

ロケット搭載用大出力電子銃装置

矢守 章・萩原通伸・金子 修・佐々木 進・河島信樹

High Power Electron Gun System for Rocket Experiment

By

Akira YAMORI, Mitinobu HAGIWARA, Osamu KANEKO,
Susumu SASAKI and Nobuki KAWASHIMA

Abstract: A high power electron gun system on board sounding rocket K-9M-58 is described. The electron gun has an ability to provide an electron beam with 5 KV, 300 mA (1.5 KW). The system is composed of two sections, high voltage section for the electron gun operation and diagnostic instruments. The power to extract the electron beam for 80 ms every 5 sec. is provided from a capacitor bank charged by a high voltage power supply. Both acceleration voltage and beam current are varied systematically in three steps. The diagnostic includes Langmuir probe, a floating probe, three photomultipliers and VLF/HF receivers. The electron density and temperature in the ionosphere are measured by the Langmuir probe, and the charging of the rocket caused by the electron beam emission is measured by the floating probe. The visible emissions excited by the electron beam are observed by the photomultipliers with optical filters. The VLF and HF receivers are thrown away from the rocket (TAD, Throw Away Detector) and signals received by TAD are transmitted to the rocket by telemetry systems.

1. 実験目的, 概要

宇宙空間での電子ビーム放出実験は、近年ロケット等を用いて盛んに行なわれ、既に波動励起、人工オーロラ、大気光の生成及びエレクトロンエコーの観測等の成果が挙げている。又、将来も1980年代に予定されている、Space Shuttle SLI-SEPAC 計画を初めてとして、大出力電子銃を用いた実験が各国で予定されている。我々も既に3機の観測ロケットを用いて、

1. ロケット・ポテンシャルの上昇
2. VLF, HF 波動
3. 周囲のプラズマ擾乱（温度上昇等）

等の観測に成功している。今回の実験は、これまでの実験の規模より大きくして、物理的現

象の観測のみならず、高圧を用いた電子銃装置の宇宙空間での動作に於ける安全性という事も実験の目的として挙げられる。

実験は電子ビームによる人工オーロラ生成の観測のため闇夜に行なう。電子ビーム放出はロケット高度200 [km] を越えてから開始する。電子ビームのエネルギーは3段階に分けられ、電子銃動作は高圧安全及び放電防止の為 (X+150) 秒より30秒間動作30秒間休止という60秒を一周期としたシーケンスで行なわれる。光学観測、プローブ観測は (X+52) 秒より開始してバックグラウンドを観測すると共に (X+150) 秒以降は、人工オーロラ、ロケット電位の変化の測定を行なう。波動測定は、親ロケットへのテレメータ送信機を備えた (T・A・D: Throw Away Detector) を放出して宇宙空間での測定を行う。

2. 構成

2-1 全体の構成

SPAのブロック図を (Fig 1) に示す。大きく分けると電子銃 - MPD アークジェット部、電子回路部、観測部の3つに分けられる。電子銃 - MPD アークジェット部は、電子銃-MPD アークジェット本体とそれに付属する電源等で構成され、打ち上げ後150秒より動作状態に入る。電子回路部は、SPAのタイムシーケンスを司る制御系、テレメータ送信機に信号を送るアンプ系及び観測部への電源系で構成されている。観測部は、プローブ、光電子

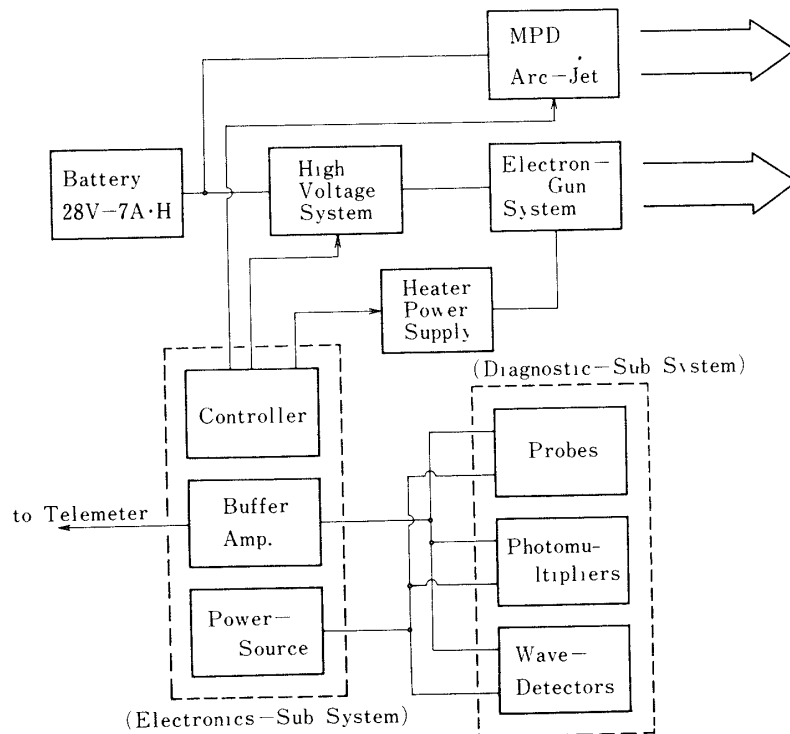


Fig. 1 Block Diagram of S.P.A.

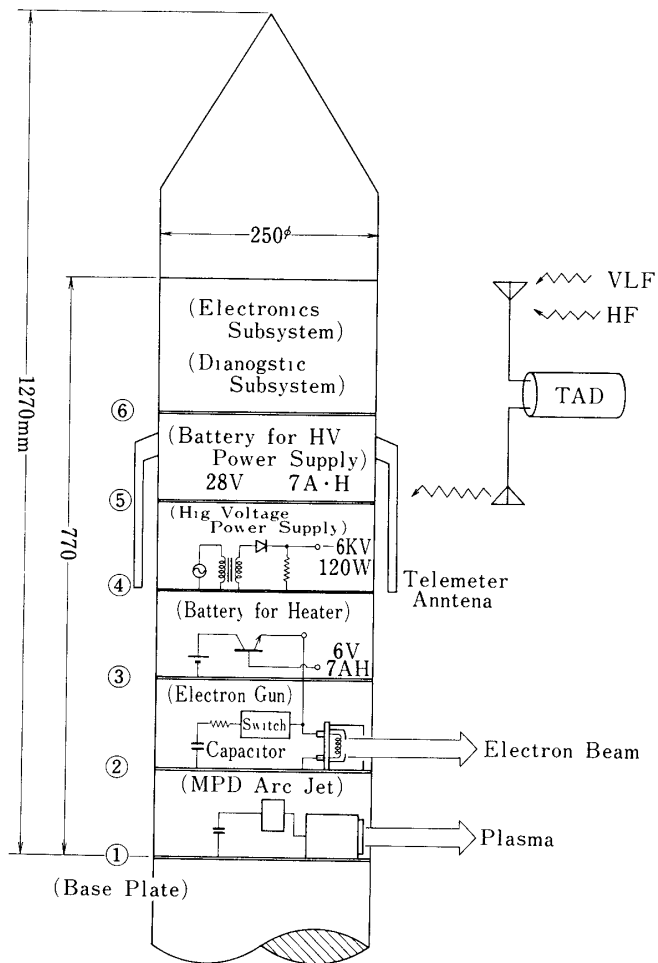


Fig. 2 S.P.A.

増倍管、及び電磁波測定器 (T・A・D) で構成され、電子ビーム、プラズマ流により引き起こされた諸物理現象を観測する。(Fig. 2) に、具体的な構成図を示す。SPA 最上部の基板⑥に、光学観測器が 45° 下方を向いて搭載され、電子ビーム、プラズマ流による光を観測する。又、T・A・D (Throw Away Detector) と呼ばれる観測器が同基板上に搭載されている。これは、上空でロケットより放出され、ロケット本体より 2 [m/s] で離れていき、電子ビームにより励起される V. L. F 帯 H. F 帯の電磁波を観測し、T・A・D に収められているテレメータによりロケット本体にその信号を送信する。電子ビーム放出によるロケット電位の変化を測定するフローティング・プローブとプラズマ密度測定のラングミュア・プローブも同基板上に搭載されている。本基板より下部に搭載されている機器は、高圧器及びその電源である。

電子銃ヒーターの電源は、ロケット・ボディに対する電位が -5 [kV] まで沈むため、上下両基板を FPR にして、電氣的絶縁を図り、又ヒーター電源本体を 1 気圧に密閉して、上空での放電及び高圧リークを防いでいる。電子ビーム及びプラズマ流は光学観測方向と同一

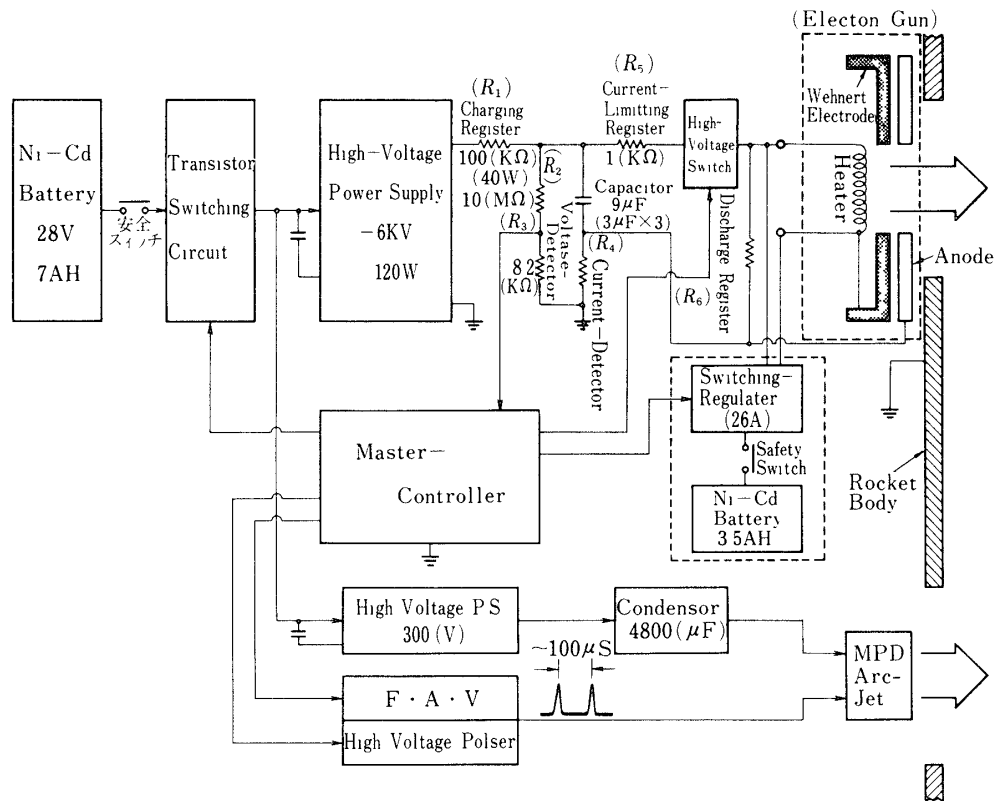


Fig. 3 Block Diagram of Electron Gun and MPD-AJ System

方向に開けられた各々 50 mm ϕ の孔より電離層中に発射される。電子銃と同一基板上には放電用コンデンサー、高圧スイッチ、抵抗類が集められ、いずれもロケット・ボディに対する電位は、最高 -5 [kV] という高圧になるので、金属が表面に出ている通電箇所は全てアラルライトで固めてある。(Fig. 3)に電子銃システムのブロック図を示す。電子銃の加速電圧として、コンデンサ ($9 \mu\text{F}$) に蓄えられた電圧を高圧スイッチを通して印加する。その為電子ビームの加速電圧の値は、大体 80 [ms] の時定数で変化する。高圧電源の出力電圧は、 -6 [kV] で 100 [k Ω] の充電抵抗を通してコンデンサ ($9 \mu\text{F}$) を充電するのであるが、充電電圧は 10 [M Ω] : 82 [k Ω] の分割比で検出され、その検出値は制御部に送られる。(Fig. 3) のタイムシーケンスに見られる様に、あらかじめ設定された電圧値にまでコンデンサ充電されると制御部の電圧比較器が作動して、高圧電源の一次側のトランジスタスイッチを OFF にして充電を完了する。

