

TR-O-0105

23

光/ミリ波無線リンクシステムの設計と構築

川村 博史

1996. 3. 1

ATR光電波通信研究所

光/ミリ波無線リンクシステムの設計と構築

目次

1	はじめに	1
2	光/ミリ波無線リンクの概要	2
3	システム設計	4
3.1	概要	4
3.2	アナログ通信	4
3.3	デジタル通信	6
3.4	システム全体	7
4	光区間検討	9
4.1	電気/光変換および光/電気変換の用語	9
4.1.1	電気/光変換に関する用語	9
4.1.2	光/電気変換に関する用語	12
4.1.2.1	受光器一般	12
4.1.2.2	トランスインピーダンスアンプ	13
4.1.2.3	受光器のC/Nについて	15
4.2	光変調器	18
4.2.1	LiNbO ₃ Mach-Zehnder型光変調器諸特性	18
4.2.1.1	諸特性解析	18
4.2.1.2	実測結果	21
4.2.2	高効率化の検討	27
4.2.3	高線形化	31

4.3	受光器	38
4.3.1	概論	38
4.3.2	PD特性測定結果	41
4.3.3	高効率化の検討	42
4.3.3.1	HPT	42
4.3.3.2	トランスインピーダンスアンプ	44
4.3.3.2.1	トランスインピーダンスアンプの設計	44
4.3.3.2.2	特性評価	50
4.3.3.2.2.1	MSM-PD単体	50
4.3.3.2.2.2	アンプ	52
4.3.3.2.2.3	受光器全体	53
4.3.3.2.3	考察	55
4.4	光区間全体	55
4.4.1	概要	55
4.4.2	光区間諸特性実測結果	56
4.4.3	光ファイバの分散の影響	57
5	空間伝搬	60
6	システム総合評価	65
6.1	概要	65
6.2	波長多重の構成	66
6.3	システム評価	66
6.4	考察	69
7	まとめ	75
	謝辞	75
	資料	76
	主要な参考図書および文献	76
	部品購入について	82
	成果	86

図索引

図 1	光/ミリ波無線リンクを用いた通信網の将来像	3
図 2	光/ミリ波無線システム構成図	4
図 3	視感度補正用ウエイティング曲線	5
図 4	各変調方式におけるBERのC/N依存性(理論値)	7
図 5	QPSK同期検波におけるBERのC/N依存性	7
図 6	光強度変調	9
図 7	微分量子効率	10
図 8	LN-EOMの静特性	10
図 9	進行波型変調器の変調の様子	11
図 10	EA-EOMバンド構造	12
図 11	EA-EOM光吸収特性	12
図 12	負帰還アンプを用いたトランスインピーダンスアンプ	14
図 13	DFBレーザの相対強度雑音	15
図 14	受光器	16
図 15	ショット雑音、RINの光起電流依存性	17
図 16	ショット雑音+RINの光起電流依存性	17
図 17	受信電力、雑音電力の入力抵抗依存性	18
図 18	アンプの雑音=受光器の雑音となる入力抵抗の光起電流依存性	18
図 19	ベッセル関数	20
図 20	IM3の誘導位相依存性	21
図 21	LN-EOMのDCドリフト	22
図 22	最適バイアス電圧と平均光強度の入力電力依存性	22
図 23	基本波および3倍高調波強度の位相変化量依存性	23
図 24	2 tone法による光変調器特性評価システム構成図	24
図 25	LN-EOMの変調特性の周波数依存性	25
図 26	LN-EOM S21特性	25
図 27	LN-EOMの44 GHzにおけるIM3特性	26
図 28	LN-EOMの49 GHzにおけるIM3特性	26
図 29	IM3により生じるcomposite数のチャンネル数依存性	27
図 30	定在波による光の変調	28
図 31	定在波変調LN-EOMシミュレーション等価回路	29
図 32	定在波位置による電圧振幅の変化	30

図 33	変調度の定在波位置依存性	30
図 34	変調度周波数依存性	30
図 35	変調度の電気電導度依存性	30
図 36	EA-EOM等価回路	31
図 37	変調特性の周波数依存性	31
図 38	光信号の光学的減算の様子	32
図 39	導波路を用いた光学減算器と計算式	32
図 40	高線形EOMのC/Nの分岐比依存性	34
図 41	高線形EOMの信号強度の変調度依存性	34
図 42	高線形EOMのC/Nの変調度依存性	34
図 43	高線形EOMの最適分岐比の変調度依存性	34
図 44	最適分岐比での光信号の様子	35
図 45	最適分岐比でのC/Nの位相依存性	36
図 46	IM2の変調度依存性	37
図 47	IM2のC/N依存性	37
図 48	MSM-PDの構造とバンド構造	38
図 49	PIN-PDの構造とバンド構造	39
図 50	各種PDの受光特性	42
図 51	各種PDの周波数特性	42
図 52	コレクタ電流、電流利得のベース電流依存性	43
図 53	各種受光器比較	43
図 54	電流利得の光入力依存性	43
図 55	各種受光器周波数特性比較	43
図 56	HPTの周波数特性の入力電力依存性	44
図 57	HPTの周波数特性の光強度依存性	44
図 58	受光素子のSパラメータの周波数依存性	45
図 59	受光感度の入力抵抗依存性	45
図 60	帯域の入力抵抗依存性	47
図 61	MSM-PD等価回路	47
図 62	MSM-PD複素共役インピーダンス とアンプ入力インピーダンス	47
図 63	トランスインピーダンスアンプ回路図	48
図 64	MSM-PDの構造	50
図 65	MSM-PD顕微鏡写真	50
図 66	MSM-PDの受光特性	51

図 67	Fittingに用いた等価回路	51
図 68	MSM-PD Sパラメータ	51
図 69	実素子の等価回路	51
図 70	アンプのSパラメータ (設計時)	52
図 71	アンプのSパラメータ (実測値)	52
図 72	アンプの入出力特性	52
図 73	トランスインピーダンスアンプチップ写真	53
図 74	光応答測定系	53
図 75	トランスインピーダンスアンプとMSM-PD単体の周波数特性	54
図 76	TIAとMSM-PD単体の信号入力依存性	54
図 77	TIAとMSM-PD単体の光強度依存性	54
図 78	実測MSM-PD S11とTIA入力インピーダンス (シミュレーション値)	55
図 79	MSM-PDとTIA間の信号伝達量	55
図 80	リンク特性の信号入力依存性 (1)	57
図 81	リンク特性の光強度依存性 (1)	57
図 82	リンク特性の信号入力依存性 (2)	57
図 83	リンク特性の光強度依存性 (2)	57
図 84	受信電力の伝送距離依存性	60
図 85	無線基地局アンテナ設置法	61
図 86	ホーンアンテナのビーム特性	62
図 87	受信電力の距離依存性	62
図 88	アンテナ利得のビーム幅依存性	63
図 89	モデルシステム構成図	65
図 91	評価S/Nの伝送距離依存性	67
図 92	BER特性の受信C/N依存性	68
図 93	復調器入力スペクトル (1)	69
図 94	復調器入力スペクトル (2)	69
図 95	アイパターン	69
図 97	変調器出力スペクトル (1)	71
図 98	変調出力スペクトル (2)	71
図 99	ロールオフフィルタ遅延特性	71
図 100	140 MHzバンドパスフィルタ遅延特性	71
図 101	等価C/N劣化量の振幅歪み依存性	72
図 102	等価C/N劣化量の遅延歪み依存性	72

図 103	BER特性の振幅歪み依存性	72
図 104	BER特性のIM3依存性	73
図 105	各種劣化によるBER特性の変化	74
図 106	MilliWave社製HPA特性 (1)	82
図 107	MilliWave社製HPA特性 (2)	82
図 108	MilliWave社製LNA特性 (1)	82
図 109	MilliWave社製LNA特性 (2)	82
図 110	HP83050A特性 (1)	83
図 111	HP83050A特性 (1)	83
図 112	HP83051A特性 (1)	83
図 113	HP83051A特性 (2)	83
図 114	Spacek社製down converter特性 (1)	84
図 115	Spacek社製down converter特性 (2)	84
図 116	Spacek社製up converter特性 (1)	84
図 117	Spacek社製up converter特性 (2)	84
図 118	Spacek社製up converter特性 (2)	84
図 119	Insulated Wire社製ケーブル特性	85

1 はじめに

近年、コンピュータの高速化や動画像を含んだマルチメディアの普及などにより高速データ通信の重要性が高まっている。LANの世界ではEthernetが10 Mbpsから100 Mbpsに高速化され、デジタル通信のバックボーンではSDH (Synchronous Digital Hierarchy) で156 Mbps、光ファイバ通信では10 Gbpsあるいは20 Gbpsと高速化されている。また、動画伝送を考えた場合、MPEG2では4 Mbps～60 Mbps、デジタルHDTVで60 Mbps程度の速度が必要である。

一方で携帯電話の爆発的な普及にも見られるように通信の無線化も極めて重要である。移動体通信を用いることにより情報収集効率が非常に高まるため、現在問題となりつつあるホワイトカラーの生産性の向上が期待される。オフィスなどのネットワークのように半固定で使用する場合にも無線化することにより、組織変更などに柔軟に対応でき極めて魅力的である。

従って、近い将来には完全な動画の携帯テレビ電話や超高速ワイヤレスLANなどの高速の無線通信システムが必要になり、その伝送速度は100 MbpsあるいはATMに対応できる156 Mbps程度になると考えられる。

そのような通信を実現するために、ATRでは光/ミリ波無線リンクを提案してきた¹。ミリ波/無線リンクは光ファイバで直接ミリ波伝送を行い、町中に多数設置された無線基地局で光/ミリ波変換を行いミリ波を空間に放射して無線通信を行う。光ファイバの低損失性を用いて長距離のミリ波伝送を行い無線区間では伝送されてきたミリ波をそのまま使用することにより、多数必要となる無線基地局の単純化ができる。その研究をさらに推し進め、システムの実現性を実証するために、モデルシステムを構築した。

本モデルシステムは電話局に対応する制御局に2つの無線基地局、2つの携帯局の構成とした。また、伝送信号としては、FM変調のアナログ画像信号(上り: 43.95 GHz/下り: 48.55 GHz)と、QPSK変調の120 Mbpsのデジタル画像信号(下り: 43.65 GHz)の2種類の信号形式を用いた。

本テクニカルレポートはモデルシステム構築のためのシステム設計とシステム性能向上のための検討をまとめたものである。

本レポートでは新規研究内容だけでなく基礎的なことから網羅できるように心掛けた。各種文献や教科書等も数多く参照しているので参考にさせていただきたい。また、途中の計算や理論等は間違い等も含まれると思われるので、重要な計算を行う場合にはもう一度教科書等で確認していただきたい。

¹ 小川博世、他、"光ファイバを用いたミリ波信号フィード系の検討", 信学技報 OCS91-66, 1991/11

2 光/ミリ波無線リンクの概要

高速データ通信を実現するためには広帯域が必要となる。広帯域と無線を両立できる手段として電波による通信と光による通信を考えることができる。

電波による通信ではミリ波を用いることが不可欠となる。例えばQPSK変調を用いて100 Mbpsのデータ伝送を行うためには、1チャンネル当り約50 MHzの帯域が必要となり、10チャンネルでも500 MHz以上の帯域が必要となる。このような帯域を許容するためには、非常に高い周波数、即ちミリ波(周波数:30~300 GHz, 波長:1~10 nm)を用いることが不可欠である。

表1にミリ波通信と光空間通信の長所、短所をまとめる。

表1 ミリ波通信と光空間通信の比較

	長所	短所
ミリ波通信	<ul style="list-style-type: none"> ・伝送信号の帯域が小さいために設計が比較的容易 ・ほこりや霧などの影響を受けにくい ・壁などによる回折および挿入による損失、空間伝搬における損失が大きい ・ためセル間の干渉が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・無線で伝送するために高速な変復調器が必要 ・マルチパスの影響が大きい ・空間伝搬および同軸ケーブルの損失が大きい ・ため長距離伝送が困難
光空間通信	<ul style="list-style-type: none"> ・ベースバンド伝送が可能なので、変復調不要 ・直接光のみによる見通し通信を行うので、セル間の干渉が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・光学系のほこり、汚れ等の影響が大きい ・送受間の損失が大きい ・受光素子の感度が低い

上表について少し補足をする。

光通信の場合にはほこりや紙などの通信を遮断する要因が数多く存在することが問題である考えられている。しかし、ミリ波信号も回折損が大きいため見通し通信が不可欠であり、紙などによる通信品質の劣化は小さいものの、人間あるいはオフィスなどで用いられているパーティション等による通信品質の劣化は無視できない。また、ミリ波での高速通信ではマルチパスの問題を解決することが極めて重要である。

このような状況においても移動体通信でミリ波通信が重要であると考えられる理由は、アンテナの性能によるところが大きい。アンテナ(光通信の場合には発光器と受光器)の感度は、波長の2乗に反比例するため、ミリ波の1/10³の波長を持つ光はアンテナの感度が原理的に60 dB程度悪い。したがって、受信レベルの低下を補うためにアンテナ利得を高めることが必要である。アンテナ利得を高くするためにはアンテナのビーム幅が小さくするか伝送距離を短くしなければならない。アンテナのビーム幅が狭くなるとアンテナの設置が極めてシビアになる。実際にミリ波通信で用いられるアンテナのビーム幅は数10度であるのに対し、光通信では2~3度であることが多い。現在ビクター等から市販されている光高速通信装置でも、発光器と受光器の自動アライメント装置が付けられている。したがって現状では、非常に近距離(数10 cm)か手間の掛かるアライメントを許容できる半固定通信にしか光通信を用いることができない。このような理由により現在の携

帯電話のようなパーソナル通信ではやはりミリ波通信が最適であると考えられる。

さて、無線にはミリ波を用いることが最適であることがわかったが、ミリ波と言えども周波数資源は有限なので、現在の携帯電話で用いられているようなマイクロセルあるいはピコセルを用いて周波数を繰り返し利用することにより周波数の利用効率を高めなければならない。このようなセル構造を取るためには各セルまでミリ波信号を運ぶことが必要である。残念ながらミリ波では、表皮効果による抵抗損と誘電体損が大きくなるため同軸ケーブルのロスが大きく(数dB/m)同軸で伝送することは困難である。また、導波管を用いた場合には比較的low損失での伝送が可能であるが、敷設コストが非常に高くなるため現実的ではない。また、各セルまでマイクロ波などの比較的low周波数で伝送し、各セルの送受信機(以下無線基地局と呼ぶ)でミリ波に変換して放射する構成も考えられるが、多数必要な無線基地局にそれぞれ周波数変換のための装置が必要となる。また周波数の変更などが困難になるなどデメリットが多い。そこで、低損失の光ファイバを伝送媒体にすることを提案してきた。これは、制御局でレーザーの光をミリ波で強度変調して無線基地局まで伝送し、無線基地局で光/ミリ波変換を行って放射するものである。このような構成を用いることにより、1)無線基地局の構成が単純になり、小型軽量化、低コスト化ができる、2)各無線基地局から放射される周波数、変調方式等をすべて制御局で設定することが可能となるため、将来の新しい方式に柔軟に対応できる、3)ミリ波を用いる場合には現在既に敷設されているデジタル伝送用の光ファイバにミリ波信号を多重することにより既存の設備を利用でき、システム全体の低コスト化が可能などの利点が生じる。将来像を図1に示す。

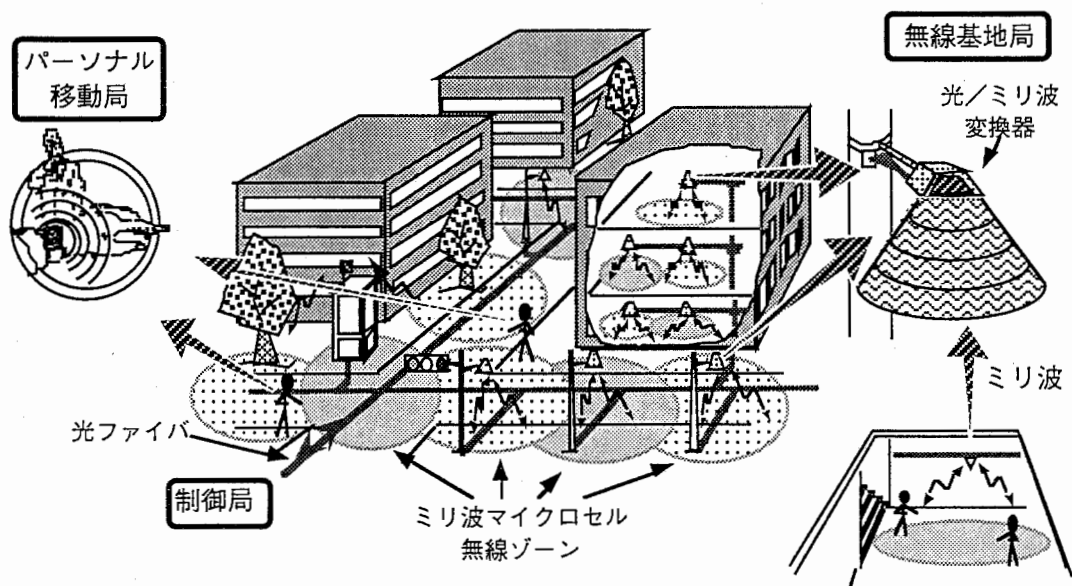


図1 光/ミリ波無線リンクを用いた通信網の将来像

3 システム設計

3.1 概要

まず最初に将来予想されるシステム構成を図2に示す。図に示されているシステムでは、無線基地局間は波長多重を行い、移動局間および上り/下り回線間は周波数多重を行っている。最終的な多重方法としてこの方法が適切かどうかはまだ検討を行っていない。特に、波長多重を行うためにはレーザーの正確な波長制御が必要となり、さらに、無線基地局数を増やすためには狭帯域の光フィルタが必要になる。また、上り回線でもミリ波を使用しているが、上り回線のデータ速度を要求しないアプリケーションでは、低い周波数を用いることも可能である。

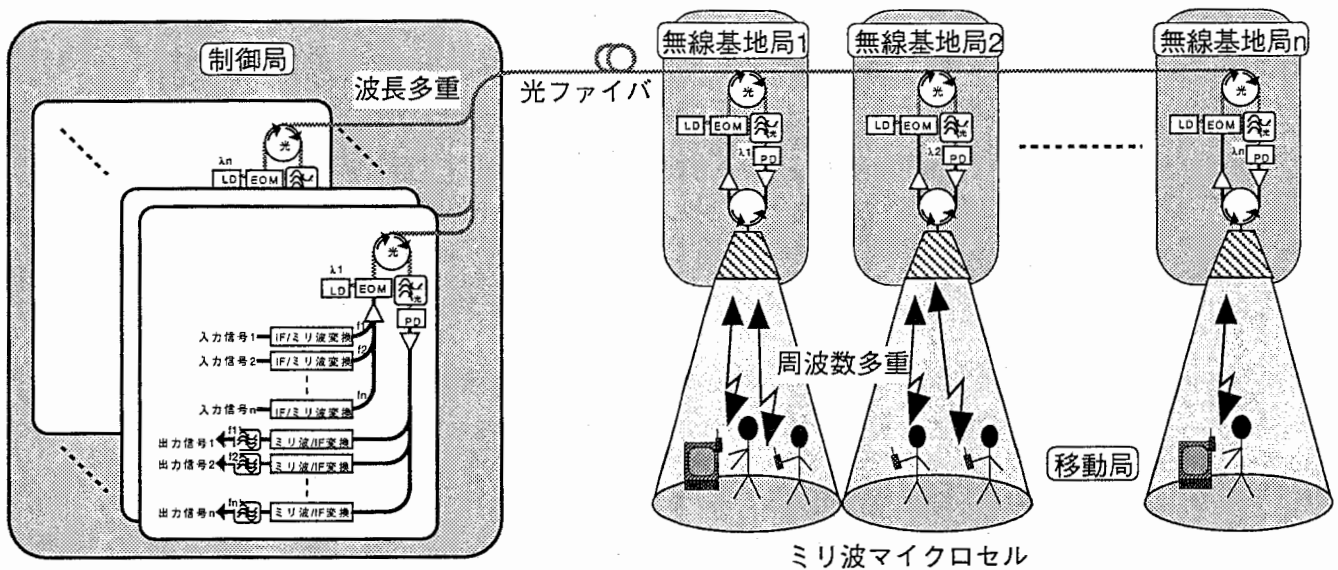


図2 光/ミリ波無線システム構成図

本研究では、図2に示す構成の一部を構築し、その実現性の実証と問題点の抽出を行った。

システムの性能を示す指標として、アナログ信号であればS/N、デジタル信号であればビットエラーレート (BER) が考えられる。このシステムは、ミリ波を用いて大容量のデータ伝送ができることが特長であるので、アナログ信号として、FM変調による画像伝送、デジタル信号として、100 Mbps以上のデータをQPSKで伝送することを考えた。

3.2 アナログ通信

まず、アナログの画像伝送から考える。画質評価の指標として評価S/Nというものが存在する。評価S/Nは、人間の感覚上のS/Nを示すもので、人間が周波数の高い雑音成分に比較的鈍感であるという視感度補正

をNTSC信号のS/Nに行ったものである²。その補正曲線を図3に示す。この補正により、帯域内での雑音が均一であれば、信号帯域4.2 MHzでは評価S/NはNTSC信号のS/Nに対して6.7 dB良い値となる(全体を積分することで計算できる)。

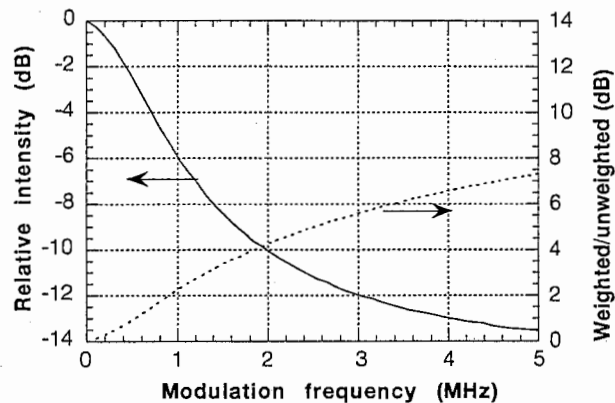


図3 視感度補正用ウエイティング曲線

さて、このような評価S/Nを用いたシステムの目標値として、昭和42年度電技審答申より、望ましい性能として40 dB以上とされている³。また、放送局などで使用される映像素材伝送としては60 dB程度が要求されているが、今回のシステムでは無線を用いた移動体通信で、一般ユーザが携帯通信として使用することを想定しているため、それほど高い画質は求められないと考え、評価S/Nの目標値を40 dBとした。実際に画面を見た感じでは評価S/N = 40 dBは比較的良好であり、45 dB以上であれば画質劣化は全く感じられない。

次にS/NとC/Nの関係を導き出すことが必要である。FM変調のC/NとS/Nの関係は、

$$\frac{S}{N} = \frac{0.51\Delta f^2 \cdot B}{f_h^3} \cdot \left(\frac{C}{N}\right)$$

Δf : 周波数偏移(Hz)

B : 受信帯域幅(Hz)

f_h : 変調する映像信号の最高周波数(Hz)

で表される⁴。FM変調器として使用するPasolinkの $\Delta f = 8 \text{ MHz}_{p-p}$ 、 $B = 36 \text{ MHz}$ 、 $f_h = 4.2 \text{ MHz}$ を代入すると、 $S/N = 15.9 C/N$ となり、S/NはC/Nに比べて12 dB改善される。また、ミリ波通信では十分な帯域が確保できるので、周波数偏移を大きくすることにより、さらにS/Nを改善することができる。例えば、現在の衛星放送で用いられている $\Delta f = 17 \text{ MHz}_{p-p}$ 、 $B = 27 \text{ MHz}$ 、 $f_h = 4.5 \text{ MHz}$ を代入すると、C/Nに対してS/Nが21 dB改善される。更に、FM伝送には三角雑音が存在するため、その影響を軽減するためにエンファシスをつける。

