

第3章

Ta-Zr 合金による陽極酸化膜キャパシタの 電気的特性に及ぼす熱処理温度と 酸化膜厚低減の効果

Ta-Zr 合金による陽極酸化膜キャパシタの電気的特性に及ぼす 熱処理温度と酸化膜厚低減の影響

渡邊 大介[†] 後藤 智利[†] 山根美佐雄[†] 佐々木克孝[†]
阿部 良夫[†]

Influences of Heat-Treatment Temperature and Reduction of Oxide Thickness on Electrical Properties of Ta-Zr Anodized Thin Film Capacitor

Daisuke WATANABE[†], Tomoyoshi GOTO[†], Misao YAMANE[†], Katsutaka SASAKI[†],
and Yoshio ABE[†]

あらまし Ta₂N を用いた陽極酸化膜キャパシタは、耐熱性の向上を図れるが比誘電率の低下を伴うので、このことを回避するため、Ta-Zr 合金の陽極酸化膜キャパシタを作製し、その電気的特性に及ぼす熱処理温度の影響と、酸化膜厚を低減させた際にも Ta₂N 陽極酸化膜キャパシタの場合と同様に低損失なキャパシタが実現可能か否かを検討した。その結果、Ta₂N の場合とは異なり比誘電率の低下を生じることなく耐熱性の向上が可能となり、かつ酸化膜厚を低減させても、Ta₂N の場合と同等以上に低損失なキャパシタが得られることがわかった。したがって、低損失、高耐熱でかつ高誘電率という特徴を兼ね備えた、高信頼性の陽極酸化膜キャパシタを実現する上で、Ta-Zr 合金膜は有用な材料と結論できる。

キーワード Ta-Zr 陽極酸化膜キャパシタ, 高い比誘電率, 低損失特性, 高信頼性, 耐熱性

1. ま え が き

これまで利用されている薄膜キャパシタの代表的な材料には Ta 陽極酸化膜があり、Ta 陽極酸化膜は比較的高い比誘電率と優れたキャパシタ初期特性を示すが、200°C 程度の大気中熱処理により、酸化膜中の酸素原子が下地金属方向へ拡散するため、熱劣化しやすいという欠点がある [1], [2]。この欠点を改善するためには、Ta 膜中に比較的高濃度の窒素を添加したり、Ta₂N 化合物の陽極酸化膜を利用することが有効であるが、この場合は酸化膜中に窒素がそのまま取り込まれるため比誘電率が減少し、同一化成電圧で得られる静電容量密度が低下する。静電容量密度の低下を補う方策としては、酸化膜厚を低減させればよいが、一般に酸化膜厚が薄くなればなるほど、膜中に多くの欠陥が含ま

れるため $\tan \delta$ が増加し、Ta₂N キャパシタでは、低損失キャパシタとしての実用限界値である 0.01 以下の $\tan \delta$ が得られる化成電圧の下限は 40V までであった [3], [4]。

このように窒素添加や窒化物の利用は比誘電率の低下を伴うので、このことを回避して、高耐熱で、高信頼性の陽極酸化膜キャパシタを得るには、Al₃Ta や Al₃Hf 及び Al₃Zr のような金属間化合物の陽極酸化膜の利用が有効と思われる。その理由は、前述の Ta₂N キャパシタでは酸化膜中の窒素は酸化反応に関与しないので双極子密度が減少するのに対し [5]、この場合は化合物の構成元素である Al も酸化するため、比誘電率の低下が抑制できるものと考えられるからである。そこで我々は、前報で Al₃Ta, Al₃Hf 及び Al₃Zr の各陽極酸化膜キャパシタを作製し、その耐熱性を検討したところ、高信頼性薄膜キャパシタとなることがわかった [6]~[8]。

このような発想を更に拡張し、もし合金化によって

[†] 北見工業大学工学部機能材料工学科, 北見市
Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology,
Kitami-shi, 090-8507 Japan