又コンデンサー充電と平行して、ヒーター電源部のスイッチング・レギュレーターに制御部より信号を送り、3段階に設定された電流を Ni-Cd 電池 (6 [V], 7 [AH])よりヒーターに流す。なお、この際ヒーターはロケット・ボディに対して -5 [kV] の高圧になる為、制御部よりのコントロール信号は、フォト・カプラーを通してスイッチング・レギュレーターに伝えられる。コンデンサーの放電経路としては、電流制限抵抗 R_5 、高圧スイッチ、電子銃及び放電抵抗 R_6 、電流検出抵抗 R_4 、となる訳であるが、ロケットより外部に発射され

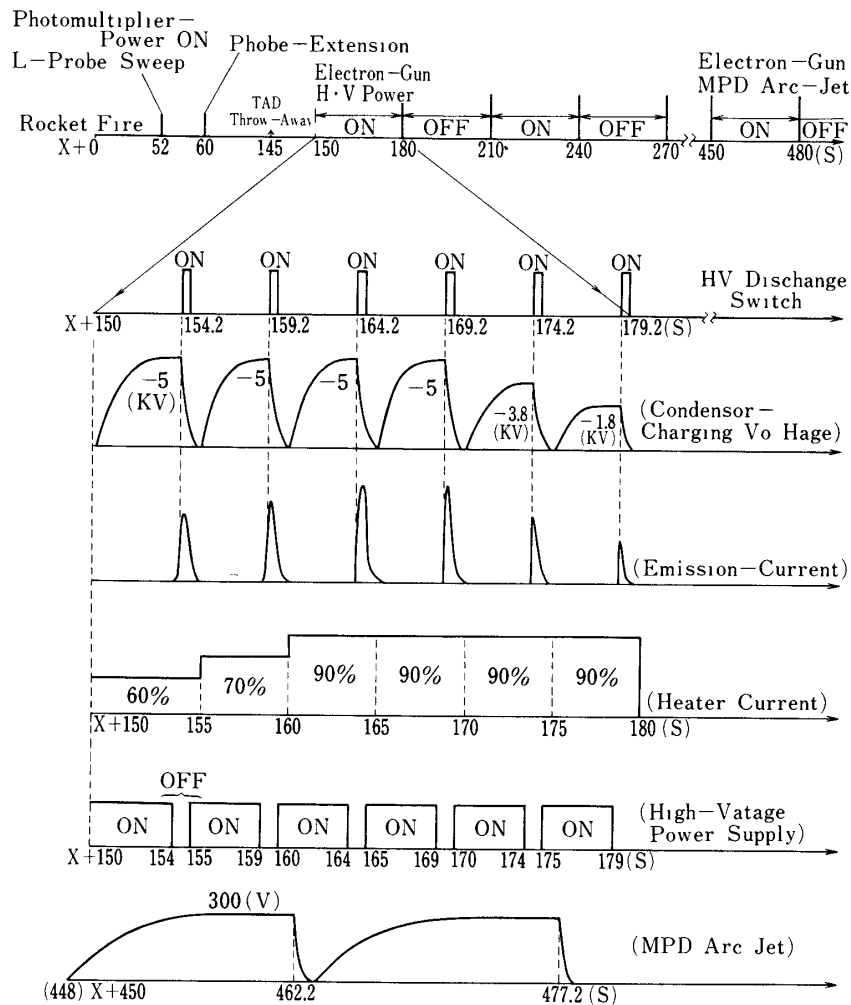


Fig. 4 Time Sequence of S.P.A.

た電子ビームと等量の電流のみが電流検出抵抗 (7.5Ω) を流れ、この値をモニターすれば放出された電子ビームの量が測定できる。(Fig 4) に SPA のタイムシーケンスを示す。打ち上げ後 52 秒で光学観測器の 3 本の光電管に、 -1 [kV] の電圧を印加して、光学観測を開始する。それと同時にラングミュア・プローブに -50 [V] ~ $+10$ [V] の、のこぎり波を掃引する。(X+ 60) 秒に、最上基板⑥の上の 2 つのプローブをロケットより電離層中に突き出し、プラズマ密度、フローティング電位の観測を開始する。(X+ 145) 秒にロケットのスピンのよる遠心力を利用して、2 個の TAD をロケットよりお互い逆方向へ投げ出す。(X+ 150) 秒で電子銃ヒーターに電流を流し又高圧電源を動作させて、コンデンサーの充電を開始する。(X+ 150) 秒より 30 秒間だけ電子銃系を動作させ、次の 30 秒間は動作を停止させ、以後ロケットが着水に至るまで 30 秒間隔つまり 60 秒 1 シーケンスで電子銃系の動作を行なっている。これは、同乗した他の P,I に与える高圧放電による影響を考慮しての事である。電子銃動作中の 30 秒間について説明すると、先ず高圧スイッチ

は、5秒間隔でONになる。第1回目の電子ビーム発射は、 $(X + 154.2)$ 秒で以後5秒毎に30秒間、6回の電子ビーム発射を行なう。この時、電子銃ヒーター電流、加速電圧を各ショット毎に変化させる。

まず最初の3回は、加速電圧を最大にして、ヒーター電流を変化させ、次の3回は、ヒーター電流を最大にして、加速電圧を変化させる。なお図中のヒーター電流の〔%〕は、Duty Cycleで100〔%〕で直流となる。 $(X + 448)$ でMPDアークジェットの電源スイッチが入り、コンデンサーの充電を開始し $(X + 462.2)$ 秒に第一回目の放電を行ない、プラズマ流を電離層に打ちこむ。 $(X + 450)$ 秒以後は着水まで電子銃系動作の30秒間は、MPDアークジェット系も動作させる。MPDアークジェットは15秒/ショットなので1シーケンスに2回の放電を行なうのみである。

2-2 高圧系機器

2-2-1 電子銃

本ロケット実験に使用した電子銃は、日本電子株式会社製の、JEBG-03Uという陰極直熱式自己加速型の電子銃である。これは本来蒸着用として市販されているもので、最大出力は、3kW（加速電圧6kV、ビーム電流500mA）である。この電子銃は既に、K-9M-57号機にも使用されており、ロケット搭載に関して実績を持っている。ヒーターも付属の規格品として、生産されている、6〔V〕、26〔A〕のものを使用した。このヒーターは太さ0.5mmφで、取り付けさえしっかりすればヒーター自身の強度は、ロケット打ち上げ時の振動、衝撃に対して充分耐えうるものである。(Fig. 5)に本電子銃の形状、大きさを示す。電子銃の電気的性能を決めるものは、ヒーター電力に対するエミッション電流の値であるが、この値は、ヒーター電力だけでなく、アノード及びカソードに対するヒーターの位置によっても変化する。(Fig. 6)に示される様な実験配置によりエミッション電流の測定を行ない、ヒーター電力及び、ヒーター位置への依存性を調べた。ヒーター電流がある値の時に加速電圧を2kV、4kV、6kVと変化させた。加速電圧の変化に対するエミッション電流の変化を(Fig. 7)に示す。

次にヒーター取り付け位置に対するエミッションは、

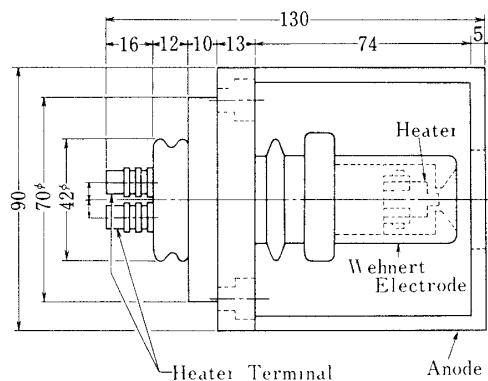


Fig. 5 Figure of Electron Gun

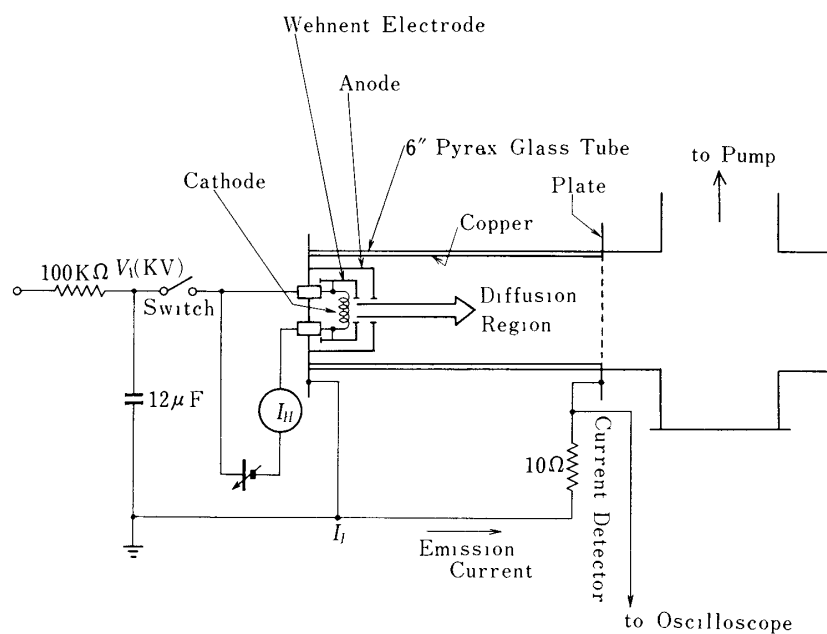


Fig. 6 Experimental Layout

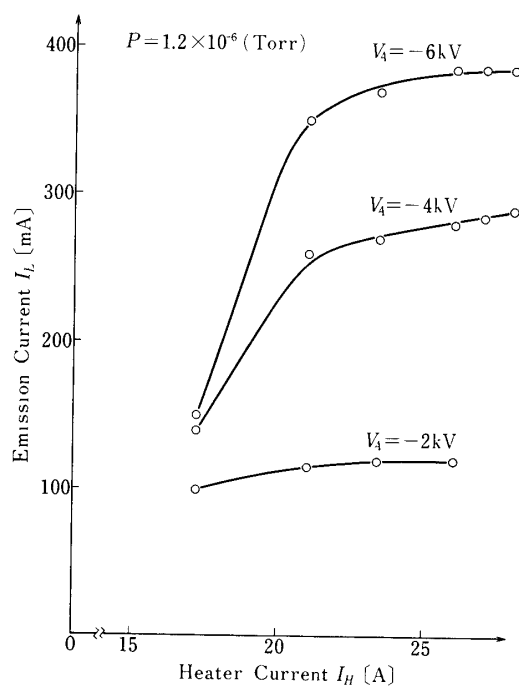


Fig. 7 Emission Current-Heater Current

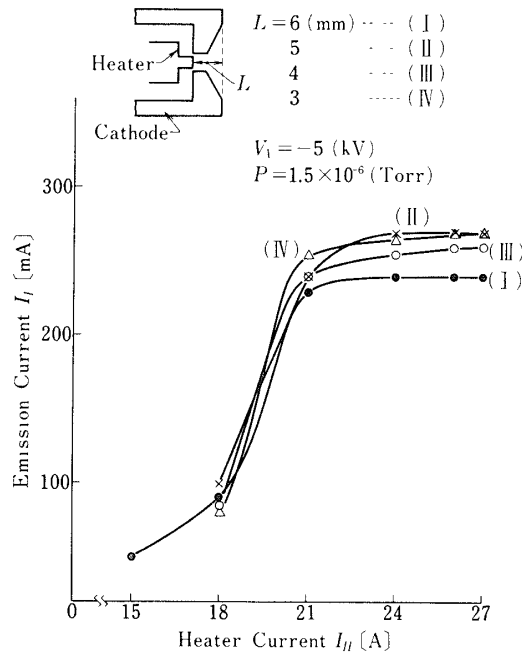


Fig. 8 Emission Current-Heater Position

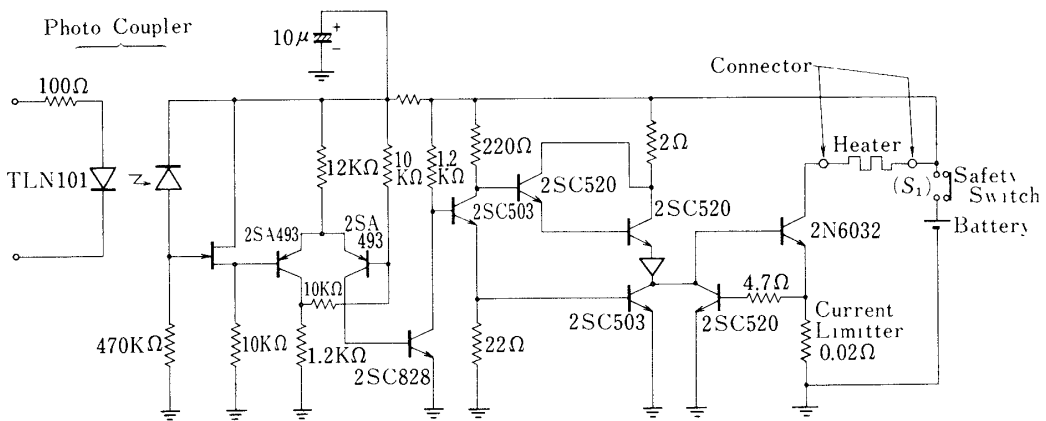


Fig. 9 Heater Switch Circuit

電流の変化を (Fig. 8) に示す. ロケット実験は (Fig. 8) において II の状態で行なった.

