

論文

リアクティブスパッタ法による TaN_x 薄膜抵抗体の作製と電極との接触抵抗の評価

小畑 元樹^{†a)} 作田 輝行^{††} 林部 林平^{††} 上村 喜一^{††b)}

Characterization of Contact Resistance between Electrode and TaN_x Thin Film Resistor Prepared by Reactive Sputtering

Motoki OBATA^{†a)}, Teruyuki SAKUDA^{††}, Rinpei HAYASHIBE^{††},
and Kiichi KAMIMURA^{††b)}

あらまし 高精度薄膜サブマウント基板の回路形成において薄膜抵抗設計は重要である。本論文では、リアクティブスパッタリング法により形成した窒化タンタル薄膜 (TaN_x) 抵抗体の精度に電極の接触抵抗が与える影響について検討した。電極形状を一定にしたまま抵抗体の長さを変えることにより、電極部分の抵抗と抵抗体自体の抵抗とをそれぞれ独立に評価した。また電送線路モデル (TLM: Transmission Line Model) により、 TaN_x 薄膜と電極との固有接触抵抗とその抵抗温度係数 (TCR) を求め、 TaN_x 薄膜の堆積条件との関係を検討した。電極部分の抵抗は、抵抗体部分のシート抵抗の 1/10 程度の値をもち、高精度な薄膜抵抗体を作製する場合には設計時に考慮する必要があることが示された。また固有接触抵抗は、 TaN_x 薄膜の窒素濃度に依存し、およそ $10^{-8} \Omega m^2$ のオーダーであった。

キーワード TaN_x , TCR, TLM, 接触抵抗, 固有接触抵抗率

1. ま え が き

電子素子の小型化とともに、パッケージ技術の重要性が高まり、様々な機能を付加したパッケージが求められている。光エレクトロニクス関連については半導体レーザ分野において、レーザダイオード (LD) を搭載するため、放熱特性の優れた窒化アルミニウム (AlN) 基板に、電極膜、抵抗膜、LD を高い位置精度で実装するはんだ膜といった機能膜が形成された構造をとっている。これは AlN 薄膜サブマウントと呼ばれる。このように一体化することで、各電子素子のみで構成するよりも精度、使用周波数帯域、動作電圧電力領域の機能面からも製造コスト面からも好ましくなる。その中

の抵抗体は寄生容量の小さい薄膜抵抗を終端抵抗として用いる。この薄膜抵抗は、一般に抵抗体パターンの精度を制御する (トリミング) ことで高精度化 (抵抗値の合せ込み) が行われる。更なる精度化を考えた場合、抵抗体と電極との接触抵抗を低くさせることも重要な要素の一つである。そこで本研究では抵抗体として TaN_x 薄膜抵抗体をリアクティブスパッタリングにより開発し、抵抗体と電極との接触抵抗について検討した。 TaN_x は物理的、化学的に強固な特性をもつことに加えて、窒素の組成比を制御することにより、抵抗温度係数を低くすることが可能であり、抵抗値における経時変化が小さいことから、高信頼性薄膜抵抗材料として着目されている [1], [2]。

また最近では、抵抗材料としての用途以外に、集積回路の配線技術において、銅配線の拡散バリア層としても注目されている [3]。 TaN_x 薄膜の堆積については既に多くの報告があるが、薄膜自体の抵抗値に着目した検討が大部分であり、電極との接触抵抗に関する報告は見当たらない。一般に薄膜抵抗を回路要素として用いる場合、電極材料として Au が使用される場合が

† シメオ精密株式会社, 長野県

Cimeo Precision Co., Ltd., 4107-5 Miyotamachi, Kitasakugun, Nagano-ken, 389-0295 Japan

†† 信州大学工学部電気電子工学科, 長野市

Department of Electric and Electronic Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi, 380-8553 Japan

a) E-mail: motozo@cimeo.co.jp

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

表1 TaN_x 薄膜のスパッタリング条件
Table 1 Sputtering conditions of TaN_x thin films.

