平行平板型電子増倍管の製作とその特性

Parallel Plate Dynode Electron Multiplier; the Method of Production and its Characteristics.

紺 野 忠*・金 山 道 雄*・清 野 節 男*

TADASHI KONNO, MICHIO KANAYAMA AND SETSUO KIYONO

(1969年4月21日受理)

An easy method of making a parallel plate electron multiplier, which is used for detection of x-rays, electron beams, and charged particles, is developed. The multiplier consists of two continuous dynodes, which are prepared by evaporating aluminum onto glass substrates on which carbon has been evaporated in advance. The gain is in the range of 10^6 to 10^9 , when the applied voltage is 3 kV. Some of the features are quite good linearity of response except for the saturation region, extremely small noise and long lifetime, and ease in handling. It also can be used for the pulse count techniques. A brief review of the outline of the continuous dynode electron multiplier is added.

1. 緒 言

荷電粒子線・軟X線・極端紫外線(XUV)などの検出にとって、「窓なし」増倍管としての連続ダイノード二次電子増倍管は有用視され、また有望視されている。

この電子増倍管の着想が Farnsworth¹⁾ によって示されたのは古く1930年に遡るが、その後 Oshchepkov²⁾ や Goodrich³⁾ によって具体的な増倍管として開発されるまでには30年を要した。この小型で簡単な構造の電子増倍管はその性能のよさが認められ、特にロケットや人工衛星に搭載しての大気圏外における荷電粒子や軟X線・XUVの研究にとっての理想的な検出器として急速な発展をみ、その一部はすでに市販されるに至っている。

また、Hinteregger⁴⁾ が XUV の検出器として初めて使用した resistance strip magnetic electron multiplier は、もともと Goodrich⁵⁾ によって time-of-flight mass spectrometer におけるイオン検出器として開発されたもので、質量分析の分野における増倍管の役割とその開発も見逃せない。

もちろん、この増倍管は開発され始めてまだ日も浅く、新しいダイノード材料の開発、動作機構の解析、特性の安定性などの点で残された問題は多いが、検出器としてはすでに実用化の段階に入ったと考えられる。

以下、本論文では連続ダイノード電子増倍管の概要と、筆者らの研究室で開発した平行平板型電子増倍管の製法とその特性について述べる。なお、これをイオン検出器として使用した場合についても触れる**。

2. 連続ダイノード二次電子増倍管

連続ダイノード二次電子増倍管はその形状からチャンネル型電子増倍管*** (continuous channel electron multiplier または channel electron multiplier) とも呼ばれている。その原理は Fig. 1. に示される。 $10^7 \sim 10^9 \Omega$ 程度の抵抗を有する均一な連続ダイノードを例えばガラス細管の内面に形成させ、あるいは2枚の平板状ダイノードを適当な間隔で平行に向かい合わせ、その両端に数kVの直流電圧を印加して、増倍管の軸方向に平行な一様な電界を形成させる。このような増倍管の入口近くに入射した電子、イオン

* 東北大学工学部応用物理学科(仙台市荒巻字青葉)

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Tohoku University (Aramaki aza Aoba, Sendai).

** 連続ダイノード電子増倍管に関する全般的な展望については石川⁶⁾の解説を、特にイオン検出器としての性能については道嶋⁷⁾の総合報告をも参照されたい。

*** Goodrich³⁾が最初に開発した直交電磁界をかける型⁵⁾もこの中に含めることができるが、普通は狭義に解釈し、電界のみをかける型を指すことが多い。

Fig. 1. A schematic diagram illustrating the principle of a continuous dynode electron multiplier.