² 例えば"NHKテレビ技術教科書", 下巻, p. 162, 日本放送出版協会

³ 例えば"NHKテレビ技術教科書", 下巻, p. 3, 日本放送出版協会

⁴ 例えば"NHKテレビ技術教科書", 下巻, pp. 27-29, 日本放送出版協会

Pasolinkのエンファシスによる改善度は不明であるが、衛星放送の場合が2.9 dBなので、Pasolinkのエンファシス量も2.9 dBとすると、

$$\text{評価S/N (dB)} = \text{C/N (dB)} + 21.6 \text{ (dB)}$$

となる。従って、評価S/N = 40 dBを目標とした場合には、C/N > 18.4 dB/帯域が必要となる。

3.3 デジタル通信

次にデジタルの場合には、BERとしてワイヤレスLANの仕様値である 10^{-5} を目標とする。

同期検波を用いた場合の各種変調方式でのBERのC/N依存性は誤差補関数erfcを用いると次のように示される⁵。ただし、 $K^2 = \text{C/N}$ 。

$$\text{BER}_{\text{ASK}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{K}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\text{BER}_{\text{BPSK}} = \frac{1}{2} \text{erfc} (K)$$

$$\text{BER}_{\text{QPSK}} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{K}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\text{BER}_{16\text{QAM}} = \frac{3}{8} \text{erfc} \left(\frac{K}{\sqrt{10}} \right)$$

$$\text{BER}_{64\text{QAM}} = \frac{7}{24} \text{erfc} \left(\frac{K}{\sqrt{42}} \right)$$

$$\text{BER}_{256\text{QAM}} = \frac{15}{64} \text{erfc} \left(\frac{K}{\sqrt{170}} \right)$$

今回のシステムでは、QPSKの同期検波を用いるので、BER= 10^{-5} となるC/Nは12.5 dB/帯域となる(図4, 5)。実際には、モデムでの信号劣化や、通信経路での理論で考慮されている以外の劣化により、実際に必要なC/Nは数dB大きくなり、15 dB程度は必要となる。

⁵ 例えば「デジタル無線通信」, 室谷正芳, 山本平一著, p. 34, 産業図書

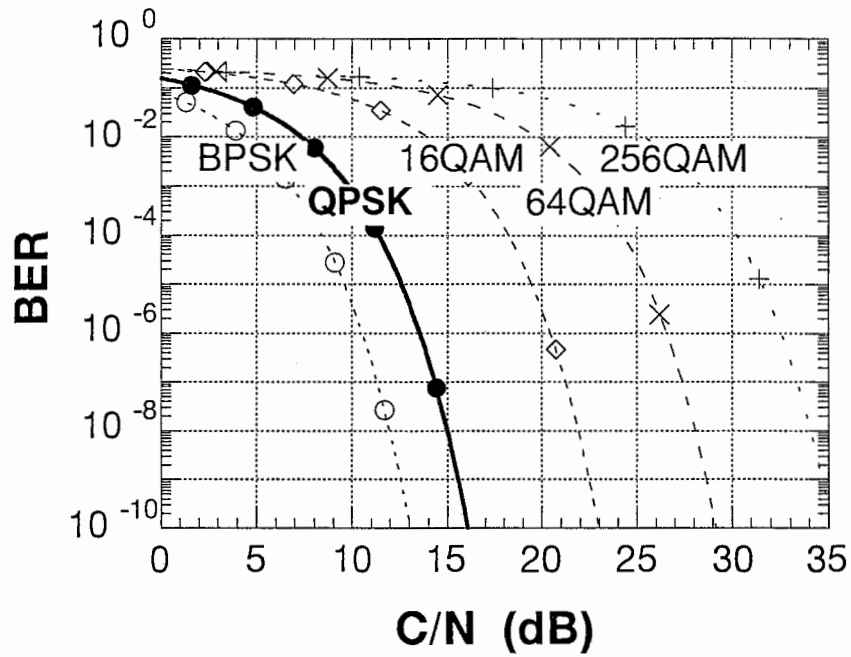


図4 各変調方式におけるBERのC/N依存性(理論値)

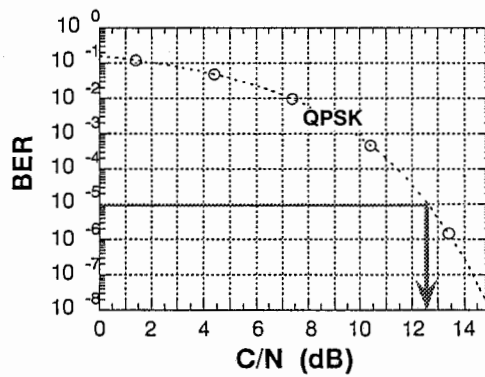


図5 QPSK同期検波におけるBERのC/N依存性

3.4 システム全体

アナログ信号とデジタル信号の両者を同時に伝送できるシステムを考えた。システム全体の性能は両者の厳しい方の仕様を満足しなければならない。アナログ信号とデジタル信号は伝送帯域幅が異なるため帯域幅に依存しないC/N比較方法として、キャリアの全電力と1 Hz当りの雑音電力の比を考える。

まずFM画像伝送では、3.2章で述べたようにC/N > 18.4 dBが必要である。Pasolinkでは受信帯域幅が36 MHzである⁶。従って、1 Hz当りの雑音電力はキャリア全電力に対して94 dB以下にすることが必要であ

⁶ Pasolink取り扱い説明書, p. 17, No. 7 定格・性能. オプションの項

る。

次にQPSKデジタル伝送では、前章で述べたように $C/N > 15$ dBが必要である。ロールオフフィルタにより帯域制限しているため受信帯域幅はシンボルレートと同じ値となる。今回のシステムの伝送速度はNTSC信号をPCM化した118 Mbpsなので、QPSK変調ではシンボルレートは59 Mbpsである。従って、受信帯域幅は59 MHzとなり、1 Hz当りの雑音電力はキャリア全電力に対して93 dB以下にすることが必要である。

この結果を比較するとアナログFM伝送がC/N的には1 dB程度厳しくなるため、アナログ伝送のC/Nを満足するようにシステム設計を行わなければならない。

C/Nを直接的に劣化させる雑音源はミリ波/マイクロ波ではショット雑音と熱雑音である。ショット雑音と熱雑音は、それぞれの素子(アンプ、ミキサなど)のNFにより容易に計算できる。モデムの出力部では $C/N > 50$ dBが満足されているので、伝送経路中の伝送損失の大きな個所で、信号が雑音に埋もれる事を防がなければならない。伝送経路中で大きな伝送損失を発生させる箇所として、1)空間伝送部、2)ミリ波/光変換部が存在する。

4 光区間検討

4.1 電気/光変換および光/電気変換の用語

光と電気の変換部ではそれぞれ特有の用語があり、また、同じ用語でも光信号の定義と電気信号の定義で値が大きく異なるものがあるのでそれらを簡単に説明しておく^{7,8}。

4.1.1 電気/光変換に関する用語

光を単一の周波数で強度変調した光信号を図6に示す。変調光信号強度は P_{mod} はピーク値で示される。一般に実効値で示されている電気分野とは異なるので、注意が必要である。変調度 m は、

$$m = \frac{P_{mod}}{P_{ave}}$$

で示され、一般的には%表示される。

光変調器にもresponsivityという言葉が使用されることがあるが、極めてまれなので、ここでは省略する。

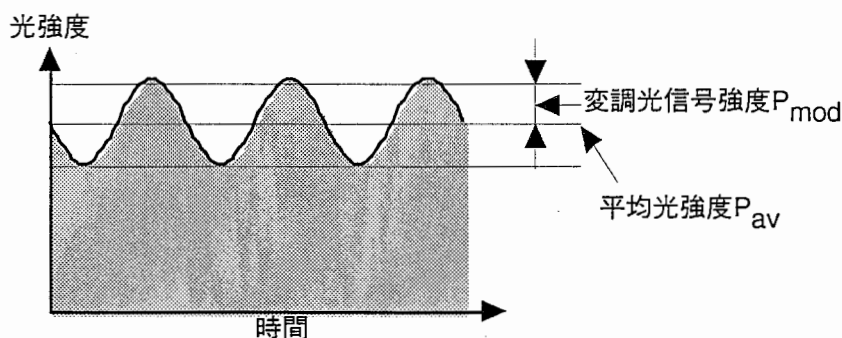


図6 光強度変調

また、光変調器には、DCなどの低周波での応答から3 dB応答が劣化する周波数を帯域と呼んでいるがこの帯域の定義には光帯域と電気帯域の2種類がある。光/電気変換の項で詳細な解説を行うが、光/電気変換により得られた信号電力は光信号強度の2乗に比例する。従って、光信号での3 dBの劣化は電気信号で6 dBの劣化に相当する。変調器の帯域が光帯域なのか電気帯域なのかで値がかなり異なる。本レポートでは区別が必要と思われる個所では光信号での比を'dBo'、電気信号での比を'dBe'で表す。

光の変調方法はレーザー・ダイオードのバイアス電流に高周波を加える直接変調とレーザー光を外部光変調

⁷ "測定技術 一般的な光-電気信号の関係", Hewlett Packard社, 1995 光測定器カタログ, p. 26

⁸ "変調光の発生、検出および表示", 横河・ヒューレット・パッカート, "HP 71400 光シグナル・アナライザ 変調光測定", アプリケーション・ノート 371, 1章, pp. 2-14

器で変調する外部変調の2種類が存在する。直接変調で重要な特性としては、外部微分量子効率 η 、スペクトル幅およびチャープ量などがある。外部量子微分効率とは図7に示すようにしきい値電流 V_{th} 以上の電流域での単位電流変化当りの光出力変化量である。微分量子効率が高ければわずかな電流変化量で、大きな変調度を得られる。スペクトル幅は光のスペクトルの幅で、マルチモードならば数10 nm (1.5 μ m帯ならば10 nmは1 THz程度になる)、DFBならば数MHzからkHzオーダーまでである。チャープ量とは、駆動電流変化によりどの程度波長が変化するかを示す量である。スペクトル幅、チャープ量ともに光ファイバーの分散によりどの程度の距離を伝送できるかを大きく左右する量である。

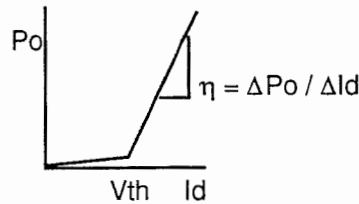


図7 微分量子効率

外部変調器にはさらに、LiNbO₃ Mach-Zehnder型光変調器 (以下LN-EOMと記す) と半導体電界吸収型光変調器 (以下EA-EOMと記す) の2種類が存在する。

LN-EOMはLiNbO₃結晶など電気光学効果を持つ物質上にY分岐をした導波路を設け、導波路に電界をかけることにより一方の光の速度を変化させ、再び合波する。2つの光の位相が同じであれば、入射光と同じ強さの光が出力され、位相が逆相であれば完全に消光する。入力電圧と出力光強度はコサイン関数にしたがって変化する。線形性の良い変調信号を得るため、通常、光強度が半分になる (2つの光の位相差が1/4波長になる) 点にバイアスされる (図8)。

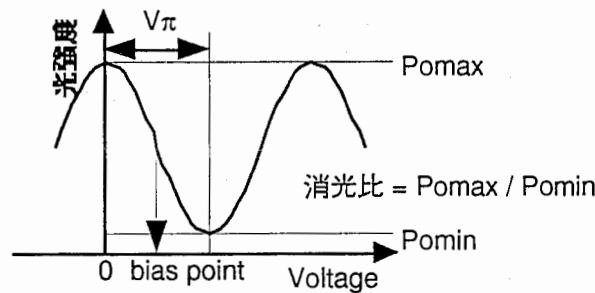


図8 LN-EOMの静特性

図8に示されるように光強度が最大なる点と最小になる2点間のバイアス電圧差を半波長電圧 V_{π} と呼ぶ。これは、2つの光の位相が半波長変化したことに対応するからである。 V_{π} を下げるためには電界と相互作用を起こす領域、すなわち導波路を長くすることが有効である。しかし、導波路を長くすると光の挿入損失が大きくなる、電極長が高周波の波長に近づくと電極に均一に高周波信号を与えることが困難になり変調特性

が劣化するなどの問題が生じる。電極長により生じる変調特性の劣化を防止するために進行波型変調器というものが考案された。これは、高周波信号と光が同じ方向に進みながら変調をかけるもので、これにより、広い帯域と、高い変調特性を同時に実現することができるようになった。その様子を図9に示す。

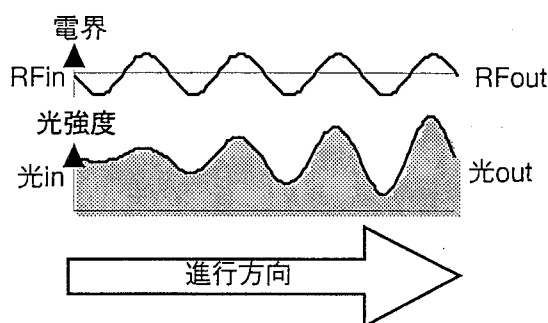


図9 進行波型変調器の変調の様子

実際には導波路中の光の速度と伝送線路中の高周波の速度が正確には一致しないこと、さらに、表皮効果により周波数が高くなるほど伝送線路の抵抗損が増加するため、広帯域化には限界がある。現状では、実用的な特性を持つ光変調器としては、20 GHz程度が帯域の上限であると考えられる⁹。

LN-EOMでは直接変調で見られたようなチャープは原理的に生じない。しかし、ミリ波などの高い周波数で強度変調を行った場合には、光のスペクトルが広がるため、直接変調で述べたように光ファイバの分散の影響で伝送距離が制限される。詳細な検討は光ファイバの分散の影響の項参照。

EA-EOMは半導体のバンドギャップが電界により変化することを利用している。一般的には超格子が用いられ、電界をかけることにより見掛け上のバンドギャップが小さくなり、より長い波長を吸収するようになる(図10)。

EA-EOMの場合には、LN-EOMに比べて素子長が数100 μ mと小さいため進行波型は存在しない。帯域は基本的にCR定数により決定され、20 GHz程度と思われる。

EA-EOM開発当初は偏波依存性が非常に大きかったが、現在では超格子に歪みを導入することにより偏波無依存のEOMが作製されている¹⁰。

EA-EOMの諸特性としては、光の挿入損失、消光までの駆動電圧等がある。また、変調原理が駆動電圧により光の吸収端が移動することを利用しているため(図11)、若干のチャープが存在する。

⁹ ここでは電気の3 dB帯域で記述する。

光の3 dB帯域としては、75 GHzが報告されている*が、このEOMの電気の3 dB帯域はやはり20 GHz程度である。

* K. Noguchi, H. Miyazawa, O. Mitomi, "75 GHz broadband Ti:LiNbO₃ optical modulator with ridge structure", Electron. Lett., Vol. 30, No. 12, pp. 949-950

¹⁰ F. Devaux, et al., "Full Polarization Insensitivity of a 20 Gb/s Strained-MQW Electroabsorption Modulator", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 6, No. 10, pp. 1203-1205, 1994

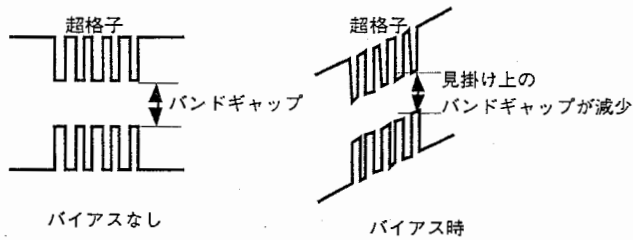


図 10 EA-EOMバンド構造

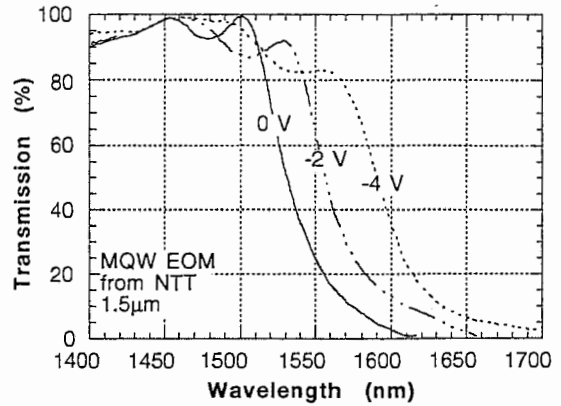


図 11 EA-EOM光吸収特性

4.1.2 光/電気変換に関する用語

4.1.2.1 受光器一般

光/電気変換は一般的には受光素子により行われる。受光器の特性を示す項目としては、変換効率、responsivityがある。変換効率 η とは1光子当たりいくつの電子対が発生するか(通常パーセントで記述)を示すものであり、responsivityとは光強度1 W当りの光起電流の値である。

$$R_r = \frac{I_{\text{photo}}}{P_{\text{optin}}}$$

R_r : responsivity (A/W)

I_{photo} : 光により生じた電流 (A)

P_{optin} : 入力光強度 (W)

$$\eta = \frac{I_{\text{photo}}/q}{P_{\text{optin}}/h \cdot \nu} = R_r \frac{h \cdot \nu}{q} = R_r \frac{h \cdot c}{q \cdot \lambda}$$

h : プランク定数 (6.62617×10^{-34} J·s)

ν : 光の振動数

q : 素電荷 (1.60218×10^{-19} C)

c : 光速 (2.99792×10^8 m/s)

λ : 波長

変換効率 η の計算で、既知の数字を計算し、波長をnm表示にすると、

$$\eta = R_r [A/W] \frac{1239.856}{\lambda [nm]}$$

となる。また、受光素子から出力されるRF電力 P_{out} は、

$$P_{out} = \frac{(R_r \cdot \overline{P_{optin}} \cdot m)^2 \cdot L_{PD} \cdot R}{2} = \frac{(I_{photo} \cdot m)^2 \cdot L_{PD} \cdot R}{2}$$

R : 受光素子に接続されているアンプの入力インピーダンス

m : 変調度

L_{PD} : 受光素子の計測周波数での周波数劣化分

受光素子は光強度に比例した電流を流すため、受光素子からの電力は光強度の2乗に比例する。このことが光帯域と電気帯域の差を引き起こしている。また、先述したように変調光強度はピーク値を用い、高周波の電力は実効値を用いるため、出力電力には1/2の係数が掛けられる。

4.1.2.2 トランスインピーダンスアンプ

受光素子は基本的に光強度に応じた電流を流すため、信号出力は電流振幅となる。一方で、デジタル回路で一般的に用いられているECLなどのロジック回路の入力には、電圧振幅が必要である。受光素子に高い負荷抵抗を接続すれば大きな電圧振幅を得ることができる。しかし、ECLに直結する場合にはECLの入力インピーダンスである50 Ω が負荷抵抗となり、高い電圧振幅を得ることができない。また、受光素子は内部容量を持つため高い負荷抵抗を接続するとRC定数が大きくなり、受光素子自身の帯域が狭くなる。そこで、電流振幅を電圧振幅に変換するトランスインピーダンスアンプというものが考案された¹¹。一般の光伝送はベースバンド伝送であるため、DCからの伝送帯域が必要である。一般的な回路構成は、負帰還を用いたアンプで構成されている(図12)。負帰還回路を用いることにより、受光素子の負荷インピーダンスが低くなり、かつ電流/電圧変換を行うことができる。負帰還回路の場合には、電流/電圧変換特性は負帰還抵値に比例する。一方、負帰還アンプの帯域は負帰還抵抗に反比例する¹²ため、電流/電圧変換特性と帯域のトレードオフが存在する。

¹¹ "光ファイバ通信光学", Gerd Keiser 著, 山下栄吉 訳, pp. 221-227, 産業図書

¹² R. H. Walden, et al., "Multigigahertz Monolithic GaAs Optoelectronic Receiver using 0.2 μ m Gate-Length MESFETs", 1991 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 491-494

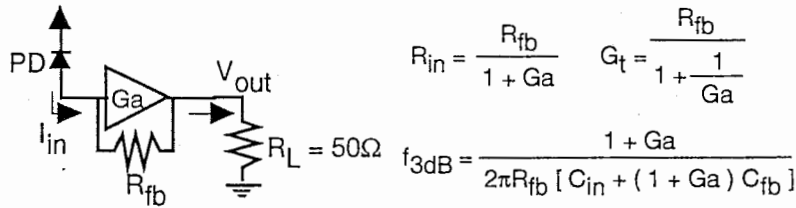


図 12 負帰還アンプを用いたトランスインピーダンスアンプ

電流/電圧変換の指標としてトランスインピーダンスゲイン G_t が用いられる。入力電流 I_{in} 、出力電圧 V_{out} の場合にトランスインピーダンスゲイン G_t は、

$$G_t = \frac{V_{out}}{I_{in}} (\Omega)$$

あるいは

$$G_t = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{I_{in}} \right) (\text{dB}\Omega)$$

で定義される。50 Ω のトランスインピーダンスゲインは、 $G_t = 50 \Omega = 34 \text{ dB}\Omega$ となる。負帰還回路のトランスインピーダンスゲインは負帰還抵抗とほぼ同じ値となる。

Yパラメータを用いて記述すると、負荷抵抗を R_L とすると、

$$G_t = G_v / y_{in}$$

$$-G_v = -y_{21} / (y_{22} + 1/R_L)$$

$$y_{in} = y_{11} + G_v \cdot y_{12}$$

となる¹³。さらに、YパラメータをSパラメータに変換する公式を用いてSパラメータで記述すると、

$$G_t = \frac{|Z_0| \cdot |S_{21}|}{|1 - S_{11}|}$$

Z_0 : 出力インピーダンス

となる¹⁴。

また、もう一つのトランスインピーダンスアンプの重要な特性である雑音を表す指標として入力換算雑音電流 I_{noise} というものが存在する。これは、出力部で測定した1 Hz帯域の雑音電力 P_n より、

¹³ R. E. Saad et al., "Sパラメータによる光学受信機の変換インピーダンス利得の発見", Microwaves & RF 日本語版, December 1992, pp. 29-31

¹⁴ J. Cowles et al., "7.1 GHz bandwidth monolithically integrated InGaAs/InAlAs PIN-HBT transimpedance photoreceivers", IEEE Photon. Technol., Vol. 6, No. 11, pp. 963-965, 1994

$$I_{\text{noise}} = \sqrt{\frac{P_n}{G_i}}$$

で定義され、単位は一般的にpA/Hz^{1/2}となる。単純に50 Ωの抵抗を付けた場合(熱雑音のみ)の入力換算雑音電流は式より、8.9 pA/Hz^{1/2}となる。入力換算雑音電流は当然ながら入力抵抗が大きくなれば小さくなる。

これらの、トランスインピーダンスゲインと入力換算雑音電流は、基本的にベースバンド伝送用の受光器を設計する過程で考えられたパラメータであり、入力インピーダンスが純抵抗であると仮定している。そのため、単純に変換式からSパラメータに拡張することはあまり意味がないと考えられる。詳細な考察については、受光器の高効率化で論じる。

4.1.2.3 受光器のC/Nについて

まず受光器の雑音について考える。受光器から出力される雑音は、1)レーザからの雑音、2)受光素子からのショット雑音、3)受光素子に接続されているアンプからの雑音などである。

まずレーザからの雑音は、相対強度雑音 (Relative Intensity Noise, RIN) として取り扱う。RINの定義は、

$$RIN_{\text{electrical}} = \frac{\Delta P_{e_{\text{noise}}}}{P_{e_{\text{signal}}}} = \frac{\Delta P_{o_{\text{noise}}}}{2 \cdot P_{o_{\text{signal}}}} \left(= \frac{RIN_{\text{optical}}^2}{2} \right)$$

で示される。レーザのデータシートでは'dB/Hz'という単位を用いてRIN_{electrical}を示しているものが多い。ただし、この値は一般に使用される周波数である数100 MHzでの値を示しているようである。RINはレーザの緩和振動周波数である数GHzで最大となる。1.5 μm帯のDFBレーザのRIN測定結果を図13に示す。測定機器により値が5 dB程度異なるため、まだ正確な評価ができていないと難しい。しかし、我々のシステムで使用するミリ波帯ではRINが比較的小さい(-145 dB/Hz程度) ことがわかる。

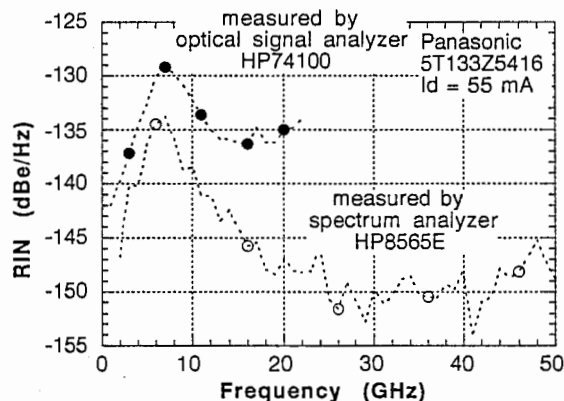


図13 DFBレーザの相対強度雑音

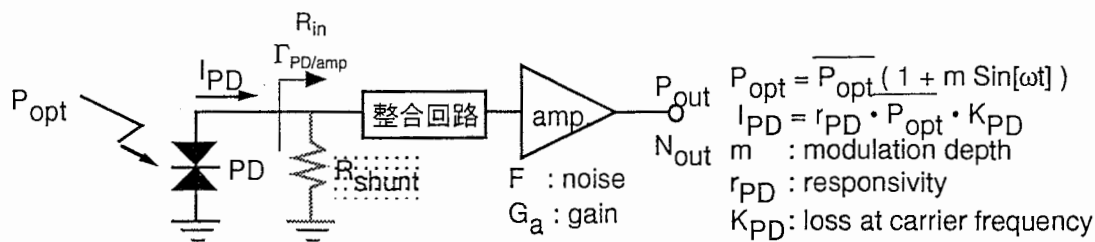


図 14 受光器

図14に示す回路で雑音の計算を行う。図中の R_{shunt} は実質的な受光効率を低下させるが、アンプの動作を安定化するためと、広帯域化のために導入されている。特に一般的な $50\ \Omega$ 系のアンプを受光素子に直結する場合には、発振等を防止するために入れられている場合が多い(ATRで保有しているNEL社製のPIN-PDは効率重視のためこの抵抗が入っていない)。