2-2-2 電子銃ヒーター電源

この電源の負荷であるヒーターの定格は, 6[V], 26[A] である. K-9 M クラスのロケット実験の場合, 正味で 10 分間, 余裕をみて 15 分間が実験時間である. 従って, 6[V], 26[A] を 15 分間供給することができる電池が必要ということになる. 湯浅電地株式会社

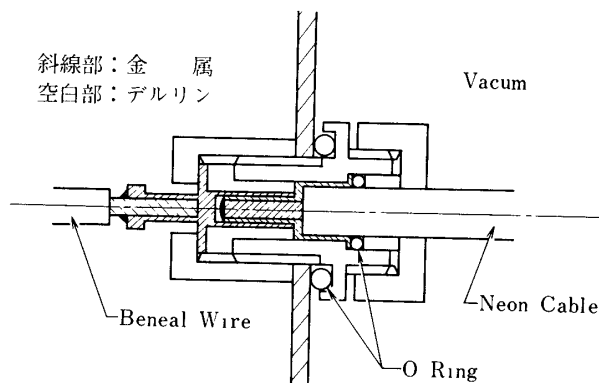


Fig. 10 Seal-off Connector

の完全密閉型ニッケル・カドミウム蓄電池円筒形 3500 RS は、1 個 1.25 [V]、3.5 [AH] である。これを 7 個直列につなぎ、それを 2 本並列にして使用した。計算では 8.75 [V]、7 [AH] となる。電池と電子銃のヒーターとの間に、ヒーター電流を制御するスイッチング回路を入れた。この回路の電源もこの電池が兼ねている。このスイッチング回路の電圧降下等を考えても、ヒーターに 6 [V]、26 [A] を 15 分間は充分供給できる。(Fig. 10) にスイッチング回路を示す。スイッチング回路は、30 [A] 以上流さない過電流防止回路と、ヒーター電流を 3 段階に切り変えるためのドライブ回路から成っている。このドライブ回路は、パワートランジスタによる発熱が予想される為、アルミニウムのブロック上にパワートランジスタを組み放熱を良くするようにしている。大きさとしては全体で、幅 12 cm、奥行き 5 cm、高さ 5.5 cm 程度でほぼ直方体である。過電流防止回路は、ヒーターに定格以上の電流を流さないための回路で、文字通りヒーター保護のためである。制御部に於いて、10kHz の矩形波信号を作りそのデューティを 60 [%]、70 [%]、70 [%] と変化させ、ホト・カプラーを通してドライブ回路に入れる。従って出力は、ピーク電流値が 26 [A] で、そのデューティが 60 [%]、70 [%]、90 [%] と変化する。コントロール部とこのスイッチ回路を、ホト・カプラーで絶縁しているのは、電子銃動作時にスイッチング回路が高圧になるので、低圧であるコントロール回路部を保護するためである。ヒーターが高圧になると、電池、スイッチング回路も高圧になる。その時のブレイク・ダウンを防ぐため、電池とスイッチング回路を 1 枚のベーク板上に固定して、これを大気圧に封じた。

電池とスイッチング回路を大気圧に封じたため、低圧の入力端子は、ハーメチック・シールを使用し、ヒーターの取り出しコネクタは、ウィルソン・シール型のコネクタを開発

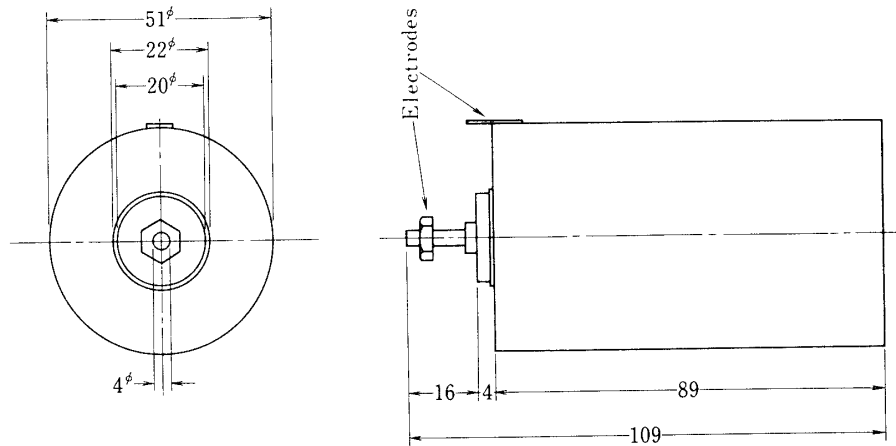
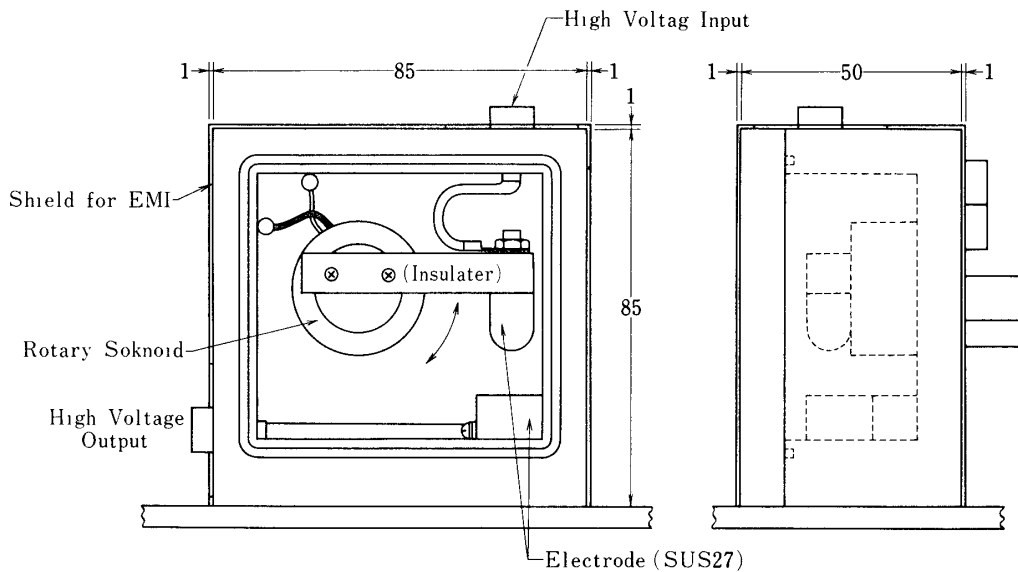


Fig. 11 Capacitor

し、これを使用した。(Fig. 11) にウィルソン・シール型のコネクターを示す。ヒーター電源ボックスにOリング付きの窓を設け、この窓に(Fig. 9)の安全スイッチ S_1 をつけている。又ロケットボディにもこの窓と同位置に窓を設けた。ロケット本組後電池に充電する場合この窓を通して安全スイッチの電池測の端子を利用して充電し、又打ち上げ直前に安全スイッチを入れる事によってそれ以前のテスト等で誤動作してヒーター電源回路が働きヒーターを損焼させるといった事故を防ぐ事ができる。

2-2-3 コンデンサー

搭載されたコンデンサーは、アメリカのマックスウェル社製のコンデンサで、容量 $3[\mu\text{F}]$ 許容充電電圧 $6[\text{kV}]$ である。許容充電電圧が $6[\text{kV}]$ 迄あって、大きさが限られる条件に合うのがこのコンデンサーであった。又このコンデンサーは、 3.3 cc/J , 7.56 g/J である。これは、K-9 M-51号機実験でも使用しており、安全性、形状等を考えて、このコンデンサーを使用した。形は円柱形で、径 $50 \text{ mm}\phi$ 、高さ 110 mm 程度である。このコンデンサーを3個並列に接続して用いた。(Fig. 12) に形状を示す。



- $R_1 \sim R_5$: 充電抵抗 500 k Ω を5本並列接続
 1本8Wなので40W
 R_6 : エミッション検出抵抗 7.5 Ω
 $R_7 \sim R_8$: 充電モニター抵抗
 $R_7 = 10 \text{ M}\Omega$ $R_8 = 8.2 \text{ k}\Omega$
 R_9 : 保護抵抗 1 k Ω
 R_{10} : 放電抵抗 100 k Ω を2本並列接続
 $C_1 \sim C_3$: コンデンサ 1個3 μF 充電電圧6kVを3個並列接続

Fig. 12 High Voltage Discharge Switch Box

2-2-4 高圧スイッチ

高圧スイッチとしては、電子管、3点ギャップ、メカニカルなものといったものが挙げられる。電子管の中で熱電子を利用したサイラトロンは、ヒーター電力に大きなエネルギーをとられる為ロケット搭載用としては不向きである。冷陰極の電子管で小型かつ堅固なクライトロンというものがある。これは、電子管中をあらかじめ放射線で弱い電離を起こさせておき、そこに高圧のトリガーパルスを入れて放電を行なうものである。最初スイッチとして、このクライトロンを使用する予定であったが、我々の使用するエネルギーが定格以上であること。スイッチONの時間が長すぎることでクライトロンの使用条件と合わず、又実際回路を組んでテストしたところ通弧してしまったりして使用できないことが分かった。そこでメカニカルなスイッチを用いた。

ロータリー・ソレノイドに絶縁物のアームを付け、その先に金属片を付けて、リード線を結ぶ。アームの先の金属片よりロータリー・ソレノイドの回転方向へ、1cm離れた位置へ金属片を置き、リード線を結ぶ。アームの先の金属片と、他方の金属片との間でON/OFF

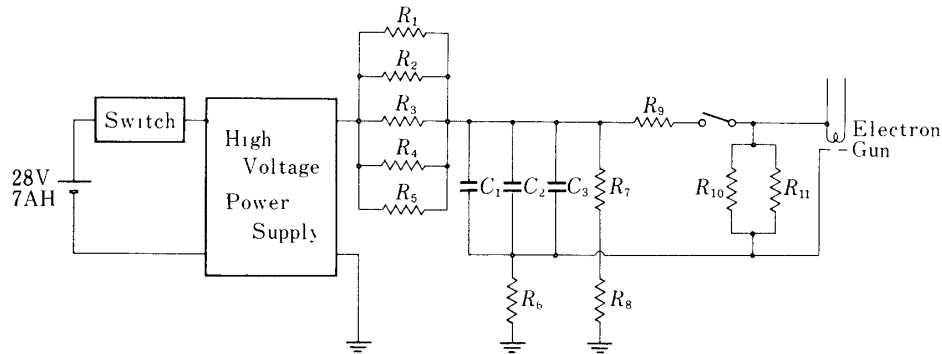


Fig. 13 Charge and Discharge Circuit

を行なう方式である。このスイッチ部も高圧になるため、大気圧に封じた。ケースはデルリンで作ったが、スイッチ ONの瞬間に出るノイズを防ぐため、このデルリンの周囲を1 mm厚のステンレス板でおおった。このケースより4個の端子（高圧入出力、ロータリー・ソレノイド用端子）が出る。高圧の入出力端子は、アラルダイトでポッティングしている。(Fig. 13)に、大体の構造を示す。このスイッチは高圧の両電極が接触する時振動するが、その程度は、ロケットのスピンのため、スイッチの向く方向で変化し、実験的にスイッチの方向がロケットのスピンの中心を向いている時が1番良く、その振動時間は、数 mS で本実験にとってこの値は問題ない値であると判断した。

