小型真空管のガラス部品の強さと、それに用いる ガラスの熱膨張係数との関係について*

池 田 豊**

On the Strength of the glass parts for vacuum tubes

by

Yutaka IKEDA

(New Nippon Electric Co., Ltd.)

We have studied about what kind of glass to be used when the glass parts of small type vacuum tubes are made, and especially the relation between the thermal or mechanical strength of glass parts and the thermal expansion coefficient of glass used was studied.

The most desirable relations between flare glass and exhaust tube glass of pinched stems, between stem glass, bulb glass and lead wire of wafer stems, and between bulb glass and exhaust tube glass of tubulated bulbs are explained.

(Received Jan. 8, 1959)

1. 緒 言

小型真空管には、その外囲器、すなわち真空容器として、ガラスのバルブおよびステムが用いられる。ステムには内部の電極をソケットに接続するためにリード線が封入される。さらに、バルブまたはステムには中を真空にするための排気管が溶着される。

小型真空管には ST 管および GT 管と称せられる、いわゆる摘みステム、あるいはバンタムステムを使用したやや大型のもの、MT 管と称せられる小型のウエファーステムを使用したものがあり、それぞれ製造方法を若干異にしている。これらの各種真空管に用いられる封入材料相互の熱膨張係数の相対関係と、その封入体の熱的および機械的強度との関連性について、推計学的方法による研究を行った。

2. 実験材料および実験方法

(1) 実験材料

実験に供したガラスとして、バルブに用いたものはソーダライムガラスで、組成はおおむね SiO_2 69%, Na_2O 17%, CaO および MgO 10%, Al_2O_3 2% およびその他 2% で、熱膨張係数は 30°C ないし 380°C の平均値で、 $100\sim 102 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ のものであり、また、ステムおよび排気管に用いたものは、おおむね SiO_2 57%, PdO 30%, アルカリ酸化物 10% およびその他 3% の鉛ガラスで、熱膨張係数は $90\sim 108 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ の間の種々のものである。同系統のガラスで異なった熱膨張係数を与えるためには Na_2O の含有量のみで調整を行い、また、ガラスに封入されるリード線はデュメッ

Fig. 1 Thermal expansion coefficient of glass

ト線を用い、おおむね銅比率 22.5%, 芯線の鉄ニッケル合金の組成はニッケル含有率 42% 程度のものである。

実験に供したガラスの熱膨張曲線を例示すれば Fig. 1 のようである。なお、以下に記す熱膨張係数の値はすべて $30^\circ\text{C}\sim 380^\circ\text{C}$ の平均値で表わす。

(2) 実験試料

実験に供するため作成したガラス加工部品はステム 2 種、すなわち摘みステムおよびウエファーステムならびに管付バルブ 1 種で、その形状はだいたい Fig. 2 のようである。

これらのステムおよび加工バルブは、いずれも多ヘッドの自動機械を用い、酸素を混入して燃焼を助勢したガスバーナーを用いて加工、作成した。

* 原稿受付 昭和34年1月8日

** 新日本電気株式会社大津工場

Fig. 2 Shape and size of stems and a bulb

Fig. 3 Mechanical strength test of exhaust tube of stems

(3) 試験方法

実験試料に対し、それぞれつぎの各項目の試験を行った。

(i) ひずみ試験 試料のガラス内のひずみを偏光板ひずみ検査器にて観察し、かつ、水晶くさびを用いた光弾性縞偏位測定法によってその部分の応力を求めた。

(ii) 耐熱試験 試料の耐熱試験は急冷試験および急熱試験を行った。

急冷試験としては、試料を高温の炉の中で一定温度に約10分間保持した後、ただちにこれを水中に投入し、1分後取り出してガラス部分のクラックの有無を検し、クラックを生じていないものは、さらに高温の所定温度にあげて同様の実験を繰り返し、ついにクラックを生ずるに至った場合の急冷温度差をプロットする。

