カーボン薄膜のフォーミングと電子放出

荒木 久*・平原洋和**・埴 輝雄*

(昭和56年9月24日)

Electroforming and Electron Emission of Carbon Thin Films

Hisashi ARAKI*, Okikazu HIRABARU**
and Teruo HANAWA*

*(Electron Beam Laboratory, Faculty of Engineering,
Osaka University, Suita, Osaka)

** (Department of Physics, Miyakonojo Technical College,
Yoshio-cho 473-1, Miyakonojo, Miyazaki)

(Received September 24, 1981)

The purposes of the present work were to develop the fabrication techniques of a thin film electron emitter. Devices with good reproducibility and stability were obtained when carbon films were deposited on a Corning 7059 glass rubbed with emery paper (# 1000), and were heat-treated at 600°C in high vacuum.

When the input power density to the devices attained to about 2.4×10^8 W/cm³, the carbon films were locally broken due to the joule heating and electron emission from the devices became to be detected. The *I-V* characteristics after the forming were similar to those of the electroformed MIM type devices, and the emission efficiencies were $(2 \sim 6) \times 10^{-4}$.

1. ま え が き

1965年に、局所的に不連続膜部分をもつ SnO₂ 膜から真空中への強い電子放出現象が Elinson¹⁾ らによって発表された。彼らが製作した素子の構造は簡単で、サブミリ幅の橋絡部をもつ H 型形状膜に通電し、ジュール熱で膜を局所的に破壊することによって作られた。そのような表面伝導型構造の素子から数10%という極めて高い放出効率(伝導電流に対する放出電流の比)が得られることが魅力的であったので、その後 SnO₂^{2,3)}, In₂O₃-SnO₂^{4,5)} 等の不連続膜や Au, Ag, Pt⁶⁾ 等の金属島状膜についてもこれに準じた研究が行われてきた。

本研究の目的は、良質の電子放出素子の開発である。カーボン薄膜から作った表面伝導型構造素子は、膜の作りやすさ、10数Vという低い動作電圧、低真空で動作可

能等の利点をもち、また再現性、安定性に関しても従来の酸化物や金属薄膜から作成した素子よりも優れている。

本論文では、作成法の異なる三種類のカーボン薄膜素子のフォーミング過程、*I-V* 特性、放出効率についての実験結果と検討が記述されるが、また基板表面研磨による基板と膜の相互作用や、蒸着された膜の熱処理がこれらの特性に与える影響についても言及される。

2. 素子作成と実験装置

Fig. 1a は基板上に形成された素子の形状である。基板には、コーニング7059ガラスを用いた。基板の洗浄は中性洗剤洗浄、脱イオン水洗浄、イソプロピルアルコール蒸気洗浄の順序で行った。カーボンの蒸着は、液体窒素トラップつき油拡散ポンプ排気系の蒸着装置内で、真空中蒸着用のカーボン電極のアーカ放電により行った。

蒸着中の真空度は、 10^{-5} Torr であったが、この蒸着

* 大阪大学工学部 電子ビーム研究施設 (吹田市山田丘2-1)

** 都城工業高等専門学校 物理 (都城市吉尾町473-1)

Fig. 1 Geometrical shape of device and diagram of experimental circuit: I_f -film current; V_f -power supply for film current; I_e -emission current; V_e -high voltage supply for the collection of emitted electrons.

