

論 文

伝送線路モデル (TLM) による高精度低抵抗抵抗器の電極接触抵抗の評価

上村 喜一^{†a)} 岡田 伸介[†] 中尾 真人[†] 小沼 義治[†]
 山下 昌三^{††}

 Characterization of Contact Resistance of Low Value Resistor
 by Transmission Line Model (TLM) Method

Kiichi KAMIMURA^{†a)}, Shinsuke OKADA[†], Masato NAKAO[†], Yoshiharu ONUMA[†],
 and Shozo YAMASHITA^{††}

あらまし 伝送線路モデル (TLM) を用いて電極部分の接触抵抗を、全抵抗から分離して測定・評価した。抵抗体として Ni-Cr 合金または Cu-Ni 合金を用い、銅 (Cu) の電解めっきにより電極を形成した試料について測定した。電極金属の抵抗も考慮した伝送線路モデルを用いた理論値を導くとともにこれを使った抵抗値の計算値を測定結果と比較した。その結果、電極金属の面抵抗を無視した場合、単位面積当りの接触抵抗は、Cu と Ni-Cr 合金の間で $2 \rightarrow 3 \times 10^{-9} \Omega \text{m}^2$ 、Cu と Cu-Ni 合金の間で $2 \times 10^{-10} \Omega \text{m}^2$ と概算された。温度特性を含めた検討から低抵抗かつ高精度を要求される抵抗器では、電極部分の性能が特性を支配することが示された。

キーワード 低抵抗, 高精度抵抗, 接触抵抗, 伝送線路モデル, ニクロム

1. ま え が き

近年、各種電源の仕様に対する高精度化が進むにつれ、電流検出用のより高精度で低抵抗な抵抗器の開発が求められている。コンピュータをはじめとする、集積回路等の半導体素子を用いた各種電子機器はすべて直流電源を必要としており、大規模化、高性能化に伴ってより大容量で安定度の高い直流電源が求められているが、直流電源の高性能化には電流の制御が不可欠であり、このための電流検出には極めて抵抗の低い高精度抵抗器が必要とされている。抵抗両端の電位差で電流を検出する方法は、構成が単純で安価かつ正確であることから広く用いられているが、抵抗での電力損が

避けられず、近年の大電流化に伴ってより値の低い電流検出用高精度抵抗器が必要とされている。

このような電流検出用低抵抗抵抗器は、現在既に製品として市販されているが十分な性能とはいえない。電流検出に用いるためには、抵抗値自体の精度に加えて、その抵抗温度係数 (TCR: Temperature coefficient of resistance) が十分に小さいことが必要とされる。材料自体では十分低い TCR が得られているが、製品とした場合にははるかに大きな値となることが商品開発の問題点となっている。ニクロムやマンガンなどそれ自体は既に抵抗材料として十分に調べられており、必要とされる抵抗値や TCR を実現できる特性を備えている。しかしながら、これを抵抗器として製品化した場合にとりわけ TCR が著しく大きくなることが指摘されている。この現象は電極とその接触面に起因すると考えられる。

低抵抗の精度を制限する要因が電極部分にあると考えられるが、明確な測定結果は報告されていない。電極部分の接触抵抗は、主にトランジスタ、FET、IC などの半導体素子の特性を制限する要因として問題

[†] 信州大学工学部, 長野市

Department of Electrical and Electronic Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano-shi, 380-8553 Japan

^{††} KOA 株式会社, 長野県

KOA CORPORATION, Earth Wing In Pine Park, 14016 Oaza Naka-minowa, Minowa-machi, Kamiina-gun, Nagano-ken, 399-4697 Japan

a) E-mail: kamimur@gipwc.shinshu-u.ac.jp

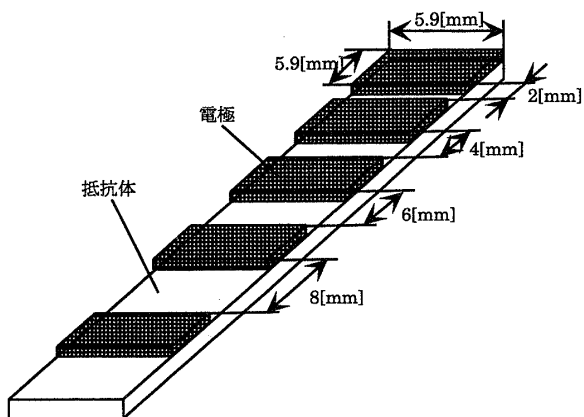


図1 電極部分の抵抗値測定用試料の形状

Fig.1 Structure and size of the sample.

