綜 説

タ ン タ ル 薄 膜

岡 本 英 一*

(昭和42年9月12日受理)

Tantalum Thin Films

Eiichi OKAMOTO

(Nippon Electric Company Ltd, Sagami-hara, Kanagawa)

(Received Sept. 12 1967)

1. ま え が き

金属あるいは合金、化合物の薄膜を集積回路に使用する努力が永い間続けられたが、結局再現性に欠けることが主な理由で量産段階にはほとんど至っていない。

数年前 Bell Telephone Lab. (BTL) で高融点金属の薄膜化が強力に進められ、グロー放電を用いた陰極スパッタで得られた、タンタル、窒化タンタルが極めて安定性に富み、しかも再現性の良いことが確かめられた。原理的な検討のみにとどまらず、両端開放型の連続スパッタ装置をタンタル薄膜製造用として開発し、量産にもタンタル薄膜が適することを立証し、昭和42年には100万個の生産記念を Western Electric社 (B. T. L. の製造部門) で行なった。勿論、これは薄膜タンタルが優れているばかりでなく、薄膜用の Beam Lead 能動素子が時機を同じくして開発されたことも、集積回路の主要な部門を占める一因となっている。以下にタンタル薄膜について簡単な解説をしよう。

2. タンタル薄膜の形成方法

金属薄膜の形成には、真空蒸着が、最も普通に行なわれる方法であるが、Ta, W, Mo 等の高融点金属の場合、抵抗加熱による真空蒸着は容易でないで、陰極スパッタリング、電子線加熱真空蒸着、電着、気相法などが検討された。中でも陰極スパッタ法が最も多く行われる方法なので、ここでは、スパッタリングによる薄膜について考察する。

なお、蒸着については、Holland¹⁾により、スパッタリングについては、Holland¹⁾, Kay²⁾ および Maissel³⁾により、それぞれまとめられているので参照されたい。

表 1 真空装置を用いたタンタル薄膜形成方法

真空装置を用いたタンタル薄膜形成方法	特 徴
直流二極スパッタリング	構造が簡単で大きな基板を用いることが出来、薄膜回路生産用リアクティブスパッタリング容易。
四極スパッタリング	低いガス圧中でのスパッタリング。
バイアス スパッタリング	膜中の不純分ガスのコントロール、基板内バラッキのコントロール
非対称交流スパッタリング	膜中不純分ガスのコントロール
ゲッタスパッタリング	残留不純分ガスを少なく出来る
DC+RFスパッタリング	低いガス圧中でのスパッタリング、蒸着速度向上、O ₂ ガス中などのリアクティブスパッタリング
電子ビーム蒸着	高純度薄膜

3. タンタル薄膜の性質

3.1 タンタル金属薄膜

タンタル薄膜には、バルクと同じ b, c, c 構造のものと、バルクでは認められない正方晶系の β -Ta とがある⁴⁾。スパッタによる b. c. c-Ta が普通 $\rho=24\sim 50\mu\Omega\text{-cm}$, T. C. R= $+500\sim +1800\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ であるのにくらべて、 β -Ta は、 $\rho=150\sim 250\mu\Omega\text{-cm}$, T. C. R= $-100\sim +100\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ であるから、薄膜抵抗体薄膜としては、b. c. c-Ta よりも望ましい。 β -Ta を $6\times 10^{-8}\text{ torr}$ 以上の高真空中で $755\sim 775^\circ\text{C}$ に加熱すると、b. c. c-Ta に変わる。 β -Ta ができるスパッタ条件で、分圧で $1\sim 5\times 10^{-5}\text{ torr}$ の N₂ や O₂ などの不純物ガスを加えると、b. c. c-Ta ができる^{5,6)}。

また、バイアススパッタの場合、基板バイアスが -100V 以上になると、b. c. c-Ta が得られている^{7,8)}。図5には基板バイアスと比抵抗の関係を示してあるが、

* 日本電気株式会社相模原事業所 (神奈川県相模原市下九沢1120)

図1 四極スパッタ装置電極構成

図2 非対称交流電源

図3 ゲッタスパッタ電極構成

図4 D.C or D.C+RFスパッタ電極構成

図5 基板バイアスと比抵抗の関係

図6 電圧による比抵抗及び T.C.R.の変化 (二極 D.C.)