法により、約2100Åまでの厚さの膜を得た。膜厚 d の測定には、二光線干渉顕微鏡を用いた、H 型形状はマスクによって行い、ブリッジ部の幅 w は、0.25~0.5 mm とした。

カーボン膜の作成法と素子の再現性、安定性の関係を調べるため、基板や膜には次にあげるような二つの処理を施した。

- 1) 水を滴下した耐水研磨紙（エメリー #1000）上で基板表面を軽く研磨し、スリガラス状とする。
- 2) 蒸着膜を高真空（ 10^{-6} Torr）中 600°C で熱処理する。

実験には、1), 2) の処理の効果を調べるため、次に示すような A, B, C 三種類のカーボン膜を用いた。

- A : 1), 2) の処理を二つとも行わなかった膜
- B : 1) の処理は行ったが 2) の処理は行わなかった膜
- C : 1), 2) の処理を二つとも行った膜

なお、1) の処理は行わず、2) の処理だけを行った場合は 2) の処理後膜が基板面から剝離したので以後の実験に供することは不可能であった。

電極は、カーボン膜の橋絡部上に $l=0.1$ mm のギャップをもつように Ag を真空蒸着することにより作製した。出来上った素子もカーボン膜の種類と同様な記号

A, B, C で示す。

Fig. 1b は電気特性の測定系である。素子—コレクター間の距離は 12 mm, コレクター印加電圧は通常 1,200 V とした。また図には示していないが、フォーミング過程及び I_f - V_f 特性の記録には X-Y レコーダー、 I_e - V_e 特性の記録には Y-t レコーダーを使用した。また V_f の掃引は、素子のフォーミング用には定電圧電源出力をモーターで駆動し、 I_f - V_f 特性測定用には掃引信号発生器を使用した。電気的測定は、液体窒素トラップつき油拡散ポンプ排気系内で、 10^{-7} Torr の真真空度のもとで行った。

3. 実験結果及び検討

3.1 フォーミング過程

作成したままの素子に電極を通して通電を行うとき、定常な素子の動作状態が得られるまでに起る電気特性の絶縁破壊とは異なる非可逆的な変化を「フォーミング」と呼ぶ。フォーミング時の電圧掃引速度は 1~1.5 V/min とした。

A, B, C 型素子に対して、 V_f を 0~16 V で一回だけ掃引した場合のフォーミング過程の I_f - V_f 特性を **Fig. 2** に、またそれらを両対数でプロットしたものを **Fig. 3** に示す。 V_f の上昇を 16V にとどめた理由は、16V 以上では I_e の増大は余りみられず、むしろ I_f , I_e の急激な降下を伴う膜の破損が度々生じ素子が不安定になるからである。

16V で 30~60 分間素子を動作させたまま放置するとき電流は定常となりフォーミングは完了した。

〔A 型素子の場合〕 この素子からは、フォーミング後電子放出が観測される場合と観測されない場合があり、一般に再現性は良くなかったが **Fig. 2a** は後者の場合の一例である。この素子はフォーミング前、かなり高抵抗（4.2 kΩ, $\rho_0=5.2 \times 10^{-2}$ Ωcm）と非線形性（ $I_f \propto V_f^{1.1}$ ）を示した。 V_f の上昇が 3 V 以下で I_f が小さい値をとっている間は、 I_f - V_f 間にはフォーミング前と同じ関係が保たれた。しかるに 3 V まで上昇し、入力電力が 3 mW に達したとき、初期の特性よりも大きい増大率で I_f が上昇していくのが観測された。**Fig. 3** の P 点がこの位置を示す。

引き続いて 10~11 V 附近で起る I_f の急上昇部分では、電極のギャップ内のカーボン膜が瞬時的な弱い赤色発光を示し、同時に微小な I_e が検知されたが、11.5 V で I_f は最大値を示した後急に降下し始めた。この時の電力は、0.2W で Q 点はこの位置を示す。カーボン膜のギャップ内の体積は 1.9×10^{-9} cm³ であったので、P 点と Q 点における電力密度は、それぞれ 1.6×10^6 W/cm³, 1.1×10^6 W/cm³ であった。 I_f 降下後 V_f 上昇と共に I_f は線形

Fig. 2 Forming processes of the devices A, B and C. The insertion in Fig. 2c denotes the film temperature detected at the back of substrate during the forming processes. $l=100\ \mu\text{m}$, $w=0.25\ \text{mm}$, $d=750\ \text{\AA}$.

