



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Photomixingにおける方向係数の一測定
Author(s)	小柳, 幸次郎; Koyanagi, Kojiro; 桜庭, 一郎 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 53, 159-169
Issue Date	1969-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40942
Type	departmental bulletin paper
File Information	53_159-170.pdf



Photomixing における方向係数の一測定*

小柳 幸次郎**

桜庭 一郎**

(昭和 43 年 11 月 30 日受理)

Measurement of Directivity Factors in Photomixing with Coherent Light

Kojiro KOYANAGI

Ichiro SAKURABA

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

(Received November 30, 1968)

Abstract

This paper deals with measurements of directivity factors in photomixing with coherent light.

In the case of unfocused light beams the directivity factor of a rectangular detector of sides a and b , $D(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2)$ is $4 \sin(pa/2) \cdot \sin(qb/2) / pqab$ and the directivity factor of a circular detector of radius ρ_0 is $D(\omega, \rho_0) = 2 J_1(\omega, \rho_0) / (\omega \rho_0)$. A comparison of calculated and experimental values was made with rectangular and circular detectors of MS 9 S, M 7316, M 7324 and M 7696 photomultipliers and LSD 39 B photodiodes in optical homodyne receivers and a good experimental comparison was obtained.

目 次

Abstract	159
1. 緒 言	159
2. 測定方法	161
3. 測定結果	162
4. 考 察	166
5. 結 論	168
参 考 文 献	169

1. 緒 言

コヒーレント光のヘテロダイン受信方式は、低雑音、良好な周波数選択性、さらに変換利得が存在するなどの利点を持つため、光通信の分野と、レーザの発振特性の測定などの測定技術

* 本論文は昭和 43 年 10 月 2 日の電気四学会北海道支部大会で講演した報告の詳細である。

** 電子工学科 電子管工学講座

の分野で、非常に興味を持たれている^{1),2)}。

しかるに Siegman や Harris および McMurtry によって指摘されたようにこの受信方式は、指向性が非常に鋭い²⁾。すなわち信号光ビームと局部発振光ビーム（以下局発光ビームと略称する）の間の位相差が、差周波数の光電子流を減少する。つまり両波の波面が、検波器表面上全体にわたって平行でなければ、表面上の異なった場所で生ずる光電子流の位相は互に異なり減少する。それ故局発光ビームが常に照射されている場合、信号光ビームを

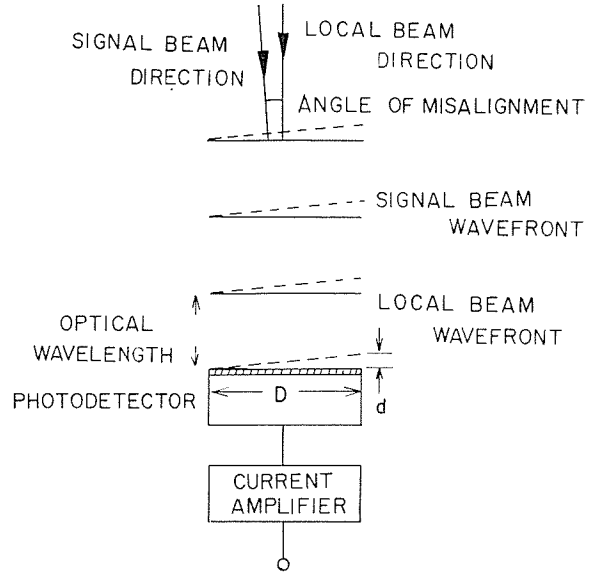


Fig. 1. Photomixing angular sensitivity.

能率的に検出し得る角度は、非常に鋭い範囲におさめる必要がある。例えば Fig. 1 のような場合、幅 $D=3\text{ mm}$ の一次元の検波面に波長 6000 \AA の局発光ビームが照射されている場合、検波面の他方の端からの出力電流が反対位相になる角度差 θ は $\lambda/2D$ で与えられ、 10^{-4} radian となる（これはまた出力半値幅を与える）。Read と Fried はこの欠点を除く一つの方法として、信号用光ビームをレンズで絞り Airy の円板を用いて、指向性がかなり緩和されることを示した³⁾。Corcoran は一次元の受光面に関する指向性の解析を与え、その緩和について論じた⁴⁾。また Lucy と Lang および Peters は、信号源自動追尾アンテナ方式を用いて、指向性を緩和した移動用光ヘテロダイン受信器を試作した⁵⁾。さらに Sakuraba と Tsubo は、一次元の検波面に関する方向係数の表示式が Fraunhofer の回折の結果と一致しているのに着目し、Corcoran の解析を矩形と円形の受光面に拡張して方向係数を求め、さらに両光ビームが非集束の場合と集束された場合の指向性を論じ、ホモダイン受信方式で実験的に確かめた⁶⁾。

