

JAERI-M
85-192

フォトダイオードを用いた $H\alpha$ 光の
ポロイダル分布測定装置とその較正

1985年11月

三浦 幸俊・河西 敏・玉井 広史・長谷川 浩一

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

フォトダイオードを用いた H_{α} 光の
ポロイダル分布測定装置とその較正

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部
三浦幸俊・河西敏・玉井広史・長谷川浩一

(1985年10月24日受理)

シリコンフォトダイオード (S 1226-5BQ, 浜松ホトニクス社製) とOP アンプにより,
 H_{α} 光のポロイダル分布測定装置を製作し, He-Ne レーザー光により, その絶対放射感度を
測定した。測定装置のチャンネル数は, 高速応答でペレット入射時におけるその蒸発量をモ
ニタするためのファーストタイプ8チャンネルと, 通常の動作ガスからの放射光を測定する
スロータイプ36チャンネルである。較正実験により, ファーストタイプの立ち上がり時間
は, 約 $2.8 \mu\text{sec}$ であり, 絶対放射感度は, 72.7 V/mW (照射波長 633 nm) であった。ス
ロータイプの立ち上がり時間は, 約 $350 \mu\text{sec}$ であり, 絶対放射感度は, $18.2 \text{ V}/\mu\text{W}$ (照射
波長 633 nm) であった。

The Device for The Poloidal Profile Measurement of H_{α} -line
Emission by Photodiode and Its Calibration

Yukitoshi MIURA, Satoshi KASAI,
Hiroshi TAMAI and Koichi HASEGAWA

Department of Thermonuclear Fusion Research,
Naka Fusion Research Establishment, JAERI

(Received October 24, 1985)

The device for the poloidal profile measurement of H_{α} -line emission has been equipped by photodiode (S1225-5BQ by HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) and operational amplifier. The absolute efficiency was calibrated by using He-Ne laser. The device is constructed by 44 channels. The fast type of 8 channels is for the monitor of pellet abration profile. The slow type of 36 channels is for the poloidal profile measurement of H_{α} -line emission from JFT-2M plasma. The rise time of the fast type and the slow type is about 2.8 μ sec and about 350 μ sec, respectively. The absolute efficiency of the fast type and the slow type is 72.7 V/mW and 18.2 V/ μ W, respectively.

Keywords; H_{α} , Photodiode, Operational Amplifier, Poloidal Profile,
Pellet, Abration, Absolute Efficiency, Rise Time,
Calibration, Plasma

目 次

1. はじめに	1
2. 装置について	1
2.1 フォトダイオード	1
2.2 OPアンプによるプリアンプ	2
2.3 光学測定系	2
3. 校正実験	3
3.1 発光ダイオードによるステップ応答特性と各チャンネル間の相対感度測定	3
3.2 He-Ne レーザーによる絶対放射感度測定	4
3.3 クロストーク	4
3.4 オフセットドリフト	5
4. まとめと問題点	5
謝 辞	6
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Description of the device	1
2.1 Photodiode	1
2.2 Pre-Amplifier by Operational Amplifier	2
3. Calibration experiment	3
3.1 Measurement of the step response and the relative efficiency by using LED	3
3.2 Measurement of the absolute efficiency by using He-Ne laser	4
3.3 Cross-talk	4
3.4 Offset-drift	5
4. Summary and the problem of this system	5
Acknowledgements	6
References	7

1. はじめに

最近の磁場閉じ込めによる核融合研究において、燃料補給の方法として通常のパフとは別に、液体ヘリウム温度下で作られた水素あるいは重水素の個体（ペレット）をプラズマに入射する研究が、ISX-B〔1〕、ALCATOR〔2〕、D-III〔3〕などで行われている。JFT-2Mにおいても、空気銃方式のペレット入射装置を製作し、0.5～1 km/secのスピードを持つ、直径1.65 mm、長さ1.65 mmの大きさ（設計値）のペレット入射実験が進められている。ペレットはプラズマに入ると、電子あるいは高速イオンとの衝突により蒸発し、イオン化されてプラズマに粒子を補給する。その過程で H_{α} 光あるいは D_{α} 光を放射する。またその放射強度が粒子補給量にほぼ比例しているという計算結果〔4〕も報告されている。通常のペレット入射実験では、入射している方向から H_{α} （ D_{α} ）光をモニタし、 H_{α} （ D_{α} ）光の光っている時間とペレットのスピードから、プラズマのどの位置にどれだけの粒子補給がなされたかを測定しているが、今回製作したポロイダル分布測定装置は、通常のモニタとは別に、入射方向とほぼ垂直に交わる測定ラインでペレットからの H_{α} （ D_{α} ）光の分布を測定するための装置である。

また最近の追加熱実験においては、閉じ込めの良い放電（Hモード）〔5-6〕がプラズマの動作ガスからの放射光（ H_{α} 、 D_{α} ）と強い相関があることが報告されている。それで上記の蒸発量モニタと同時に、その動作ガスからの放射光のポロイダル分布も同時に測定できるようにした（放射光強度がペレット入射時に比べると約1/250であるために、両者を1つの検出器で同時に測定するのは困難である）。

第2節では、フォトダイオードを用いた測定装置について述べ、第3節では、各チャンネルのステップ応答特性、絶対放射感度測定などの校正実験結果について記す。最後に、まとめと測定系の問題点について述べる。

2. 装置について

2.1 フォトダイオード

フォトダイオードは、暗中には一般の整流用ダイオードと同様であるが、両端を短絡し光を照射すると逆方向（整流用ダイオードの意味で）に短絡電流が流れ、その短絡電流は、負荷抵抗が小さい場合に、照射強度に広い範囲で優れた直線的関係を示すという性質を持つ。前述のような性質を持つフォトダイオードも、分光感度特性、受光面サイズなどの異なるものが多品種存在する。そこで選定は、 H_{α} 光（656.28 nm）、 D_{α} 光（656.1 nm）の波長域に十分感度があること、ある程度的高速応答（立ち上がり時間が約5 μ sec以下）が期待できるように、接合容量が小さいこと、多チャンネルアレイ化するために小サイズでコストのかからないもの、ばらつきの小さいもの、という基準で行い、浜松ホトニクス社製シリコンフォトダイオードS1226-5BQを使用した。表1にそのカタログ特性〔浜松ホトニクス株式会社 Cat.No SC10-3より〕図1に外形寸法を示す。

1. はじめに

最近の磁場閉じ込めによる核融合研究において、燃料補給の方法として通常のガスパフとは別に、液体ヘリウム温度下で作られた水素あるいは重水素の個体（ペレット）をプラズマに入射する研究が、ISX-B [1], ALCATOR [2], D-III [3] などで行われている。JFT-2M においても、空気銃方式のペレット入射装置を製作し、0.5～1 km/sec のスピードを持つ、直径 1.65 mm、長さ 1.65 mm の大きさ（設計値）のペレット入射実験が進められている。ペレットはプラズマに入ると、電子あるいは高速イオンとの衝突により蒸発し、イオン化されてプラズマに粒子を補給する。その過程で H_{α} 光あるいは D_{α} 光を放射する。またその放射強度が粒子補給量にはほぼ比例しているという計算結果 [4] も報告されている。通常のペレット入射実験では、入射している方向から H_{α} (D_{α}) 光をモニタし、 H_{α} (D_{α}) 光の光っている時間とペレットのスピードから、プラズマのどの位置にどれだけの粒子補給がなされたかを測定しているが、今回製作したポロイダル分布測定装置は、通常のモニタとは別に、入射方向とほぼ垂直に交わる測定ラインでペレットからの H_{α} (D_{α}) 光の分布を測定するための装置である。

また最近の追加熱実験においては、閉じ込めの良い放電（Hモード）[5-6] がプラズマの動作ガスからの放射光（ H_{α} , D_{α} ）と強い相関があることが報告されている。それで上記の蒸発量モニタと同時に、その動作ガスからの放射光のポロイダル分布も同時に測定できるようにした（放射光強度がペレット入射時に比べると約 1/250 であるために、両者を 1 つの検出器で同時に測定するのは困難である）。

第2節では、フォトダイオードを用いた測定装置について述べ、第3節では、各チャンネルのステップ応答特性、絶対放射感度測定などの較正実験結果について記す。最後に、まとめと測定系の問題点について述べる。

2. 装置について

2.1 フォトダイオード

フォトダイオードは、暗中には一般の整流用ダイオードと同様であるが、両端を短絡し光を照射すると逆方向（整流用ダイオードの意味で）に短絡電流が流れ、その短絡電流は、負荷抵抗が小さい場合に、照射強度に広い範囲で優れた直線的關係を示すという性質を持つ。前述のような性質を持つフォトダイオードも、分光感度特性、受光面サイズなどの異なるものが多品種存在する。そこで選定は、 H_{α} 光（656.28 nm）、 D_{α} 光（656.1 nm）の波長域に十分感度があること、ある程度的高速応答（立ち上がり時間が約 5 μ sec 以下）が期待できるように、接合容量が小さいこと、多チャンネルアレイ化するために小サイズでコストのかからないもの、ばらつきの小さいもの、という基準で行い、浜松ホトニクス社製シリコンフォトダイオード S1226-5BQ を使用した。表1にそのカタログ特性 [浜松ホトニクス株式会社 Cat. No SC10-3より] 図1に外形寸法を示す。

2.2 OPアンプによるプリアンプ

フォトダイオードにより、照射光量に対する直線的関係の出力を得るためには、その負荷が小さい必要がある。図2に示すようにOPアンプを用いて電流電圧変換回路を構成すると、OPアンプの入力インピーダンスは、フィードバックの抵抗値 (R_f) をオープンループゲインで割った値になるため、 R_f に高抵抗を使用しても、フォトダイオードの負荷としては小さくすることができる。短絡電流 (I_{sh}) を簡単に、 $-(I_{sh} \times R_f)$ の電圧に変換することができる。