2-2-5 充放電回路

本実験のロケット搭載機器の主要部分として、コンデンサー充放電回路もその1つに挙げられる。(Fig. 13)にその回路を示す。充電抵抗 ($R_4 \sim R_5$) の値は、コンデンサー ($C_4 \sim C_5$) の容量、高圧電源の容量及びコンデンサーの充電時間との関係で決められる。(Fig. 14にその関係を示すが、本実験においてはコンデンサ容量 9 (μF)、充電抵抗 100 [$\text{k}\Omega$] とし、前述のコンデンサー3個及び 500 [$\text{k}\Omega$] の抵抗 5本を各々並列接続し、充電回路を形成している。この充電回路によりコンデンサーに蓄えられたエネルギーは、高圧スイッチを通して電子銃へ供給され、1部は放電抵抗 (R_{10} , R_{11}) 及び電子銃のアノードを通してコンデンサーの低圧側へと流れこむが、電離層中へ打ち出された電子ビームと等量のリターン電流は、エミッション検出抵抗 (R_9) を通ってコンデンサーへ流れこむ。本回路中で高圧が露出している部分（抵抗、コンデンサの電極、電子銃端子等）は全て、アラルダイトでポッティングし、又配線は耐圧 30 kV のケーブルを使用して高圧リークには、特に注意した。

2-2-6 高圧電源用電池

この電池は、電子銃用高圧電源と、MPD アークジェット用の高圧電源の共通一次側電源として使用した。一般に高圧電源 (DC-DC コンバーター) の1次側入力電圧は、28 [V] である。今回の場合も特注ではあるが、高圧電源の1次側入力電圧は 28 [V] とした。湯浅電池株式会社のニッケル・カドミウム蓄電池を使用すると、1個 1.25 [V] なので、22個必要

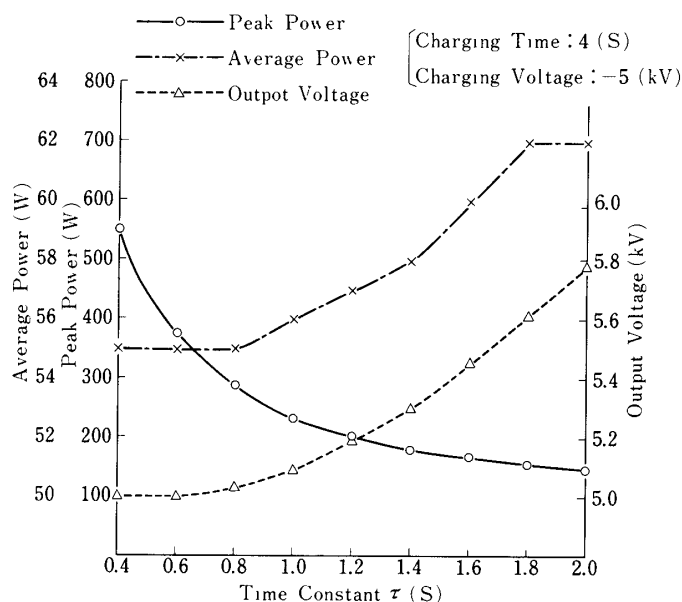


Fig. 14 Power and Output Voltage is Charging time Constant

である。計算上 22 個を直列に接続すると、27.5 [V] であるが充電完了時には、約 30 [V] である。30 [V] となっても高圧電源の 1 次側入力電圧の許容範囲は、24 [V] ~ 32 [V] としたので、問題はない。次に決めるのは、電流容量である。計算によって、電子銃用の高圧電源は平均 8 [A]、MPD アークジェット用の高圧電源は平均 3 [A] 必要である。2 つの高圧電源を同時に使用する時があるので、平均 11 [A] 使うことになる。高圧電源使用開始時のピーク電流等を考え、余裕をもって湯浅電池株式会社のニッケル・カドミウム蓄電池円筒形 7000 Rs を使用した。7000 Rs は、1 個 1.25 [V]、7 [Ah] である。これを 22 個直列に接続して使用すると、27.5 [V]、7 [Ah] である。平均電流で考えてみると、15 分間使用できればよいのだから、28 [A] まで流すことができる。余裕がありすぎると言えなくもないが 7000 RS の 1 段下の 3500 RS (1 個 1.25 [V]、3.5 [Ah]) では、ピーク電流等を考えると少々心細いので、7000 Rs を使用した。なお電池用ボックスは大気封じにして電池内部の保護をしている。

2-2-7 高圧電源

高圧電源の容量を決める要因は、コンデンサーに蓄わえられるエネルギーとその充電時間である。電子ビームの加速電圧、充電時間、コンデンサーの容量は、他の要因との関連で決定される為、電源の容量は、自ずと決められるが、出力電圧、ピーク許容電流は、コンデンサー充電の時定数によって変化する。(Fig. 14)に時定数 τ をパラメータとしたときのピーク電力、平均電力、出力電圧の変化を示す。平均電力は55[W]~62[W]とその変化量は、約1割程度で時定数 τ への依存性は小さく、又出力電圧も同様の傾向を示すが、ピーク電力は150[W]~550[W]と大きく変化する。ピーク電力の上限は、高圧電源の入力28[V] DCの電池の容量により決まり、電池の容量を越えて余り大きくすると、電池電圧が下がって電源の発振停止に至る。本実験に於いては、以上の事と、電源の許容容積とを考慮して時定数 τ を0.9秒にしたが、この場合ピーク電力が260[W]、平均電力が56[W]、出力電圧は5.1[kV]となる、この値に安全係数をかけて製作された本実験に搭載される高圧電源の仕様を下記に示す。

入力電圧 : DC 28 ± 4 [V]

出力電圧 : DC -6 ~ -7 [kV]

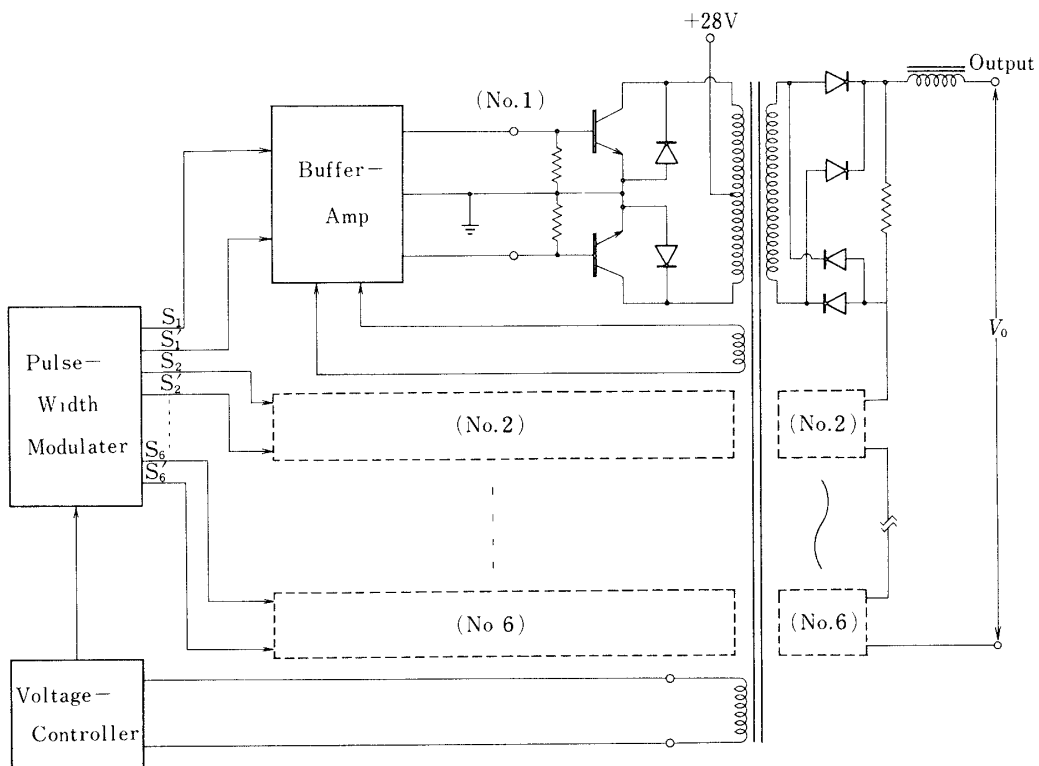


Fig. 15 High Voltage Power-Supply

- 出力容量 : 平均値 120 [W]
ピーク値 360 [W]
- 出力安定度 : 安定度 ± 5 [%]
リップル 2 [%] p~p
- 絶縁耐圧 : DC 10 [kV] / 1分間
- 絶縁抵抗 : DC 10 [kV] で 10 [M Ω] 以上
(中央電子株式会社製)

出力電圧は、 $-6 \sim -7$ [kV] と可変にしているが、実験に際しては -6 [kV] と固定する。この値は、前述の -5.1 [kV] の計算値より大きいが、本実験に於いては、コンデンサーの

