

高度集積電子デバイス等に向けたナノ材料用特性評価システムの開発

森田寛之*¹ 鈴木浩之*¹ 廣島啓太*² 増淵維摩*³

Development of an Assessment System of Properties of Nano Materials for High Integrated Devices and etc.

MORITA Hiroyuki*¹, SUZUKI Hiroyuki*¹, HIROSHIMA Keita*², MASUBUCHI Yuma*³

抄録

高集積度デバイスの微細化・高度化に伴い、デバイスの発熱・排熱は喫緊の課題である。デバイス上の微細配線では量子効果による物性値に大きな変化があると予想されている。そこで、ナノ加工により測定用の電気配線したナノワイヤーを用いて、Labviewやデジタルマルチメーター等を用いて3 ω 法による熱伝導率を評価する測定システムの開発を試みた。

キーワード：3 ω 法、ナノワイヤー、ナノ加工、Labview

1 はじめに

産業の高度化に伴い、高性能かつ低消費電力の高集積度デバイスの微細加工が進められている。デバイス内のトランジスタやFET等の個々の半導体では低い消費電力であるが、数千万～数億個の半導体が集積されたデバイスとしての消費電力は増大し、発生する熱も大きくなる。そのため、デバイス設計時の半導体の配置や配線を適切に行うことで、熱の局所的発生を抑え、効率的な排熱が重要となる。このとき、各材料の熱物性値が重要であり、特に数十nm以下の超微細形状では量子効果による物性値の変化が現れると報告されていることから^{1)~3)}、今後ナノ加工された材料の熱特性の評価を求められることが予想される。

そこで、本研究では、微細なワイヤー形状の電気伝導体の熱特性を評価することができるシステムの開発を進める。

2 3 ω 法の原理

両端を固定して宙に吊したワイヤーの温度 T_0 の時の抵抗を R_0 とすると、温度変化 T のワイヤーの抵抗 R_T は、

$$R_T = R_0(1 + \alpha_T T) \quad (1)$$

となる。係数 α_T は、ワイヤー材料の温度係数を示す。ワイヤーの両端に熱容量の大きいブロックを接触させ、ワイヤーに実効値 I_0 、角周波数成分 ω の交流電流 I を通電したとき、ワイヤー両端の電圧 V_R は

$$V_R = IR_T = I_0 R_0 (1 + \alpha_T T) \sin(\omega t) \quad (2)$$

となる。

ワイヤーに発生するジュール熱 W は、温度変化による抵抗変化が非常に小さいもの ($\alpha_T T \ll 1$) と考えると、以下の式となる。

$$W = V_R I = \frac{I_0^2 R_0}{2} (1 - \cos(2\omega t)) \quad (3)$$

ジュール熱 W と温度変化 T の関係は

$$T \propto W \quad (4)$$

とみなせることから、温度変化 T は

*¹ 技術支援室 電気・電子技術担当

*² 技術支援室 材料技術担当

*³ 事業化支援室 製品開発担当

$$T = T_0(1 - \cos(2\omega t)) \quad (5)$$

となる。 T_0 は定数である。

以上のことから、電圧 V_R は下記の式となる。

$$\begin{aligned} V_R &= IR_T = I_0 R_0 \sin(\omega t)(1 + \alpha_T T) \\ &= I_0 R_0 \sin(\omega t)(1 + \alpha_T T_0(1 - \cos(2\omega t))) \\ &= V_{1,x} \sin(\omega t) + V_{1,y} \cos(\omega t) + V_{3,x} \sin(3\omega t) \quad (6) \end{aligned}$$

式 (6) のように、温度変化により角周波数成分 3ω の電圧が発生する。 $V_{3,x}$ を測定し、試料のサイズ、温度係数の値から解析することにより熱伝導率を求めることが可能となる^{4)~6)}。