完全に整合がとれている場合には、 RIN による雑音 N_{RIN} 、受光素子のショット雑音 N_{shot} 、熱雑音 N_{th} 、アンプの発生する雑音 N_{amp} はそれぞれ、

$$N_{RIN} = RIN_{electrical} \cdot \overline{P_{electrical}} \cdot B \cdot G_a = \frac{RIN_{electrical} \cdot \left(R_r \cdot \overline{P_{optin}} \right)^2 \cdot R_{in} \cdot B \cdot G_a}{2}$$

$$= \frac{RIN_{electrical} \cdot I_{photo}^2 \cdot R_{in} \cdot B \cdot G_a}{2}$$

$$N_{shot} = 2 \cdot q \cdot I_{photo} \cdot R_{in} \cdot B \cdot G_a$$

$$N_{th} = k \cdot T \cdot B \cdot \left(1 - |\Gamma_{PD/amp}|^2 \right) \cdot G_a$$

$$N_{amp} = F \cdot k \cdot T \cdot B \cdot G_a$$

R_{in} : 受光素子から見たアンプ側の入力抵抗、整合がとれていれば $= R_{shunt}/2$

B : 帯域幅

$\Gamma_{PD/amp}$: 受光素子とアンプの入力の間の反射係数

F : 雑音指数

G_a : アンプの利得

で示される。ただし、アンプの発生する雑音は入力側のインピーダンスによらずに一定と仮定している。また、図14中の R_{shunt} が存在しない場合には、 N_{amp} に含まれている R_{shunt} の雑音がなくなるため、 $kTBG_a$ 分小さ

くなる。また、受光素子はほぼ純粋な容量に見え、アンプの入力は一定の抵抗成分を持つため、 $|\Gamma_{PD/amp}|$ はほとんど1になる。これらすべては互いに相関がないので、雑音全体 N_{total} はこれらの和で示され、

$$N_{total} = \left(\left(\frac{RIN \cdot I_{photo}^2}{2} + 2 \cdot q \cdot I_{photo} \right) \cdot R_{in} + F \cdot k \cdot T \right) \cdot B \cdot G_a$$

と計算される。

一方、信号出力 P_{out} は入力される電力が R_{shunt} とアンプの両者へ1/2ずつ供給されること、光の変調度がピーク値で規定されるので実効値に換算するとさらに1/2になることに注意して計算すると、

$$P_{out} = \frac{(I_{photo} \cdot m)^2 \cdot R_{in} \cdot G_a}{4}$$

となる。

まず、ショット雑音とRIN雑音から考える。ミリ波帯で測定したRINの値は、-145~-150 dB/Hzであった(図13)。この値を用いて入力電流に換算したショット雑音とRIN雑音の光起電流依存性を図15, 16に示す。RIN = -145 dB/Hzの場合には $I_{photo} = 0.1$ mAでショット雑音とRIN雑音がほぼ同じとなる。

$P_{opt} = -10$ dBm、responsivity = 1 A/W (量子効率 = 80%) の条件で $I_{photo} = 0.1$ mA、アンプの利得=1の場合、全体の雑音電力と信号電力の R_{shunt} 依存性は図17のようになる。

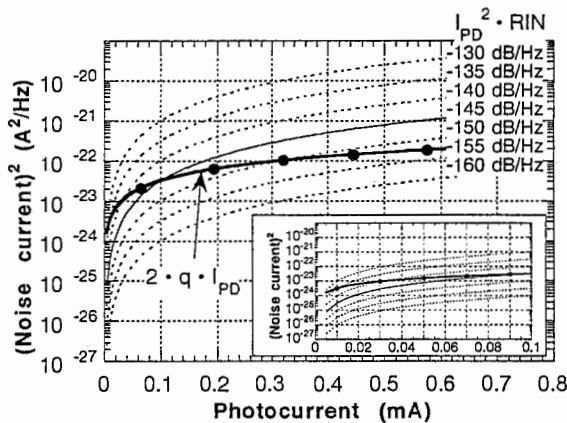


図15 ショット雑音、RINの光起電流依存性

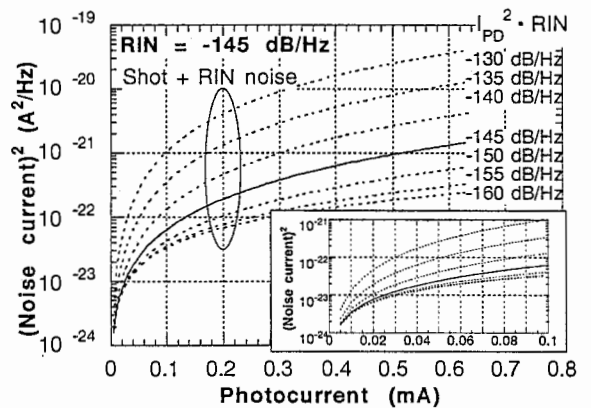


図16 ショット雑音+RINの光起電流依存性

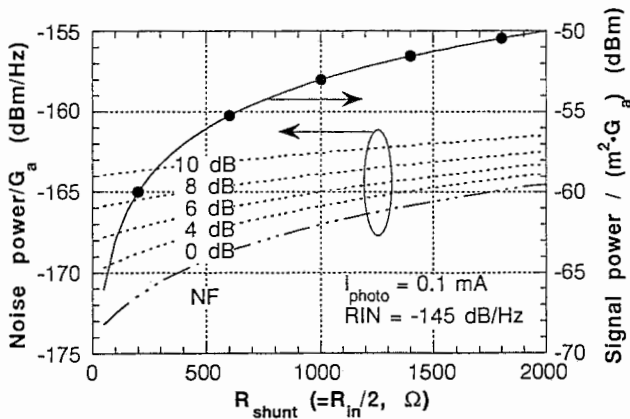


図 17 受信電力、雑音電力の入力抵抗依存性

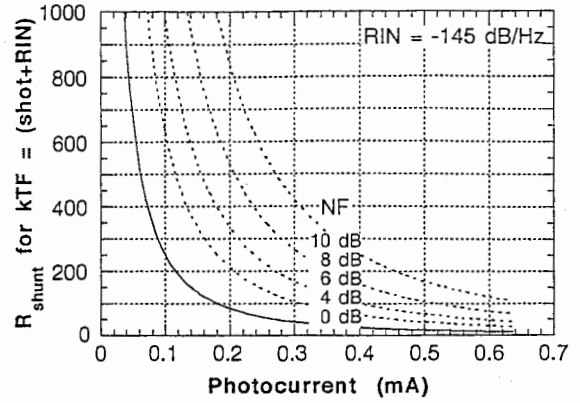


図 18 アンプの雑音＝受光器の雑音となる
入力抵抗の光起電流依存性

信号電力と雑音電力の差がC/Nとなる。 R_{shunt} が1000 Ω 程度になると、それ以上 R_{shunt} を大きくしても信号電力は大きくなるが、雑音電力も同様に大きくなるためC/Nはあまり改善されない。また、 R_{shunt} を大きくすることにより、ショット雑音やRIN雑音が熱雑音とアンプの雑音より大きくなるため、NFによるC/Nの差は徐々に小さくなる。ショット雑音が熱雑音やアンプの発生する雑音より大きくなり、受光器の雑音が主にショット雑音で決められるような状態をショット雑音限界での検波と呼ばれる。先に述べたように R_{shunt} を大きくすると帯域幅が狭くなるので、帯域幅とC/N改善度によるトレードオフを考えなければならない。図18に(ショット雑音+RIN雑音)=(熱雑音+アンプの雑音)となる R_{shunt} の値を示す。ショット雑音限界で光/電気変換を行うためには、0.1 mA以上の I_{photo} が必要であることがわかる。

文献15,16にもリンク全体の詳細なC/Nシミュレーションが紹介されているので、参考にするとよい。

4.2 光変調器

4.2.1 LiNbO₃ Mach-Zehnder型光変調器諸特性

4.2.1.1 諸特性解析

Mach-Zehnder型の外部変調器は入力電圧に対して、光の変調度がコサイン関数にしたがって変化し、光出力強度 $P_{OPTout}(W)$ は、

$$P_{OPTout} = P_{OPTin} (1 + \text{Cos}(\phi))$$

15 E. Ackerman, et al., "Maximum Dynamic Range Operation of a Microwave External Modulation Fiber-Optic Link", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 41, No. 8, pp. 1299-1306, 1993

16 C. H. Cox III, et al., "An Analytic and Experimental Comparison of Direct and External Modulation in Analog Fiber-Optic Links", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 38, No. 5, pp. 501-509, 1990

P_{OPTin} :外部変調器への入力光パワー(W)

ϕ :位相変化量(rad.)

となる。位相変化量 ϕ (rad.)は、LN-EOMの半波長電圧 V_{π} (V)、LN-EOMへ入力されるRF電力 P_{RFIn} (W)、外部変調器のインピーダンス R_{EOM} (Ω)、RF入力周波数 ωt を用いて、

$$\phi = \frac{\sqrt{2 P_{RFIn} \cdot R_{EOM}}}{V_{\pi}} \cdot \text{Cos} \left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{\pi}{2}$$

となる。ここで、誘導位相量 $\phi_m = \frac{\sqrt{2 P_{RFIn} \cdot R_{EOM}}}{V_{\pi}} \cdot \frac{\pi}{2}$ とする。通常用いられる1/4波長バイアス点(図8参

照)では、広帯域FM変調と式の形が同じになり、Bessel関数を用いて周波数成分毎に分解することができ、

$$P_{OPTout} = P_{OPTin} \left(1 - 2 \sum (-1)^n \cdot J_{2n+1}(\phi_m) \cdot \text{Cos}((2n+1)\omega \cdot t) \right)$$

となる¹⁷。基本波成分 ($n=0$) に着目すると、

$$P_{OPTout} = 2 P_{OPTin} \cdot J_1(\phi_m) \cdot \text{Cos}(\omega \cdot t)$$

となる。光に含まれる高周波強度は一般的に平均値ではなくピーク値で表示される。直線強度変調度 $m(-)$ は、

$$m = 2 J_1(\phi_m)$$

となる。Bessel関数では取り扱いが困難なので、サイン関数で近似すると、

$$m = 1.17 \text{ Sin}(0.85 \phi_m)$$

と表すことができる。参考までに、Bessel関数の2倍を図19に示す。

¹⁷ 例えば"ラシイ 通信方式 情報伝送の基礎"、宇佐美興一、山中惣之助共訳、pp. 154-160、マグロウヒル

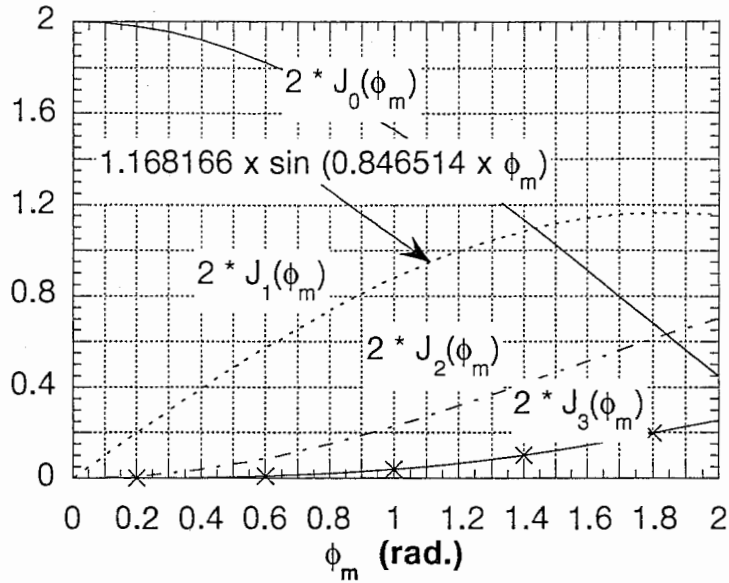


図 19 ベッセル関数

π などの係数を計算し、実用上計算しなければならない外部変調器での光強度挿入損失 $L_{EOMopt}(-)$ 、変換効率のその周波数での劣化分 $L_{EOMelec}(-)$ を考慮すると、基本波の光RF強度 $P_{OPTout1}(W)$ は、

$$P_{OPTout1} = L_{EOMopt} \cdot P_{OPTin} \cdot 1.17 \sin \left(1.89 \sqrt{L_{EOMelec} \cdot P_{RFin} \cdot R_{EOM}} / V_{\pi} \right)$$

となる。なお、 $L_{EOMelec}$ は電氣的に測定した値を用いる。dB表記の場合には、

$$P_{OPTout1}(dBm) = P_{OPTin}(dBm) + L_{EOMopt}(dB) + 10 \log \left[1.17 \sin \left\{ 1.89 \sqrt{10^{(L_{EOMelec}(dB) + P_{RFin}(dBm) + R_{EOM})/10}} / V_{\pi} \right\} \right]$$

となる。また、入力RF電力が小さければ $x = \sin(x)$ がほぼ成り立つので、

$$P_{OPTout1} = 2.21 \cdot L_{EOMopt} \cdot P_{OPTin} \cdot \sqrt{L_{EOMelec} \cdot P_{RFin} \cdot R_{EOM}} / V_{\pi}$$

と簡略化される。また、計算した変調度と IM_3 の関係を図20に示す。

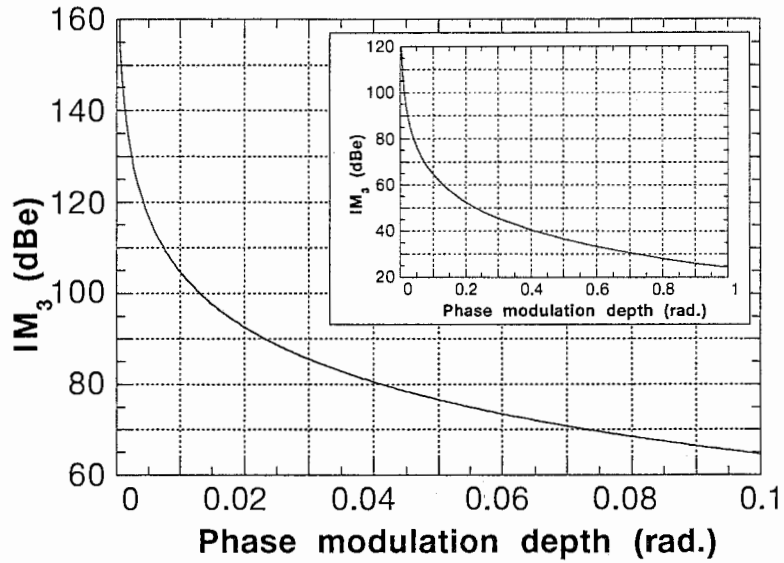


図 20 IM_3 の誘導位相依存性

4.2.1.2 実測結果

変調器の重要な特性は、半波長電圧 V_π と帯域である。特に、今回のシステムでは、変調器の帯域を越えるミリ波で使用するため、使用周波数での変調特性が極めて重要である。 V_π はDCバイアスを変化させながら光強度をモニタし、光強度が極小、あるいは極大になる点から計算により容易に求めることができる。

現在、ATRで保有している代表的なLN-EOMの諸特性を表に示す。なお、短波長用は設計がやや古いため帯域が狭い。

表2 LN-EOM諸特性

項目	0.8 μ m用		1.3, 1.5 μ m用		
	No. 292	No. 585	No. 2217	No. 2219	No. 2220
挿入損失(dBo)	6.2		3.4	3.6	4.1
半波長電圧(V)	2.0	2.4	4.9	4.9	4.9
消光比(dBo)	18		32.4	34.6	30.8
電極帯域(GHz)	4.9	4.5	6.1	6.3	6.7
変調帯域(GHz)	6*	6*	17.6	18.4	18

*短波長用の変調帯域を測定する測定器がないために、後で述べる2 tone法で測定した値を示す単位は光領域での比を示す

EOMの諸特性の測定を行う際にDCドリフトに注意しなければならない。DCドリフトとは、LN-EOMで光と電気との速度整合を行うために導入されている SiO_2 膜と $LiNbO_3$ の界面に電荷が蓄積し、それがそれぞれに存在するリーク電流により再配分されるために生じる現象である(図21)。

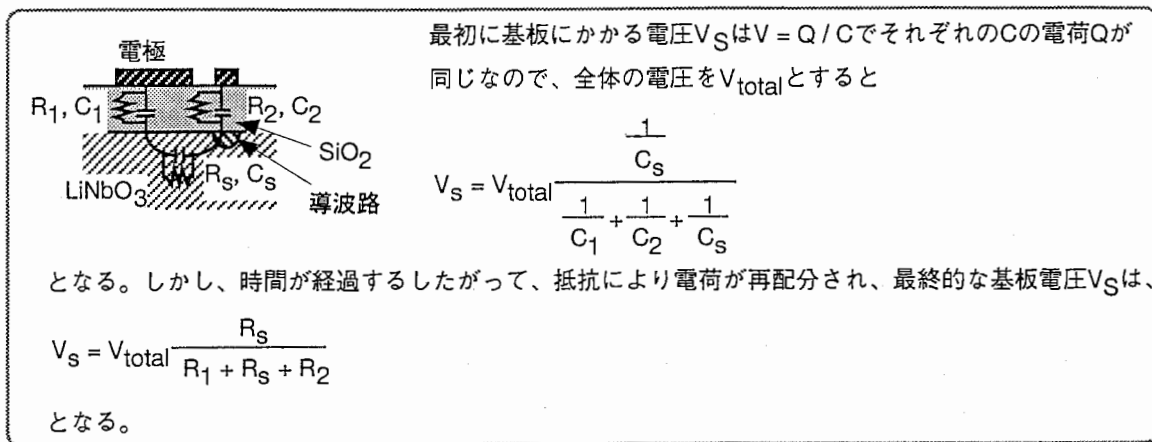


図 21 LN-EOMのDCドリフト

さらに原因は不明であるが、変調信号を入力することにより、バイアス点の変動しているようである。LN-EOMを線形性の高い1/4波長バイアスをした場合、2次の高調波は発生しない。図22に2次高調波が発生しないように調整したバイアス電圧とEOMから出力される平均光強度の変調信号入力電力依存性を示す。バイアス電圧が、 V_π の6割り近くも変動している。また、本来変動するはずのない光強度もやや変動している。また、この現象はバイアスや変調信号を印加してからの時間によっても徐々に変動している。

最近のLN-EOMはこのような現象は見られ難くなっているが、それは変動の時間が長くなっており(数日単位)、変動そのものがなくなっていない場合が多いようなので、長期にわたる測定を行うときには注意が必要である。

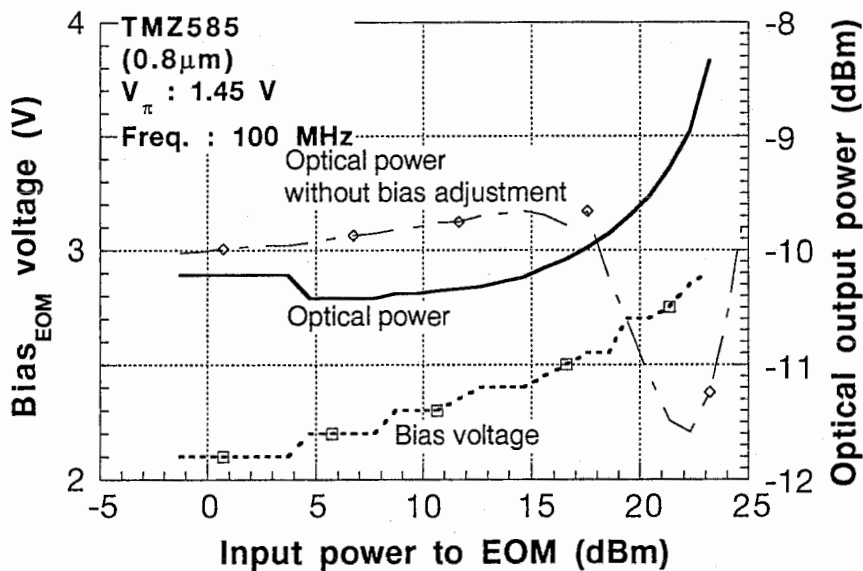


図 22 最適バイアス電圧と平均光強度の入力電力依存性

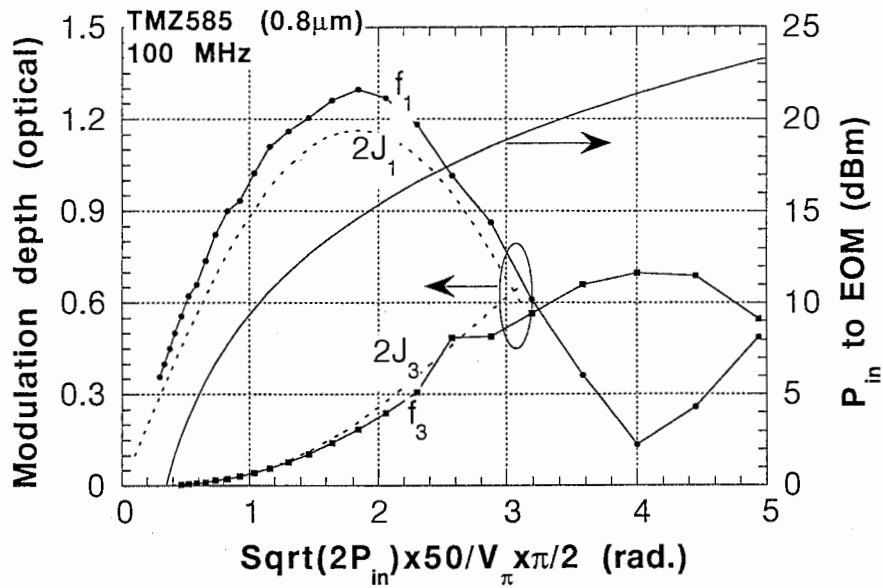


図 23 基本波および3倍高調波強度の位相変化量依存性

次に、LN-EOMの基本波および3倍高調波の位相変化量依存性を測定した。測定は V_{π} の小さな短波長用のEOMを用いた(図23)。ベッセル関数を用いた計算と実測値が非常に良く一致している。

一方、帯域や、ミリ波での周波数応答特性は、現在のところ、電気/光変換特性を測定できる光シグナルアナライザあるいは光コンポーネントアナライザが22 GHzまでしか測定できないため、別の測定法を考えなければならない。高い周波数特性を測定する方法としては、

- 1)光ヘテロダイン法を用いて校正された受光素子を用いて測定する¹⁸
- 2)AM法を用いて測定する¹⁹
- 3)2 tone法を用いて測定する²⁰
- 4)サイドバンド法を用いて測定する²¹

などがある。簡単に説明を加えると、1)は測定周波数分だけ波長の異なる2つのレーザー光を同一偏波方向で合成すると、出力光は測定周波数で100%変調される。一方のレーザーの波長を掃引して変調周波数を変化させ、受光器の周波数特性を測定するものである。この測定を行う場合には波長間隔が希望周波数になるようにレーザーの波長をロックしなければならない。そのような測定用にレーザー波長を望みの周波数でロックする装置が市販されている。2)は測定周波数の信号にAM変調を行い、AM変調周波数を一定にして測定周波数を掃引する。LN-EOMのコサイン特性により変調周波数に信号が現れる。このAM信号強度は測定周波数の

¹⁸ S. Kawanishi et al., "Wide-Bands Frequency-Response Measurement of Optical Receivers Using Optical Heterodyne Detection", J. Lightwave Technol., Vol. 7, No. 1, pp. 92-98, 1989

¹⁹ S. Uehara, "Calibration of optical modulator frequency response with application to signal level control", Applied Optics, Vol. 17, No. 1, pp. 68-71, 1978

²⁰ R. L. Jungerman et al., "High-Speed Optical Modulator for Application in Instrumentation", J. Lightwave Technol., Vol. 8, No. 9, pp. 1363-1370, 1990