すなわち面積 ab の矩形受光面を持つ非集束ヘテロダイン受信方式における方向係数 $D(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2)$ は

$$D(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2) = \left[4 \sin\left(\frac{pa}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{qb}{2}\right) \right] / pqab, \quad (1)$$

ここで

$$p = -k_1 \cos \theta_1 + k_2 \cos \theta_2, \quad (2)$$

$$q = -k_1 \cos \varphi_1 + k_2 \cos \varphi_2, \quad (3)$$

である。 k_1 と k_2 は二波のそれぞれの位相定数、 $\theta_1, \theta_2, \varphi_1$ と φ_2 の関係位置は Fig. 2 に示す。また半径 ρ_0 の円形受光面では

$$D(\omega, \rho_0) = 2J_1(\omega, \rho_0)/\omega\rho_0, \quad (4)$$

$$\omega^2 = p^2 + q^2 \quad (5)$$

で与えられる。

したがって本論文ではさらに多くの種類の受光面や受光面積をもった検波器で測定し、主輻射特性と副輻射特性を測定し得たので報告する^{7),8),9),10)}。

2. 測定方法

ビート周波数が X 帯域になるような適当な二台のレーザが教室にないため、また X 帯域光変調器も基本設計の段階にあるため、一台のレーザより発生する出力をスプリッタにより二つの光ビームにわけ、一方を局発光ビームとし、他方を信号光ビームとした。このようなホモダイン受信系は基本的には Mach-Zehnder 干渉計を利用したものであり、その概要を Fig. 3 に示した。まずスプリッタ S_1 によって分けられた信号光ビームは鏡 M_1 に向い、他方局発光ビームは鏡 M_2 に向う。信号光ビームは光減衰器 A を経て、約 1 kHz の機械的チョップで振幅変調される。つづいて、両光ビームは M_1 と M_2 で反射され、スプリッタ S_2 とスリット S_3 を経て検波器に入り photomixing を生ずるに至る。

測定の手順は、光路差の影響をなくするため、水銀ランプまたはナトリウムランプと白色光を併用して、局発光ビームと信号光ビームの光軸をあわせて、光路差を零とする。ホモダイン受信方式の場合、両光ビームによる photomixing の検波出力は、直接検波による出力を含んでいるから、実際の photomixing の出力は、局発光ビームをさえぎった場合の出力を差引いて得られる。またスリット S_3 と検波器表面との間隔は、検波素子によってはかなりの寸法となる。両光ビーム角度差は鏡 M_2 で作り、微小角は光でこで測定した。すなわちスプリッタ S_2 より出た光ビームを鏡で反射させ、photomixing が生じた後、レンズ系をレーザとスプリッタ S_1 との間に置き、鏡よりの反射光のスポットをスケール上に結ばせ、微小角を測定した。

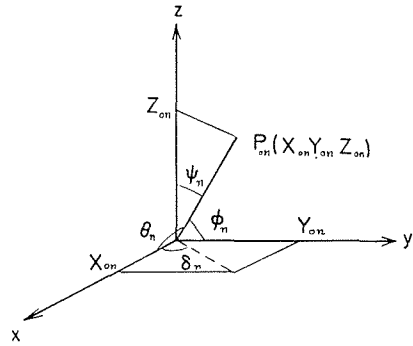


Fig. 2. A right-handed orthogonal system.

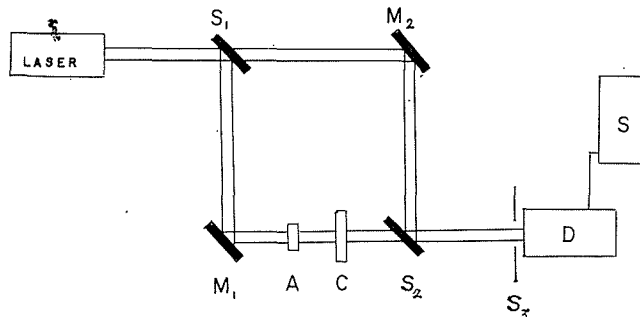


Fig. 3. Experimental setup.

