



Title	Photomixingと光電子ビーム復調器
Author(s)	桜庭, 一郎; Sakuraba, Ichiro
Citation	北海道大學工學部研究報告, 41, 95-120
Issue Date	1966-08-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40808
Type	departmental bulletin paper
File Information	41_95-120.pdf



Photomixing と光電子ビーム復調器

桜庭 一郎*

(昭和41年4月30日受理)

Photomixing and Photoelectron-Beam Demodulators for Microwave Amplitude-Modulated Light Signals

Ichiro SAKURABA

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
Hokkaido University, Sapporo, Japan

(Received April 30, 1966)

Abstract

This paper reviews the early experiments on the photoelectric mixing process and reports on the recent trends of photoelectron-beam demodulators in the United States of America and Europe.

Rapid advances in detection techniques are expected. Microwave photoelectron-beam systems and photodiodes are the leading contenders.

目 次

Abstract	95
1. 緒 言	96
2. Photomixing Process	96
2.1 沿 革	96
2.2 Photomixing Process	98
3. Optical Heterodyne Detection	100
3.1 Optical Heterodyne Systems	100
3.2 Equivalent Resistance	101
3.3 Conversion Gain	102
3.4 Frequency Selectivity	102
3.5 Noise Considerations	103
3.6 Directivity	105
3.7 Electron-Transit-Time Effects および Secondary-Electron Multiplication	106
4. Photoelectron-Beam Demodulators	107
4.1 序 論	107
4.2 Linear-Photoelectron-Beam Systems.	109

* 電子工学科電子管工学講座

4.3 CEF-Type Photoelectron-Beam Systems.	116
4.4 Scannable Systems	117
5. 結 言	117
参考文献	118

1. 緒 言

Laser の発明^{1),2),3)} が科学的小および工学的な広い分野にわたって門戸を開いた。そのうちの一つである photoelectric process による coherent light の photomixing の研究は^{4),5)}, optical communication の実現という点で、また laser の発振特性の測定などの spectroscopic tool として、さらに photoelectric process それ自身の研究という点で、非常に興味ある課題である。とくに通信方式の分野において、Siegman と McMurtry⁶⁾ の提案した microwave phototubes と、それにつづく photoelectron-beam demodulators および半導体光検出装置の開発は、microwave で変調した coherent 光による広帯域 optical heterodyne systems の可能性をもたらした。また Gemini VII が Hawaii 島上空 290 km において、地上局との間に Laser 光使用の通信の実用実験にはじめて成功したことは⁷⁾, これらの研究が今後一層活性化するものと考えている。

したがってここではまず photomixing について一般的考察を行ない、ついで photoelectron-beam demodulators について最近の発展を調べることが目的である。なお本論文は 1965 年 The University of Michigan の Graduate School の “Microwave and Quantum Electron Devices” の科目の一部として講義したものを要約したのである。したがって日本におけるこの分野の研究に関しては、帰国以来日浅く十分に調査し得なかつたので別の機会にゆずることとした。

2. Photomixing Process

2.1 沿 革

一般に photoelectricity, photoconduction あるいは photovoltaic effects が光の検出用に長い間利用されてきた。いずれも光波帯で photoelectric current が light power に比例するのであり、したがって optical electromagnetic field に関し square-law detection の特性をもつ。Forrester, Parkins および Gerjuoy⁸⁾ は、photoelectric effects における square-law 特性は、互に独立な光源から二つの光波の beat を与え得ると述べた。すなわち photocurrent が、周波数 ν_1 と ν_2 の total electric fields の平方で変化するなら差周波数 $f = |\nu_1 - \nu_2|$ で変調された成分が生ずるということである。しかしこの photoelectric process には二つの重要な仮定を含んでいる。第一に photocathode 上任意の点から一個の electron が放射し得る確率は、 $(1/f)$ に比べて非常に小さな時間について平均した average light intensity に比例するということであり、第二に photoemission の life time は $(1/f)$ に比べて小さいという仮定である。もしこれ

らの仮定が満足されないなら, beat は生じないし, またはつきりした beat pattern を得るには, f に比べて小さな linewidth を要する。しかし laser の実現以前は, このような実験はきわめて困難であったが, 彼らはずぎのような測定を試みた。 10^4 gauss の磁界における 5461 \AA の mercury において, Zeeman pattern の二つの outside component は 1 Gc ていどの linewidth と 10 Gc ていどの frequency separation をもつ。これらの光波を photocathode にむけると, 差周波数で変調された photocurrent を発生し, その周波数に同調した空洞共振器をととした。試みられた実験の主な noise は, photocurrent の shot noise と空洞共振器の thermal noise であった。このような装置は, buncher と photocathode とが一緒になったと考えられ photoklystron と呼ぶことが出来よう。

その後このような beat に関する実験が, 非常に多く行なわれた^{9),10),11)}。ある研究者達は, photocurrent は各周波数成分のそれぞれの平方の和に比例するから, 差周波数成分は存在しないと主張した。またほかの研究者は二つの光波の入射角の差, cathode 表面の granularity, および photoelectrons の速度の変化などによって差周波数成分が wash out されると主張した。しかしその後の研究において, 後者の議論が検討され¹²⁾ 差周波数成分は, 非常に困難かもしれないが不可能でない結論された。前者の主張に関しても, 放射確率は total electric field intensity に比例することが基本的な仮定であり妥当であると考えられるに至った¹³⁾。また 5461 \AA の mercury line の Zeeman split components による実験において, 空洞共振器により検波し得なかったことは, spectral lines がのぞましい差周波数成分に比べて, そんなに狭くないこと, cathodes の各部からの差周波数の位相が変化すること, また空洞共振器における SN 比がわずかに 3×10^{-5} ていどであるためと考えられた。その後改善された実験方法によって Forrester, Gudmundsen および Johnson¹³⁾ らは予想された差周波数成分を検出した。したがって photoelectric process に関する仮定が正しいと結論された。さらに Brown と Twiss¹⁴⁾ の実験はこれらの結果を支持したが, 一部についての疑問をもっていた。とくにいくつかの実験に示されたように, photomixing process の time delay 10^{-9} sec でいどあり, したがって差周波数成分が Gc 帯にあるような成分は阻止されてしまうのではないかという疑問であった。

ついで helium, neon CW laser の開発は, spectral lines 間の差周波数成分を得る問題について明るい結果をもたらした。すなわち laser はわずかに異なった光波帯の発振周波数をもつ異なった modes を同時に発振しているから, Javan, Bennett および Herriott¹⁵⁾ は通常の photomultiplier の cathode に laser 光をいれて, 予想された発振 mode 間の差周波数成分に対応する出力を得た。したがって photomixing の技術が急速に発展することとなり, laser 自身の発振特性の測定や^{15),16)}, Forrester¹⁷⁾ によって提案された linewidth の測定などに応用されることとなった。

しかしながらかなり高い周波数成分が予想されたにもかかわらず測定し得た最高周波数は 300 Mc であった。それ故もつとはなれた発振 modes が存在しないか, photomultiplier の周

波数特性が不十分か、または photomixing それ自身がそれらの周波数帯で非常に sharp な cut off をもつかもしいなどの理由が考えられた。これらのうち前者2つの原因がもっともらしいと考えられたが、第三の原因についてもさらに研究すべきとする研究者達もいた。さらに ruby laser の出力を high-resolution spectrometer で調べた結果、linewidth 600 Mc 以下の lines 10 個が 2.4 Gc の間隔で得られた¹⁷⁾。(このときの spectrometer の resolution は 600 Mc であった) ついで Fox と Li¹⁸⁾ は、ruby rod によって形成される共振器は多くの modes をもつことを指摘し、Wagner と Birnbaum¹⁹⁾ はそれらが同時に発振することを示した。またこのような現象は gaseous optical maser でも観測された。しがた一つ mode を signal と考えれば、ほかの modes は local oscillator と考えられるから、microwave phototubes を用いれば Gc 帯の出力が得られるはずである。ついで Maiman^{20), 21)} は Fabry-Perot interferometer で測定した結果、linewidth は 40 Mc 以下であるとされた。これらのことが Siegman と McMurtry とらによって当時市販されていた S-band 用進行波管 TW 530 で長さ 5.53 cm ruby rod の発振特性を調べる動機となった^{6), 22)}。

この ruby cavity の軸方向 modes の間隔は、605 Mc であるから、TW 530 の pass band よりかなり低く、第三より第七軸方向 modes を増幅するわけである。彼らの測定結果によれば 1.8, 2.4, 3.0, 3.6, および 4.2 Gc の付近に幅約 20 Mc 以下の出力が得られ、出力はおおよそ $-50 \sim -70$ dbm であった。けっきょく 4.2 Gc までの差周波数成分が観測されたわけであり、また同時に少なくとも二つの軸方向 modes の発振が可能であり計算値ともよく一致する。また個々の spectral component の linewidth は 5 Mc 程度であり、従来の high-resolution spectrometer では測定し得ないものであった。これらの結果から photocathode をもつ進行波管の研究が進められ、つづいて photoelectron-beam demodulators の開発、また photodiodes や bulk photoconductor などによる検波方法の発展と、急速な進展をみるに至った。

2.2 Photomixing Process

photoelectric emission と bulk photogeneration はともに一般的な photoelectric process であり、optical input power $P(t)$ は photocurrent $i(t)$ を発生する。(Fig. 1 参照) それらが optical square-law effects をもつことであり、

$$i(t) = K \bar{E}^2(t), \quad (1)$$

で示される。ここで $E(t)$ は optical electric field であり $\bar{E}^2(t)$ は電界の平方がある時間 τ にわたって平均されたものである。この τ は一般に optical period 比べてきわめて長く、microwave の period に比べて非常に短いと考えられる^{23), 24)}。

いま簡単のために二つの理想的な平面

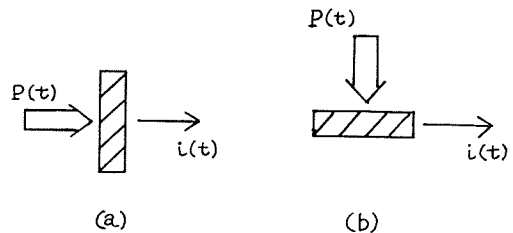


Fig. 1. An optical input power $P(t)$ generates a photocurrent $i(t)$ in two common photoelectric processes of photoelectric emission (a) and bulk photogeneration (b).