²¹ E. Eichen et al., "Bandwidth Measurements of Ultrahigh-Frequency Optical Detectors Using the Interferometric FM Sideband Technique", J. Lightwave Technol., Vol. LT-5, No. 10, pp. 1377-1380, 1987

信号強度に比例するため光素子の周波数特性の影響を受けずに光変調器の周波数特性を測定することができる。3)は、一定周波数はなれた2波のRF信号を光変調器に加えると、光変調器の非線形性により、2波の周波数差に一致する周波数に信号が生じる。周波数差を一定に保ちながら2つのRF信号を掃引し、2波の差周波数での信号を受光素子で測定することにより、2)と同様に受光素子の周波数特性の影響を受けずに全体の周波数特性を測定することができる。4)は強度変調した光の光分解能の光スペクトルアナライザで測定すると、光の周波数から変調周波数だけ離れた波長に光信号が生じる。その信号強度を測定するものである。近年一般的に行われているのは、4)のサイドバンド法であるが、ATRの機材の関係で、3)の2 tone法を用いて現在使用している光変調器の諸特性を評価した。

測定系を図24に、測定結果を図25に示す。また、LN-EOMの S_{21} を図26に示す。

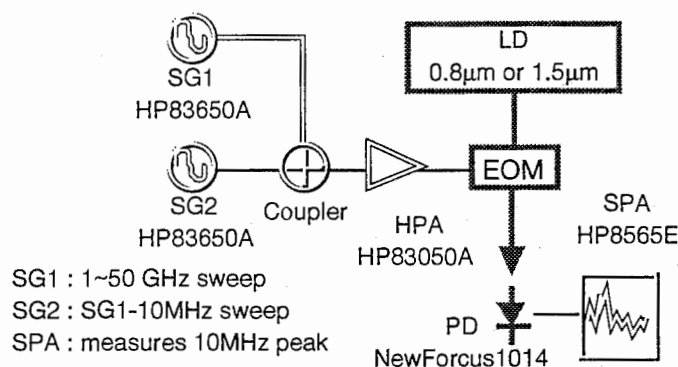


図 24 2 tone法による光変調器特性評価システム構成図

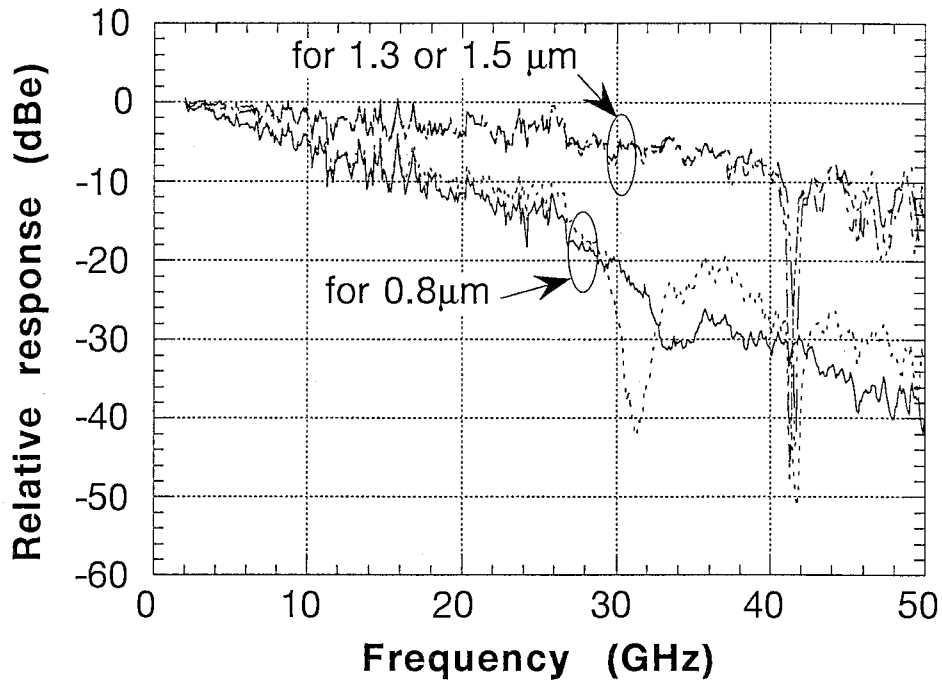


図 25 LN-EOMの変調特性の周波数依存性

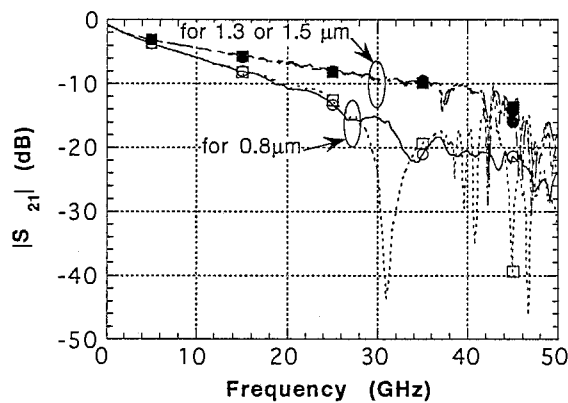


図 26 LN-EOM S_{21} 特性

短波長用EOMはTMZ192とTMZ585の2つ、長波長用EOMはTMZ2217, TMZ2219, TMZ2220の3つの特性を示す。長波長用EOMはほとんど特性が一致している。短波長用は長波長用に比べて設計が古く、また、2つのEOMの納入時期も大きく異なるため特性にかなり差がある。短波長用EOMは30 GHz付近に大きなディップが存在し、短波長、長波長両者に42 GHz付近に急峻なディップが存在する。これらの特性は S_{21} 特性と比較的よく一致している。ディップの原因は伝送線路の不連続部(例えばコネクタとの接続部など)での反射や、ケース内部での電磁界の共振等が考えられ、最近では電極形状の最適化や電波吸収帯などを用いて50 GHzまで素直な特性のEOMが開発されている。

次にモデルシステムで使用する周波数である44 GHzと49 GHzの3高調波歪みの測定結果を図27, 28に示

す。TMZ2217の V_{π} は4.9 Vである。また、44 GHzおよび49 GHzのTMZ2217の変調周波数特性はDCのその10 dB落ち (図25参照) なので、EOMへの5 dBm入力では44 GHz, 49 GHzでは実質的に-5 dBm入力と等しい。50 Ω系の-5 dBmは電圧振幅 (ピーク値) としては $\text{Sqrt}(0.316 \text{ mW} * 2 * 50) = 0.1778 \text{ V}_{p-p}$ となり、変調位相幅は $0.1778 / 4.9 * \pi / 2 = 0.0570 \text{ rad.}$ となる。変調位相幅0.0570 rad.は約5.7%の変調度 ($2 * J_1(0.0570 \text{ rad.})$) で、前章の理論計算では IM_3 が75 dBとなる。しかし、実測では44 GHzでは47.5 dB、49 GHzでは55 dBと理論値とは一致していない。ちなみに、理論計算で IM_3 が47.5 dBと55 dBは変調位相幅として0.267 rad.と0.173 rad.に相当し、電圧振幅はそれぞれ0.833 V_{p-p}および0.540 V_{p-p}となり、50 Ω系での電力としては9.6 dBmと4.6 dBmとなり、実験値とは全く一致していない。測定系としては5 dBm入力時に IM_3 として80 dB程度確保できていることは確認しているが、もう少し詳細な実験系の検討が必要と考えられる。

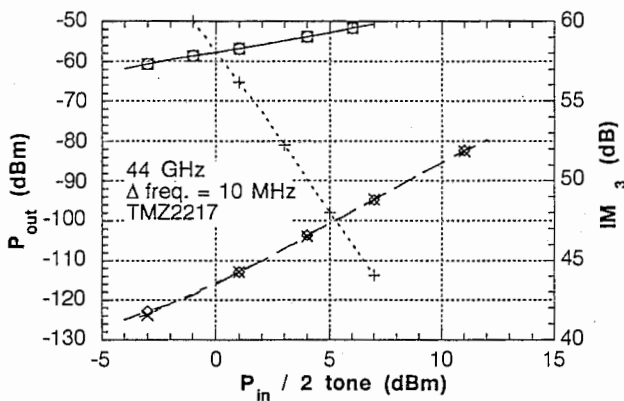


図 27 LN-EOMの44 GHzにおける IM_3 特性

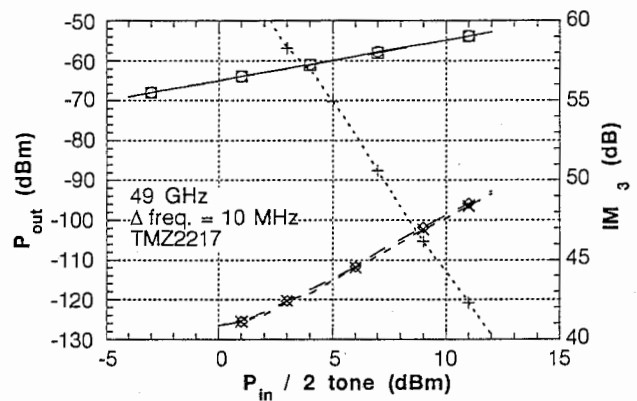


図 28 LN-EOMの49 GHzにおける IM_3 特性

システムに要求される IM_3 の値は、3次複合歪み (Composite Triple Beat, CTB) として、 $BER = 10^{-5}$ に必要な $C/N > 15 \text{ dB}$ が実現できるように $CTB > 15 \text{ dB}$ が必要となる。 CTB と IM_3 の関係は、 $CTB = 10 * \text{Log}(IM_3 \text{のコンポジット数}) + IM_3$ である。 IM_3 コンポジット数は、すべてのチャンネルから3つの周波数 (同じ周波数の重複も含む) のすべての組み合わせをとりだして加減演算を行い、各周波数に存在する混変調波の数を数えたものである。全体の中心に近い周波数ほど数が増える。10チャンネルまでの計算の結果を図29に示す。6チャンネルを考えた場合の IM_3 コンポジット数は16となり、 $IM_3 > 27 \text{ dB}$ となる。44 GHzの測定値でもRFとして実用的な入力電力15 dBmの IM_3 は27.5 dBで、現在の変調度では光変調器の歪みによる C/N の劣化は比較的小さい。

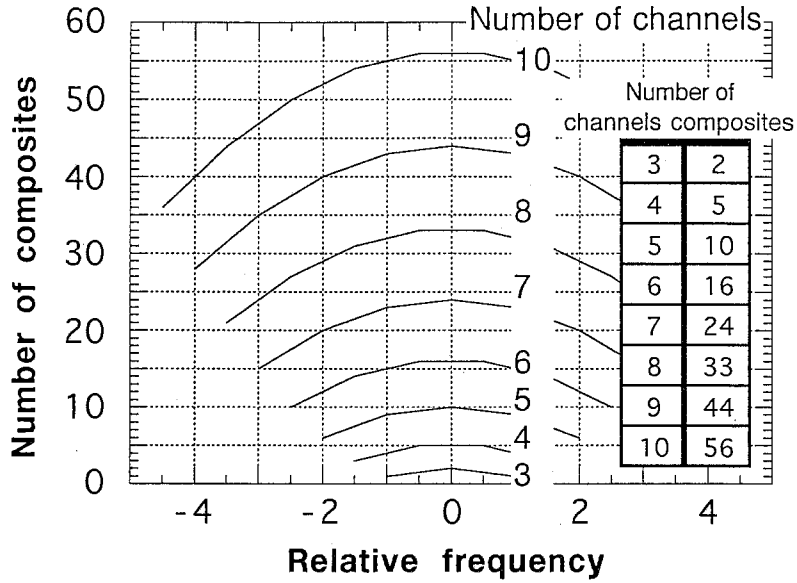


図29 IM₃により生じるcomposite数のチャンネル数依存性

4.2.2 高効率化の検討

光変調器は基本的に光ファイバによるデジタル通信用に開発されてきた。この通信はベースバンド伝送であり、光変調器を駆動するのはECLなどの電圧駆動型のデジタルICであるため、光変調器で重視される特性は、変調帯域、駆動電圧、光の挿入損失である。しかし、我々のシステムはサブキャリア伝送なので伝送帯域での特性のみが重要で、それ以外の周波数、例えば非常に低い周波数での特性は重要でない。また、ベースバンド伝送では非常に広い帯域内で均一な変調特性が要求されるが、サブキャリア伝送では伝送帯域が比較的小さいため駆動回路等による特性補正が容易である。従って、光変調器の帯域外で周波数特性が平坦でなくても補正回路を用いることにより十分に使用することができる。

光変調器は電界駆動型でありほとんど電流が流れないため、低い周波数では光変調器に注入された大部分の電力が終端抵抗で消費されている。つまり、回路上の工夫により高効率化を行うには、変調器に入力された電力をできるだけ光の変調に利用することが重要である。マイクロ波ではインピーダンス変換により容易に電圧振幅を大きくすることができる。特にミリ波を用いたサブキャリア伝送のように比帯域が小さなサブキャリア伝送では、インピーダンス変換が比較的容易になるので、この特徴を用いれば変調器の高効率化が期待できる。

電圧振幅を大きくするためには高インピーダンス駆動で変調しなければならない。しかし、現在のLN-EOMはコプレーナリヤ伝送線路を用いた進行波型で、光との結合度を保ったままLN-EOM内の伝送線路の特性インピーダンスを高くすることが困難である。

そこで、光変調器の終端抵抗と駆動アンプの出力インピーダンスを高くして、LN-EOM内の伝送線路上で定在波を作り電圧振幅を大きくすることを考えた。ただし、伝送線路で定在波が形成されるためには、伝

送線路長と波長の比が整数であることが必要なため、変調特性は大きな周波数特性を持つ。しかし、我々のシステムでは比帯域が比較的小さな帯域伝送なので、このことは大きな問題にはならない。伝送線路の定在波により光が変調される様子を図30に示す。

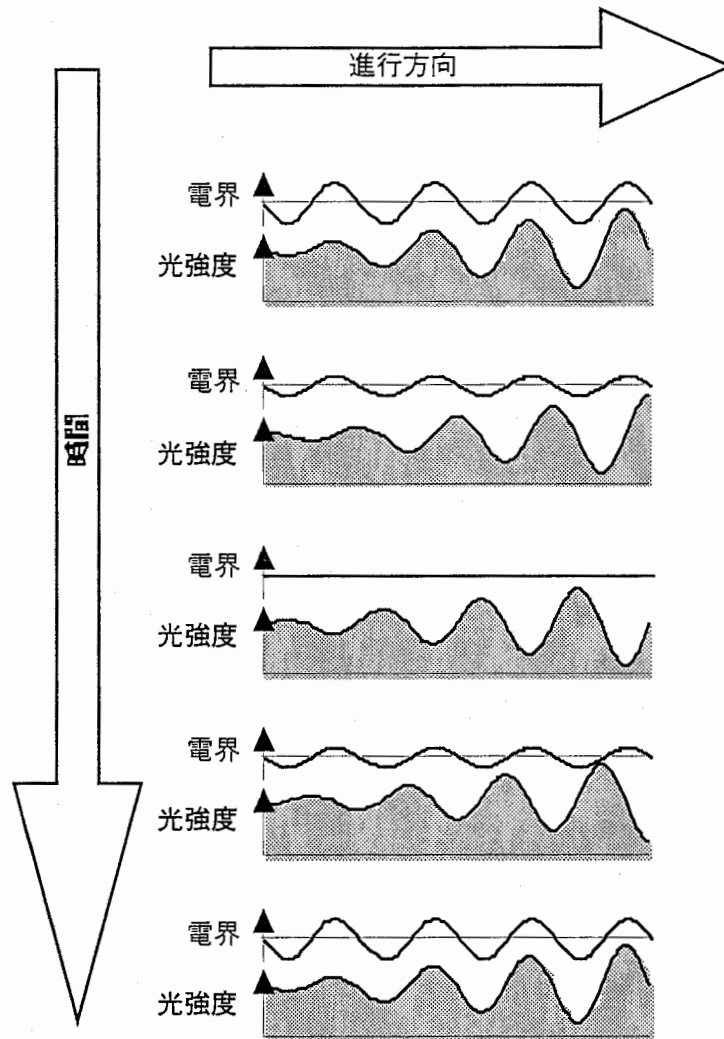
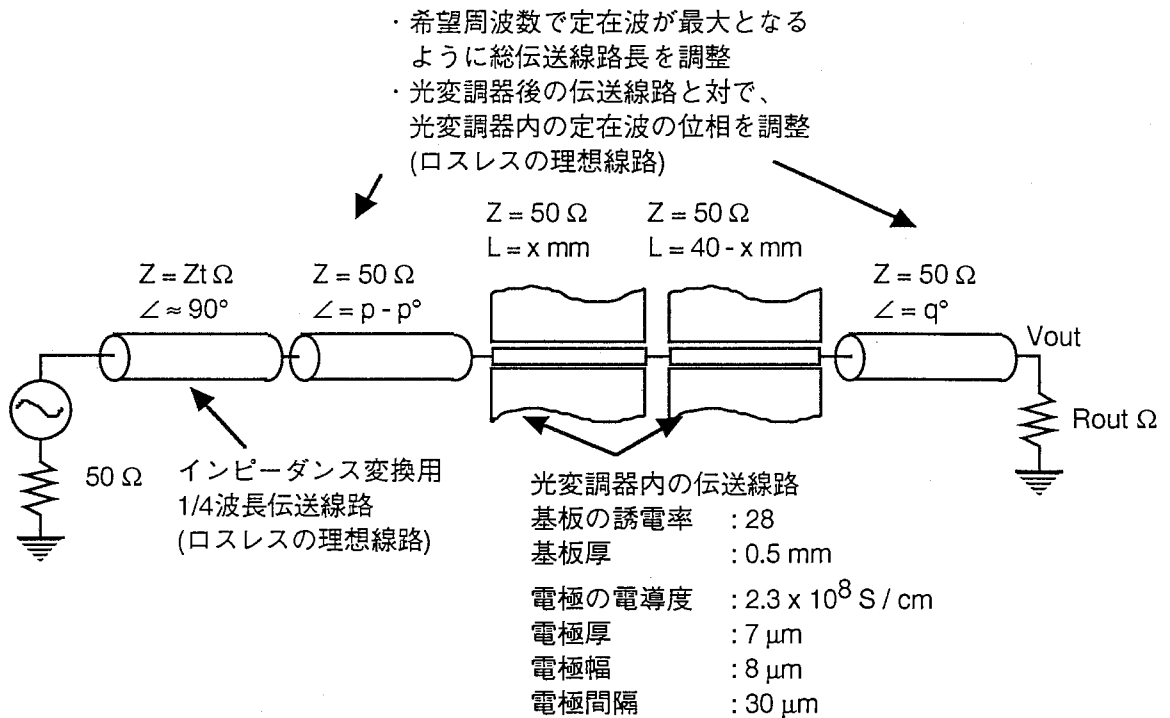


図 30 定在波による光の変調

このような考えのもとに簡単なシミュレーションを行った。シミュレーションではLN-EOMを伝送線路と考え、伝送線路内の電圧振幅の平均値を性能の指標とした。これは、LN-EOMは電界で光の強度変調を行うので、伝送線路全体の電圧振幅の平均値は強度変調量に比例するからである。残念ながらLN-EOMの電極構造の正確な形状が不明なので、現在判明している内容をもとに測定したLN-EOMの S_{21} にフィッティングを行った。現在判明しているのは、電極厚が $8\ \mu\text{m}$ 、電極幅が $7\ \mu\text{m}$ 、電極長が $40\ \text{mm}$ である。これに、金の電気伝導度 $4.17 \times 10^7\ \text{S/cm}$ 、 LiNbO_3 の誘電率28.13、変調域からコネクタ端までの長さ $5\ \text{mm}$ を仮定した。フィッティングを行った結果、この条件では実測よりもロスが大きすぎるため、現実とは異なるが電気伝導度を $2.3 \times 10^8\ \text{S/cm}$ と高くして合わせ込んだ。

基本的には50 ΩのLN-EOM伝送線路内部に定在波を発生させるため、終端抵抗と駆動インピーダンスを50 Ωから離すことが必要で、今回は50 Ωより高い特性インピーダンスを選んだ。また、定在波がもっとも強く発生する条件とは、駆動側から見た反射係数が0になる条件である。従って、シミュレーションでは、入力側の整合回路(今回は簡単な1/4波長伝送線路を用いた)を最適化して、反射係数を0にした。シミュレーションに用いた回路を図31に示す。また、定在波の波長に対して、伝送線路長が数倍程度の場合には、定在波のどの部分を切り取るかを最適化する必要がある。これは、図32のような場合に(a)の方が(b)よりも平均電圧振幅が大きくなるためである。この差は伝送線路内の波数が小さいほど顕著である。シミュレーションでは、ロスレスの50 Ωの伝送線路をLN-EOMの伝送線路の前後に接続し、全長を変化させずにLN-EOMの位置を変化させた。



R_{out} を適当な値に設定し、A点での反射係数が最小となるように Z_t, p を最適化。光変調器内の伝送線路の両端5 mmが導波路からコネクタまでの伝送線路と仮定し、 $x = 5 \text{ mm}$ から $x = 35 \text{ mm}$ までの電圧振幅を積分し、その値を2乗してすべてが50 Ωの時と比較。

図31 定在波変調LN-EOMシミュレーション等価回路

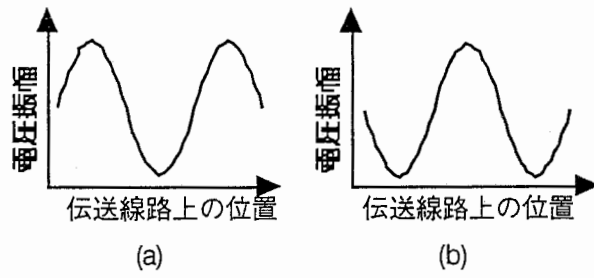


図 32 定在波位置による電圧振幅の変化

まず最初に結果から言えば、この方法による改善はほとんど見られなかった。ミリ波では、0.5 dB以下、5 GHzでも2 dB程度であった。その原因は、伝送線路の抵抗損により、定在波が小さくなったためである。図33, 34, 35にLN-EOMの定在波切り取り位置依存性、周波数依存性、電気伝導度依存性をそれぞれ示す。

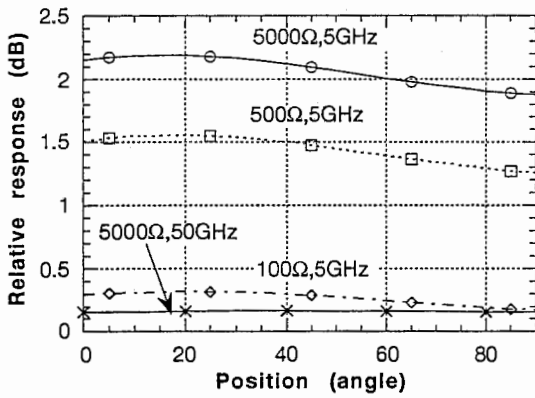


図 33 変調度の定在波位置依存性

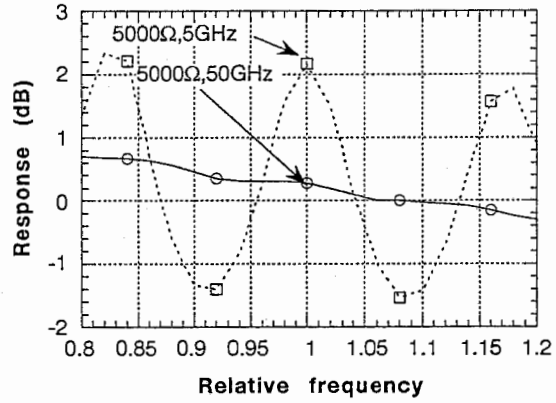


図 34 変調度周波数依存性

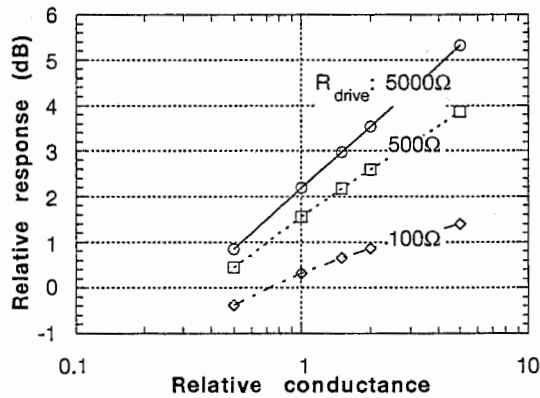


図 35 変調度の電気伝導度依存性

定在波の切り取り位置は、波長に対する角度で示している。LN-EOMの伝送線路内に4.5波長が入っている5 GHzの場合でも0.3 dB程度、45波長入っている50 GHzでは予想されたようにほとんど差は生じていな

