研究成果報告書 科学研究費助成事業



今和 5 年 6 月 2 6 日現在

機関番号: 82641 研究種目: 基盤研究(A)(一般)
研究種目・其般研究(A)(一般)
研究期間: 2020 ~ 2022
課題番号: 20H00356
研究課題名(和文)高温CVD法による高速SiCバルク結晶成長における転位低減機構解明と限界探求
研究課題名(英文)Clarification of dislocation reduction mechanism and exploring the limit in fast SiC bulk growth by high-temperature CVD
 研究代表者
・ 十田 委一(Tsuchida Hidekazu)
一般財団法人電力中央研究所・エネルギートランスフォーメーション研究本部・副研究参事

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 25,800,000 円

研究成果の概要(和文):省エネや電化促進への寄与が期待される高性能炭化珪素(SiC)パワー半導体について、その素材となるSiC結晶の高速・高品質製造法に関する研究を行った。その結果、高温化学気相法(高温CVD法)による高速結晶成長において、結晶成長に伴って結晶各部における欠陥(転位)の密度が大幅に減少することを見出すとともに、結晶成長中における転位同士の合体および新たな転位生成の抑制を通じて転位密度が減少 したことを示す評価結果を得た。また、更なる高速化・高品質化を実現する上での制限因子を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義 カーボンニュートラルに向けて、電力系統制御や再生可能エネルギーの系統連系装置、自動車、鉄道車両、産業 機器などの高効率化が必須であり、それらにおける電力変換を担うパワー半導体の低損失化が求められている。 SiCパワー半導体は高い低損失性能を有するため、各種の電力変換装置への適用が期待されているが、その素材 となるSiC結晶の生産性が低いことが課題となっている。本研究では、高温CVD法を用いて従来手法よりも約10倍 高い速度で高品質なSiC結晶を製造するよっな多次的・技術的知見を得たものであり、将来の高性能SiCパワー半 導体の適用・普及拡大に大きく貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文):High-performance silicon carbide (SiC) power semiconductor devices are expected to promote saving power and electrification. This study investigated the fast and high-quality production method of SiC crystals as material for SiC power devices, using the high-temperature chemical vapor deposition (CVD) technique. Significant reduction of defect (dislocation) densities along the crystal growth direction was found in each part of a grown SiC crystal and the characterization results showing coalescence of dislocations and suppressed generation of new dislocations during crystal growth are obtained. Limiting factors in fast and high-quality SiC CVD crystal growth are also revealed.

研究分野:応用物理工学

キーワード: 炭化珪素 結晶成長 転位 熱応力 X線トポグラフィ 転位動力学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等に ついては、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1.研究開始当初の背景

半導体メモリやLSI用のウェハとして用いられている半導体シリコン(Si)については、チョ クラルスキー法(CZ法)によって約1mm/minの成長速度で、無転位結晶を育成する技術が工 業的に確立されている。一方、次世代のパワーデバイス用半導体材料として期待されている炭化 珪素(SiC)の結晶成長においては、常圧で液相を持たない性質から昇華法(物理気相成長法) が開発され、SiC バルク結晶製造の現在における主流となっている[1]。この手法では、固体 SiC 原料を 2100 - 2300℃で昇華させて、種結晶上で再結晶化させることで成長結晶を得る。SiC 結晶 を用いたパワーデバイスにおいては、Si パワーデバイスを上回るデバイス特性が実現され、一 部の用途で実用化が進められている。しかしながら、昇華法による SiC 結晶成長速度が 0.3 mm/h 程度(Si 引き上げ速度の 1/100 以下) 結晶長さは数 cm 程度に制限されていることが、ウェハ 供給と材料コストの両面で、SiC パワーデバイスの普及拡大に対する障害となっている。