波の単色光がきわめて小さい photosensitive region に入ってきたと考えよう²⁵⁾。その全電界は

$$E(t) = E_1 \cos(2\pi\nu_1 t + \phi_1) + E_2 \cos(2\pi\nu_2 t + \phi_2). \quad (2)$$

ここで ν_1 と ν_2 は optical frequency を示し f つまり $\omega/2\pi = f$ は microwave frequency を示すものとする。それ故 $\bar{E}^2(t)$ は

$$\begin{aligned} \bar{E}^2(t) = & \frac{1}{2} E_1^2 + \frac{1}{2} E_2^2 + E_1 E_2 \cos[2\pi(\nu_2 - \nu_1)t + \phi_2 - \phi_1] \\ & + f(2\nu_1) + f(2\nu_2) + f(\nu_1 + \nu_2). \end{aligned} \quad (3)$$

上式の第一項と第二項は直流項を示し、二つの光波による photocurrent の直流分を与える。第三項はいわゆる photomixing の項であり、差周波数 $f = \nu_2 - \nu_1$ をもつ。もちろん averaging process で $f \ll (1/\tau)$ を仮定している。ほかの項は、optical frequency $2\nu_1$, $2\nu_2$ および $\nu_1 + \nu_2$ をもち、これらは averaging process で完全におさえられると想像される。たとえ完全に消えなくても現在の技術では optical frequency で変調された photoelectron beam を利用出来ないから実用性がない。

さて photomixing の項は、 E_1 と E_2 の積で示されるから、optimum に動作させるには、これらの二波の polarization を同じにする必要がある。また optical power $P(t)$ は、 $E^2/2$ に比例するから式 (3) は、

$$P(t) = P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_1), \quad (4)$$

となる。いま毎秒到着する photon の数を $n(t)$ とすれば

$$n(t) = \frac{P(t)}{h\nu} \quad (5)$$

で与えられる。ここで h は Planck's constant である。したがって

$$n(t) = n_1 + n_2 + 2\sqrt{n_1 n_2} \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_1) \quad (6)$$

この photomixing の項は二波の photons の間の interference を示しており、差波数 f をもつ。ただしここで $(1/\nu_1)$ と $(1/\nu_2)$ との差は小さいとして $\nu_1 \approx \nu_2 = \nu$ と仮定した。

つぎに photoelectric process の量子効率 η は放出 electrons の数と入射 photons の数との比で定義されるから ($\eta \leq 1.0$) photocurrent は

$$\begin{aligned} i(t) = \eta e n(t) = \eta e P(t)/h\nu = & \rho P_1 + \rho P_2 + 2\rho\sqrt{P_1 P_2} \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_1) \\ = & I_{01} + I_{02} + 2\sqrt{I_{01} I_{02}} \cos(\omega t + \phi_2 - \phi_1), \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ここで ρ は responsivity といわれ、

$$\rho = \eta e/h\nu \quad (8)$$

で定義される。また I_{01} と I_{02} はそれぞれの単色光によって作られる dc photocurrent である。

一つの目安として 6000 \AA の単色光に対して、photon energy $h\nu/e$ は約 2 volts である。それ故量子効率 100% に対して photocurrent は optical input power を 2 volts で割った値と

なる。故に visible light によって作られる photocurrent はおおよそ $\eta \times 0.5$ amperes/watt of light で与えられることとなる。(Fig. 2 参照)

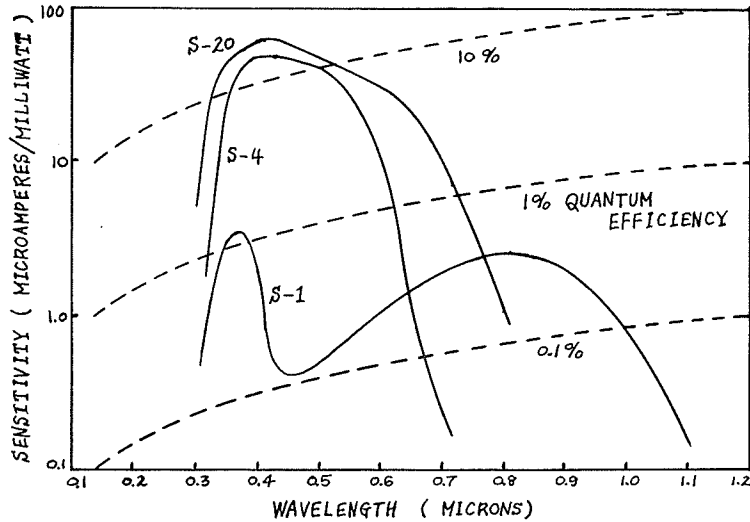


Fig. 2. Typical spectral response curves for S-1, S-4 and S-20 photoelectric cathodes. (McMurtry)

また photomixing のもつ最大周波数は $(1/\tau)$ で与えられる。この photoelectric averaging time τ は、光電材料の atomic process における一つの特性を示すものであり、collision や scattering による quantum-mechanical phase memory を失うまでの life time である。photoelectric emission の詳細な機構は現在十分に明らかにされていないが、この average time τ はきわめて短く $10^{-11} \sim 10^{-13}$ sec と信ぜられており、したがって最大周波数は $10^2 \sim 10^4$ Gc と考えられる。しかしそのような高い周波数における photo effects に関する測定技術は現在開発されていない²⁶⁾。

3. Optical Heterodyne Detection

3.1 Optical Heterodyne Systems

photomixing の応用例の一つが optical heterodyne detection であり、photocathode と photoelectron beam system を用いる方式を Fig. 3 に一例を示す。この system において強い local laser よりの光波 $P_1 = P_{I_0}$ と弱い信号光波 $P_2 = P_S$ が同時に photocathode を照射する。一般に $P_{I_0} \gg P_S$ であるから photocurrent $i(t)$ は

$$\begin{aligned} i(t) &= \rho P_{I_0} + \rho P_S + 2\rho \sqrt{P_{I_0} P_S} \cos(\omega t + \phi_S - \phi_{I_0}) \\ &\approx I_0 + i_1 \cos(\omega t + \phi_S - \phi_{I_0}). \end{aligned} \quad (9)$$

ここで $\omega = 2\pi f = 2\pi(\nu_S - \nu_{I_0})$ が optical heterodyne receiver の中間周波数となる。

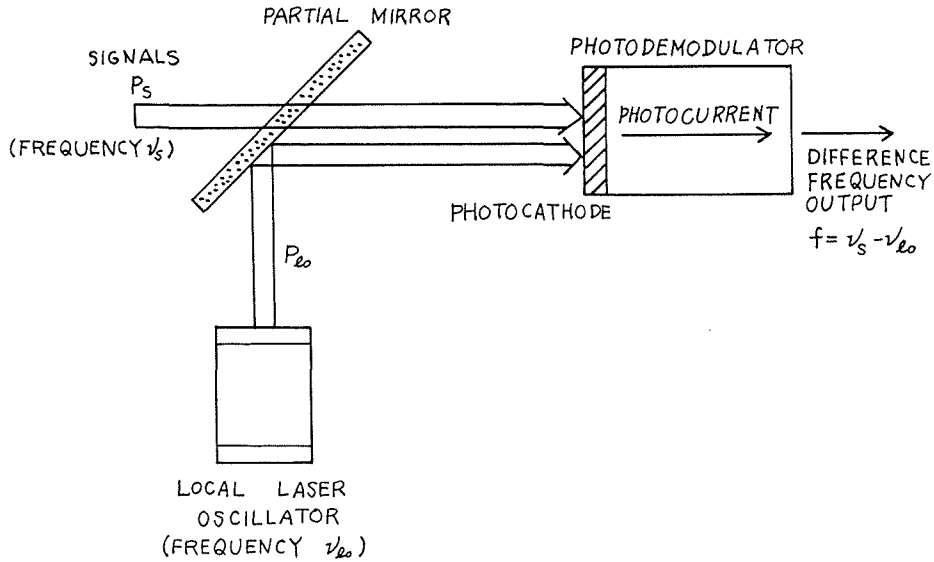


Fig. 3. Schematic drawing of an optical heterodyne receiver.

3.2 Equivalent Resistance

photoelectron beam devices の一般的配置を Fig.4 に示す。図において入射光が photocathode に入ると photocurrent が発生し, gun region や interaction region を経て collector に至る。この場合一般に電子走行時間効果や二次電子増倍作用をうけるが, これらは後節で議

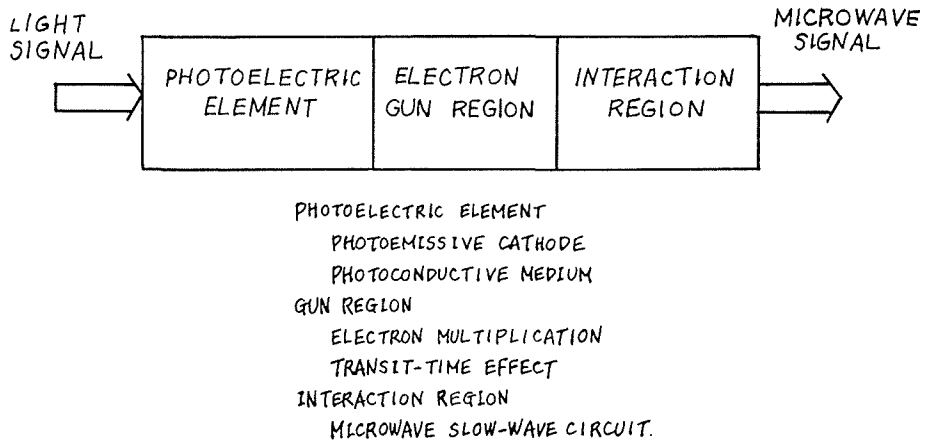


Fig. 4. Schematic drawing of a generalized photodemodulator.