実際に製作した回路図を図3 (スロータイプ) に示す。使用したOPアンプは、漏れ電流の小さいFET入力で、補償回路を付けずにオフセット電圧が2 mV以下 (10 V, 12 ビットのトランジェントレコダの1 ビット以下)、かつ特性のそろっているナショナルセミコンダクター社製 LF356 AHである。ファーストタイプとしてはフィードバック抵抗を、200 k Ω とした。この抵抗値は、各チャンネルの電流電圧の変換系数を決定するので、1%許容差の抵抗器を用いた。7 pFのフィードバックコンデンサは、ゲインのピーキングをおさえるためのもので、発光ダイオードによるパルス光を照射し、出力のリングングをおさえ、立ち上がりが最も速くなるように、定数を決定した。これらの構成により回路部品を最少にし、性能をOPアンプ、抵抗器で確保し、多チャンネルアレイ化した。図4は、5チャンネルで1ボードを構成するプリントパターンである。

スロータイプは、上記ファーストタイプと同様な回路構成でフィードバック抵抗を50 M Ω (日本ファインケミカル社製 RH1/4 VCタイプの1%許容差、温度特性 50 ppm/ $^{\circ}$ Cのもの)、フィードバックコンデンサを3 pFとした。抵抗値が大きいため、抵抗器の回りの汚れには注意した。

2.3 光学測定系

図5に JFT-2M真空容器断面と大半径、 $R=1.31$ m, 小半径、 $a_p=0.35$ mの円形プラズマ、測定装置断面及び各チャンネルの測定コードを示す。スロータイプのチャンネル番号を図のようにRの大きいほうから、CH.1~CH.36とすると、CH.6~CH.36は、 $a_p=0.35$ mの円形プラズマのポロイダル分布測定用であり、CH.1~CH.5は、ダイバータ放電時にセパトリックス近くにおける発光を測定すためのチャンネルである。ファーストタイプの8チャンネル (Rの大きいほうからCH.37~CH.44) は、ペレットの蒸発量をモニタするためのものである。H α 用干渉フィルター (W型干渉フィルター、中心波長 658 nm、透過率 43%、半値幅 11.5 nm) は、スリット上部に、プラズマ中心測定コードに対して垂直に置かれている。

図6は、プラズマ中心測定コードにおけるポロイダル方向の分解能を示す。トーラス赤道面の位置において約 12 mmである。図7は、同じくプラズマ中心測定コードにおけるトロイダル方向の分解能を示す。トーラス赤道面において約 121 mmである。このようにトロイダル方向の対称性の仮定できる (ただしリミタ、ガス導入部からは、中性粒子の平均自由行程以上離れている所) 視野を広げることにより、フォトダイオードへの照射強度を強め、ポロイダル分布を測定する構造になっている。(ファーストタイプに関しては、強度をかせぐというよりペレットの飛行のばらつきを、カバーできるように広い視野としている。)

表2は、CH.1~CH.44までの、 $R=1.31$ m, $a_p=0.35$ mの円形プラズマに対する測定位

置関係を示す。ここで、 r 、 θ 、 x は、図5における記号に対応させた。以下にその意味を示す。

- (1) r : $R = 1.31\text{m}$ をプラズマ中心としたときの、プラズマ中心から測定コードまでの距離。
- (2) θ : 干渉フィルターと測定コードとの成す角度。
- (3) x : トーラス赤道面における $R = 1.31\text{m}$ から測定コードまでの距離 (R の増加する方向を正とした)。

3. 較 正 実 験

3.1 発光ダイオードによるステップ応答特性と各チャンネル間の相対感度測定

フォトダイオード、プリアンプ総合のステップ応答特性を、ファースト、スロータイプの各チャンネルについて行った。ステップ入力としては、発光ダイオードをパルス発生器で点滅することにより入力した。また発光ダイオードは、なるべく H_{α} 光に近い波長域の光を出す、東芝製 TLR102 (ピーク発光波長 700 nm) を用いた。図8に測定回路図を示す。パルス発生器からの入力は、5 Vの方形波 (スロータイプは、250 Hz、ファーストタイプには、2.5 kHz) とした。図9(a), (b), (c)にファーストタイプの代表例、図10(a), (b), (c)にスロータイプの代表例を示す。ファーストタイプでは、立ち上がり時間 (τ_r : 10%から90%まで立ち上がる時間)、立ち下がり時間 (τ_d : 90%から10%まで立ち下がる時間)とも約 $2.8 \mu\text{sec}$ であり、視野を 1 km/sec で通過する (約 $20 \mu\text{sec}$ で通過) ペレットを測定することができる。スロータイプでは τ_r 、 τ_d とも約 $350 \mu\text{sec}$ であり、 $500 \mu\text{sec}$ 以上の時間で立ち上がる、あるいは立ち下がるプラズマの内部ディスラプション現象には、十分追従できることがわかる。

ファーストタイプの各チャンネル間の、相対感度測定をHe-Neレーザーを用いて行った (ビームがすべてフォトダイオードの有効感度エリアに入っていることの確認は、3.2に述べる)。スロータイプにおいては、スリット中心に発光ダイオードを点滅させ、立体角が一定になるようにフォトダイオードを移動することにより行った。表3、4にそれぞれファースト、スロータイプ各チャンネルの τ_r 、 τ_d 、相対感度を示す。

次に、スリット部にトロイダル方向 12mm間隔に、3個の発光ダイオードを置いて点滅させ、各チャンネルを最終状態にセットして出力を測定し、測定器内での光学系のチェックを行った。スリットから各フォトダイオードまでの距離が一定でなく、受光面は、全チャンネル同一平面上にあるので、図11に示すように、発光ダイオードと受光面の成す角度、距離をそれぞれ θ_{ij} 、 r_{ij} とすると、フォトダイオードへの照射パワー P_{ij} は次式で予想される。

$$P_{ij} = p_i \times dS_j / (4 \pi r_{ij}^2) \times \text{COS}(\theta_{ij}) \quad (1)$$

ただし、ここで p_i は、発光ダイオードの発光パワー、 dS_j は、受光面積、 i 、 j はそれぞれ発光ダイオード、チャンネルの番号である。図12に各チャンネルの出力 (●) と、(1)式から予想されるパワー (実線) の比較を示す。ただしこの図においては、CH.21で規格化している。両者は

置関係を示す。ここで、 r 、 θ 、 x は、図5における記号に対応させた。以下にその意味を示す。

- (1) r : $R = 1.31\text{m}$ をプラズマ中心としたときの、プラズマ中心から測定コードまでの距離。
- (2) θ : 干渉フィルターと測定コードとの成す角度。
- (3) x : トーラス赤道面における $R = 1.31\text{m}$ から測定コードまでの距離 (R の増加する方向を正とした)。

3. 較 正 実 験

3.1 発光ダイオードによるステップ応答特性と各チャンネル間の相対感度測定

フォトダイオード、プリアンプ総合のステップ応答特性を、ファースト、スロータイプの各チャンネルについて行った。ステップ入力としては、発光ダイオードをパルス発生器で点滅することにより入力した。また発光ダイオードは、なるべく H_{α} 光に近い波長域の光を出す、東芝製 TLR102 (ピーク発光波長 700 nm) を用いた。図8に測定回路図を示す。パルス発生器からの入力は、5 Vの方形波 (スロータイプは、250 Hz、ファーストタイプには、2.5 kHz) とした。図9(a), (b), (c)にファーストタイプの代表例、図10(a), (b), (c)にスロータイプの代表例を示す。ファーストタイプでは、立ち上がり時間 (τ_r : 10%から90%まで立ち上がる時間)、立ち下がり時間 (τ_d : 90%から10%まで立ち下がる時間)とも約 $2.8 \mu\text{sec}$ であり、視野を 1 km/sec で通過する (約 $20 \mu\text{sec}$ で通過) ペレットを測定することができる。スロータイプでは τ_r 、 τ_d とも約 $350 \mu\text{sec}$ であり、 $500 \mu\text{sec}$ 以上の時間で立ち上がる、あるいは立ち下がるプラズマの内部ディスラプション現象には、十分追従できることがわかる。

ファーストタイプの各チャンネル間の、相対感度測定をHe-Neレーザーを用いて行った (ビームがすべてフォトダイオードの有効感度エリアに入っていることの確認は、3.2に述べる)。スロータイプにおいては、スリット中心に発光ダイオードを点滅させ、立体角が一定になるようにフォトダイオードを移動することにより行った。表3、4にそれぞれファースト、スロータイプ各チャンネルの τ_r 、 τ_d 、相対感度を示す。

次に、スリット部にトロイダル方向 12mm間隔に、3個の発光ダイオードを置いて点滅させ、各チャンネルを最終状態にセットして出力を測定し、測定器内での光学系のチェックを行った。スリットから各フォトダイオードまでの距離が一定でなく、受光面は、全チャンネル同一平面上にあるので、図11に示すように、発光ダイオードと受光面の成す角度、距離をそれぞれ θ_{ij} 、 r_{ij} とすると、フォトダイオードへの照射パワー P_{ij} は次式で予想される。

$$P_{ij} = p_i \times dS_j / (4 \pi r_{ij}^2) \times \text{COS}(\theta_{ij}) \quad (1)$$

ただし、ここで p_i は、発光ダイオードの発光パワー、 dS_j は、受光面積、 i 、 j はそれぞれ発光ダイオード、チャンネルの番号である。図12に各チャンネルの出力 (●) と、(1)式から予想されるパワー (実線) の比較を示す。ただしこの図においては、CH.21で規格化している。両者は

一致しており、光学系の大きなずれ、あるいは、フォトダイオード取り付け部が、視野をけずっているようなことがないことを示す。

3.2 He-Ne レーザーによる絶対放射感度測定

フォトダイオード、プリアンプ総合の絶対放射感度測定は、He-Ne レーザー（波長 633 nm）を用いて行った。測定方法は、絶対較正されているパイロ検出器を用いて He-Ne レーザーのパワーとビーム径を測定し、そのレーザー光をフォトダイオードに照射することにより行った。パイロ検出器は、Molecron 社製 P 4-32 であり、感度 58.2 V/W、有効径 2 mm のものである。図 13 に測定系を示す。パイロ検出器が、AC 動作であるので、ビーム径を精度良く測定するために、チョップとロックインアンプを使用した。また測定を開始する前に、パイロ検出器により He-Ne レーザーの安定度を調べた。結果は、スイッチオン後約 5 時間して、2.5% 以下の変動（約 10 分周期）であり、測定上問題とならないことを確認してから始めた。