Ta陽極酸化膜キャパシタの熱劣化の抑制が可能となるのであれば、 Al_2O_3 の比誘電率よりも Ta_2O_5 の比誘電率に近い ZrO_2 や HfO_2 を Ta_2O_5 と組み合わせて、複合酸化膜が得られるように、Ta-Zr合金やTa-Hf合金の陽極酸化膜キャパシタを作製すれば、耐熱性の向上と同時に、よりいっそうの高誘電率化が可能になるものと期待される。そこで本研究ではTa-Zr陽極酸化膜キャパシタを作製し、その電気的特性に及ぼす熱処理温度の影響を検討するとともに、酸化膜厚を低減させた際にも、 Ta_2N 陽極酸化膜キャパシタの場合と同程度の低損失特性が実現可能か否かを検討した。

2. 実験方法

Ta-Zr合金膜の作製には、RFマグネトロンスパッタ装置を用い、種々の面積比のTa-Zr複合ターゲットを同時スパッタすることで行った。このとき、ターゲットへの投入電力は40W、Arガス圧は10mTorrに固定し、基板温度 250°C 一定で、コーニング7059ガラス基板上にTa-Zr合金膜を約 5500\AA 堆積させた。堆積させた膜の原子組成は、オージェ電子分光(AES)分析によって評価した。成膜したTa-Zr合金膜の陽極酸化は、化成液に2wt.%ホウ酸アンモニウム水溶液を用い、室温状態で定電流-定電圧法によって行った。このとき、定電流密度は $3\text{mA}/\text{cm}^2$ とし、所定の化成電圧に到達した後、その電圧にそのまま1時間保持することで、電流密度を十分に減衰させた。その後、試料を十分に乾燥させた後、作製した陽極酸化膜上には、1試料当たり10箇所、Al(面積: $2\times 2\text{mm}^2$)を上部電極として真空蒸着することで、平行平板型の薄膜キャパシタとした。

作製した試料のキャパシタ特性は、LCRメータを用いて周波数1kHzで静電容量Cと $\tan\delta$ を測定し、容量温度係数TCCは 30°C と 60°C に保持したときのC値より算出した。漏れ電流の測定にはエレクトロメータを用い、それぞれの直流印加電圧に対する特性値には、電圧を印加後1分経過値を採用した。耐熱性の評価では、各試料を大気中 $150\sim 350^\circ\text{C}$ の範囲でそれぞれ2時間熱処理を行い、その前後のキャパシタ特性や漏れ電流特性を比較した。なお以下に示す結果は、2個以上の同一試料から得た値の平均値であり、試料間及び1試料内におけるAl上部電極間でのばらつきの程度は、 $\pm 5\%$ 以内である。

3. 結果と検討

3.1 熱処理前後のTa-Zr陽極酸化膜キャパシタの $\tan\delta$ に及ぼすZr含有量の影響

はじめに予備的検討として、Ta-Zr合金膜中のZr含有量を増加させた際に得られるキャパシタ特性がどのように変化するかを調べるため、Ta-Zr複合ターゲットのZr面積比を徐々に増加させることによって、前報[6]~[8]の場合と同様に化成電圧160V一定として陽極酸化膜キャパシタを作製し、その $\tan\delta$ を熱処理前と 200°C 熱処理後について比較した。その結果を図1に示す。ここで図中に示してあるZr含有量は、AES分析の結果より得られたものである。

図1より、熱処理前に着目すると、Zr含有量の増加に伴って $\tan\delta$ が低減する傾向が見られるので、Ta-Zr合金の利用は低損失特性を得る上で有効な方策と思われる。また、 200°C 熱処理後の $\tan\delta$ に注目しても、Zr含有量が多くなるほど、むしろ低損失となることがわかる。ただし、Zr含有量が10at.%のときも、 200°C 熱処理後の $\tan\delta$ は、熱処理前よりも幾分大きく0.007程度であり、この値は Ta_2N の場合と比較すると若干大きいので、熱的安定性を十分に改善できたとはいえない。したがって、低損失特性を実現する意味でのZrの添加は、10at.%程度ではまだ不十分であり、むしろZr含有量を大幅に増大させることが有効と思われる。そこで次に、AES分析の結果より、Zr60at.%と評価されたTa-Zr合金膜を用いて、陽極酸化膜キャパシタを作製することとした。