論するとしていまこれらの影響がない簡単な場合を考えよう。いま二つの入射光が完全に co-directional であり, spatially coherent であると仮定し, photocathode 上の異なった点における二つの信号の位相関係による cancellation effects を避けたとき, 差周波数 f をもった peak ac photocurrent は前述の結果より

$$i_1 = 2\rho\sqrt{P_{lo}P_S} \quad (10)$$

それ故 i_1 がわかれば photodemodulator が外部へ供給し得る microwave output power P_{out} を求め得る。この i_1 と P_{out} との関係は

$$P_{out} = \frac{1}{2} i_1^2 R_{eq} \quad (11)$$

で定義される equivalent resistance R_{eq} を用いて示すのが適当である²⁷⁾。この R_{eq} は photodemodulators の構造と動作条件によって決定される。

3.3 Conversion Gain

optical heterodyne systems と直接検波とを比較するために、100% 振幅変調された入力信号 P_S を考える。この場合 video detection と呼ばれる直接検波法によっても復調出来るから optical input power を

$$P(t) = P_S(1 + \cos \omega t) \quad (12)$$

とおけば photocurrent は

$$i(t) = \rho P_S(1 + \cos \omega t) \quad (13)$$

となる。故に両方式の角周波数 ω における検波出力の比は

$$\frac{\text{Power output, heterodyne case}}{\text{Power output, video case}} = \left[\frac{2\sqrt{P_{lo}P_S}}{P_S} \right]^2 = 4 \frac{P_{lo}}{P_S} \quad (14)$$

で示される。すなわち任意の周波数における square-law heterodyne と全く同様に optical heterodyne system においても、中間周波数の出力は、local laser によって増加し得る。また上式のように conversion gain も存在し、 P_{lo}/P_S に比例する。さらに output power は P_{sig} に比例するから linear receiver となる。

3.4 Frequency Selectivity

optical systems においても一般の heterodyne detection と全く同様の周波数分布を示す。(Fig.5 参照) 重要な性質は、microwave で広い中間周波数帯域 B であっても、optical な立場よりみれば非常な狭帯域となる。たとえば $B=1\text{ Gc}$ のときこれに対応する波長は、 6000 \AA で

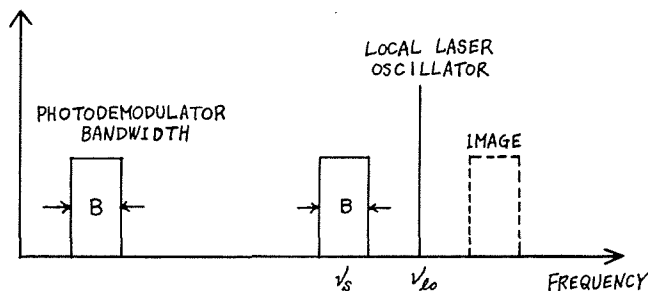


Fig. 5. The frequency selectivity of a heterodyne receiver.

$\Delta\lambda = 0.012 \text{ \AA}$ となる。これは従来の passive optical filters に比べて非常に小さな値である。それ故 optical heterodyne system はきわめて高い selectivity をもち background light を強くおさえることとなる。

3.5 Noise Considerations

いま photocurrent の平均値を I_0 とすれば, devices の周波数帯域 B 内における mean square noise current fluctuation I_n^2 はよく知られた shot noise の式

$$I_n^2 = 2e I_0 B. \quad (15)$$

で与えられ, photomixing process における基本的な制限となる^{28), 29)}。さて photocathode がそれにつづく interaction region に photocurrent を与え, interaction region から microwave output が得られるような photoelectron beam systems を考えよう。(Fig.6 参照) 簡単のため

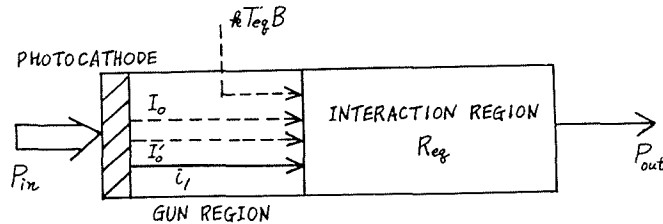


Fig. 6. Schematic for discussing noise in photodemodulators.

に photocathode より出た peak ac photocurrent i_1 が gun region で影響うけないと仮定し, そのまま interaction region へ入り, 出力 P_{out} を与えるとすれば, この出力は R_{eq} を用いて前述の式 (11) で示される。

このような system において noise に関する三つの主要な原因が考えられる。まず第一に optical laser oscillator と optical input power はともに dc photocurrent I_0 をつくるが, 一般に $P_{lo} \gg P_s$ であるから, $I_0 \approx \rho P_{lo}$ と書き得る。この dc photocurrent は shot noise fluctuations $I_n^2 = 2e I_0 B$ をもち, gun region で影響されずに interaction region に入ると仮定すれば system の出力点における shot noise output は $P_n = 2e I_0 B R_{eq}$ となる。つぎに dark current および background light による dc photocurrent I'_0 が存在するから, 全く同様にして出力点における shot noise output P'_n は $P'_n = 2e B I'_0 R_{eq}$ となる。第三に考えられることは system 内の任意の抵抗によって作られる thermal noise や interaction region へ入る等価雑音入力である。これらのうち後者が主要なものであるが, 一括して systems に noise power input $k T_{eq} B$ としよう。ここで T_{eq} は附加的なすべての noise source から生ずる実際の noise input power に等しいようにきめる。さらに interaction region は非常に低 level で動作すると仮定すれば, 出力点の power output は単に $k T_{eq} B$ となる。したがって photoelectron beam systems の出力点における SN 比は

$$\frac{S}{N} = \frac{\frac{1}{2} i_1^2 R_{eq}}{2eB(I_0 + I_0') R_{eq} + k T_{eq} B}. \quad (16)$$

実際の optical heterodyne system では, local laser の出力 P_{lo} が充分大きく, それによる dc photocurrent I_0 は, background の light による dc photocurrent と dark current との和 I_0' に比べて非常に大きいと仮定し得る。また photoelectron-beam systems の R_{eq} はかなり大きくかつ P_{lo} も充分に大きいから $2eBI_0R_{eq} \ll kT_{eq}B$ と仮定し得る。故に SN 比は

$$\frac{S}{N} \approx \frac{\frac{1}{2} i_1^2 R_{eq}}{2eBI_0R_{eq}} = \frac{\rho P_{sig}}{eB}, \quad (17)$$

となる。optical heterodyne における conversion gain と shot noise power は P_{lo} に比例するから, 非常に大きい P_{lo} のとき SN 比は P_{lo} に独立となる。検出可能な限界を示すいわゆる equivalent noise input power は上式より

$$\text{Equivalent noise input power} = \frac{Be}{\rho} = \frac{h\nu}{\eta T_R}, \quad (18)$$

$$T_R = B^{-1}. \quad (19)$$

つまり理想的な maser amplifier の equivalent noise input power は一個の photon の energy を resolution time T_R で除したものであり, optical heterodyne system は $(1/\eta)$ だけ, 理想的な maser amplifiers より悪化する。それ故 SN 比を $(1/\eta)$ だけ改善するには, optical heterodyne receiver の前に理想的な optical preamplifiers を置くなどの方法が原理的に可能である。しかしながら現状では理想的 maser amplifiers を作ることは, dark current や noise をおさえることによって改善された理想に近い optical heterodyne receiver を作るより実用上困難と思われる。

つぎに実際の photoelectron beam systems において, 電子走行時間効果や回路的な原因などのために, interaction region に入る ac photocurrent は, photocathode 面上に生じた値よりもかなり少なくなると思われる。いまかりに軽減係数 Γ とおけば, R_{eq} は実効的に Γ^2 倍されると考えられる。他方 shot noise current fluctuation も同じ軽減係数 Γ だけ減少するから, 結果的に signal と noise は, とともに同じような軽減係数の影響をうけることとなる。Anderson³³⁾ はこの軽減係数の影響を含んだ equivalent resistance R_{eq} が簡単に測定し得ることを示した。すなわち photodevices が incoherent または coherent な非変調光を照射し, dc photocurrent I_0 をつくと shot noise output は $P_n = 2eI_0BR_{eq}$ となり, radiometer で容易に測定し得る。また P_n , I_0 および B は独立に測定し得るから R_{eq} は容易に決定し得る。さらに photocurrent が低い周波数で chopped されていなければ, ほかのより大きな noise source があっても容易に検出可能となる。

3.6 Directivity

つぎに重要なことは、photomixing において directivity の問題が存在することである。photocathode の寸法が光波の波長に比べて大きいとき、表面上で差周波数の位相が変化し、photomixing が有効に行なわれない。しかし二つの光波が表面に直角である必要がなく、また optically になめらかである必要はない。これらを少し定量的な結果を用いて考察しよう。(Fig. 7 参照) 二つの入射平面波が $x-z$ 平面に直角におかれた平らな photocathode A に入射角がそれぞれ θ_1 , θ_2 をもつ場合を考えよう。まず photocathode は x 方向に幅 d をもち y 方向に一様と考える。この場合二つの波が同じ polarization をもつとすれば ac peak current i_1 は

$$i_1 = D(\theta_1, \theta_2) 2\rho\sqrt{P_1 P_2} \quad (20)$$

となる^{31), 32)}。ここで P_1 と P_2 とは optical power であり $D(\theta_1, \theta_2)$ は directivity factor である。

この場合

$$D(\theta_1, \theta_2) = \sin \Delta k d / \Delta k d, \quad (21)$$

$$\Delta k = \frac{1}{2} (k_1 \sin \theta_1 - k_2 \sin \theta_2). \quad (22)$$

で与えられる。 k_1 と k_2 とは wave numbers である。故に出力半値幅を考えると $D(\theta_1, \theta_2) \geq (1/\sqrt{2})$ であるから $\Delta k d \leq \pi/2$ となる。いま簡単ないくつかの例を考えよう。

まず二つの光波が完全に平行であり、かつ photocathode に対して入射角 θ で入射する場合つまり $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ のとき出力半値幅に対して

$$\lambda \geq 2d \sin \theta \quad (23)$$

の条件が得られる。ここで λ は差周波数 f に対する波長である。それ故 microwave band では常に満足され実用上問題とならない。つまり二つの平面波が完全に平行であるなら、それらの photocathode に対する入射角は、directivity の点で重要でない。

つぎに両波の到来方向が photocathode 面に直角であるが、完全に平行でないときつまり $\theta = \delta\theta$ および $\theta_2 = 0$ の場合出力半値幅に対して

$$\delta\theta \leq \lambda_1 / 2d \quad (24)$$

の条件が得られる。ここに λ_1 は optical wave length である。一般に cathode の寸法は optical wave length よりもかなり大きいから、これはかなりきびしい制限となる。たとえば $\lambda_1 = 6000 \text{ \AA}$ で $d = 3 \text{ mm}$ なら二つの光波は $\delta\theta = 10^{-4}$ radian 以内に平行でなければならぬというきわめて severe なものとなる。これより大きな角度差があれば、photocurrent は Fig. 8 に示された $D(\theta_1, \theta_2)$ のように変化する。

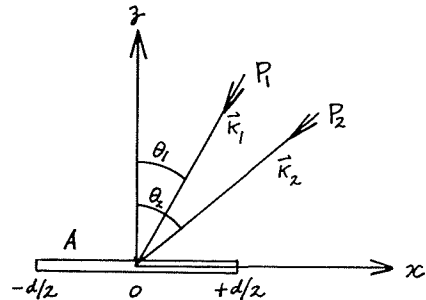


Fig. 7. Geometry for evaluating the directivity properties.