基板バイアスは、膜へ飛来する不純物イオン数、膜中の不純物ガス量や結晶成長に影響を与え、バイアスパッタの場合の膜中の不純物ガス濃度は

$$g_b = \frac{\alpha N_g - (j/q)(S' - \beta)}{\alpha N_g - (j/q)(S' - \beta) + R}$$

で与えられる⁹⁾。ここに N_g は単位時間、単位面積について、膜面に衝突する不純物ガス数、 α はその付着確率、 R は蒸着速度、 j はバイアス電流密度、 q は電子の

電荷, S' は不純物ガスの実効スパッタ率である。

直流二極スパッタの場合, 負の陰極電圧が大きい程比抵抗が小さく密度が大きい膜が得られ^{7),10),11)}, Krikorian と Sneed¹¹⁾ によると (図6), -1KV では $\sim 10^5 \mu\Omega\text{-cm}$ であるが, -6KV では $30\sim 60 \mu\Omega\text{-cm}$ である。Cook は⁷⁾ 陰極電圧, およびバイアス電圧を変えた場合, 基板前面のプラズマポテンシャルが, ほぼ -6V 以下では, 比抵抗がほとんど一定になると報告している。基板は普通, 基板支持台兼陽極の接地された金属製の台の上に置かれるが, 基板支持台と陽極を分け, 基板支持台を電氣的に浮かした状態で行なうこともある。この場合, 基板支持台, 陽極などの配置, 寸法により, 基板前面は, 負のプラズマポテンシャルになる。

b. c. c-Ta の場合, 不純物ガスが小さい程また, 蒸着速度が大きい方が比抵抗がバルクのものに近いものが得られる。高真空中での電子ビーム蒸着の場合蒸着速度が充分大きいと, $14 \mu\Omega\text{-cm}$ のものが得られ¹²⁾, スパッタでも残留ガス圧を小さくして, $500\text{\AA}/\text{min}$ の蒸着速度で $15\sim 20 \mu\Omega\text{-cm}$ が得られている¹³⁾。不純物ガスの影響を小さくするため, バイアススパッタリングの他に, 非対称交流スパッタリング^{14),15),16)} やゲッタスパッタリング¹⁷⁾ が用いられる。

スパッタリングによる $\beta\text{-Ta}$ の超伝導遷移温度 T_c は, 0.5°K という報告があるが⁴⁾, スパッタリングによる b. c. c-Ta の場合, $52.2 \mu\Omega\text{-cm}$ のもので, 3.25°K であり, ¹⁸⁾ 電子ビーム蒸着¹⁸⁾, 非対称交流スパッタリング¹⁶⁾, ゲッタスパッタリング¹⁷⁾ や, 高真空中の特殊な蒸着¹⁹⁾ による方法などにより, 残留ガスの影響を小さくする程バルクに近いものが得られている。

$\beta\text{-Ta}$ と b. c. c-Ta の形成条件には, 不純物ガスが大きく影響していると思われるが, 現在のところ良くわかっていない。

4. リアクティブスパッタリングによる薄膜

4.1 Ta-窒素系薄膜

リアクティブスパッタリングは, 主として金属酸化膜を作るのに応用されてきた¹⁾。スパッタリングによって薄膜を作る場合, 不純物ガスが一部分電離されていたり, 基板がプラズマにさらされたりするため, 真空蒸着の場合より, 不純物ガスの影響が大きいたることがしばしばある。Geretenberg らは^{20),21),5)} N_2 , O_2 , CH_4 , CO の活性ガスのTa薄膜への影響を調べた。Ta のリアクティブスパッタリングの場合, 主として薄膜回路への応用から Ta-N系, Ta-O系の膜の製造が行われている。