3 試験方法

本研究では、計測・制御を行うことで熱物性を評価するための評価システムの構築を行った。次に測定対象となるワイヤー形状の試料作製およびナノ加工による電気配線、ワイヤーを宙吊りにするためのエッチングを行った。

3.1 評価システムの概要

本評価システムは主に、(1) 温度制御、(2) 角周波数 ω の交流電流通電、(3) 角周波数 3ω の交流電圧計測の機能を有するものとした。本研究では、図1のようなフローチャートに基づき、図2に示す電子計測器間を GPIB で接続し、アプリケーション作成に Labview を用いて評価システムの開発を試みた。

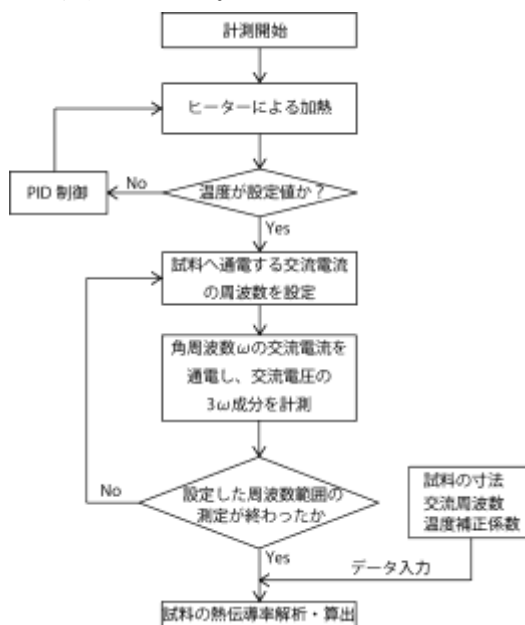


図1 評価システムのフローチャート

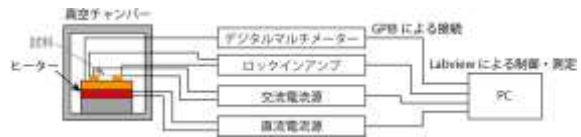


図2 ナノ材料特性評価システムの概略図

さらに、計測対象の試料への適切な(1)電気接合、(2)電気配線、(3)試料露出のためのエッチングの技術の開発も行った。測定試料として、熱伝導率が性能評価のパラメータであり、加工を行ったことのある⁷⁾石英ガラスに覆われたビスマスナノワイヤーを用いることにした。試料の加工完成図を図3に示す。

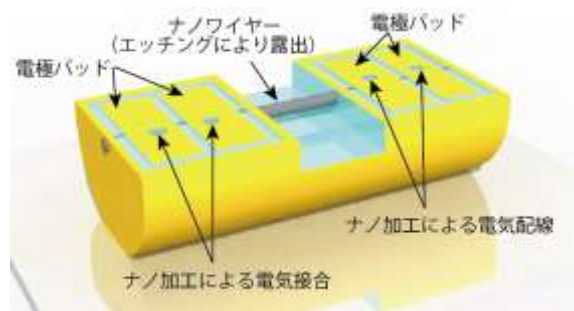


図3 試料の加工完成図

3.2 試料の作製

図4のように、直径200~300nmの空孔を有する石英ガラステンプレートを高圧下で溶融したビスマスを空孔に圧入・冷却し、成形・研磨を行い、ビスマスナノワイヤーを作製した(図5)。