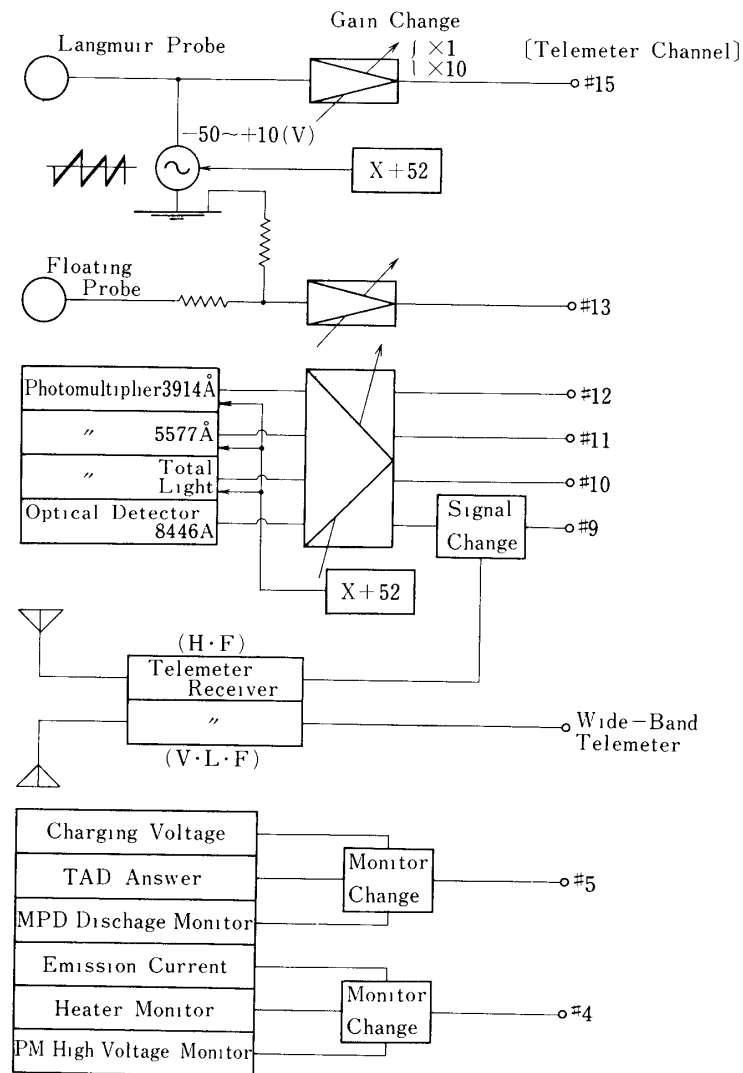


Fig. 16 Block diagram of Diagnostic System

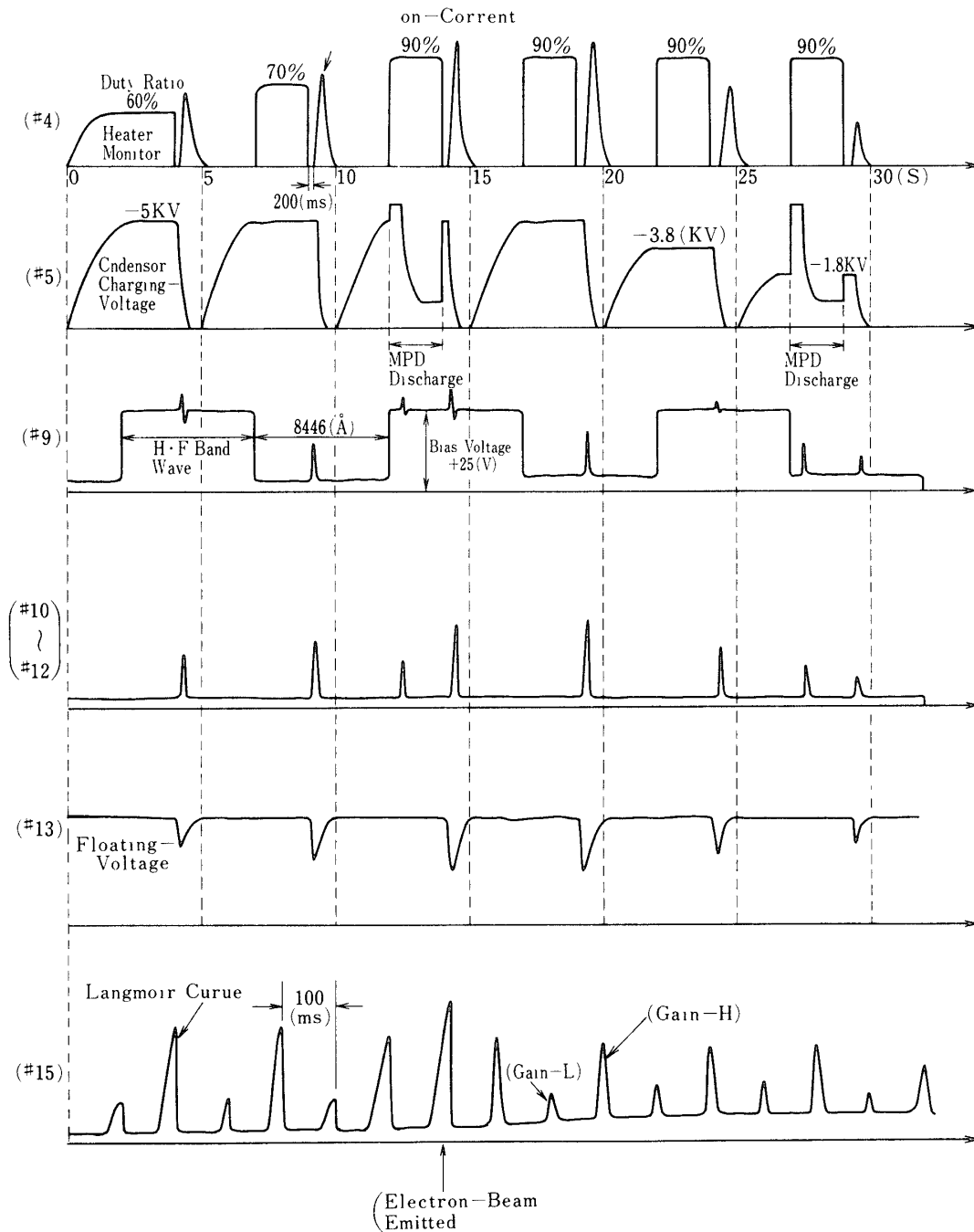


Fig. 17 Typical Telemeter Output

充電電圧が-5 [kV]になると電源の入力電圧が OFF になる様に設計されている為、いくつか分き目しておいた方が入力電圧が下がった場合でも、コンデンサーの充電電圧の減少防止になるので都合が良いであろう。高圧電源の回路図を (Fig 15) に示す。高圧発生用のインバータトランスは、6個に分けられていて、各トランス毎に発振回路、高圧整流器が付き

6個のトランスを直列に結んで、高電圧を発生する。これは、各トランス巻線の製作を簡単にする為である。インバータトランスの2次側出力の1部を検出してその信号を電圧設定部に送り、ここよりの出力信号でパルス幅変調を行なう。

変調されたパルスは、バッファアンプに入り発振時間の幅を変えて設定された出力電圧になる様パルス幅変調が行なわれる。本電源は、入力電圧が24[V]~32[V]迄の間ではその出力電圧は、-6[kV]に安定化されていて、24[V]より下がるに従い出力電圧も低下し、18[V]に於いて、発振停止に至る。形状は、ほぼ正7角形の柱状で高さが100[mm]径が200[mm]で、色は熱輻射を効果的にする為、黒色アルマイトにしている。電源内部は、絶縁及び機械的強度の向上の為真空中で脱泡したエポキシ系の充填材で固められている。

2-3 低圧系機器

2-3-1 概要

低圧系には制御部、測定器部により構成されている。測定器部は物理現象観測系と本実験に於いて基礎的な情報例えばエミッション電流等を測定するモニター系に分けられる。(Fig. 16)に測定器部のブロック図を示す。観測系としては前に述べた目的の為に

- ① フローテングプローブ、ラングミュア・プローブ
- ② 光電子管とオプテカルデテクター
- ③ TAD (Throw Away Detector)

が搭載されている。打ち上げ後52秒にラングミュアプローブに印加する電圧を掃引する。又プローブ電圧掃引と同時に光電子管に-1(kV)の電圧を印加して光学観測を行なう。Optical Detectorの出力はHF帯受信機の出力と5秒毎に切り換えて#9チャンネルのテレメータ送信機に送られる。VLF帯受信機の出力はWide-Bandテレメータにより地上に送信されてくるが、これは予想される信号の周数数帯が1~10(kHz)とFM-FMテレメータでは送信不能な周波数になっている為である。モニター系として6個の信号が挙げられる。これを#5#4の2チャンネルで送信する為時分割式をとっている。TADアンサーは2個のTADがX+145(秒)にロケットより放出されると2ステップ状の電圧波形をモニターシグナルとして#5チャンネルに送られる。ヒータモニターは電子銃ヒータの光をフォトダイオードで受光しその受光レベルによりヒータ電流の値の変化をモニターするものである。観測系のGainは10(Hz)の周期でもってLow、Highの2段階に切り換えられ、電子ビームが発射された時GainレベルはLowの方になっていて、電子ビームが続いている時間は数百(ms/位)になるので一現象中にGainはLowよりHighに切り換わり信号レベルの平均化を図っている。(Fig.17)に各チャンネル毎のテレメータ出力波形を示す。#5のMPD放電波形はX+450(秒)以後のシーケンスにだけ表われそれ以前の電子銃動作の30秒間はコンデンサー充電波形のみとなっている。図に於いては#4、#5の両チャンネルにTAD放出アンサー、光電子管電圧モニターの波形を書いていないが、この2つのモニター波形は電子銃が動作していない30秒間にテレメータ出力として送信されてくる。

2-3-2 ラングミュアプローブ

ラングミュアプローブは直径が30φ、全身277(mm)の3段式構造で、一段目は金メッキをしたアルミニウムで二段目はデルリン、三段目はアルミニウムのパイプ状となってい

る。打ち上げ後60秒でプローブを固定している。1φ (mm) のピアノ線をワイヤ・カッターで切断するとプローブは遠心力とプローブ内に仕込まれているバネの力によりロケットボディより約150 (mm) 外に飛び出す。プローブ内のバネはプローブ飛び出しの為に使われるだけでなく、プローブ掃引電圧をプローブの一段目に印加するリード線の役をもなしている。電離層中の電子をとりこむプローブの一段目の面積は約70 (cm²) となっているが、電離層中の電子密度を10⁴ ~ 10⁶ (個/cc)、電子温度を0.1 (eV) とするとプローブ電流は大体1 ~ 100 (μA) 位の値となる。しかし、電子ビームがロケットより放出されると、ロ

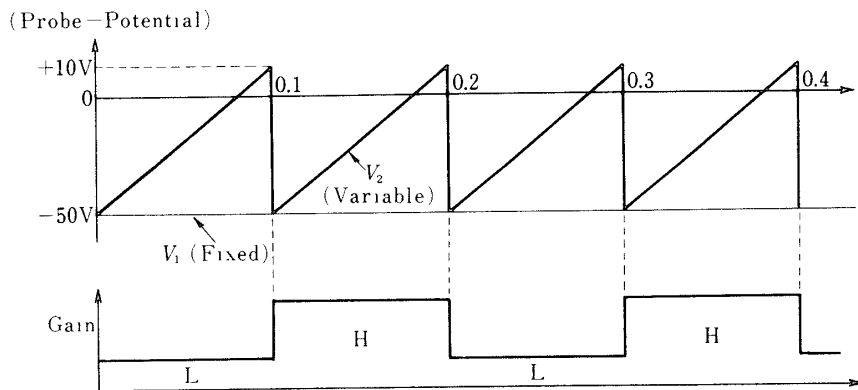
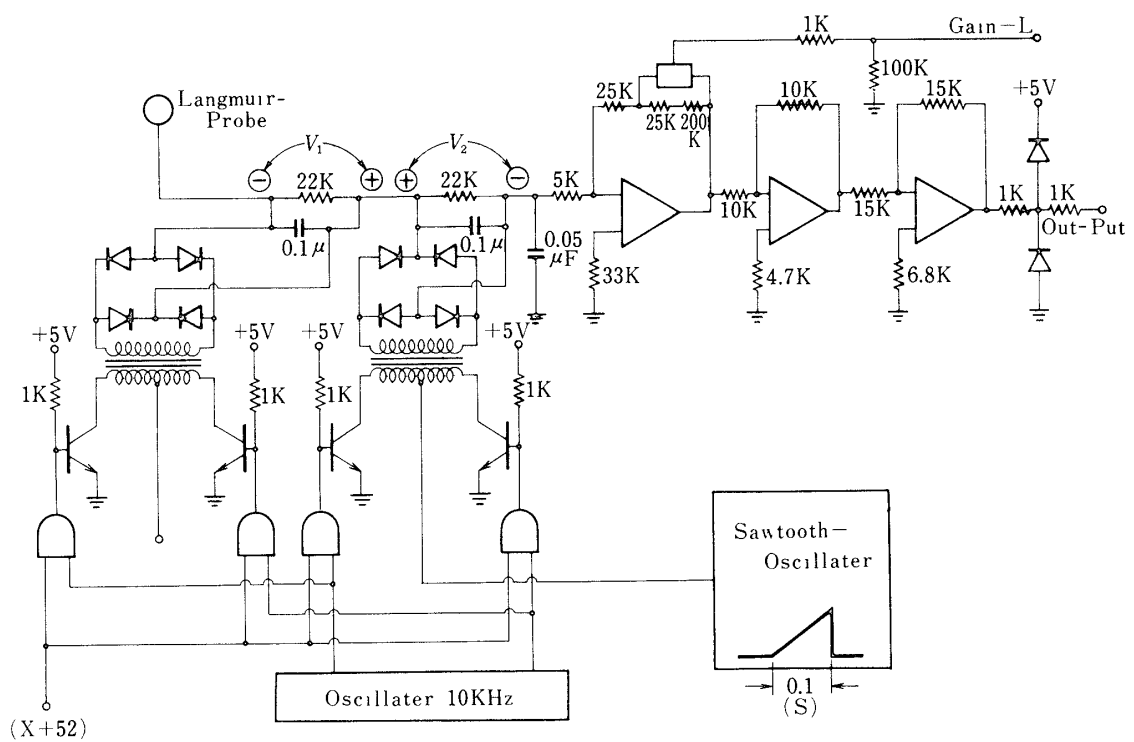


Fig. 18 Langmuir-Probe Sweep Circuit

ケットボディの電位は電離層プラズマの空間電位に対して上昇するので、プローブ電流は上記の値以上になるであろう。

又ラングミュアプローブに印加するロケットボディに対する掃引電圧は通常大体 0 ~ 10 (V) であるが、ロケットボディの電位自身の上るのでイオン飽和電流を流すまでにはプローブ電位をボディに対して大分沈んだ値にまで掃引する必要がある。それはほぼロケットボディ電位の上昇を打ち消す位の値で電子ビーム放出量とプラズマ密度とロケットボディの面積で決められる。K-9M-57号機で同様の実験を行なったが、その実験結果と今回の実験状況を考慮してプローブ電圧の掃引幅は -50 ~ +10 (V) と決めた。プローブ電圧の掃引周期は電子ビーム放出時間の幅とプローブ特性のヒステリシスを考慮して決られる。ヒステリシスはプローブの表面状態により左右されるが、本プローブはプローブ表面を金メッキして、なるだけヒステリシスを小さくするようにしている。電子ビーム放出時間は大体 250 (ms) 位となり、ヒステリシスとこの値を考慮すると掃引周期は 10 (Hz) 位が妥当な値であると思われる。(Fig. 18) にラングミュアプローブの掃引回路とプローブ電流検出回路を示す。掃引電圧は前に述べたように -50 ~ +10 (V) という値をとるが、電源は ±18 (V) なのでステップアップする必要がある。X × 52 (秒) のタイマー信号が入ってくると4個のトランジスタは 10 (kHz) で ON, Off しトランジスタの負荷のトランスの二次側に電圧を誘起し整流平滑された V_1 , V_2 の電圧を発生する。 V_1 側の方のトランジスタの電源電圧一定値にしてあるので V_1 は -50 (V) に固定されているが、 V_2 側のトランジスタの電源電圧は 10 (Hz) 周期ののこぎり波となっている為、 V_2 はピーク値が +60 (V) ののこぎり波となっている。それでプローブ電圧 100 (ms) の間に -50 (V) より +10 (V) まで掃引される事になる。又プローブ電流は I - V 変換された後プローブ電圧の掃引周期と同期して Gain 切り換えが行なわれる。(Fig. 19) に本回路の入出力特性の測定データを示す。なお、プローブ電流の最大値は前に述べた計算値の2倍の 200 (μ A) とした。