図 14, 15 にパイロ検出器をそれぞれ x 方向、z 方向にスキャンしビーム径を測定した結果を示す。x 方向、z 方向とも、ほとんど一致したガウス分布である。この結果より、ビーム強度のピークから ± 0.5 mm のところでの値は、ピークに対し約 90% であることと、パイロ検出器の有効径が 2 mm であることから、使用した He-Ne レーザーのビーム径 (d_b) は、 $1 \text{ mm} < d_b < 2 \text{ mm}$ であることがわかる。このことからピークでは、パイロ検出器は、レーザーパワーの全パワーを測定しており、またフォトダイオードの有効径は、 $2.5 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$ であるから、ビームをすべて有効径に入れることができるので、プリアンプ出力と入力パワーの関係が簡単に較正できることがわかる。

図 16 (a) に、チョッパーを通した He-Ne レーザー光に対するパイロ検出器の出力、(b) に He-Ne レーザー光を 1%, 5%, 10% の 3 枚のニュートラルデンシティーフィルター (ND フィルター) を通して、CH. 20 のフォトダイオードに照射したときの出力を示す。(a) より出力が 53 mV であるから、パイロ検出器の感度より、He-Ne レーザー光のパワーは、0.91 mW であることがわかる。この値を用いて (b) よりフォトダイオード、プリアンプ総合の感度は、 $18.2 \text{ V}/\mu\text{W}$ である。プリアンプのフィードバック抵抗が 50 M Ω であることを考えると、フォトダイオードの放射感度は、0.36 A/W である。ファーストタイプは、ND フィルターを取り同様におこない、72.7 V/mW という結果を得た。

上記の結果と、照射パワーゼロでノイズ電圧が約 ± 2 mV 以下であること、プリアンプのフルスイングが約 ± 10 V であることより、測定可能な照射パワーは、スロータイプで、約 6×10^{-11} W から 6×10^{-7} W である。この 4 オーダーのダイナミックレンジの出力の直線性を、1%, 5%, 10%, 50% の ND フィルターと He-Ne レーザーにより測定した。結果を図 17 に示す。S/N が約 2 である 4 mV から、10 V まで照射パワーに対する良い直線性が得られた。

3.3 クロストーク

多チャンネルアレイ化するために小型化しており、電子回路部品もチャンネル間での間隔が狭

くなっているため、クロストークが大きい場合は問題となるので測定した。隣り合うチャンネル間のクロストークを、一方に出力が約 10 V になるような 250 Hz の方形波パルス光を照射し、もう片方は遮光することにより測定した。結果は、OP アンプのフィードバック抵抗、コンデンサの間隔が、最も近いチャンネル間でのクロストークが最も大きく、約 -58 dB であった。しかし、測定上での AD 変換時の 1 ビット以下になると考えられるので、問題にならないことが確認できた。

3.4 オフセットドリフト

プリアンプ全チャンネル ± 12 V で同時に使用した場合、± 0.2 A の電流を必要とする。全体で約 5 W の電力を消費しており、2 重にシールドされているので、周囲温度が定常になるまでの間の、オフセットドリフトを測定しておく必要がある。放射感度測定時に最大オフセット電圧を示していた CH. 7 と、スタンダードな CH. 21 について遮光し、電源投入からドリフトを約 8 時間測定した。結果を、図 18 に示す。CH. 7 は、電源投入時にすでにオフセット 1.5 mV を示しているが、ドリフトはスタンダードな CH. 21 と同じで、約 0.5 mV であった。両者とも定常時に、目標とする AD 変換時の 1 ビット以下である。

4. まとめと問題点

市販されているフォトダイオードと OP アンプを用いたプリアンプにより、JFT-2 M ($a_p = 0.35$ m) から放射される H_α 光のポロイダル分布測定用スロータイプを空間 36 点、ペレット入射時の蒸発量モニタ用ファーストタイプを空間 8 点として構成することができた。以下にその性能をまとめる。

- (1) ファーストタイプの τ_r , τ_d は、ともに約 2.8 μ sec であった。スロータイプの τ_r , τ_d は、ともに約 350 μ sec であった。
- (2) フォトダイオード、プリアンプ総合の絶対放射感度は、ファーストタイプ、スロータイプでそれぞれ、72.7 V/mW, 18.2 V/ μ W (照射波長 633 nm) であった。
- (3) 各チャンネルのバラツキは、10 % 以下であった。
- (4) クロストーク、オフセットドリフトは、目標とする AD 変換時の 1 ビット以下であり、問題にならないことが確認できた。

現在測定装置は JFT-2 M に取り付けられ、測定を開始しているが、真空容器がステンレス製の鏡面仕上げであるため、その反射光が測定上問題となっている。真空容器内には一部にカーボン材のダイバータープレートが取り付けられており、視野がそこを見込むチャンネルは反射が問題にならないので、現在真空容器内の視野部分全体にカーボン材を取り付けることを検討している。

くなっているため、クロストークが大きい場合は問題となるので測定した。隣り合うチャンネル間のクロストークを、一方に出力が約 10 V になるような 250 Hz の方形波パルス光を照射し、もう片方は遮光することにより測定した。結果は、OP アンプのフィードバック抵抗、コンデンサの間隔が、最も近いチャンネル間でのクロストークが最も大きく、約 -58 dB であった。しかし、測定上での AD 変換時の 1 ビット以下になると考えられるので、問題にならないことが確認できた。

3.4 オフセットドリフト

プリアンプ全チャンネル ± 12 V で同時に使用した場合、± 0.2 A の電流を必要とする。全体で約 5 W の電力を消費しており、2 重にシールドされているので、周囲温度が定常になるまでの間の、オフセットドリフトを測定しておく必要がある。放射感度測定時に最大オフセット電圧を示していた CH. 7 と、スタンダードな CH. 21 について遮光し、電源投入からドリフトを約 8 時間測定した。結果を、図 18 に示す。CH. 7 は、電源投入時にすでにオフセット 1.5 mV を示しているが、ドリフトはスタンダードな CH. 21 と同じで、約 0.5 mV であった。両者とも定常時に、目標とする AD 変換時の 1 ビット以下である。

4. まとめと問題点

市販されているフォトダイオードと OP アンプを用いたプリアンプにより、JFT-2 M ($a_p = 0.35$ m) から放射される H_α 光のポロイダル分布測定用スロータイプを空間 36 点、ペレット入射時の蒸発量モニタ用ファーストタイプを空間 8 点として構成することができた。以下にその性能をまとめる。

- (1) ファーストタイプの τ_r , τ_d は、ともに約 2.8 μ sec であった。スロータイプの τ_r , τ_d は、ともに約 350 μ sec であった。
- (2) フォトダイオード、プリアンプ総合の絶対放射感度は、ファーストタイプ、スロータイプでそれぞれ、72.7 V/mW, 18.2 V/ μ W (照射波長 633 nm) であった。
- (3) 各チャンネルのバラツキは、10 % 以下であった。
- (4) クロストーク、オフセットドリフトは、目標とする AD 変換時の 1 ビット以下であり、問題にならないことが確認できた。

現在測定装置は JFT-2 M に取り付けられ、測定を開始しているが、真空容器がステンレス製の鏡面仕上げであるため、その反射光が測定上問題となっている。真空容器内には一部にカーボン材のダイバータープレートが取り付けられており、視野がそこを見込むチャンネルは反射が問題にならないので、現在真空容器内の視野部分全体にカーボン材を取り付けることを検討している。

謝 辞

本研究に対し、つねに暖かい支援をしていただいた核融合研究部小幡行雄部長(現在技術情報部部長)、同田中正俊部長、同プラズマ実験研究室田中裕二室長(現在核融合計画室室長)、同プラズマ実験研究室船橋昭昌室長、同装置技術管理室鈴木喜八郎室長の各氏に心から深謝いたします。また、技術開発面に関し多くの助言をいただいた装置技術管理室松崎誼係長、同谷孝志係長の各氏はじめ装置技術管理室の人達に感謝いたします。パイロ検出器による絶対放射感度測定等に関して、多くの助言と協力をしていただいた、上杉喜彦研究員はじめプラズマ実験研究室の人達に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] MILORA S.L., FOSTER C.A., THOMAS C.E., BUSH C.E., WILGEN J.B. and et al. : Nucl. Fusion **20** (1980) 1491.
- [2] GREENWALD M., GWINN D., MILORA S.L., PARKER J., PARKER R. and et al. : in Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Res. (Proc. 10th Int. Conf., London, 1984) IAEA, Vienna, IAEA-CN-44/A-I-3.
- [3] SENGOKU S., ABE M., HOSHINO K., ITOH K., KAMEARI A. and et al. : in Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Res. (Proc. 10th Int. Conf., London, 1984) Vol.1, IAEA, Vienna, (1985) 405.
- [4] CHANG C.T. and THOMSEN K. : Nucl. Fusion **24** (1984) 697.
- [5] WAGNER F., BECKER G., BEHRINGER K., CHMPBELL D., EBERHAGEN A. and et al. : Phys. Rev. Lett. **49** (1982) 1408.
- [6] NAGAMI M., KASAI M., KITSUNEZAKI A., KOBAYASHI T., KONOSHIMA S. and et al. : Nucl. Fusion **24** (1984) 415.