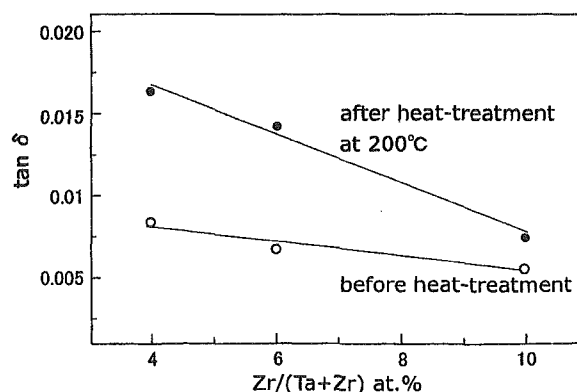


図1 160V化成したTa-Zr陽極酸化膜キャパシタの熱処理前後の $\tan\delta$ に及ぼすTa-Zr合金膜中のZr含有量の影響

Fig. 1 Influences of Zr content in Ta-Zr alloy films on $\tan\delta$ before and after heat-treatment of Ta-Zr anodized thin film capacitor prepared at 160V.

3.2 Ta-Zr(60at.%) 陽極酸化膜キャパシタのキャパシタ特性

図2にTa-Zr(60at.%)陽極酸化膜キャパシタのキャパシタ特性に及ぼす熱処理温度の影響を示す。このとき、図1の場合と同様に160V化成すると、得られた陽極酸化膜の干渉色は部分的に不均一となった。このことは、スパッタ堆積させた状態のTa-Zr合金膜の組成は、AES分析の結果より場所によらず均一なことが確認されているので、陽極酸化後の酸化膜の組成にむらがあることを示唆し、得られる特性値は信頼性に乏しいことを意味するものと思われる。その理由として、陽極酸化反応の成長プロセスに着目すると、Taの場合にはTa金属イオンの溶液界面方向への拡散と溶液中の酸素イオンの金属中への拡散の両者に依存するのに対して、Zrの場合はHfと同様に主として酸素イオンの拡散のみに支配されるので[9]、その違いによって酸化膜の組成に部分的なむらが生じたのではないかとと思われる。したがって、この組成状態の膜では、前報のAl₃Ta[8]等の場合とは異なって、TaとZrの存在比がほぼ匹敵しているため、化成電圧を比較的高く、酸化膜厚を厚くしていくと、このような違いが顕在化したのではないかと推測される。

もしこの推測が妥当であるとすれば、化成電圧を低下させて酸化膜厚を薄くすれば、このような違いは顕著でなくなるため、均一な干渉色に近い陽極酸化膜が得られるのではないかと期待される。しかも、化成電圧を低減させ酸化膜厚を薄くすればいっそうの高容量化が可能となる。ただし、前述したように一般に酸化膜厚を薄くすると、tan δが増加するとともに、熱劣化開始温度も低下することが知られている[4]。しかし

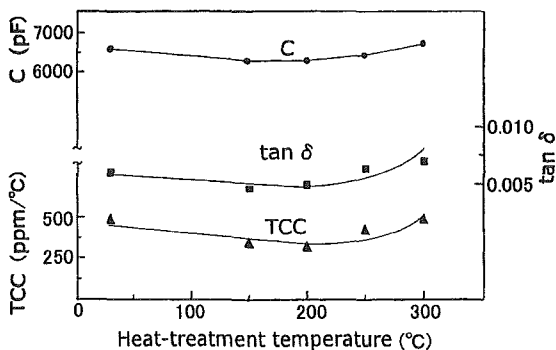


図2 化成電圧 80V で作製した Ta-Zr 陽極酸化膜キャパシタのキャパシタ特性に及ぼす熱処理温度の影響

Fig. 2 Influences of heat-treatment temperature on capacitor properties of Ta-Zr anodized thin film capacitor prepared at 80V.