い。また、LN-EOMのみの周波数特性は、定在波の状態が波長と伝送線路長の比によって変化するため、周期性を持つ。しかし、5 GHzの場合でも3 dB程度、50 GHzでは伝送線路のロスが大きいため、周期性はあまり見えず、単調に周波数の増加に伴い変調度が低下している。また、伝送線路のロスに大きな影響を与える電気伝導度を変化させた場合には、変調度が電気伝導度のほぼ1/2乗に比例するため、電気伝導度が2倍になっても応答は1.5 dB程度しか改善されない。伝送線路長を半分にして効率が2倍以上得られれば最終的な変調効率が改善されるが、この結果からすればそれも望めない。

特性が改善されない最大の理由は、伝送線路が50 Ωであったため定在波を用いてしか電圧振幅を大きくできず、さらに伝送線路のロスが大きかったことである。そこで、内部電極が非常に小さく、ミリ波でも集中定数として扱うことが可能で、抵抗による損失もかなり小さいEA-EOMを用いることを考えた。EA-EOMの等価回路を文献などから抽出し、図36に示すインピーダンス整合回路を用いてシミュレーションを行った。その終端抵抗 $R = 5000 \Omega$ とした場合の結果を図37に示す。図からわかるように低い周波数での応答は従来の方式より劣化しているものの、設計周波数である40 GHzでは30 dB以上の特性改善が得られている。特性の改善度は大ざっぱに $R/50$ となるため、終端抵抗値 R は高いほうが特性改善度は大きくなるが、帯域が狭くなるため、実際のシステムに応じて最適化する必要がある。また、整合回路としてフィルタに用いられる回路を用いて広帯域化することが可能である。

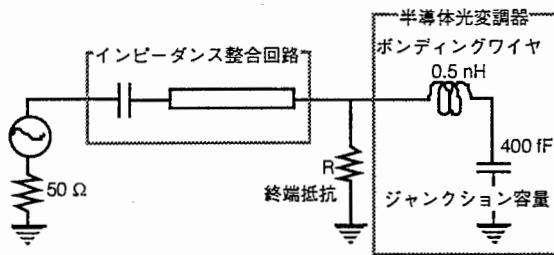


図 36 EA-EOM等価回路

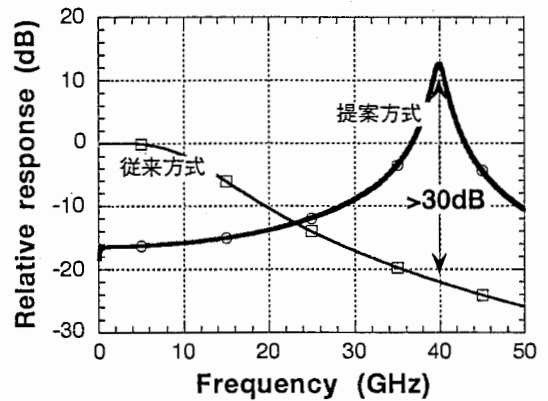


図 37 変調特性の周波数依存性

4.2.3 高線形化

LN-EOMがコサイン変調特性を持つため変調度が高くなると歪みが増加する。また、ミリ波で変調する場合、15 dBm入力でも約10%程度の変調度しか得られない。ミリ波では電力合成があまり容易でないため、小さな電力で高い変調度を得ることが期待される。そこで、光信号の無変調部を光学的に減算し、光強度の低下分をファイバンプで増幅することを考えた(図38)。この方法を用いれば、EOM自身の変調度によらず最大100%の変調度を得ることができ、1)基本的にLN-EOMは低い変調度で使用するため歪みが少ない、2)ファイバンプへ入力される光強度が低いので飽和などの問題が生じないなどのメリットが得られる。また、現状のCATV用の光システムでは40チャンネル伝送の場合、1チャンネル当りの変調度は5%程度に設定され

ている。これにより、全体での変調度が $5 \times \text{Sqrt}(40) \sim 30\%$ 程度になる。しかし、すべての信号の位相が一致した最悪のケースでは変調度が200%と大きな過変調となり信号が劣化する。この新しい方式を用いれば最悪の条件でも全体の変調度を100%以下にできるため、伝送特性の向上が期待できる。具体的な回路としては、図39に示すような回路をLiNbO₃基板上に作ることにより実現可能である。

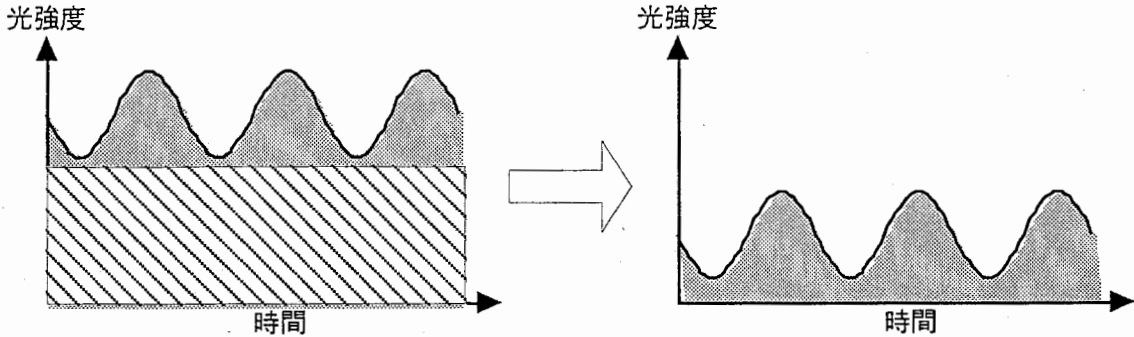


図38 光信号の光学的減算の様子

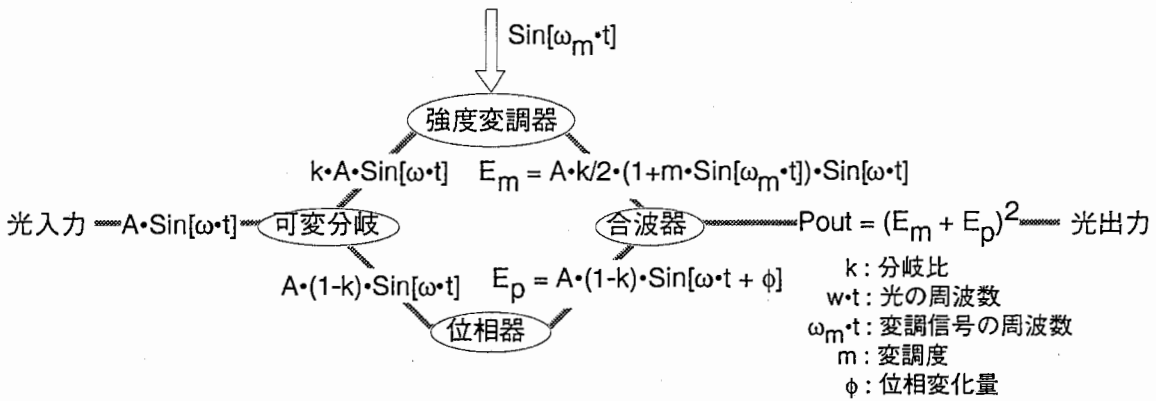


図39 導波路を用いた光学減算器と計算式

実際に導波路による回路を作製する前に簡単な計算を行った。図39に示した変数を用い、出力は受光素子による2乗検波なので出力の関数を2乗して計算した。従って、C/Nなどの値は電気換算値(dBe)となる。なお、係数Aは除いて計算した。また、LN-EOMによる強度変調は先に説明したようにコサイン特性により変調され、変調信号強度はベッセル関数に従うが、計算の簡略化のため直線的に変調すると仮定した。以下に計算を示す。

$$\begin{aligned}
 P_{out} = & \frac{1}{2} - k + \frac{k^2}{16} (10 + m^2) + \frac{k}{2} (1 - k) \cos(\phi) + \\
 & \frac{k^2 \cdot m}{4} \sin(\omega_m \cdot t) + \frac{k \cdot m}{4} (1 - k) (\sin(\omega_m \cdot t + \phi) + \sin(\omega_m \cdot t - \phi)) - \\
 & \frac{k^2}{16} (2 + m^2) \cos(2 \cdot \omega \cdot t) + \frac{k}{2} (k - 1) \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \phi) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} (k^2 - 2 \cdot k + 1) \text{Cos} (2 \cdot \omega \cdot t + 2 \cdot \phi) - \\
& \frac{k^2 \cdot m^2}{16} \text{Cos} (2 \cdot \omega_m \cdot t) + \\
& \frac{k^2 \cdot m}{8} \left(\text{Sin} (2 \cdot \omega \cdot t - \omega_m \cdot t) - \text{Sin} (2 \cdot \omega \cdot t + \omega_m \cdot t) \right) + \\
& \frac{k \cdot m}{4} (1 - k) \text{Sin} (2 \cdot \omega \cdot t - \omega_m \cdot t + \phi) + \\
& \frac{k^2 \cdot m^2}{32} \left(\text{Cos} (2 \cdot \omega \cdot t + 2 \cdot \omega_m \cdot t) + \text{Cos} (2 \cdot \omega \cdot t - 2 \cdot \omega_m \cdot t) \right) + \\
& \frac{k \cdot m}{4} (k - 1) \text{Sin} (2 \cdot \omega \cdot t + \omega_m \cdot t + \phi)
\end{aligned}$$

この計算式より、受光器のショット雑音を決定する光のDC成分 P_{DC} と変調信号成分 P_{ω_m} を抜き出すと、

$$\begin{aligned}
P_{DC} &= \frac{1}{2} - k + \frac{k^2}{16} (10 + m^2) + \frac{k}{2} (1 - k) \text{Cos} (\phi) \\
P_{\omega_m} &= \frac{k^2 \cdot m}{4} \cdot \text{Sin} (\omega_m \cdot t) + \frac{k \cdot m}{4} (1 - k) \left(\text{Sin} (\omega_m \cdot t + \phi) + \text{Sin} (\omega_m \cdot t - \phi) \right) \\
&= \frac{k \cdot m}{4} \cdot \left(k + 2 \cdot (1 - k) \text{Cos} (\phi) \right) \text{Sin} (\omega_m \cdot t)
\end{aligned}$$

となる。特に、 $\phi = \pi$ (逆相) の場合には、

$$P_{DC} = \frac{1}{16} (8 - 24 \cdot k + 18 \cdot k^2 + k^2 \cdot m^2)$$

$$P_{\omega_m} = \frac{k \cdot m}{4} (-2 + 3 \cdot k)$$

従来の変調方式は上式で、 $k=1$ より

$$\begin{aligned}
P_{DC} &= \frac{1}{8} + \frac{m^2}{16} \\
P_{\omega_m} &= \frac{m}{4} \text{Sin} (\omega_m \cdot t)
\end{aligned}$$

受光部の雑音が熱雑音ではなく受光素子のショット雑音で支配されている(ショット雑音限界)状態で動作しているとすると、 P_{DC} と P_{ω_m} の比を計算することにより、 C/N を計算することができる。厳密に計算するに

は、受光器の雑音やファイバンプの雑音を計算しなければならないが、とりあえず、それらを見捨てて計算した。

まず、最初の目的どおり逆相で光を合波し、光のDC成分を取り除く場合に、分岐比 k を横軸に種々の変調度における C/N を図40に示す。また、 P_{DC} と P_{ω_m} 、 C/N の変調度依存性をそれぞれ図41, 42, 43に示す。

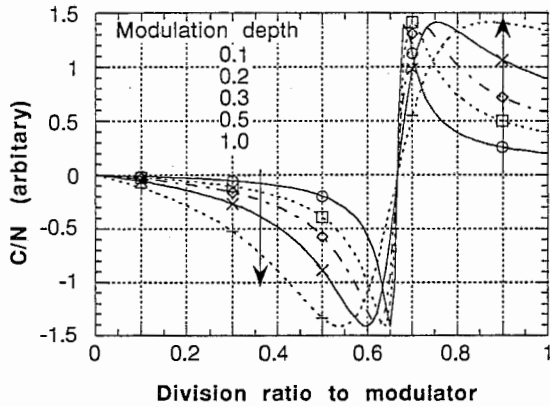


図 40 高線形EOMの C/N の分岐比依存性

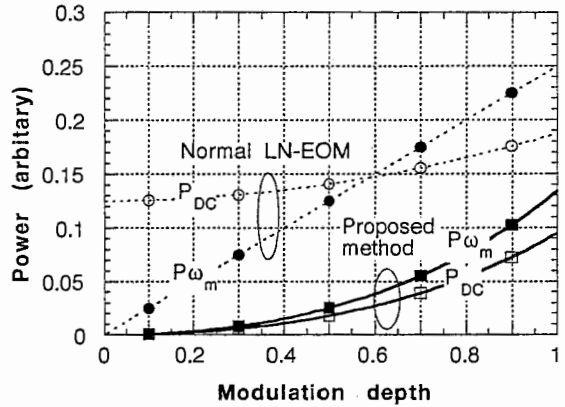


図 41 高線形EOMの信号強度の変調度依存性

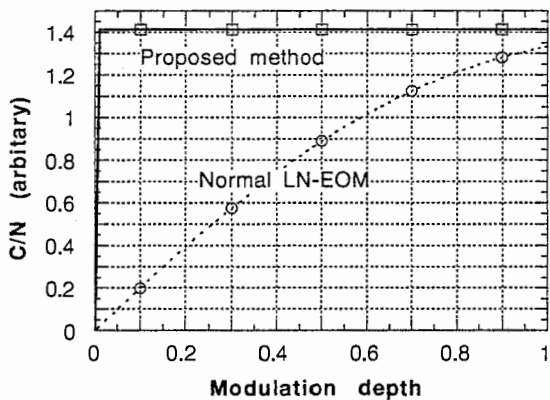


図 42 高線形EOMの C/N の変調度依存性

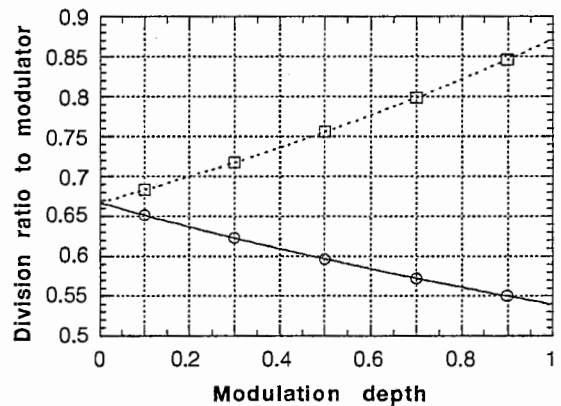


図 43 高線形EOMの最適分岐比の変調度依存性

C/N が負となっているのは位相が180度反転していることを示す。まず、変調器からの出力は変調器に入った光強度の約半分となるため、変調器からの出力と位相器からの出力が同じになる点が分岐比 $k = 0.67$ となり、その点では変調周波数の2倍の周波数が出力されるのみで基本波は出力されない(図40)。また、 C/N は変調度によらず一定値(ここでは1.4)となっている(図42)。光の変調度が同じ場合には、光の変調信号強度は同じである。しかし、光/電気変換を行う場合には、2乗検波を行うため平均光強度によりとりだせる信号電力が大きく異なる。そのため、同じ変調度での信号電力は通常の変調方式に比べてかなり小さくなる(図41)。また、最適分岐比は、変調度が高いほど0.67から離れている(図43)。分岐比と変調度から出力部での実効変調度 m_{eff} を求めることができ、その値は、最適分岐比では C/N と同様常に1.4となっている(図42)。これは、出力される光信号 $S = a \cdot \sin(\omega t) + 1$ としたときに、 S^2 に含まれる ωt 成分とDC成分の比を最大にする

るaの値が $\sqrt{2}$ であることと一致している。

ちなみに S^2 は、

$$S^2 = (a \cdot \sin(\omega t) + 1)^2 = \frac{a^2}{2} - \frac{a^2 \cdot \cos(2\omega t)}{2} + 2a \cdot \sin(\omega t) + 1$$

となり、 ωt 成分(=2a)/DC成分(=a²/2+1)が最大となる解はこの比を示すaについての2次関数のaについての微分=0とにおいて(計算簡略化のため分子分母を入れ替えて計算)、

$$\frac{d}{da} \left(\frac{\frac{a}{2} + 1^2}{2a} \right) = \frac{1}{2} - \frac{1 + \frac{a^2}{2}}{2a^2} = 0$$

を解くことにより得られ、解は $a = \pm\sqrt{2}$ となる。光信号の様子を図44に示す。

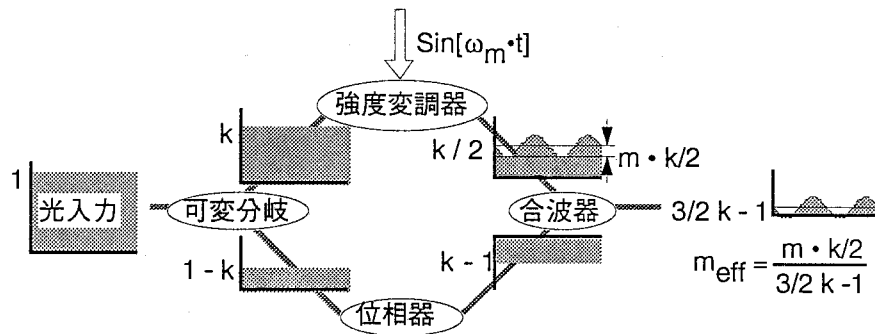


図44 最適分岐比での光信号の様子

最適分岐比はC/Nを示す式を分岐比kで微分したものが0となることで求められ、

$$k = \frac{4 - 8 \cdot \cos(\phi) - 2\sqrt{2 + m^2 - 2 \cdot \cos(2 \cdot \phi) + m^2 \cdot \cos(2 \cdot \phi)}}{8 - 10 \cdot \cos(\phi) + m^2 \cdot \cos(\phi)}$$

or

$$k = \frac{4 - 8 \cdot \cos(\phi) + 2\sqrt{2 + m^2 - 2 \cdot \cos(2 \cdot \phi) + m^2 \cdot \cos(2 \cdot \phi)}}{8 - 10 \cdot \cos(\phi) + m^2 \cdot \cos(\phi)}$$

となる(図42)。また、常に最適な分岐比を選んだ場合のC/Nの位相器の角度依存性を図45に示す。

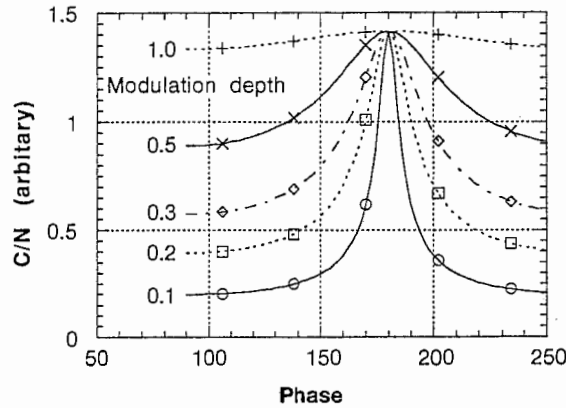


図 45 最適分岐比でのC/Nの位相依存性

変調度が小さいほど分岐比や位相角度に敏感になっていることがわかる。

さて、実際に使用する場合にはファイバアンプ等で光強度を増幅しなければならない。先に述べたように厳密にC/Nを計算するにはファイバアンプの雑音や、レーザからの雑音 (RIN)、受光器での雑音等を考えなければならない。

まず、RINにより生じる雑音は先に述べたようにレーザの光強度に比例する。新しい変調方式では光学的な演算により光強度を小さくしているが、そのとき、RINによる雑音も光強度に比例して小さくなるのかあるいは雑音は変化しないのかが重要である。しかし、RINが緩和振動周波数 (数GHz) で大きいことは雑音のコヒーレンス長が10 cm程度あるということを示している。従って、光学的演算で使用する2つの導波路の光路差長を小さくすればRINによる雑音も小さくなると期待される。光路差を変化させたときに雑音の変化など、実験的に測定することが不可欠である。

RIN雑音は、光起電流が小さなきにはショット雑音より小さい (図15参照) ので、受光強度を低くすることにより、影響を受けなくすることができる。また、熱雑音は電流/電圧変換能が高いトランスインピーダンスアンプを用いることにより、影響を押し返ることができる。

最後にファイバアンプの雑音を考える。ファイバアンプのNF₀は6 dB程度が得られている。ファイバアンプのNF₀の定義は、

$$NF_0 = \frac{P_{sp}}{G \cdot h \cdot \nu \cdot B} + \frac{1}{G}$$

P_{sp} : 自然放出光強度

G : 利得

h : プランク定数 (= 6.624×10^{-34} J)

ν : 光の振動数 (= 2×10^{14} Hz @ $1.5 \mu\text{m}$)

B : 光の帯域

である。信号帯域を1 GHz、利得が30 dB、NF = 6 dB、1.5 μ mの場合、 $P_{sp} = -32.8$ dBmとなる。光出力は10 dBm程度が得られるので変調度が10 %でもC/Nが33 dBつまり電気では66 dBe得られるので、雑音は大きな問題にならない。

今までの解析では、新しい変調方式はかなり有望であると思われる。しかし、1点については注意が必要である。それは、2次高調波である。これは、C/Nを最大にする最適分岐比を用いた場合には、出力される変調度が100 %を越えることは先に述べた。変調度が100 %を越えると、波形の折り返しが生じるため、2次高調波が大きくなる(図46)。そのため、最適分岐点では、 IM_2 としては4.5 dB程度となっている。しかし、我々のシステムでは、比帯域としては小さな値を用いるため、2次高調波が信号帯域に落ち込むことは生じない。2次高調波の大きさは分岐比と変調度を種々の条件で変化させてもC/Nと一対一の関係を持つため、2次高調波を小さくすることが必要な場合には、C/Nとのトレードオフを考えることが必要となる(図47)。

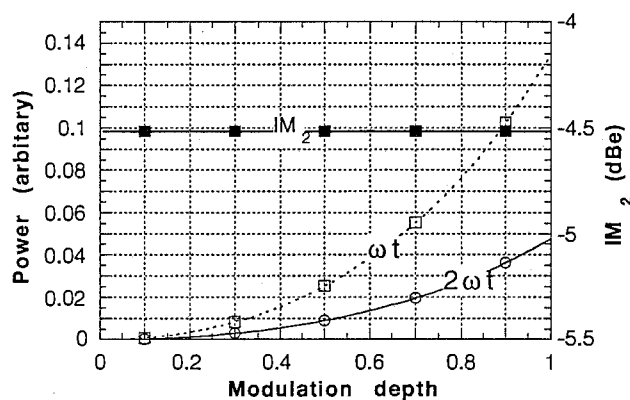


図 46 IM_2 の変調度依存性

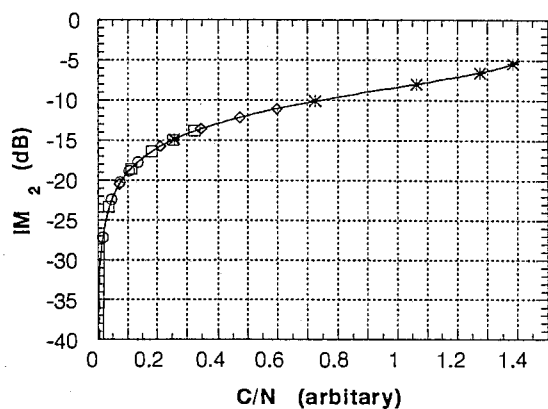


図 47 IM_2 のC/N依存性

4.3 受光器

4.3.1 概論

光/ミリ波変換は受光素子で行われる。現在高周波で一般的に用いられている受光素子としては、PIN Photodiode (PIN-PD)、Metal-Semiconductor-Metal Photodetector (MSM-PD)が一般的である。