等はダイノードに衝突して二次電子を発生させる。これらの二次電子は軸方向に加速されながらあるエネルギーを得て反対側のダイノードに衝突する。そのときの衝突エネルギーを1個以上の二次電子を放出させるような大きさにすればこの過程は繰り返され、電子数は急速に増倍されながら出口に向かい、最終的には $10^5 \sim 10^9$ に増倍されて、出力パルスあるいは出力電流として取り出される。

増倍機構はほぼこのように考えられているが、その詳しい解析はかなり複雑で、確立されたものとはなっていない。しかし、これらの増倍管は

- (1) 構造が極めて簡単で、小型・軽量である。
- (2) 利得は $10^5 \sim 10^9$ とかなり高い。
- (3) 導入電極への導線の数が少ない。

(4) したがって、真空への封じ込めに際して取扱いが容易である。

(5) パルス計測にも適している。

(6) background noise が極めて少ない。

(7) 磁界に対して比較的鈍感である。

といった長所を有し、荷電粒子の検出^{8), 9)}や光電素子との併用によるXUVの検出^{4), 10)}のみならず、イメージ・インテンシファイヤー¹¹⁾、光電増倍管¹²⁾、走査型電子顕微鏡¹³⁾などへの応用といった種々の分野への利用が考えられ、実用上かなりの期待が寄せられている。

連続ダイノード電子増倍管はその形態によって、

- (1) キャピラリー型 (またはパイプ型)
- (2) 平行平板型

の2つに分けられる。これらは、ダイノード材料やその製法によってそれぞれ異なった増倍管に作られているが、これまでに発表された主な増倍管を参考としてTable 1. に示す。

それぞれの増倍管には長短があると思われるが、作製について言えば、キャピラリー型に比べ平行平板型は蒸着技術だけで作れるという容易さが利点であろう。なお、平行平板型はこのままでは後述のイオン・フィードバック効果を避けることはできない。したがって利得の真空度への依存性をなくすことは難しいが、真

Table 1. Various types of the continuous dynode electron multiplier.

	開 発 者	ダイノード材料と製法	利 得	α	V_d (kV)	備 考	文献
キャ ピ ラ リ ー 型	Oshchepkov ら	ガラス管内面にSb-Cs 膜を塗布 TiO ₂ -MgO 混合物を管状に焼成	$10^3 \sim 10^6$	50~70	3	空気にさらせない。	2)
	Goodrich ら	ガラス管内面に半導体金属被膜	1×10^6	50	2.4	直線形	3)
	(Channeltron [®])	不明	$> 5 \times 10^7$	100	3	円弧形, スパイラル形	14)
	Adams ら	不明 (特殊なガラス?)	$> 10^8$	50	2.5	直線形, 円弧形, スパイラル形	15)
	Chuiko ら	高鉛ガラスを水素中で還元	$\sim 10^4$	60	3	光電増倍管への応用	12)
	西岡	同上	$10^3 \sim 10^5$		3	400℃ 10時間加熱 ($< 10^{-6}$ Torr) で安定。	16)
平 行 平 板 型	豊田ら	ガラス管内面に半導体被膜 チタン酸バリウム系半導体	$10^7 \sim 10^8$ $10^7 \sim 10^8$		4 4	10^{-4} Torr 以下で圧力依存性なし	17) 18)
	林ら	有機半導体を押し出し成型	3×10^8		3	フレキシブル	19)
	Spindt ら	Mo と Al ₂ O ₃ の同時蒸着	10^6	83	2.5	900℃ (10^{-4} Torr 以下) で繰返 し加熱可能	20)
	Siprikov ら	高鉛ガラスを水素中で還元	10^6		2.5		21)
	石川ら	Al ₂ O ₃ , Mo, Al ₂ O ₃ の3層蒸着	10^5	40	3		22), 23)
	Kanayama ら	C と Al の2層蒸着膜 (Al を大 気中で酸化させる)	$10^6 \sim 10^9$	30~60	3~4		24)
	Onuma ら	Ge と Al ₂ O ₃ または Ge と MgO, 蒸着	$10^6 \sim 10^9$	40~76	4		25), 26)
	大庭ら	Ni 蒸着膜の酸化, Ge 蒸着膜	$10^2 \sim 10^5$	20, 45	2, 3		27), 28)