ながらもう一方では、高耐熱化が可能となる Ta₂N 陽極酸化膜キャパシタの場合は、化成電圧を 80V まで低減させても、250°C 程度の熱処理温度までであれば熱劣化は生じないことが知られている [10].

そこで、この Ta-Zr(60at.%) 合金膜を陽極酸化して薄膜キャパシタとした場合でも、Ta₂N の場合と同様なことがいえるか否かを確認するため、化成電圧を 80V に設定し直して薄膜キャパシタを作製することとした。その結果、この場合には前述の予測のとおりほぼ均一な干渉色の陽極酸化膜が得られた。そこで次に、この時のキャパシタ特性に及ぼす熱処理温度の影響を調べたので、その結果を図2に示す。図2より、熱処理温度 250°C 以上で C, TCC, 及び tan δ が若干増加し始める傾向が見られるが、その程度はごくわずかで、300°C 熱処理後においても tan δ は 0.007 程度であり、図1に示されている Ta-Zr(Zr, 10at.%以下) キャパシタ及び一般的に利用されている Ta キャパシタの場合と比べると、十分に耐熱的であるといえる。

3.3 漏れ電流特性に及ぼす熱処理温度の影響

次に、図2に示した薄膜キャパシタの熱処理前の漏れ電流特性に及ぼす、A1 上部電極に対する印加電圧の極性の違いによる影響を調べた。図3はその結果である。この図より、印加電圧が小さければ極性による違いはほとんど見られないが、印加電圧を増大させるに従って、極性による違いが徐々に顕在化し、負の電圧を印加した方が小さいことがわかる。このことは、前報の Al₃Hf, Al₃Zr, 及び Al₃Ta の場合とは異なる点であり [6]~[8]、その理由としては、前報では上部電

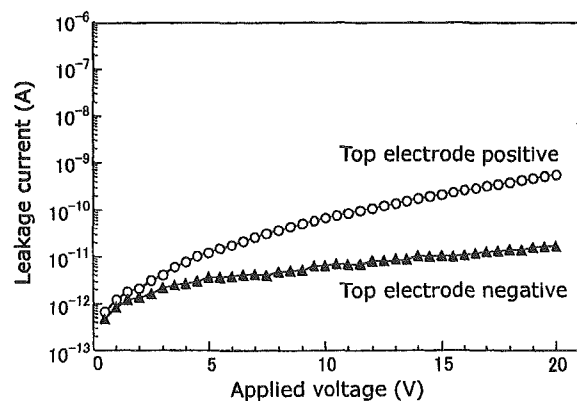


図3 80V 化成した Ta-Zr 陽極酸化膜キャパシタの漏れ電流特性に及ぼす印加電圧の極性の影響

Fig. 3 Influences of applied voltage polarity on leakage current property of Ta-Zr anodized thin film capacitor prepared at 80V.

極, 下部電極ともにAlに近い組成であったのに対して, 本系では, 上部電極であるAlと, 下部電極となっているTa-Zr合金ではその組成が大きく異なるため, 電極金属の仕事関数の違いが寄与している可能性も考えられるが, 低印加電圧領域では両者の差が無視できるようになることを考えると, 現段階では必ずしも明確でない。ただし, その違いは, 20Vの印加電圧で比較しても, 10^{-11} A台と 10^{-10} A台の違いであり, 実用面では問題にならないといえる。とはいえ, このことはあくまでも直流印加電圧に対して得られた特性であって, 多くの陽極酸化膜キャパシタの $\tan \delta$ は, MHz以上の領域で増加傾向を示すのが一般的であるので, 高周波領域でも同様な特性が得られることを意味するものでないことは留意しておく必要がある。