ターゲット材料	Tantalum
ターゲット純度	3N
スパッタ電力	750 [W]
基板加熱温度	300 [°C]
Ar 流量	20 [ml/min]
N ₂ 分圧比	0,15,25 [%]
基板回転速度	40 [rpm]
狙い膜厚	0.35 [μm]
成膜レート	10.8(N ₂ =0%)
(N ₂ 添加率)	10.5(N ₂ :15%)
	8.40(N ₂ =25%)[nm/min]

多い。Auは基板との付着力が弱いので、界面にCrやTi等のバッファ層を用いて基板との付着強度を高める方法が用いられる。本研究では、このような構造に対して、電極とTaN_x薄膜との接触抵抗に着目し、窒素濃度の異なるTaN_x薄膜をRFリアクティブスパッタリング法により開発し、そのTCRの評価を行った。接触抵抗を他の要素と分離して評価するため、TLMを用いて固有接触抵抗を算出した[4]。

2. 実験方法

2.1 TaN_x薄膜の作製

RFマグネトロンリアクティブスパッタリング法によりTaN_x薄膜を開発・製作した。このときの成膜条件を表1に示す。

具体的にはスパッタリングガスに超高純度Arガスを用い、RF電力750W、基板加熱温度300°C、Ar流量20ml/min、ターゲットには純度3Nで直径150mmのタンタル板を用いた。このとき反応ガスの窒素の流量を0, 3, 5ml/minと変化させてN₂分圧比が0, 15, 25%と異なるTaN_x薄膜を作製した。N₂分圧0%はTaN_xと純Taとの比較のため作製した。各N₂分圧比が異なるTaN_x薄膜の膜厚は0.35μmとし、あらかじめ算出した成膜レート(nm/min)により時間比例分配法により制御した。薄膜は主にガラス基板に堆積させた。結晶性評価やサブマウント性評価のため、単結晶Siウェーハや窒化アルミニウム(以下AlN)セラミックス基板も使用した。作製したTaN_x薄膜はX線回折による結晶学的評価、SEMによる表面形状の観察、AESによる組成分析等を行った。また電気的特性としてTCRと固有抵抗率の反応ガス分圧依存性も評価した。

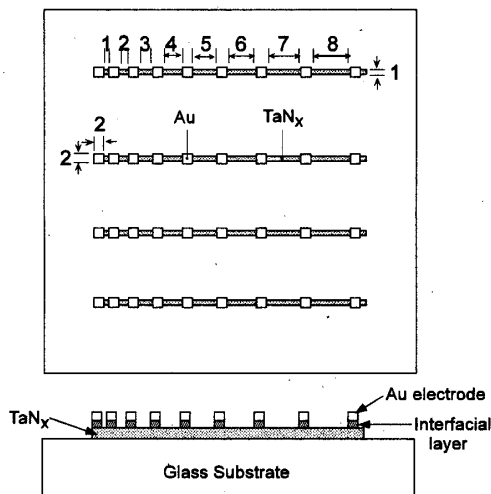


図1 TLM測定に用いた試料の形状
Fig.1 Sample form using TLM measurement.

2.2 TLM試料の形成とTCR測定

図1に電極部分と抵抗体部分の寄与を分離してTCRを評価するためのTLMを考慮した実験試料の形状を示す。TLMの詳細については図7で述べる。試料は幅1mmのTaN_x薄膜の線状試料をフォトリソグラフィとドライエッチング法により形成し、この上に電極となる2×2mmのAuパターンをフォトリソグラフィとリフトオフ法により搭載した。Auはスパッタリングにより堆積した。基板とAuの密着強度を補うために、Au堆積前に界面層としてCr, Ta, Tiのいずれかを堆積させた。界面層の厚さはおよそ60nm、Au層の厚さはおよそ200nmとした。電極間隔を1mmから8mmまで変化させることにより、電極部分の抵抗とTaN_x薄膜自体の抵抗を分離して評価した。このTLM試料について、測定温度を-20°Cから+90°Cまで変化させて各間隔における電極間の抵抗を10°Cごとに測定し、TCRを電極部分と抵抗体自体をそれぞれ独立に評価した。TCR測定には、ETAC高度加速寿命試験装置とデジタルマルチメータ(TR8641 Takeda-Riken製)を用いた。

3. 実験結果並びに検討

3.1 結晶性の評価

Siウェーハ上にN₂ガス流量を変えて堆積させたN₂分圧比の異なるTaN_x薄膜のX線回折パターンを図2に示す。X線光源は通常のCuKαである。TaN_xは高融点材料であり、基板温度の300°Cという値は結晶化のために十分な値ではないため、結晶粒径が小さく十分な回折強度が得られなかったと考えられる。