検波出力は、シンクロスコープ DS 5305 の波形を撮影して測定し、検波素子は光電子増倍管 MS 9 S, M 7316, M 7324, および M 7696, さらに光ダイオード LSD 39 B と太陽電池 SS 201 を使用した。

3. 測定結果

光電子増倍管の受光面半径が、1 mm, 0.7 mm, 0.6 mm, 0.4 mm, 0.25 mm および 0.2 mm の場合の正規化した検波出力と角度差との関係を Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, および

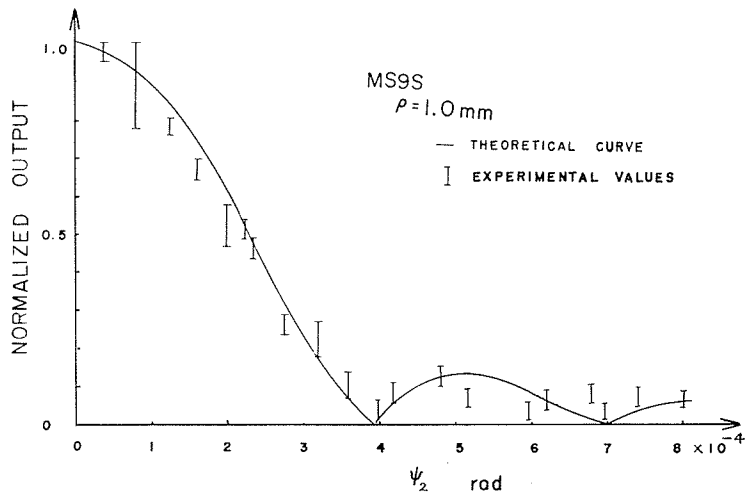


Fig. 4. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case in which the radius of the circular photosensitive surface is 1.0 mm and $\theta_1 = \varphi_1 = \pi/2$ and a MS 9 S photomultiplier is used.

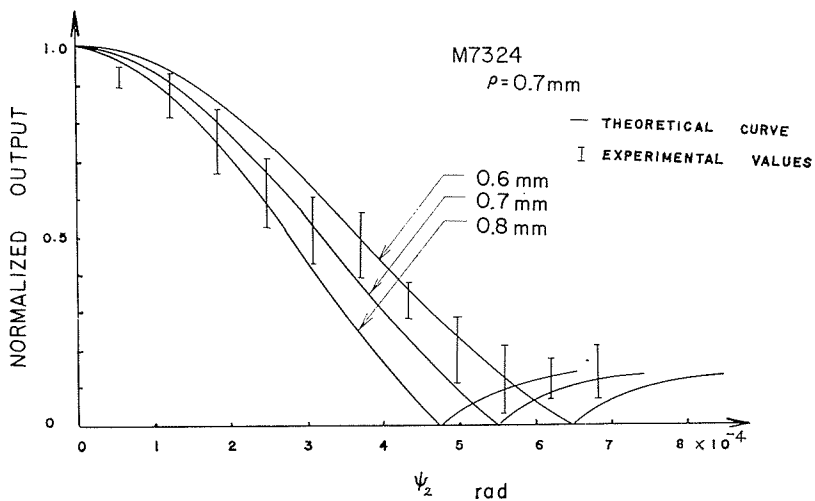


Fig. 5. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case in which the radius of the circular photosensitive surface is 0.7 mm and $\theta_1 = \varphi_1 = \pi/2$ and a M 7324 photomultiplier is used.

Fig. 9 に示した。Fig. 4 は MS 9 S (S4 陰極) を使用しており、副輻射特性まで測定されたが、理論値と実測値とがよく対応している。一つの理由は MS 9 S の使用法が簡便でかつ長年使いたれた電子管であるためと考えられる。Fig. 5 は M 7324 (S1 陰極) を使用したが、 $\rho=0.6\text{ mm}$ 、 0.7 mm および 0.8 mm の理論値もあわせて示している。受光面の半径が 0.7 mm であることの精度を考慮すると、Fig. 5 の結果は理論値と実測値とがよく対応していると判断される。Fig. 6 と Fig. 7 は円形受光面の半径が 0.6 mm と 0.4 mm の場合で M 7324 を使用している。

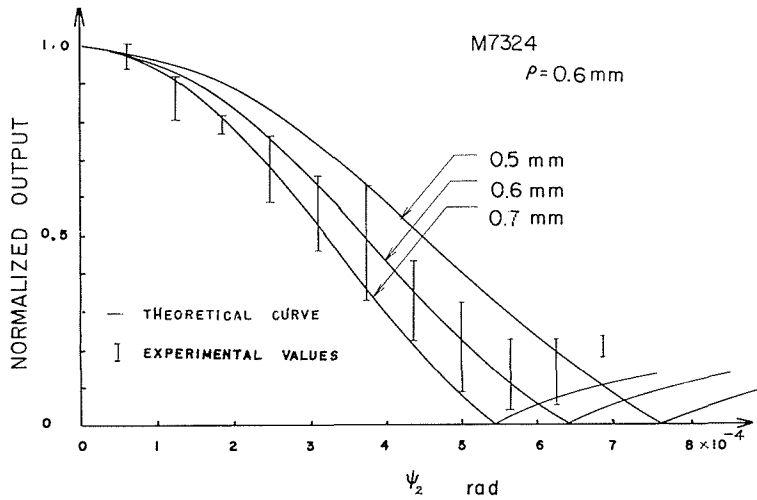


Fig. 6. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case in which the radius of the circular photosensitive surface is 0.6 mm and $\theta_1 = \varphi_1 = \pi/2$ and a M 7324 photomultiplier is used.