にされ、伝送線路モデル (TLM: Transmission Line Model) と呼ばれる方法で計算されている [1], [2]. しかし、一般に半導体素子では電極の抵抗は、半導体の抵抗に比べ著しく小さいので電極金属の面抵抗は考慮されていない。しかしながら、 $100\text{m}\Omega$ 以下の公称抵抗値の抵抗器では電極金属の抵抗値も無視できないと考えられる。

そこで、電極間距離を変えた試料を用いて電極部分の抵抗を抵抗体の全抵抗から分離して測定するとともに、電極部分の面抵抗を考慮したモデルを用いて抵抗器の抵抗値の理論計算を行い、計算値と測定値を比較することにより単位面積当たりの接触抵抗の値を求め、実際に低抵抗精度を制限している要因について検討した [4]. 電極金属の抵抗も考慮した伝送線路モデルは本論文において新たに提案されたものである。また室温と 100°C における抵抗値を測定し抵抗体の TCR と電極部分の TCR をそれぞれ独立に求めて検討した。

2. 試料の形状と測定方法

抵抗体だけの部分の抵抗 R_B と電極部分の抵抗 R を分離するには、図1のような試料を用いるのが最も簡単かつ確実である [3], [5].

幅 6mm の帯 (リボン) 状の抵抗体上に、電解めっき法で正方形の電極を設けた試料を作製した。電極の形状はすべて等しく $6 \times 6\text{mm}$ の正方形とし、電極間隔を 2mm からそれぞれ 2mm 間隔で 8mm まで増した試料を作製した。

それぞれ隣り合う電極間に電流端子から電流を流し、その間の電位差を電圧端子で測定した。電流値は標準抵抗を電流端子、電極間に挿入し、その間の電位差から算出した。標準抵抗の電圧の測定には入力インピー

ダンスの高いエレクトロメータを用い、電極間の電圧の測定にはデジタルマルチメータを使用した。これらの計器はそれぞれ5けた、6けたの値を読み取ることができる。

抵抗体として Ni-Cr リボンと Cu-Ni リボンを用いて図1に示した形状の試料を作製した。この試料のそれぞれの電極間抵抗値を測定することにより、抵抗体自体の抵抗と電極部分の抵抗を分離して測定できる。 0.1A から 0.8A の範囲で供給電流を与え、電流供給端子と電圧測定端子を分けたいわゆる4端子法を用いて抵抗測定を行った。

抵抗温度特性の評価のために室温と 100°C で抵抗測定を行い、比較した。室温での測定は通常の室内環境で行い、 100°C での測定にはオイルバスを用いた。温度測定は、通常の温度計をオイルバスに挿入して行った。温度設定の精度はおよそ $\pm 2^\circ\text{C}$ である。

3. 電極間抵抗の測定

3.1 Ni-Cr 抵抗体を用いた試料の抵抗温度特性

抵抗体に Ni-Cr を用いた試料の室温と 100°C における抵抗値を、図2に示す。横軸は抵抗体だけの部分の長さであり、縦軸は電極間の抵抗値 (電極部分の抵抗と抵抗体だけの抵抗を直列接続した値) が示されている。図中の白丸 (○) が室温 (20°C) の値であり、黒丸 (●) が 100°C の結果である。図2中の直線は、それぞれの抵抗体の室温における面抵抗の値から計算した電極部分を含まない抵抗体自体の抵抗値である。電極部分の抵抗値が無視できる程度に小さい場合には測定値はこの直線上に現れることになる。

測定値を結ぶ直線は、抵抗体の面抵抗から計算した直線に対してほぼ平行となった。電極部分の抵抗を R [Ω], 抵抗体単位長さ当たりの抵抗値を R_0 [Ω/m] 電極間距離を l とすれば、電極間の抵抗値 R_m は、

$$R = 2R + R_0l \quad (1)$$

となる。この式を用いて測定値から最小2乗法で R_e と R_0 を求め、図中に直線で示した。図2から、温度を上げると抵抗値は縦軸 (抵抗値) 方向にわずかに高くなっており、室温の値に対してほぼ平行に移動しているように見受けられる。抵抗値の変化が小さいため、図から変化の様子を判別することは困難である。そこで、抵抗変化の様子をより詳細に表すために、測定値を表1に示した。