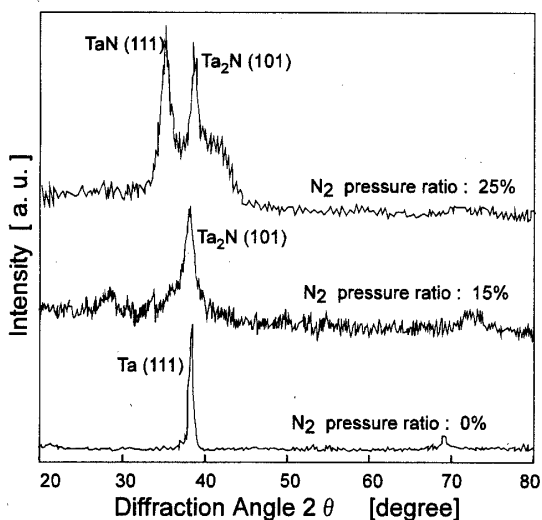


図2 Si ウェーハ上に堆積した Ta_N_x 薄膜の X 線回折パターン
Fig. 2 XRD pattern of the Ta_N_x on a Si substrate.

窒素を流さないで堆積した場合は純 β -Ta の薄膜が形成された。窒素分圧比 15% で堆積した薄膜では、 Ta_2N の (101) 面からの回折位置付近にピークが現れた。25%に増すと、このピークに加えて TaN の (111) 面からの回折とされる位置にもピークが現れている。これらの結果から、窒素流量を増すに従って薄膜中の窒素濃度が増加したことが推察される。全体的に薄膜からの回折ピークは半値幅が大きく、正確な結晶構造の決定はできなかった。図2は、薄膜が極めて小さい結晶粒の多結晶で構成されていることを示している。

表1に示した $N_2=15\%$ で堆積した Ta_N_x 薄膜のオージェ電子分光法による組成分析では、表面付近から若干の酸素が検出されたが薄膜を 1 min 程度スパッタエッチングしながら測定すると、Ta と N がおよそ 3:1 の組成比で形成されていることがわかった。図3では、横軸は Ta_N_x 薄膜のエッチング時間を表し、縦軸は元素の組成比を表している。図より Ta と N 以外の元素成分として、表面に O、内部に Si、C が検出されている。特に薄膜内部の検出成分は雑音レベルと同程度であり定量的な評価はできない。その結果、AES 分析で検出された酸素成分は主に表面付近に吸着されているものと考えられ、膜自体は Ta と N から構成されている。

3.2 電気的特性評価

反応ガス圧を変えて作製した Ta_N_x 薄膜の電気的特性結果を図4に示す。電気的特性は堆積対象となる基板の面質に大きく影響されるため、表面形状が無視できるガラス基板に堆積させた Ta_N_x 薄膜について評価を行った。測定には、図1の Au 電極の間隔が 1 mm

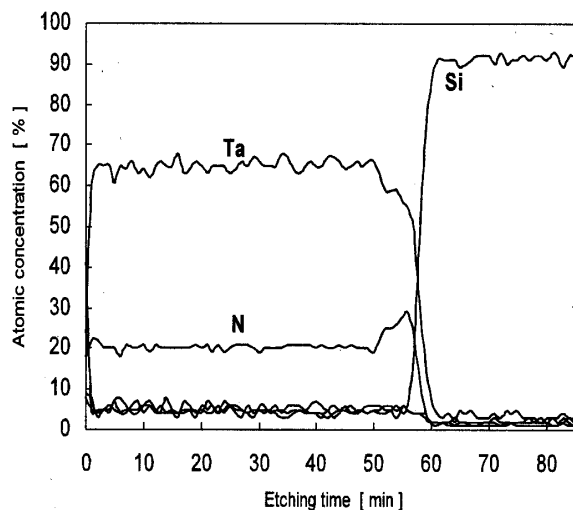


図3 AES による Ta_N_x の組成分析結果
Fig. 3 AES depth-profile of the Ta_N_x on a Si substrate.