でわずかに増大したが、発光や I_e は検出されなくなった。
 [B型素子の場合] この素子からは、フォーミング後常に電子放出は観測されたが再現性や安定性は余り良くなかった。この素子の初期抵抗や10 V以下における I_f の変化及び発光、電子放出等の現象については、Fig. 2bに示すように、A型素子の場合とほぼ同様であった。11.3Vで最大値を示したが、この電圧以上ではA型素子と異った過程を示した。即ち、 I_f の降下はA型素子ほど著しくはなく、また I_e は小さい値ではあるが常に持続した。

[C型素子の場合] この素子からは、常に再現性や安定性において優れた放出特性が得られた。Fig. 2cはフォーミング過程の代表例である。この素子は、フォーミング前、A、B素子に比してかなり低い抵抗 ($65\ \Omega$, $\rho_0=9.3 \times 10^{-4}\ \Omega\text{cm}$) を示した。 V_f の上昇とともに、 I_f は電圧に比例して上昇していったが、2 Vで入力電力が60 mW ($3.2 \times 10^7\text{W/cm}^2$) に達したとき、コンダクタンスの増大が始まり (Fig. 3 P点)、それ以上の電圧では、やや非線形性を示すようになった。5.3Vまで上昇し、電力

Fig. 3 Log I -log V plots of the forming characteristics. P: the point on the curve changing from linear to super linear, Q: the point giving the first apex of current.

が 0.74W ($4 \times 10^8\text{W/cm}^2$) に達したとき (Fig. 3 Q点)、 I_f の降下と強い赤熱発光が始まったが、 I_f 降下速度はA、B型素子の場合よりは緩やかであり、強い発光が約1分間持続した。この発光の色温度は、光高温計による測定では $1200 \sim 1300^\circ\text{C}$ を示した。発光と同時に微小な I_e を検知した。発光強度が弱まると同時に I_f の降下も止まったが、 I_f は V_f 上昇とともに $6.5 \sim 7.5\text{V}$ 及び $8 \sim 16\text{V}$ 間でそれぞれわずかな上昇及び下降を示した。 I_e は V_f が小さい領域では、 V_f とともに指数関数的に増大していったが、16V付近では次第に飽和していく傾向があった。フォーミング完了時において得られた I_e は $1.5\ \mu\text{A}$ で、これはB型素子の場合より約30倍大きかった。

42個の素子に対して、それらのフォーミング特性からP (I_P , V_P) 及びQ (I_Q , V_Q) を求め、それらの点の決定に、どのような要因が含まれているかを調べた。フォーミングを行ったC型素子の膜厚とP、Q点における入力電力密度及び平均電界強度の関係を Fig. 4 に示す。

P点における電力密度は、実験した全膜厚範囲 ($450 \sim 1960\ \text{\AA}$) において特に膜厚に依存する傾向はなく、 $(2.5 \sim 4.6) \times 10^7\text{W/cm}^2$ なる値で分布した。Q点の電力密度は、厚さが $450 \sim 750\ \text{\AA}$ の範囲をとる場合には、薄くなるとともに大となる傾向がみられたが、 $750 \sim 1960\ \text{\AA}$ の範囲をとる場合には、測定値のばらつきは大きい膜厚に依存する傾向はなく、 $(1.6 \sim 3.3) \times 10^8\text{W/cm}^2$ なる値の範囲に分布した。一方、P、Q点の平均電界強度は、膜

Fig. 4 Experimental values of the input power density and the electric field at the points P and Q for the type C devices of the thickness range 450–1970Å.