表の中で、 ΔR は 100°C における抵抗値から室温

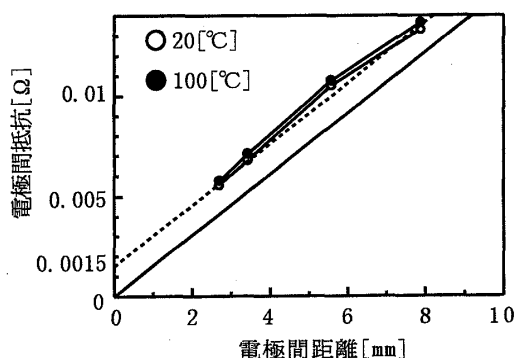


図2 Ni-Cr を用いた試料の室温と 100°C における抵抗値と電極間距離の関係

Fig.2 Relation between length and resistance of Ni-Cr resistor measured at room temperature and 100°C.

表1 Ni-Cr を用いた試料の室温と 100°C における抵抗値
Table 1 Resistance of Ni-Cr resistor measured at room temperature and 100°C.

電極間距離 [mm]	ΔR [Ω]	TCR [ppm/°C]
2.70	0.000198	344
3.43	0.000235	336
5.57	0.000199	185
7.88	0.000277	204

における値を引いたものであり、TCRはこの値から1°C当りの抵抗の変化値を求め、それを室温における抵抗値に対する割合で示したものである。

温度による抵抗値の変化 ΔR は、ばらつきが大きい電極間距離に関係なくおよそ0.0002 Ω とみなすことができ、電極間距離に依存しているというよりはむしろ全体としてほぼ一定であると考えられる。このことは、抵抗値の変化が主に電極部分に起因していることを示している。抵抗体自体の抵抗値の変化が主要な原因であれば、温度上昇による電極間抵抗の増加は電極間隔が増せば大きくなるはずである。

TCRの値は、電極間隔が大きくなると低くなる傾向を示している。これは、全体の抵抗に対する電極部分の抵抗の割合が、電極間隔が長くなるほど小さくなることによる。

この構造で、TCRは200~300 ppm/°Cとなった。この値は、高精度抵抗素子としては不十分であり、更に界面特性を改善する必要があると考えられる。

3.2 Cu-Ni 抵抗体を用いた試料の抵抗温度特性

抵抗体としてCu-Niを用いた試料についても同様に、室温(20°C)と100°Cにおいてそれぞれの電極間の抵抗値を測定した。図3は電極間距離と抵抗の関

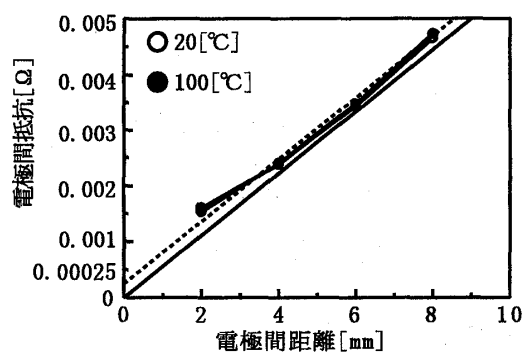


図3 Cu-Ni を用いた試料の室温と 100°C における抵抗値と電極間距離の関係

Fig.3 Relation between length and resistance of Cu-Ni resistor measured at room temperature and 100°C.

表2 Cu-Ni を用いた試料の室温と 100°C における抵抗値
Table 2 Resistance of Cu-Ni resistor measured at room temperature and 100°C.

電極間距離 [mm]	ΔR [Ω]	TCR [ppm/°C]
2	-0.0000665	-415
4	0.0000131	55
6	0.0000445	129
8	0.0000847	182

係を、測定温度をパラメータにして図示したものである。室温における測定値から求めた実験式(図中の直線)は、この試料面抵抗から計算した直線に対してほぼ平行となった。電極間抵抗軸切片より、室温における電極部分の全抵抗値は0.000125 Ω となった。温度変化による抵抗値の変化は、図2に比べると小さく、図ではほとんど重なり合って表され、温度による差異は明確に現れていない。そこで、Ni-Cr 抵抗体を用いた場合と同様に、測定結果を表2にまとめて示した。表2から、室温と100°Cにおける抵抗値の差 ΔR は電極間距離の増加とともに増加していることがわかる。この様子は、明らかに図2や表1の場合とは異なっている。抵抗体としてCu-Niを用いた場合には、温度上昇による電極間抵抗の変化は、接触抵抗の増加以外にも要因があると思われる。

