

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540324

研究課題名(和文) 固体量子もつれ構造の電流相関に対するエネルギー散逸および帯電効果の非摂動論的理論

研究課題名(英文) Non-perturbative Theory of Quantum Entanglement Current-Correlation in Solid State under the presence of Energy Dissipation and Charging Effect

研究代表者

岩淵 修一 (Shuichi, IWABUCHI)

奈良女子大学・自然科学系・教授

研究者番号：40294277

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)：固体量子もつれ生成構造である共通の超伝導電極を有する疑似2重容量結合型単一電子トランジスター構造に対して、任意のエネルギー散逸効果と任意の透過確率の解析に資する非摂動論的な完全計数統計理論を構築した。系のキュムラント生成関数をシュウィンガー・ケルディッシュ法に基づく有限温度の場の理論で電流連続性を担保した計数場の導入を踏まえて求め、第1キュムラントである量子もつれ電流のエネルギー散逸、帯電エネルギー依存性等を検討し、有効なもつれ情報の取り出し方を理論的に議論した。一方、既存の実験の検討を行い、有効な量子もつれ生成構造を作成しうるレーザ加工、集束イオンビーム誘起堆積技術等のプロセスを起ち上げた。

研究成果の概要(英文)：We developed the non-perturbative theory of the full counting statistics for the Solid State Entangler consisting of two capacitively-coupled single electron transistors with a common superconducting electrode. We obtained the general expression for the cumulant generating function of the system based on the finite temperature field theory of the Schwinger-Keldysh scheme in the coexisting regime of both Andreev reflection and Coulomb blockade. We successfully reproduced a recent experimental findings about quantum entanglement currents by Hofstetter et al. and showed that, adjusting bias voltages and the effects of energy dissipation and charging energy, the quantum entanglement current (1st cumulant) can be purely extracted avoiding other kinds of current flows. We also established fabrication processes of SSE structure consisting of techniques of LASER fabrication of quantum dots of graphene and carbon nanotube, and ion-beam stimulated deposition of superconducting tungsten films.

研究分野：物性基礎理論

キーワード：量子もつれ 全計数統計 メゾスコピック系の量子伝導現象 非摂動論的理論 エネルギー散逸 交差アンデレ-エフ反射 クーロン・ブロッケイド 完

1. 研究開始当初の背景

Feynman が予見 (1959) したように、メゾスコピック系の量子伝導現象の研究はナノテクノロジーの発展と歩調を合わず形で 1980 年代半ばに萌芽を見たが、以来爆発的な勢いで世界的規模での研究が進んでいた。その間、基礎科学としては、既成の基礎概念の検討・見直しとともに新たな基礎概念の発見がなされ、応用科学的には 21 世紀の高度マルチメディア社会を支える技術として、ナノテクノロジーを駆使した新しいタイプの電子素子の理論的、実験的探求・検討が世界的規模で繰り広げられていた。帯電効果によって発生する特異なトンネル現象であるクーロン・ブロッケイドを動作原理とするシングルエレクトロニクスはその代表例であり、我が国においてもこのような流れは「科学技術基本計画」の中で大きな位置を占めていた。

一方、特筆すべき研究として、量子情報に関する理論的、実験的な研究の大きな進展が挙げられる。これは Einstein らによる、所謂 EPR パラドックス (1935) をその歴史的発端とする。Feynman によって提唱された制御 NOT 構造を持つ量子コンピュータ等の実現だけではなく、Bell の不等式の破れに代表されるような量子力学の持つ局所実在論を超えた自然現象 (量子相関) の記述能力といった量子力学の根幹を改めて見直す機会を提供するという基礎科学的に大きな意義を持っていた。“量子もつれの物理と量子ビットの実現” は、双子の光子に代表されるような質量を持たないボソン系での研究が主流であったが、質量を持つフェルミオンである電子が織りなすメゾスコピック電子系の量子伝導現象を利用する固体量子もつれ構造が脚光を浴びてきていた。