MSM-PDの上面図、断面図、バンド構造を図48に示す。

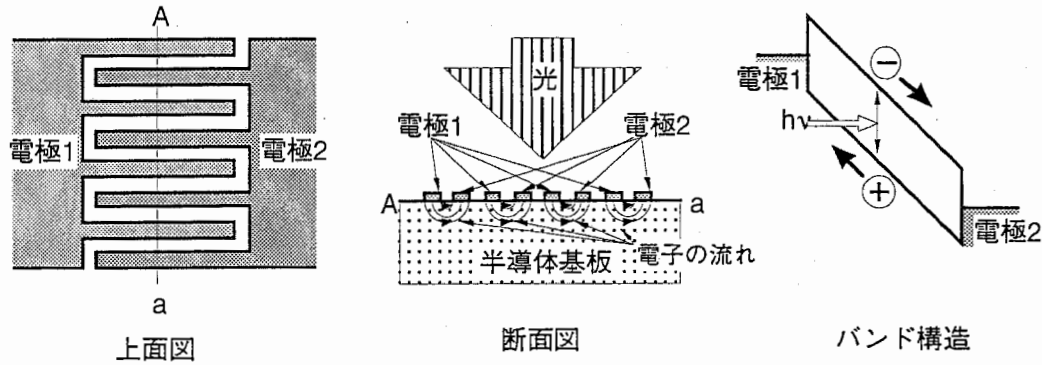


図 48 MSM-PDの構造とバンド構造

MSM-PDは櫛形電極を半絶縁性半導体基板の上に配置した構造で、構造が単純で、FETなどの能動素子の製造プロセスと整合性が良いことが特徴である。従って、トランスインピーダンスアンプなどとモノリシックIC化することが比較的容易である。しかし、構造的に電極による影ができるため原理的に量子効率は100%にならない、高速化のためには微細加工の技術が必要などの問題点もある。MSM-PDを50 Ωのアンプに接続した場合には、帯域は電子の走行時間で決定されるため、ミリ波などで動作させるには電極間隔を狭くする必要がある。比較的詳細な解析が文献22,23,24,25で行われている。また、トランスインピーダンスアンプのように入力インピーダンスが高いアンプに接続した場合、あるいは電極間隔が極めて小さくなった場合には、素子の容量と負荷抵抗のRC定数によって帯域が決定される。帯域として最も高いものはTHzのレベル26で、それ以外でも100 GHz程度のものが報告されている27,28,29。

PIN-PDはp型半導体-i型 (intrinsicの意味で、何も不純物をドーピングしていないことを示す)半導体-n型半導体のサンドイッチ構造で構成される。光/電気変換を行うのはi層で、高周波動作は電子の走行時間を短くするため厚さ0.2 μm程度である。従来は半導体基板に対して垂直な方向より光を入射していた(図

- 22 J. B. D. Soole et al., "Transit-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodetectors", IEEE Trans. Electron Devices., Vol. 37, No. 11, pp. 2285-2290, 1990
- 23 E. H. Böttcher, et al., "Ultrafast Semiinsulating InP:Fe-InGaAs-InP:Fe MSM Photodetectors: Modeling and Performance", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 28, No. 10, pp. 2343-2357, 1992
- 24 J. B. D. Soole, et al., "InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors for Long Wavelength Optical Communications", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 27, No. 3, pp. 737-752, 1991
- 25 D. L. Rogers, "Integrated Optical Receivers using MSM Detectors", J. Lightwave Technol., Vol. 9, No. 12, pp. 1635-1638
- 26 S. Y. Chou, et al., "Nanoscale Tera-Hertz Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 28, No. 10, pp. 2358-2368
- 27 Y. Chen, et al., "375-GHz-bandwidth photoconductive detector", Appl. Phys. Lett., Vol. 59, No. 16, pp. 1984-1986, 1991
- 28 B. J. van Zegbroeck, et al., "105-GHz Bandwidth Metal-Semiconductor-Metal Photodiode", IEEE Electron Device Lett., Vol. 9, No. 10, pp. 527-529, 1988
- 29 J. Burm, et al., "High-Frequency, High-Efficiency MSM Photodetectors", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 31, No. 8, pp. 1504-1509, 1995

49(a)が、吸収層が薄いために大部分の光が透過してしまい、量子効率が高くなかった。そこで、導波路型と呼ばれるPIN-PDが開発された(図49(b))。

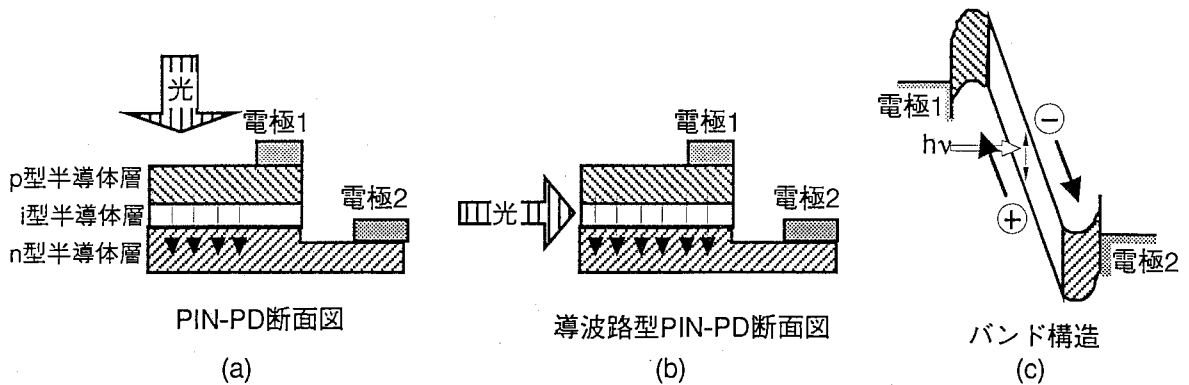


図 49 PIN-PDの構造とバンド構造

これは、半導体基板の横から光を照射することにより量子効率を高くしたものである。100 GHzを越える動作周波数のものが存在する^{30,31,32,33}。最近では光ファイバとの結合効率を高くするためクラッド層を設けて光を閉じ込め、帯域100 GHzで量子効率70%程度のもものが市販されている³⁴。PIN-PDの理論的解析も文献^{35,36,37}に掲載されている。さらに、PIN-PDと半導体光アンプをモノリシック化した例もある³⁸。

30 GHzを越えるような高い帯域を持つMSM-PD, PIN-PDの測定は、パルス波形をフーリエ変換して求めているものが多い。特に、帯域特性が走行時間で決定されるMSM-PDを通常の連続波で使用する場合には、走行時間の遅いホールによる影響を考慮する必要があるが、実際にそこまでの検討を行っている論文が現在のところは見当たらないようである。NTTの加藤氏が研究したPIN-PDは、ホールの走行時間も設計にいれているとのことであった。

MSM-PD, PIN-PD以外にも受光素子としては、Schottky Photodiode、Avalanche Photodiode (APD)、Heterojunction Phototransistor (HPT)などがある。Schottky PhotodiodeはATRで保有しているNewFocus社製の高速受光器が用いており、100 GHzを越える帯域を示すものもある³⁹。しかし、構造的にはMSM-PDとほとんど同じで、MSM-PDの一方の電極がオーミック接合になっているだけであり、現在では製造プロセスの簡

³⁰ K. S. Giboney, et al., "Travelling-Wave Photodetectors with 172-GHz Bandwidth and 76-GHz Bandwidth-Efficiency Product", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 7, No. 4, pp. 412-414
³¹ K. Kato, "Long-Wavelength Photodetectors for Ultrawide-Band Systems", IEICE Trans. Electron., Vol. E79-C, No. 1, pp. 14-20, 1996
³² Y.-G. Wey, et al., "108-GHz GainAs/InP p-i-n Photodiodes with Integrated Bias Tees and Matched Resistors", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 5, No. 11, pp. 1310-1312, 1993
³³ J. E. Bowers, et al., "Millimetre-waveguide-mounted InGaAs Photodetectors", Electron. Lett., Vol. 22, No. 12, pp. 633-635
³⁴ NTT Electronics Technology社(NEL)より 公称帯域 > 40 GHz, 量子効率 > 50%として販売されているが、最も最近入手したものは帯域 > 50 GHz, 量子効率 ~68%であった
³⁵ Y. Leblebici, et al., "Transient Simulation of Heterojunction Photodiodes - Part I: Computational Methods", J. Lightwave Technol., Vol. 13, No. 3, pp. 396-405, 1995
³⁶ M. Selim, et al., "Transient Simulation of Heterojunction Photodiodes - Part II: Analysis of Resonant Cavity Enhanced Photodetectors", J. Lightwave Technol., Vol. 13, No. 3, pp. 406-415, 1995
³⁷ Y. Zebda, et al., "Frequency Response and Quantum Efficiency of PIN Photodiode", J. Opt. Commun., Vol. 15, No. 5, pp. 185-189, 1994
³⁸ D. Wake, "A 1550-nm Millimeter-Wave Photodetector with a Bandwidth-Efficiency Product of 2.4 THz", J. Lightwave Technol., Vol. 10, No. 7, pp. 908-912, 1992
³⁹ S. Y. Wang, et al., "100 GHz bandwidth planar schottky photodiode", Electron. Lett., Vol. 19, No. 14, pp. 554-555, 1983

単なMSM-PDに研究が移ったようである。

帯域がやや小さいためベースバンド伝送の高い周波数では用いられていないが、APDやHPTなどは内部利得があるので、低い周波数では比較的よく使用されていた。

高速なAPDとしては、帯域・利得積が100 GHzを越えるものが報告されている^{40,41}。現状では、APD自身の最高動作周波数が20 GHz程度なのでミリ波通信で使用することは困難である。

HPTもPIN-PDに見られたような導波路型の研究⁴²や、高速化の研究⁴³が行われ、理論的な解析も行われている⁴⁴。HPT自身は、現状では受光素子としては帯域が狭いためあまり用いられていないが、3端子にすることにより、ミキシングなどの機能を持たせることができる、サブキャリア伝送のように比帯域が狭いアプリケーションでは伝送帯域で利得さえあれば非常に有効である(基本的には受光電流が増幅されるので、電流利得の2乗に比例した出力を得ることができ、さらに、インピーダンス変換も行うことができる)など、かなり魅力的な受光素子であるといえる。すでにHBTとしてはミリ波で十分に動作する素子がすでに開発されており、ミリ波伝送にHPTを用いることが十分に可能になってきた。

PDを用いた光/ミリ波変換の式は、

$$P_{RFout} = 1/2 (r_{PD} \cdot P_{OPTout} \cdot L_{fiber})^2 \cdot L_{PDdelec} \cdot R_{amp.}$$

P_{RFout} : フォトダイオードから出力される電気出力(W)

r_{PD} : フォトダイオードの受光感度(A/W)

P_{OPTout} : 外部変調器出力端での光出力パワー(W)

L_{fiber} : 外部変調器からフォトダイオードまでの光ファイバーで生じるロス(-)

$L_{PDdelec}$: フォトダイオード変換効率のその周波数での劣化分(-)

$R_{amp.}$: フォトダイオードが接続されているアンプの入力抵抗(Ω)

となる。また、dB表記にすると、

$$P_{RFout} = -63 + 20 \text{ Log} (r_{PD} \text{ (A/W)}) + 2 (P_{OPTout} \text{ (dBm)} + L_{fiber} \text{ (dB)}) + L_{PDdelec} \text{ (dB)} + 10 \text{ Log} (R_{amp.})$$

となる。

⁴⁰ I. Watanabe, et al., "High-Speed and Low-Dark-Current Flip-Chip InAlAs/InAlGaAs Quaternary Well Superlattice APD's with 120 GHz Gain-Bandwidth Product", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 5, No. 6, pp. 675-677, 1993

⁴¹ T. Kagawa, et al., "A Wide-Bandwidth Low-Noise InGaAsP-InAlAs Superlattice Avalanche Photodiode with a Flip-Chip Structure for Wavelengths of 1.3 and 1.55 μm ", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 29, No. 5, pp. 1387-1392, 1993

⁴² D. Wake, et al., "Optically-biased, edge-coupled InP/InGaAs heterojunction phototransistors", Electron. Lett., Vol. 29, No. 25, pp. 2217-2219, 1993

⁴³ H. Fukano, et al., "High-Speed InP-InGaAs Heterojunction Phototransistors Employing a Nonalloyed Electrode Metal as a Reflector", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 30, No. 12, pp. 2889-2895, 1994

⁴⁴ R. A. Milano, et al., "An Analysis of the Performance of Heterojunction Phototransistors for Fiber Optic Communications", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-29, No. 2, pp. 266-274, 1982

4.3.2 PD特性測定結果

ATRで保有しているPDの測定を行った。測定したPDは、長波長用のNewFocus社製PD1011 No. 130, PD1014 No. 252, PD1014V No. 583、NEL社製KEPD1510VPG No. 9である。表にPDのカタログ上の各種特性を示す。なお、NewFocus社製PDは導入時期がPD1011, PD1014, PD1014Vの順で遅くなっている。

表3 受光素子諸特性

型名	波長	PD種別	帯域	受光感度	量子効率
PD1001	0.4-0.8 μm	ショットキー	40 GHz	0.05 A/W @ 0.83 μm 6.6 V/W ¹⁾	7% @ 0.83 μm
PD1011, PD1014, PD1014V	0.9-1.75 μm	ショットキー	45 GHz	0.42 A/W @ 1.3 μm 0.35 A/W @ 1.55 μm 10 V/W ¹⁾	41% @ 1.3 μm 29% @ 1.55 μm
KEPD1510VPG	1.5 μm	PIN	37 GHz ²⁾	0.86 A/W @ 1.55 μm	69% @ 1.55 μm

1) トランスインピーダンスアンプを内蔵しているため、受光感度が電圧表記となっている

2) 40-50 GHzの特性重視のため。38 GHz付近にディップがある

各PDの量子効率と40-50 GHzでの受光感度を測定した(図50, 51)。まず、量子効率を見ると、NewFocus社製の古いPDは、光強度に依存しないはずの量子効率が光強度が低いほど高く測定されている。NewFocus社製のPDでも最新のPD1014Vは光強度によらずほぼ一定の量子効率を示している。これは、MSM-PDで見られるような内部利得が原因であると考えられる^{45,46,47}。最新のPDに関しては、おそらく表面の処理等の導入により内部利得が押さえられていると考えられる。表面の影響が出にくいPIN-PDでは全くそのような現象は見られていない。また、NewFocus社製のPDでは、1.3 μm に比べて1.5 μm の量子効率がかなり劣化している。最新のPD1014Vに関しては量子効率のカタログ値を大きく下回っている。

次に、40-50 GHzでの受光感度と比較すると、感度の順番が大きく変化している。NEL社製のPDが最も高感度であることは変化しないが、NewFocus社製のPDでは、PD1014とPD1014Vではほとんど差がないかむしろPD1014Vの方がやや特性が良い。また、カタログ上では同一スペックであるPD1011とPD1014は波長特性に大きな差がある。さらに、NEL社製のPDはPD1014Vに対してDCでの量子効率は4.5倍なので、量子効率の差から予想される受光感度差は $20 * \text{Log}(4.5) = 13 \text{ dB}$ であるにもかかわらず、40-50 GHzでの受光感度では20 dBの差が生じている。詳細な原因は不明であるが、PDおよびアンプの周波数特性等が影響しているものと考えられる。

⁴⁵ M. C. Hargis, et al., "Epitaxial Lift-Off GaAs/AlGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors with Back Passivation", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 5, No. 10, pp. 1210-1212, 1993

⁴⁶ St. Kollakowski, et al., "Fully Passivated AR Coated InP/InGaAs MSM Photodetectors", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 6, No. 11, pp. 1324-1326, 1994

⁴⁷ M. Ito, et al., "Low Dark Current GaAs Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Photodetectors Using WSi_x Contacts", IEEE J. Quantum Electron., Vol. 22, NO. 7, pp. 1073-1077, 1986

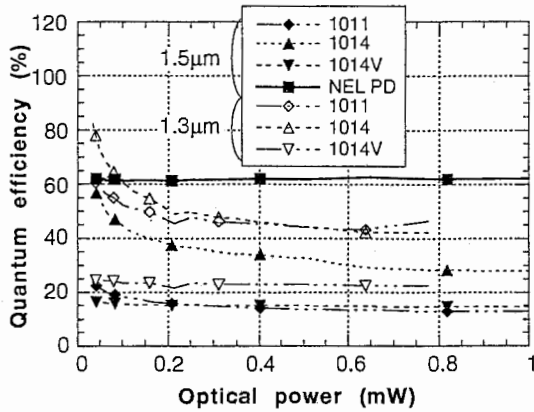


図 50 各種PDの受光特性

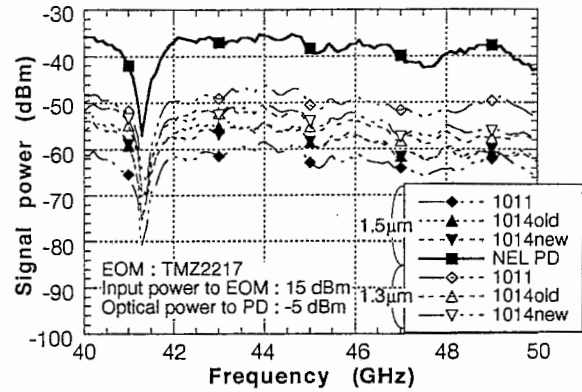


図 51 各種PDの周波数特性

4.3.3 高効率化の検討

受光素子の高効率化には1)素子自身の量子効率の改善、2)素子の周波数特性改善、3)トランスインピーダンスアンプの付加などが考えられる。今回は、1)高効率化が期待できるHPT、回路上の工夫で改善のできる3)のトランスインピーダンスアンプとMSM-PDのモノリシックIC化を試みた。

4.3.3.1 HPT

HPTは前任者の末松氏が研究を行っていたので、それを用いて引き続き測定を行った。雑音の解析等は末松氏の論文が参考になる^{48,49}。また、著者自身はあまり調査を行っていないが、HPTの研究が盛んであった当時には数多くの文献が出ていたと思われるので参考にするとよい。以前はGaAsベースの受光用の窓をベース電極とエミッタ電極の間に設けたHBTを用いていたが、今回の実験は、比較対象として高感度なPIN-PDの存在する長波長帯で行った。HPTはInGaAsベースの通常のHBTを用いたので、特に受光用の窓はなく、エミッタ電極やコレクタ電極とベース電極のすき間から受光している。

HPT (HBTでも同じ)により受光効率が改善されるのは、HPT自身に電流利得があるため、見掛け上量子効率が100%を越えることにある。電流利得があることは入力インピーダンスの高いトランスインピーダンスアンプが接続されたのと等価で、アンプを接続した場合には、信号出力に関係しない電流が回路内を流れるためその電流による付加的なショット雑音が発生するが、HPTの場合には増幅のために必要な電流が比較的小さなため雑音が小さくなり高いC/Nを得ることができる。しかし、現在あまり使用されていないのは先にも述べたように帯域が非常に狭いことと、PIN-PDの特性向上や光ファイバアンプの登場により魅力が少なくなったためであると考えられる。しかし、我々のシステムのように比帯域の小さなサブキャリア伝送では周波数特性の傾きを補正しやすいため、魅力のある素子であるといえる。

⁴⁸ 末松 英治, "HBTの光マイクロ波集積回路への適用", ATRテクニカルレポート, TR-O-0076

⁴⁹ E. Suematsu, et al., "Signal-to-noise performance of a fiber optic subcarrier link using HBT optoelectronic upconverter", IEEE MTT-S Microwave Symp. Dig., May 1994

現在、研究という面ではHPTを単なる受光素子でなくミキサなどの能動素子として使用したものが多いが、ここでは単なる受光素子としての評価を行った。

まず、静特性評価を行った。光照射なしでのコレクタ電流および電流増幅率 β のベース電流依存性を図52に示す。

コレクタ電流が多いほど電流増幅率は高くコレクタ電流が10 mA程度では100近い。この受光時のコレクタ電流を電流利得で割ることによりベースへ流れ込む光起電流を計算し、受光効率を計算した。図53に他の受光素子との比較を示す。受光効率を正確に測定するにはベースとエミッタを接地し、コレクタにバイアスを加えて光起電流を測定すればよい。

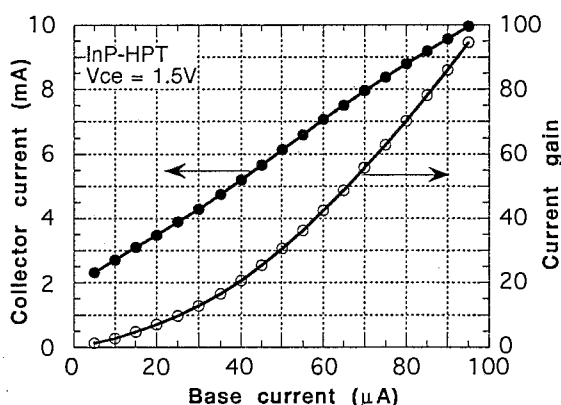


図 52 コレクタ電流、電流利得のベース電流依存性

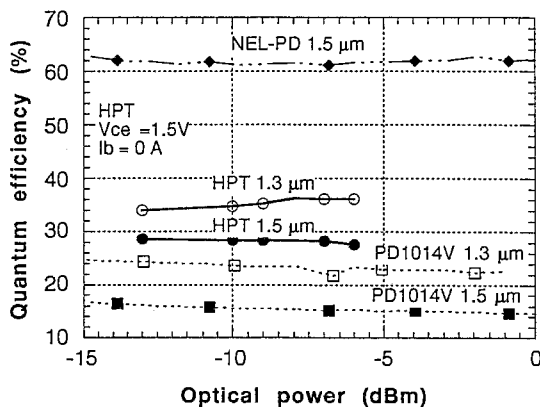


図 53 各種受光器比較

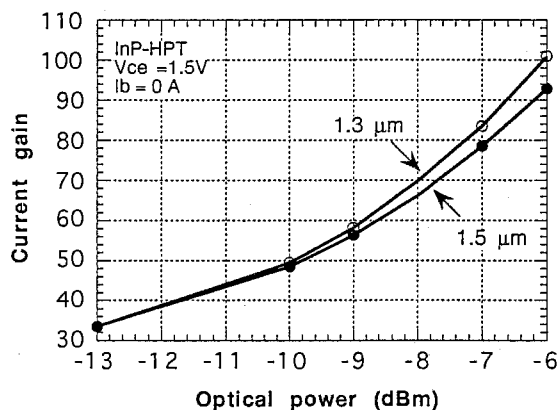


図 54 電流利得の光入力依存性

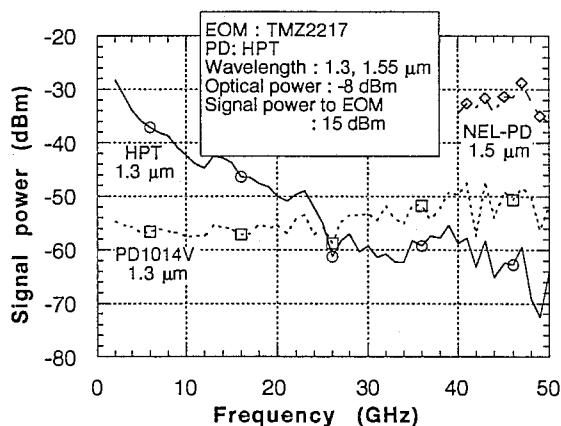


図 55 各種受光器周波数特性比較

量子効率はPD1014Vよりもやや高くNEL-PDよりかなり低い。また、1.5 μm より1.3 μm の方が感度が高い。HPTは縦型の素子で表面の影響をあまり受けないため、ショットキーダイオードで見られた受光効率の光強度依存性は見られない。電流利得の受光強度依存性を図54に示す。波長による差はほとんどなく、光強度が強いほど電流利得も大きい。今回は測定していないが、ベース電流を流しておくことにより、低い光強度でも高い電流増幅率を得ることができそうである。周波数特性の他のPDとの比較を図55に示す。周波数特

性は他の受光素子に比べるとかなり大きい。また、ミリ波帯では量子効率の低いPD1014Vよりも受光感度が低下している。これは、素子そのものの周波数特性が悪いためと考えられる。

EOMへの信号入力電力と光強度を変化させたときの受信電力の周波数依存性を図56, 57に示す。FM法で測定したLN-EOMの周波数特性で補正済みである。

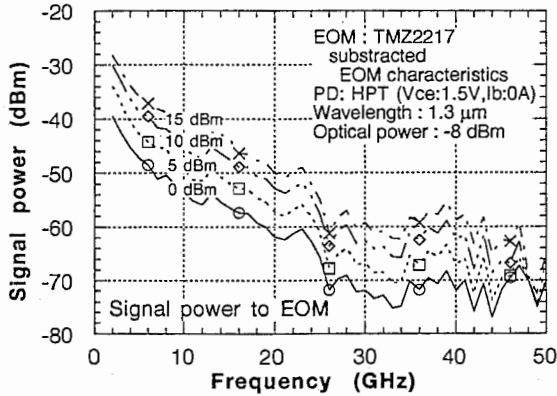


図 56 HPTの周波数特性の入力電力依存性

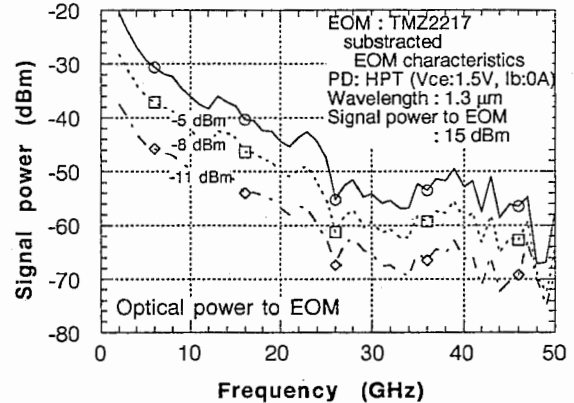


図 57 HPTの周波数特性の光強度依存性

HPTは非常に大きな周波数特性を持っている。また、理論どおりに出力電力は信号入力電力に比例し、光強度の2乗に比例している。

これらの結果より、現段階ではミリ波でのサブキャリア伝送にHPTを使用するには更なるデバイスの高速化が必要であると考えられる。近年ミリ波帯で十分に動作するHBTの報告⁵⁰もあるので、そのようなHBTを用いればミリ波帯で十分に利得が得られる可能性が高い。