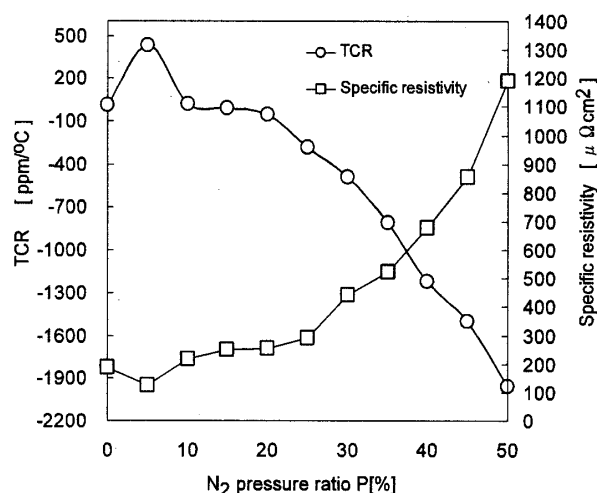


図4 N_2 分圧と TCR と固有抵抗率の関係
Fig. 4 TCR and specific resistivity as a function with N_2 pressure ratio.

の部分を用いて膜厚、抵抗値を測定し、 Ta_N_x 薄膜抵抗体の抵抗率を算出した。実際に測定に用いたパターンを図5に示す。パターン精度は $\pm 1 \mu m$ 以下であるため抵抗値への影響はないものとする。膜厚の測定には、触針式表面粗さ計 (P-10 Tencor 製) を、抵抗の測定には、四探針ミリオームハイテスタ (3540 HIOKI 製、プローブ: 9461) を用いた。横軸は N_2 反応ガス分圧、縦軸は TCR と固有抵抗率を表している。図4より N_2 分圧が変化しても TCR 特性がほとんど変化しない領域が存在していることがわかる。これが plateau 領域である。本実験では、 N_2 が 10~20% 付近が plateau 領域であり、 Ta_2N の結晶構造付近である。また固有抵

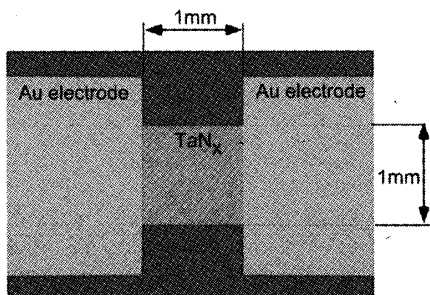


図5 TCRと固有抵抗率測定試料の外観

Fig. 5 Photograph of a sample on a glass substrate used to measure TCR and specific resistivity.

抗率もこの付近で一定の値を示している。N₂流量が更に増加するに従って、TCRが急激に下がり、抵抗率が上がっている。以上より、抵抗体としての電気的特性はTa₂Nの結晶構造が安定していることを示唆している。

3.3 SEMによる表面状態

AlN薄膜サブマウント性を考慮して、実際にAlN基板にN₂=15%で膜厚0.1 μmと1.0 μm堆積させたときの表面SEM像を図6に示した。膜厚による差は見られず、AlN基板の表面形状がそのまま現れている。そのため実際の仕様抵抗をねらう場合、安定した抵抗設計が可能となると考えられる。

3.4 電極間距離と抵抗の関係

図7は薄膜抵抗体の基本構造を電気的にモデル化した図である。TaN_x薄膜抵抗体のシート抵抗を R_s 、電極の抵抗を R_e 、電極間距離を d と定義すると、全抵抗 R は、

$$R = R_s d + 2R_e \quad (1)$$

となる。また電極-界面層-抵抗体の単位面積当りの接触抵抗が固有接触抵抗 ρ_c である。このTLMを考慮して作製した実際の試料(図1)の電極間距離と抵抗値の関係を図8に示した。

抵抗値は電極間隔の増加に対して直線的に増加している。しかしながら、電極部分の抵抗値は長さに関係であるためこの値が y 切片に現れている。この値が式(1)の $2R_e$ であり、傾きが R_s に相当する。図8では、TaN_x堆積時の窒素分圧比がパラメータにとられており、窒素流量を増すに従って R_s が増加している。また、 $d=0$ における抵抗値も窒素流量に影響を受けていることがわかる。