急熱試験としては、微温湯、冷水、寒剤もしくは液体空気を用いて冷却した冷槽中からただちに沸騰水中に投入し、クラックを生ずるに至った急熱温度差をプロットする。

(iii) 機械的強度試験 ステムもしくはバルブに溶着した管の溶接部の機械的強度を測定する方法としては、Fig. 3のように、スプリングバランスの鉤に管の一端を引掛け、本体の部分を手で引張り、管の付け根に直角方向へ力を加え、しだいに力を強くして管が切断するに至った

場合のスプリングバランスに掛っている荷重を読み、管の付け根に加わっているトルクをプロットする。

3. 実験結果および考察

(1) 摘みステムのフレヤと排気管の熱膨張係数

(i) 実験要因

ステムの本体をなす材料、すなわち、いわゆるフレヤに使用するガラスと、排気管に用いるガラスとをそれぞれ熱膨張係数の異なる5種を選び、Table 1のようにその他の2要因を組み合わせ、75種の組み合わせ

Table 1 Experimental factors and their levels concerning the pinched stems

Levels	Factors			
	Exp. Coef. of flare glass α_F $\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	Exp. Coef. of exhaust tube glass α_E $\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	Experimental date D	Kind of stems S
1	92	92	1	A
2	94	94	2	B
3	96	96	3	C
4	98	98	4	
5	100	100	5

Fig. 4 Stress of each portion of a stem

Fig. 5 Results of sudden cooling test of stems

Fig. 6 Results of mechanical strength test of stems

によって、3回繰り返しのある 5×5 ラテン方格法により割り付けて、各組み合わせそれぞれ 250 個のステムを作成して実験に供した。

(ii) 実験結果

a) ステムのひずみ ステムのひずみから、その各部の応力を求めた結果の一例を示せば Fig. 4 のとおりである。図はフレヤの熱膨張係数 $96 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 、排気管の熱膨張係数 $92 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ のものを用いて作成したステムのものである。

b) 耐熱強度 ステムの急冷試験において、掛気管の付け根にクラックを生じた際の急冷温度差を Fig. 5 に示す。本図は各要因水準ごとに 20 個の試料をとって行った結果である。

c) 機械的強度 排気管の付け根から切断するに至った際の、付け根にかかっているトルクを各 20 個の試料につきプロットすれば Fig. 6 のようである。

(iii) 実験結果の考察

Fig. 7 Stress of stems vs. difference of expansion coefficient of flare glass and exhaust tube glass

a) ステムの応力 ステムの排気管付け根の部分にかかっている応力と、二つのガラスの熱膨張係数との関係を図示すれば Fig. 7 のようである。応力は明らかに両ガラスの熱膨張係数差に比例する。

b) 耐熱強度 Fig. 8 のように、両ガラスに熱膨張係数の差のない場合が、耐急冷強度はもっとも大きく、差が増せばいずれが大きい場合でも強度は減少する。また、フレヤガラスが大きい場合のほうが減少の程度が大きい。

図において点線に矢印を付けた範囲は、測定値の平均値を基準として 1% の危険率において母平均の存在する信頼限界を示す。なお、その後の図においても同様である。

c) 機械的強度 Fig. 9 のように直線関係にあり、排気管の熱膨張係数のほうが大きいほど折れ難い。図の横軸はフレヤの熱膨張係数から排気管の熱膨張係数を減じた差を示す。この関係はステムの排気管付け根部分に圧力ひずみのかかっている程度が大きいほど強いことを示している。

Fig. 8 Strength against sudden cooling of stems; temperature difference of cooling when cracked vs. difference between expansion coefficient of flare glass and exhaust tube glass

Fig. 9 Mechanical strength of exhaust tubes of stems; torque when broken vs. difference of expansion coefficient of flare glass and exhaust tube glass

(2) ウェファーステムのガラスの熱膨張係数

(i) 実験要因

ステムに用いるガラスには7種の鉛ガラス、デュメット線には銅比率41.6%のものと43.0%のものと2種、また、ステムにかぶせて封入するバルブには熱膨張係数 $100 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ のソーダガラスを用い、その要因組み合わせは Table 2 に示すとおりで計28種類を採用し、各組み合わせのステムそれぞれ150個を作成して実験に供した。