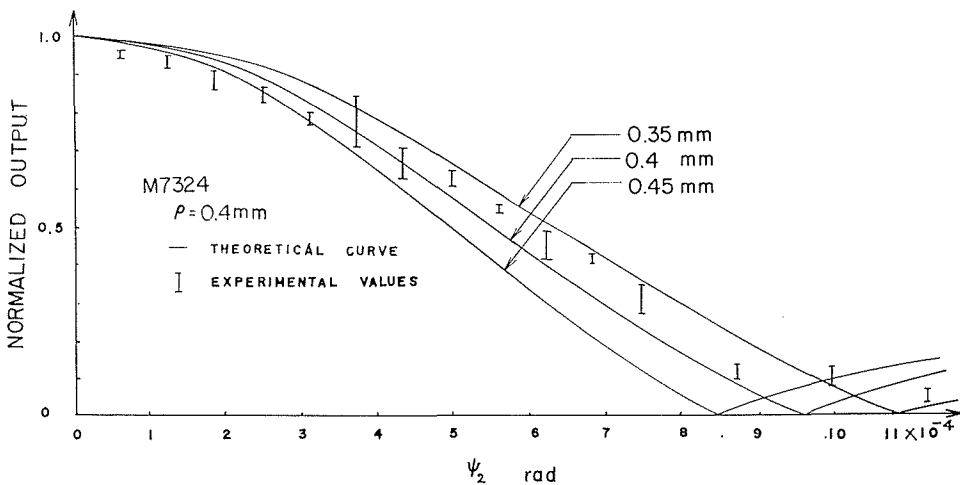


Fig. 7. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case where the radius of the circular photosensitive surface is 0.4 mm and $\theta_1 = \varphi_1 = \pi/2$ and a M 7324 photomultiplier is used.

0.05 mm ずつ変化した場合の理論曲線も示したが、理論値と実測値とがよく対応していると考えられる。Fig. 8 は受光面の半径が 0.25 mm の M 7316 (S1 陰極) であり、Fig. 9 は半径 0.2 mm の円形受光面を有する M 7324 を使用した。受光面積が小さくなると指向性が一般に緩和されるが、photomixing を得るためにかなりの困難を伴う。したがって実用上は受光面を大きめにとり、指向性緩和のための対策を必要とする。またこの面積の大きさは雑音特性からも考慮されるべきであると考えられる。受光面が矩形の場合の測定結果を Fig. 10, Fig. 11 および

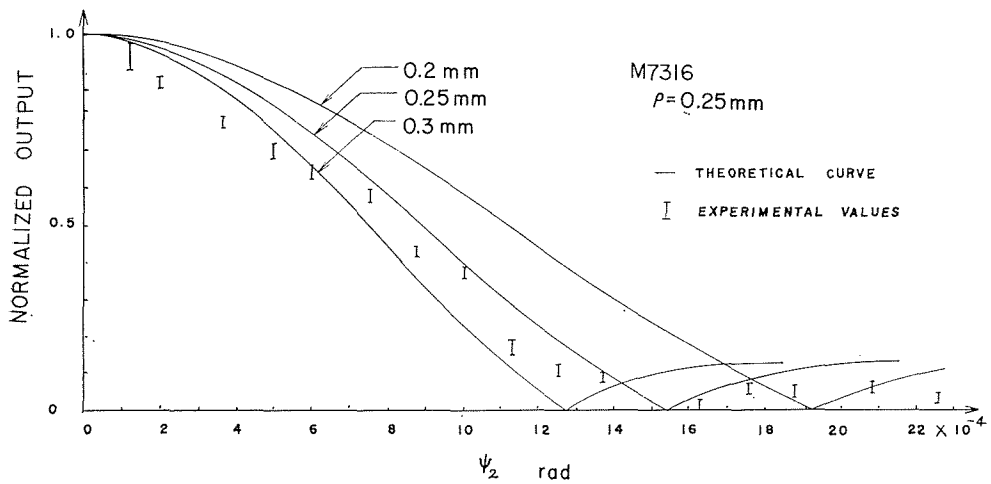


Fig. 8. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case where the radius of the circular photosensitive surface is 0.25 mm and $\theta_1 = \varphi_1 = \pi/2$ and a M 7316 photomultiplier is used.