表1 フォトダイオード (S1226-5BQ) の、カタログ特性 (浜松トニクス株式会社カタログ Cat. No. SC10-3 より)。

S1226・5BQ カタログ特性

S1226, S1227 シリーズ (紫外～近赤外用)

④ 型名	外形寸法図	発光面		特性 (25°C)		特性 (25°C)				特性 (25°C)			最大定格		⑤ 型名				
		サイズ	有効面積	発光波長範囲	ピーク波長	Hg 輝線	He-Ne レーザ	LED	NEP	D*	③ 暗電流 (Ish)	Id	暗電流温度係数	① 出力抵抗 (Rsh)		② 電流立ち上がり時間	最大逆電圧	保証温度範囲	動作保存
(nm)	(mm ²)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)	(W/Hz ^{1/2})	(μA)	(μA)	(pA)	(%/°C)	(GΩ)	(μs)	(V)	(°C)	(°C)	(°C)
S1226-5BQ		2.5x2.4	5.6	190~1080	0.1	—	0.4	0.16	3x10 ⁻¹⁵	2.2	2.8	20	1.09	0.5	5	240	0.5	-55~+80	S1226-5BQ
-58K				320~1080	—	—	—	—	6x10 ⁻¹³	—	—	—	—	—	—	—	—	-55~+100	-58K
-88Q		5.9x5.9		190~1080	0.1	0.1	—	0.16	1x10 ⁻¹⁴	12	15	100	—	0.1	1	1300	3	-20~+60	-88Q
-88K				320~1080	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-55~+80	-88K

S1226 シリーズ (メタルケース型)

- ④ B …… 紫外～近赤外用
- K …… 銅鍍銀ガラス窓
- Q …… 石英ガラス窓
- R …… 樹脂コーティング窓

③ NEP = $\frac{10 \text{ (nmV)}}{\sqrt{\text{放射感度 (ピコワット/cm}^2\text{)}}}$

④ D = $\frac{[\text{暗電流 (pA)}]}{[\text{放射感度 (ピコワット/cm}^2\text{)}]^{1/2}}$

⑤ Rsh = $\frac{10 \text{ (mV)}}{\text{暗電流 (I}_D\text{ = 10 mA) (A)}}$

⑥ GaAsP・LED (655 nm) のステップ・ファンクション光による出力が、定常値の10%から90%に達する時間。

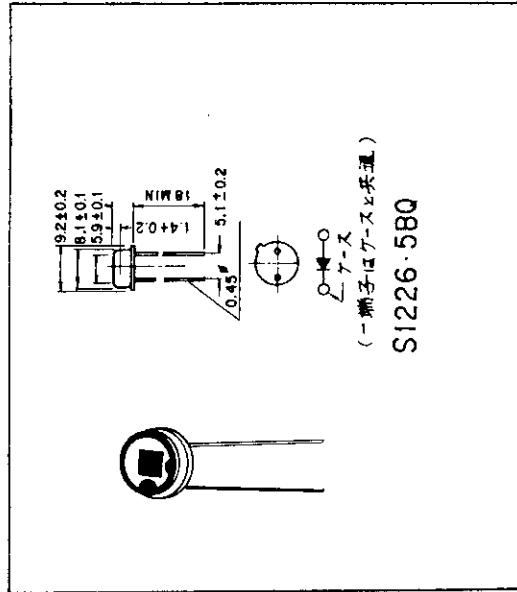


図1 フォトダイオード (S1226-5BQ) の、外形寸法

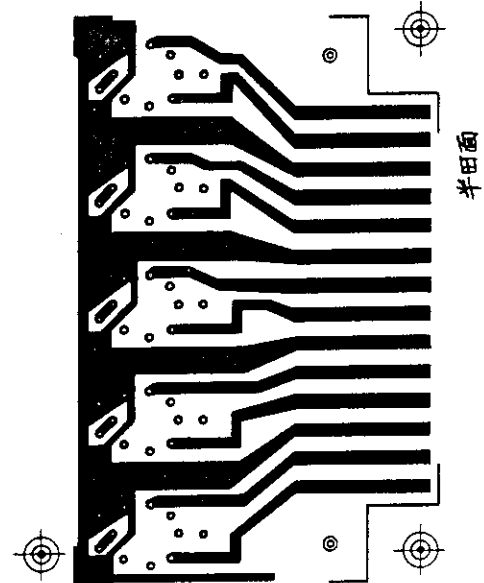
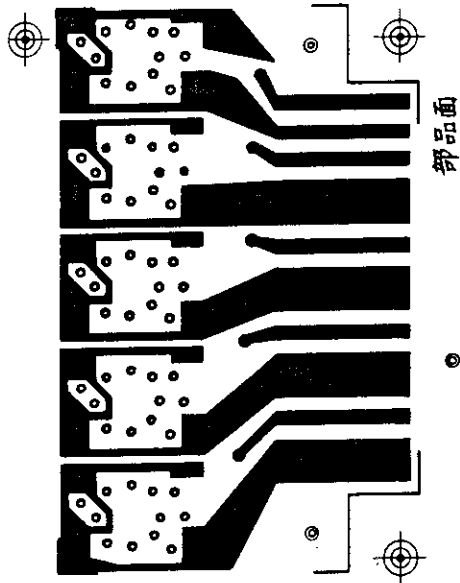


図4 5チャンネルで1ボードを構成する面の
のプリントパターン

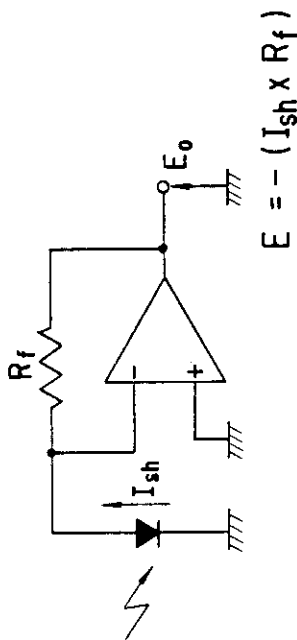


図2 OPアンプによる電流電圧変換回路

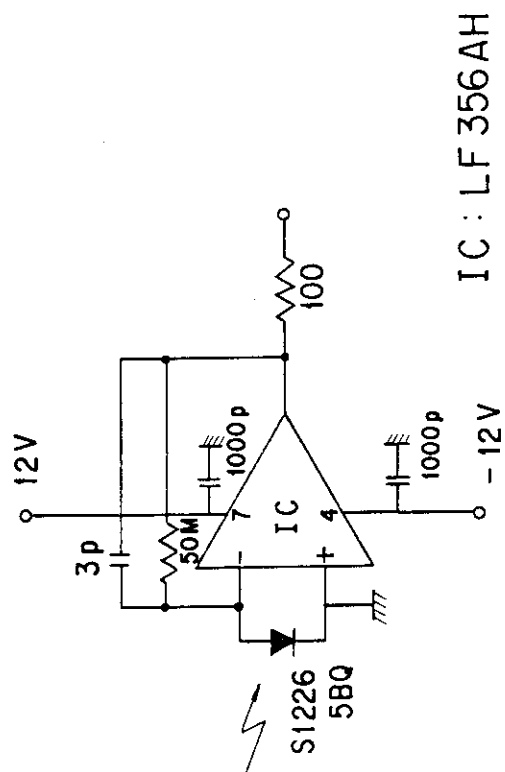


図3 OPアンプLF356AHを用いて製作した
スロータイプの回路図

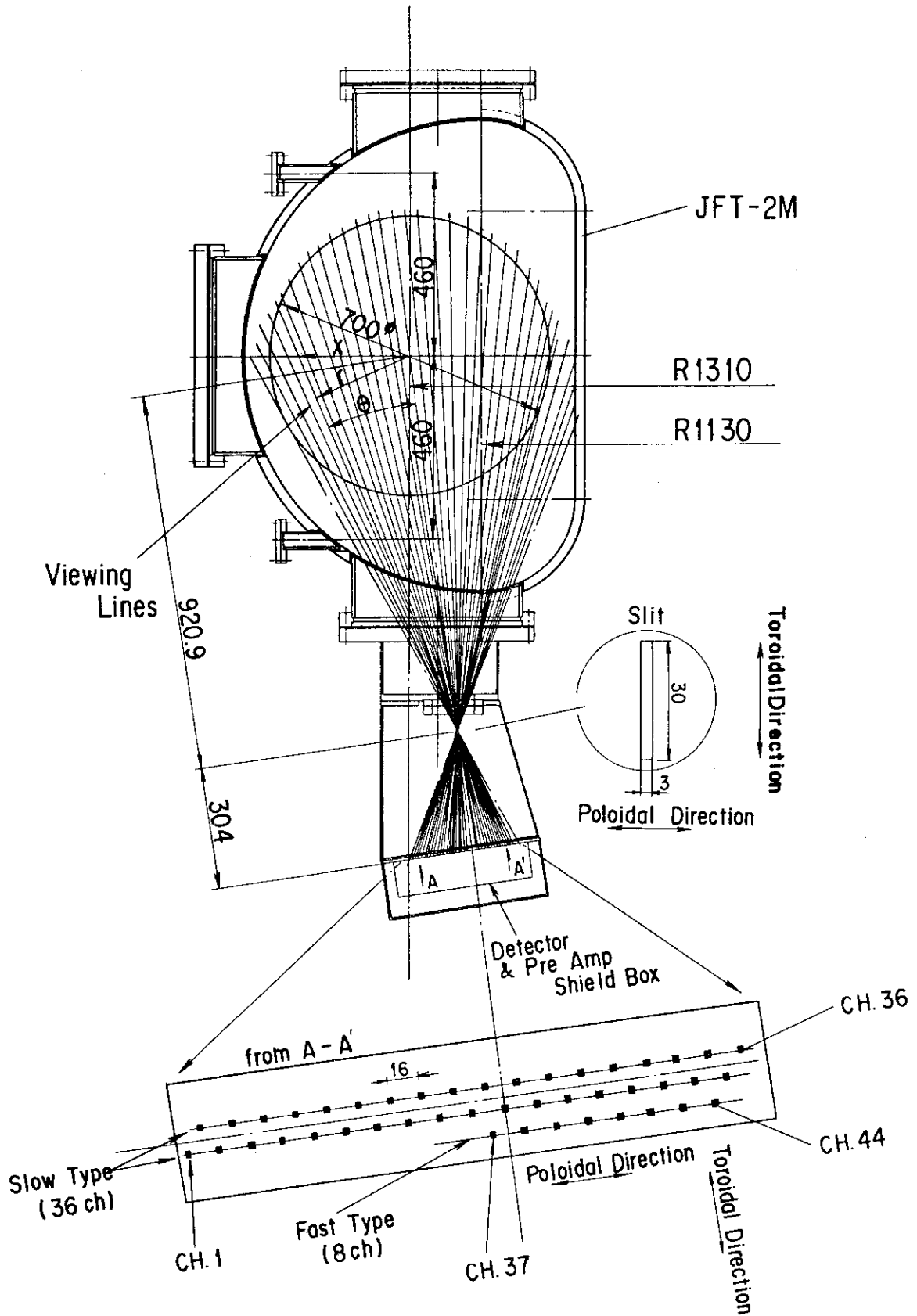


図5 JFT-2Mの真空容器，測定コード，スリットおよび測定チャンネルの位置関係。
CH.1～36はスロータイプであり，CH.37～44はファーストタイプである。