空度が変化しない場合や、パルス計測法を用いる場合にはこのまま用いられ、そのイオン・フィードバックは利得の上でかえって幸いしている場合もある。

キャピラリー型増倍管の増倍機構の理論的解析として、Novitskii²⁹⁾は直線状増倍管では利得に関係するパラメータは増倍管の内径や長さといった寸法そのものではなく、 $\alpha = \text{長さ}/\text{直径}$ であることを示した。さらに吉田³⁰⁾は増倍にあずかる二次電子のエネルギー分布を考慮することによって幾分実験との一致の度合いが良くなることを示した。また、Adams³¹⁾は空間電荷効果を考慮して解析し、円弧状の増倍管では電子は外壁との衝突のみを繰り返す増倍過程をとり、直線状の場合とは異なって、重要な因子は α ではなく、 $\beta = \text{弧長}/\text{曲率}$ であるとしている。

一方、増倍管の印加電圧を増しても利得が増えないいわゆる利得飽和の現象がある。この原因は、Evans⁸⁾は増倍管の出力端付近での壁の charge up による電界平坦化効果であるとしているのに対し、Schmidt³²⁾は空間電荷効果が主であるとしている。一方、Adams³¹⁾は直線形と円弧形とでは飽和の機構が異なり、前者では電界平坦化効果が、後者では空間電荷効果がその主な原因であるとしている。

円弧形チャンネル増倍管は大気圏外におけるエネルギー荷電粒子の検出器としてしばしば使用されてきている。これについては Evans^{8),9)}が、250eV~10keVの電子に対する検出効率は50%以上あり、 $10^5/\text{sec}$ での計数が可能で、他の multi-dynode bare electron multiplier や G-M 計数管、シンチレーション・カウンタに比べて大変有利であることを示している。

イオン検出に対する研究は比較的少ないが、前述のように Goodrich⁵⁾のほが Spindt²⁰⁾、Onuma²⁵⁾もイオン検出を目的として増倍管を作っている。また Siprikov²¹⁾は高鉛ガラスの水素中還元による方法を用いた平行平板型で He, N₂, CO₂, O₂, Ar 等に対する特性を調べ、Burrous³³⁾はチャンネル増倍管の、500eV~18keV の H⁺, H₂⁺, ³He⁺, ³He⁺⁺, He⁺, Ne⁺, Ar⁺ イオンに対する相対的検出効率について調べ、それは入射イオンのエネルギー、速度、イオン価の関数であることを示している。

3. 平行平板型電子増倍管の製作法

連続ダイノード電子増倍管において電子増倍過程を実現せしめるためには、ダイノードは次のような条件を満足していなければならない。すなわち、

(1) ダイノードは増倍管の内部に様な電界を生ぜしめるための適当な電位勾配をもたせること、(2) ダイノード表面に電子を供給するために必要な適当な導電性を有すること、(3) 二次電子放出比が1以上であること、さらに大気にさらしあるいは大気中に放置しても安定であること、長時間の動作に対して安定であることなどの条件も満たされるようなダイノード材料の選択が、増倍管作製上の最も重要な点である。

上述の3つの要求を満たすための形式には幾通りかが考えられる。これまで行なわれている方法はこの3つの作用を1層で行なわしめている。筆者らは、電界形成とダイノードへの電子補給にあづかる層と、二次電子放出をなす層の2層に分けることを考え、前述の条件を満たす材料について検討した結果、カーボンとアルミニウムを使うことが最もよいと考えた (Fig.2)。

Fig. 2. The construction of the C-Al dynode multiplier.

厚さ1~2mmの平面ガラスを巾20~25mm、長さ30~60mmで2枚同じ大きさに切る。ガラスの鋭いへりは電圧印加時に放電を誘起することがあるので、すり落すことが望ましい。ガラスは中性洗剤を用いて洗滌し、水道水および蒸留水ですすぎ、さらにエチルアルコールに浸してから乾燥させる。ガラスの両端に細く銅を蒸着し電極とし、この電極に導電性接着剤を用いて細い導線を取りつける。次にこのガラス板上に、真空中でアーク法によりカーボンを蒸着する。カーボンの厚みは電極間の抵抗が50~200MΩ(2枚並列で)になるようにする。続いてその上にアルミニウムを前同様に真空中で蒸着する。アルミニウム膜の厚みは、蒸着直後に真空中で数10MΩ、空気中に取り出したときにはアルミニウム膜が酸化アルミニウムになり、電極間の電気抵抗がカーボン膜の抵抗よりはるかに大きくなるようにする。電界形成にあづかるカーボン層をできるだけ均一の厚さにするためには、蒸着源とガラス基板との距離をできるだけ大きくした方がよく、われわれは約40cmとなっている。

このようにして作ったダイノードを 0.5~1.5mm の

Fig. 3. Three embodiments of the multiplier, with a width of 20 mm and a length of 35 mm, widths of 15 mm and lengths of 60 mm as arranged from front to back.