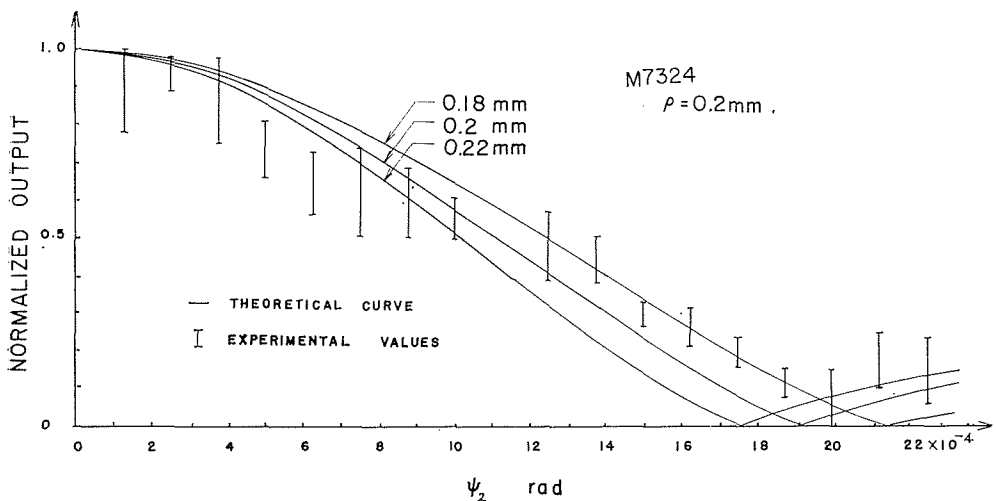


Fig. 9. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case where the radius of the circular photosensitive surface is 0.2 mm and $\theta_1 = \varphi_1 = \pi/2$ and a M 7324 photomultiplier is used.

Fig. 12 に示した。Fig. 10 は $a=1.3\text{ mm}$, $b=2.0\text{ mm}$ の受光面を持つ M 7696 (S 11 陰極) であり, Fig. 11 は $a=b=1.1\text{ mm}$ の受光面を持つ M 7696 であり, 実測値と理論値はよく対応していると考えられる。Fig. 12 は $a=b=2\text{ mm}$ の受光面を持つ光ダイオード LSD-39 B で測定した結果である。受光面積 4 mm^2 の理論値よりかなりはなれ, むしろ面積 1 mm^2 の計算値に対応している。この理由は, 受光面は 4 mm^2 であるが, 実際に photomixing が起きている PN 接合部の受光面積は明らかでなく, かなり小さいと考えられる。したがって PN 接合部における photomixing 作用は, レーザ光の偏波面や電界依存性などの点でさらに検討を要する。矩

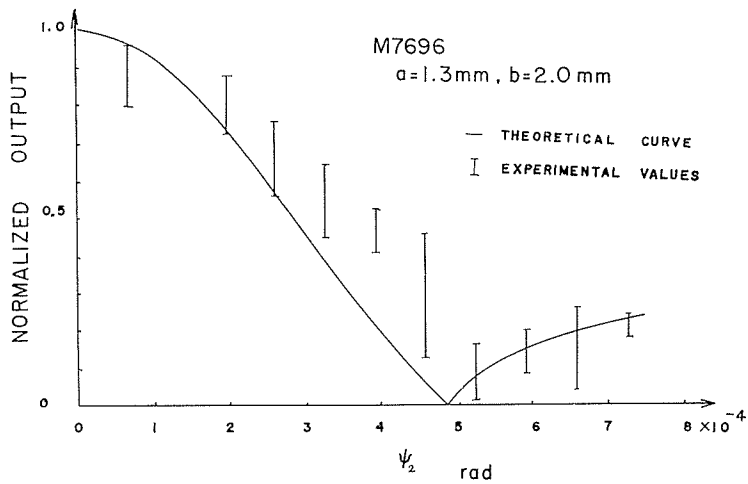


Fig. 10. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case where the rectangular detector of sides $a=1.3\text{ mm}$ and $b=2.0\text{ mm}$ and $\theta_1=\varphi_1=\pi/2$, $\delta_2=0$ and a M 7696 photomultiplier is used.