表2では、電極間距離が長くなるとともに、室温と100°Cにおける抵抗値の差 ΔR が大きくなる傾向が現れている。このことは、温度による抵抗変化が、電極部分の抵抗より抵抗体自体の部分の抵抗により支配されていると考えることができる。すなわち、Ni-Crを用いた抵抗器では、温度による抵抗材料の抵抗変化が小さく、これに比べて接触抵抗の温度変化が大きい

ため、電極間距離とは無関係にほぼ一定の抵抗値の温度による変化が現れた。これに対して Cu-Ni を用いた試料では、接触抵抗が低くかつ抵抗体材料自体の抵抗値の温度変化が比較的大きいため、温度による抵抗変化が、電極間距離が大きいほど大きくなったと考えることができる。

表2では、電極間距離が2mm の場合には、室温に比べて 100°C の方が抵抗値が低くなっている。この現象をそのまま解釈すると、温度を上げた場合、電極材料の抵抗の増加以上に接触抵抗の減少幅が大きいと考えられる。しかしながら、このことを確かめるには更に実験を繰り返す必要がある。

4. 接触抵抗の評価

温度による抵抗値の変化が、接触抵抗の温度変化による場合があることが判明したので、接触抵抗自体の温度変化を求めることを試みた。それぞれの試料について、理論計算値と比較することにより単位面積当りの接触抵抗の値を求めて検討した。

4.1 接触抵抗の計算値

半導体素子の場合と異なり、低抵抗抵抗器では電極金属の面抵抗を無視することができない。そこで、電極金属の抵抗と接触抵抗を同時に考慮したモデルを用いて電極部分の抵抗値の理論式を導いた。

図4のように、電極金属の面抵抗を $r_e \Omega/\square$ 、抵抗体の面抵抗を $r_s \Omega/\square$ 、単位面積当りの接触抵抗を $r_c \Omega m^2$ とし、電流流入端を原点とする。電極長を l とすれば、 $x=0$ では電流はすべて金属電極中に存在し、 $x=l$ ではすべて抵抗体中を流れる。すなわち、電極金属中の電流を $i_e(x)$ 、電位を $v_e(x)$ 、抵抗体中の電流を $i_s(x)$ 、電位を $v_s(x)$ 、全電流を I とすれば、

$$\frac{dv_e(x)}{dx} = -r_e i_e(x) \quad (2)$$

$$\frac{dv_s(x)}{dx} = -r_s i_s(x) \quad (3)$$

$$\frac{di_e(x)}{dx} = -\frac{1}{r_c} (v_e(x) - v_s(x)) \\ = -\frac{di_s(x)}{dx} \quad (4)$$

$$i_e(x) + i_s(x) = I \quad (5)$$

となる。境界条件は、

$$i_e(0) = I \quad (6)$$

$$i_s(l) = I \quad (7)$$

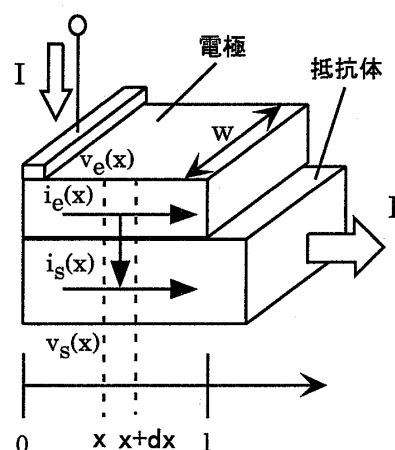


図4 電極金属の抵抗値を考慮した電極部分の抵抗値の伝送線路モデル

Fig.4 Transmission line model in consideration of the sheet resistance of metal electrode.

$$v_e(0) = V \quad (8)$$

$$v_s(l) = 0 \quad (9)$$

である。

これを解いて電極部分の抵抗を求めると、式(10)になる。

$$R = \frac{v_e(0) - v_s(l)}{I} \\ = \frac{2r_s r_e + (r_s^2 + r_e^2) \cosh(ml)}{wm(r_e + r_s) \sinh(ml)} \\ + \frac{r_s r_e ml \sinh(ml)}{wm(r_e + r_s) \sinh(ml)} \quad (10) \\ m \equiv \sqrt{\frac{r_e + r_s}{r_c}}$$