2. 研究の目的

クーロン・ブロッケイドと交差 Andreev 反射の安定領域は接合面の透過率に関して両極端にある。しかし、量子もつれ情報の生成にはクーロン・ブロッケイドによる 1 電子レベルの制御が必須である。そこで、量子もつれ情報が発生する微小な「固体量子もつれ構造 (SSE)」 (メゾスコピックな超伝導・常伝導複合接合系など) に於いて、量子もつれ電流及びその相関が任意の大きさのオーミックなエネルギー散逸下での帯電効果および接合面の任意の大きさの透過確率に対して定量的に記述し得る非摂動的理論が必要である。研究の目的は、このような理論を構築し、それを基にこのような系の量子相関の物理に関する新たな知見を呈示すること、並行して実験的観点から新たな実証実験に繋がる構造の検討とそれを可能とする作成プロセスを提示することであった。

3. 研究の方法

Andreev 反射とクーロン・ブロッケイドの共存領域に於ける量子もつれ電流を含む全ての種類の電流の理論及びその相関関数の理論の構築は、Schwinger-Keldysh 形式の有

限温度の場の理論に基づいて行う。理論には、これまでの研究成果をベースにして任意の強度の電磁場環境効果やエネルギー散逸、非摂動的コ・トンネリングの取り込みなど実験を定量的に議論しうる効果を取り込む。この取組は、既存の完全計数統計理論の大幅な拡張となる。また、提案されている SSE の実験的にネックとなっている種々の問題点の洗い出し、SSE 構造の作成のための加工プロセス技術の立ち上げと構造に関する提案を行うために、研究分担者に実験研究者を配置し検討する。

4. 研究成果

(1) 疑似 2 重容量結合型単一電子トランジスタ (CSET) 型 SSE 構造に対する完全計数統計理論の構築と検討

超伝導電極を共通とする疑似 2 重容量結合型単一電子トランジスタ型 SSE (以下 D-SCSET として引用) を取り上げた (図 1)。

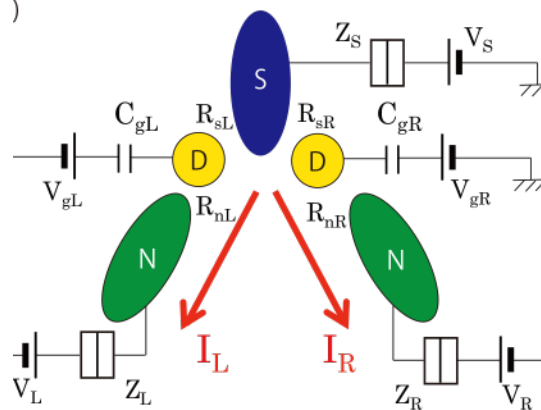


図 1: 固体量子もつれ生成構造としての D-SCSET。

この系のキュムラント生成関数を Schwinger-Keldysh 法に基づく有限温度の場の理論で電流連続性を担保した計数場の導入を踏まえて求めた。

観測時間 T (長時間平均) でのキュムラント生成関数 $(\{\chi_{\alpha}^{(i)}\})$ は包括的な電流連続条件を考慮して導入された複数の計数場 $\chi_{\alpha}^{(i)}$ ($\alpha=L,R; i=1,2$) を含み、これは左右の SCSET を構成する電極電子数の変化や電流連続条件に関わっている:

$$\begin{aligned} \Omega(\{\chi_{\alpha}^{(i)}\}) & \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \log \left\langle U^{\dagger} \left(\{\chi_{\alpha}^{(i)}\}; T/2, -T/2 \right) \right. \\ & \quad \left. \times U \left(\{\chi_{\alpha}^{(i)}\}; T/2, -T/2 \right) \right\rangle \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{2\pi} \text{Tr} \cdot \text{Sp} \log \left\{ \frac{\hat{M}(\{\chi_{\alpha}^{(i)}\}; \omega)}{\hat{M}(0; \omega)} \right\} \end{aligned}$$

ここで、

$$U_{c\mp}(\{\chi_{\alpha}^{(i)\mp}\})$$

$$\equiv T_{c\mp} \exp \left\{ -\frac{i}{\hbar} \int_{c\mp} d\tau \mathcal{H}_T(\{\chi_{\alpha}^{(i)\mp}\}; \tau) \right\}$$