Ar 中のスパッタリング $\beta\text{-Ta}$ ができるスパッタリ

ング条件に N_2 gas を少し加えると, 比抵抗の減少と, 抵抗値温度数 T. C. R. の急激な増加が見られ, b. c. c-Ta が形成される。さらに N_2 gas 量を増加して行くと, 窒素原子が格子間に入り, Ta_2N が形成されるようになる。その間, 比抵抗が増加し, T. C. R. は減少する。 Ta_2N が形成された後は, 比抵抗, T. C. R. とともにほぼ一定値 ($\rho = 250\sim 300 \mu\Omega\text{-cm}$, T. C. R. = $150\sim 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$) を示し, "plateau" 領域を作る。さらに, N_2 を増加と, bulk の窒化タンタルには認められない NaCl 型の f. c. c-TaN を形成した後, 比抵抗が急激に増加し, T. C. R. は負で大きくなる。Guldner は²²⁾, キセノンフラッシュランプによる Ta 膜の蒸発と, ガスクロマトグラフとを組合せて, 膜中の窒素, アルゴン, 水素濃度を調べた。Ta-N 系では, スパッタ中の窒素分圧と, 膜中の窒素濃度が比例している。また, b. c. c-Ta でも窒化タンタルでも水素が約 $7\sim 8\%$, Ar は $1.6\sim 2\%$, 酸素と炭素は $1.1\sim 1.2\%$ が含まれている。バルクの窒化タンタルは, Ta_2N , TaN 共に六方晶系であるがリアクティブスパッタリングによる Ta_2N は六方晶系, TaN は NaCl 型の面心立方構造である。バルクの Ta_2N , TaN および, Ta_2N 薄膜は 1.5°K 以上では超伝導を示さないが^{23),24)}, f. c. c-TaN 薄膜は超伝導を示し $T_c = 4.94\text{K}$ である¹⁸⁾。Sosniak²⁵⁾ によると, Ta-N 系のホール係数は, $\beta\text{-Ta}$ から TaN が大部分になるまでの窒素含有量の膜では, 正の値を示し, TaN が形成され始めると, 急激に小さくなるが TaN 薄膜そのものが, 負のホール係数値を示すものかどうかは調べていない。

リアクティブスパッタリングの場合, 膜中の不純物ガ

図7 リアクティブガス分圧と比抵抗の関係

図 8 陽極電圧, N_2 分圧と比抵抗の関係

ス濃度は

$$g_1 = \alpha N_g / (\alpha N_g + R)$$

である⁹⁾。純粋の窒化タンタル(化学量論的には)では $\alpha N_g/R=0.5\sim 1$ となるはずであるが, Guldner の分析では²⁹⁾ Ta_2N+TaN 膜でも, 窒素とTaの原子数比は $^{28}/_{60}=0.47$ である。いずれにしても, Taの蒸着速度 R , したがって, Taのスパッタ率によって N_g を変えねば, g_1 は一定とならない。

Plateau領域での比抵抗, T.C.Rおよび, 平坦部の巾は種類の報告がなされているが²⁰⁾⁵⁾³⁶⁾²⁶⁾²⁷⁾³³⁾³⁷⁾, Krikorian と Sneed¹¹⁾によると(図7)陽極(兼基板支持台)と基板を接地しないで, 同じバイアス電圧をかけた場合, 陽極圧(基板は, 陽極と電気的に連っている)を, 負で大きくしていく程, 比抵抗が小さくなり, 平坦部の巾も延びる。陽極を浮かした場合は, 約 $-200V$ 以内の電圧を陽極に印加したものと同一効果を示している。

4.2 Ta-酸素系薄膜

Ta-O系でも, 少し O_2 を加えた状態で β -Taからb.c.c-Taへの遷移があるが, それ以上 O_2 -ガスを増していくと, Ta_2O_5 が形成される比抵抗は, 増加し続ける。特に, Ta_2O_5 が形成される直前では, 比抵抗の急激な変化(約10桁)がある¹¹⁾。酸素をドーブしたTa-O系膜は, $\rho \cong 2000 \mu\Omega\text{-cm}$ でも, T.C.R $\cong -500 \text{pcm}/^\circ\text{C}$ であるから¹¹⁾²¹⁾²⁸⁾高抵抗に使用できる。リアクティブスパッタリングによる Ta_2O_5 膜はコンデンサの誘電体膜や交叉

して重ねる絶縁膜に使用できる²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾。リアクティブスパッタリングによって Ta_2O_5 を作る場合基板温度が高い程, 蒸着速度は大きくなる。これは, 基板面での酸化反応が進むためと考えられる¹¹⁾。

酸素ガス中や, 酸素ガス濃度が大きい雰囲気中で, スパッタすると蒸着速度が小さくなるが³⁾, 直流に高周波を重畳することにより, 大巾に蒸着速度を上げることができる³²⁾。

5. タンタル薄膜の応用

スパッタリングによるタンタル薄膜は, ガス組成, 蒸着速度陰極電圧等, スパッタ条件を変えることにより比抵抗, T.C.R, 共に広い範囲にわたって変えることができるから, 薄膜受動素子として広い応用範囲があり, そのための量産装置も種々発表されている。ベルジャの中に多数の基板を貯えておき, それらを次々にコンベヤで運んでスパッタする装置¹³⁾³⁴⁾や, 大気中から次々と基板を真空装置内へ送り込む方式の装置がある。後者の場合, 基板と共に真空槽内に入る空気量を小さくしなければならぬが, このために特殊なバルブ³⁵⁾を用いる方法と圧力通減のためのいくつかの予備槽を用い, それらをコンダクタンスの小さい仕切窓で連結した, いわゆる開端方式の連続スパッタ装置³⁶⁾³⁷⁾とがある。連続スパッタ装置では, 一度条件設定を行なうと, ずっとその条件でスパッタできるため基板間のバラツキを小さくできる。