測定値から求めた電極部分の抵抗と式(10)の計算値を比較することにより、単位面積当りの接触抵抗 r_c を求めた。

4.2 Cu と Ni-Cr 合金の接触抵抗

式(10)により、電極部分の全抵抗値と接触抵抗との関係を導くと、図5のようになる。図5では電極金属の面抵抗の値として、めっき層の厚さを実測し、この部分の抵抗率が純銅の値であるとして求めた抵抗値 ($4.25 \times 10^{-4} \Omega/\square$) に対する値と、電極金属の面抵抗を0とした場合について示した。図2より、電極部分の全抵抗値はおおよそ室温において 0.00075Ω 、100°C では 0.0009Ω 程度であり、この値を図5の曲線に当てはめることにより電極部分の接触抵抗は電極金属の面抵抗を $4.5 \times 10^{-4} \Omega/\square$ とした場合 $7 \rightarrow 9 \times 10^{-10} \Omega m^2$ (電極金属の抵抗を無視した場合 $2 \rightarrow 3 \times 10^{-9} \Omega m^2$)

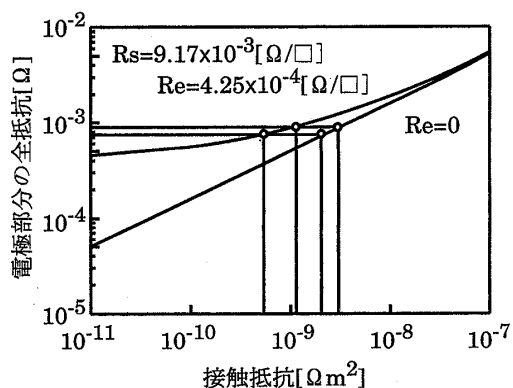


図5 Ni-Cr 抵抗体を用いた試料の接触抵抗と電極部分の全抵抗の関係

Fig. 5 Relation between specific contact resistance and the total resistance of Cu/Ni-Cr electrode.

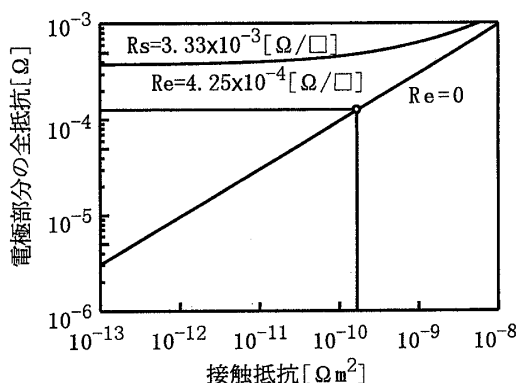


図6 Cu-Ni 抵抗体を用いた試料の接触抵抗と電極部分の全抵抗の関係

Fig. 6 Relation between specific contact resistance and the total resistance of Cu/Cu-Ni electrode.

に増加することがわかった。

抵抗温度特性の測定から、抵抗体自体の TCR は十分小さいが接触抵抗の温度変化は 100% 以上になり、温度に対して極めて不安定であることがわかった。抵抗器の TCR を低く抑えるには、接触抵抗の値を抵抗体の抵抗値に比べて十分低くするとともに、その温度係数も低くすることが必要と考えられる。

4.3 Cu と Cu-Ni の接触抵抗

室温において、電極部分の全抵抗値が得られたので、接触抵抗の値を計算した。図6は抵抗体に Cu-Ni 合金リボンを用いた試料について電極部分の抵抗と接触抵抗の関係を、電極金属の面抵抗をパラメータにとり図示したものである。

図6から明らかなように、電極金属の面抵抗を純銅の値とした場合には、電極部分の面抵抗の計算値は測定値よりも大きな値となってしまう実験結果を説明で

きない。実際の測定では、再現性を高めるために電流測定プローブと電圧測定プローブをそれぞれはんだ付けより電極に固定した。このため、電極金属の面抵抗は明らかに銅のめっき層の値よりも小さくなっている。このことが電極部分の全抵抗の計算値が測定値よりも大きくなった原因と考えられる。