図4 ビスマスナノワイヤーの作製方法

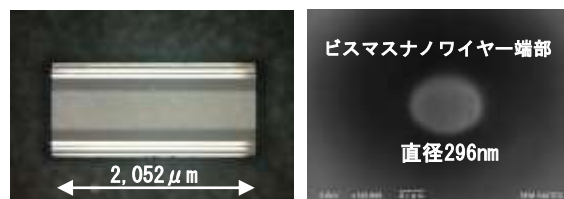


図5 作製したビスマスナノワイヤー

作製した試料は、ビスマスナノワイヤー側面表面から数 μm 厚の石英ガラスを残して研磨し

た。その後、石英ガラスに覆われた直径約 200～300nm のビスマスナノワイヤーに電気配線を行うため、下記の (1)～(3) の加工を行った。

- (1) イオンプレATING装置を用いて、研磨した試料にチタン、銅の順で成膜した。
- (2) 対象物へ Ga イオンビームを照射して局所的に切削するミリング機能を有する集束イオンビーム装置により、石英ガラスに覆われたビスマスナノワイヤー側面をナノ加工により露出させた。次に露出した側面とチタン/銅電極膜間を図 6(a)～(d)のようにタングステン膜成膜にて電気配線を行った。
- (3) チタン/銅電極膜が電極パッドとなるよう、パターン加工を施した。

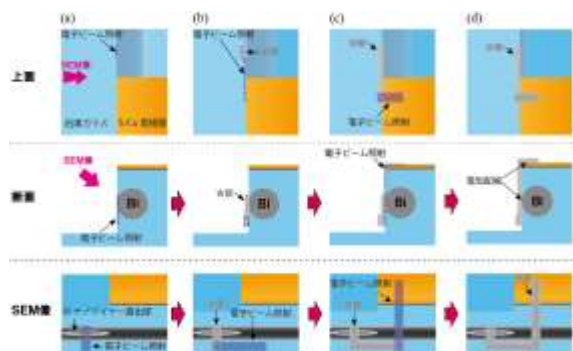


図 6 ビスマスナノワイヤーへの電気配線概略図

4 結果及び考察

4.1 ペルチェモジュールを用いた温度制御システム

本評価システムでは、電圧測定を行うことでジュール熱による電気抵抗の変化を評価する方法をとった。そのため、測定試料に印加される温度を精密に制御する必要があることから、図 7 のとおり、ペルチェモジュールを用いて温度制御を行った。

また、電気エネルギーの供給源には直流電源 (Agilent 製 E3643A) を用い、温度測定に K 型熱電対とデジタルマルチメーター (Keithley 2110) にて測定し、計測・制御ソフトである Labview を用いた。PID 制御により温調しながら 1 秒間隔でサンプリングを行った。

評価プログラムを用いて温度設定を 300K にし

た時、ペルチェ素子表面の温度の計測値は 299.9～300.0K を示した。

また、デジタルマルチメーターで得られた電流、電圧値を一定時間間隔で取り込み、さらに抵抗値を計算して Excel ファイルに計測データを書き込み可能なプログラムを作成した。現在開発中の Labview によるプログラム画面を図 8 に示す。