2-3-3 フローテング・プローブ

フローテング・プローブの形状はラングミュアプローブと全く同じで (X + 60) 秒にロケットボディより電離層中に突き出され観測を行なう。(Fig. 20) に電子ビーム放出時の電位の変化を示す。電子ビームが放出されるとロケットの電位は V_R より V_R' と上昇しプローブの負荷抵抗 R に電流 i が流れプローブ電位も V_f より V_p に変化する。それでフローテングプローブの出力としては ($V_p - V_R$) となるが i をプローブ飽和電流より充分小さくなる様に R を決めてやれば出力は ($V_R' - V_f$) となり正しいロケット電位変化を示す。しかし、余り R の値を大きくするとタイムレスポンスが悪くなり正確なロケット電位変化の波形を示さないで、その値には適当な値がある。(Fig. 21) に示す様に今回の実施に於いては R の値は 10 (M Ω) とした。この時浮容量を 100 (pF) とすると時定数は 1 (ms) となり、又 K-9M-57号機のデータより ($V_p - V_f$) の値は ($V_R' - V_R$) の値に較べて充分小さい事が予想される。電子ビームが放出されていない時のプローブ電位 ($V_f - V_R$) は K-9M型のロケットに於いては +1 (V) であるが、電子ビーム放出時に於いては電流 (約 300 mA) プラズマ密度、ロケットボディ面積を考慮するとマイナス数 10 V になる事が予想される。それで、回路の初段に於いて入力電圧を分割圧縮し、2段目でその利得を ×1 と ×10 に切り換え (

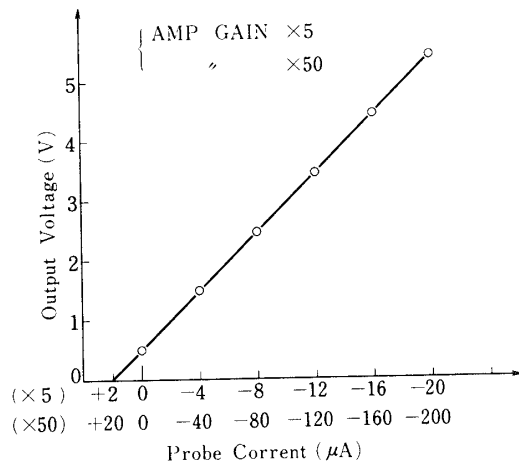


Fig. 19 Probe Current-Output Voltage

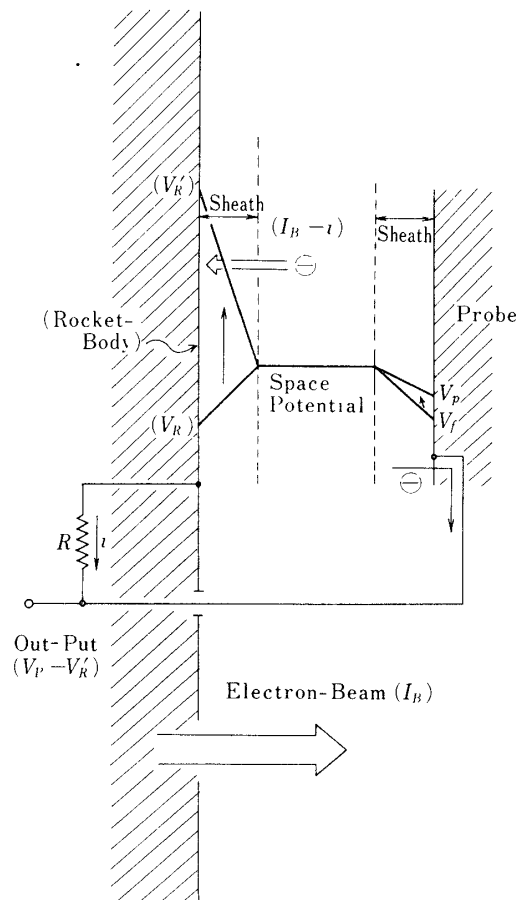


Fig. 20 Rocket Body Potential

Fig. 21) の (b) に見られる如くテレメーター入力 $0 \sim +5$ (V) に対応する入力電圧を $-240 \sim +40$ (V), $-24 \sim +4$ (V) とした。

2-3-4 光学測定系

電子ビーム、プラズマ流により励起された電離層大気分子原子よりの光はロケットボディに開けられた窓を通して光電子増倍管及び半導体のオプティカルデテクターにより観測される。(Fig. 22) に光学測定器の配置の断面図を示す。光電子増倍管・オプティカルデテクターの光軸はロケット軸に対し 45° の角度を持ち上空での高圧放電防止の為に一気圧に封じられたステンレスのケースに納められている。観測される光の波長は 3914 (\AA), 5577 (\AA), 8446 (\AA) の3波長とほぼ可視光全領域の波長である。光電子増倍管、オプティカルデテクターの前面に (Fig. 23) に示す様な特性のフィルターを置いて3波長の測定を行ない、可視光領域測定に於いては光電子増倍管の前面にフィルターと同形のデルリンの窓を置いて観測を行なう。フィルターは干渉フィルターで直径 15 (mm), 厚さ 5 (mm) の円板で光の窓としての役目の他にケース内を大気圧封じにする為のフランジとしても使用されていて、その光学的特性は (Fig. 23) に示されている。 3914 (\AA), 5577 (\AA) 可視光領域は光電子増倍管

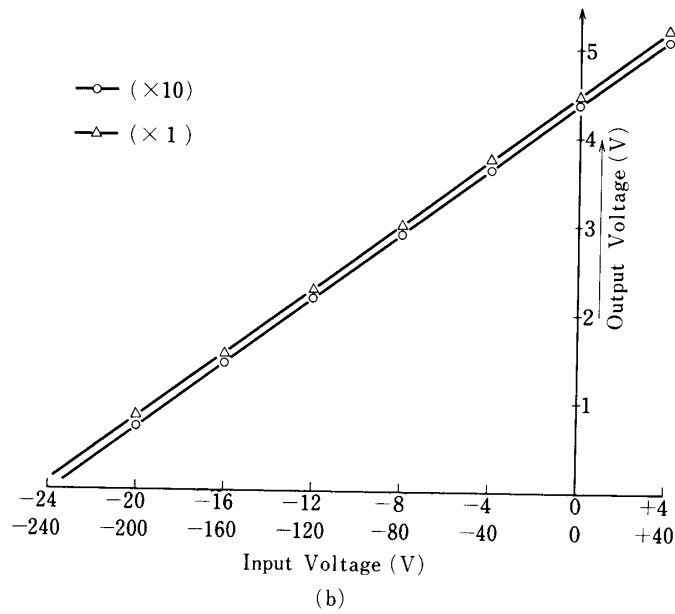
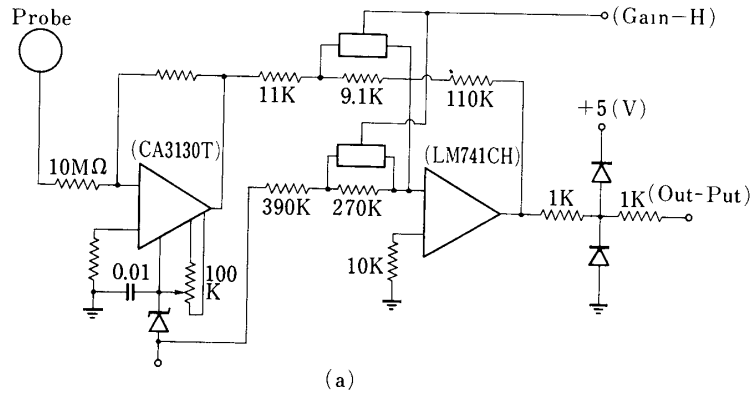


Fig. 21 Floating Probe Electronics Circuit

により、8446 (Å) はオプテカルデテクターにより観測されるのであるが、それぞれの特性は下記の様になっている。

- a) 光電子増倍管
 型名：R 647 (浜松テレビ社製)
 寸法：14mmφ × 73 mm

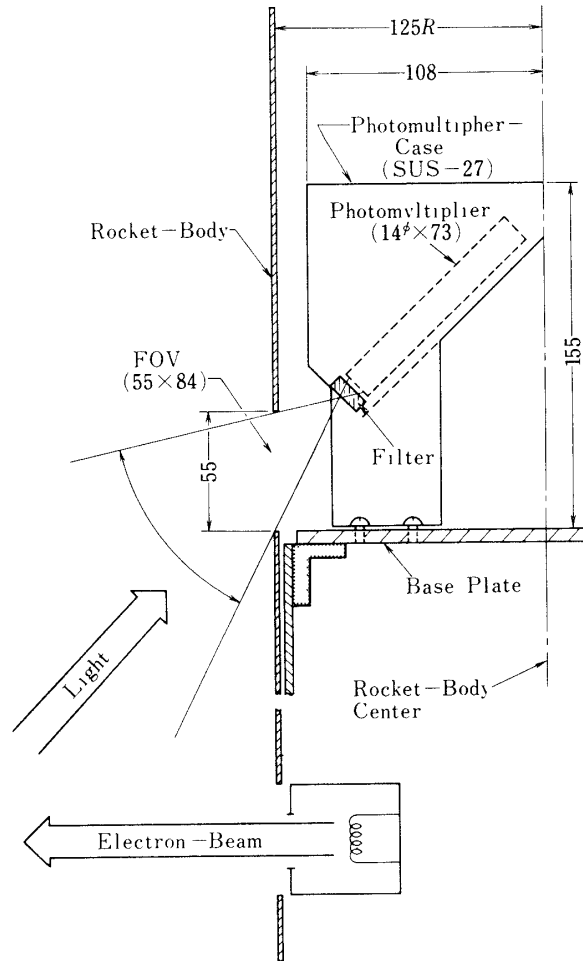


Fig. 22 Layout of Photomultiplier Box

(但しブリーダ抵抗内蔵のソケットがつくと約 100 (mm) の長さになる)

陽極光電面： Ss, - Cs, ヘッドオン型

分光感度特性： 3000~ 6500 (Å) [(Fig. 24) 参照
(4000 (Å) が最大感度)]

陰極感度： 60 ($\mu\text{A}/\text{Lm}$) 標準値

陽極感度： 80 (A/Lm)

暗電流： 5×10^{-9} (A) 標準値

(但し陽極印加電圧は 1 KV)

b) オプテカルデラクター

型名： TYPE 509 (BELL ϵ HOWELL 社製)