間隔で平行に向かい合わせ、両端にスペーサーを入れて接着剤で固定する。でき上がった増倍管は、両端のいずれを入力端としてもよい。ただし、いずれか一方を選ぶことによってより大きい利得を得ることができる場合もある。

4. 増倍管の特性

4.1 特性測定回路

入射電流 10^{-13} A 以上については直流入射電流に対する出力電流の関係を測定して利得を求めた。また、入射電流 10^{-14} A 以下の場合には、光電子により生ずるパルス数を計数して利得その他の特性を測定した。それぞれの測定方式のブロック・ダイアグラムを Fig. 4. (a) および (b) に示す。

Fig. 4. Schematic diagrams of the electron multiplier test circuit: (a) for dc current measurement and (b) for pulsed detection.

Fig. 4 (a) の方式では電子増倍管への入射電流が $10^{-11} \sim 10^{-13}$ A という微弱な直流電流を扱うので、電子銃から不必要な電子が漏れ出すこと、各電源回路から測定系への電流の漏洩、外部誘導の影響などを防ぐことに特別の注意を払った。電子銃と増倍管は蒸着装置中にセットし、測定中の内部の圧力は 2×10^{-5} Torr 程度に保った。電子銃および増倍管と電源および測定器との接続には同軸ケーブルを用い、直接に真空装置中に導入接続して高絶縁抵抗を保ったまま真空封止を行なった。

ダイノード電圧印加用高圧電源以外の電源、抵抗器、メーター、スイッチなどは漏洩と外部からの誘導を防ぐためにポリエチレンの紐で吊したアクリル板上に載せ、全体を銅網および薄鉄板で2重に遮蔽した。このようにして漏洩電流は 1.5×10^{-13} A 程度におさえることができた。

電子銃からの入射電流は増倍管の入口付近でできるだけ細いビームとしてダイノードに入射するように、タングステン・フィラメントを出た電子を加速電極を兼ねた2重のスリット（スリット巾 0.1 mm, 長さ 15 mm, 2つのスリットの間隔 10 mm）を通過せしめている。またフィラメントの周囲に円筒状の電極をおき、フィラメントに対して適当な負電圧をかけ、電子銃後方の排気用孔から電子が漏れ出ることを防いでいる。なお入射ビームはダイノード面に対してわずかな傾け（ $\sim 5^\circ$ ）入射させる。

Fig 4 (b) は光または軟X線入射のときの測定系の概略図である。入射ビームは増倍管に直接入射させ、出力パルスをオシロスコープまたはパルス計数器で観測する。

4.2 利得と印加電圧

増倍管の利得はダイノードの両端に印加する電圧によって大きく変化する。長さ 45 mm の増倍管についてその様子を Fig. 5 (a) に示す。入射電流は 10^{-13} A 以上について測定されているが、さらに微小電流においては、点線で示されるように利得が大きくなることが推定される。事実、この増倍管で光入射のときの出力パルス全電流量から利得を推定すると、印加電圧 4.4 kV で 8×10^8 程度に達することがわかる。なお、この図で入力 $0.6 \mu\text{A}$ と $5.1 \mu\text{A}$ の曲線は他の3本を測定したあと2週間空気に放置したのち測定したもので、大気露出に対し安定であることがわかる。

Fig. 5 (b) は長さ 60 mm の増倍管についての利得—印加電圧特性についての1例である。

(a)

(b)

Fig. 5. The gain as a function of the applied voltage V_d . I_p and L denote the input current and the length of the multiplier, respectively. The broken line indicates an estimated gain at $I_p < 10^{-14}$ A.