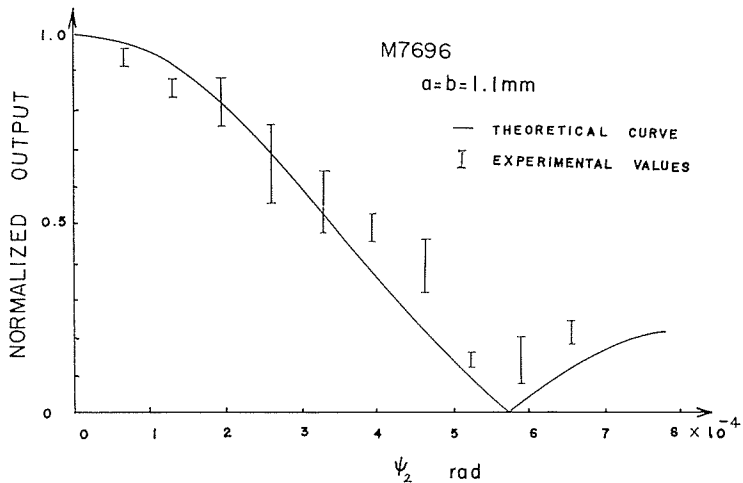


Fig. 11. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case where the rectangular of sides $a=1.1\text{ mm}$ and $b=1.1\text{ mm}$ and $\theta_1=\varphi_1=\pi/2$, $\delta_2=0$ and a M 7696 photomultiplier is used.

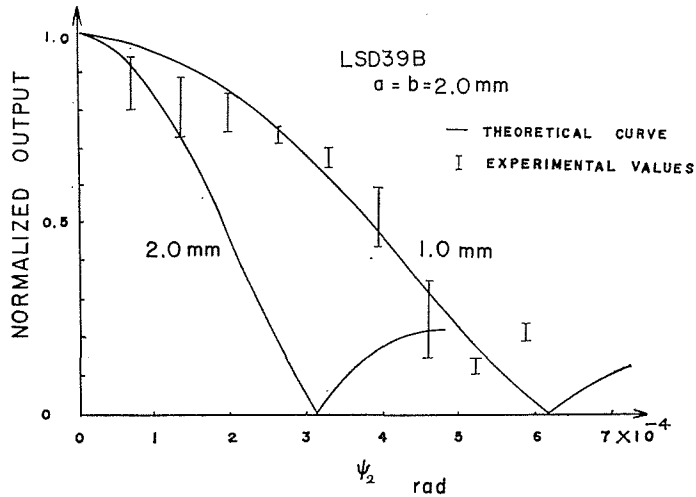


Fig. 12. Detected normalized output vs. angular mismatch in the case where the rectangular detector of sides $a=b=2.0$ mm and $\theta_1=\varphi_1=\pi/2$, $\delta_2=0$ and a LSD 39 B photodiode is used.

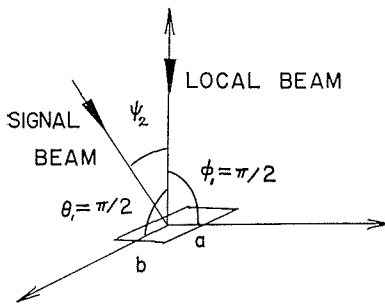


Fig. 13. Representation of detection with unfocused light in the case in which $\theta_1=\varphi_1=\pi/2$ and $\delta_2=0$.

形受光面における二つの光ビームの関係角度 δ_2 , ψ_2 , φ_1 および θ_1 は Fig. 13 に与えた。

4. 考 察

前節で述べた実験結果からつぎのような事項が考察される。

1. photomixing による検波電流は、信号光ビームの出力を一定とした場合、局発光ビームの出力を増加すれば、増すことが理論的に知られている。したがって信号光ビームの出力を一定とし、局発光ビームの出力を光減衰器により変化した場合の測定結果の一例が Fig. 14 で

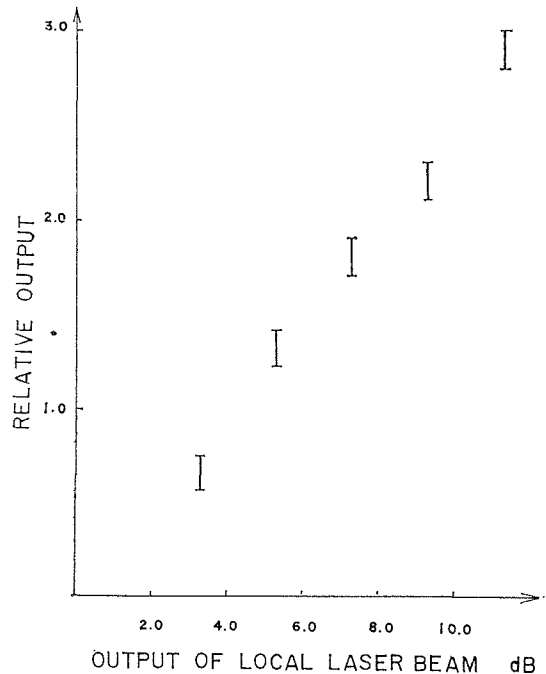


Fig. 14. Relative output vs. output of local laser beam.