はハミルトニアン $H_T(\{\chi_{\alpha}^{(i)\mp}\})$ による Keldysh 経路 (図 2) に沿った時間発展演算子である。

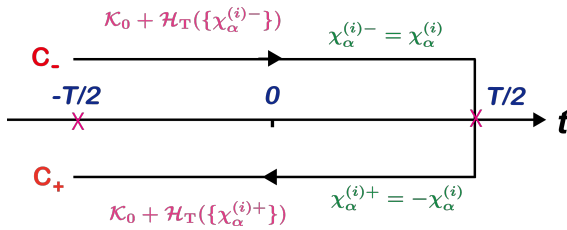


図 2 : Keldysh 経路。

D-SCSET の各接合のトンネルハミルトニアン の総和 H_T は、そもそも、電位差に関する古典位相に加え、アイランド電荷に共役な量子位相および電磁場環境効果、エネルギー散逸に共役な量子位相の依存性を持っているが、 $H_T(\{\chi_{\alpha}^{(i)\mp}\})$ は H_T に対して計数場変換をして得られたものである。キュムラント生成関数 $(\{\chi_{\alpha}^{(i)\mp}\})$ の表式は南部-Gorkov 及び Keldysh 空間での行列 $M(\{\chi_{\alpha}^{(i)\mp}\};)$ を用いてコンパクトな形で与えられる (Tr 及び Sp はそれぞれの空間での対角和) が、その表式は極めて複雑な式であり、エネルギー散逸効果、帯電効果と電磁場環境効果、非摂動的コ・トンネリング効果などはすべてこの 8×8 行列 M の中に各電極電子の自己エネルギー効果を通して取り込まれている (詳細略)。

第 1 キュムラントの検討

第 1 キュムラントは、今の場合電流である。量子もつれ電流のエネルギー散逸、帯電エネルギー依存性等を図 4 (A) 及び (B) に示す。パラメータ設定の詳細は省くが、観測温度は帯電エネルギーの 0.1 倍に設定してある。上述のように、クーロン・ブロッケイドと Andreev 反射の安定領域は透過確率に関して両極端にあるが、帯電エネルギーによるクーロン・ブロッケイドはクーロン階段が図 3 の程度に実現されている。

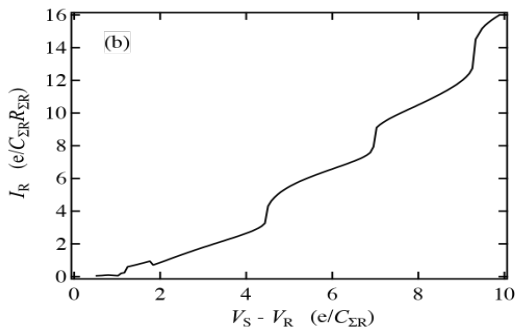


図 3 : クーロン・ブロッケイドによるクーロン階段が生じている。量子もつれ生成には帯電効果が必須。

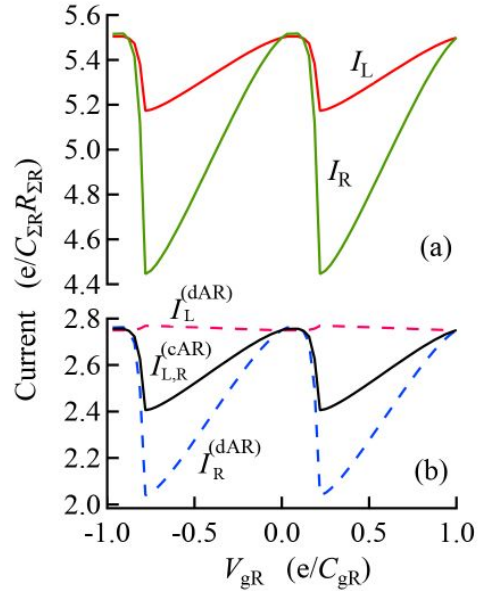


図 4 (A) : エネルギー散逸大。 $I_L^{(dAR)}$ ($I_R^{(dAR)}$) および $I_L^{(cAR)}$ ($I_R^{(cAR)}$) はそれぞれ左 (右) の SCSET の直接および間接 Andreev 反射による電流を表す。ゲート電圧は右の SCSET だけ変化させクーロン振動を起こさせているが、ゲート電圧を固定している左の SCSET を流れる $I_L^{(cAR)}$ だけに転写されている。