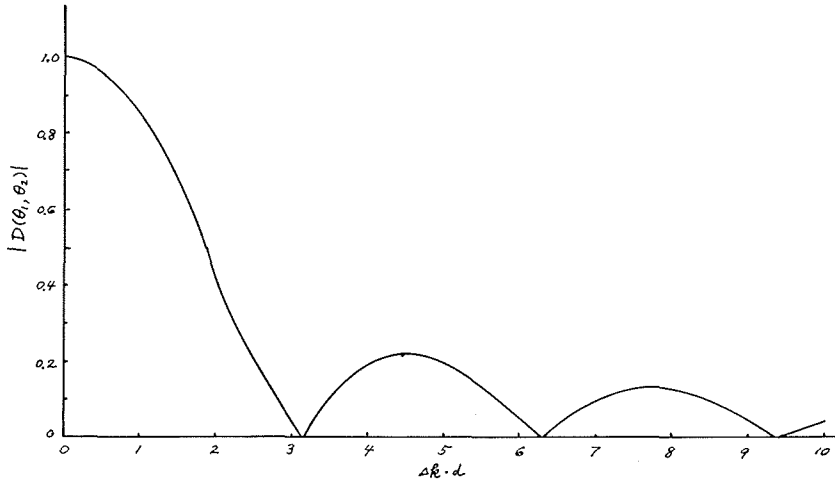


Fig. 8. The directivity factor $D(\theta_1, \theta_2)$ as a function of $\Delta k \cdot d$ (Sakuraba and Chida)

一般に local laser の光波は photocathode 面に直角に入射し得るから, directivity による出力の大幅な減少をなくするには, 入射信号光波を $\delta\theta = \pm \lambda_1/2d$ 以内におさえる必要がある。(Fig. 9 参照) つまり photoelectron beam demodulators は非常に狭い main antenna lobe をも

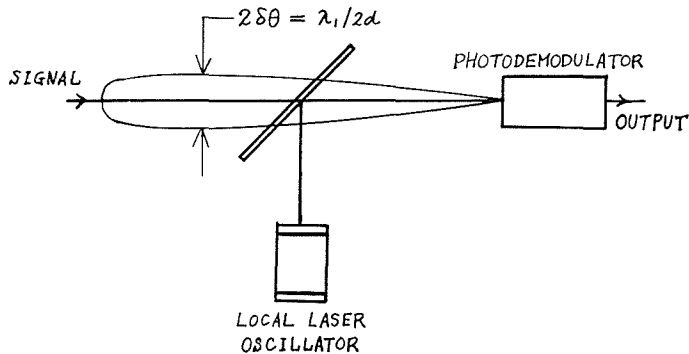


Fig. 9. An optical heterodyne receiver is essentially an optical antenna.

つこととなり, あたかも cathode を一つの antenna として考えた diffraction pattern となる。

3.7 Electron-Transit-Time Effects および Secondary-Electron Multiplication

一般に gun region において, 電子走行時間効果 (Fig. 10 参照) が存在した dynodes によって multiplication も行ない得る。それ故 peak ac photocurrent は

$$i_1 = \rho F(\omega T) \cdot M \cdot D(\theta_1, \theta_2) 2\sqrt{P_1 P_2} \quad (25)$$

で表示し得る²⁷⁾。ここに T は電子走行時間であり, $F(\omega T)$ は走行時間による reduction factor, M は electron multiplication factor である。したがって interaction region の equivalent re-

distance R_{eq} を用いて photoelectron beam systems の figure of merit は

$$\begin{aligned} \text{Figure of Merit} &= \eta^2 F^2(\omega T) M^2 D^2(\theta_1, \theta_2) R_{eq} \\ &\equiv \eta^2 \bar{R}_{eq} \end{aligned} \tag{26}$$

$$\bar{R}_{eq} = F^2(\omega T) M^2 D^2(\theta_1, \theta_2) R_{eq} \tag{27}$$

と示し得る。 $F(\omega T)$, M および R_{eq} は systems の設計によって定まるが、量子効率 η は、使用する photocathode によって定まる。一般にこの η は semiconductor のそれに比べて著しく低いからそれを補償する方法としていくつかの dynodes を設置してかなりの高い M を得ているが、電子走行時間効果のため figure of merit が減少する。他方 local laser の出力も同時に増幅されるなどの不利な点も存在する。また gun region 自身も周波数特性をもつが一般に低 level 動作であればさほど問題とならない。

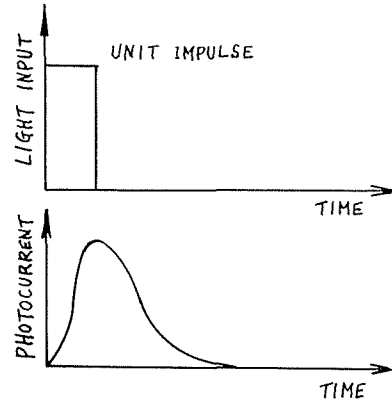


Fig. 10. Unit impulse response of a photomultiplier tube.

4. Photoelectron-Beam Demodulators

4.1 序 論

photomixing は一般に photocathodes や photodiodes さらに bulk photoconductor によって行なわたるが、最近是非線形誘電性を利用したものもある。現在実際の mixing 素子とし

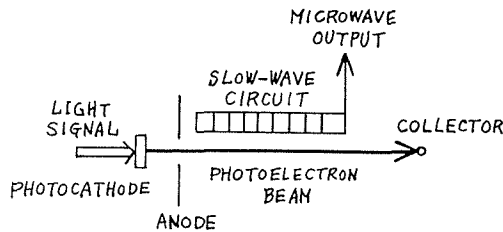


Fig. 11. Schematic of a traveling-wave microwave phototube.

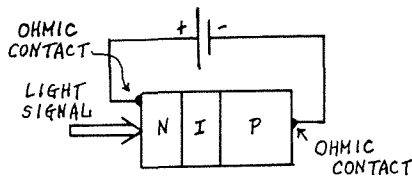


Fig. 12. Schematic of a PIN photodiode.

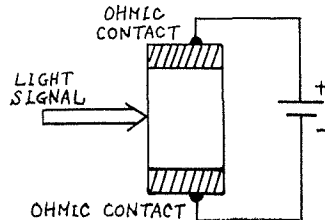


Fig. 13. Schematic of a bulk photoconductor.

ては, photocathodes と slow-wave circuits おおいは dynodes とくみあわせた microwave phototubes (Fig. 11 参照) や, PN または PIN photodiodes (Fig. 12 参照) および bulk photoconductor (Fig. 13 参照) などがある。逆バイアスをかけた photodiodes の半導体としては Ge, Si および Ga As などを用いられ³⁰⁾, bulk photoconductor には CdS, Cd Se さらに PbS が利用される³³⁾。ともに赤外線感度良好で量子効率高く, dark current も少なく heterodyne detection に適する。また photodiodes は走行時間による周波数限界が存在するが, bulk photoconductor はその影響が少ないので大いに期待出来る。

つぎに photocathodes と slow-wave circuits とをくみあわせた microwave phototubes は広帯域増幅可能, SN 比良好および heterodyne 方式に適するなどの点から急速に開発され, またいろいろな space-charge waves の利用の点から, さらに image devices とのくみあわせなど, 今後発展するものと思われる。photomultipliers は古くから光の検出用で使用されてきたが, 電子走行時間にもとづく周波数限界があり, これが改善のためとくに原子力関係技術者達によって絶えざる努力が続けられてきたが³⁴⁾, 従来の方式より脱し得なかった。しかしながら最近では dynamic crossed-field type³⁵⁾ や static crossed-field type および cancellation-in-pairs type^{36), 37), 38)} などが試みられ周波数限界も X-band に拡張された。しかしこれらは photocathode で photomixing を行なう optical heterodyne systems に適しない。他方 transmission-type dynodes によって走行時間効果の問題を解決し, slow-wave circuits とくみあわせた方式も提案され Lasecon と呼ばれている。mixing は pumping power を slow-wave circuits に加えて行なっている。

photocathode を用いた方式は赤外線感度不良のため cathode 自身の開発が必要であるが, photoelectron beam が密度変調波として cathode より放射され slow-wave circuits との相互作用が非常に能率よく行なわれるため solid state demodulators とともに将来の発展が期待される。それ故本章では photoelectron-beam demodulators を Table 1 のように分類し, とくに microwave phototubes について最近の動向と著者らの研究結果を述べる。

Table 1 Photoelectron-Beam Demodulators

-
- | |
|--|
| A. Microwave Phototubes |
| 1. Linear Beam Systems (O-Type) |
| 2. Centrifugal Electrostatic Focusing Systems (CEF-Type) |
| 3. Scannable Systems |
| B. Microwave Photomultipliers |
| 1. Dynamic Crossed-Field Type |
| 2. Static Crossed-Field Type |
| 3. Static Cancellation-In-Pairs Type |
-