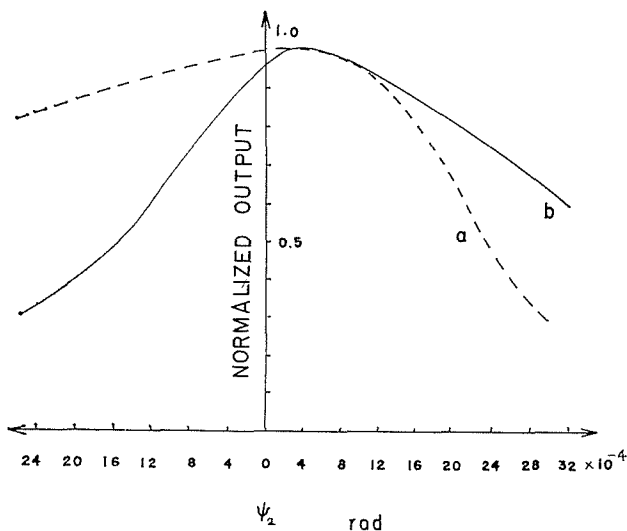


Fig. 15. The cosine characteristics of M 7696 photocathode; (a) without a slit, (b) with a slit of radius $\rho=2.0$ mm.

ある。これから光電面の外側では二波の干渉が、光電面内では photomixing 成分が生じていると判断される。

2. 直接検波における受光面と方向特性の関係を調べた一例を比較のため Fig. 15 に示した。光電面の前にスリット S_3 を置いた場合の結果も示してある。これらはよく知られている光電面の cosine 特性を与えており、出力半値幅もかなり広い。前節で述べた測定結果は、はじめに光路差零にした場合の photomixing による検波出力の方向特性であり、理論的に予想された値とよく対応している。(光路差は photomixing に直接影響ないが、干渉計を用いた実験のため、念のため光路差零に調整してから方向特性の測定に入った。)

3. 測定結果は理論値と実測値がよく対応していることを示しているが、実測値にはかなりのばらつきを生ずる。これはつぎのような原因によると考えられる。

(1) 微小角の測定に際し、スケール上のビームスポットにある程度の広がりがあり、位置を正確に読みとることが難しい。さらにスポットを結ばせるためのレンズ系の位置が不安定でスポットがかなりゆらぐことが多い。

(2) 実験室の床や実験台の微小振動により photomixing による検波電流にかなりのゆらぎを生じる。これはホログラフイの実験で経験する難しさとほぼ同じと考える。

(3) 振幅変調器として機械的チョッパを使用しているが、大気の大擾乱の原因となり、とくに photomixing の検波出力の最大値付近でその影響が大きい。

(4) シンクロスコープの波形を写真にとり検波出力を判定しているが、シャッターチャンスや判定方法にある程度誤差が入る。

(5) スリット S_3 の穴の寸法や形状は、小さい程厳密に決定することが困難で精度の高い

方法をさらに工夫すべきである。

4. 光電子増倍管を使用した実験では、比較的容易に行なわれた。これは光電面の量子効率の低いにもかかわらず、多段ダイノードを使用して出力電流が大であるためと考えられる。他方 1 GHz 用 PN 接合光ダイオードを使用した場合、量子効率大であるが出力電流少なく、思うようにデータが得られなかった。この原因はその後静特性を調べた結果、たまたま特性がきわめて不安定であることを知ったので現在検討中である。

5. 円形受光面の方向係数の計算値より、受光面の半径をパラメータとして主輻射特性を示すと Fig. 16 となる。したがって主輻射特性が零になる角度を ψ_0 とすれば、 $\psi_0 = 0.61 \lambda / \rho$ の関係が得られる。ここで λ はレーザ波長であり、 ρ は受光面半径である。また Fig. 4, 5, 6, お

