

機関番号：71301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310070

研究課題名(和文)アモルファス合金の常温電界効果型トランジスターの開発研究

研究課題名(英文)Research for room temperature-amorphous alloy field effect transistor

研究代表者

福原 幹夫 (Fukuhara, Mikio)

公益財団法人電磁材料研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30400401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：アモルファス合金電界効果型トランジスター(FET)の常温特性を測定した。FETは非磁場中 $V_g=0.28$ mVの周期で単電子クーロン振動を、 $V_g=2.35$ μ Vの周期でFabry-Perot干渉効果を、磁場中 $V_g=0.26$ mVの周期でファノ効果を示した。島間のギャップエネルギーは熱雑音の265倍大きく常温駆動を保證した。NMR、陽電子消滅、中性子解析の結果、Hはクラスター間にあり量子ドットトンネリングのパスとなる。標準MD計算より、クラスター集団Ni₄₈Zr₄₀Nb₂₄の局所構造モデルを提案した。以上の現象はクラスターの[130]方向に並んだ原子鎖の低次元成分間の電荷密度波により説明された。

研究成果の概要(英文)：The I_d - V_g characteristics of an amorphous alloy FET were measured in nonmagnetic and magnetic fields at room temperature. The transistor reveals one-electron Coulomb oscillation with period of 0.28 mV, Fabry-Perot interference with period of 2.35 E-6 V in nonmagnetic field, and Fano effect with period of 0.26 mV for V_g and 0.2 T for magnetic field. Since the gap energy is 265 times larger than thermal energy (25.6 meV) at room temperature, this intriguing phenomenon does not violate an essential principle. NMR, positron annihilation spectroscopy and neutron scattering studies show that H occupation between Ni atoms of neighboring icosahedral clusters provides a distinct model of quantum dot tunneling. From standard MD calculation, we construct a local structural model for amorphous alloys. These phenomena could be explained by charge density waves that the low-dimensional component of clusters, in which the atoms are lined up in chains along the [130] direction.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：アモルファス合金 電界効果型トランジスター 単電子トンネリング クラスター エレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

(1) 応募者らがその以前に発見した Ni-Nb-Zr-H 系アモルファス合金の『常温クーロン振動現象 (J. Appl. Phys., **105**, 063715 (2009))』を電界効果型トランジスタ (FET) で体系化することで、半導体代替次世代の単電子トンネリングの実用化素子を開拓することであった。

(2) 単電子トンネリング現象に基づく常温 FET 効果は約 2 nm のクーロン島をもつカーボンナノチューブを用いた数例の報告が既になされていたが、本系のようにアモルファス合金系では初めてである。

2. 研究の目的

(1) Ni-Nb-Zr-H 系アモルファス合金電界効果型トランジスタ (AAFET) の常温における FET 特性を精密測定し、更に強磁場下での AB 効果とクーロン振動の組み合わせられたファノ効果、更には Fabry-Perot (FP) 干渉効果を検証する。

(2) 常温クーロン現象の理解を得る為、シミュレーション法により Ni-Nb-Zr 系 20 面体クラスターの安定性と 20 面体クラスターから構成された原子集団の解析を行う。更にナノメートルオーダーのクラスター関与の珍奇な現象を電荷密度波 (CDW) の観点から理論化する。

3. 研究の方法

(1) $(\text{Ni}_{0.42}\text{Nb}_{0.28}\text{Zr}_{0.3})_{90}\text{H}_{10}$ アモルファス合金に金線のソース、ドレイン電極をスポット溶接し、上部に Al_2O_3 酸化物を 10 nm 被覆させた AAFET を作成し、ノイズ除去のため 500 kHz 以下と 1 GHz 以上の周波数フィルターを設置し 6.3 mV/s ステップで -0.5 ~ +0.5 mV 範囲のゲート電圧を直流バッテリー電源により駆動させ、0-60 mV のドレイン電圧で常温における FET 特性を計測した。更に 0-2 T の強磁場下でのファノ効果と Fabry-Perot (FP) 干渉効果を三次元クーロンダイヤモンドの解析により追及した。

(2) 1.8-300 K 間の核磁気共鳴 (NMR)、陽電子消滅解析、Ni-Nb-Zr-D 系アモルファス合金の常温中性子解析により Ni-Nb-Zr 系クラスター間の水素の位置、原子空孔の大きさ及び分布を究明した。

(3) 第一原理密度関数法のシミュレーションにより Ni-Nb-Zr 系 20 面体クラスターから成る合金クラスターの原子模型と断熱ポテンシャルエネルギー解析を行い、標準動力学近似法で 112 個の原子集団の解析を行った。