このような背景に鑑み、研究代表者らは原料にガスを用いた高温化学気相法(高温 CVD 法) による高速 SiC バルク結晶成長に関する研究を 2010 年より進めてきた。この手法は、1990 年代 後半に Linköping 大学により提案 [2] されたものであるが、研究代表者らは、種結晶温度として 2500 - 2550℃という従来よりも格段に高い成長温度を適用することで、昇華法の約 10 倍となる 3 mm/h の成長速度でボイド等の巨視的欠陥のない良好な結晶品質を得ることに成功している [3-5]。この高温 CVD 法に関する研究成果は、SiC バルク結晶成長の生産性向上に対してブレー クスルーを与え得るものであるが、今後はデバイス特性への悪影響が懸念される結晶欠陥に関 して、特に結晶成長時の転位の挙動・低減機構に関する理解を深め、その制御技術を得ることが 将来の大口径化や工業化に向けての鍵となる。

2.研究の目的

本研究では、高温 CVD 法による SiC バルク結晶成長における転位低減と成長速度の向上を追求し、超高温下での高速結晶成長における転位の挙動・低減機構を解明するとともに、高速・高 品質化に関する学術的・技術的知見を得ることで、SiC バルク結晶成長における生産性向上やコ スト低減に対してブレークスルーを与えることを目的とする。

3.研究の方法

(1) 高温 CVD 法による高速 SiC バルク結晶成長における転位低減機構の解明

高温 CVD 法による SiC 結晶成長実験、放射光 X 線トポグラフィによる転位観察、および転位 動力学シミュレーションにより、SiC バルク結晶成長における転位の伝播、合体等の挙動を解析 することで、高温 CVD 法による高速 SiC バルク結晶成長における転位の低減機構を明らかにす る。

(2) 高温 CVD 法における成長速度の制限因子の解明

結晶成長速度ならびに成長面方向を変化させた場合について、結晶成長実験ならびに結晶品 質評価を行い、高温 CVD 法における成長速度の増大に対する制限因子を明らかにする。

4.研究成果

(1) 高温 CVD 法による高速 SiC バルク結晶成長における転位低減機構の解明

(1)-1 成長方向における転位密度の変化

高温 CVD 法により成長速度約 3 mm/h で得た厚さ約 4 mm の直径 2 インチ SiC 結晶に対して、 段階的な表面研削と X 線トポグラフィ観察を行うことで、結晶成長方向(成長厚さ方向)に異 なる位置における貫通らせん/混合転位(TSD/TMD)貫通刃状転位(TED)基底面転位(BPD) の密度を調べた。図 1 に、結晶の中央部、中心軸から半径方向に半径の 1/2 離れた位置(R/2 部) 周辺部における TSD/TMD、TED、BPD 密度の成長厚さ方向の変化を示す [6]。この結果より、 成長初期の成長厚さが 0 mm(種結晶)から 0.7 mm の範囲において TSD/TMD、TED、BPD 密度 の顕著な増加は起きていないこと、また成長初期から成長厚さ 3.6 mm に達するまでにそれぞれ の転位密度が連続的に減少し、種結晶の転位密度と比較して結晶中央部において TSD/TMD は 約 1/2、TED は約 1/10、BPD は約 1/20 にまで低減していることが判明した。

従来法である昇華法の場合には成長初期において転位密度が大幅に増加することが報告されている [7]。SiC バルク結晶成長時の貫通転位の生成メカニズムとして、互いに反対のバーカースベクトルを有する貫通転位がペアとして生成されるモデルが提唱されている [8]。このような転位生成の技術的要因として、昇華法では原料供給量と炉内温度が連動しているために、特に成長初期の過渡状態における原料供給量および原料 C/Si 比の制御が容易でないことが推察される。



図 1 (a) TSD/TMD、(b) TED、(c) BPD 密度の成長厚さ方向の変化 [6]。

一方、高温 CVD 法では、原料ガスを導入しない状態(H2雰囲気中)で炉内温度を成長温度まで 上昇させることができるとともに、原料となる SiH4 と C3H8のそれぞれのガス流量を独立して制 御することで原料 C/Si を適切な値に維持しつつ結晶成長を開始できる。これらのことが、高温 CVD 法による本結晶成長実験において、成長初期の転位生成を抑制できている要因として考え られる。