利得は印加電圧の増加につれて次第に飽和する傾向があり、その傾向は入射電流が大きくなるにつれ比較的小さい印加電圧の方へと移る。これは利得の飽和というよりも、出力電流そのものに飽和の傾向があることによるもので、ダイノード電流と関連があり、出力電流がダイノード電流の10分の1程度に達すると飽和し始める。この状況は Fig. 6 に示され、印加電圧の増加と共にダイノード電流が直線的に変わり、またこれにほぼ比例して飽和出力電流の変化していることがわかる。これは増倍管の出力端に近い方で、沢山の電子放出を余儀なくされ、ダイノード電流による電子の供給が追いつかないためダイノード面が charge up し、電界が平坦化されるために生ずるものと考えられる。カーボン膜の厚さを厚くする、したがってダイノードの抵抗を小さくすることによって飽和しにくくすることができる。また逆に、飽和しやすい増倍管にしたいときには、カーボン膜の抵抗を大きくした方がよい。ただし、ダイノード抵抗が小さくなると電流が多く流れ、ジュール熱が発生するという望ましくない現象が生ずる。このような点からもカーボン膜にとっての最適の抵抗値が定まり、通常は50~200M Ω 程度に選んでいる。

Fig. 6. The correlations between dynode current (I_d) and collector current (I_c).

4.3 入出力間の直線性

入射電流が大きくなり、出力電流が飽和し始めるような大きさ以上の領域を除けば、入出力間の直線性は極めてよい。非常に微弱な入力で、出力がパルスとして計数されるような領域での直線性も、電流の場合から予想されるように良好である。それぞれの例を Fig. 7 と Fig. 8 に示す。またイオン検出における直線性については 4.7 で述べる。

4.4 取扱いと寿命

増倍管を使用する際には、管の両端に電圧を印加し

Fig. 7. The linearity between input and output currents for three different applied voltages.

Fig. 8. The number of output pulses against the distance between the source and the multiplier. Measurements were made by varying the distance d (cm) between the light source and the multiplier with a constant luminous intensity at the light source.

て20分位 warming-up することにより、利得がほぼ安定する。これは増倍管の熱的平衡状態に達するための時間と考えられる。

長時間連続使用すると利得はわずかつつ下がる傾向があるが、その原因はまだはっきりしていない。しかし、長時間使用した後あるいは、大きい入射電流で使用した場合に、ダイノードの出力端付近に“焼け”のような状態が見られることがあり、また現在、排気系

として油拡散ポンプを使用しているので、ダイノード表面の油蒸気によるコンタミネーションがその原因の一つかと思われる。

同様の減衰は他の増倍管においても観測されているが、Smith が Mullard 社製増倍管について 10^{-9} Torr 程度の超高真空中で行なった実験³⁵⁾でも減衰が観測されていることから推して、油蒸気のコンタミネーションだけがその原因ではなく、二次電子の衝突によるダイノード表面の変質もその1因と考えられる。事実、多少利得の下がった増倍管を暫く空气中に放置すると回復することがあり、コンタミネーション以外にもその原因を求めなければならないことを示唆する。

一般には、増倍管を空气中に取り出すことを繰り返しても、また長期間放置しておいても、その特性はほとんど変わらない。ただし、空气中に放置するうちにダイノード抵抗が著しく増大し、利得も非常に小さくなるものがあるが、これは蒸着前のガラス洗滌の不十分さによることが多い。

4.5 出力パルス特性と周波数応答性

出力がパルスとして取り出されるときには、その波形、分解時間等は出力回路の時定数によって大きく影響される。増倍管の出力パルスが1個の入射粒子により生成されるものと仮定すると出力パルスの全電気量から利得が計算できるが、その電気量は最大 10^{-10} C. 程度に達し、したがって利得は $10^8 \sim 10^9$ に達する。出力パルスの立上りおよび巾はそれぞれ $0.2 \mu \text{ sec}$, $0.5 \mu \text{ sec}$ 以上で、曲線形キャピラリー型増倍管に比し1桁大きい^{8), 15), 31), 32)}これはイオン・フィードバックによる後続パルスが入っているためと考えられる。