寸法： 8.4 mm ϕ \times 6.6 mm の TO - 99 Case

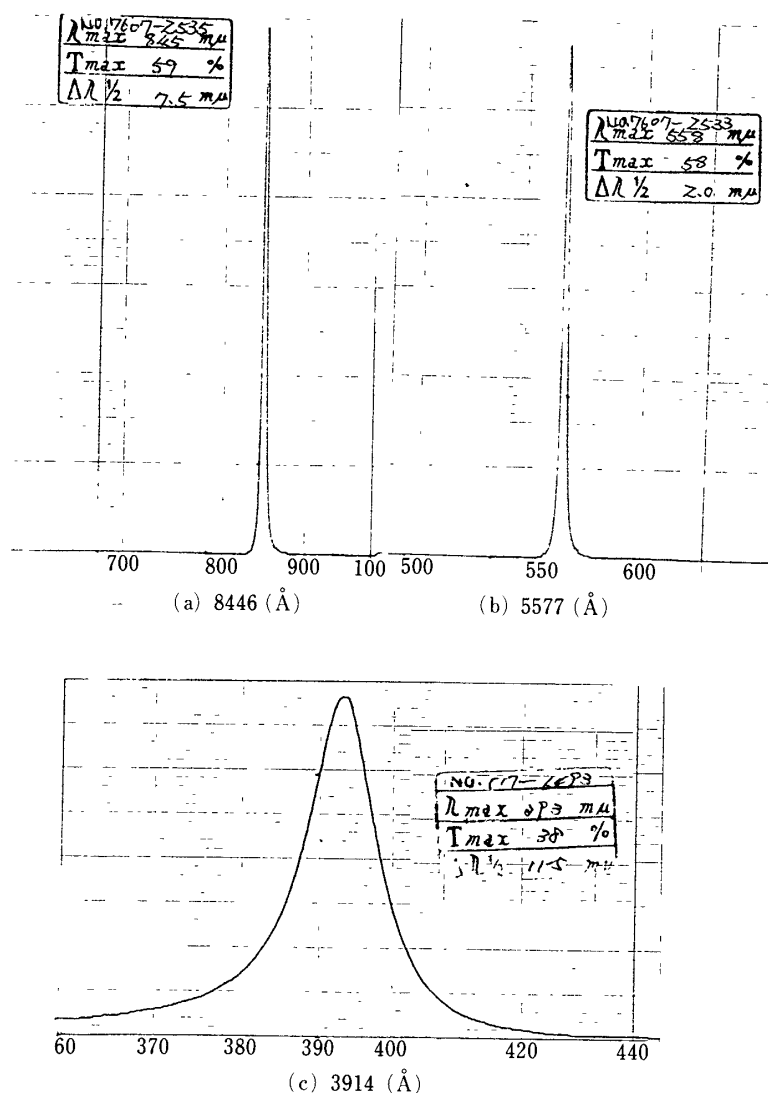


Fig. 23 Characteristic of Optical Filter

感度： 10^{-12} (W)

波長範囲： 0.35 ~ 1.12 (μ) [(Fig. 25)]

バンド幅： DC ~ 40 (MHz)

消費電流： 3 (mA)

動作電圧： ± 15 V (± 3 V min)

受光部面積： 10 (mm^2)

内部回路： (Fig. 26) 参照

上記の光電子増倍管，オプテカルデクターを含めた光学測定系の回路図を (Fig. 27) に示す。図より分る様に測定部とエレクトロニクス部との2つに分けられ両者はコネクターを通してその信号の送信を行っている。光電子増倍管は陽極接置型としている為陰極に高圧電源の出カ-1 (kV)を印加し，その電圧は $10(\text{M}\Omega) : 25(\text{k}\Omega)$ ， $10(\text{M}\Omega) : 40(\text{k}\Omega)$ の分割比

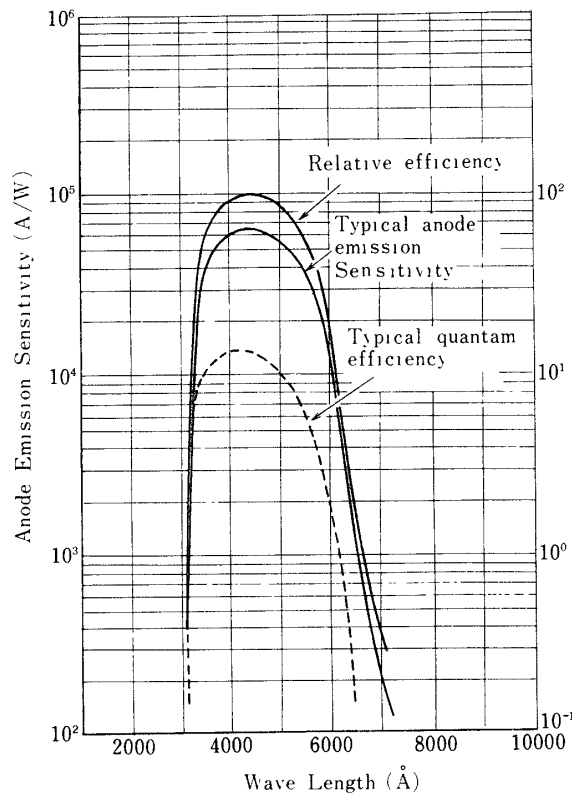
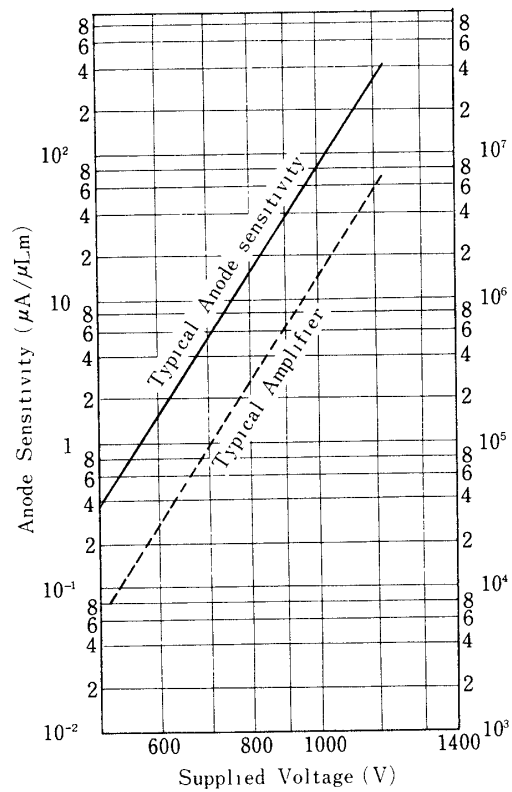


Fig. 24 Characteristic of Photomultiplier

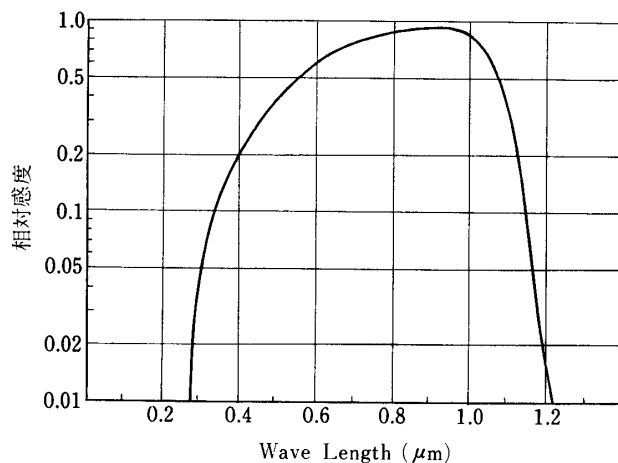


Fig. 25 Characteristic of Optical Detector

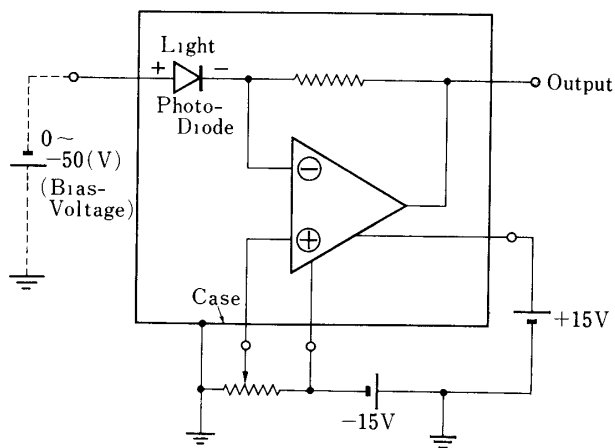


Fig. 26 Optical Detector

で以って検出されエレクトロニクス部を通してテレメータの#4チャンネルに高圧モニターとして送られる。光電子増倍管及びオプテカルデテクターにより観測された光の信号はエレクトロニクス部に送られ (Fig. 28) に示される特性の増幅回路を通してテレメータチャンネル#9#10#11#12に送られる。図に於いては $\lambda = 3914 \text{ (\AA)}$ の回路特性のみを示したが、他の波長の回路の特性もほぼ同様のものである。ただ、その入力電流、電圧の範囲が光

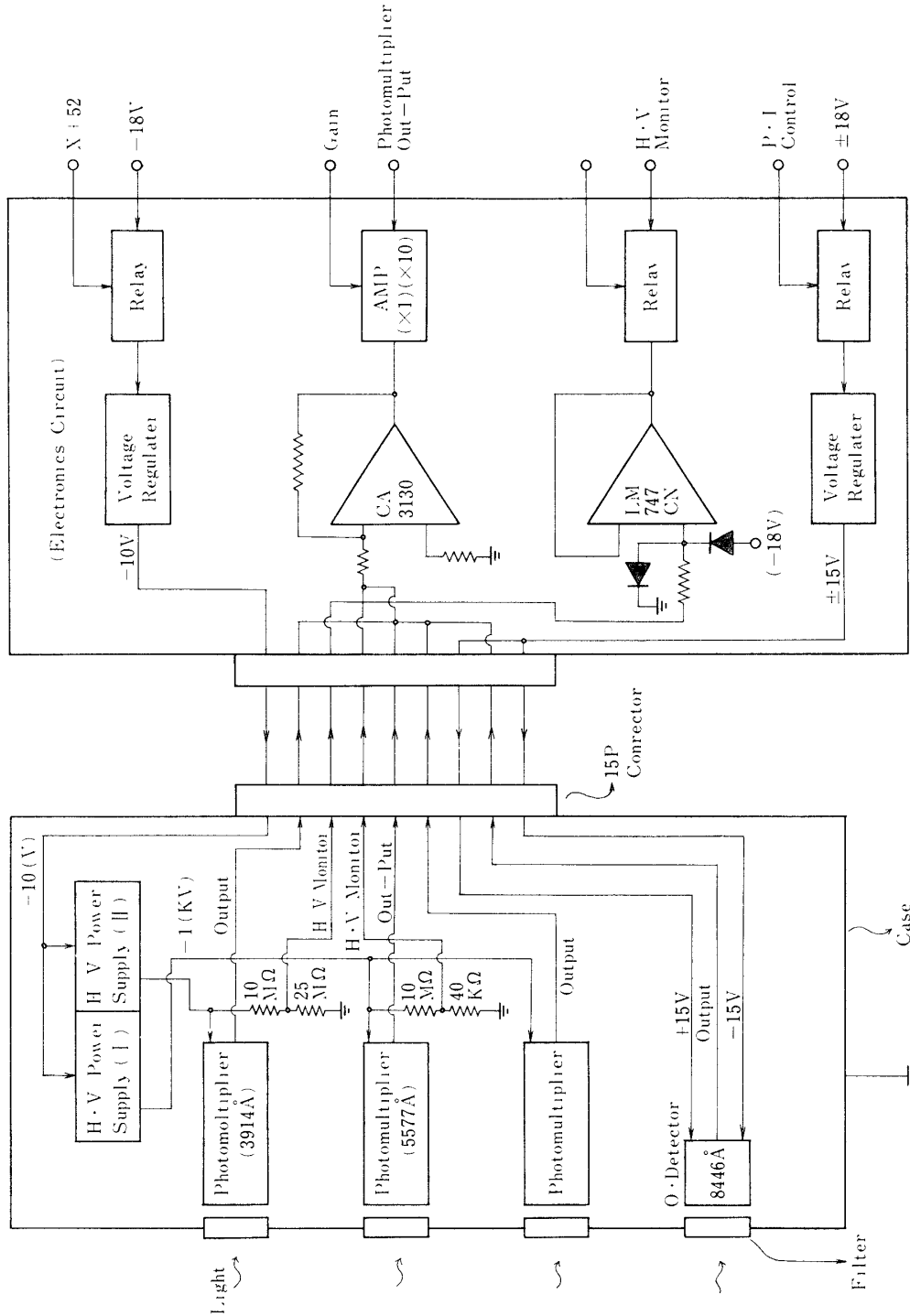


Fig. 27 Blockdiagram of Optical Diagnostic System

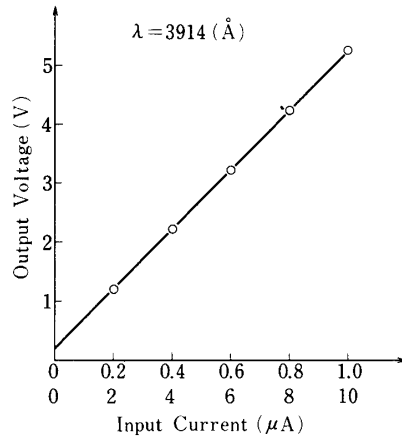


Fig. 28 Characteristic of amplifier

の予想される強さ。光電子増倍管の波長に対する感度の差、フィルターによる減衰等の為波長により変わり本実験に於いては図に示される様な値に決めた。

Gain の切り換え周期はラングミュアプローブと同じで 10 (Hz) にしてあり電子ビーム放出と同時に ($\times 1$) の Gain になり光の信号が弱くなってきた 100 (ms) 後に ($\times 10$) の Gain に切り換えられる。