(1)-2 TSD/TMD の低減機構

成長初期から成長厚さ 3.6 mm までを成長方向に 4 つの範囲に分けて、各範囲での TSD/TMD の減少量をバーカースベクトルの c 方向成分毎に分類した結果、互いに反対の c 方向成分を有する TSD/TMD が成長方向においてほぼ同数毎に低減していることが確認された [6]。また、成長方向と並行にカットした断面試料に対する透過 X 線トポグラフィ観察 ($g = 000\overline{4}$) とセクショントポグラフィ観察 ($g = 000\overline{4}$)、および反射 X 線トポグラフィ観察 ($g = 11\overline{2}8$)の結果から、互いに反対の c 方向成分を有する 2 本の TSD/TMD が合体することで c 方向成分が消失していることを確認した [9]。これらの結果より、結晶成長方向における TSD/TMD 密度の主な低減機構は、反対の c 方向成分を有するもの同士の合体の進行によるものと考えられる。なお、断面試料に対する透過トポグラフィ観察より、一部の TSD/TMD については、基底面の積層欠陥によって基底面方向に屈曲されていることも確認された [9]。

図 2(a) に示すように、互いに反対の c 方向バーガースベクトルを有する 2 本の TSD には $\pm r_s b$ の力が相互に作用する。ここで r_s は単位長さあたりの TSD に働く分解剪断応力、b はバーガー スベクトルを示し、b の大きさは 10.053 Å である。断面試料に対する透過トポグラフィ観察にお いて、初期に 0.1 - 0.4 mm 離れていた 2 本の TSD/TMD が成長結晶中で合体していることが確認 された [9]。この距離において双方の TSD に働く剪断応力(引力)は 0.34 - 0.09 MPa と計算さ れる。c 方向に伝播する TSD はプリズム面上を交差すべりによって移動することが可能であり、 転位間相互作用によって引力として作用する剪断応力が、反対方向の c 方向のバーガースベク トルを有する 2 本の TSD の合体の駆動力となる。一方、熱応力が存在する場合には、図 2(b) に 示すように、反対方向の c 方向のバーガースベクトルを有する 2 本の TSD には $\pm t_{21}b$ の力が作 用し、TSD のすべり運動の駆動力となる [9]。ここで t_{21} は単位長さあたりの TSD に働く x_1 方向 に垂直な面に働く x_2 方向の剪断応力であり、 α をオフ方向と x_1 方向のなす角度、 β をオフ方向と x_2 方向のなす角度、 σ_T を熱応力によって生じる垂直応力とすると $t_{21} = \cos\alpha cos \beta \sigma_T$ で表される。 オフ角度が 4°の場合、TSD に対する $cos accos \beta$ の最大値は 0.06 となる。

熱応力が転位間相互作用による応力よりも優勢な場合には、TSD/TMDのすべり運動は t21b に よって支配されると考えられる。このとき、t21は(1010)および(0110)面に限定されることか ら、図 2(b)のように異なる2つのすべり面上にTSDが配置されている場合には、転位間の距離 が最短になる位置から離れる方向にすべり運動が起こると考えられる。同一のすべり面上に反 対方向のc方向のバーガースベクトルを有する2本のTSDが存在する場合には転位同士が合体 する方向に力が作用すると想定されるものの、そのような偶然のケースは極めて稀である。この





図 2 (a) 2 本の TSD に働く転位間相互作用、(b) 互いに反対の c 方向バーガースベクトル成 分を有する TSD に働く剪断熱応力の模式図 [9]。

ため、転位間相互作用によって反対方向の c 方向のバーガースベクトルを有する 2 本の TSD が 合体する方向に動くためには、熱応力の影響が十分に小さいことが条件となると考えられる。 (1)-3 TED の低減機構

高温 CVD 法による SiC バルク結晶成長における TED の挙動については、成長方向と並行に カットした試料に対する放射光透過トポグラフィ観察(g=1120)と二次元転位動力学シミュレ ーションにより解析を行った。断面試料に対する透過 X 線トポグラフ像において、TED 密度は 種結晶に近い部分で高く成長に伴って減少すること、また TED の合体を示す転位コントラスト のパターンがみられることが確認され、結晶成長に伴って TED の合体が進行していることが示 唆された。転位動力学シミュレーションにおいては、TED の上昇運動とすべり運動を考慮し、 上昇速度は 4H-SiC エピ膜における TED の傾き角の評価結果 [10] を参考として 2.5×10⁻⁸ m/s、 すべり速度は摩擦係数 *B* で決定されるものとして *B* = 180 kg/s と仮定して計算を行った。