4.3.3.2 トランスインピーダンスアンプ

4.3.3.2.1 トランスインピーダンスアンプの設計

用語としてここでは、MSM-PD単体を受光素子、MSM-PDとトランスインピーダンスアンプ(以下TIAと記す)のモノリシックICを受光器と呼ぶことにする。まず最初にトランスインピーダンスアンプの設計を行う。基本的にTIAは高い入力インピーダンスによりアンプ内部で発生する雑音を低減する。また、文献等にあるTIAは一般的にベースバンド伝送用に設計されているため、入力インピーダンスとしては純抵抗である。従って、これまでの設計では、受光素子は電流源として扱い、それを如何に効率よく増幅し、雑音を小さくするかという設計が行われてきた。しかし、ミリ波などの高周波で設計を行う場合には、受光素子は単純な電流源ではなく、電流源と並列に容量を直列に抵抗を付加した回路となる。そのときのSパラメータの軌跡を図58に示す。

⁵⁰ Y.-K. Chen, et al., "Subpicosecond InP/InGaAs Heterostructure Bipolar Transistors", IEEE Electron Device Lett., Vol. 10, No. 6, pp. 267-208, 1989

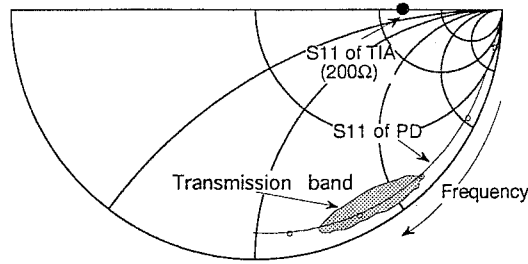


図 58 受光素子のSパラメータの周波数依存性

受光素子のSパラメータは、周波数が高くなるにしたがって受光素子の容量によりopenから右回りに回っていく。また、直列抵抗の影響でやや内側に入ってくる。一般のTIAの様に入力インピーダンスが純抵抗の場合(図中では200 Ωの場合を示す)、周波数が高くなるにしたがって受光素子のSパラメータの位置とTIAのSパラメータの位置が徐々に離れていく。このことは受光素子とTIA間の反射係数が大きくなること示し、この反射係数の増加により応答が3 dB低下した周波数が帯域となる。TIAのインピーダンスが高いほど反射係数が小さく、応答が高くなることを示す。これは、受光素子を電流源として考えると、入力抵抗に比例して出力電力が大きくなることがわかる(図59)。しかし一方で、TIAのインピーダンスが高くなると、受光素子とTIAの反射係数(スミスチャート上ではTIAとPDのSパラメータの距離)の周波数依存性が大きくなり3 dB帯域が小さくなることわかる(このことは低周波ではRC定数により応答が劣化したと説明される)。

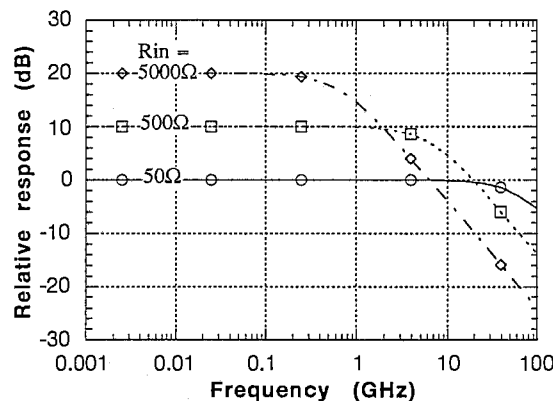


図 59 受光感度の入力抵抗依存性

ミリ波の帯域伝送を考えた場合には、低周波での応答が低くても全く問題がないので、帯域伝送に着目したTIAの設計が可能となる。文献ではこのような帯域伝送に着目した受光器の設計が行われている例はコヒーレント通信用に数少ない文献があるのみである⁵¹ (ごく最近になってC-bandでの帯域伝送用の光伝送系の論文が発表された⁵²)。伝送帯域に着目した設計とは、具体的には伝送帯域で受光素子のSパラメータとTIAの入力のSパラメータの複素共役を同じになる(つまり入力インピーダンスの整合する)ように設計することにほかならない。ここで、用語の説明で述べたトランスインピーダンスゲインについて再び考えてみ

⁵¹ G. Jacobsen, et al., "Tuned Front-End Design for Heterodyne Optical Receivers", J. Lightwave Technol., Vol. 7, No. 1, pp. 105-114, 1989

⁵² B. J. Markey, et al., "Impedance-Matched Optical Link for C-Band Satellite Applications", IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 43, No. 9, pp. 960-965, 1995

る。トランスインピーダンスゲインのSパラメータによる定義は、

$$G_t = \frac{|Z_0| \cdot |S_{21}|}{|1 - S_{11}|}$$

である。 Z_0, S_{21} を一定とするとスミスチャート上で S_{11} がopenに近いほど G_t は高い値となる。しかし、帯域伝送用の設計を考えた場合には、 S_{11} は受光素子のSパラメータの複素共役に近いことが必要で、必ずしもopenに近いことが良い特性につながるとは限らない。このことはトランスインピーダンスゲインがベースバンド伝送用の受光器設計を行う過程で考えられた式であるため、サブキャリア伝送のような高周波回路には単純には適用できないことを示しているものと考えられる。また、スミスチャート上で受光素子のSパラメータよりopenに近いほうが G_t が高くなることは実際の特性と一致しない。高周波に適応できる新たな指標を考えるとすれば、

$$G_t' = \frac{|G_a|}{|S_{det}^* - S_{11}|}$$

G_a : 入力をインピーダンス整合し、出力を50Ωに接続したときの利得

S_{det}^* : 受光器のインピーダンスの複素共役

などが適当と考えられる。

また、入力換算雑音電流もこのようにトランスインピーダンスゲインの定義がやや曖昧であることと、もともと電流として定義したのは、TIAの入力インピーダンスが純抵抗であったからで、インピーダンス整合などを行う場合には単純に電流としての規定が困難になる。従って、雑音の指標も高周波で一般的に用いられているNF (ただし入力には50Ωではなく受光素子と同じインピーダンスを接続した状態で)を用いることが適当と考えられる。

さて、入力整合をさせる際に一定の帯域幅をとるためには、ある程度の反射を許容するか損失を含んだ整合回路を用いなければならない。今回の設計では、受光素子に並列に抵抗を挿入することにより帯域を確保することを考えた。その並列抵抗の値と帯域との関係を図60に示す。

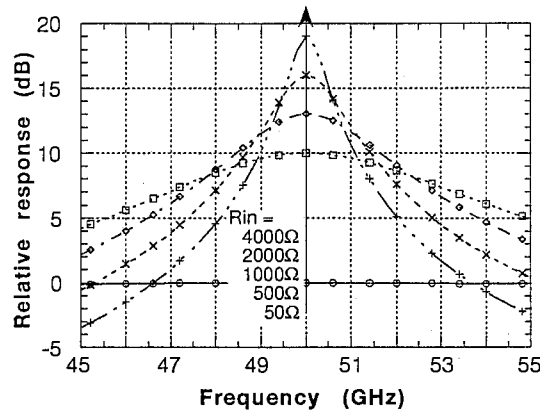


図 60 帯域の入力抵抗依存性

今回の設計は50 GHz中心で帯域は2 GHzを目標とした。従って、受光素子から見たTIAの入力抵抗としては1000 Ω 程度になるように設計を行った。また、MSM-PDの形状は先球ファイバによる照射光の直径が約10 μm であるので、フィンガー幅が1 μm 、フィンガー間隔1 μm 、フィンガー長13 μm 、フィンガー数は3 \times 4とした(図64参照)。

Sパラメータは文献などより図61に示す等価回路と仮定して設計を行った。また、設計時のMSM-PDのSパラメータの複素共役とTIAの入力インピーダンスの関係を図62に示す。

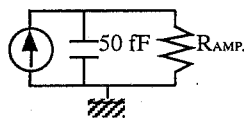


図 61 MSM-PD等価回路

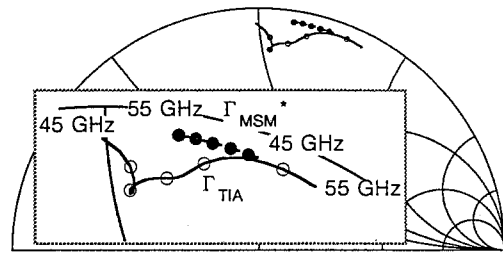


図 62 MSM-PD複素共役インピーダンスとアンプ入力インピーダンス

設計した回路図を図63に示す。FETは、Two mode transistor (TMT)と呼ばれるHeterojunction FETの一種で、ゲート長0.2 μm 、ゲート幅100 μm である。FETの f_t 、 f_{max} はそれぞれ90 GHzと180 GHzであった。アンプは3段構成とした。また、Libraのシミュレーションで使用したサーキットファイルを以下に示す。トランスインピーダンスアンプの回路設計は前任者の末松氏がを行い、その後の評価、解析を著者が行った。現在の光通信では1.5 μm の超波長が研究の中心であるが、今回はプロセスの制約もあり、0.8 μm 帯用の受光器となる。また、受光素子となるMSM-PDの帯域は、動作周波数である50 GHz付近ではかなり特性が劣化していると考えられるが、MSM-PD単体の特性と比較することにより、本設計の有効性を検証した。

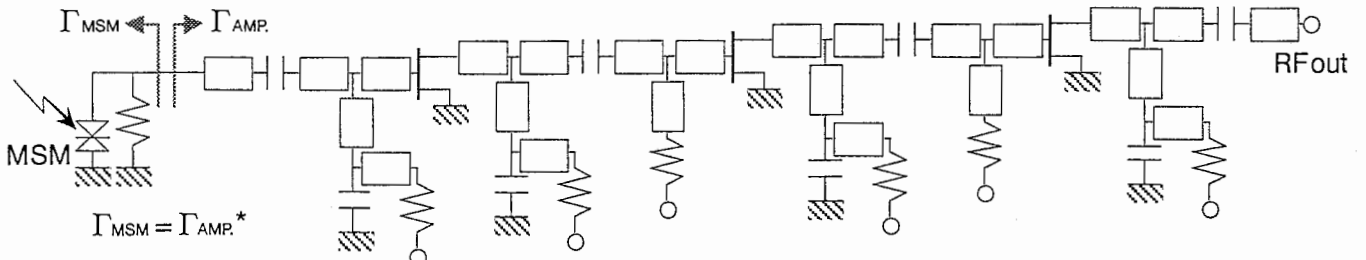


図 63 トランスインピーダンスアンプ回路図

```
! SCCS file libra300/examples/extouchstn: @(#)get -r1.1
/eesof/src/libra300/exam
! Generalized noise analysis of a 3-link distributed
amplifier - 5/12/88
! The amplifier was designed by K. Niclas et al. (IEEE
Trans. MTT, Aug. 83)
```

```
DIM
FREQ GHZ
ANG DEG
CAP pF
IND NH
RES OH
lng um
time ps
cond /oh
```

```
var
z3=55
k3=6.70
a3=0.000070
```

```
Coo#0.1 1.635761 2.4
Co#0.1 1.024007 2.4
Csl#0.1 2.054960 2.4
```

```
!-----
rload=2000 !0 5000
!-----
r1=0 !#0 0 1200!gate short ldanme
r2=0 !#0 0 600!drain ldanme
r3=1000 !#500 1000 2000!gate 2danme
r4=0 !#0 0 600 !drain 2danme
rg1=1000 !500 5000!gate ldanme hozyo bias
rdrain=600 !#0 0 500!drain bias hozyo ldanme
```

```
Lc1#50 178.1293 400!383 etuzoku1
Ll1#50 80.16660 400!1003setuzoku1
Li2#50 636.4893 700!SHORT 1030????????
Li3#50 53.20496 200!LINE2 st=684.5835
Li4=0 !#0 0 300!FB 1
Li5=200!400!gate bias line
Lol#50 99.04887 200!LINE 843.5361
Lo2#50 83.13201 300!SHORT st=812.6292
Lo3=150 !200! drain bias line
Lbia1=150 !400! bias 2danme gate
```

```
Lbia2=200 !#0 200.4630 1000!bias 2danme gate
Lbia3=200 !#0 200 1000!bias 3danme gate
Lo4#50 58.20683 500 !
Lo5=0 !#0 7.068212 300 !FB2
Lc2#50 503.4590 600 !mim setuzoku 2
```

```
!-----
Lt1#50 50.02872 200 !LINE 843.5361
Lt2#50 128.6543 300 !SHORT st=812.6292
Lt4#50 183.3556 500 !
Lt5=0 !0 600 !FB2
Lct#50 400.5979 600 !mim setuzoku 2
```

```
!----
Lm1#100 355.1858 500 !LINE1
Lm2#50 797.4822 1200 !SHORT st=781.8367
Lm3#50 50.00009 100 !
Lc3#50 50.00032 100 !mim setuzoku
Lm4=200 !400!
```

```
!
!-----
CKT
!=====amp parts =====
```

```
TLINP 1 2 Z^Z3 L^Lc1 K^K3 A^A3 F=1
CAP 2 3 C^Coo
TLINP 3 4 Z^Z3 L^Ll1 K^K3 A^A3 F=1
TLINP 4 6 Z^Z3 L^Li2 K^K3 A^A3 F=1 !SHORT --HI LINE
CAP 6 0 C^Cs1
TLINP 6 7 Z^Z3 L^Li5 K^K3 A^A3 F=1 !SHORT --HI LINE
res 7 8 r^rg1 ! gate bias1
TLINP 4 9 Z^Z3 L^Li3 K^K3 A^A3 F=1
DEF2P 1 9 NAIN
S2P 9 10 30 ow_tmt337.out
DEF3P 9 10 30 NA2P
```

```
TLINP 30 0 Z^Z3 L^Li4 K^K3 A^A3 F=1 !50OHM
TLINP 30 0 Z^Z3 L^Li4 K^K3 A^A3 F=1 !50OHM
DEF1P 30 NASER
```

```
! *****
TLINP 10 11 Z^Z3 L^Lo1 K^K3 A^A3 F=1 !LINE @@@@
TLINP 11 12 Z^Z3 L^Lo2 K^K3 A^A3 F=1 !SHORT STUB
CAP 12 0 C^Cs1
res 12 62 r^rdrain
TLINP 62 63 Z^Z3 L^Lo3 K^K3 A^A3 F=1 !
!
TLINP 11 13 Z^Z3 L^Lc2 K^K3 A^A3 F=1 !MIM
```



```

CAP 13 14 C^Co !MIM
TLINP 14 15 Z^Z3 L^Lc2 K^K3 A^A3 F=1 !MIM
DEF2P 10 15 NAOUT

TLINP 15 16 Z^Z3 L^Lbia1 K^K3 A^A3 F=1 !bias
res 16 50 r^r3
TLpoc 50 51 Z^Z3 L^Lbia2 K^K3 A^A3 F=1 !bias
!

TLINP 15 17 Z^Z3 L^Llo4 K^K3 A^A3 F=1 !LINE
DEF2P 15 17 NBIN

S2P 17 18 40 ow_tmt337.out
DEF3P 17 18 40 NB2P

TLINP 40 0 Z^Z3 L^Lo5 K^K3 A^A3 F=1
TLINP 40 0 Z^Z3 L^Lo5 K^K3 A^A3 F=1
DEF1P 40 NBSER

!*****
TLINP 10 11 Z^Z3 L^Lt1 K^K3 A^A3 F=1 !LINE @@@@@@
TLINP 11 12 Z^Z3 L^Lt2 K^K3 A^A3 F=1 !SHORT STUB
CAP 12 0 C^Cs1
res 12 62 r^rdrain
TLinp 62 63 Z^Z3 L^Lo3 K^K3 A^A3 F=1 !
!

TLINP 11 13 Z^Z3 L^Lct K^K3 A^A3 F=1 !MIM
CAP 13 14 C^Co !MIM
TLINP 14 15 Z^Z3 L^Lct K^K3 A^A3 F=1 !MIM
DEF2P 10 15 NTOUT

TLINP 15 16 Z^Z3 L^Lbia1 K^K3 A^A3 F=1 !bias
res 16 50 r^r3
TLpoc 50 51 Z^Z3 L^Lbia2 K^K3 A^A3 F=1 !bias
!

TLINP 15 17 Z^Z3 L^Llt4 K^K3 A^A3 F=1 !LINE
DEF2P 15 17 NTIN

S2P 17 18 40 ow_tmt337.out
DEF3P 17 18 40 NT2P

TLINP 40 0 Z^Z3 L^Lt5 K^K3 A^A3 F=1
TLINP 40 0 Z^Z3 L^Lt5 K^K3 A^A3 F=1
DEF1P 40 NTSER

!*****
TLINP 18 25 Z^Z3 L^Lm1 K^K3 A^A3 F=1
TLINP 25 26 Z^Z3 L^Lm2 K^K3 A^A3 F=1 !SHORT HI_LINE
CAP 26 0 C^Cs1
res 26 73 r^rdrain
TLinp 73 74 Z^Z3 L^Lm4 K^K3 A^A3 F=1 !SHORT HI_LINE
!

TLINP 25 27 Z^Z3 L^Lm3 K^K3 A^A3 F=1
CAP 27 28 C^Co
TLINP 28 29 Z^Z3 L^Lc3 K^K3 A^A3 F=1
DEF2P 18 29 NBOU

!*****
!

!

!

```

```

NAIN 1 2
NA2P 2 3 4 !-----
NASER 4
!*****
NAOUT 3 5
NBIN 5 6
NB2P 6 7 8 !-----
NBSER 8
!*****
NTOUT 7 20
NTIN 20 21
NT2P 21 22 23 !-----
NTSER 23
!*****
NBOU 22 9
!*****
DEF2P 1 9 calc

cccs 1 2 0 0 m=0.168 a=0 r1=50 r2=50 f=5000 t=0
def2p 1 2 fib

gain 1 2 a=-7 s=0 f=10000
cccs 2 3 0 0 m=.20 a=0 r1=50 r2^rload f=10000 t=0
cap 3 0 c=.050
def2p 1 3 eo_conv

fib 1 2
eo_conv 2 3
calc 3 4
def2p 1 4 receiver

outvar
a=calc y11
b=calc y21
c=calc y12
d=calc y22

outeqn
Gv=-b/(d+1/50)
ye=a-(b*c)/(d+1/50)
yin=a+Gv*c
transi=(Gv/yin)**2
tram=(Gv/ye)**2

FREQ.
SWEEP 43 58 .5

out
receiver db[s21] gr1
calc db[s21] gr1a
! eo_conv db[s21] gr1
! eo_conv db[s22] gr1a
! eo_conv s22
outeqn db[transi] gr1a
calc VSWR2 GR1
receiver ang[s21] gr2

```

```

calc    ang[s21] gr2
outeqn ang[transi] gr2
calc   nf      GR3
calc   VSWR1   GR3
calc   VSWR2   GR3
calc   k       GR3
!
GRID
RANGE  40  60  2
GR1    10 -40  5
GR1A   10  60  5
GR2   -180 180 90
gr3    0   10  1

OPT
RANGE  48    53
!*****
receiver db[s21] ==-12 10
!*****
! outeqn db[transi] <43 5
outeqn db[transi] >50 6
calc   DB[S21]> 16    2
! calc   DB[S21]< 8    10
! calc   VSWR1 <10    2
calc   VSWR2 <2.5    6
calc   k    >1.2    2
! RANGE  18    14.0
! calc   NF <8.0    1
! ***** BOT7OM OF FILE *****

```

4.3.3.2.2 特性評価

4.3.3.2.2.1 MSM-PD単体

MSM-PDはMBEで成長したアンドープGaAsバッファ層の上にTi/Pt/Auを蒸着することにより形成した。作成したMSM-PDの構造と写真を図64, 65に示す。

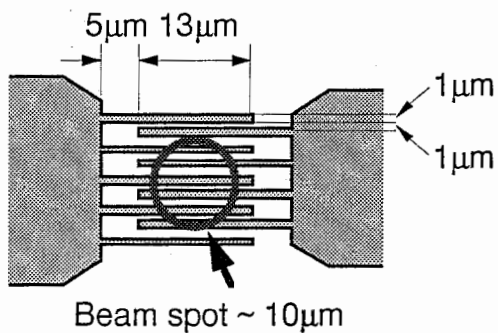


図 64 MSM-PDの構造

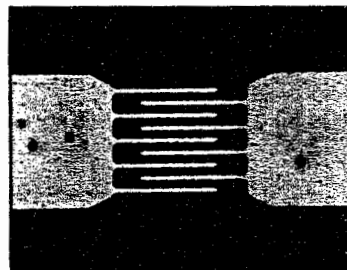


図 65 MSM-PD顕微鏡写真

前にも述べたが、活性層がGaAsなので受光波長は $0.8\ \mu\text{m}$ である。まず最初にMSM-PD単体の静特性評価を行った。I-V特性を図66に示す。

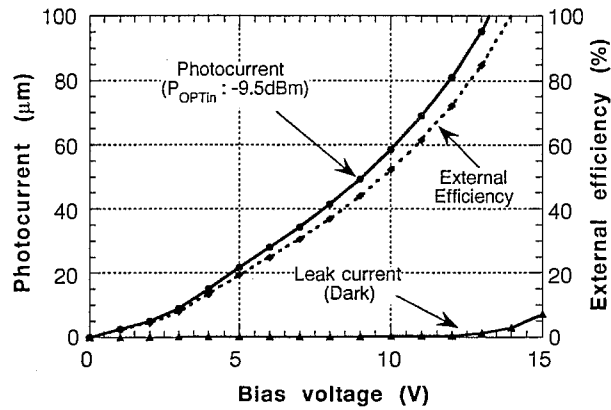


図 66 MSM-PDの受光特性

一般的な受光素子に見られる飽和特性が見られず徐々にブレイクダウンしているようである。リーク電流は13 Vまでは $1\ \mu\text{A}$ 以下であった。受光部は電極で半分影になるため、ブレイクダウン付近のバイアス点では内部量子効率が100%を越えている。これは、MSM-PDによく見られる内部ゲインが原因であると考えられる45,46,47。なお内部ゲインに関係のあるMSM-PDの表面は、 SiN_x 膜で覆われている。

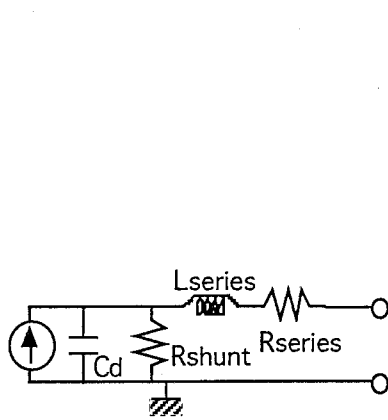


図 67 Fittingに用いた等価回路

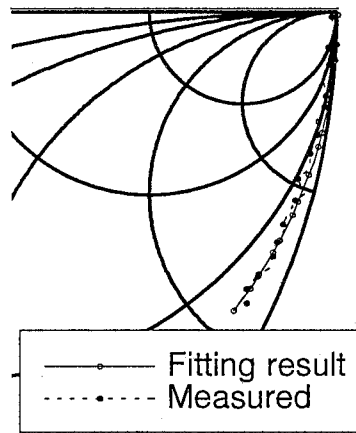


図 68 MSM-PD Sパラメータ

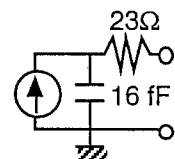


図 69 実素子の等価回路

MSM-PDのSパラメータを測定し、図67に示す等価回路でフィッティングを行った結果、図68に示す等価回路で図68に示す様に実測結果とよく一致した。得られた等価回路は設計時に仮定していたものより容量値がかなり小さい(図69)。

4.3.3.2.2.2 アンブ

TIA自身は非常に高い入力インピーダンスを持っているため、50 Ω測定系では測定精度が非常に悪いと考えられる。そこで、アンブ自身の特性を評価するためにTIAの入力の整合回路を変更して50 Ωに整合するアンブを試作し、その評価を行った。図70, 71に入出力の反射係数と S_{21} の設計値と実測値を示す。アンブのチップサイズは受光器と同じ2.2×1.14 mmである。計算ミスにより各FETのドレインに700 Ω程度の抵抗を付加したため、ドレイン電圧は17 Vと高くなった。また、ゲート電圧は各FETにドレイン電流が20 mA程度流れるように調整した。

