

研究報告書

研究課題名

超伝導クーパ対を使用した電子 EPR 対高密度ビームの開発

(研究領域:「量子と情報」)

研究者氏名: 趙 福來

(研究期間: 2004 年 10 月 1 日 ~ 2008 年 3 月 31 日)

研究報告書

1. 研究課題名

超伝導クーパ対を使用した電子 EPR 対高密度ビームの開発

2. 氏名

趙福來

3. 研究のねらい

2 個の相関している量子、EPR 対は光子で実現され、量子情報処理へ向けた応用研究が盛んに行われている。一方、真空中の電子 EPR 対はその強い相互作用を生かした量子実験が期待できるが、必要不可欠な高密度 EPR 対電子ビームは実現されていない。本研究では、ナノチップ、ニオブ超伝導体チップ等の様々なナノ電子源に関して蓄積した技術を基礎に、電子源中での電子相関をそのまま電子ビームに反映させた高密度の EPR 対電子ビームを開発する。

4. 研究成果①

ナノ電子源から放出される電子ビームの電流ノイズの変化を測定した。ノイズ測定のため開発した極高真空低温電界電子放出顕微鏡の圧力は実験を行うシステムとしては記録的な 3×10^{-10} Pa であって、不純物による電流の揺らぎも極めて少なかった。装置に W(111)針を搭載して極高真空下で行ったショットノイズ測定は 10Hz 以下という低周波測定記録を達成した。そして装置の極高真空環境を利用して、仮に電界電子放出現象を応用した極高真空領域の圧力測定法を開発した。以下にその二つの成果と装置の構造を記述し、期待される今後の展開について述べる。

A. 極高真空低温電界電子放出顕微鏡

極高真空低温電界電子放出顕微鏡の真空容器の内壁と全ての金属部品には電解複合鏡面研磨が施された。研磨後 1×10^{-4} Pa 程度の真空中で、真空容器と導入端子は 350°C 、他の金属とセラミック部品は 450°C で 24 時間以上加熱するガス出しを行った。真空システムはターボ分子ポンプを除いた全て、オープンを用いて 170°C で 48 時間そのベーキングを行った。オープンの中の温度のむらは $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内であった。

イオンポンプは 10^{-9} Pa 台前半以下では殆ど排気しないので、TSP(チタンサブレーションポンプ)だけで排気する方が、(イオンポンプ+TSP)で排気するより、到達圧力を下げられると考えられる。しかし実験装置ではフィラメントのアニール、部品のガス出し、実験用ガスの導入など、圧力が上がる場合が多い。実用的な面から見ると、ガス放出量が極めて少ない(イオンポンプ+TSP)が最適だという考えのもと、排気システムを構成した。ベーキング中と前の排気はターボ分子ポンプを用いて行われた。ベーキングの終了後、ターボポンプと真空容器をつなぐオールメタルゲートバルブを閉め、純クロム酸化膜作製法で処理された極高真空用のイオンポンプと TSP で排気した。ベーキングした後 24 時間で、到達圧力は $4 \sim 6 \times 10^{-10}$ Pa に達した。フィラメント、蛍光スクリーンと電界放出電子源のガス出しを行った後、圧力は少し上がり $7 \sim 8 \times 10^{-10}$ Pa になった。

B. 電界放出電流のショット雑音測定

10^{-9} Pa 台の超高真空下における電界放出電子源からの放出電流の揺らぎには、吸着分子によるフリッカー雑音(Flicker Noise)とショット雑音(Shot Noise)が含まれている。フリッカー雑音は電界放出電子源の表面でガス分子が吸着、表面拡散、脱離等の動的運動をすることで仕事関数 ϕ が変化して発生する。放出電流値 I_{FE} は以下の Fowler-Nordheim 式で表される。

$$I_{FE} \propto \frac{(\mu/\phi)^{1/2}}{(\phi + \mu)} \exp(-C \cdot \phi^{3/2}) \quad (1)$$

ここで C は電子源の大きさ(針先端の曲率)と電界の強度で決められる比例定数、 μ はフェルミレベルである。変動 ΔI は仕事関数の変化 $\Delta\phi$ が小さいとき $\Delta I \propto -\Delta\phi$ になり、仕事関数がゆらぐと電流