2-3-5 モニター系

(Fig. 16) に示した様にモニターとしては 6 つの項目がある。これらの項目は実験後データ解析の情報になるだけでなく、本実験に於いて何らかの不具合が生じた場合にその原因解明の参考になるものである。(Fig. 29) にその回路を示す。

2-3-6 制御部

制御部としては高圧電源の制御、電子銃ヒーターの制御 Gain の切り換え、チャンネルの時分割等の動作を行なう。(Fig. 4) に示したタイムシーケンスに従って制御部より制御信号が各部に送られるが、その内高圧電源、ヒーター制御の具体的な回路図を (Fig. 30) に示す。高圧電源スイッチ制御用ゲート回路に ($X + 150$) 秒のタイマー信号、コンデンサー充電電圧を抵抗分割検出後比較器を通過した信号、Decade Counter の出力である 4 秒 H, 1 秒 L の信号の 3 つの信号が入り ($X \times 150$) 秒以後高圧電源スイッチの動作を行ない (Fig. 4) のコンデンサー充電電圧波形に示される様な 3 段階の電圧充電の制御を行なう。電子銃ヒーターは 3 段階にその電力を制御されるが、周波数 10 (kHz) で Duty Ratio が 60, 70, 90 (%) の 3 種類の矩形波を Decade Counter より出力で以って 5 秒毎に切り換えてヒータースイッチの入力フォトカップラーに送りその制御を行なう。($X + 90$) 秒でクロックをリセットして ($X + 115$) 秒まではコンデンサー充電電圧を -5 (kV) に固定してヒーター電流を 60, 70, 90 (%) と上げていき、($X + 115$) 秒より ($X + 130$) 秒まではヒーター電流を 90 (%) に固定してコンデンサー充電電圧を $-5, -3.8, -1.8$ (kV) と下げていく。30 秒間の休みを置いて以後同様のタイムシーケンスで以って制御される。Gain の切り換え

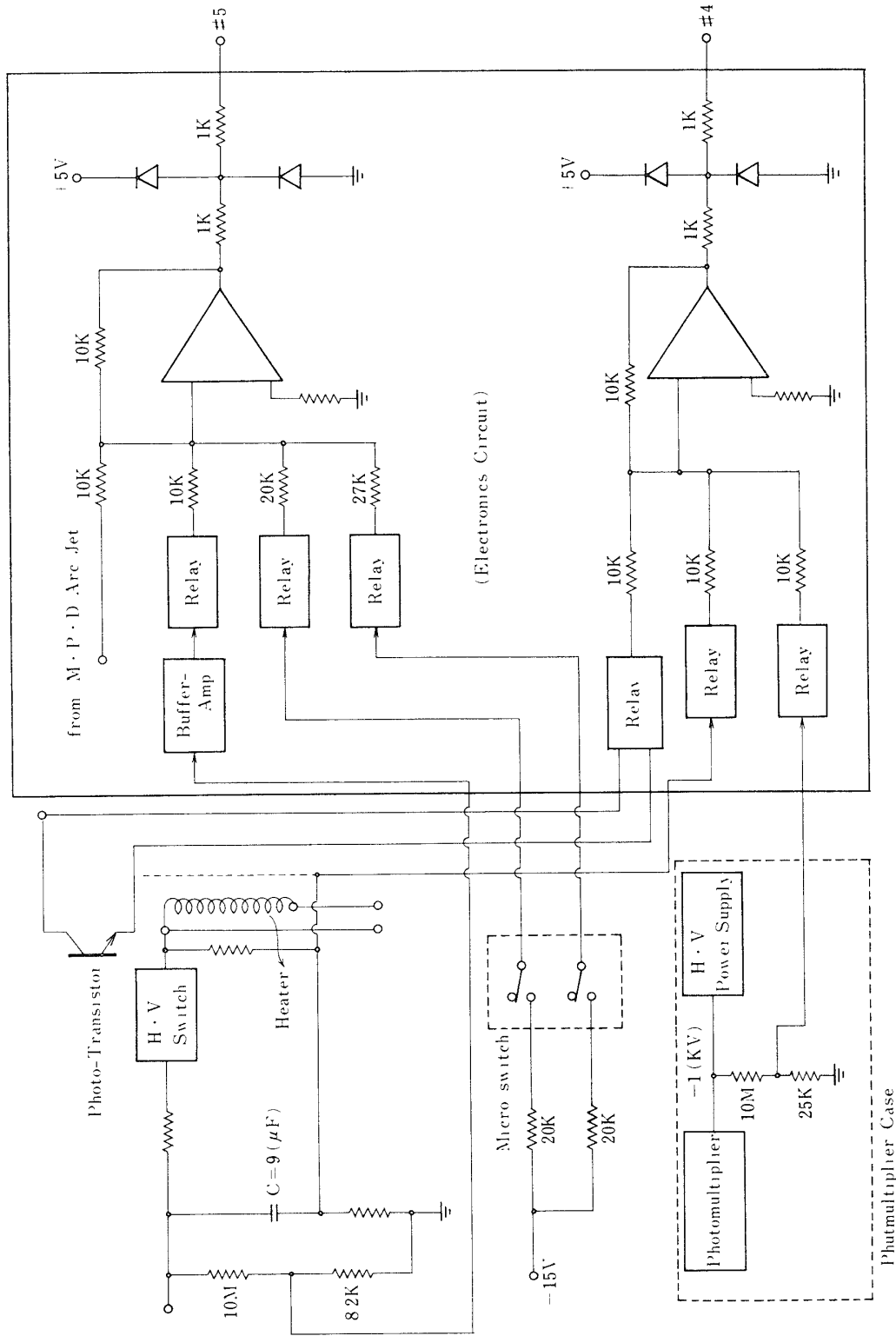


Fig. 29 Monitor Circuit

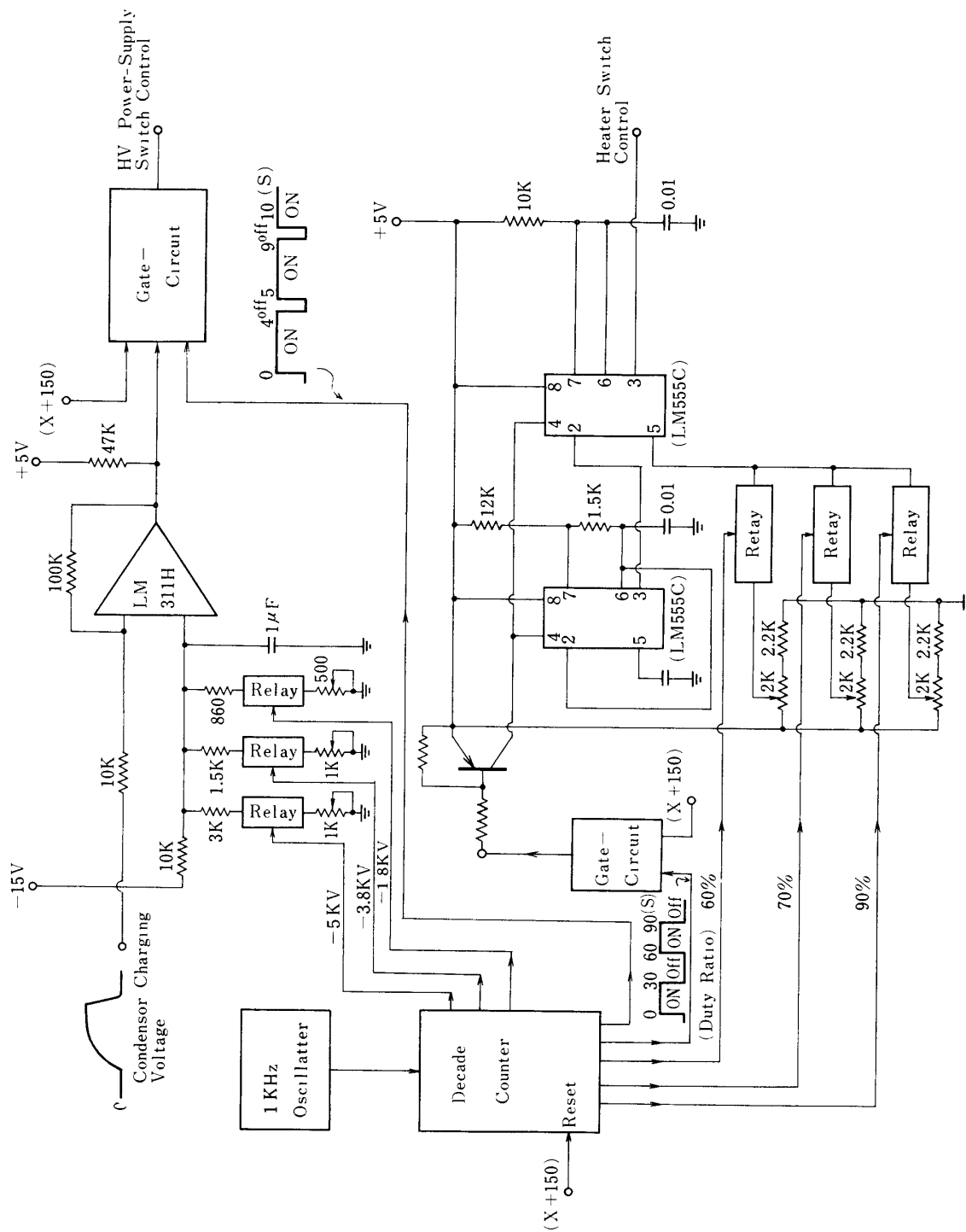


Fig. 30 Control Circuit

は1 (kHz) の原発振を Decade Counter によりその周期が10 (Hz) にまで下げられたクロックを各O・P アンプに送りその帰還抵抗の値を変える事により行なわれる。

3. 結 論

本実験は1977年1月16日21時45分鹿児島県内の浦東大宇宙空間観測所より発射されたK-9M-58号機により行なわれた。打ち上げ後52秒に光学観測系が動作状態に入り3914 (Å), 5577 (Å), 8446 (Å) 及び可視光線領域波長の観測を行った。電子ビームMPD-AJ発射と同期して3914, 5577 (Å) の信号が観測されたが, 8446 (Å) に関してはMPD-AJのみの信号しか観測されなかった。ラングミュアプローブ, ダブルプローブは(X+60)秒にロケットより突き出され電子密度・温度, フローテング電位の測定を行ない電子ビーム発射に供なうロケット電位の上昇を観測した。(X+145)秒に2個のTADがロケットより投げ出されたが, 電子ビームにより励起されるVLF帯及びHF帯の電波は観測されなかった。(X+150)秒に高圧電源が動作しコンデンサー充電が行なわれた(X+154.2)秒に高圧スイッチがONになり第一回目の電子ビームが発射された。第2周期の余中より第3周期まで高圧がリークして電子ビームの発射が行なわれなかったが第4周期より第7周期まで決められたタイムシーケンスに基づいて電子ビームを発射しロケットの大気圏突入をもって実験を終了した。又MPD-AJも第6周期に2回, 第7周期に1回の放電が行なわれ, それによる光の観測を行なった。

今後改良すべき点として機器の小型化が挙げられる。エネルギー, 実験時間が決まると機器の内でもコンデンサー, 電地の大きさは自ずと決められるが, 高圧電源に関してはその大きさは容量だけでなく安定度等も関係してくるので実験条件, 目的とを考慮してその最適値をとれば必要以上に大きくなる事は避けられるであろう。今回の場合, 我々としては初めて6kV, 120Wという高圧電源を搭載したのでその安定及び安全性に重点を置いた為, この容量のクラスの高圧電源としては大きくなったが, 今回の実験結果をふまえてその最適値を改めて検討すれば小型化も可能であろうと思われる。今回電子銃はロケット先端の開頭部より下に置きボディに窓を開けて電子ビームを発射したが, 電子銃周辺の機器よりのアウトガスがロケット内より電離層中に流れていく際その通り道となる。アウトガスが充分抜けきっていない時高圧放電を行うと電子ビームの加速だけでなく, アノード・カソード間でプラズマの生成も行なわれるので, 電子銃は開頭部に置いて周辺機器よりのアウトガスの影響を小さくする方が望ましい。

1977年5月19日 新設部(科学)