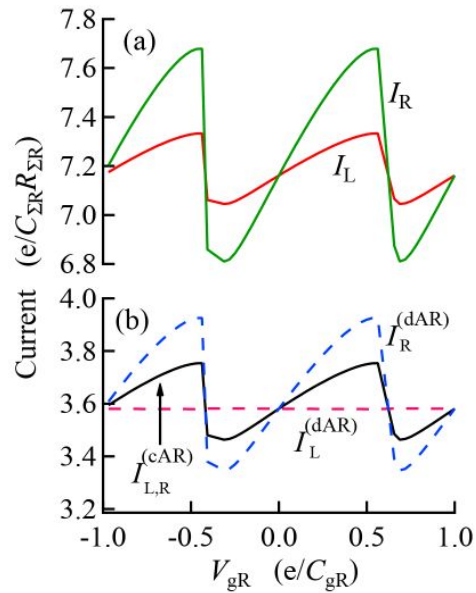


図 4 (B) : エネルギー散逸小。ゲート電圧は右の SCSET だけ変化させクーロン振動を起こさせているが、ゲート電圧を固定している左の SCSET を流れる $I_L^{(cAR)}$ だけに転写されている。

この結果は Hofstetter らの実験報告 [L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygard and C. Schönenberger, Nature 461, 960 (2009)] を極めてよく説明する。尤も、彼らの実験では、理論が考慮している種々の効果エネルギー散逸を見積もる記述 (実験が) がなされてい

ないので、より詳細な実験データがあれば、より詳細な理論解析が可能である。この意味でより詳細で注意深い測定が望まれる。また、クーロン・ギャップはエネルギー散逸の大きさによって変化（増大）すること、直接 Andreev 反射より交差 Andreev 反射のクーロン・ギャップは小さいので、バイアス電圧 eV を超伝導ギャップより小さくかつこれら 2 種のクーロン・ギャップ間に設定すれば、量子もつれ情報だけを取り出すことが可能であることが分かる。この点も、実験的に確認する事が望まれる。

以上のように、この理論は量子もつれ情報のディ・コヒーレンスも考慮しながら信頼性に足る記述を可能とするものであり、量子もつれ情報の更なる研究に大きく寄与するものであると考える。この初期の結果は国際会議 ISANN2013 において報告された（〔雑誌論文〕、〔学会発表〕、）。また、更に進んだ検討は、現在投稿中である（投稿中論文 3 件）。

第 2 キュムラントの考察

現在も進行中である。得られた結果は第 1 キュムラントレベルでの検討を補足するものであるが、論文投稿準備中でもあり、その詳細は此处では省略する。

(2) 実験的検討

交差アンドレーエフ反射を利用した量子もつれ状態を実際のデバイスとして実現するためのプロセスを検討した結果、グラフェンまたはカーボンナノチューブを用いて量子ドットを形成し、さらに集束イオンビーム誘起堆積技術を利用して超伝導材料を堆積し量子ドットと結合するプロセスを考案した。集束イオンビーム誘起堆積技術で作成したタングステンは 5~6 K 程度の比較的高い温度で超伝導を示すことが報告されている。現有の装置にタングステンの材料ガスを導入するための機構を増設しタングステンを堆積できるように改造した。また、材料は異なるが同じ技術で堆積したナノピラーからの電界電子放出パターンに縞模様が観測される機構を明らかにするための実験手法を提案し実験を始めている。

グラフェンに関しては、レーザを用いた加工プロセスの開発を行った(例えば、〔雑誌論文〕、など)。グラフェンに紫外パルスレーザを照射すると、大気中でマスクレス加工が可能であること、さらにグラフェンの層数を選択できることを明らかにした。これらの技術は超伝導材料と量子ドットを結合させた系を実現する実験手法(プロセス)としては有望であり、今後も継続・発展させていきたい。

以上の結果は、論文 4 件、投稿中論文 1 件、国際会議発表 6 件、国内学会発表 2 件として報告されている。

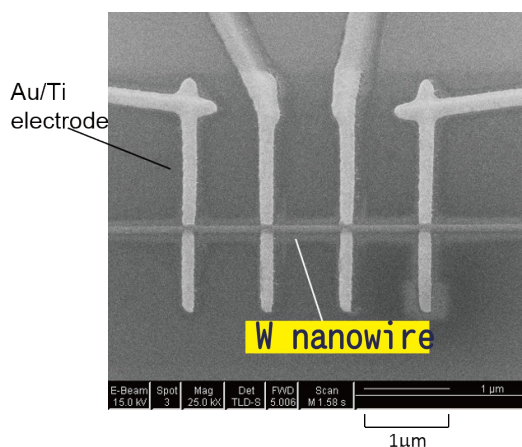


図 5 : ナノワイヤの形成例

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 12 件)

