究分担者

立木 実 (TACHIKI Minoru)
(独) 物質材料研究機構
研究者番号: 50318838

(H-20→H-21 連携研究者)

(3) 連携研究者

高野 義彦 (TAKANO Yoshihiko)
(独) 物質材料研究機構
研究者番号: 10354341

梁 正勲 (YANG Jung-Hoon)

早稲田大学 理工学術院
研究者番号: 80409086

岩崎孝之 (IWASAKI Takayuki)

早稲田大学 理工学術院

(現 東京工業大学)

研究者番号: 80454031