4. 研究成果

(1) FET 効果と FP 効果

図 1 (a) は $(\text{Ni}_{0.42}\text{Nb}_{0.28}\text{Zr}_{0.3})_{90}\text{H}_{10}$ の AAFET 概略

図、図 (b) は 3 次元のクーロンダイヤモンドを示す常温の 3 次元 I_d - V_d - V_g 図 (c) は 2 次元 V_d - V_g 断面で V_d に対する I_d の周期的振動であり、これらは明確な単電子トンネリングの AAFET を示している。図 (d) は島間距離に対する理論的クーロンエネルギー (6.8 eV) とクーロン温度 (78, 678 K) である。本研究の 0.56 nm のクラスターから成る試料は赤丸点に対応し常温で熱雑音の 25.6 meV 以上であり、常温駆動の妥当性を説明している。

本研究結果は従来の半導体材料は言うに及ばず、カーボンナノチューブの FET より常温安定性が高く 100 μA オーダーのゲート電圧駆動のため、消費電力は従来の 1/1000 以下である。この理由は島の大きさが 0.5 nm と従来より 1/1000 以下であることによる。また砒素のような有害物質を用いていないので環境負荷が小さく、世界トップの成果である。

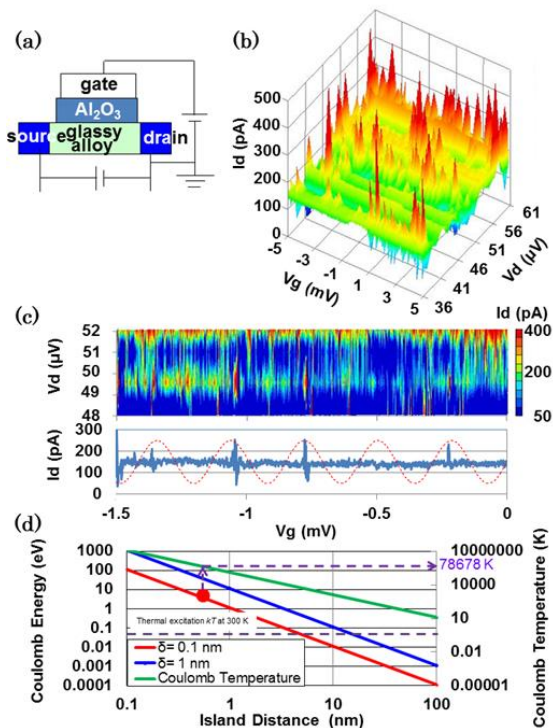


図 1 (a) AAFET デバイスの概略図。(b) 常温の 3 次元 I_d - V_d - V_g 図。(c) 2 次元 V_d - V_g 断面で V_d に対する I_d の周期的振動。(d) 島間距離に対する理論的クーロンエネルギーとクーロン温度。赤丸は本系の 0.56-nm クラスター。

図 2 (a) は常温 AAFET の 2 次微分導電率 $d^2 I_d / d V_d^2$ の等高線、図 (b) は V_d に対する 1 次微分導電率 $(d I_d / d V_d)$ であり、メゾスコピック量子ドットの量子効果と波動性が同時に起こる FP 干渉効果を示している。それも図 (c) の $V_d = 52.5 \mu\text{V}$ での $(d I_d / d V_d)$ プロットが示すように周期的である。

(2) ファノ効果

強磁場下 0-2 T までの AAFET の常温 3 次元

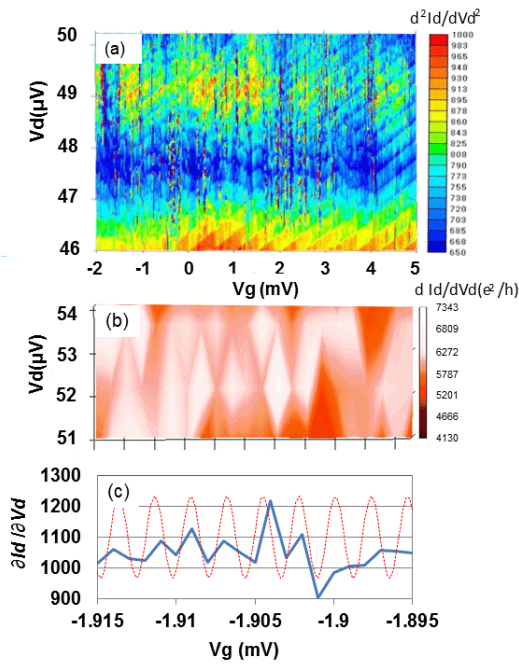


図2 常温 AAFET の 2 次微分導電率 $\frac{\partial^2 I_d}{\partial V_d^2}$ の等高線(a)と V_d に対する微分導電率 $(\frac{\partial I_d}{\partial V_d})$ (b) 及び(c) $V_d = 52.5 \mu\text{V}$ での $(\frac{\partial I_d}{\partial V_d})$ プロット