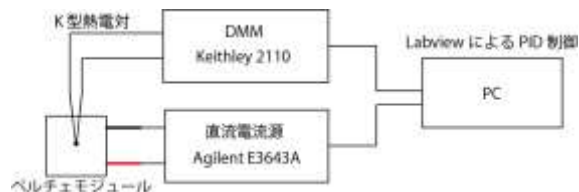


図 7 ペルチェモジュールの温度制御概略図

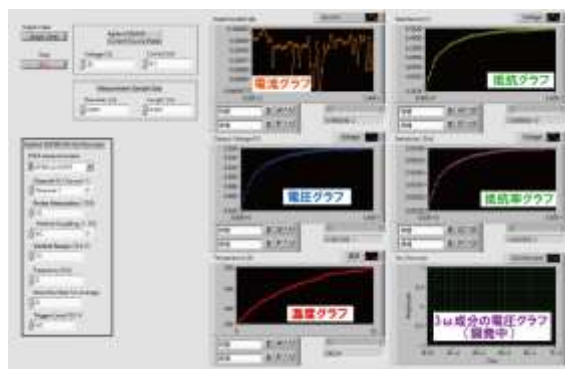


図 8 開発中の Labview プログラム画面

4.2 集束イオンビーム装置を用いた電気配線加工

図 6 のとおり、集束イオンビーム装置 (日本電子 JIB4600F) を用いて作製したビスマスナノワイヤーにナノ加工を行い、電圧測定のための電気配線を行った。集束イオンビームの加速電圧や照射電流を調整し、ミリングを行いながら、SEM にてビスマスナノワイヤーの側面が露出したことを確認した。その後、タングステンへキサカルボニルのガスを流しながら加速電圧や照射電流を調節した電子ビームを照射して局所的に成膜を行い、チタン/銅電極膜—露出させたビスマスナノワイヤー間の電気接続を行った。ナノ加工を行った試料の SEM 像を図 9、さらにチタン/銅電極膜のパターン加工した試料の写真を図 10 に示す。

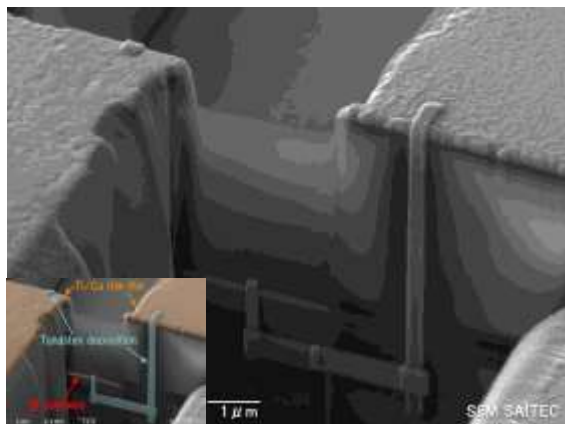


図9 電気配線を行った試料 SEM 像



図10 パターン加工を行った試料写真

5 まとめ

以上、本研究結果を下記に示す。

- (1) PID 制御により、ペルチェモジュールの温度制御を行い、計測データを一定間隔で Excel データに書き込み可能な評価システムを構築した。
- (2) 石英ガラスに覆われたビスマスナノワイヤーを作製し、ナノ加工およびタングステン膜成膜により電気配線を行った。

今後、角周波数 3ω 成分の交流電圧を測定するため、ロックインアンプを用いて、角周波数成分 3ω の信号を取得する機能を評価システムに追加し、測定データから熱伝導率を解析できるよう評価システムの開発を進めていく。

さらに、エッチングおよびナノ加工を行うことでビスマスナノワイヤーの熱伝導率が評価できるように試料を作製・加工し、本開発プログラムを用いて熱伝導率の評価が可能か検討する。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、御指導いただきました埼玉大学の長谷川靖洋准教授に感謝の意を表します。

- 1) Yu-Ming Lin, Xiangzhong Sun, and M. S. Dresselhaus: Thermoelectrical investigation of thermoelectric transport properties of cylindrical Bi nanowire, *Phy. Rev. B*, 62, 7, 4601 (2000)
- 2) Yasuhiro Hasegawa, Masayuki Murata, Daiki Nakamura and Takashi Komine: Reducing thermal conductivity of thermoelectric materials by using a narrow wire geometry, *JJAP*, 106, 0637703 (2009)
- 3) L.D. Hicks and M. S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* 47, 12727 (1993)
- 4) Chris Dames and Gang Chen: 1ω , 2ω and 3ω methods for measurements of thermal properties, *Rev. Sci. Instrum.*, 76124902 (2005)
- 5) L.Lu. Yi and D. L. Zhang: 3ω method for specific heat and thermal conductivity measurements, *Rev. Sci. Instrum.*, 72, 7, 2996 (2001)
- 6) Yasuhiro Hasegawa, Masayuki Murata, Fumiaki Tsunemi, Yusuke Saito, Katsuhito Shirota, Takashi Komine, Chris Dames and Javier E. Garay: Thermal Conductivity of an Individual Bismuth Nanowire Covered with Quartz Template Using a 3-Omega Technique, *J. Electron. Mater.* 42, 2048 (2013)