はそれに比例して揺らいでしまう。

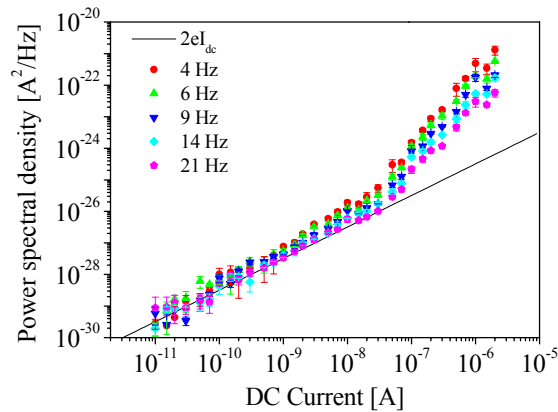


図1. 放出電流ノイズの電力スペクトル密度

吸着分子による電流変動の電力スペクトル密度(Power Spectrum Density: PSD)は電流量の二乗に比例し($N_f \propto I^2$)、周波数のべき乗には反比例($N_f \propto 1/f^\alpha$)することがよく知られている。一方ショット雑音は、その電力スペクトル密度が周波数全領域で一定($N_s = 2eI$, e は電子の電荷の絶対値)の白色雑音である。超高真空領域で電界放出電流の電力スペクトルを観察すると、1kHz 以下の低周波領域ではフリッカー雑音に埋もれてショット雑音は観察できない。Kleint は徹底的な周辺の電極のガス出しのあと 10^{-9} Pa 前半の真空下で 100Hz 以下までショット雑音を測定したと報告し、それは今まで最も低い周波数で行ったショット雑音測定であった。

雑音の測定は(Agilent 4396B)を用いて行った。 7×10^{-9} Pa 程度の極高真空中で W(111)電子源を洗浄した後 1kV 程度の電圧を引き出し電極にかけ、10 pA から 100 μ A までの電界放出電流のスペクトル密度を得た。図1に数十 Hz 以下の低周波で測定したスペクトル密度を示す。4Hz では 10 pA から 1nA までスペクトル密度はショット雑音の理論(実線、 $N_f = 2eI$)とよく合ったが、1nA 以上では理論直線(実線)を上まわる傾向を見せた。高い周波数になるとスペクトル密度の実測値がより広範囲で理論曲線に合い、20Hz 程度では 10 pA から 50nA までほぼ理論と一致した。100 nA 以上におけるスペクトル密度は電流の二乗に比例し、周波数のべき乗には反比例するフリッカー雑音になった。この雑音は洗浄後表面に残っているガス分子、あるいは表面のタングステン原子の動きで発生すると考えられる。

電界放出電子源の表面でのガス分子の吸着量が増えることにつれて、雑音のスペクトル密度は増加し、雑音のスペクトルは平坦なショット雑音的から $1/f^\alpha$ タイプのフリッカー雑音的に変化した。2 日間電子源を 1×10^{-9} Pa の真空で放置すると、吸着により雑音が増加して、 N_f が I^2 に比例するフリッカー雑音の典型的な電流依存性を示した。

C. 放出電流の減少速度を利用した圧力測定

超高真空の圧力は一般的にイオンゲージで測定される。イオンゲージはフィラメントから熱放出される数 mA の電子を残留ガスに衝突させ、イオン化されたガスのイオン電流を測定して圧力を読む。イオンゲージでは熱電子が電極に衝突する時に出る X 線や ESD イオンが雑音を起こす。 10^{-10} Pa 台の極高真空になると、イオン電流が数百 fA レベルに下がり、X 線や ESD イオンによる雑音に埋められ、圧力測定が極めて難しくなる。発生する X 線や ESD イオンを防ぐため巧妙な機構が開発されたが、構造が複雑であり普及していない。 10^{-10} Pa 台の極高真空領域の圧力を測定するには、根本的に違う原理で働く圧力ゲージが必要だとも言える。

吸着量が少なく、仕事関数の増加量 $\Delta\phi$ が元の仕事関数 ϕ_0 に比べて小さいとき式(1)は、下式

$$\log I_{FE} \approx -\frac{3}{2} C \phi_0^{1/2} \Delta\phi + \log I_0 \quad (2)$$