なお、試験はこれらのステムおよびそれらを用いて作成した封入球の両方について行った。

(ii) 実験結果

a) ステムのひずみ 製作の工程において、ステム

Table 2 Experimental factors and their levels concerning the wafer stems

Levels	Factors		
	Exp. Coef. of stem glass $\alpha \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	Kind of Dumet wire <i>L</i>	Experimental date <i>D</i>
1	90	L_1	D_1
2	93	L_2	D_2
3	96		
4	99		
5	102		
6	105		
7	108

Fig. 10 Results of sudden cooling test of stems

Fig. 11 Stress of stems

のガラス部分に強制空冷法による圧力ひずみを与えて作成したままのもの、およびそれを鈍炉にてガラスの除歪域においてアニールしたものにつき、そのひずみを測定した。

b) 封入球のひずみ ステムにバルブをかぶせて封入を行った後の球につき、バルブとステムとの溶着部におけるひずみを各実験試料につき測定した。

c) ステムの耐熱強度 ステムの急冷試験および急熱試験を行ったが、各要因組み合わせごとのステムの急冷試験の結果を Fig. 10 に示す。各組み合わせごとの試験数は7個、また、図の黒丸はデュメット線にたんを発しているクラックを生じたもの、白丸はそれ以外のクラックを生じたものを示す。

なお、同様にして急熱試験も行った。

d) 封入球の耐熱強度 封入球の急冷試験および急熱試験を行い、クラックを生ずるに至った場合の急冷および急熱温度差をプロットした。

(iii) 実験結果の考察

a) ステムの応力 ステムのデュメット線封入部における応力とガラスの熱膨張係数との関係は Fig. 11 A に示すとおりである。なお、同図にステムに強制空冷ひずみ、すなわちデュメット線による影響をほとんど受けない部分の応力の大きさをC、また、除歪したステムのデュメット線封入部における応力をBに示す。

ステムの応力は図で明らかなように、いずれもガラスの熱膨張係数に対して直線的関係を示す。

b) 封入球の応力 封入球のバルブとステムの封入部分における応力は Fig. 12 のようである。図のA曲線は封入作業後鈍炉にて充分除歪したものに関し、図のB曲線は封入作業に際してステム底面から強制空冷を施してステム中央部分のひずみを除去するような操作を行ったものである。

前者の場合はステムガラスの熱膨張係数 $95 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ の付近のものがバルブとの接触界面において無応力となり、後者の場合はステムガラスの熱膨張係数が $100 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 、すなわち、バルブの熱膨張係数とほとんど完全に一致させた場合が、界面において無歪とな

Fig. 12 Strength against sudden cooling of stems

ることが明らかにされた。

c) ステムの耐熱強度 ステムの耐急冷温度差とガラスの熱膨張係数との関係は Fig. 13 A, このうちデュメット線にたんを発するクラックを生じた急冷温度差に関しては同図 B, デュメット線との封入部に無関係なクラックを生じた場合の急冷温度差に関して同図 C に示すような関係となる。

ステムの耐熱強度とガラスの熱膨張係数との関係は Fig. 14 に示すとおりで、総合を A, デュメット線にたんを発するものを B, ガラス自体からクラックしたものを C に示す。

デュメット線にたんを発するものについては、急冷、急熱ともほとんど同じところに曲線の極大点がある。すなわち、ガラスの熱膨張係数 $95 \sim 99 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 付近のものが急熱、急冷ともじょうぶであるのは、ガラスとデュメット線の熱膨張とがこのような相対関係にある場合に、残存応力が少ない点ともよく一致し、もっともよい関係にあると云える。

デュメット線にたんを発しないクラックは、主にガ

Fig. 13 Strength against sudden heating of stems

Fig. 14 Stress of sealed tubes

Fig. 15 Strength against sudden cooling of sealed tubes

ラス自体の原因によるものであり、実験の結果からは、急冷に対しては熱膨張係数の小さいほうがじょうぶで、急熱に対しては熱膨張係数の大きいほうがじょうぶであるということができ、いずれもガラスの熱膨張係数に対して直線関係にある。

d) 封入球の耐熱強度 封入球の耐急冷強度は Fig. 15 のように曲線に最大点があり、耐急熱強度は Fig. 16 のようにステムガラスの熱膨張係数が小さいほどじょうぶである。