厚に対して一定値をとる傾向はみられず、Q点の場合には、むしろ膜厚とともに減少する傾向さえみられた。これらの結果は、P、Q点は、主として一定の電力密度によって決定されていることを示している。

各測定点における I_P と V_P または I_Q と V_Q の直接の対応関係は Fig. 4a からはわからない。しかし、これらの対応関係には電力がかかわっているので、単位体積当りに換算した形で示す必要がある。 $\log(I_{P,Q}) - \log(V_{P,Q}/dlw)$ の形でプロットした結果を Fig. 5 に示す。

P、Q点は傾き-1の直線のまわりに分布し、それぞれ一定の電力密度で与えられていることがわかる。以上の結果から、P、Q間でみられるコンダクタンスの上昇は電極間に印加された電界強度によるよりは、むしろ入力された電力密度によってもたらされた現象であると言える。A、B型素子におけるP、Q点についても、Fig. 5 に示してある。素子間のばらつきが大きく、C型素子ほど明瞭ではないが、やはり電力密度によって決定されているように思われる。これらの素子のP、Q点における電力密度は、それぞれ $(1.6 \sim 5.6) \times 10^8 \text{ W/cm}^3$ 、 $(1.1 \sim 3.1) \times 10^8 \text{ W/cm}^3$ であった。A、B、C型素子におけるP、Q点の電力密度の平均値を Table 1 にまとめて示す。

これからわかるように、Q点の電力密度はA、B、C型素子とも余り変わらないが、P点の電力密度はC型素子の方がA、B型素子より10倍大きい。A、B型素子とC

Fig. 5 Plots of $\log I_P$ vs $\log (V_P/dlw)$ and $\log I_Q$ vs $\log (V_Q/dlw)$ for the type A, B and C devices.

Table 1 Average values of the input power densities at the points P and Q.

Types of device	$\langle I_P I_P / dlw \rangle$ (W/cm ²)	$\langle I_Q V_Q / dlw \rangle$ (W/cm ²)
A, B	3.6×10^6	1.8×10^8
C	3.2×10^7	2.4×10^8

型素子の作成法の違いは、A、B型素子には熱処理を施していないことだけである。従ってA、B型素子のP点では、C型素子よりも温度上昇が低い点でコンダクタンスの上昇が始まると考えられる。

Fig. 2c の挿入図は、フォーミング過程において同時に測定した膜の温度変化である。温度測定は、予め校正した熱電対で基板裏面から行ったが、温度上昇は150℃までにすぎなかった。しかしながら基板の裏側から基板表面での反射光を観察することにより、フォーミング後のガラス基板表面が局所的に熔融した形跡があるのを確認した。膜と基板の界面付近では、局所的に7059ガラスの軟化点(835℃)以上の温度上昇があったと考えられるので、基板からの7059ガラス組成分(Al, Ba, B等)の拡散や、相互作用についても考慮する必要がある。

我々は、素子電極間に存在する元素をXMAで線分析し、高温に達したと思われる膜の部分Al, Ba等の分布がより強調されるという結果を得ている。

3.2 (I_f , I_e)- V_f 特性

フォーミング完了後、 V_f を下降していく場合に得ら

れる I_f , I_e の変化を Fig. 6 に示す。

A型素子の I_f - V_f 特性は線形性を示し、 I_e は検出されなかった。B型素子の I_f - V_f 特性には、余り顕著ではないが、VCNR (電圧制御型負性抵抗) がみられた。しかし I_e は極めて不安定であり、 I_e - V_f 特性は単調な形ではなかった。C型素子の I_f - V_f 特性には、顕著なVCNRが現われ、 I_e - V_f 特性には、VCNRが生ずる電圧領域に小さい隆起が現われた。この隆起は、VCNRを示す素子では常に観測された。このC型素子から得られた (I_f , I_e)- V_f 特性は、フォーミングされたMIM型構造素子Cu-SiO/BaO-Cu²⁹と極めて類似した性質を持つので、両者は現象的に等価な構造で動作していると思われる。