2本の TED の合体によるバーガースベクトルの *a* 方向成分の減少もしくは消失は、それぞれ のバーガースベクトルの間の角度が 180°の場合もしくは 120°の場合に起こることが期待できる [6]。図3は2次元転位動力学シミュレーションの結果をもとに、結晶成長方向をY、[1120]方 向をXとして、[1100]方向(紙面垂直方向)の厚さ 0.8 mm の領域に含まれる TED の成長方向 における軌跡をプロットしたものである。2本の TED の合体を示すパターンが表れ、結晶成長 方向に沿って TED 密度が減少する様子が示されており、転位動力学シミュレーションによって 断面試料に対する透過X線トポグラフィ像でみられた TED の転位コントラストの特徴が再現さ れた。また、転位動力学シミュレーションにおいて TED の上昇運動を考慮することで、バーガ ースベクトル間の角度が 180°の場合の2本の TED の合体の進行を再現できることが確認され た。以上のことから、実験で確認された成長方向における TED 密度の主な低減機構は、異なる *a*方向バーガースベクトルを有する TED 同士の合体の進行によるものと考えられる。



図 3 結晶成長方向に対する TED の転位線の軌跡の転位動力学シミュレーション結果。シミ ュレーション条件:初期 TED 密度 1×10⁴ cm⁻²、TED 上昇速度 2.5×10⁻⁸ m/s、TED 摩擦係数 180 kg/s、SiC ヤング率 500 GPa、SiC ポアソン比 0.18。

(1)-4 BPD の低減機構

成長結晶における BPD の形成機構は、種結晶からの引継ぎと、成長中での生成に分類するこ とができる。図1に示した成長実験では <1120> 方向に4°オフした直径2インチの種結晶を使 用したため、成長厚さ1.4 mm においては結晶中央付近では種結晶中の基底面が引き継がれてい るが、成長厚さ3.6 mm おいては種結晶中の基底面は結晶外に達しており成長層に引き継がれて いない。このため、図1(c) において成長厚さ0から1.4 mm の間において確認された BPD 密度 の低減は種結晶中の BPD の伝播方向の転換が成長中に進行したことを示唆しているとともに、 成長厚さ1.4 から3.6 mm の間において1×10² cm⁻² 以下のレベルで BPD 密度が漸減傾向にある ことは結晶成長中における新たな BPD の生成が抑制されていることを示している。結晶成長中 における新たな BPD の生成は基底面に働く剪断応力によって引き起こされると考えられるため、 確認された BPD 密度の低減は結晶成長プロセスにおいて基底面に働く剪断応力が抑制された結 果として理解できる。SiC バルク結晶成長における SiC 結晶の基底面に加わる剪断応力の代表的 な要因として、SiC 結晶中の径方向の温度勾配が考えられる。径方向の温度勾配は、炉自体が有 する径方向温度分布や、結晶表面が水平方向でないことに起因して垂直方向の温度勾配によっ て生じる結晶表面の径方向温度分布に起因するため [11]、これらをより高度に制御することに よって BPD 密度を低減できるものと期待される。

(2) 高温 CVD 法における成長速度の制限因子の解明

以前の我々の研究において、高温 CVD 法による SiC バルク結晶成長において、オフ角度を 4°、 オフ方向を <1120> とした場合に、ファセット成長領域とステップフロー成長領域で成長表面 におけるマクロステップバンチングの様相が異なることが確認された [4]。このため、本研究で はオフ角度およびオフ方向が異なる種結晶を用いて得た成長結晶に対して結晶評価を行った。 その結果、オフ角度が 0°の種結晶を用いた場合には異種多型(4H 以外の結晶型)の混在が発生 しやすいこと、オフ角度を4°としてオフ方向を <1100> とした場合にはオフ方向が <1120> の 場合と同様に異種多型の混在が抑制されることがわかった。また、放射光 X 線トポグラフィに よる転位観察の結果、オフ方向を <1100> もしくは <1120> とした両者の場合において、結晶 外周部に (1100)[1120]、(0110)[2110]、(1010)[1210] の 3 種のプリズム面転位が生成されるこ とを確認した。これらプリズム面転位の結晶中での位置は、径方向の温度勾配を仮定した際にプ リズム面に作用する剪断応力が高まる領域 [12] と符合していることから、観察されたプリズム 転位の生成要因は結晶成長もしくは成長後の冷却過程における結晶中の径方向温度勾配による ものと推定される。さらに、成長速度を増大させるための成長条件の探索を行った結果、オフ方 向を <1100> もしくは <1120> とした両者の場合において、<1100> 方向に前進するマクロス テップの成長表面におけるバンチングの発達とそれに伴う空隙形成が、3 mm/h を越える成長速 度で良質な結晶を得る上での主な制限因子となることが明らかとなった。