次に, 80V化成したこのTa-Zr(60at.%)陽極酸化膜キャパシタのAl上部電極に, 負の電圧を印加した場合の漏れ電流特性に及ぼす熱処理温度の影響を図4に示す。この図からわかるように, 200°C程度の熱処理温度までは, 漏れ電流的にも全く劣化は見られないばかりか, その値は同一化成電圧で作製したTa₂N陽極酸化膜キャパシタの場合よりも2けた以上小さい[4]。ただし, 前節の図2で見られた損失特性の若干の熱劣化に対応して, 250°C以上では漏れ電流に増加が見られるので, 前報[6]~[8]のAl₃Hf, Al₃Zr及びAl₃Taの陽極酸化膜キャパシタほどには, 高耐熱といえないことがわかる。その理由は, 本研究で用いている合金膜が, 本質的に熱劣化が生じやすいTaを, 40at.%程

度含む膜であることと, 化学量論的な金属間化合物ではないため, 化合物としての熱的安定性の利点が活用できていないためと思われる。しかしながら, 漏れ電流の大きさ自体に着目すると, その値は20V印加時で 10^{-9} A台であり, 同一化成電圧で作製したTa₂Nキャパシタの場合よりまだ1けた以上小さいので, 実用的には全く問題ないと思われる。

一方, 最近のChiuらの報告[11]によると, 電気伝導機構の立場からは, Ta₂O₅の2MV/cm以下の機構はSchottky伝導とされているので, 本研究のTa-Zr(60at.%)陽極酸化膜の場合にも同様なことがいえるかどうかを確認するため, 図4中の熱処理前における電流密度の自然対数ln(J)を, 電界Eの平方根に対してプロットすることとした。ただし, このとき, Eの関数として表示するためには酸化膜厚が必要となるので, Ta及びZrで単位の化成電圧に対して形成される陽極酸化膜の厚さ, すなわち化成速度は, 文献値[12]によるとそれぞれ20Å/V及び14Å/Vとされているので, 作製した合金原子組成比のまま混合酸化物になっているものと仮定して酸化膜厚を評価すると, 80V化成した酸化膜厚は約1300Åと見積もられる。したがって図3及び4の印加電圧20Vは約1.5MV/cmに相当し, Chiu等[11]がSchottky伝導とした電界領域に対応する。

そこでEの値には, 印加電圧を1300Åで除した値を用いることとした。その結果は, 図5に示されている。この図より, Schottkyプロットによく対応して, この電界領域では直線関係が得られるので, この陽極

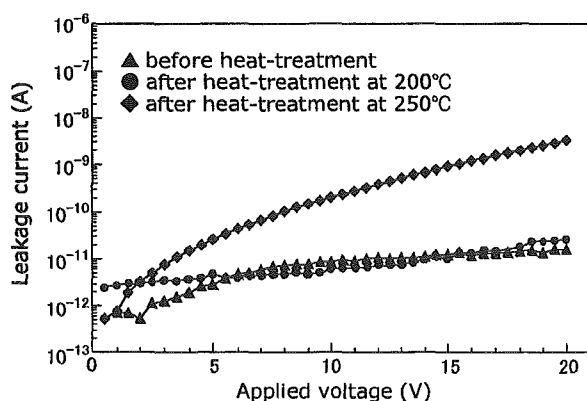


図4 80V化成したTa-Zr陽極酸化膜キャパシタの漏れ電流特性に及ぼす熱処理温度の影響

Fig. 4 Influences of heat-treat temperature on leakage current property of Ta-Zr anodized thin film capacitor prepared at 80V.

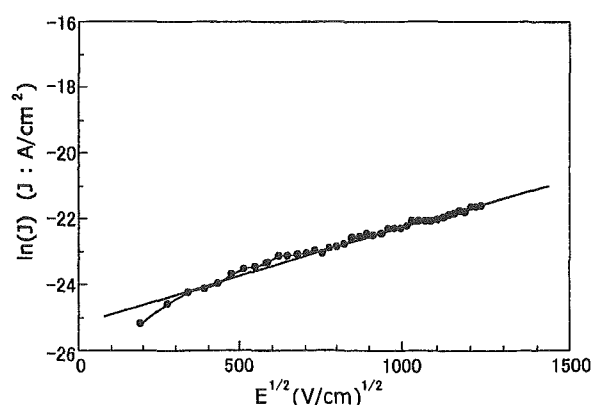


図5 80V化成したTa-Zr陽極酸化膜キャパシタのln(J)-E^{1/2}プロット

Fig. 5 The ln(J) as a function of of E^{1/2} for Ta-Zr anodized capacitor prepared at 80V.