Fujio WAKAYA, Toyoshi TERAOKA, Toshiya KISA, Tomoya MANABE, Satoshi ABO, Mikio TAKAI、Effect of ultra-violet laser irradiation on graphene、Microelectronic Engineering、査読有、Vol.97, 2012, pp.144 - 146、DOI : 10.1016/j.mee.2012.04.028

Tomoya Manabe, Shogo NITTA, Satoshi ABO, Fujio WAKAYA, Mikio TAKAI、Development of planar X-ray source using gated carbon nanotube emitter、J. Vac. Sci. Technol. B、査読有、Vol. 31, 2013, pp. 02B1101 - 02B1104、DOI : 10.1116/1.4790518

H. SHIMAWAKI, Y. NEO, H. MIMURA, F. WAKAYA, M. TAKAI、Photoassisted electron emission from metal-oxide-semiconductor cathodes based on nanocrystalline silicon、J. App. Phys.、査読有、Vol. 113, 2013, pp. 103705- 1~4、DOI : 10.1063/1.4801887

Tomohisa KITAYAMA, satoshi ABO, Fujio WAKAYA, and Miko TAKAI、Observation of fringelike electron emission pattern from triode Pt nano electron source fabricated by electron-beam-induced deposition、J. Vac. Sci. & Technol. B、査読有、Vol.21, 2013, pp. 02B107-1 ~ 4、DOI : 10.1116/1.4769976

Tomoya MANABE, Shogo NITTA, Satoshi ABO, Fujio WAKAYA, Mikio TAKAI、Development of planar X-ray source using gated carbon nanotube emitter、J. Vac. Sci. & Technol. B、査読有、Vol.31, 2013, pp. 02B110-1~4、DOI : 10.1116/1.4790518

Fujio WAKAYA, Tadashi KURIHARA, Satoshi ABO, Mikio TAKAI、Ultra-violet laser processing of graphene on SiO₂/Si、Microelectronic Engineering、査読有、Vol. 110, 2013, 358 - 360、DOI : 10.1016/j.mee.2013.02.062

Megumu MIHATA, Mayumi YAMAMOTO, Takeshi INAGAKI, Fujio WAKAYA, and Shuichi IWABUCHI、 Non-perturbative and non-equilibrium theory of quantum entanglement current in ultra-small solid state entangler、 Extended abstract of ISANN2013、 査読有、 2013, pp. 93 - 94

Megumu MIHATA, Yang Wang, and Shuichi IWABUCHI、 Non-perturbative microscopic description of charging effect on phase coherence of Cooper pair in Coulomb blockade regime、 Extended abstract of ISANN2013、 査読有、 2013, pp. 57 - 58

Kosuke, NAKAHAMA, Michiaki TAKAHASHI, Satoshi ABO, Fujio WAKAYA, Mikio TAKAI、 Effect of electron focussing in X-ray sources using LiTaO₃ crystals excited by Neodyum-Yttrium Lithium Fluoride laser light、 J. Vac. Sci. & Technol. B、 査読有、 Vol. 32, 2014, pp 108-1~108-5、 DOI : 10.1116/1.4864307

Satoshi ABO, Pei Ri, Xin Yuan Yao, Fujio WAKAYA, Mikio TAKAI、 Analysis technique for ultra shallow junction using medium-energy-ion-scattering-time-of-flight elastic-recoil-detection-analysis、 Surface and Interface Analysis、 査読有、 Vol.46, 2014, pp. 1192 - 1195、 DOI : 10.1002/sia5590

Fujio WAKAYA, Tadashi KURIHARA, Nariaki YURUGI, Satoshi ABO, Masayuki Abe, Mikio TAKAI、 Maskless laser processing of graphene、 Microelectronic Engineering、 査読有、 Vol.141, 2014, pp. 203-206、 DOI:10.1016/j.mee.2015.03.049

Yoshio YAMADA, Satoshi ABO, Fujio WAKAYA, Katsuhisa Murakami Masayuki Abe、 Observation of fringelike emission pattern in magnetic field、 Proc. INTERN. Display Workshop、 査読無、 Vol. 21, 2014, pp.599 - 601

〔学会発表〕(計 14件)

Fujio WAKAYA, Tadashi KURIHARA, Satoshi ABO, Mikio TAKAI、 Ultra-violet laser processing of grapheme On SiO₂/Si、 38th International Conference on Micro and Mano Engineering、 2012年10月17日、 Toulouse(フランス)