タンタル薄膜は, 主としてガラス, セラミック上に回路が形成されるが³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾, シリコンウェファア上に形成して, 半導体集積回路との混成集積回路⁴¹⁾や時には単体の抵抗としても用いられる⁴²⁾。タンタル薄膜抵抗値の調整は, 酸化による方法と, 陽極酸化による方法が主として行われる。前者の場合, 主として安定化のために行われるが, 赤外線加熱によって0.3%の精度で調整できる⁴³⁾。スパッタ膜を空気中で熱処理すると, 最初結晶粒界への酸素の拡散が進む⁴⁴⁾。金をドーブしておく, これを小さくすることができ, 熱安定なものが得られる⁴⁵⁾。陽極酸化を用いると, $\pm 0.1\%$ の精度を容易に達成でき, 注意深く行くと $\pm 0.01\%$ の精度まで得られる⁴⁶⁾⁴⁷⁾。

抵抗体薄膜としては, 窒化タンタルが非常に安定であるが, 実用面積抵抗値がたかだか $100\sim 200 \Omega/\square$ であるため, 高抵抗に難点がある。面積抵抗値を大きくするため, Ta-O膜を用いたり, $1\sim 3KV$ でスパッタした密度の小さいタンタル膜¹⁶⁾を用いたり¹⁰⁾⁴⁸⁾⁴⁹⁾, リアクティブスパッタによって Ta_2O_5 -Auサーメットを用いたりする試みもなされているが⁵⁰⁾, 抵抗だけでなく, コンデン

図9 窒素量と比抵抗 T.C.R. 及び変化率の関係

図10 基板材質による温度分析の違い

サへの応用も考慮しなければ、タンタル薄膜のメリットが殺されてしまうことになる、

薄膜回路の場合、ジュール熱による発熱のため、膜温度が上昇し、(図10)そのために劣化が進むことになるので、設計に際しては、この点を考慮して、パターンの配置、基板材料の選定を行わねばならない。

陽極酸化法によるタンタル薄膜または、窒化タンタル

図11 タンタル薄膜コンデンサの構造

表2 タンタル薄膜コンデンサの3方式

	T M 式	T S M 式	T M M 式
最大容量 (C)	0.05 μF	0.05 μF	5 μF
C/A	0.1 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$	0.1 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 以下	1.0 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$
使用電圧 (V)	50V	50V	100V
下地	平滑	平滑	粗
漏洩電流	<1AF	同	同
損失	<0.01	<0.01	0.02~0.05
温度係数	200ppm/ $^\circ\text{C}$		500~1000ppm/ $^\circ\text{C}$

薄膜の酸化膜は、コンデンサ素子として利用される。対向電極は一般に蒸着によって作られる。この形のコンデンサは漏洩電流が小さく、損失 0.003 ~ 0.01 (1 KC/s) 温度係数 + 200ppm/ $^\circ\text{C}$ 、容量 0.1 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ と、すぐれた特性を有している。すぐれている Ta_2N 膜を用いると容量は Ta 膜に対して約1/2になる。また Ta 膜としては、 β -構造の方が $b.c.c$ 構造によるコンデンサ素子よりすぐれた特性を有し安定度も高い⁸⁾⁵¹⁾。

タンタル薄膜コンデンサの構造として、現在図11のものが考えられている。TSM 構造というのは、タンタル酸化膜と対向電極間に、 SiO の層を形成したもので SiO の誘電率(約6)がタンタル酸化膜の誘電率(約22)に比べ小さいので、 SiO 膜の厚さによって色々な容量のものが得られる。すなわち、TM 構造で作ると、非常に製作上困難な数 PF のものが容易に作れる、右側のTMM 構造は、タンタル酸化膜の

上に二酸化マンガン層を形成したもので、この構造のものは固体タンタルコンデンサと同様である。したがって耐圧の高いものができ、信頼性も向上する。そのため数 μF の大容量のものが作れるようになる。また、下地の表面粗度の影響を受けにくいため、一般のセラミックス基板を下地として使用できる。しかし、損失および温度係数が大きいのが欠点である。表2にコンデンサとし