最小2乗法により、電極間距離と抵抗の関係を表す直線を求め、傾きと $d=0$ における抵抗値から薄膜の

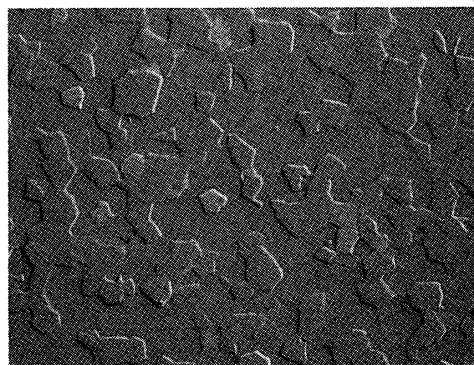
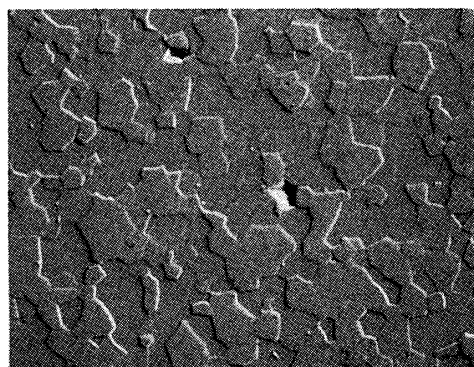
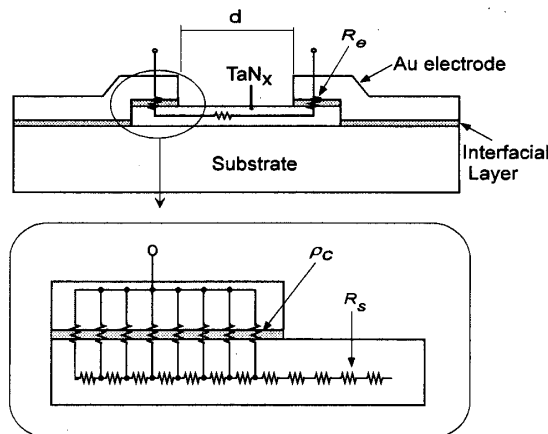
TaN_x thickness 0.1 μmTaN_x thickness 1.0 μm図6 AlN基板上に堆積したTa_xN_x薄膜のSEM像Fig. 6 SEM photograph of the TaN_x thin film on an AlN substrate.

図7 電送線路モデル

Fig. 7 Transmission line model of thin film resistor.

シート抵抗 R_s と電極の抵抗 R_e を求めた。表2に結果をまとめて示した。

電極の抵抗($2R_e$)は、薄膜のシート抵抗の1/10以上の値を示しており、抵抗値を精密に設計する場合には電極の抵抗も考慮する必要があることが示された。特に、界面層にCrを用いた場合の電極の抵抗がTa,

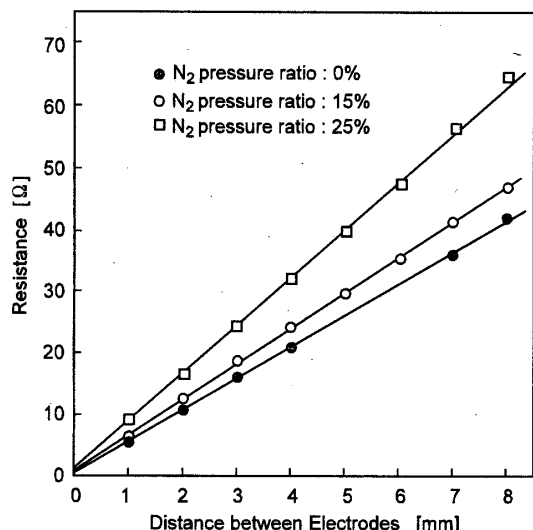


図8 TaN_x 薄膜抵抗の電極間距離と抵抗値の関係
Fig. 8 Relation between resistor length and resistance to TaN_x thin film resistor.

表2 電極間距離と抵抗値の関係から求めた薄膜の面抵抗と電極抵抗

Table 2 Calculated sheet resistance and resistance of electrode.