パルス計測に際しては、増倍管の利得が飽和し、出力パルスの高さの分布がピークを持つような状態で使用することが望ましい。一般に、増倍管に印加する電圧を増すと利得は増大し出力側負荷抵抗の両端に現われる出力パルスの高さも次第に高くなり、しかも揃ってくる。Fig. 9. にその例を示す。(a) ではまだ出力パルスの高さが不揃いであるが、(b) ではかなり揃ったものが得られ、ほぼ飽和していることがわかる。これらの状況は個々の増倍管によって異なるが、一般的には増倍管の長さを長くするかカーボン膜の厚さを薄くして利得を上げるによりパルスの高さを揃えることができる。

キャピラリー型増倍管の利得飽和モードにおける出力パルス特性や飽和の原因については Evans,⁸⁾ Adams ら³¹⁾ および Schmidt ら³²⁾ が詳しく述べて

Fig. 9. (a) The observed pulse height distribution. The heights of all pulses are almost uniform (1 V/div, 10 msec/div)
(b) The observed pulse height distribution. The carbon films of this multiplier are about 4 times thicker than that used in the measurement of Fig. 7(a). In this case, the pulse heights are not uniform. (3 V/div, 10 msec/div)

いるが、平行平板型の場合にはやや事情を異にするとと思われる。

パルス計数時の雑音は増倍管の利得にもよるが、長さ 45mm, 5×10^7 程度の利得で 5 cts/min 程度のものが得られた。

入力がパルス状態から次第に増加して連続的な電流として観測されるような領域では、使用目的によっては周波数応答性も考慮しなければならない場合が生ずる。筆者らは、以前に 100 kHz までの応答性があることを確かめていたが、²⁴⁾ 最近この増倍管が走査型電子顕微鏡に使用され、TV 方式で画像が得られた (Fig. 10) ということから、4 MHz 程度のレスポンスがあり、SN 比も非常によいことが分った。これは従来あまり注意されなかったことで、新たな使用分野が開けると思われる。

4.6 イオン・フィードバック効果

直線状キャピラリ型増倍管の利得には真空度依存性があり、その原因は増倍管の電子増倍過程に発生したイオンが電界によって入力端の方向に加速され、入力端近くのダイノードに衝突し、そこで二次電子を放出させ、それらの二次電子が再び増倍過程をたどって出力側に現われることにある。これはイオン・フィードバック効果と言われており、Evans⁸⁾ や Adams

Fig. 10. A micrograph of surface structure on copper side in a copper clad laminate, using a scanning electron microscope employed TV system. Beam voltage: 25 kV, beam current: 3×10^{-9} A, V_d : 3.5 kV, 1,700 $\times$. [Courtesy of Japan Electron Optics Laboratory Co., Ltd.]

ら¹⁵⁾ によって見い出され、増倍管を適当な曲率でカーブさせることによって、その効果の影響をなくせるということが示された。

平行平板型の場合にも当然その効果のあることが予想されるが、Siprikov ら²¹⁾ はその機構につき考察し、また Onuma ら²⁵⁾ はその効果による利得への影響の簡単な見積りをし、それをできるだけ避けるためには 10^{-5} Torr 以下で使うべきであるといっている。しかし、その効果の現われ方は真空度、利得、ダイノードの均一さなどにも関連し、一様には言えない。われわれも、以前、 $L=60$ mm の増倍管について $10^{-5} \rightarrow 10^{-4}$ Torr の変化では利得の変化はほとんど観測されなかったが、²⁴⁾ その後、 $L=30 \sim 35$ mm の短い増倍管について実験すると明らかな真空度依存性が見られた。今、Fig. 11 (a) のような三つの型について測定してみると、電子銃からの電子流の大きさを一定にしてあるにもかかわらず 1 では I_p が圧力の上昇と共に大きく増加し、イオンが電子銃先端に戻っていると考えられ、同時に I_p の変化に応じて I_o も大きく増加する。2 では 1 に比べこの傾向は小さくなっているが、それでもなおかなり戻っている。これは長さが 1 の 2 倍ほどあり、また途中の電界の不均一さなども影響して、入力端まで達するイオンが比較的少ないためと考えられる。さらにイオンは電子密度が極めて大きい出力端で作られるものが多く、そのうち利得に関係するものは入力端近くまで戻ってダイノードに衝突したものであるから、出力端近くの電界を増倍管の中心軸に対して傾けてイオンを外に追い出すことができれば、その効果は小さくなるはずである。このような効果を

Fig. 11. (a) 3 types of multiplier for the check of ion feedback effect. (Size: in mm).