図12 金とニクロム金対向電極を用いたコンデンサの対湿経時変化

表3 いろいろの対向電極金属によるコンデンサの破壊電圧

金 属	化成電圧に対する破壊電圧比	
	小さい電極 面積 $1 \times 10^{-3} \text{cm}^2$	大きい電極 面積 $200 \times 10^{-3} \text{cm}^2$
金	95~98	80~90
カドミニウム	95~98	60~65
鉛	80~95	45~55
亜鉛	75~90	40~50
錫	70~75	55~60
銀	75~85	<0.1
ニッケル	70~85	<0.1
銅	80~90	<0.1
クローム	60~75	<0.1
アルミニウム	50~70	<0.1
スパッタされたタンタル	0~15	<0.1
スパッタされた金	70~80	<0.1

ての特性を有す。

タンタル薄膜コンデンサは、対向電極の構成方法により耐圧(表3)歩留、信頼性、耐湿性(図12)が問題となっている⁵²⁾⁵³⁾⁵⁴⁾。しかし、これら問題は、外装方法や、製造方法の進歩により解決されるであろう。

タンタル薄膜の主な応用はこのような素子としてでなく、むしろ薄膜回路としてである⁵⁵⁾⁵⁶⁾⁵⁷⁾。その例として“twintee notch filter”があり、設計周波数に対して0.1%の精度のものが得られる。さらに周波数の温度の依存度を小さくするために、タンタル膜に酸素を加えるTa-O系が使用される。分布定数回路への応用も考えられ、すでに実用化に向いつつある。このようにタンタル薄膜はCR複合回路への適用に大きな利点をみいだす。すでにタンタル薄膜を利用して、抵抗素子としては海底中継器へ使用され、コンデンサを組合せた“touch-tone”, “notch filter”や高周波増巾器の商品化が進め

られている。

6. あとがき

タンタル薄膜抵抗は完全に実用化に入っており、今後はタンタル薄膜コンデンサも急速に実用化されるものと思われる。タンタル酸化膜については、充分文献を調査し得なかったことおよび全体として羅列に終わってしまったことをお詫びする。

〔文 献〕

- (1) L. Holland : *Vacuum Deposition of Thin Films* (Chapman & Hall, London 1956) .
- (2) E. Kay : *Advance in Electronics and Electron Physics* 17 245 (Academic Press N.Y 1962)
- (3) L. I. Maissel : *Physics of Thin Films* 3 101. (G. Hass, R. E. Thun編, Academic Press 1964)
- (4) M. H. Reed and C. Altman : *Appl. Phys. Letters*, 7 (1965) 51.
- (5) C. J. Calbick and N. Schwartz : *Tran. of the 9th Vac. Symp* 81, 1962.
- (6) D. A. McLean : 第11回化学系学協連合講演会1965.
- (7) H. C. Cook : *J. Vac. Sci. and Technol.*, 4 (1967) 80.
- (8) F. Vratny/ B. H. Vromen and A. J. Harendza Harinxma : *J. Electrochem. Soc. Buffalo Meeting* 1965.
- (9) L. I. Maissel and P. M. Schaible : *J. Appl. Phys.* 36 (1965) 237.
- (10) H. J. Schutze, H. W. Ehlbeck and G. G. Doerbeck : *Trans of the 10th A. V. S Vac. Symp.* (Macmillan Co. N. Y. 1963) 434.
- (11) E. Krikorian and R. J. Sneed : *J. Appl. Phys* 37 (1966) 3674.
- (12) C. J. Calbik and N. Schwartz : *Trans of the 9th Vac. Symp.* (Pergamon Press. N. Y. 1962) 81.
- (13) J. G. Needham : *Trans of the 10th A. V. S, Vac. Symp.* (Macmillan Co., N. Y. 1963) 402.
- (14) F. Vratny and D. J. Harrington : *J. Electrochem. Soc.* 112 (1965) 484.
- (15) 小野寺大, 三岡洸, 佐藤透, 宮崎智光 : 電気学会電子回路部品材料研究会, 東北大 1964.
- (16) R. Frerichs : *J. Appl. Phys.* 33, (1962) 1898.
- (17) H. C. Theuefer and J. J. Hauser : *J. Appl. Phys.* 35 (1964) 554.
- (18) D. Gerstenberg and P. M. Hall : *J. Electrochem. Soc.* 111 (1964) 936.
- (19) J. F. Marchand and A. Venema : *Philips Res. Repts.* 14 (1957) 427.
- (20) D. Gerstenberg and E. H. Mayer : *Proc. 1962 Electronic Components Conference* 57 (1962).
- (21) D. Gerstenberg and C. J. Calbik : *J. Appl.*