N ₂ [%]	界面層	R _s [Ω/□]	2R _e [Ω]	(2R _e)/R _s
0	Ta	1.59	0.20	0.13
0	Cr	1.72	0.53	0.30
0	Ti	1.45	0.27	0.18
15	Ta	6.40	0.87	0.14
15	Cr	6.52	0.93	0.14
15	Ti	6.48	0.72	0.11
25	Ta	6.10	0.86	0.14
25	Cr	6.04	0.91	0.15
25	Ti	6.14	0.73	0.12

Tiと比較して大きいことがわかった。逆に界面層にTiを用いた場合に低い値が得られる傾向があった。また、抵抗温度係数に対しても電極の抵抗が影響すると考えられる。

3.5 TCRの測定

抵抗器としての使用を考える場合、抵抗温度特性が十分に低いことが求められる。Au電極や界面層と抵抗体では異なる温度特性をもつことが考えられる。そこで相対的に電極部分の影響が現れやすい電極間距離が短い試料について、抵抗温度特性の測定結果から求めたTCRの値を図9に示した。電極は本来の電極として働くAu薄膜とTaN_x(または基板)との間に、付着強度を増すための界面層が挿入されている。界面層は、接触抵抗の値に影響すると考えられるので、界面

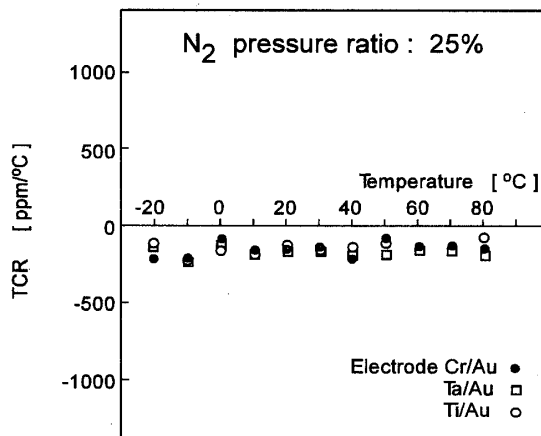
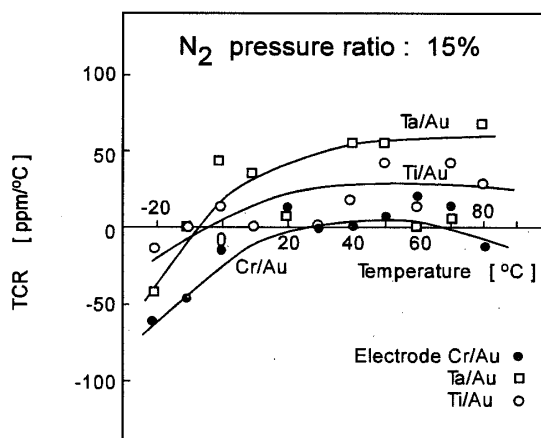
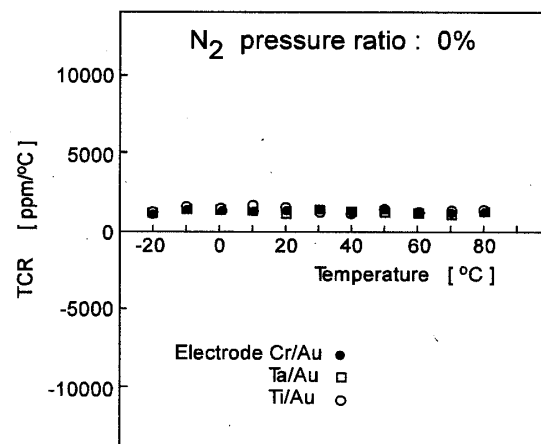


図9 TaN_x 薄膜抵抗のTCR
Fig. 9 TCR of TaN_x thin film resistor.

層の材質を変えた場合について検討した。

N₂=0%で堆積した場合には、純β-Ta薄膜が形成される。このため、TCRは金属導体的な正の値を示し、窒素を添加してスパッタすると、窒化タンタル薄膜が得られ、TCRは窒素流量を増すに従って負の大

きな値となった。N₂=15%前後の領域で正から負に変化しており、この近辺で最も低いTCRが得られた。N₂=25%で堆積した膜では半導体的な負の値となった。このように窒素を増すことで、半導体的な電気伝導が支配的となるためTCRは正から負へと変化すると考えられる。またN₂=15%で堆積した抵抗体の場合、界面層の材質の違いがTCRに現れている。これは抵抗体自体のTCRが極めて低いためであると考えられる。一方、抵抗体のTCRが大きい場合には電極部分の抵抗自体が小さいため、電極構造による差異は現れていない。