に近似できる。

ここで I_0 は初期の電流値である。N 個の分子が電子源に吸着したとき、分子の電気双極子モーメントを D とすると、仕事関数の変化量 $\Delta\phi=2\pi ND$ である。吸着分子の数 N は圧力 P と時間 t に比例する。放出電流の対数を縦軸に、時間を横軸に取った片対数グラフは理論的には直線になり、その傾きは圧力 P に比例して一定になる。しかし放出電流片対数グラフが長時間直線になったという報告はまだ無かった。

我々は電子源周辺の電子線衝突によるガス出しを行った後、周辺の部品を液体窒素温度に冷却し、放出電流片対数グラフが長時間直線になることを見出すのに成功した。電子源を洗浄した直後、放出電流を 2nA に調整して引き出し電圧を一定に維持し、放出電流の減少の様子を観察した。

$7\times 10^{-10} \sim 3\times 10^{-9}$ Pa の圧力下で測った放出電流の片対数グラフは、200pA の上ではほぼ直線であり、ほぼ完璧に(相関係数 $R^2>0.999$)フィッティングされ、その傾きは圧力に比例する傾向を見せた。作製した極高真空電界放出システムで電流の揺らぎが極めて小さい($\Delta I/I < 0.01\%$)特性を生かして、短時間の片対数グラフの傾きから圧力を測定することも可能であった。2.5 分間 0.5 秒毎に取った 300 個の放出電流データの片対数傾きを換算して得た圧力値 (P_F) は、イオンゲージの測定値が平均値 $P_1=7.5\times 10^{-10}$ Pa を中心に $\pm 10\%$ 以上変動する真空の中で、10 時間測定した P_F の値は平均 5×10^{-10} Pa、標準偏差 10% 以下の分布を見せた。データの個数を 100 個(50 秒間)、50 個(25 秒間)に減らすと標準偏差はそれぞれ 13%、21% に増えた。

6. 今後の展開

さきがけ研究の期間中、電子相関を測るための極高真空電子ビームノイズ測定装置を開発した。本装置を用いた最低周波数ショットノイズの測定は、従来のノイズ測定系では例が無いレベルの感度を示し、今後行う予定の様々なナノ電子源から放出される電子ビームの電子相関測定が、十分可能なことを示唆している。一方、5K 以下を実現する極低温機能は、現在組み立てを完了しテスト中である。今後は、この極低温機能とノイズ測定系を組み合わせることで、最近装置に設置した二つの電子検出器を用いて同時計数率を測定し、超伝導電子源からのクーパー対放出の有無を確認する予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表 11件

1. B.Cho, T. Ishikawa and C.Oshima, "Coherent and intense multibeam generation by the apex of sharp nano objects: Electron half-circular prism" *Applied Physics Letters* **91(16)**, 163102 (2007) and *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology* **V16**, Issue **18**.
2. B.Cho, T. Itagaki, T. Ishikawa, and C.Oshima, "Measurement of pressure in 10^{-10} Pa range from the damping speed of field emission current" *Applied Physics Letters* **91(1)**, 012105(2007).
3. B.Cho, T. Itagaki, T. Ishikawa, E. Rokuta, and C.Oshima, "An XHV-FEM for study on the inherent fluctuation of field emission" *Journal of Vacuum Science and Technology B* **25**, 1420 (2007)
4. B.Cho, T. Itagaki and C.Oshima, "Record of the lowest frequency shot noise measurement below 10 Hz" *Applied Physics Letters* **91(5)**, 051916 (2007).
5. Tsuyoshi Ishikawa, Tomohiro Urata, Boklae Cho, Eiji Rokuta, Chuhei Oshima, Yoshinori Terui, Hidekazu Saito, Akira Yonezawa, and Tien T. Tsong, "Highly efficient electron gun with a single-atom electron source", *Applied Physics Letters* **90**, 143120 (2007) and *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology* **V15**, Issue **16**.
6. E. Rokuta, T. Itagaki, D. Miura, T. Moriyama, T. Ishikawa, B.-L. Cho, T.Y. Fu, T.T. Tsong, and C. Oshima "Single-atom coherent field electron emitters for practical applications to electron microscopy: Buildup controllability, self-repairing function, and demountable characteristic", *Appl. Surf. Sci.* **252** (2006) 3686-3691
7. T.Itagaki, E.Rokuta, H.-S. Kuo, K.Nomura, T.Ishikawa, B.-L.Cho, I.-S. Hwang, T.T.Tsong, and C.Oshima "Stabilities in field electron emissions from noble-metal covered W nanotips: Apex structure dependence" *Surface and Interface Analysis* **39**, 299(2006).