< 引用文献 >

[1] 大谷昇, 応用物理 54, 339 (2011).

[2] O. Kordina, C. Hallin, A. Ellison, A.S. Bakin, I.G. Ivanov, R. Yakimova, M. Touminen, A. Vehanen, E. Janzén, Appl. Phys. Lett. **69**, 1456 (1996).

[3] N. Hoshino, I. Kamata, Y. Tokuda, E. Makino, N. Sugiyama, J. Kojima, H. Tsuchida, Applied Physics Express 7, 065502 (2014).

[4] N. Hoshino, I. Kamata, Y. Tokuda, E. Makino, T. Kanda, N. Sugiyama, H. Kuno, J. Kojima, H. Tsuchida, J. Cryst. Growth **478**, 9 (2017).

[5] Y. Tokuda, E. Makino, N. Sugiyama, I. Kamata, N. Hoshino, J. Kojima, K. Hara, H. Tsuchida, Journal of Crystal Growth **448**, 29 (2016).

[6] N. Hoshino, I. Kamata, T. Kanda, Y. Tokuda, H. Kuno, H. Tsuchida, Applied Physics Express **13**, 095502 (2020).

[7] K. Tani, T. Fujimoto, K. Kamei, K. Kusunoki, K. Seki, and T. Yano, Mater. Sci. Forum 858, 73 (2016).

[8] M. Dudley, X.R. Huang, W. Huang, A. Powell, S. Wang, P. Nudeck, M. Skowronski, Applied Physics Letters **75**, 784 (1999).

[9] I. Kamata, N. Hoshino, K. Betsuyaku, T. Kanda, H. Tsuchida, Journal of Crystal Growth **590**, 126676 (2022).

[10] R. Tanuma, I. Kamata, J.P. Hadorn, H. Tsuchida, Journal of Applied Physics 124, 125703 (2018).

[11] T. Okamoto, T. Kanda, Y. Tokuda, N. Ohya, K. Betsuyaku, N. Hoshino, I. Kamata, H. Tsuchida, Material Science Forum **1004**, 14 (2020).

[12] J. Guo, Y. Yang, G.Y. Goue, B. Raghothamachar, M. Dudley, ECS Transactions 75, 163 (2016).

5.主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件(うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件)

1 . 著者名	4.巻
土田秀一、鎌田功穂、星乃紀博、村田晃一	90巻11号
2.論文標題	5 . 発行年
大容量SiCパワーデバイスに向けた結晶成長技術の開発	2021年
3.雑誌名	6 . 最初と最後の頁
応用物理	675-978
掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)	査読の有無
10.11470/oubutsu.90.11_675	無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著

1.著者名	4.巻
Hoshino Norihiro, Kamata Isaho, Kanda Takahiro, Tokuda Yuichiro, Kuno Hironari, Tsuchida	13
Hidekazu	
2.論文標題	5 . 発行年
Reduction in dislocation densities in 4H-SiC bulk crystal grown at high growth rate by high-	2020年
temperature gas-source method	
3.雑誌名	6.最初と最後の頁
Applied Physics Express	095502 ~ 095502
掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)	査読の有無
10.35848/1882-0786/abace0	有
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスとしている(また、その予定である)	-
	•