3.3 放出効率とエミッターとしての評価

〔放出効率〕 フォーミング終了後、 V_f を降下していくときのA, B, C型素子に対する放出効率 I_e/I_f の値を Fig. 7 に示す。

Fig. 7a は I_e/I_f の V_f 依存性である。 I_e/I_f は素子によらず V_f とともに増大し16Vで最大となる。 I_e が10⁵の大きさの範囲で変化するのに対して、 I_f は10以下の大きさの範囲でしか変化しないので I_e/I_f の V_f 依存性の形は、 I_e - V_f 特性の形と余り変わらない。

Fig. 7b は I_e/I_f 最大値の、膜厚 d に対する依存性である。C型素子は、フォーミング前の比抵抗は、膜厚によらず全て $(0.9 \sim 2) \times 10^{-8} \Omega \text{cm}$ であった。フォーミング後得られたC型素子の放出効率は、450~1700Åの膜厚範囲では、 $(2 \sim 6) \times 10^{-4}$ というほぼ一定した値を

Fig. 6 I_f - V_f and $\log I_e$ - V_f characteristics for the electroformed A, B and C devices.

Fig. 7 Dependence of emission efficiencies on the applied voltage (a) and on the carbon film thicknesses (b). $l=100\ \mu\text{m}$, $w=0.25\ \text{mm}$.

とり、素子の再現性が良好であることを示している。しかし膜厚が450 Åより薄い場合や、2000 Åより厚い場合は、 10^{-4} より数オーダー小さい値を示した。膜厚が薄すぎると、フォーミング中の温度上昇が低くてフォーミングが十分達成できないし、膜厚が厚すぎると、フォーミング終了後も高い導電性の状態が続くため、 I_e/I_f が低下すると考えられる。A型素子の効率、C型素子と同程度の値を示す場合もあったが、通常はA、B型素子とも 10^{-7} ~ 10^{-8} という小さい値しか得られなかった。またこれらの素子では、再現性、安定性が悪く、しかも I_f 、 I_e に含まれる電流雑音が大きかった。基板面の研磨処理を行わなかったA型素子では、フォーミングにより、膜全体がしわ状となり、度々その一部が基板から剝離され、欠落しているのがみられた。これが素子の安定性や再現性が不良となる原因である。これらの結果は、基板表面の状態と膜との間に働く相互作用が重要であることを示している。

本素子で得られた放出効率の値は、酸化物系の表面伝

導型構造素子で報告された放出効率(10^{-2} ~1)と比べるとはるかに小さい。しかし、酸化物系素子における印加電圧の範囲は、 SnO_2 素子では、2~40 V¹⁾、30~80 V²⁾、100~290 V³⁾、60~100 V³⁾、 In_2O_3 : SnO_2 素子では、25~250 V⁴⁾であり、例外もあるがこれらの素子の高い放出効率は、本素子よりもかなり高い電圧のもとで得られた結果である。

〔放出電流密度〕 電子放出は、フォーミング中に生じた不連続膜領域内の極く限られた部分から起っていると推察されるが、放出源の詳細が明らかでないので放出電流密度を概算することは困難である。しかしながら、後述する3.4で示す光学顕微鏡像(Fig. 10)の不連続膜領域($\sim 10^{-5}\ \text{cm}^2$)を放出実効面積の上限とみなすならば、放出電流密度は、 $10^{-1}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 以上ということになる。

フォーミングされたMIM構造素子の場合の放出電流密度は、上部電極全体を放出面積として、報告された実験値から概算すると、 10^{-3} ~ $10^{-1}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 程度の値である。しかし、この素子の場合、放出は、局所的な孔の部分に限られ、真の放出電流密度は、これによりはるかに大きいとも考えられる。これら薄膜素子の放出電流密度は、例えば、タングステンチップを用いた電界放出顕微鏡における公称値、 $10^6\ \text{A}/\text{cm}^2$ よりはるかに小さいと推定される。

〔寿命〕 本素子は、後述するように、外乱(誘導コイルの作動、高電圧スイッチのon-off等)によって影響を受け、長時間の測定でその影響を避けることは不可能であったので、連続的な寿命の測定は行っていない。外乱の影響がないように留意して行った断続的な実験では、良好な素子の場合、80時間以上の動作が可能であった。