(b) Relations between pressure and come back ion.

(c) Relations between pressure and collector current. In each case, incident electron beam from the gun is constant.

調べるために出力端を斜めに切り*電界を傾けて測定したものが3で、電子銃先端まで戻るイオンがほとんどなくなっている。しかし、 I_c が少し変化しているのは、まだダイノードの入力端近くに達するイオンがあり、これによる効果が残っていることを示している。

このような簡単な処置によってイオン・フィードバックを非常に少なくできることがわかった。

4.7 イオン検出器としての利用

この増倍管をイオン検出器として使用した場合の性能について実験を行なった。実験は Fig 12 (a) のように増倍管の前にイオン-二次電子変換電極として Cu 板をおき、Ar イオンビームについて行なったものである。図の 1, 2, 3, 4 はイオン電流が $5 \sim 25 \mu\text{A}$ について行なったもので、イオン流は $30 \mu\phi$ のスリットを通して直接 Cu に当てた。また T は Ag の蒸着薄膜 (厚さ $1000 \sim 1200 \text{ \AA}$) を通過したイオン流について測ったもので、照射イオン流は $5 \sim 60 \mu\text{A}$ である。Fig. 12 (b) に見られる如く、感度・直線性ともに良好である。すなわち、この実験の直前に求

* (1) 切断の角度をいろいろ変えたときの電界と、これに従うイオンの径路についてあらかじめ図式的に検討した。
(2) 増倍過程にある電子の 1 ステップは $1 \sim \text{数 mm}$ と考えられ、等電位線が傾いても電子増倍にはあまり影響しない。

めた増倍管のこの印加電圧における利得は 5×10^5 であったので、図のT線から ~ 3 kVのArイオンに対し 10^{-17} A程度のイオンの検出ができることがわかり、またイオン入力が約 10^{-11} Aという比較的大きい場合にも、 $10^{-16} \sim 10^{-17}$ Aの小さい入力に対しても直線性が良いこともわかる。

Fig. 12. (a) Schematic diagrams of ion detection utilizing the multiplier.

(b) The linearity between incident ion beams and out put currents. 1: 9 kV (accelerating voltage), 2: 7 kV, 3: 5 kV, 4: 3 kV and T: for the case of trans-mitted ion beams of 3 kV

5. 結 言

上述のように、筆者らの開発した増倍管は、製作法が容易で、利得その他の特性も良い。作り慣れると、製作した増倍管のほとんどにより特性をもたせることができる。その構造は多段の電子増倍管に比べ非常に簡単ではあるが高利得であり、窓なし増倍管として電子・イオン・軟X線などの測定に充分利用できる。さらに、キャピラリー型に比べ開口面積が広い、パルス計

測・電流測定 of いずれにも適したものが手軽に作られるなどの利点を有する。

しかし、高計数率での使用や長時間使用の際の利得の減衰、出力電流の飽和、真空度に関連する利得の変化、ダイノード面の汚れ・荷電粒子の衝撃による劣化などの問題を抱え、光の絶対強度の正確な測定に類した測定に使用できるようより安定した増倍管として完成するまでには幾つかの 解明 すべき点が残っている。

もちろん、この種の連続ダイノード増倍管は、前述したように、そのいずれもがまだ開発されて日が浅く、しかもそれぞれが特長を持ち、いずれが最も優れているかは簡単に言えない、しかし、これらはいくつかの領域で使用され始め、今後の発展に伴いますその領域は広くなるものと思われる。