1.著者名	4.巻
土田秀一	12
2.論文標題	5 . 発行年
高電圧パワー半導体に向けたSiC結晶材料開発	2020年
3. 雑誌名	6.最初と最後の頁
電気評論	13~17
掲載論文のD01(デジタルオプジェクト識別子)	査読の有無
なし	無
オープンアクセス	国際共著
オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	-

1.著者名	4.巻
Kamata Isaho、Hoshino Norihiro、Betsuyaku Kiyoshi、Kanda Takahiro、Tsuchida Hidekazu	590
2 . 論文標題 Investigation of propagation and coalescence of threading screw and mixed dislocations in 4H- SiC crystals grown by the high-temperature gas source method	5 . 発行年 2022年
3.雑誌名	6 . 最初と最後の頁
Journal of Crystal Growth	126676~126683
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
10.1016/j.jcrysgro.2022.126676	有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著

〔学会発表〕 計8件(うち招待講演 4件/うち国際学会 1件)

1.発表者名

Hidekazu Tsuchida, Isaho Kamata, Norihiro Hoshino, and Koichi Murata

2.発表標題

Recent progress in 4H-SiC CVD growth and defect control

3 . 学会等名

13th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials(招待講演)(国際学会)

4.発表年 2021年

1.発表者名 別役潔、星乃紀博、鎌田功穂、神田貴裕、土田秀一

2.発表標題

4H-SiC結晶における貫通刃状転位の上昇運動を考慮した転位動力学シミュレーション

3.学会等名第69回応用物理学会春季学術講演会

4.発表年 2022年

1.発表者名

土田秀一、鎌田功穂、星乃紀博、村田晃一、前田康二、浅田聡志

2.発表標題

高耐圧SiCパワーデバイスの高性能化・高信頼性化を目指した欠陥制御

3.学会等名

日本学術振興会「ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会」第120回研究会(招待講演)

4 . 発表年 2020年

1.発表者名

土田秀一、鎌田功穂、星乃紀博、村田晃一、宮澤哲哉

2.発表標題

高品質 SiC 結晶成長技術の開発と欠陥評価

3 . 学会等名

日本学術振興会「放射線科学とその応用第186委員会」第36回研究会(招待講演)

4.発表年 2020年

1.発表者名

星乃紀博、鎌田功穂、別役潔、神田貴裕、土田秀一

2.発表標題

ガス法で成長した4H-SiCバルク結晶中の貫通転位ペアの分布評価

3.学会等名 先進パワー半導体分科会第7回講演会

4.発表年

2020年

 1.発表者名 鎌田功穂、星乃紀博、別役潔、神田貴裕、土田秀一

2.発表標題 放射光セクショントポグラフィによる貫通転位挙動の観察

3.学会等名第68回応用物理学会春季学術講演会

4.発表年 2021年

 1.発表者名 別役潔、星乃紀博、鎌田功穂、神田貴裕、土田秀一

2 . 発表標題

4H-SiCにおける貫通刃状転位間の相互作用

3.学会等名第68回応用物理学会春季学術講演会

4.発表年

2021年

1.発表者名
星乃 紀博、鎌田 功穂、 神田 貴裕、徳田 雄一郎、 久野 裕也、 土田 秀一

2.発表標題

高温ガス法による高速4H-SiCバルク結晶成長における転位密度低減

3.学会等名

第70回応用物理学会春季学術講演会(招待講演)

4 . 発表年 2023年 〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6 . 研究組織

_

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
	鎌田 功穂	一般財団法人電力中央研究所・エネルギートランスフォー メーション研究本部・上度研究員	
研究協力者	(Kamata Isaho)		
	(20371643)		
	別役 潔	一般財団法人電力中央研究所・エネルギートランスフォー メーション研究本部 - ト度研究員	
研究協力者	(Betsuyaku Kiyoshi)	╱ [—] ╱当╱ѡӏ҄҄҄҄ҲѰӹ ^ѵ ҈⊥ѬѡӀ҄҄҇Ӆ <u>ҏ</u>	
	(40638160)		
	星乃紀博	一般財団法人電力中央研究所・エネルギートランスフォー メーション研究本部・主任研究員	
研究協力者	(Hoshino Norihiro)		
	(60516706)		

7.科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8.本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------