酸化膜も Ta_2O_5 の場合と同様な電気伝導機構に従っているものと思われる。また、Schottky 伝導であれば、漏れ電流の大きさは用いた電極金属の仕事関数の違いによって異なるはずであるが、図3に示された結果は、その意味では対応しているといえる。

次に、この Ta-Zr(60at.%) 陽極酸化膜が、前述と同様に原子組成比的に Ta_2O_5 と ZrO_2 が 2:3 の割合の均一な混合誘電体であると仮定し、 Ta_2O_5 と ZrO_2 の比誘電率は文献値 [13] と同じとみなして、それぞれ 25 及び 23 の値を用いると、この陽極酸化膜の平均的な比誘電率は約 23.8 と見積もられる。この比誘電率の値と実測した静電容量値から酸化膜厚を推定すると、80V 化成では約 1300Å となるので、前述の酸化膜厚の仮定は妥当とみなすことができる。更に、図5に示した Schottky プロットの直線の傾きより、比誘電率を算出すると約 24.1 という値が得られ、先ほどの 23.8 という値と極めてよく一致する。したがって、Ta-Zr(60at.%) 合金を用いることで、Ta 陽極酸化膜キャパシタの場合に見られたような熱劣化は、前報の Al_3Hf , Al_3Zr , Al_3Ta の場合 [6]~[8] ほど顕著とはいえないまでも、これらのキャパシタよりも高誘電率の状態を維持したまま改善できたといえることができる。

3.4 薄層化の検討

以上に加えて、 Ta_2N 陽極酸化膜キャパシタでは [4]、比誘電率の低下が生じるものの、化成電圧を 40V 程度まで低減させて酸化膜を薄くしても、低損失キャパシタの $\tan \delta$ の基準 (1%以下) を保持できたので [10]、この Ta-Zr(60at.%) 合金膜の場合でも同様なことがいえるかどうかを確認するため、化成電圧の低減を試みた。その結果を図6に示す。この図中には比較のため、 Ta_2N 陽極酸化膜キャパシタの場合の結果も併せて示してある。この図に示されているように、低化成電圧の場合でも、 Ta_2N キャパシタよりもむしろ低損失な特性が得られ、このような特徴を保持したまま、酸化膜厚の薄層化によって、よりいっそうの高容量化が可能となることがわかる。更に付言すると、ここにはその結果は直接図示しないが、化成電圧を 60V 及び 40V と低減させた場合でも、その $\ln(J)-E^{1/2}$ 特性は Schottky プロットに従って直線関係が得られ、比誘電率も約 24 という値が得られたので、酸化膜厚を薄くしても、80V 化成の場合と同様に均一な混合誘電体とみなせるものと思われる。

したがって、Ta-Zr(60at.%) 陽極酸化膜キャパシタでは、 Ta_2N の場合に不可避的に生じる比誘電率の低

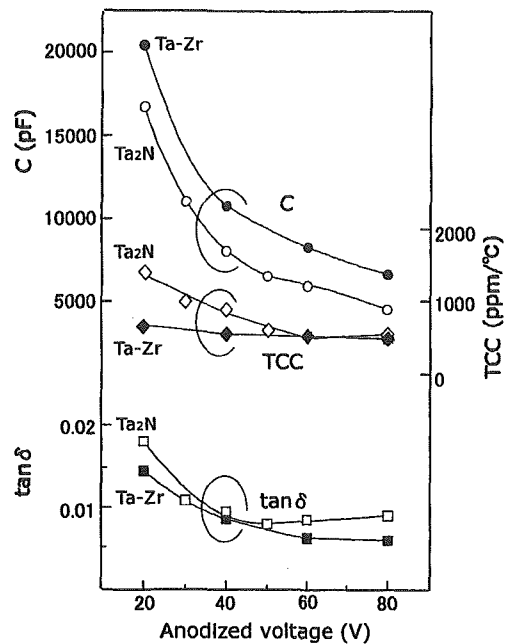


図6 Ta-Zr 合金及び Ta_2N 陽極酸化膜キャパシタのキャパシタ特性に及ぼす酸化膜厚の低減の影響

Fig. 6 Influences of reduction of oxide thickness on capacitor properties of Ta-Zr and Ta_2N anodized capacitor.