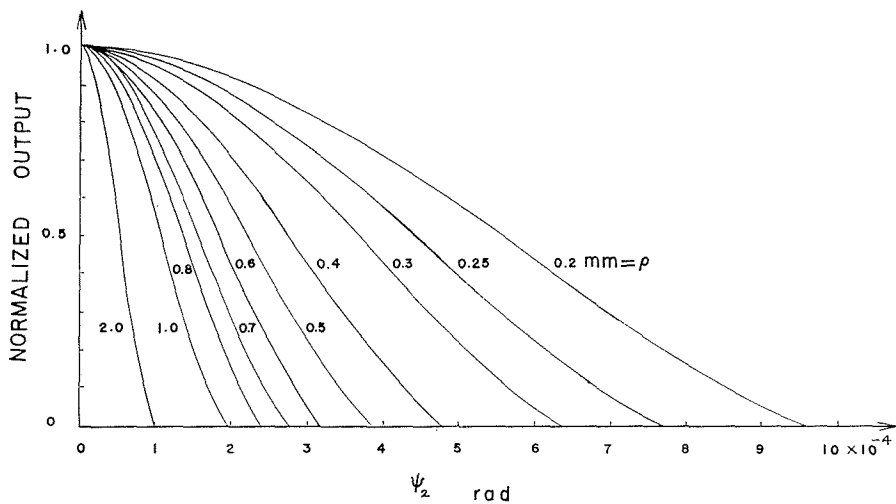


Fig. 16. Calculated normalized output vs. angular mismatch $\psi_2/2$ with the radius of photosensitive surface as parameter.

よび 8 の実測値よりもほぼこの値におちつく、他方 Siegman¹¹⁾ の提案している光ヘテロダインの系のアンテナ特性より求めると $\psi_0 \approx 0.57 \lambda / \rho$ となり、かなりよく対応していることを知る。

5. 結 論

非集束の局発光ビームと信号光ビームとの到来角度差による検波出力の低下、すなわち非集束の二光ビームによる photomixing における方向特性を、ホモダイン受信系で実験した結果つぎのような結果が得られた。

1. Sakuraba と Tsubo によって与えられた矩形受光面の方向係数 $D(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2)$ と、円形受光面の方向係数 $D(\omega, \rho)$ は実測値とよく対応することが確かめられた。
2. Siegman の主張する受光面の photomixing におけるアンテナ特性、つまり $\Omega A \approx \lambda^2$ の関係もほぼ満足されることを知った。

3. マイクロ波帯で応答する PN 接合部を用いた photomixing の特性は、受光面と偏波面との関係および検波出力の電界依存性、さらに走行時間の立場より検討する必要がある。

4. 集束された二つの光ビーム系の方向係数についても詳細な実験的検討を要する。

5. 周波数安定化した局発光ビームと X 帯域で変調された信号光ビームを用いた光ヘテロダイン受信方式で上記の実験をさらに検討すべきである。

6. 局発光ビームと信号光ビームの偏光面の関係と検波電流の関係も実験的に検討する必要がある。

おわりに輪講で討論下さった坪俊宏氏、千田正彦助手、また実験について御助言下さった福田長重助手、固体電子工学講座および電波応用工学講座の各位に感謝する。さらに電気四学会北海道支部連合大会（昭和 43 年 10 月 2 日）で討論下さった塚本信夫氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Forrester, A. T.: "Photodetection and Photomixing of Laser Outputs", Advances in Quantum Electronics, Columbia University Press, New York and London, pp. 233-238 (1961).
- 2) Siegman, A. E., Harris, S. E. and McMurtry, B. J.: "Optical Heterodyning and Optical Demodulation at Microwave Frequencies", Proc. Symp. on Optical Maser, Polytechnic Institute of Brooklyn, New York, pp. 511-527 (1963-4).
- 3) Read, W. S. and Fried, D. L.: "Optical Heterodyning with Noncritical Angular Alignment", Proc. IEEE., Vol. 51, p. 1787 (1963-12).
- 4) Corcoran, V. J.: "Directional Characteristics in Optical Heterodyne Detection Processes", J. Appl. Phys., Vol. 36, pp. 1819-1825 (1965-6).
- 5) Lucy, R. F., Lang, K., Peters, C. J. and Duval, K.: "Optical Heterodyne Receiver", Applied Optics, Vol. 6, pp. 1333-1342 (1967-8).
- 6) Sakuraba, I. and Tsubo, T.: "Directional Characteristics and Forms of the Detector Surface in Optical Heterodyne Detection Processes", Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University, No. 56, (to be published).
- 7) 桜庭一郎: "Photomixing と光電子ビーム復調器", 北海道大学工学部研究報告, 第 41 号, pp. 95-120 (1966-8).
- 8) 桜庭一郎・千田博之: "光ヘテロダイン検波における O 型進行波光電管の方向特性", 北海道大学工学部研究報告, 第 44 号, pp. 59-66 (1967-9).
- 9) 坪 俊宏・桜庭一郎: "光ヘテロダイン検波における受光面と方向特性", 電気四学会北海道支部連合大会講演, No. 2-4 (1967-10).
- 10) 小柳幸次郎・坪 俊宏・桜庭一郎: "Photomixing における指向性の一測定", 電気四学会北海道支部連合大会講演, No. 101 (1968-10).
- 11) Siegman, A. E.: "The Antenna Properties of Optical Heterodyne Receivers", Proc. IEEE, Vol. 54, pp. 1350-1356 (1966-10).