両図とも A 曲線は封入球を鈍炉にて除歪したもの、B 曲線は封入作業においてステム底面から強制空冷を施してステム中央部分が無歪としたものに関するものである。図で明らかのように後者の作業方法にて作成した封入球のほうが急冷、急熱いずれにもよく耐える。

(3) 管付バルブのバルブと排気管の熱膨張係数

(i) 実験要因

排気管の材料としては 7 種の鉛ガラスおよびバルブと、同材質の熱膨張係数 $100 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ のソーダガラス、バルブには熱膨張係数 100 および $102 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ のソーダガラスを用いた。実験要因の組み合わせは Table 3 に示すとおりで、上記材質のほかにはバルブの寸法および管付機械を別に要因として組み合わせた。すなわち、計 64 種の組み合わせそれぞれ 100 個の管付

Fig. 16 Strength against sudden heating of sealed tubes

Table 3 Experimental factors and their levels concerning the tubulated bulbs

Levels	Factors			
	Exp. Coef. of exhaust tube glass $\alpha \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	Kind of bulbs B	Length of bulbs L	Machine M
1	90 Lead glass	B_1	L	M_1
2	93 "	B_2	L_2	M_2
3	96 "			
4	99 "			
5	102 "			
6	105 "			
7	108 "			
8	100 Soda glass

Fig. 17 Results of mechanical strength test of tubulated bulbs

バルブを作成して実験に供した。

(ii) 実験結果

バルブの管付作業方法は管の上に、その頂部において接触するよう上向きに配置したバルブの内面上方から、炎の径約1mmの細くて鋭い酸素ガスバーナーで極部加熱して熔融封着することにより作成する。

バルブと排気管との接触しているところの形状は、いっぽうが他ほうの周囲を取り囲んでいるのではなく、二つの円筒の垂直切断面どうしを突き合わせて接続したような形をなしている。

a) バルブのひずみ 管付作業を行った直後のもの、およびこれを鈍炉によって除歪したものの両方について、管付け根部におけるバルブガラス内のひずみを測定した。

b) 耐熱強度 急冷試験を行った結果は、最初にクラックの入るのは排気管の付け根ではなく、バルブの肩部であった。

急熱試験は管付バルブを0°Cの水中から100°Cの沸騰水中に投入する方法で試験したが、どの要因組み合

Fig. 18

わせのものもクラックを生じなかった。

c) 機械的強度 排気管の付け根部にクラックの入った際の荷重を各要因組み合わせ別にプロットすれば Fig. 17 のとおりである。

(iii) 実験結果の考察

a) バルブの応力 管付け機械により作成したままの状態のものは、管ガラスの熱膨張係数 $99 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 付近、すなわち、バルブのそれとほぼ近似した場合が、管付け根に応力のない溶着体が得られる。さらに、これを鈍炉にて除歪した場合は、管ガラスの熱膨張係数 $95 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 付近のものをを用いた場合に無歪となし得る。

熱膨張係数 $95 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ の鉛ガラスは、バルブガラスとおおむねその除歪温度においてその熱膨張曲線が交差するから、鈍炉における除歪操作によって無歪の封着体を得られることは当然である。いっぽう、管

付け機械から取り出した製作直後の管付バルブは、その製造工程上必然的にバルブと排気管の熱容量量との関係で後者がさきに冷却するから、いわゆる温度差冷却がなされ、熱膨張係数がやや高い $99 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 付近の排気管ガラスを使用するほうが無歪となるわけである。

b) 耐熱強度 管付バルブにおいて、熱的衝撃によって破壊される箇所は、バルブ自体である場合が大部分であるから、バルブガラスと排気管ガラスの熱膨張係数との相対関係がどうであるかということは、耐熱強度に対しては重大な要素ではない。

c) 機械的強度 Fig. 18 のように排気管の熱膨張係数が $99 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 付近のものがもっとも弱い。両ガラスに熱膨張係数差のある場合が、両者が一致する場合に比べてじょうぶであるのは特異の現象である。また、バルブと同材質のソーダガラスを排気管に使用した場合は比較的良好な結果を得た。