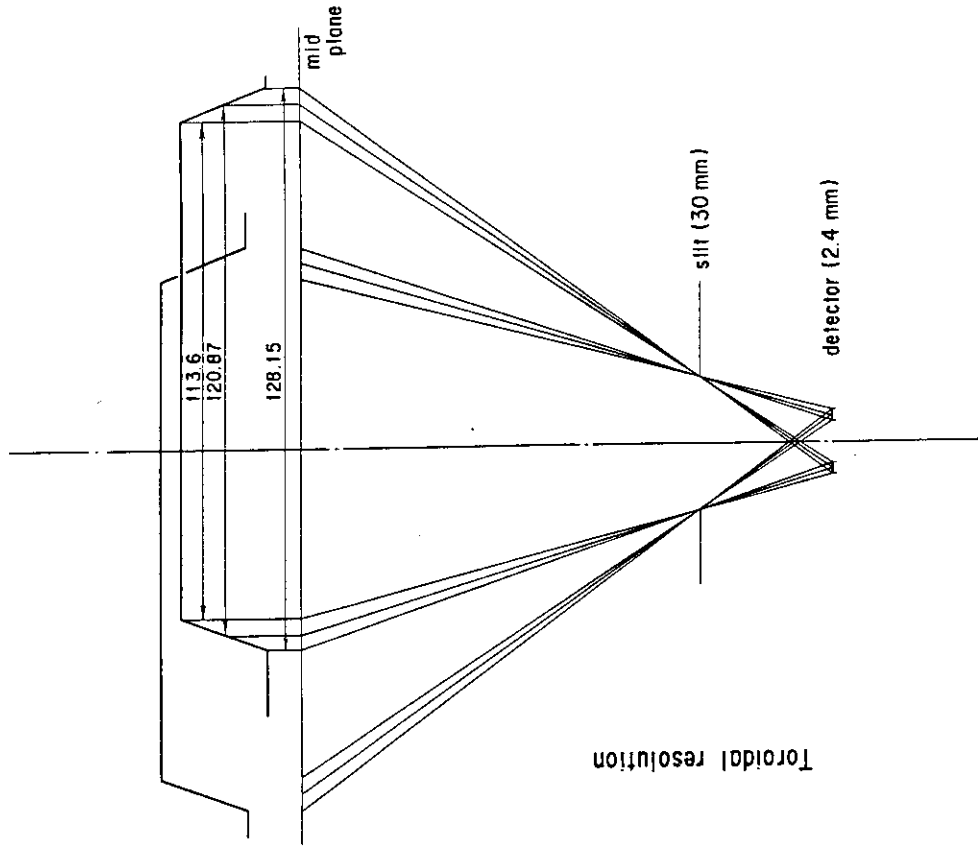


図7 大半径 $R = 1.31\text{m}$ のプラズマ中心を測定コードとする CH.21, 22 の赤道面における、トロイダル方向の視野

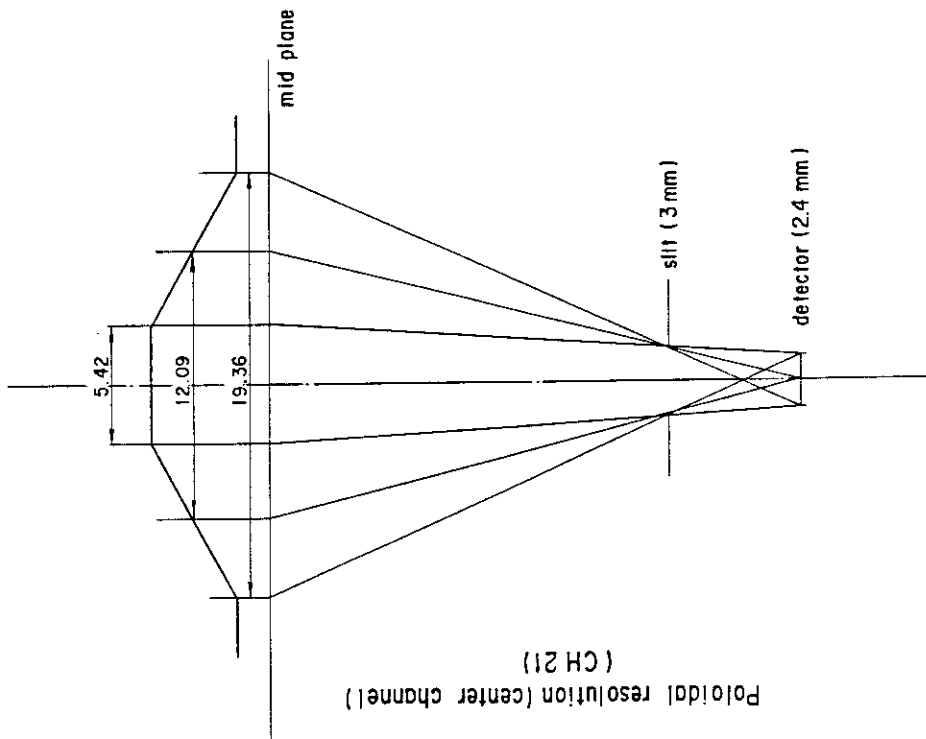


図6 大半径 $R = 1.31\text{m}$ のプラズマ中心を測定コードとする CH.21 の赤道面における、ポロイダル方向の視野。

表2 各チャンネルと、 r , θ , x の関係。 r , θ , x は図5に対応し以下のことを示す。 r : $R = 1.31\text{m}$ をプラズマ中心とした時の、プラズマ中心から測定コードまでの距離。 θ : 干渉フィルタと測定コードとの成す角度。 x : トーラス赤道面における $R = 1.31\text{m}$ から測定コードまでの距離 (R の増加する方向を正とした)。

Channel No.	γ (cm)	θ (deg)	X (cm)	Channel No.	γ (cm)	θ (deg)	X (cm)
1	48.47	27.76	-54.77	19	4.85	3.01	-4.85
2	46.04	26.57	-51.48	20	2.42	1.51	-2.42
3	43.62	25.35	-48.27	21	0	0	0
4	41.20	24.10	-45.13	22	2.42	1.51	2.42
5	38.77	22.83	-42.07	23	4.85	3.01	4.85
6	36.35	21.54	-39.08	24	7.27	4.51	7.29
7	33.93	20.22	-36.16	25	9.69	6.01	9.75
8	31.50	18.89	-33.30	26	12.12	7.50	12.22
9	29.08	17.53	-30.50	27	14.54	8.97	14.72
10	26.67	16.14	-27.75	28	16.96	10.44	17.25
11	24.23	14.74	-25.06	29	19.39	11.89	19.81
12	21.81	13.32	-22.41	30	21.81	13.32	22.41
13	19.39	11.89	-19.81	31	24.23	14.74	25.06
14	16.96	10.44	-17.25	32	26.67	16.14	27.75
15	14.54	8.97	-14.72	33	29.08	17.53	30.50
16	12.12	7.50	-12.22	34	31.50	18.89	33.30
17	9.69	6.01	-9.75	35	33.93	20.22	36.16
18	7.27	4.51	-7.29	36	36.35	21.54	39.08

37	2.42	1.51	-2.42
38	2.42	1.51	2.42
39	7.27	4.51	7.29
40	12.12	7.50	12.22
41	16.96	10.44	17.25
42	21.81	13.32	22.41
43	26.67	16.14	27.75
44	31.50	18.89	33.30