下を招かず、高誘電率状態を維持したまま、Ta 陽極酸化膜キャパシタで生じる熱劣化が改善でき、同時に、酸化膜厚を低減させても、 Ta_2N キャパシタの場合と同等以上に低損失化が図れることがわかった。

4. む す び

耐熱性の向上を図ると同時に、比誘電率の低下を伴わない Ta 系キャパシタを実現するため、 Ta_2O_5 の比誘電率に近い ZrO_2 と Ta_2O_5 との混合誘電体を得る目的で Ta-Zr 合金膜に着目し、陽極酸化膜キャパシタを作製して、そのキャパシタ特性及び漏れ電流特性を酸化膜厚の低減効果と耐熱性との関連について検討し、以下の結論を得た。

(1) まず最初に、化成電圧 160V 一定で、Ta-Zr 合金膜中の Zr の含有量を徐々に増加させたとき、Zr 含有量の増加に伴って $\tan \delta$ が低減する傾向が見られたので、次に Zr 含有量 60at.% の Ta-Zr 合金膜の陽極酸化膜キャパシタを作製した。

(2) この合金膜を 80V で陽極酸化したキャパシタは、300°C 熱処理後においても $\tan \delta$ は 0.007 程度であり、かつ 250°C 熱処理後の漏れ電流値は、20V 印加時で 10^{-9} A 台であり、Ta より極めて高耐熱な特徴が

得られた。

(3) 次に、その漏れ電流密度の対数 $\ln(J)$ を、電界 E の平方根に対してプロットしたところ、直線関係が得られたので、この膜の電気伝導機構は Ta_2O_5 の場合と同様に Schottky 伝導に従うものと考えられる。

(4) また Schottky プロットの直線の傾きから、比誘電率を算出したところ、約 24 の値が得られ、この膜は Ta_2O_5 と ZrO_2 の均一な混合誘電体とみなせることがわかった。また、化成電圧を 40V まで低減させても、同一の比誘電率を保持したまま Ta_2N の場合よりむしろ低損失な陽極酸化膜キャパシタが得られることがわかった。

(5) 以上の結果から、Ta-Zr(60at.%) 陽極酸化膜キャパシタは、 Ta_2N の場合に生じる比誘電率の低下を招くことなく、耐熱性を改善できるばかりでなく、低損失特性を損なうことなく、酸化膜厚の薄層化により、よりいっそう高容量化も図れるので、高信頼性薄膜キャパシタを実現する上で、Ta-Zr(60at.%) 合金膜は有用な材料と結論できる。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会の科学研究費補助金、基盤研究(C)(2)(13650329)の補助を得て行った。付記して、関係各位に御礼申し上げる。