4.2 Linear-Photoelectron-Beam Systems

microwave で振幅変調された coherent 光の復調に、従来の進行波管の技術が利用出来る
と Siegman が指摘して以来、多くの研究がなされた。Forrester の photoklystron の実験につ
づいて McMurtry らの photo-traveling-wave tubes, photo-velocity jump amplifiers, photo
parametric amplifiers (Fig. 14 参照) が提案された^{39),40),41),42),43),44)}。また semitransparent pho
tocathode をもつ型式も Blattner らによって提案され、さらに transmission type dynodes を
cathode と helix との間に設けて sensitivity の改善をはかっている。これら一連の装置は Las
econ と呼ばれ (Fig. 15 参照)、各種の使用法が提案されている^{45),46),47)}。まず McMurtry らと

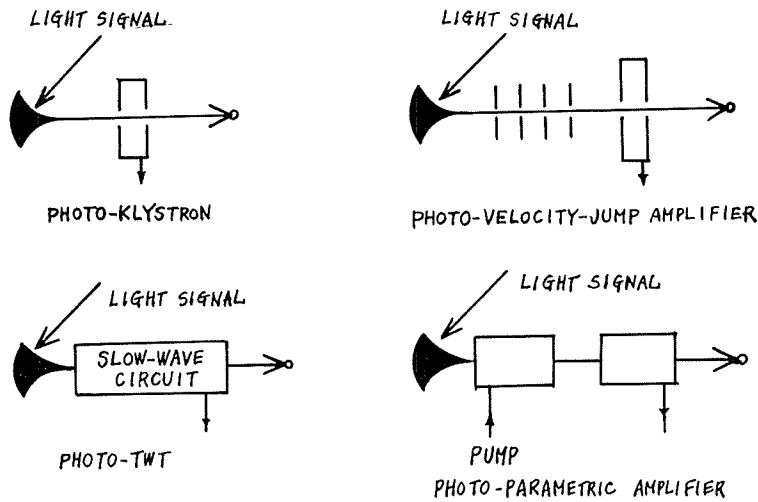


Fig. 14. Various possible forms of AM microwave phototubes. (McMurtry)

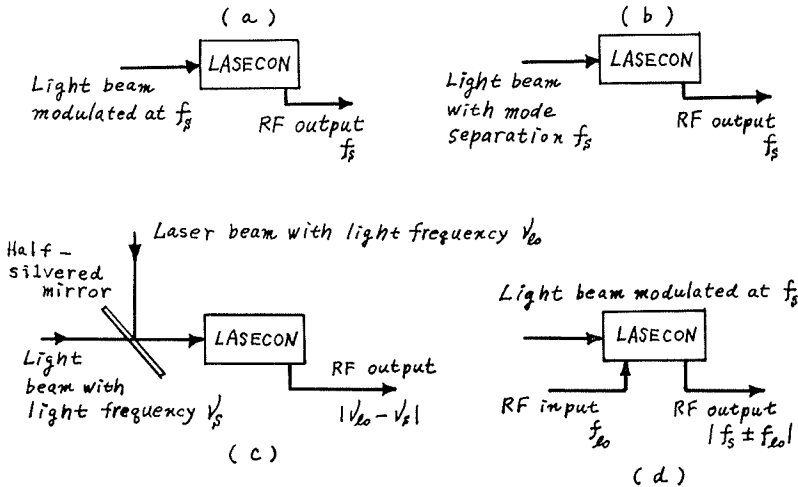


Fig. 15. Four modes of operation of the LASECON. (Blattner, Johnson, Ruedy and Sterzer.)

著者らの解析と実験結果とによって linear beam systems の一般的性質を考察しよう。

gain parameter C に対する R_{eq}/K の計算値を Fig. 16 に示す。図中の dashed curves は

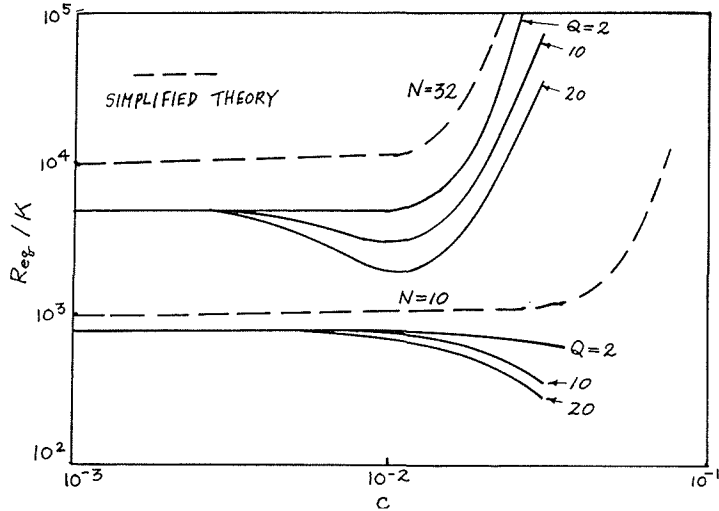


Fig. 16. Dependence of equivalent resistance upon the gain parameter, C ; $Cd = 0.004$, b = optimum value for each C , N , Q . (Caddes, McMurtry and Jacquez).

零空間電荷、無損失回路および完全同期の場合における近似計算結果を示す。これらの結果によれば、 $CN < 0.3$ の領域で R_{eq} は C に関して独立となり、 $CN > 0.4$ で growing wave operation を示す。また C がこの operation に近づくに従って空間電荷の影響のためいわゆる QC dip を

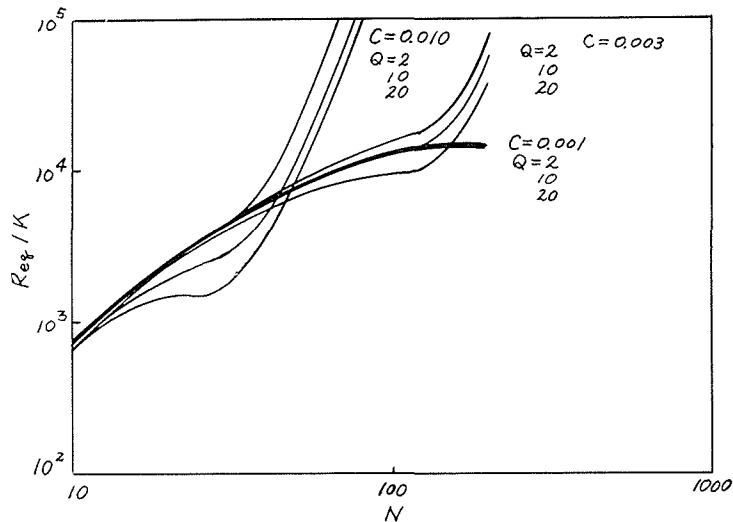


Fig. 17. Dependence of equivalent resistance upon circuit length; $Cd = 0.004$, b = optimum value for each C , N , Q . (Caddes, McMurtry and Jacquez).

生ずる。また相互作用長が短いほど大きな C の値で dip を示すに至る。つぎに N に対する R_{eq}/K の計算値を Fig. 17 に与えた。小さい C ほど大きな N の値で growing wave operation となる。またある N の範囲で、 R_{eq}/K がほとんど変化しないがこれは空間電荷と回路損失のためと考えられる。また回路損失の影響の計算例を Fig. 18 に示す。一般に相互作用長の大き

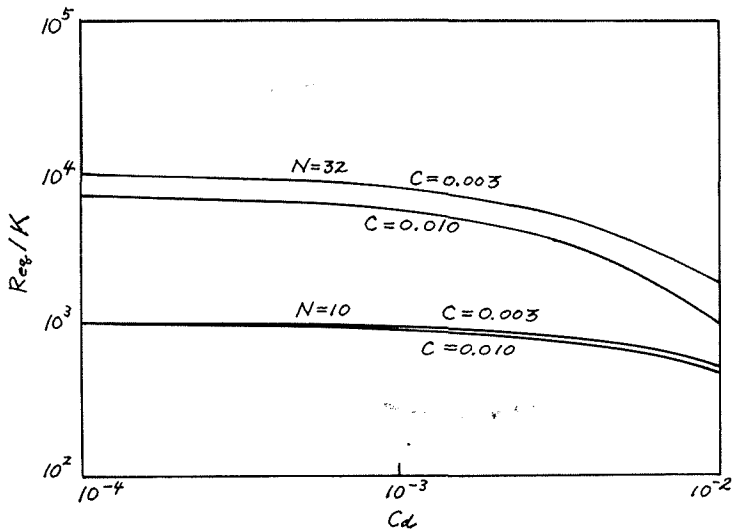


Fig. 18. Effect of circuit loss on equivalent resistance; $Q=10$, b = optimum value for each C, N . (Caddes, McMurtry and Jacquez).

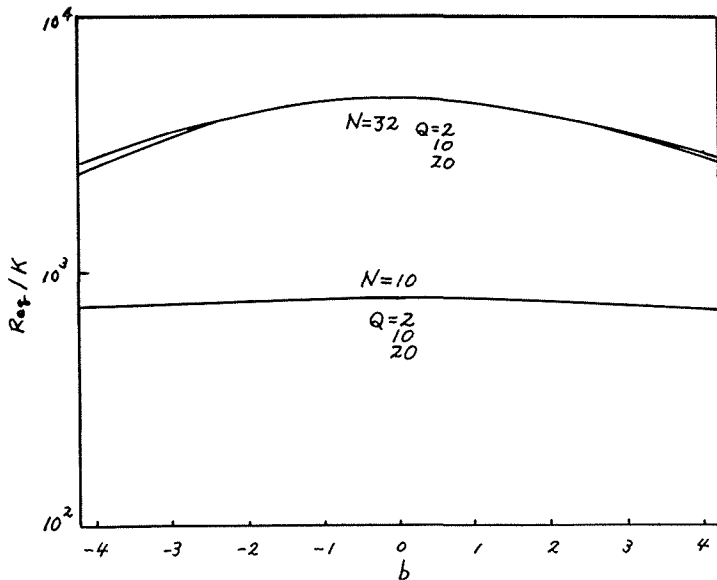


Fig. 19. Effect of beam velocity variations on equivalent resistance. $C=0.003$; $Cd=0.004$. (Caddes, MuMurtry and Jacquez).