終りに、研究を進めるに当って協力してくださった海老沢崇、村田徹雄の両君に感謝します。

なお、本研究の一部は文部省試験研究費によって行なわれたことを付記する。

文 献

- 1) P. T. Farnsworth, *U. S. Patent* 1969399 (1930).
- 2) P. K. Oshchepkov, B. N. Skvortsov, B. A. Osanov and I. V. Siprikov, *Pribory i Tekhn. Eksperim.* No. 4, 89 (1960).
- 3) G. W. Goodrich and W. C. Wiley, *Rev. Sci. Instr.* 33, 761 (1962).
- 4) L. Heroux and H. E. Hinteregger, *Rev. Sci. Instr.* 31, 280 (1960).
- 5) G. W. Goodrich and W. C. Wiley, *Rev. Sci. Instr.* 32, 846 (1961).
- 6) 石川和雄, 応用物理, 37, 1042 (1968).
- 7) 道嶋正美, 応用物理, 37, 2 (1968).
- 8) D. S. Evans, *Rev. Sci. Instr.* 36, 375 (1965), *Goddard Energetic Particles Preprint Series*, X-611-64-154, May, 1964.
- 9) D. S. Evans, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-12, 34 (1965).
- 10) W. R. Hunter, *Space Reserch III, Proc. 3rd Int. Space Science Symp.* pp. 1187 (1962).
- 11) W. C. Wiley and C. F. Hendee, *IRE Trans. Nucl. Sci.* NS-9, 103 (1962).
- 12) A. M. Yakobson, G. A. Chuiko, B. M. Glukhovskii and V. M. Evtikhieva, *Pribory i Tekhn. Eksperim.* No. 5, 244 (1967).
- 13) K. A. Hughes, D. V. Sulway, R. C. Wayte and P. R. Thornton, *J. appl. Phys.* 38, 4922 (1967).

- 14) Bendix Corporation, Catalogue and Technical Data Sheet No. 430.
- 15) J. Adams and B. W. Manley, *Electron. Eng.* **37**, 180 (1965).
- 16) 西岡直, 真空, **11**, 86 (1968).
- 17) 豊田・松本・竹村・山口, 電気四学会連合大会講演論文集 p. 1759 (1968).
- 18) 豊田・松本・山口・藤谷・脇野, 電気四学会連合大会講演論文集 p. 1758 (1968).
- 19) 林友直・橋本正之, 「低エネルギー電子ビームの発生と計測」研究会予稿 (1968).
- 20) C. A. Spindt and K. R. Shoulders, *Rev. Sci. Instr.* **36**, 775 (1965).
- 21) I. V. Siprikov and Yu N. Lyubotov, *Pribory i Tekhn. Eksperim.* No. 5, 173 (1966).
- 22) 石川・岩本, 第28回応物講演会予稿 460 (1967).
- 23) 石川・岩本, 第15回応物連合会講演会予稿 36 (1968).
- 24) M. Kanayama, T. Konno and S. Kiyono, *Rev. Sci. Instr.* **40**, 129 (1969).
- 25) T. Onuma, J. Yamada, M. Okuda and H. Kobayashi, 早稲田大学理工学研究所報告第41輯, 105 (1968).
- 26) 山田・小沼・山本・新村・小林, 第29回応物講演会予稿, 283 (1968).
- 27) 大庭弘一郎, 電通学会全国大会予稿, No. 468 (1966), 電気四学会連合大会講演論文集 No. 1587 (1967).
- 28) 大庭・春名, 電気四学会連合大会講演論文集, p. 1757 (1968).
- 29) F. N. Novitskii, *Report IMET* (1957).
- 30) 吉田重知・水野皓司, 応用物理, **34**, 807 (1965).
- 31) J. Adams and B. W. Manley, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-13**, 88 (1966).
- 32) K. C. Schmidt and C. F. Hendee, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-13**, 100 (1966).
- 33) C. N. Burrous, A. J. Lieber and V. T. Zaviantseff, *Rev. Sci. Instr.* **38**, 1477 (1967).
- 34) D. G. Smith, *J. Sci. Instrum.* **43**, 270 (1966).
- 35) D. G. Smith, *J. Sci. Instrum.* **44**, 1053 (1967).