Fig. 8は、動作開始から5時間放置した場合の電流の経時変化を示す。

素子の動作を断続的に行う場合、動作開始から定常状態に至るまで、常に、0.5~2時間を要したが、その後の電流には、なお、低周波の揺動が含まれた。これらの電流に含まれる雑音のパワースペクトルは、 $f=0.2\sim 2000\ \text{Hz}$ なる周波数領域において、 $1/f^\alpha$ ($\alpha=1.6\pm 0.1$)型であり、また、0.2~30 Hz領域に含まれる電流雑音の揺動率は、 $\Delta I_f/I_f=0.005$ 、 $\Delta I_e/I_e=0.01$ であるという結果を得ている。

素子が上述の如き外乱を受けたとき、最初に電流 I_f 、 I_e の瞬時的な降下が観測された。そのまま放置するとき、それら電流値は上昇していったが、完全に復帰する場合と復帰しない場合が生じた。

動作状態の素子の近くで、出力60Wの交流コロナ放電を行い、素子が劣化していく様子を調べた。放電源と素子間の距離 D (15~120 cm)や放電照射時間 τ (2~300

s) をパラメータとして、各素子に条件を変えて放電照射を行い、放電停止後の電流の経時変化や定常化後の V_f - I_f 特性を測定した。Fig. 9 に、放電照射前の電流 I_{f0} , I_{e0} で規格化した放電照射停止後の電流 I_f , I_e の経時変化を示す。

以下に、その要点をまとめると、

- 1) 距離が近いほど、或いは照射時間が長いほど電流の減衰は著しく、また電流の回復には長時間を要した。その場合に電流の減衰割合は、 I_f よりも I_e の方が大きかった。なお、放電照射量が大きいとき、電流値の完全な復帰は不可能であった。
- 2) 素子や測定系を静電遮へいすると、電流の初期の減衰は、やや軽減されたが、電流の回復は、必ずしも速くなるとは限らなかった。

Fig. 8 Variation of device currents at constant voltage with time.

- 3) 強い放電照射により、 I_e が全く検出されなくなった素子では、VCNR は消失したが、 I_e がわずかも検出される限り、VCNR は観測された。

劣化前後の素子の光学顕微鏡像を撮影し、比較した結果、劣化後、特に新しく作られた損傷は検出されなかったが、不連続膜領域から陽極に至るカーボン膜表面が、局部的に褐色に着色しているのが見い出された。

フォーミング後、VCNR を示す MIM 構造素子でも、同様な劣化がおけるとされているが、その原因はわかっていない。なお、正常動作状態の素子を、 10^{-8} Torr の真空系内に保存する場合には、三ヶ月経過しても劣化は認められなかった。

3.4 フォーミングされた素子の顕微鏡による観察

光学顕微鏡で観察した透過像を Fig. 10 に示す。

白く見える部分は、膜が存在しないか、または薄くなった部分である。上下両側の部分が電極で、向って上側が陽極である。100 μm の電極ギャップ内の、中央からやや陽極よりに、電極端に平行に 5 ~ 10 μm の幅で不連続となっている膜の領域がみられる。これは、フォーミング過程で連続膜が熱的に破壊されて生じたものであるが、この領域のギャップ内での位置は、素子によらずほぼ一定であった。走査型電子顕微鏡による観察から、この領域内には更に島状のカーボンが存在することはわかっているが、それらの微視的な分布や大きさについての詳細は明らかではない。フォーミングされたカーボン膜の部分は基板に密着しており、機械的な手段でそれらを除去することは不可能であった。

Fig. 9 Recovery processes of the devices degraded by the irradiation of a corona discharge. I_{f0} , I_{e0} : the device currents before the irradiation, I_f , I_e : the device currents after the irradiation, D : the distance between a device and a discharge source, τ : the irradiation time on a device.