いほど損失の影響を強くうける。つぎに直流速度と R_{eq}/K との関係を Fig. 19 に与えた。これによれば相互作用域の長いほど加速電圧が critical であり狭帯域となる。また C , N および Q を増加すると optimum が変化し、高い CN ほど QC の大きい結果も得られた。これは相互作用の結果作用域の長いほど, out of phase が大きくなり, 空間電荷界が一層影響していると考えられる。

さて microwave phototubes では一般に microwave で密度変調された beam が photocathode で発生するから, 電子銃域でその一部が速度変調波に変化する partial conversion を起す。したがって slow-wave circuit は任意の大きさと位相の関係をもつ二つの変調成分, つまり密度調波と速度変調波の両者によって励振されるに至る。その結果ある条件のもとでは, 零空間電荷のときでも R_{eq} に dip を生ずる。その結果の一例を Fig. 20 に示す。これは gun region 設計にあたり留意さるべき問題である。また R_{eq} の測定値と計算値との比較を Fig. 21 に示した。小さな電流値ではほぼ一定であり, ついで空間電荷効果と partial conversion のためいく分減少し, それから growing wave operation に入る特性がよく一致している。実用化された装置の一つである S-band 用 SYD 4302 A の計算値を Fig. 22 に掲げる。

つぎに semitransparent photocathode と transmission type dynodes を用いた Lasecon

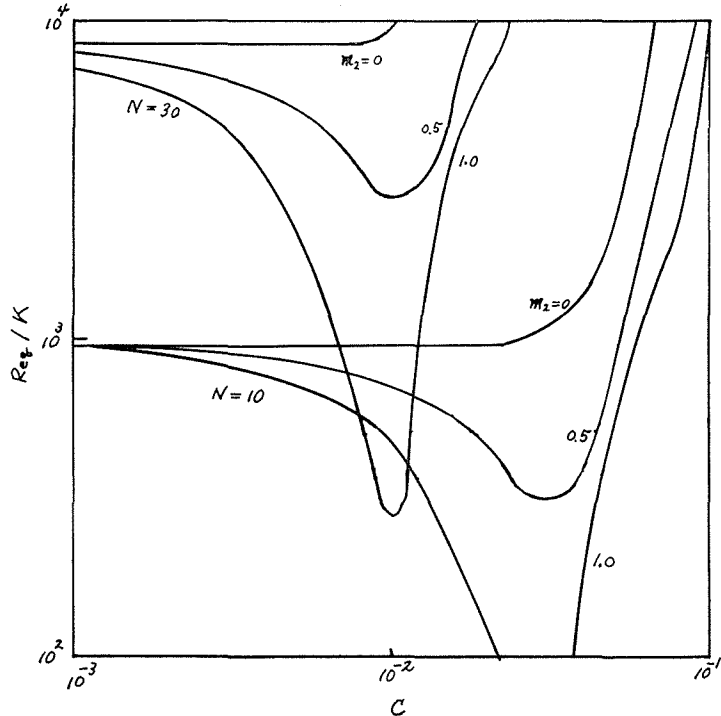


Fig. 20. (R_{eq}/K) vs C with m_2 and N as parameters for the conditions that $QC = b = d = 0$ and $m_1 = 0$. (Sakuraba and Rowe).

について考えよう。構造の一例を Fig. 23 に与えた。 photomultipliers の周波数限界は一般に二次電子の transit-time spread によりきまる。この spread は電子速度の不等および二次電子の軌道長の不等によって生ずる。 reflection-type dynodes を使う型は、transit-time spread を最小にすることが実用上困難である。その理由は、initial velocity による spread を少なくするには dynodes 間の電圧を高くすればよいが、current gain は一般に数百 volts で最大である。いいかえれば minimum transit-time spread と high current gain は相いれない。さらに reflection type dynodes における電子軌道は一般に曲線であり、全二次電子の軌道長を同じようにするには大変な困難を伴う。したがって reflection type dynodes を用いた photomultipliers の周波数限界はほぼ 1 Gc におさえられる。

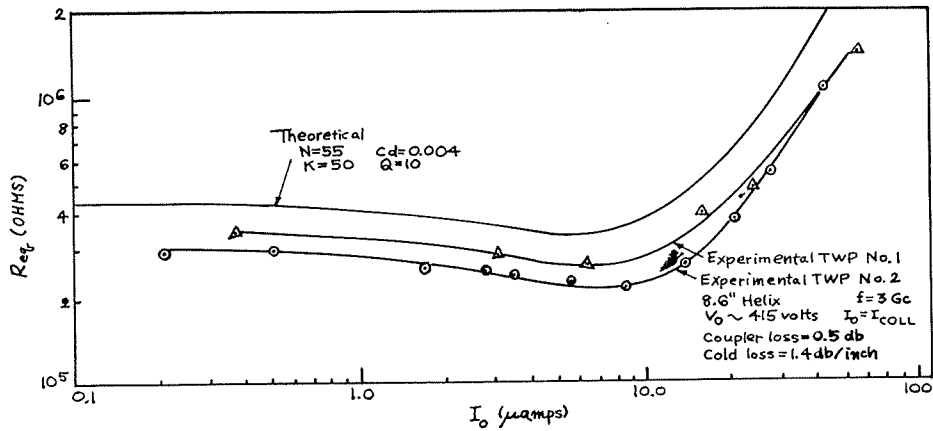


Fig. 21. Comparison of theoretical and experimental effects of photo current level on equivalent resistance. (Torg, Caddes and McMurtry).

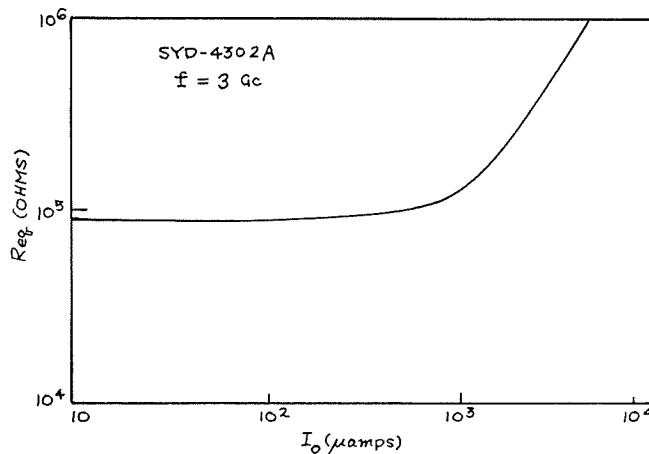


Fig. 22. Calculated equivalent interaction resistance vs. average current for the SYD-4302 A traveling-wave phototube. (McMurtry).

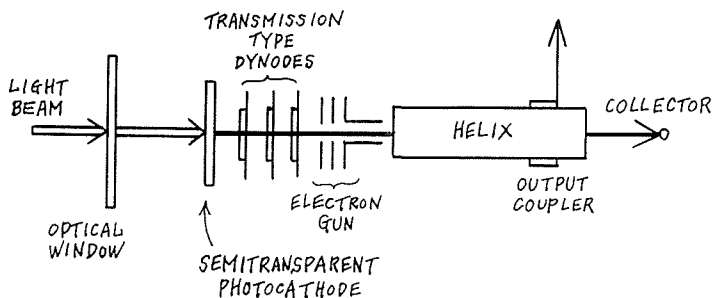


Fig. 23. Schematic diagram of LASECON with transmission-type dynodes. (Blattner, Johnson, Ruedy and Sterzer)

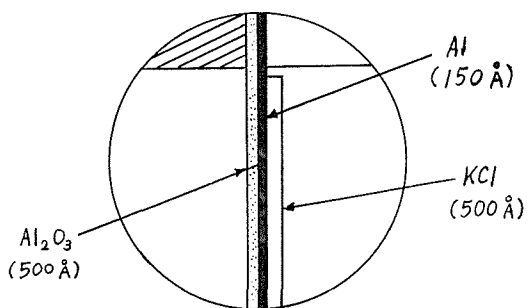


Fig. 24. Cross section of a transmission-type dynode. (Blattner, Johnson, Ruedy and Sterzer).

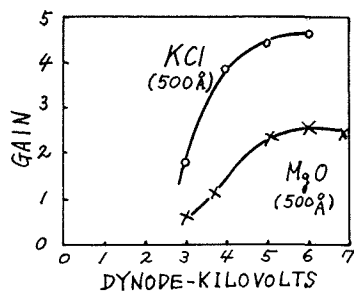


Fig. 25. Current gain of KCl and MgO transmission-type dynodes as a function of dynode voltage. (Blattner, Johnson, Ruedy and Sterzer).

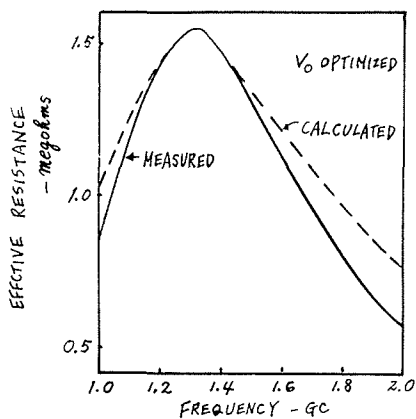


Fig. 26. Effective resistance of L-band LASECON as a function of frequency. (Blattner, Johnson, Ruedy and Sterzer).

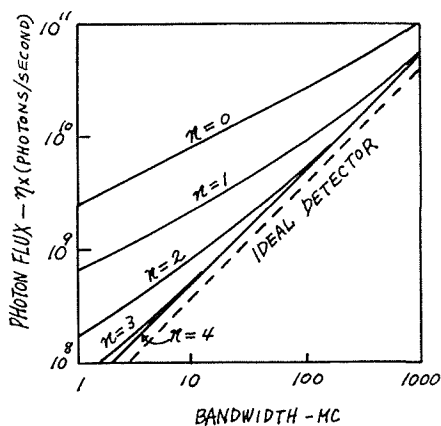


Fig. 27. Photon flux required for a signal-to-noise ratio of db as a function of bandwidth in the case where current gain per dynode = 4, modulation index = 1.0, $R_{eff} = 0.5 M\Omega$, and $T = 300^\circ K$. (Blattner, Johnson, Ruedy and Sterzer).