8. Chuhei Oshima, Eiji Rokuta, Takahiro Itagaki, Tsuyosi Ishikawa and Bokurai Cho, Hong Shi Kuo, Ing-Shouh Hwang and Tien T. Tsong, "Demountable Single-Atom Electron Source", e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, **3**, 412(2005)
9. C. Oshima, E. Rokuta, and B. Cho, "Highly Coherent Electrons Emitted from Nano-scaled Areas", CHINESE JOURNAL OF PHYSICS VOL. **43**, 145(2005).
10. E. Rokuta, T. Itagaki, D. Miura, T. Moriyama, T. Ishikawa, B.-L. Cho, T. Y. Fu, T. T. Tsong, and C. Oshima "Atomic-scale field emitter with self-repairable function and thermodynamically stable structure: FEM Study on Pd-covered nanopyramids on W<111> tips" Applied Surface Science **251** (2005) 205-209.
11. 六田英治、石川剛、趙福来、H. S. Kuo, I. W. Hwang, T. T. Tsong, 大島忠平、"単原子電子源の電子放出特性"、顕微鏡 **42**, 55(2007).

(2)特許出願

研究期間累積件数:1件

発明者:趙福来

発明の名称: 電子線源装置

出願人: 独立行政法人科学技術振興機構

出願日:2006年11月30日

(3)その他の成果

招待講演 3件

1. B.Cho, T. Ishikawa, and C. Oshima, "Fluctuations of field emission currents under extreme high vacuum", 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07.
2. 趙福来 "極高真空電界電子放出と韓国の極高真空技術" 第54回応用物理学関係連合講演会(2007年春季), 27p-ZX-5.
3. 趙福来、板垣考洋、石川剛、六田英治、大島忠平 "極高真空下でのタングステン<111>電界放出電子源の電流揺らぎ" 第4回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム(2007).

学会発表 8件

1. 板垣考洋、趙福来、石川剛、六田英治、大島忠平 "タイトル 10Hz 以下における極高真空電界放出電子ショットノイズ測定" 第54回応用物理学関係連合講演会(2007年春季), 29p-ZV-7.
2. 裏田友洋、趙福来、石川剛、六田英治、野々垣良三、米澤彬、齋藤秀一、大島忠平 "単原子電子源の走査型電子顕微鏡への応用" 第47回真空に関する連合講演会(2006), 7P-44.
3. 趙福来、Taekyun Ha、Sukmin Chung、Jingon Kim "ステンレス表面上の純クロム酸化膜作製とその応用" 第47回真空に関する連合講演会(2006), 8P-9.
4. 趙福来、板垣考洋、裏田友洋、石川剛、六田英治、大島忠平 "極高真空電界電子顕微鏡の作製とテスト" 第47回真空に関する連合講演会(2006), 9Ba-1.
5. 裏田友洋、石川剛、趙福来、六田英治、野々垣良三、米澤彬、齋藤秀一、大島忠平 "単原子電子源の走査型電子顕微鏡への応用(II)" 第67回応用物理学学会学術講演会(2006年秋季), 31p-ZM12.
6. 石川剛、裏田友洋、趙福来、六田英治、鄭天佐、野々垣良三、齋藤秀一、米澤彬、大島忠平 "実用単原子電界電子源" 第124回研究会 マイクロビームアナリシス第141委員会(2006).
7. 石川剛、裏田友洋、趙福来、六田英治、板垣考洋、野々垣良三、米澤彬、齋藤秀一、鄭天佐、大島忠平 "単原子電子源を適用した電子銃の作製とその評価" 第53回応用物理学関係連合講演会(2006年春季), 25a-F10.

8. 裏田友洋、趙福來、石川剛、米澤彬、齋藤秀一、大島忠平 “実用的極高真空システムの開発と応用” 第 53 回応用物理学関係連合講演会(2006 年春季), 23a-T10.