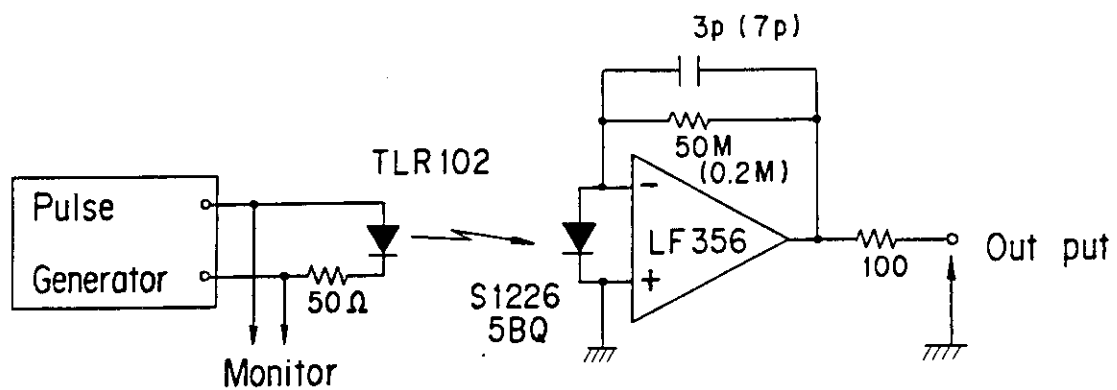
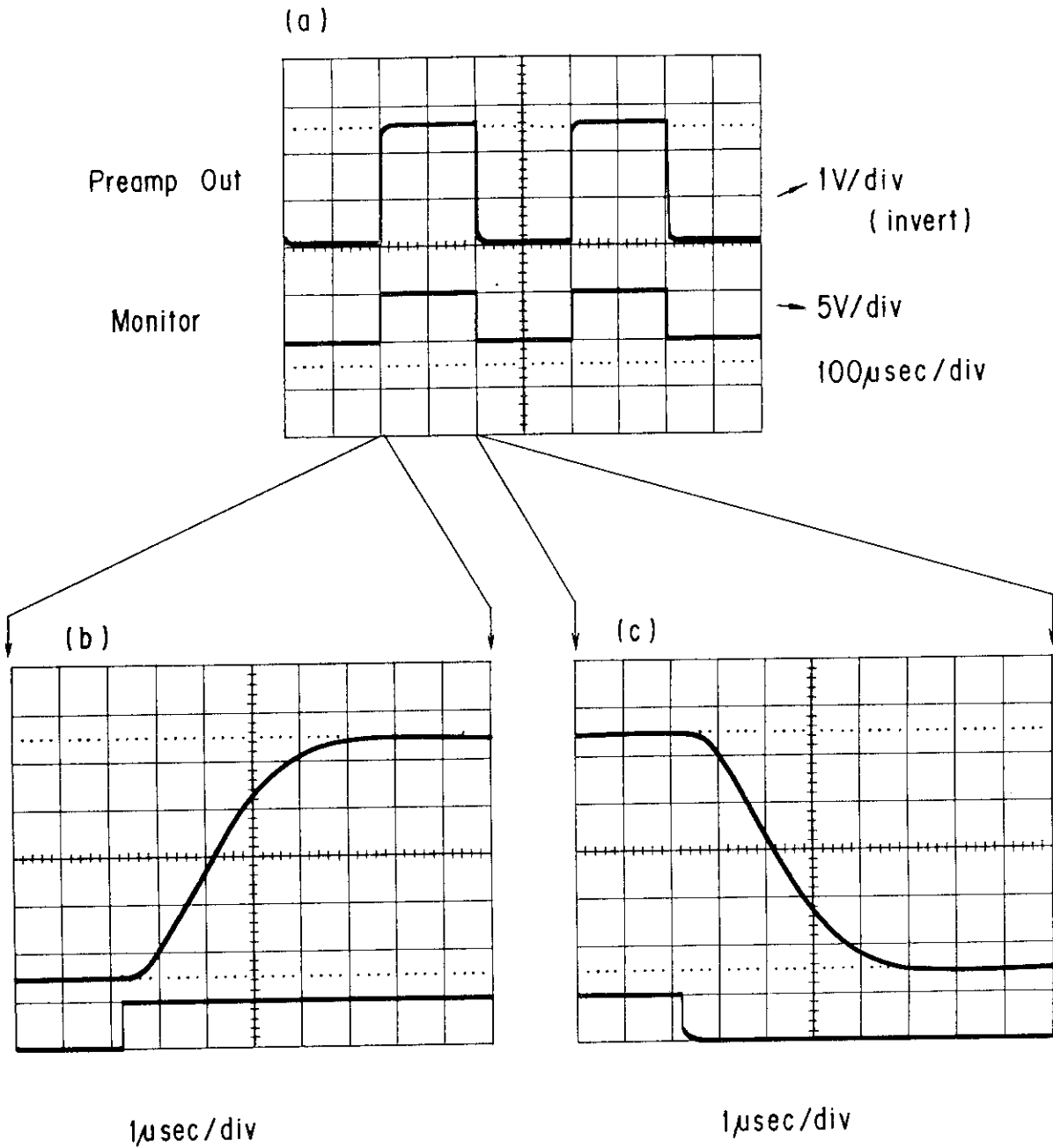


図8 ステップ応答, 相対感度測定のための測定回路図。

FAST TYPE

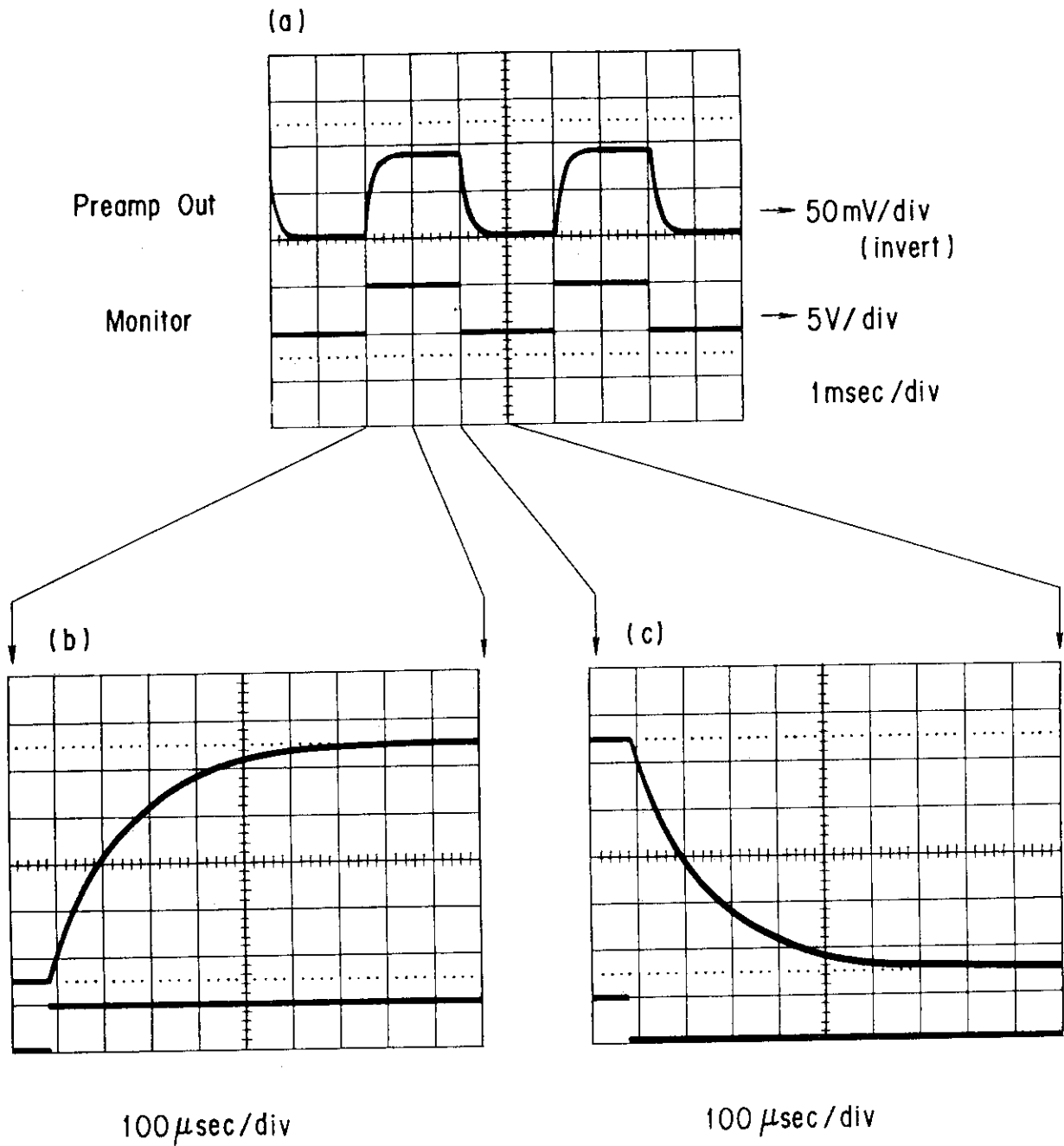


τ_r (rise time) from 10% to 90%

τ_d (decay time) from 90% to 10%

図9 フェーストタイプの立ち上がり時間, 立ち下がり時間の測定結果例。

SLOW TYPE



τ_r (rise time) from 10% to 90%

τ_d (decay time) from 90% to 10%

図10 スロータイプの立ち上がり時間, 立ち下がり時間の測定結果例。

表3 ファーストタイプの各チャンネルに対する立ち上がり時間, 立ち下がり時間および相対感度。相対感度はCH. 37で規格化している。

τ_r, τ_d and Relative Gain of Fast Type

Channel No.	τ_r (μsec)	τ_d (μsec)	Relative Gain **	Channel No.	τ_r (μsec)	τ_d (μsec)	Relative Gain **
37	2.7	2.7	1	41	2.8	2.85	0.957
38	2.75	2.8	0.957	42	2.8	2.75	0.893
39	2.75	2.8	0.979	43	2.7	2.7	0.917
40	2.85	2.85	0.893	44	2.7	2.8	0.957

** normalized by the gain of ch37

表4 スロータイプの各チャンネルに対する立ち上がり時間, 立ち下がり時間および相対感度。相対感度はCH. 21で規格化している。

τ_r, τ_d and Relative Gain of Slow Type

Channel No.	τ_r (μsec)	τ_d (μsec)	Relative Gain *	Channel No.	τ_r (μsec)	τ_d (μsec)	Relative Gain *
1	370	350	0.988	19	350	340	0.993
2	360	340	0.940	20	380	350	0.964
3	360	340	0.988	21	360	360	1
4	360	340	0.964	22	360	350	0.988
5	370	350	0.988	23	360	340	0.988
6	360	360	1	24	370	360	0.964
7	370	350	0.964	25	350	340	0.988
8	380	360	0.988	26	370	360	0.952
9	360	350	0.952	27	360	340	1
10	360	340	0.964	28	360	360	0.959
11	350	340	0.988	29	360	360	1
12	370	350	0.964	30	360	350	0.964
13	360	340	0.988	31	380	350	0.976
14	370	350	0.976	32	380	350	0.986
15	360	330	0.986	33	360	340	0.976
16	340	340	0.940	34	350	330	0.993
17	360	340	0.976	35	380	360	0.988
18	360	340	0.964	36	360	350	0.988