しかるに transmission type dynodes は一般に数千 volts で current gain が最大となるから transit time spread も非常に少なくし得る。さらに dynodes の平行平面配置も可能となるから、二次電子は、ほぼ等長の平行軌道を取り得る。それ故周波数限界もかなり高くなるが、Blattner らの実験によれば、thin-film を用いた transmission type dynodes は 30 Gc まで使用可能と予想されている。dynodes の一例を Fig. 24 に掲げた。厚さ 500 Å の aluminium oxide (Al_2O_3) の supporting substrate に、厚さ 150 Å の aluminium (Al) の film と厚さ 500 Å の放射材料 potassium chloride (KCl) とから成り立つ。また KCl を magnesium oxide (MgO) におきかえた dynode も試みられた。これらの current gain の測定結果の一例を Fig. 25 に示す。また L-band における R_{eq} の周波数特性を Fig. 26 に与えた。

KCl dynodes と photocathode S20 を使ったとき、量子効率 ≈ 0.2 および current gain ≈ 4 として SN 比を求めると ideal detector より 8.2 db ほど小さい。dynodes の数を parameter として SN 比 10 db を得るのに必要な photon flux を周波数帯域の関係として計算すると Fig. 27 のようになる。また Fig. 28 に周波数帯域を 100 Mc としたとき、dynodes の数を parameter として SN 比対 photon flux の関係を示した。これらの結果はつぎのようなことを示す。すなわち SN を比一定とすれば dynodes を有する linear systems は、それらをもたぬ systems に比べてかなり少ない毎秒あたり photons で充分であることを知る。

さて dynodes を用いるから photocathode に local laser を加えることが出来ない。それ故 slow-wave circuit に高周波の信号を pump することによって mixing を行なう (Fig. 15 の一例参照) すなわち slow-wave circuit の pass band 以外の周波数 f_m で入射光信号が振幅変調をうけていれば、周波数 f_p の高周波信号を slow-wave circuit 入力端に加えて検波し得る。このとき f_p , $(f_m + f_p)$ または $|f_m - f_p|$ のいずれかあるいはともに slow-wave circuit の pass band 内にあれば、出力信号に f_p と side bands の一つまたは二つを含み crystal mixer によって f_m

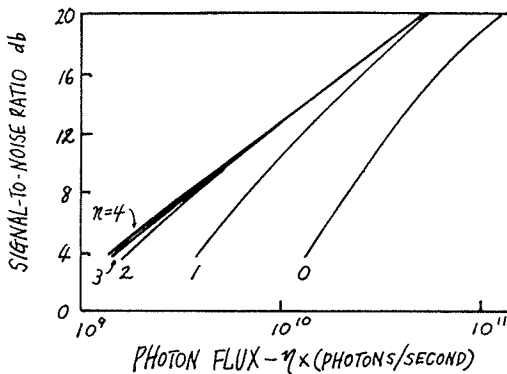


Fig. 28. Signal-to-noise ratio as a function of photon flux for various numbers of dynodes in the case where current gain per dynode = 4 and bandwidth = 100 Mc. (Blattner, Johnson, Ruedy and Sterger).

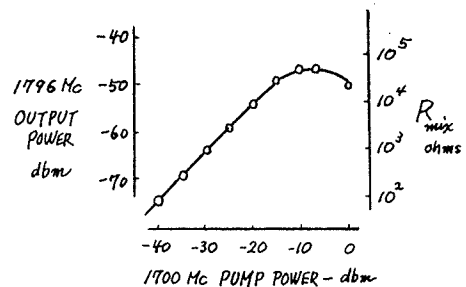


Fig. 29. Side-band power output versus pump power input for r - f mixing operation of LASECON. (Blattner, Johnson, Ruedy and Sterger).

の信号を得る。たとえば 1~2 Gc の band をもてば、0~4 Gc の信号を検出し得る。L-band における pump power と side-band power および R_{eff} の実測値の一例を Fig. 29 に示した。

4.3 CEF-Type Photoelectron-Beam Systems

遠心力を用いて静電界集束したいわゆる CEF-Type photoelectron-beam systems (Fig. 30 参照) は非常に高い等価抵抗をもち、したがってより高い $\eta^2 R_{eq}$ をもつに至る。すなわちこの devices の R_{eq} は

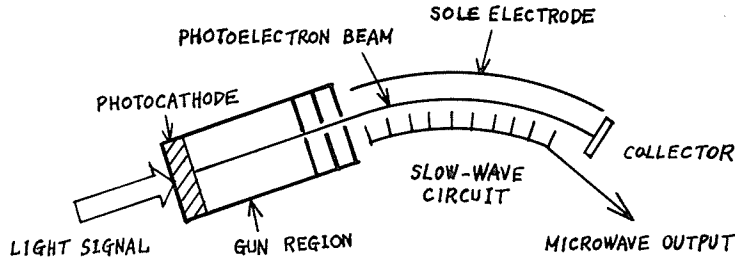


Fig. 30. A simplified schematic drawing of a CEF-type photode modulator. (Sakuraba and Rowe).

$$R_{eq} = \frac{K}{k_c^2 \beta_e^2 C^6} \left| \frac{D_\theta}{D} \right|^2, \quad (28)$$

で与えられる。ここに k_c は結合係数、 β_e は electronic circular propagation constant、 C は gain parameter であり、 D_θ と D は構造と動作条件によって決定する係数である。また gun region で partial conversion はないとし、前進波作用を仮定した⁴⁸⁾。linear systems における R_{eq} は

$$R_{eq} = \frac{K}{4C^2} \left| \frac{\phi}{\kappa} \right|^2, \quad (29)$$

となり、 ϕ と κ は装置の構造と動作条件により定まる^{39), 43), 44)}。つまり CEF 型装置の等価抵抗は C^6 に反比例し、O 型装置では C^2 に反比例する。それ故 $|D_\theta/D|^2$ と $|\phi/\kappa|^2$ が beam の値によって複雑な変化を示すとしても、ある動作条件のもとでは、CEF 型が非常に大きい値をもつと期待し得る。いいかえれば、同じ R_{eq} の値を得るには、CEF 型の N がきわめて短くてすみ構造上の点からも有利となる。またこれらの装置が低 level 動作の直接検波に使用された場合、O 型の出力は平均電流値の平方に比例するが、CEF 型では平均電流値にほぼ無関係となる。

さてこれらの原因について、現在いろいろな立場から研究されつつあるが、ここに定性的な考察を述べよう。linear systems における電子は、よく知られているように、加えられた電界と反対方向に運動する。したがって集束電子の空間電荷による界は、debunch するように働く。しかるに CEF 型の空間電荷による界の θ 方向成分は電子を減速し、したがって回転半径を減少するが、平衡条件を満足するためにけっきょく回転角速度を増加するに至る。それ故 CEF 型集束をうけた beam の θ 方向加速は、界の θ 方向成分と同じ方向であり、その結果空

間電荷界は bunch を増すように働くに至る。これが両装置の本質的な差異であり、とくに光電面より電流変調波として出てくる photodemodulators は微小電流 level で動作して好能率を期待し得る。またこの CEF 型の特性は crossed-field 装置における phase focusing や diocotron effects とともに大変興味ある現象と考えられる。

4.4 Scannable Systems

Doppler shift を用いた optical radar における検波装置は、数 Gc の周波数帯域を要した高分解能を必要とする。一般の photocathode や photodiode は受光面積が小さく、各種光源の角変位に対する information を得るのに不十分であり、機械的な scanning を要する。image orthicon や vidicon は角変位や scanning に対する能力が充分であるが、本質的に zero frequency response である。また image dissector は gum section でかなり広い周波数帯域をもっているが、出力回路に photomultipliers を用いるため難点があった⁴⁹⁾。

したがって image dissector の gun と slow-wave circuits をくみあわせれば、microwave で変調された光信号の広帯域受信が可能となり、optical radar の受信装置として秀れたものとなる⁵⁰⁾。X-band におけるこの装置は (Fig. 31 参照) non-scanning mode と scanning mode

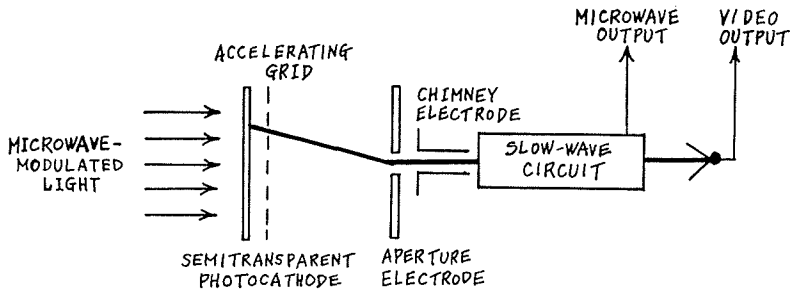


Fig. 31. Schematic drawing a scannable microwave photodetector. (Fisher).

の測定に成功しており、0 から ± 2 Gc の Doppler shift の範囲で各種の information を得ることが可能である。現在 incoherent 光の検出能力が充分でないが、今後の開発によって非常に有用な optical radar の受信装置となろう。

5. 結 言

photomixing の研究の経過とその特長を考察した。また光電子ビームを用いた復調器に関し、主として線型および CEF 型集束系の方式について述べた。coherent 光応用の分野における検出素子として、光電子ビーム装置と半導体装置が主役をなすと考える。

おわりに研究の機会を与えて下さった電子工学科の方々、および資料の整備と校正に協力された千田正彦助手と小柳幸次郎技官に感謝する。さらに、資料の調査に関し御助力下さった Professor Joseph E. Rowe および preprints の便宜を与えて下さった Dr. Burton J. McMurtry

に深謝する。

また本論文は前述したように The University of Michigan で講議した原稿の一部の要約であるが、草するにあたって下記科目

Professor G. W. Stroke: Optics of Coherent and Noncoherent Electromagnetic Radiation (1964).

Professor A. E. Siegman: Photomixing with Coherent Light (1963).