文 献

- [1] J. M. Schoen, R. C. Pitetti, and D. Jaffe, "The correlation between temperature coefficient of capacitance and dielectric loss in Tantalum and Tantalum-Aluminum anodic oxides," J. Electrochem. Soc., vol.119, no.9, pp.1215-1217, 1972.
- [2] M. H. Rotterman, M. J. Bill, and D. Gerstenberg, "Tantalum film capacitors with improved ac properties," IEEE Trans. Components, Hybrids and Manuf. Technol., vol.CHMT-1, no.2, pp.137-142, 1978.
- [3] 佐々木克孝, 平田憲太郎, 野矢 厚, 梅沢利二, "窒素添加した Ta の陽極酸化膜キャパシタの熱的安定性," 信学論(C-II), vol.J73-C-II, no. 10, pp.643-645, Oct. 1990.
- [4] 佐々木克孝, 山根美佐雄, 阿部良夫, 野矢 厚, "低化成電圧で作製した Ta_2N 陽極酸化膜キャパシタの耐熱特性," 信学論(C-II), vol.J78-C-II, no.3, pp.113-118, March 1995.
- [5] 清水健一, 幅崎浩樹, P. Skeldon, G. E. Thompson, G. C. Wood, "バルブ金属表面に生成するアノード酸化皮膜の構造と性質," 表面技術, vol.50, no.1, pp.2-9, 1999.
- [6] 尾関雅彦, 山根美佐雄, 佐々木克孝, 阿部良夫, 柳沢英人, 川村みどり, " Al_3Hf 金属間化合物の陽極酸化膜による高耐熱, 高信頼性薄膜キャパシタの検討," 信学論(C-II), vol.J81-C-II, no.7, pp.619-627, July 1998.
- [7] 稲田晴久, 山根美佐雄, 佐々木克孝, 阿部良夫, 川村みどり, 柳沢英人, " Al_3Zr 金属間化合物の陽極酸化とそれを応用した高信頼性薄膜キャパシタの作製," 信学論(C-II), vol.J82-C-II, no.10, pp.543-550, Oct. 1999.
- [8] 田辺 彩, 山根美佐雄, 佐々木克孝, 阿部良夫, " Al_3Ta 陽極酸化膜キャパシタの作製と耐熱性," 信学論(C), vol.J83-C, no.10, pp.972-974, Oct. 2000.
- [9] 野矢 厚, 梅沢利二, "Hf 陽極酸化膜キャパシタの電気的特性," 信学論(C), vol.J67-C, no.11, pp.863-870, Nov. 1984.
- [10] 山根美佐雄, 佐々木克孝, 阿部良夫, 川村みどり, 野矢 厚, " Ta_2N 陽極酸化膜キャパシタの耐熱要因と薄膜化の検討," 信学論(C-II), vol.J79-C-II, no.7, pp.358-365, July 1996.
- [11] F. C. Chiu, J. Wang, J. Y. Lee, and S. C. Wu, "Leakage currents in amorphous Ta_2O_5 thin films," J. Appl. Phys., vol.81, no.10, pp.6911-6915, 1997.
- [12] 神山雅英, 菅田栄治編, 薄膜工学ハンドブック, pp.215-222, オーム社, 1974.
- [13] 佐々木克孝, 尾関雅彦, "バルブ金属の金属間化合物のアノード酸化とコンデンサへの応用," 表面技術, vol.50, no.1, pp.16-20, 1999.

(平成 13 年 11 月 26 日受付, 14 年 1 月 11 日再受付)



渡邊 大介 (正員)

平 12 北見工大・工・機能材料卒。平 14 同大学院博士前期課程了。現在、小松エレクトロニクス(株)に勤務。薄膜電子材料に関する研究に従事。応用物理学会会員。



後藤 智利 (学生員)

平 13 北見工大・工・機能材料卒。現在、同大学院博士前期課程在学中。薄膜電子材料に関する研究に従事。応用物理学会会員。



山根美佐雄 (正員)

昭 57 北海道電波専門学校卒。同年北見工大・文部技官、現在に至る。薄膜電子材料の作製技術及び薄膜電子材料・物性の評価に関する研究に従事。



佐々木克孝 (正員)

昭42北大・理・高分子卒。北大応用電気研究所・研究生を経て昭50北見工大・工・電子工学科講師。昭54同助教授。平2同教授。学部改組により平6同大・工・機能材料工学科教授。平9年4月より平12年3月まで同大学生部長を併任。現在に至る。工博。薄膜電子材料・電子物性・LSI薄膜技術及び陽極酸化膜の電子材料への応用等に関する研究に従事。応用物理学会、日本化学会各会員。



阿部 良夫 (正員)

昭55北大・工・応物卒。昭60同大大学院博士課程了。同年(株)日立入社。ELディスプレイ、半導体メモリの研究に従事。平6北見工大・工・機能材料工学科助教授。工博。薄膜電子材料の物性に関する研究に従事。応用物理学会、物理学会各会員。