3.6 固有接触抵抗率の評価

電極-界面層-抵抗体との間の単位面積当りの接触抵抗が固有接触抵抗 ρ_c であり、接触面の電気的特性の評価基準の一つとして用いられている。Au電極や界面層のシート抵抗が十分に低く無視できる場合、電極部分の抵抗 R_e は、

$$R_e = \frac{1}{w} \sqrt{R_s \rho_c} \coth \left(\frac{l}{\sqrt{R_s \rho_c}} \right) \quad (2)$$

と表される[4]。ここで、 w は試料の幅、 l は電極長である。

電極長 l が $\sqrt{R_s/\rho_c}$ に比べて十分に大きければ、 $\coth(l/\sqrt{R_s/\rho_c}) \cong 1$ であり、固有接触抵抗率 ρ_c は、

$$\rho_c \cong \frac{R_e^2 w^2}{R_s} \quad (3)$$

となる。電極部分の抵抗 R_e と抵抗体のシート抵抗 R_s は、図8に示した電極間距離と抵抗値の関係から求めることができる。

図10はこのようにして計算した固有接触抵抗の値を測定温度の関数として示したものである。

固有接触抵抗率の値は、おおむね $10^{-8} \Omega \text{m}^2$ のオーダーとなった。界面層の種類や抵抗体の組成により異なる値が得られ、図から明らかなように温度に対する依存性は小さい。ただし、N₂=15%の界面層Tiの場合のみ、80°C付近で固有抵抗率が低下しているが、この原因については現在のところ不明であり、検討中である。図10の結果から、TaN_x薄膜抵抗体に対しては、Tiが接触抵抗の低い界面層として有効であることがわかった。また、窒素を流さずに堆積した場合は、界面層にTaを用いた場合が最も低い固有接触抵抗率を示した。これは抵抗体自体がTaであり、Ta-Taの同一材料の接触によるためと考えられる。

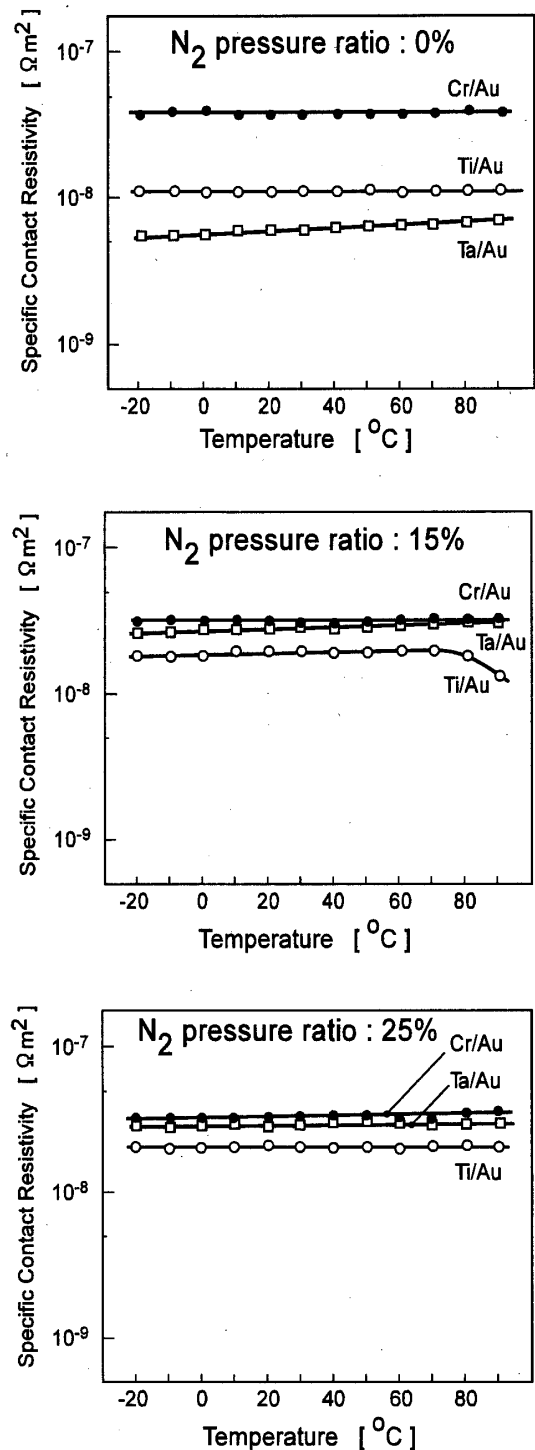


図10 TaN_x 抵抗体に対する固有接触抵抗率の温度特性
Fig. 10 Specific contact resistivity of TaN_x thin film as a function of temperature.