Fujio WAKAYA, Masahiro KAJIWARA, Satoshi ABO, Mikio TAKAI、 Contactless Sheet Resistivity measurement Using Magnetic Force Microscopy、 25th International Microprocesses and Nanotechnology Conference、 2012年11月01日、 神戸(日本)

Megumu MIHATA, Mayumi YAMAMOTO, Takeshi INAGAKI, Fujio WAKAYA and Shuichi IWABUCHI、 Non-perturbative and non-equilibrium theory of quantum

entanglement current in ultra-small solid state entangler、 International Symposium on Advanced Nano- devices and Nanotechnology、 2013, Hawaii (USA) 、 招待講演

Megumu MIHATA, Yang Wang, Shuichi IWABUCHI、 Non-perturbative microscopic description of charging effect on phase coherence of Cooper pair in Coulomb blockade regime、 International Symposium on Advanced Nano- devices and Nanotechnology、 2013, Hawaii (USA)

S. NITTA, S. OKAWAKI, S. ABO, F. WAKAYA, M. TAKAI、 CNT Cold Cathode with Side-gate Electrode for Flat Panel X-ray Sources、 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference、 (招待講演) 2013年7月8日~2013年7月12日、 Roanoke, USA

Tadashi KURIHARA, Fujio WAKAYA, Satoshi ABO, Mikio TAKAI、 Graphene laser number selective process by ultra-violet laser irradiation、 39th International Conference on Micro and Nano Engineering、 招待講演、 2013年9月16日~2013年9月19日、 London, UK
K. MARUISHI, F. WAKAYA, S. ABO, M. TAKAI、 Observation of Graphene Using Magnetic Force Microscopy、 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference、 招待講演、 2013年11月5日~2013年11月8日、 札幌, 日本

S. OKAWAKI, S. NITTA, S. ABO, F. WAKAYA, M. TAKAI、 Fabrication of Carbon Nanotube Field Emitter with Side-Gate Electrode and Its Emission Property、 20th International Display Workshop、 招待講演、 2013年12月4日~2013年12月6日、 札幌, 日本

Satoshi ABO, Takahiro Uezato, Fujio WAKAYA, M. TAKAI、 Electro emission from pyrelectric crystal excited using high power infra-red laser and its x-ray source application、 27th International Vacuum Nanoelectronics Conference、 2014年7月6日~2014年7月10日、 Engelsberg, Switzerland

Hidetaka SHIMAWAKI, Masayoshi NAGAO, Tomoya YOSHIDA, Yoichiro NEO, Hidenori MIMURA, Fujio WAKAYA, Mikio TAKAI、 27th International Vacuum Nanoelectronics Conference、 2014年7月6日~2014年7月10日、 Engelsberg, Switzerland

Fujio WAKAYA, Tadashi KURIHARA, Nariaki YURUGI, Satoshi ABO, Masayuki ABE, and Mikio TAKAI、 Maskless laser processing of grapheme、 40th International Conference on Micro and

Nano Engineering, 2014年9月22日～
2014年9月26日、Lausanne, Switzerland
S. OKAWAKI, S. ABO, F. WAKAYA and M.
TAKAI, X-ray source using CNT field
emitter with side-gate electrode、
27th Microprocesses and Nanotechnology
Conference、2014年11月04日～2014年
11月7日、Fukuoka, Japan
Hidetaka Shimawaki, Masayoshi Nagao,
Tomiya YOSHIDA, Yoichiro NEO, Hidenori
MIMURA, Fujio WAKAYA, Mikio TAKAI、
Photoassisted Field Emission from
p-type Silicon FEAs. 21st International
Display Workshops、2014年12月3日～
2014年12月5日、Niigata, Japan
Yoshio YAMADA, Satoshi ABO, Fujio
WAKAYA, Katsuhisa MURAKAMI, Masayuki
ABE, Mikio TAKAI, Observation of
Fringe like Emission Pattern in
Magnetic Field、21st International
Display Workshops、2014年12月3日～
2014年12月5日、Niigata, Japan

大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号：60240454

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩淵 修一 (IWABUCHI, Shuichi)
奈良女子大学・研究院自然科学系・物理学
領域・教授
研究者番号：40294277

(2) 研究分担者

若家 富士男 (WAKAYA, Fujio)