I_d - V_g - B 図と 周期的ダイヤモンド構造を図 3 (a) と (b) に各々図示する。図 (c) は 2.6, 2.7 と 3.0 T に対する G - V_g 曲線であり、図 (d) は 9.81, 9.83 と 9.84 mV での G - B 曲線である。AB 効果とクーロン振動の組み合わせられたファノ効果を明確に示している。この結果は FP 効果との関連で興味深く、将来の量子コンピュータへの魁となるであろう。

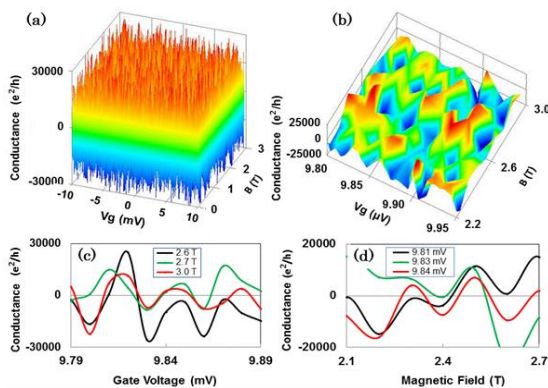


図3 AAFET の常温 3 次元 I_d - V_g - B 図(a) 周期的ダイヤモンド構造(b)。2.6, 2.7 と 3.0 T に対する G - V_g 曲線(c) と 9.81, 9.83 and 9.84 mV での G - B 曲線(d)

(3) 水素原子の配置とトンネリング

FET の基礎となるクラスター間の水素原子の配置とトンネリングの関係をも求める為、NMR、中性子及び陽電子消滅解析を行った。その結果より推論される 4 つの 20 面体クラスタの配位図を図 4 (a) に、クーロンドット

モデルを図 (b) に示す。クーロンドットトンネルが(クラスターNi-H)-(クラスターNi) 結合で起こっていることを示している。つまり島は従来品より 1/100 以下の 0.55 nm の $\text{Ni}_5\text{Zr}_5\text{Nb}_3$ のクラスターである。

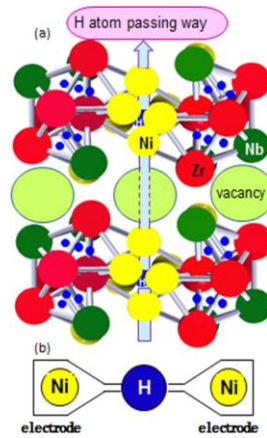


図4 4 つの 20 面体ラスタの配位図 (a)とクーロンドットトンネルモデル(b)

(4) クラスター原子集団の解析

第一原理シミュレーション法により 8 個の 20 面体からなる 1 1 2 個の原子 $\text{Ni}_{48}\text{Zr}_{40}\text{Nb}_{24}$ 合金の局部構造モデル候補を作成した(図 5)。20 面体の並び方により 2 つの種類に分かれ、20 面体を多く残す非晶質相 (a)-(d) と 20 面体から面心 8 面体への結晶化に対応した周期的相 (e) (f) に分かれ、後者の全エネルギーは前者より低い。Nb 原子のクラスターリングが結晶化防止に重要な役割を果たしていることがわかった。クラスターの構造は現在未だ十分に説明が進んでいない。

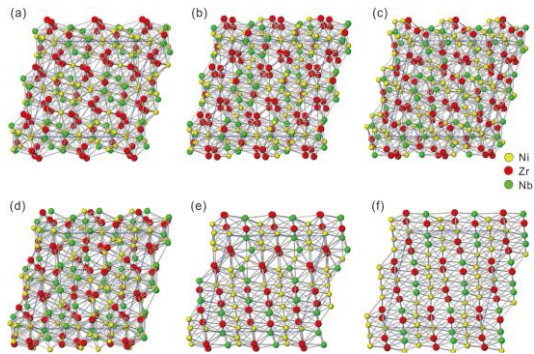


図5 20 面体の並びの違いによる 6 種類の菱面体セルの $\text{Ni}_{48}\text{Zr}_{40}\text{Nb}_{24}$ 最適構造。顕著な構造差が (a)-(d) と (e)、(f) に現れる