4. む す び

電極間隔を変えた TaN_x 薄膜抵抗体について、抵抗値と電極間距離の関係並びにその温度特性を測定し、界面層の材料に着目して比較した。

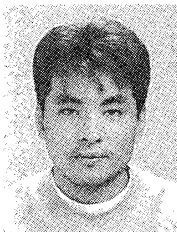
TLMにより, TaN_x 抵抗体と電極部分との固有接触抵抗とその温度係数を求め, 堆積条件との関係を検討した. 電極部分の抵抗は, 抵抗体のシート抵抗の1/10程度の値をもち, 精密な値の抵抗体を作製する場合には考慮する必要があることが示された. 固有接触抵抗は, 抵抗体の窒素濃度に依存し, およそ $10^{-8}\Omega m^2$ のオーダーであった. 基板材料により, Au電極と基板間に介在させる界面層を選ぶ必要があるが, その場合は同時に抵抗体との固有接触抵抗率も考慮する必要がある. 固有接触抵抗率の温度係数は正であり, TaN_x 抵抗体の抵抗温度係数を打ち消す方向に働いている. 抵抗温度係数が低い領域の TaN_x 抵抗体に対してはTiが界面層として優れていることが示された.

今後はLD実装時におけるはんだの拡散防止膜としてPtやNiを界面層とAu電極の間に挿入した3層構造をとった場合の接触特性について検討し, より精密な抵抗設計を実現することが課題である.

文 献

- [1] 明石照久, 竹盛英明, 友部哲哉, 小泉俊晃, "AlNサブマウントに形成した窒化タンタル薄膜抵抗の特性評価," 精密工学会誌, vol.66, no.8, pp.1052-1056, 2002.
- [2] C. Michaluk, "Correlating discrete orientation and grain size to the sputter deposition properties of Tantalum," J. Electron. Mater., vol.31, no.1, pp.2-10, 2002.
- [3] T. Laurila, K. Zeng, J. K. Kivilahti, J. Molarius, T. Reikkinen, and I. Suni, "Tantalum carbide and nitride diffusion barriers for Cu metallization," Microelectron. Eng., vol.60, pp.71-80, 2002.
- [4] M. Wermer, C. Johnston, P. R. Chalker, S. Romani, and I. M. Buckley-Golder, "Electrical characterization of Al/Si ohmic contacts to heavily boron doped polycrystalline diamond films," J. Appl. Phys., vol.79, no.5, pp.2535-2541, 1996.

(平成15年1月24日受付, 4月22日再受付)



小畑 元樹 (正員)

1993 信州大・織・織システム工卒. 1995 同大学院博士前期課程了. 1996 シメオ精密株式会社入社. 2001 同社在籍のまま信州大学院博士後期課程入学. 現在, 電子・光学部品用薄膜形成と応用技術に関する研究・開発に従事. 日本光学会(応物)会員.



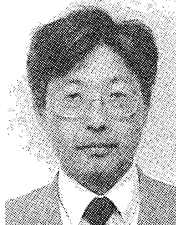
作田 輝行

2003 信州大・工・電気電子卒. 現在, 同大学院工学系研究科博士前期課程在学中. TaN_x 薄膜の作製と応用に関する研究に従事.



林部 林平 (正員)

1969 長野高専・電気卒. 1971 信州大・工・技官. 2001 博士(工学). 電子回路の計測, 医用技術への応用, 電子材料に関する研究に従事. 現在, 信州大・工・技術専門官.



上村 喜一 (正員)

1977 東工大大学院博士課程了. 工博. 1977 東京工芸大・工・電子・講師. 1983 信州大・工・電気・助教授. 現在, 信州大・工・電気電子・教授. 半導体薄膜に関する研究に従事. 応物, IEEE, MRS各会員.