電極部分の面抵抗を0として、電極部分の全抵抗の測定値に対応する接触抵抗を求めると $r_c = 2 \times 10^{-10} \Omega m^2$ となる。実際の試料では電極金属の面抵抗は有限であり、したがって接触抵抗はこの値よりも低いと考えられる。

5. む す び

実際に抵抗体として Cu-Ni と Ni-Cr を用いた試料について、電極間隔のみを変化させた試料を作り、電極間隔と抵抗値の関係を測定し、電極部分の抵抗値を評価した。抵抗温度特性についても、電極部分と抵抗体自体の効果をそれぞれ独立に評価した。どちらの試料でも電極部分の抵抗を無視できず、この値が特性を制限することが予測できる。

Ni-Cr 抵抗体を用いた試料では、TCR を制限する要因が電極部分の接触抵抗にあることがわかった。更に、電極部分の接触抵抗は電極金属の面抵抗を $4.5 \times 10^{-4} \Omega/\square$ とした場合 $7 \rightarrow 9 \times 10^{-10} \Omega m^2$ (電極金属の抵抗を無視した場合 $2 \rightarrow 3 \times 10^{-9} \Omega m^2$) に温度とともに増加することがわかった。これは界面に存在する酸化層等の効果と考えられ、電極形成方法について更に検討する必要がある。また Cu-Ni 抵抗体を用いた試料では、電極部分よりは抵抗体自体の温度特性が全体の抵抗温度特性を支配しているように見受けられた。Ni-Cr 抵抗体、Cu-Ni 抵抗体の TCR は、それぞれ $185 \sim 344$, $55 \sim 182 \text{ppm}/^\circ\text{C}$ 程度となった。

これらの結果から、低抵抗で高精度な抵抗体を作製するには、抵抗体自体の特性と同じように電極部分の特性が重要であることが示された。抵抗体としては Cu-Ni よりも Ni-Cr が優れていると思われるが、電極形成方法を更に検討する必要がある。

文 献

- [1] H. H. Berger, "Model for contacts to planar devices," Solid-State Electronics, vol.15, no.2, pp.145-158, 1972.
- [2] J. G. Chern and W. G. Oldham, "Determining specific contact resistance from contact end resistance measurement," IEEE Electron Device Lett., vol.EDL-5, no.5, pp.178-180, 1984.
- [3] M. Werner, "Electrical characterization of Al/Si ohmic

論文／伝送線路モデル (TLM) による高精度低抵抗抵抗器の電極接触抵抗の評価

contacts to heavily boron doped polycrystalline diamond films," J. Appl. Phys., vol.79, no.5, pp.2535-2541, 1996.

- [4] 岡田伸介, 中尾真人, 小沼義治, 上村喜一, 山下昌三, "電極面抵抗を含めた伝送線路モデルによる抵抗精度解析," 信学信越支部大, pp.227-228, 1999.
- [5] K. Kamimura, Z. H. Wang, and Y. Onuma, "Contact resistance of SnO₂ films determined by transmission line model method," Jpn J. Appl. Phys., vol.37, no.6A, pp.3284-3285, 1998.

(平成12年5月31日受付, 9月29日再受付)



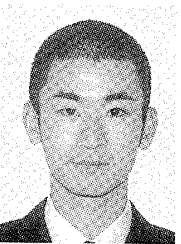
山下 昌三

1989信州大・理・化学卒。現在KOA(株)にて電子デバイスの研究開発に従事。



上村 喜一 (正員)

1977東工大大学院博士・電子工学専攻了。同年東京工芸大学講師。1983信州大助教授。1999同教授。半導体界面特性, 半導体薄膜素子の研究に従事。



岡田 伸介

1999信州大・工・電気電子卒。現在同大大学院博士前期課程在学中。低抵抗抵抗器の精度解析及び作製プロセスの研究開発に従事。



中尾 真人 (正員)

1964長野工高・電気卒。同年信州大・工勤務。主に大型機器を用いた薄膜電子材料素子の評価に関する研究に従事。現在信州大工技術専門官。工博。



小沼 義治 (正員)

1959信州大・工・電気卒・同大助手, 講師, 助教授を経て1982教授。エレクトロニクス材料の薄膜化とその電子デバイスへの応用に関する研究に従事。工博。電気学会, 応用物理学会, 日本セラミック協会, 日本表面科学会, IEEE, MRS各会員。