- Phys 35 (1964) 402.
- ② W. G. Guldner : IEEE Trans on Components Parts CP-11 (1964) 9.
 - ③ G. F. Hardy and J. KHulm : Phy. Rev. 93 (1954) 1005.
 - ④ F. H. Horn and W. V. Ziegler : J. Am. Chem. Soc. 69 (1947) 2762.
 - ⑤ J. Sosniak : American Vac. Soc. 13th National Symposium 1966.
 - ⑥ J. W. Balde, S. Scharschan and J. J. Dineen : The Bell System Technical Journal XLIII (1964) 127.
 - ⑦ 岡本英一, 牟田弘樹, 溝延孝男 : 昭和41年電気四学会連合大会 1966.
 - ⑧ W. J. Pendergast : The Electrochemical Society, Inc. Spring Meeting- Pittspurgh, Pa. Apr. (1963).
 - ⑨ P. Lloyd : Solid State Electronics 3 (1961) 74.
 - ⑩ E. E. Smith and D. R. Kennedy : Proc. Inst. Elec. Engrs. (London) 109 (1962) 504.
 - ⑪ R. Scot Clark and Coy D. Orr : IEEE Trans on Parts Materials and Packaging, PMP-1 (1965) 31.
 - ⑫ F. Vratny : J. Electrochem. Soc. 113, (1966) 166C.
 - ⑬ D. A. McLean, N. Schwartz and E. D. Tidd : Proc. of the IEEE 52 (1964) 1450.
 - ⑭ M. J. Walter : IEEE Trans on Electron Devices ED-13 (1966) 472.
 - ⑮ W. L. Shockley and E. L. Geissinger : IRE Trans Component Pts, 11 (1964) 34.
 - ⑯ S. S. Charsen and H. Westgard : Electrochemical Technology 2 (1964) 5.
 - ⑰ 新川, 岡林, 佐藤 : 昭和42年度電子通信学会全国大会発表予定
 - ⑱ D. A. McLean : 1959 IRE WESCON Convention Record 3 (1959) 87.
 - ⑲ L. Maissel, J. Simmons and M. Casey : IRE Trans on Component Parts CP-8, (1961) 70.
 - ⑳ P. G. Thomas, J. A. Ekiss, J. Roschen and M. Walker : Proc. NEC Chicago III 18 (1962) 727.
 - ㉑ T. Sikina, M. Casey, J. Saunders and F. Murray Proc. Electron Components Conf (1963) 182.
 - ㉒ James L. Owens : IEEE Trans on Parts Materials and Packaging PMP 1, (1965) 129.
 - ㉓ C. Y. Kuo, J. S. Fisher and J. C. King : IEEE Trans on Parts Materials and Packaging PMP -1, (1965) 123.
 - ㉔ L. I. Marssel : Trans of the 9th Vac. Symposium (1962) 169.
 - ㉕ P. M. Schaible and L. I. Maissel : 同上 (1962) 190.
 - ㉖ N. Schwartz and R. W. Berry : *Physics of Thin Films* 2 398 1964 (Georg Hass and Rudolf. E. Thun編, Academic Press)
 - ㉗ W. H. Jackson and R. J. Moore : IEEE Trans on Parts Materials and Packaging PMP-1, (1965) 45.
 - ㉘ B. H. Vromen : J. Electrochem. Soc. 113 (1966) 58C.
 - ㉙ E. KriKorian and B. E. Berson : Proc. IEEE 53 (1965) 2164.
 - ㉚ John P. Farrell and Clyde H. Lane : Proc. Electronic Component Conf. Washington D. C. (1966) 213.
 - ㉛ D. Gerstenberg : J. Electrochem. Soc. 113 (1966) 542.
 - ㉜ N. W. Silcox and L. I. Maissel : J. Electrochem Soc. 109 (1962) 1151.
 - ㉝ N. Schwartz and M. Gresh : J. Electrochem Soc. 112 (1965) 295.
 - ㉞ J. Klerer, W. H. Orr and D. Farrell : Proceedings Electro. Comp Conf. (1966) 348.
 - ㉟ D. A. Mclean : Proc. NEC. 16 (1960) 206.
 - ㊱ C. G. Thornton : IEEE International Convention Record Part 5, (1965) 53.
 - ㊲ Ichiro Miwa and Takeo Nishimura : IEEE trans Parts Materials and Packaging, PMP-1, (1965) 285.