* normalized by the gain of ch21

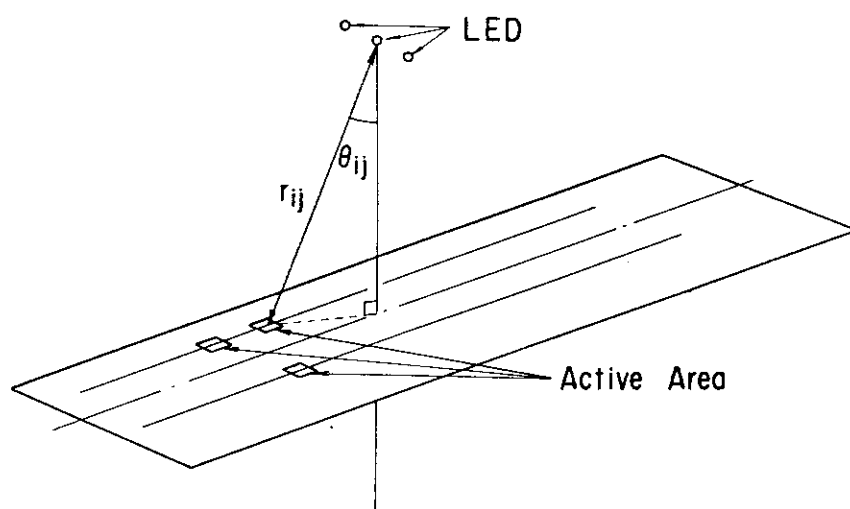


図11 3個の発光ダイオードを用いて行った、装置内での光学系チェックの概念図。

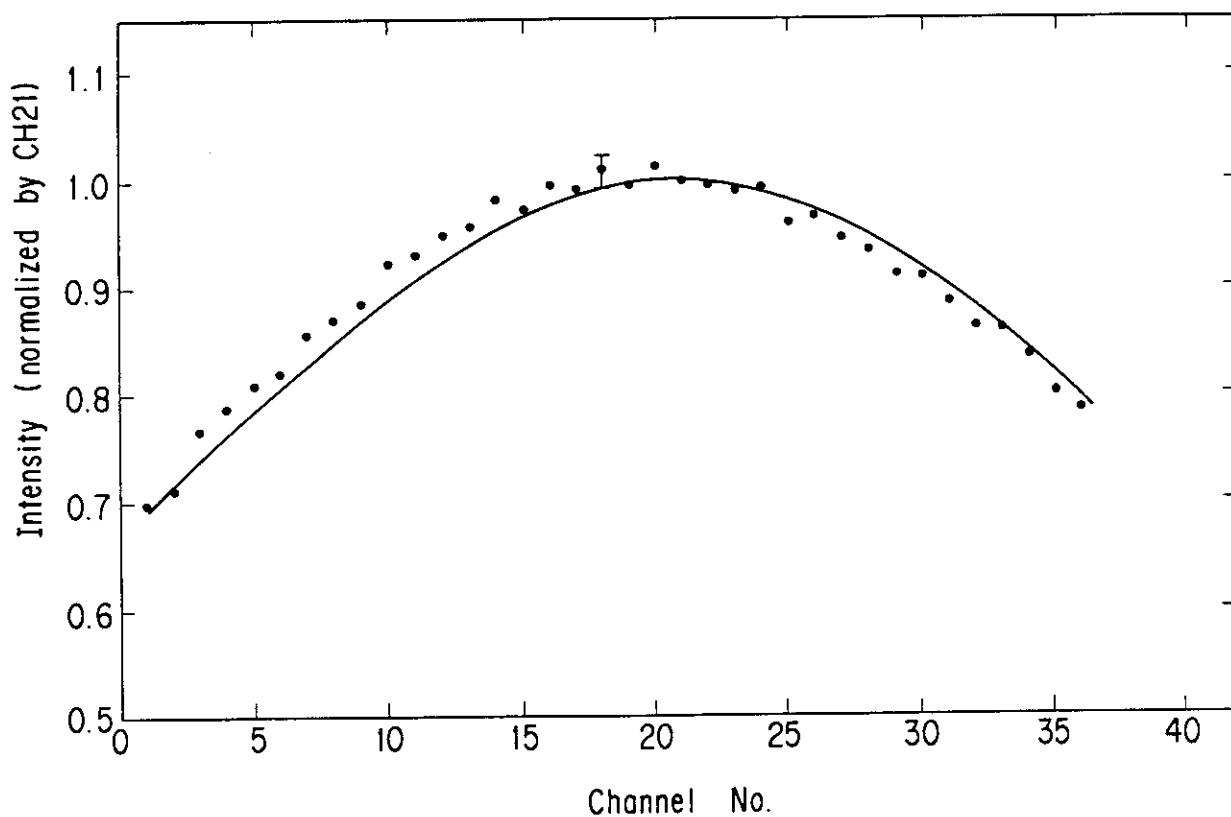


図12 図11の設定における各チャンネルと受光強度の関係。(●)は、各チャンネルの出力を示し、実線は、(1)式から予想される強度を示す。

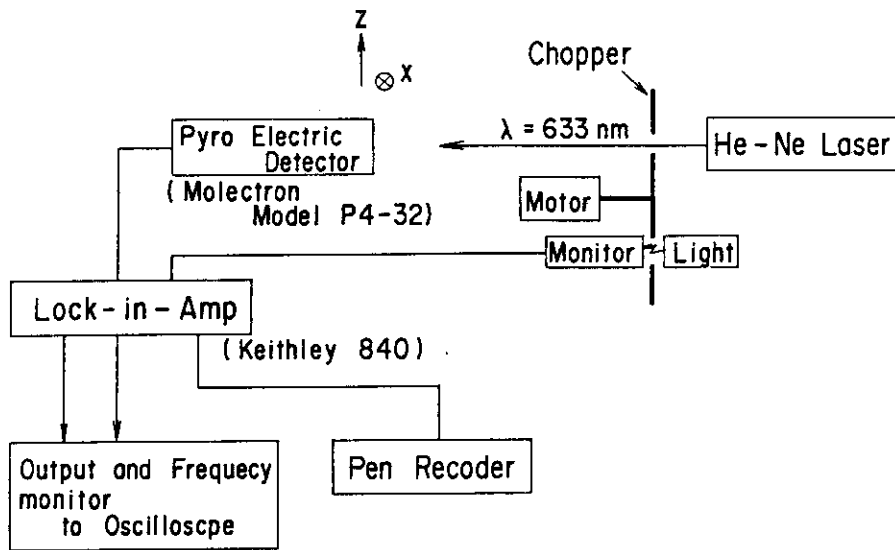


図 13 He-Ne レーザーの放射パワーとそのビームのパワー分布測定のためのブロック図。

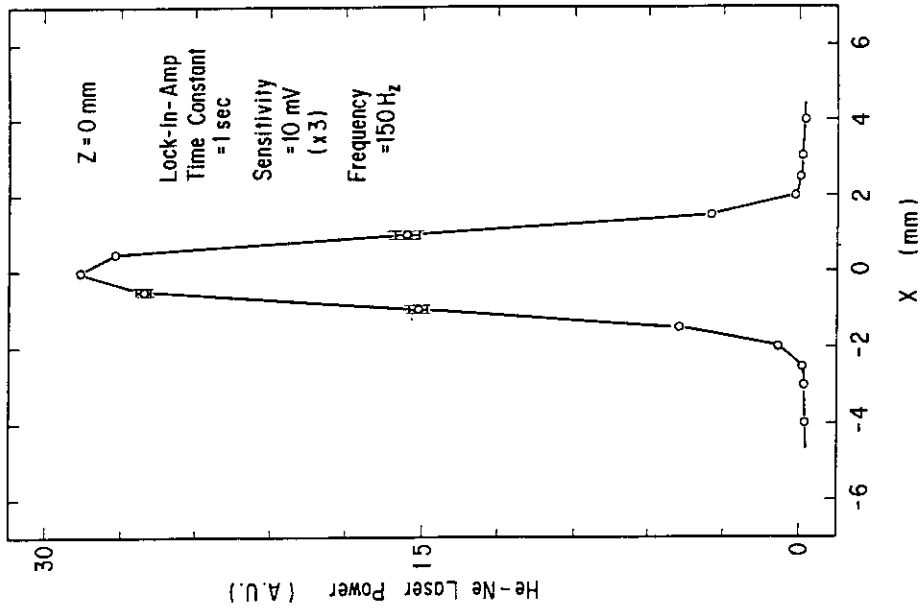


図 15 He-Ne レーザーの z 方向のビームパワー分布。

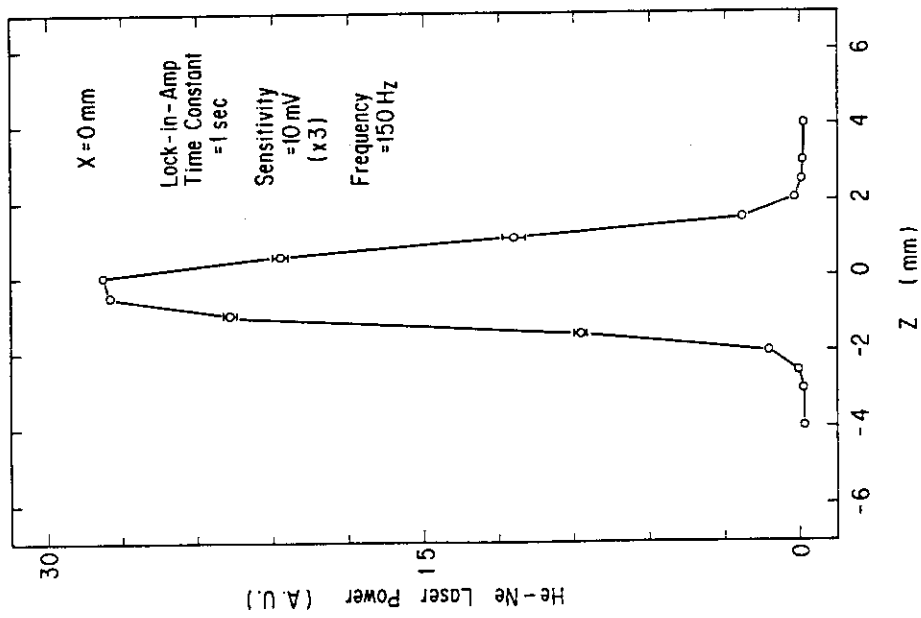