なお、この管は封入球を排気後、その付け根から封じぎってしまうものであるから、機械的強度が問題となるのは製造工程の途中においてのみである。

4. 結 言

小型真空管のガラス加工部品を製作する上において、その材料に用いるガラスとして、どのようなものの組み合わせを選択すべきかについて、特にそれらの材料の熱膨張係数の相対関係と、これらの部品の熱的および機械的強度との関連性について述べた。

摘みシステムにあっては、フレイヤに用いるガラスと排気管ガラスとは同一材質で、同一熱膨張係数のものがもっとも望ましい。ボタンシステムに用いる鉛ガラスの

熱膨張係数は、バルブガラスに熱膨張係数 100×10^{-7} /°C のものを選んだ場合 $95 \sim 98 \times 10^{-7}$ /°C のものが望ましく、それに対してデュメット線は JIS 規格の中央値付近のものが適している。管付バルブにあっては管とバルブの熱膨張係数との相対関係は、バルブより若干熱膨張係数の小さい鉛ガラスの排気管を用いるか、

あるいはバルブと同材質のソーダガラスを用いることが適当であろう。

終りに、本研究に際して新日本電気株式会社大津工場において真空管の製造技術に従事しておられる関係者諸氏の御協力を深謝する。

原子炉用耐熱材料の溶融点 (°F)

金属 : W 6,115, Re 5,756, Ta 5,425, Mo 4,750, Cb 4,479, V 3,450, Cr 3,3407, Zr 3,365, Th 3,090, Ti 3,040

金属間化合物 : Zr_2Ge 4,127, $CrAl$ 3,920, Mo_3Al 3,902, Zr_2Sb 3,452, $ZrBe_{13}$, $ZrBe_9$, $ZrBe$ 3,344, $CrBe_2$ 3,344, Cr_3Si 3,146, $MoAl$ 3,092, $ZrCr_2$ 3,047, V_5Al_3 3,038, Ti_3Sn 3,025, $NiAl$ 2,984, $ZrAl_2$ 2,984

セラミック : $4TaC \cdot ZrC$ 7,106, TaC 7,016, ZrC 6,386, Graphite 6,332, CbC 6,332, TiC 5,684, WC 5,198, VC 5,126, Mo_2C 4,874, ThC 4,766, SiC 3,992, Be_2C 3,902, Cr_3C_2 3,434

TaN 5,396, ZrN 5,396, TiN 5,342, ThN 4,280, AlN 4,046, Be_3N_2 3,992, Ba_3N_2 3,992, CbN 3,686, VN 3,686, Si_3N_4 3,452

ThO_2 5,972, $SiO \cdot ZrO_2$ 4,982, $BaO \cdot ZrO_2$ 4,982, ZrO_2 4,856, CeO_2 4,712, CaO 4,712, BeO 4,622, $3BeO \cdot 2ZrO_2$ 4,604, ZrO_2SiO_2 4,388, SrO 4,370, $CaO \cdot ZrO_2$ 4,253, Cr_2O_3 4,109, $CaO \cdot Cr_2O_3$ 3,920, $MgO \cdot Al_2O_3$ 3,884, $2CaO \cdot SiO_2$ 3,848, Al_2O_3 3,668, $NiO \cdot Al_2O_3$ 3,668, $SrO \cdot Al_2O_3$ 3,650, $BaO \cdot Al_2O_3$ 3,632, NiO 3,542, BaO 3,488, $BeO \cdot Al_2O_3$ 3,398, TiO_2 3,344, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 3,326, $2BeO \cdot SiO_2$ 3,182, SiO_2 3,146

Ta_5Si , Ta_5Si_3 4,532, Cb_5Si_3 4,496, W_5Si_2 4,244, Zr_3Si_2 to Zr_6Si_5 4,010-4,082, $TaSi_2$ 3,992, Mo_3Si_2 3,974, WSi_2 3,938, V_5Si_3 3,902, Ti_5Si_3 3,848, $MoSi_2$ 3,686, $CbSi_2$ 3,506

(奥田)