(5) ナノクラスターにおける CVD 電子輸送模型

ナノスケールサイズの $\text{Ni}_5\text{Zr}_5\text{Nb}_3$ クラスターを含有する Ni-Nb-Zr-H アモルファス合金は本研究の電流誘起電圧振動 (クーロン振動) 以外に、金属/絶縁体転移、巨大電気容量体、良伝導性を持つ電子雪崩の 4 つの電子現象を示した。これらの現象の統一的理解として

クラスターの[130]方向に原子が鎖状に並んだ低次元成分に起こる電荷密度波による電子輸送現象であると説明された。ナノスケールオーダーのメゾスコピック系の格子を持たないアモルファス合金へのCDWの適用は世界で初めてのケースである。

(6) 総括

サブナノメートルサイズのクラスターを持つ Ni-Nb-Zr-H 系アモルファス合金の電界効果型トランジスタにおいて、単電子トンネリング、FP 干渉効果、ファノ効果等が観察され、メゾスコピック系物理の新しい科学の領域が展開されつつある。今後は期待される。3年間の「基盤研究B」の目的は達成されたと思う。

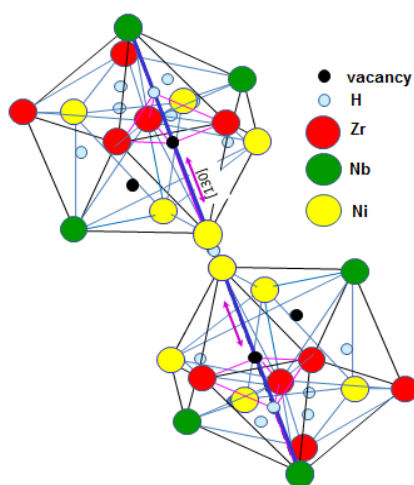


図6 20 面体クラスターの<130>方向の青線上に並んだ鎖 (Nb—4 面体サイト H—8 面体サイト空孔—Ni) に起こる CDW

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

1. M. Fukuhara, H. Yoshida, and H. Kawarada. "Effect of hydrogen and cluster morphology on electronic behavior of Ni-Nb-Zr-H glassy alloys with subnanometer-sized icosahedral $Zr_5Ni_5Nb_3$ clusters," Euro. Phys. J. D, 査読、**67**(2), 40-1-40-4. (2013).
2. R. Y. Umetsu, H. Yoshida, M. Fukuhara, S. Yamaura, M. Matsuura, T. Sasaki, T. Sekiguchi, M. Saito, J. Mizuno and H. Kawarada, "Effect of hydrogen absorption on electrical transport properties for $Ni_{36}Nb_{24}Zr_{40}$ amorphous alloyribbons," Mater. Trans., 査読、**54** (8), 1339-1342 (2013).
3. M. Fukuhara and Y. Umemori, "Electronic transport behaviors due to charge density waves in Ni-Nb-Zr-H glassy alloys," Int. J. Mod. Phys. B, 査読、**27**(28), 1350164-1-1350164-10

(2013).

4. R. Y. Umetsu, H. Yoshida, M. Fukuhara, S. Yamaura, M. Matsuura, T. Sasaki, T. Sekiguchi, M. Saito, J. Mizuno and H. Kawarada, "Transport properties of Ni-Nb-Zr-glassy alloys and hydrogen absorbed alloys," Open J. Metals. 査読、**3** 45-49 (2013).
5. N. Fujima, T. Hoshino and M. Fukuhara, "Local structures and structural phase change in Ni-Zr-Nb glassy alloys composed of $Ni_5Zr_5Nb_3$ icosahedral clusters," J. Appl. Phys., 査読、**114**, 063501 (2013).

[学会発表] (計 1 件)

1. M. Fukuhara, H. Yoshida and H. Kawarada, "Room-Temperature Glassy Alloy Field-Effect Transistor with Particle and Wave Natures," International Conference on Quantum Metrology 2013, May 15th-17th, 2013, Poznan, Poland, P. 24.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：電解効果型トランジスタ及び集積回路
発明者：福原幹夫、佐々木敏夫、吉田肇、井上明久、川原田洋、関口哲志、斉藤美紀子、水口潤

権利者：東北大学、早稲田大学

種類：国際特許

番号：PCT/JP2010/065234 P

出願年月日：2010 年 9 月 6 日

国内外の別：国外

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

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

(福原幹夫)

研究者番号：30400401

(2) 研究分担者

(藤間信久)

研究者番号：30219042