が大変参考になった。ここに深謝する。(なお Stanford University の Professor Siegman は当時 The University of Michigan の Visiting Lecturer であった)。

参 考 文 献

- 1) Schawlow, A. L. and Townes, C. H.,: Infrared and Optical Masers, Phys. Rev., vol. 112, pp. 1940-1949 (1958-12-15).
- 2) Maiman, T. H.,: Optical Maser Action in Ruby, Nature, Vol. 187, pp. 493-494 (1960-08-06).
- 3) Collins, R. J., Nelson, D. F., Schawlow, A. L., Bond, W., Garrett, C. G. B. and Kaiser, W.,: Coherence, Narrowing, Directionality and Relaxation Oscillation Oscillations in the Light Emission from Ruby, Phys. Rev. Letters, vol. 5, pp. 303-305 (1960-10-01).
- 4) Forrester, A. T.,: Photoelectric Mixing as a Spectroscopic Tool, J. Opt. Soc. Am., vol. 51, pp. 253-259 (1961-03).
- 5) Forrester, A. T.,: Photodetection and Photomixing of Laser Output, Advances in Quantum Electronics, Columbia University Press, New York, pp. 233-238 (1961).
- 6) Siegman, A. E. and McMurtry, B. J., Microwave Phototubes, Conference on Electron Device Research, Try, New York (1961-03) (Unpublished Work).
- 7) たとえば the Japan Times の 1965 年 12 月 13 日号: 全く 1965 年は宇宙開発上また光通信工学上記憶さるべき年であった。すなわち同年 3 月 Gemini III が地球三周および軌道変更成功した経過を IEEE International Convention の会場で見守った事, 同年 6 月 Univ. of Michigan 出身の Dr. White が Gemini IV で宇宙遊泳に成功したとき, Electron Physics Lab. において刻々と入る情報を聞きながら, laser beam による信号方式に関する議論がなされた事, また帰国後の 8 月に行なわれた Gemini V の 190 時間飛行の成功に喜び, ついで 12 月 Gemini VII と VI の rendezvous と VII 号による laser beam の通信実験の成功となった。
- 8) Forrester, A. T., Parkins, W. E. and Gerjuoy, E.,: On the Possibility of Observing Beat Frequencies between Lines in the Visible Spectrum, Phys. Rev., vol. 72, p. 728 (1947-10-15).
- 9) Ruark, A.,: Fast Modulation Effects in the Optical Regiom, Phys. Rev., vol. 73, p. 181 (1948-01-15).
- 10) Griffin, L. R.,: A Note on the Paper on the Possibility Beat Frequencies between Lines in the Visible Spectrum, Phys. Rev., vol. 73, p. 922 (1948-04-15).
- 11) Markinson, R. E. B.,: The Surface Photoelectric Effnct, Phys. Rev., vol. 75, pp. 1908-1911 (1949-06-15).
- 12) Gerjuoy, E., Forrester, A. T. and Parkins, W. E.,: Signal-to-Noise Ratio in Photoelectrically Observed Beats, Phys. Rev., vol. 73, pp. 922-923 (1948-04-15).
- 13) Forrester, A. T., Gudmundsen, R. A. and Johnson, P. O.,: Photoelectric Mixing of Incoherent Light, Phys. Rev., vol. 99, pp. 1961-1700 (1955-09-15).
- 14) Brown, R. H. and Twiss, R. Q.,: Correlation between Photons in two Coherent Beams of Light Nature, vol. 177, pp. 27-29 (1956-01-07).
- 15) Javan, A., Bennett, W. R. and Herriott, D. R.,: Population Investigation and Continuous Optical

- Maser Oscillation in a Gas Discharge, *Phys. Rev. Letters*, vol. 1, 6, pp. 106-110 (1961-02-01).
- 16) Herriott, D. R.,: Optical Properties of a Continuous Helium-Neon optical Maser, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 52, pp. 31-37 (1962-01).
 - 17) Ciftan, M., Krutchkoff, A. and Koozekanan, S.,: On the Resonant Frequency Modes of Ruby Optical Masers, *Proc. IRE.*, vol. 50, pp. 84-85 (1962-01).
 - 18) Fox, A. G. and Li, T.,: Resonant Modes in a Maser Interferometer, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 40, pp. 453-488 (1961-03).
 - 19) Wagner, W. G. and Birnbaum, G.,: Theory of Quantum Oscillations in a Multimode Cavity, *J. Appl. Phys.*, vol. 32, pp. 1185-1194 (1961-07).
 - 20) Maiman, T. H., Hoskins, R. H., D'Haenens, I. J., Asawa, C. K. and Evtuhov, V.,: Stimulated Optical Emission in a Fluorescent Solids", *Phys. Rev.*, vol. 123, pp. 1151-1157 (1961-08-15).
 - 21) Maiman, T. H.,: Optical Maser Action in Ruby, *Advances in Quantum Electronics*, Columbia University Press, New York, p. 91 (1961).
 - 22) McMurtry, B. J. and Siegman, A. E.,: Photomixing Experiments with a Ruby Optical Maser and a Traveling-Wave Microwave Phototube, *Applied Optics*, vol. 1, pp. 51-53 (1962-01).
 - 23) Fano, V.,: Quantum Theory of Interference in the Mixing of Light from Phase-Independent Sources, *Amer. J. Phys.*, vol. 539-545 (1961-08).
 - 24) Corcoran, V. J. and Pao, Y. H.,: Detection of Laser Radiation, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 52, pp. 1341-1350 (1962-12).
 - 25) Mandel, L and Wolf, E.,: Some Properties of Coherent Light, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 51, pp. 815-819 (1961-08).
 - 26) Pershan, P. S. and Bloembergen, N.,: Frequency Response of the Photomixing Process, *Appl. Phys. Letters*, vol. 2, pp. 117-119 (1963-03-15).
 - 27) Siegman, A. E., Harris, S. E. and McMurtry, B. J.,: Optical Heterodying and Optical Demodulation at Microwave Frequencies, *Proc. Symp. on Optical Maser*, Polytechnic Institute of Brooklyn, New York, pp. 511-527 (1963-04).
 - 28) Oliver, B. M.,: Signal-to-Noise Ratio in photoelectric Mixing, *Proc. IRE.*, vol. 49, pp. 1960-1961 (1961-12).
 - 29) Haus, H. A., Townes, C. H. and Oliver, B. M.,: Comments on Noise in Photoelectric Mixing, *Proc. IRE.*, vol. 50, pp. 1544-1546 (1962-06).
 - 30) Anderson, L. K.,: Photodiode Detection, *Proc. Symp. on Optical Maser*, Polytechnic Institute of Brooklyn, New York, pp. 549-566 (1963-04).
 - 31) Corcoran, V. J.,: Directional Characteristics in Optical Heterodyne Detection Processes, *J. Appl. Phys.*, vol. 36 pp. 1819-1825 (1965-06).
 - 32) Sakuraba, I. and Chida, H.,: Directivity of the Equivalent Resistance in Linear-Photoelectron-Beam Systems, Unpublished Work (1966-03).
 - 33) DiDomenico, M. Jr., Pantell, R. H., Svelto, O. and Weaver, J. N.,: Optical Frequency Mixing in Bulk Semiconductor, *Appl. Phys. Letters*, vol. 1, pp. 77-78 (1962-12).
 - 34) Morton, G. A., Matheson, R. H. and Greenblatt, M. H.,: Design of Photomultipliers for the Sub-Millimicrosecond Region, *Trans. PGNS-IRE.*, vol. NS-5, pp. 98-104 (1958-12).
 - 35) Gaddy, O. L. and Holshonser, D. F.,: A Microwave Frequency Dynamic Crossed-Field Photomultiplier, *Proc. IEEE.*, vol. 51, pp. 153-161 (1963-01).
 - 36) Wittwer, N. C.,: Fast-Rise Time (Less Than 10^{-10} secs.) Photomultipliers. Conference on Electron Device Research, Cornell University, Ithaca, New York (1964-06) (Unpublished Work).
 - 37) Miller, R. C. and Wittwer, N. C.,: High Speed Photomultipliers, 1965 IEEE International Convention Record, Part 5, pp. 7-16 (1965-03).
 - 38) Miller, R. C. and Wittwer, N. C.,: Secondary-Emission Amplification at Microwave Frequencies, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-1, pp. 49-59. (1965-04).

- 39) McMurtry, B. J.,: Microwave Phototube Design Considerations, Trans. PTGED-IEEE., vol. ED-10, pp. 219-226 (1963-07).
- 40) Caddes, D. E., McMurtry, B. J. and Jacquez, A. E.,: The Traveling-Wave Phototube, Part I; Theoretical Analysis, Trans. PTGED-IEEE., vol. ED-11, pp. 156-163 (1964-04).
- 41) Targ, R., Caddes, D. E. and McMurtry, B. J.,: The Traveling-Wave Phototube, Part II: Experimental Analysis, Trans. PTGED-IEEE., vol. ED-11, pp. 164-170 (1964-04).
- 42) Caddes, D. E.,: Ku-Band Microwave Phototube SYD 4300 (1965-08).
- 43) Sakuraba, I.,: Analysis of O-Type Photoelectron Beam Demodulators for Amplitude-Modulated Light Signals, Bulletin of the Faculty of Enging., Hokkaido University, Sapporo, Japan, No. 32, pp. 175-186 (1963-10) (In Japanese).
- 44) Sakuraba, I. and Rowe, J. E.,: Partial Conversion of Current Modulation in Linear-Photoelectron-Beam Systems, Trans. PTGED-IEEE., vol. ED-12, pp. 388-389 (1965-06).
- 45) Blattner, D. J., Johnson, H. C., Ruedy, J. E. and Sterzer, E.,: Lasecon: Microwave Phototubes with Transmission Photocathode, 1963 IEEE International Convention Record, Part 3, pp. 79-86 (1963-03).
- 46) Blattner, D. J., Johnson, H. C., Ruedy, J. E. and Sterzer, E.,: Design and Performance of Microwave Phototubes Using Transmission Electron Multipliers, 1963 Electron Devices Meeting, Washington, D. C.. (1963-10).
- 47) Blattner, D. J., Johnson, H. C., Ruedy, J. E. and Sterzer, F.,: Microwave Photomultipliers using Transmission Dynodes, RCA Review, vol. 26, pp. 22-41 (1965-03).
- 48) Sakuraba, I. and Rowe, J. E.,: Photodemodulation of Coherent Light Signals in Centrifugal Electrostatic Focusing Systems, Technical Report No. 75, Electron Physics Laboratory, Department of Electrical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor. Michigan (1964-09).
- 49) Lucy, R. F.,: An Experimental Photomixer Image Tube, Proc. IEEE., vol. 51, pp. 162-165 (1963-01).
- 50) Fisher, M. B.,: A Scannable Detector of Microwave-Modulated Light, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-1, pp. 37-42 (1965-04).