図 14 He-Ne レーザーの x 方向のビームパワー分布。

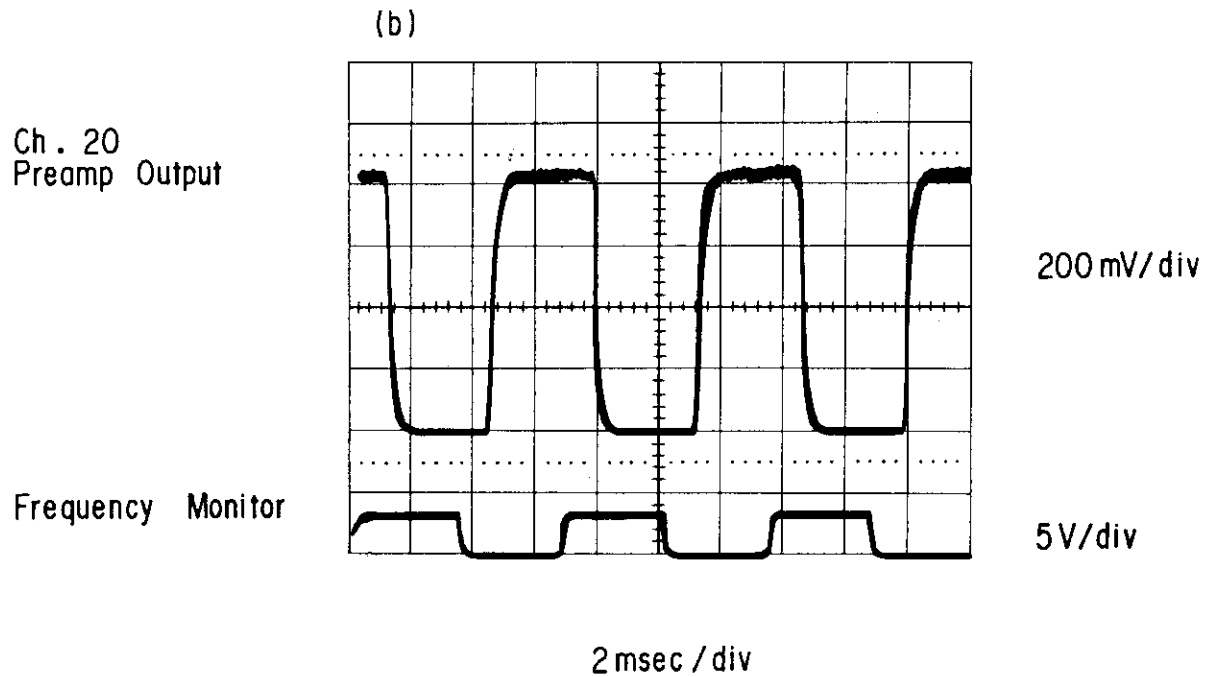
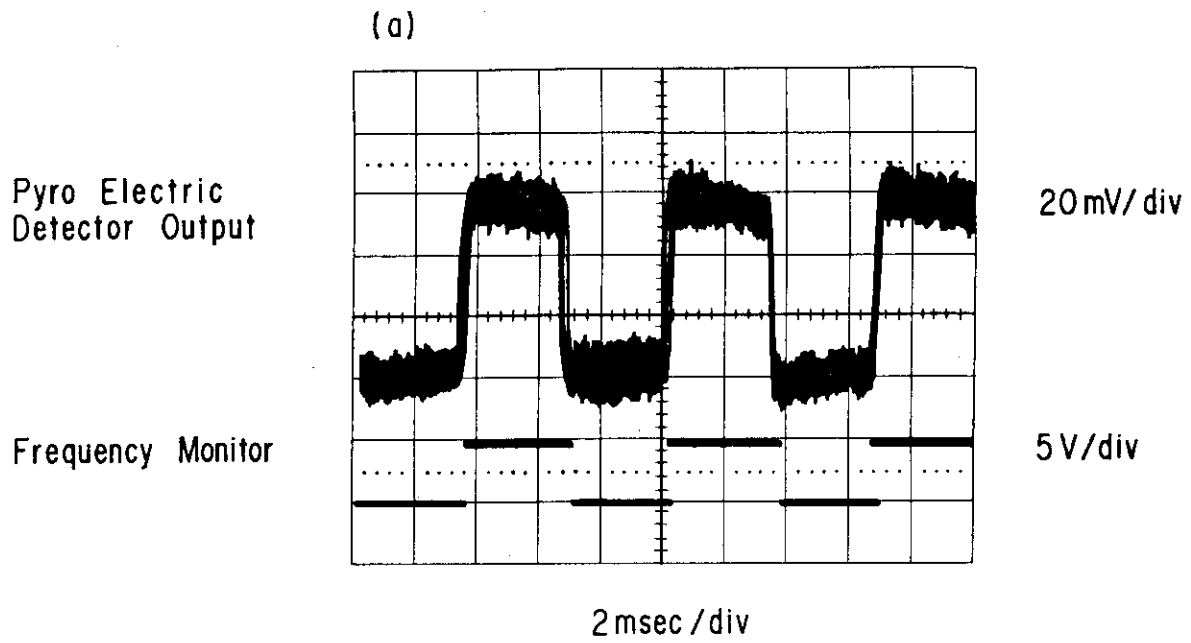


図 16 (a)He - Ne レーザー光をパイロ検出器に照射したときの出力。
 (b)CH.20 に He - Ne レーザー光を 1%, 5%, 10% の 3 枚の
 ニュートラルデンシティフィルターを通して、照射したとき
 の出力。

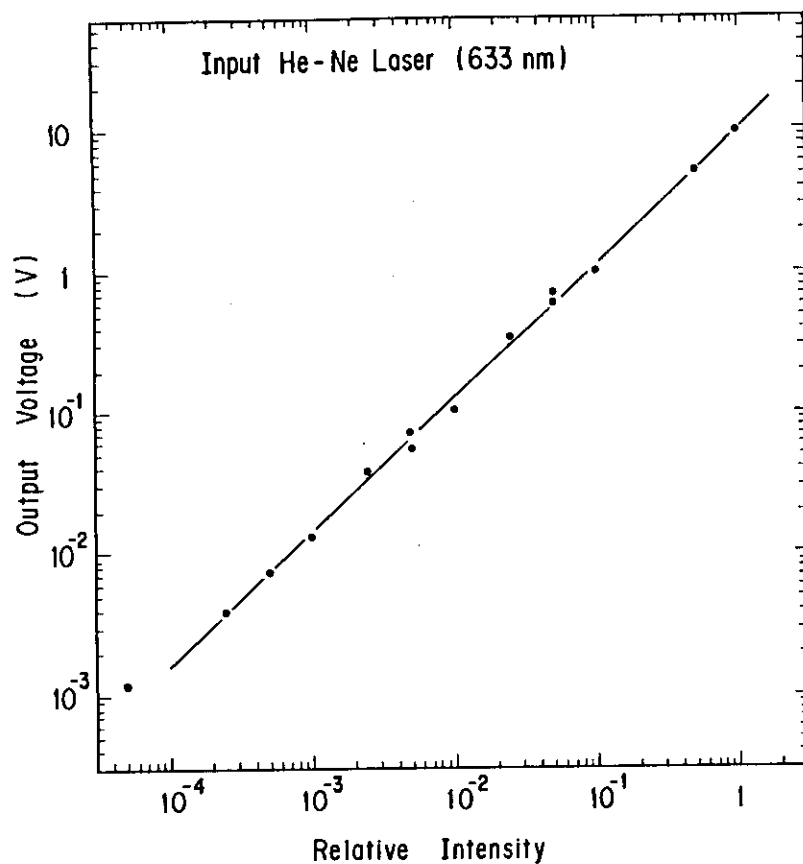


図17 スロータイプにおける，照射強度と出力の関係。

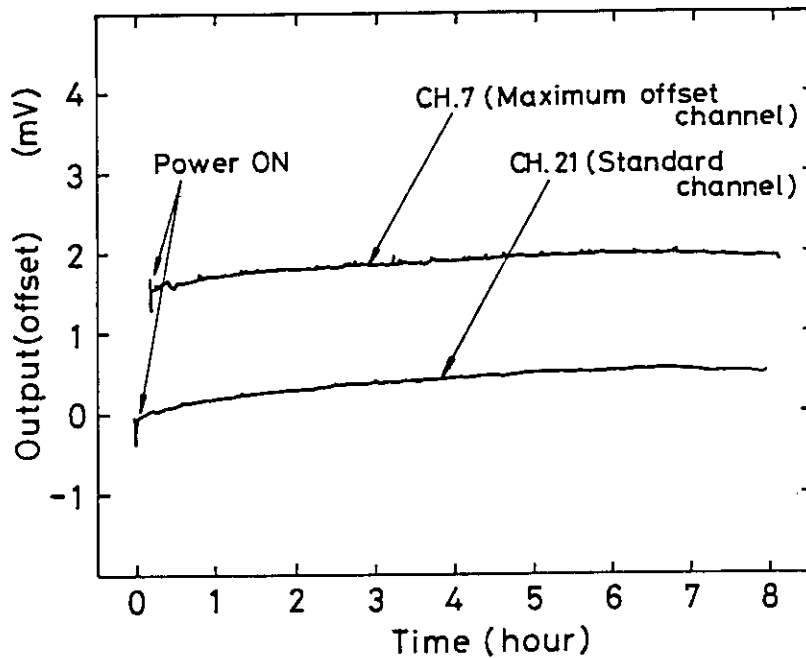


図18 最大オフセット電圧を示していたCH.7と，スタンダードなCH.21のオフセットドリフト。