POSITIVE ELECTRODE

NEGATIVE ELECTRODE

Fig. 10 Photograph of the optical transmission image of the electrode gap area of a device after forming.

4. ま と め

カーボン薄膜作成の際に行う基板表面研磨や膜の熱処理が表面伝導型構造素子のフォーミング過程や、 $I-V$ 特性に与える影響について述べ、それらの結果に対して若干の検討を行ってきた。以下に主な結果及び結論をまとめる。

1. カーボン膜を、エメリー紙 (#1000) で表面処理を行った7059ガラス基板上へ蒸着し、その膜上へ電極の蒸着を行う前に、真空中 600℃ で熱処理を行った場合は、それらの処理を行わなかった場合よりもフォーミング後得られる素子の放出特性の再現性や安定性が向上した。
2. 熱処理を行った素子のフォーミング初期における電流と電圧の間には、 $I_f \propto V_f^n$ なる関係があった。ここで n は 1 か 1 に近い定数である。素子への入力電力密度が、 $3.2 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ まで上昇したとき、 n が急に増大し電流の上昇が顕著となり、電力密度が更に上昇し $2.4 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ まで到達したとき、ジュール熱により基板と膜の界面附近は 1200~1300℃ まで温度が上昇した。それ以後、 I_f の急激な減少が起るとともに放出電流が検出されるようになったが、その電流は電圧の上昇とともに指数関数的に増大した。
3. フォーミング中ジュール熱により電極間の部分が高温に達したとき、表面研磨を行った基板上へ膜を形成した素子では、基板からの膜の剝離が起りにくい。この型の素子では、フォーミング完了後の I_f-V_f 特性には常に VCNR が現われた。顕著な VCNR を示す素子の伝導及び放出特性は、フォーミングされた MIM 構造素子の対応する特性と極めてよく似たものであった。
4. 素子は動作中に受ける外乱 (誘導コイルの作動、

高電圧スイッチの on-off 等) に敏感で、外乱発生と同時に電流の急激な降下が生じた。その電流降下の割合は、外乱の強さが大となるほど大きく、また I_e の方が I_f よりも著しかった。受けた外乱が弱い場合は電流はすぐに復帰したが、強い場合は電流の減衰した状態が続き、しかも不安定であった。このような外乱が避けられる場合は、素子は 80 時間以上動作させることができた。

5. フォーミングによって素子のギャップ内には、5 ~ 10 μm 幅の不連続な領域が生成された。その領域内には更に島状のカーボンが存在することがわかっているが、その詳細を明らかにすることは今後の研究課題である。
6. 基板表面及び膜の熱処理を行った素子の放出効率、は、カーボン膜の厚さが 450~1700 Å の範囲では、 $(2 \sim 6) \times 10^{-4}$ なる値をとったが、この膜厚範囲をはずれると、これより低下する傾向があった。

〔文 献〕

- 1) M. I. Elinson, A. G. Zhdan, G. A. Kudintseva and M. E. Chugunova: Radio. Eng. Electron Phys. **10** (1965) 1290.
- 2) J. F. Sprouse, K. M. Jackson, T. A. Raju and M. K. Testerman: Rev. Sci. Instrum. **42** (1971) 114.
- 3) V. V. Nikulov, G. A. Kudintseva, M. I. Yelinson and L. A. Kosulnikova: Radio Eng. Electron Phys. **17** (1972) 1153.
- 4) M. Hartwell and C. G. Fonstad: IEEE ED Conf. (1975) 519.
- 5) H. Schade and J. J. Hanak: Proc. 7th Intern. Vac. Cong. and 3rd Intern. Conf. Solid Surfaces (Vienna 1977) 1833.
- 6) G. Dittmer: Thin Solid Film **9** (1972) 317.
- 7) A. E. Rakhshani and C. A. Hogarth: Int. J. Electron. **42** (1977) 465.