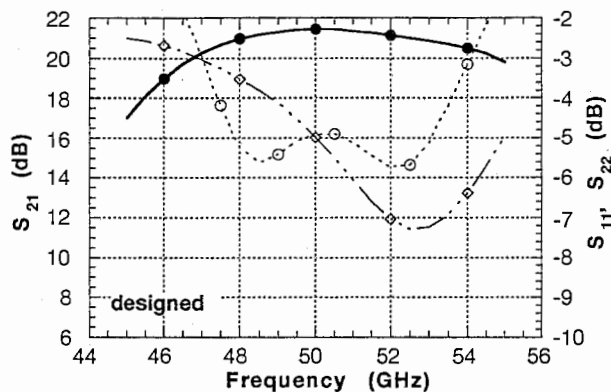


図 70 アンブのSパラメータ (設計時)

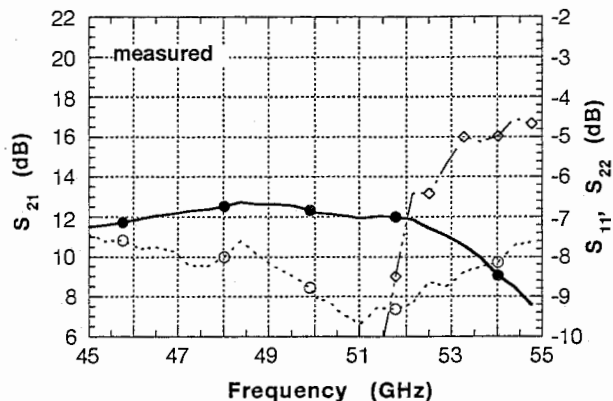


図 71 アンブのSパラメータ (実測値)

今回の設計時には、伝送線路の基本特性等の情報が乏しかったため、実際に出来上がったアンブの S_{21} や、入力反射係数はかなり異なったものとなった。原因はFETの素子パラメータが設計時に使用したものと異なったためと、伝送線路のロスが予想以上に大きかったことによると考えられる。

最後にアンブの入出力特性を示す(図72)。10 dBm以上の出力が得られており、 IP_3 も18 dBm以上と中出力アンブとしても良好な特性を示した。今回のアンブはドレイン電圧を共通でかけても発振等は生じなかったが、これは各ドレインに付加されている抵抗が高いために帰還がかかりにくかったためと考えられる。

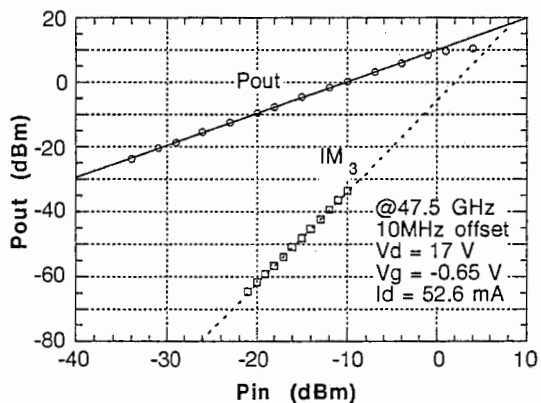


図 72 アンブの入出力特性

4.3.3.2.2.3 受光器全体

試作した受光器のチップサイズは 2.2×1.14 mmで、アンプと同様に $V_d = 17$ V, $I_d =$ 約55 mA, $Bias_{MSM} = 10$ Vで動作させた。チップ写真を図73に示す。

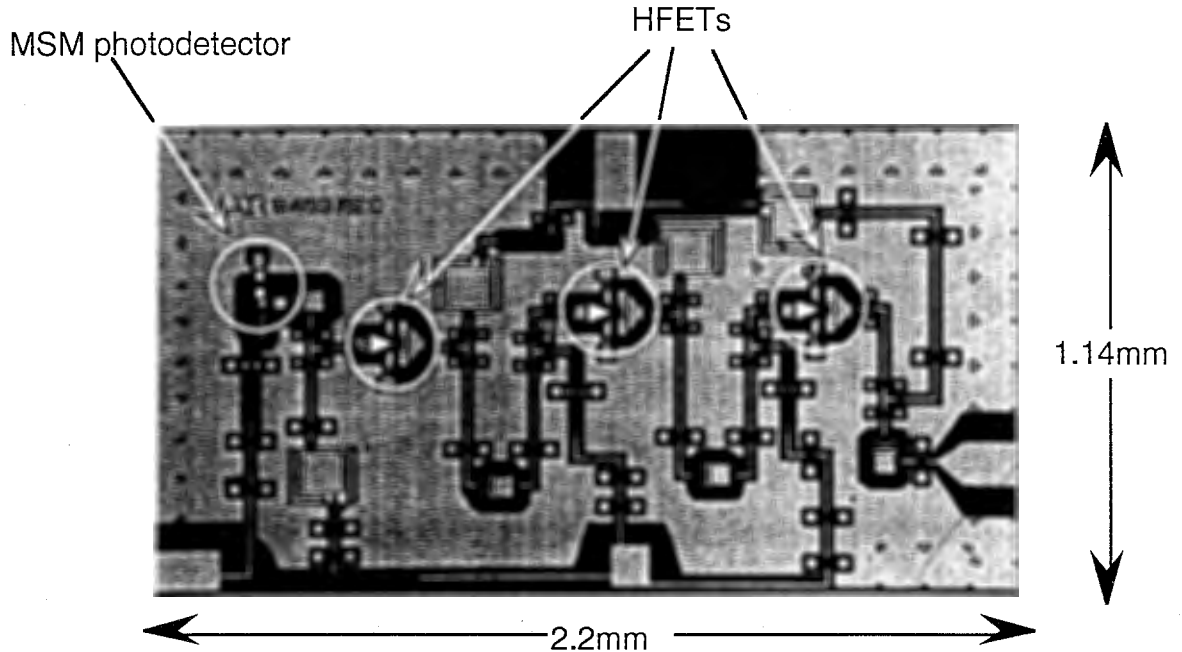


図 73 トランスインピーダンスアンプチップ写真

受光器の特性は一定変調度の光信号を入射した場合の受光器からの出力として評価した(図74)。用いた外部変調器の V_{π} は2.0 VのNo. 585の変調器を用いた。EOMへの入力電力は0 dBmで、40-50 GHzでのEOM自身の周波数特性は-30 dB程度なので、位相変調度0.005 rad.に相当し、0.5 %程度の変調度となる(図19参照)。

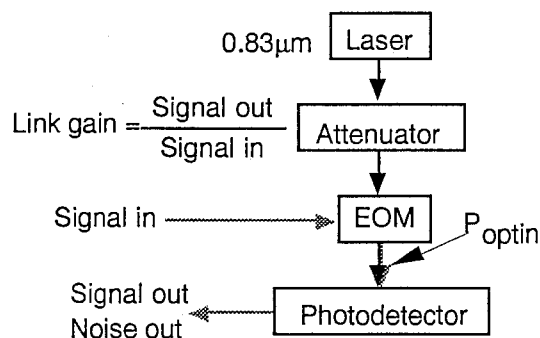


図 74 光応答測定系

このような条件で、周波数特性、RF入力依存性、光入力依存性の測定を行った。その結果を図75, 76,

77に示す。

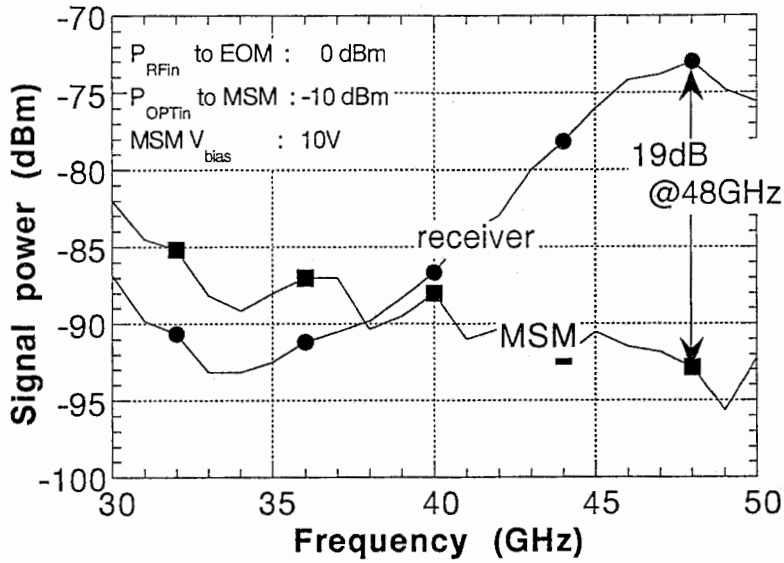


図 75 トランスインピーダンスアンプとMSM-PD単体の周波数特性

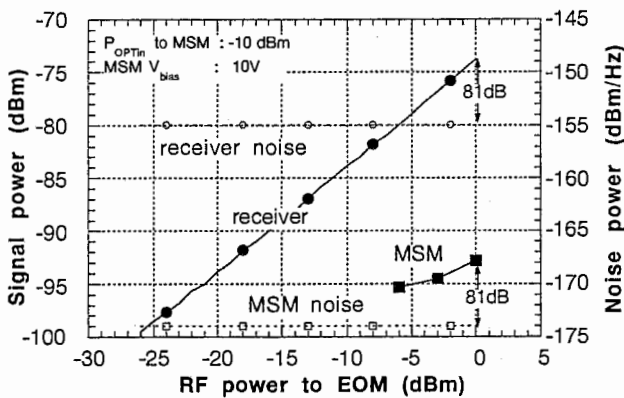


図 76 TIAとMSM-PD単体の信号入力依存性

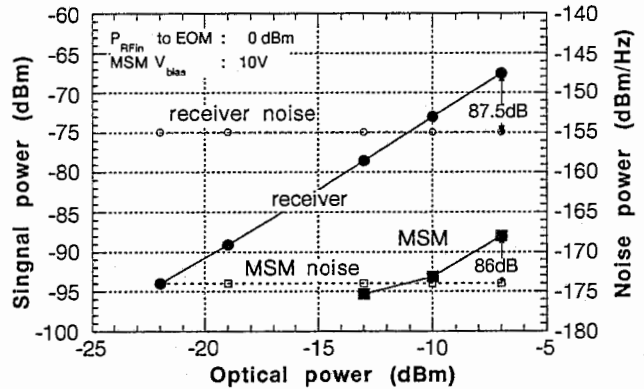


図 77 TIAとMSM-PD単体の光強度依存性

中心周波数が設計時より2 GHz程度低くなったが、MSM-PD単体に比べ中心周波数で19 dB、45-50 GHzの5 GHzの帯域でも15 dB以上の出力改善が得られた。また、ミリ波信号入力電力に対しては-26 dBmから0 dBmにわたって25 dB以上、光強度に対しては-22 dBmから-7 dBmにわたって15 dB以上の広い範囲で良好な線形性が得られた。これらの線形性は複数キャリアの信号伝送では極めて重要となる。

また、最も重要な項目であるC/Nは光入力が高いときに1.5 dB程度改善されたのみであった。これは、各種パラメータが設計よりずれていたために十分な特性が出なかったこと、アンプ部の設計が単純な利得整合で低雑音設計になっていないことに起因すると考えられる。しかし現状でもMSM-PDの出力を受光器同じレベルにするためにはアンプを接続しなければならず、その場合にはアンプのNF分だけ雑音電力が大きくなるため、その分の雑音低減効果はある。

4.3.3.2.3 考察

設計時には50 fFであったMSM-PDの等価回路パラメータは、実測では16 fFであった。この変化とFETのパラメータの変化により、入力整合条件が大きくずれている。TIA単体がウェハーの面積の関係で作れなかったため、TIAの入力インピーダンスは測定できていない。そこで、回路シミュレータのFETパラメータを実測したFETパラメータに変更して入力インピーダンスを再計算し、それを実測のMSM-PDの複素共役インピーダンスと比較した(図78)。

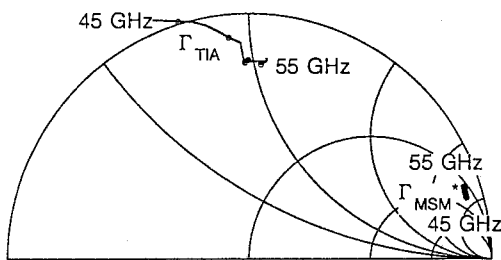


図78 実測MSM-PD S_{11} とTIA入力インピーダンス(シミュレーション値)

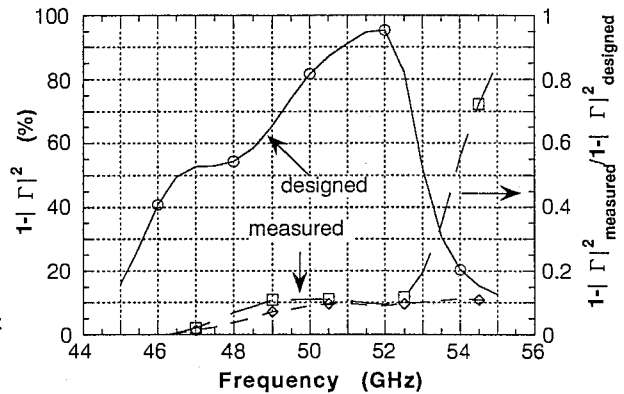


図79 MSM-PDとTIA間の信号伝達量

シミュレーションではTIAの入力反射係数が1を越えているが、伝送線路のパラメータも大きく変化しているので、実際の反射係数はやや異なるものと考えられる。しかし、MSM-PDの複素共役インピーダンスとは大きくずれている。これによりどの程度の影響が生じたかを検討するため、MSM-PDの等価回路よりインピーダンスを周波数の関数として記述し、それを用いてMSM-PDとTIAの間の反射係数を計算した(図79)。その結果、設計に比べTIAへの入力電力が1/10になっていることが判明した。設計どおりにできていれば、アンプ単体の劣化分10 dBとインピーダンス不整合によるロス10 dBを加え、MSM-PDと比較して35~40 dB程度の改善が得られたと考えられる。

4.4 光区間全体

4.4.1 概要

ミリ波/光変換+光/ミリ波変換の式をまとめると、

$$P_{RFout} = \frac{1}{2} \left[1.17 \cdot L_{EOMopt} \cdot L_{fiber} \cdot \Gamma_{PD} \cdot P_{OPTin} \cdot \sin \left\{ 1.89 \sqrt{L_{EOMelec} \cdot P_{RFin} \cdot R_{EOM} / V_{\pi}} \right\} \right]^2 \cdot L_{PDelec} \cdot R_{amp}$$

P_{RFout} : フォトダイオードから出力される電気出力(W)

- L_{EOMopt} :外部変調器での光強度挿入損失(-)
- L_{fiber} :外部変調器からフォトダイオードまでの光ファイバーで生じるロス(-)
- Γ_{PD} :フォトダイオードの受光感度(A/W)
- P_{OPTin} :外部変調器への入力光強度(W)
- $L_{EOMelec}$:外部変調器変換効率のその周波数での劣化分(-)
- P_{RFin} :平均入力RF電力(W)
- R_{EOM} :外部変調器のインピーダンス(Ω)
- V_{π} :光強度の最大変化を与える電圧(V)
- L_{PDelec} :フォトダイオード変換効率のその周波数での劣化分(-)
- $R_{amp.}$:フォトダイオードが接続されているアンプの入力抵抗(Ω)

となる。また、信号入力電力の小さなところでは $x = \sin(x)$ がほぼ成り立つので、式が簡単になり、

$$P_{RFout} = 1.11 \cdot \left(L_{EOMopt} \cdot L_{fiber} \cdot \Gamma_{PD} \cdot P_{OPTin} / V_{\pi} \right)^2 \cdot L_{EOMelec} \cdot L_{PDelec} \cdot P_{RFin} \cdot R_{EOM} \cdot R_{amp.}$$

となり、光に関するパラメータは2乗で影響し、RFに関するパラメータは1乗で影響することがわかる。

代表的なパラメータを用いて45 GHzで計算した結果を表4に示す。短波長と長波長をパラメータ的に比較してみると、光関係のロス、短波長で大きい。これは、ファイバーのコア径が小さいため、接続損失が大きい、ファイバー自身のロスも大きいことに起因している。また、受光素子に関しては、先の受光素子の諸特性の式からわかるように光強度が同じであっても光子の数が少ないために低受光感度となる。外部変調器のRFの劣化に関しては、短波長帯の外部変調器の設計がやや古いいため、伝送線路やコネクタ部の設計が悪いためと考えられる。 V_{π} に関しては、波長が短い分だけ小さくなっている。

表4 光区間諸パラメータ

波長 (μm)	P_{RFout} (dBm)	$P_{OPTout1}$ (dBm)	L_{EOMopt} (dB)	L_{fiber} (dB)	Γ_{PD} (A/W)	P_{OPTin} (dBm)	$L_{EOMelec}$ (dB)	P_{RFin} (dBm)	R_{EOM} (Ω)	V_{π} (V)	L_{PDelec} (dB)	$R_{amp.}$ (Ω)
0.83	-86.0	-26.0	-13.2	-6	0.25	10	-30	10	50	1.5	-3	25
1.5	-49.1	-10.5	-5.6	-3	0.5	10	-10	10	50	4.9	-3	25

4.4.2 光区間諸特性実測結果

これから示す光区間の諸特性は、通常のLN-EOMとPDを用いたものである。これまでに種々の効率化手法等を述べてきたが、実際のシステム構築においては再現性、安定性が非常に重要なので、すべて市販品を使用した。使用したPDは、NewFocus社製PD1014V No. 583、LN-EOMはTMZ2217を用いて1.3 μm 帯で測定を行った。EOMへの信号入力電力、PDへの光強度を変化させた際の信号出力の周波数特性を図80, 81に示

す。また、EOMへの信号入力電力、PDへの光強度をそれぞれパラメータとしたプロットを図82, 83に示す。

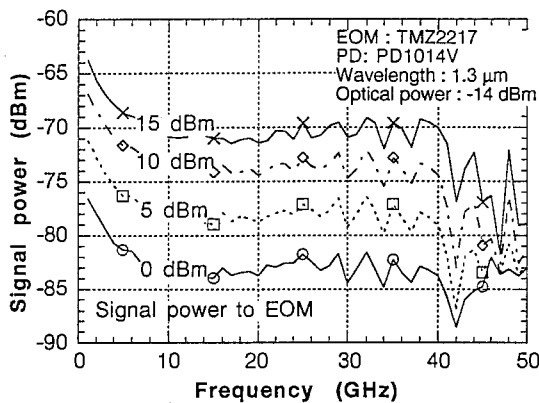


図 80 リンク特性の信号入力依存性 (1)

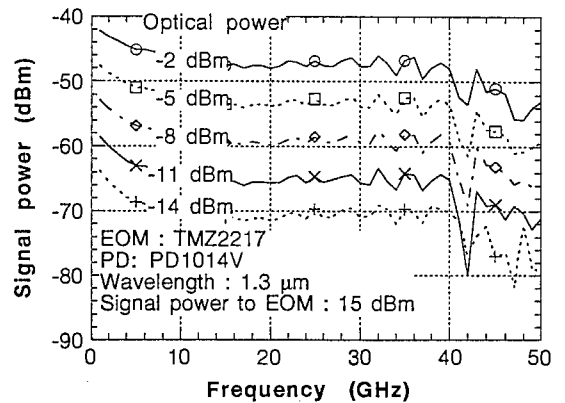


図 81 リンク特性の光強度依存性 (1)

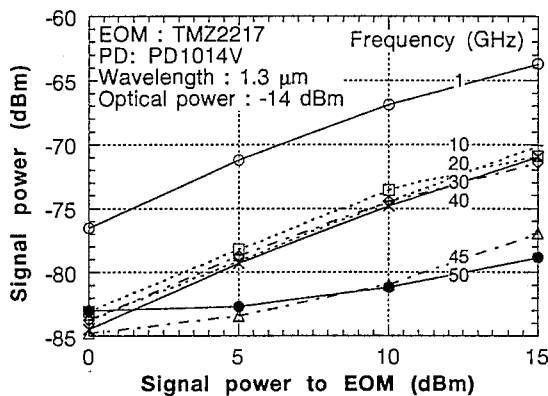


図 82 リンク特性の信号入力依存性 (2)

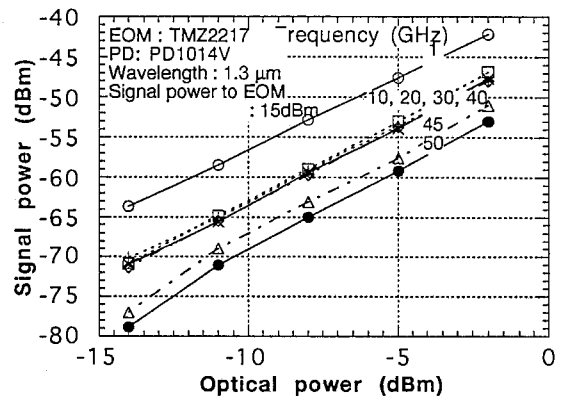


図 83 リンク特性の光強度依存性 (2)

理論式どおりに信号出力は信号入力電力に比例し、光強度の2乗に比例している。また、受光素子の章で示したように、NELのPDを用いて1.5 μm帯での伝送を行った場合には、これらの図全体が15 dB改善されることになる。

4.4.3 光ファイバの分散の影響

通常のシングルモードの光ファイバを1.5 μm帯で使用する場合には、ファイバの波長分散の影響で長距離伝送ができない。そのため、デジタルの長距離伝送では分散シフトファイバが使用されている。デジタル伝送の様にベースバンド伝送でDCからの帯域がある場合には、レーザのスペクトル幅が広がり分散の影響による信号内での位相差により長距離伝送ができなくなる。しかし我々の場合には、比帯域が小さなミリ波伝送なので、分散の影響がベースバンド伝送の場合と異なると考えられる。そこで、簡単な式を用いてその検討を行った。

光を単一周波数のミリ波信号で強度変調した場合、光の周波数を ωt 、ミリ波の周波数を ω_{mt} 、変調度 m とすると受光器直前の電界 e は、

$$\begin{aligned}
e &= \frac{1}{2} \left(1 + m \cdot \sin(\omega_m \cdot t) \right) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\
&= \frac{1}{4} \left(m \cdot \cos((\omega - \omega_m) \cdot t) + 2 \cdot \sin(\omega \cdot t) - m \cdot \cos((\omega + \omega_m) \cdot t) \right)
\end{aligned}$$

分散の影響の計算として、光キャリアに対して、 $\omega t - \omega_m t$ と $\omega t + \omega_m t$ にそれぞれ $-p, +p$ の時間遅延が入ると仮定すると、

$$e' = \frac{1}{4} \left(m \cdot \cos((\omega - \omega_m) \cdot (t - p)) + 2 \cdot \sin(\omega \cdot t) - m \cdot \cos((\omega + \omega_m) \cdot (t - p)) \right)$$

この信号を2乗検波するので、その出力は、

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \frac{1}{8} + \frac{m^2}{16} - \frac{\cos(2 \cdot \omega \cdot t)}{8} \\
&+ \frac{m^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - 2 \cdot \omega_m \cdot t - 2 \cdot p \cdot (\omega - \omega_m))}{32} \\
&+ \frac{m^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + 2 \cdot \omega_m \cdot t + 2 \cdot p \cdot (\omega + \omega_m))}{32} \\
&- \frac{m^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + 2 \cdot p \cdot \omega_m)}{16} \\
&+ \frac{m \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t - \omega_m \cdot t + p(\omega_m - \omega))}{8} \\
&- \frac{m \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t + \omega_m \cdot t + p(\omega_m + \omega))}{8} \\
&- \frac{m^2 \cdot \cos(-2 \cdot \omega_m \cdot t - 2 \cdot p \cdot \omega)}{16} \\
&+ \frac{m \cdot \sin(\omega_m \cdot t + p(\omega - \omega_m))}{8} \\
&+ \frac{m \cdot \sin(-\omega_m \cdot t - p(\omega + \omega_m))}{8}
\end{aligned}$$

その出力のミリ波信号成分をまとめると、

$$P_{\text{out}}' = \frac{m}{4} \left(\cos(p \cdot \omega + \omega_m \cdot t) \cdot \sin(p \cdot \omega_m) \right)$$

となる。受信強度が分散による時間遅れの関数となっているため、ファイバの距離が延びて時間遅れが増加

すると周期的に強度が変化する。通常のシングルモードファイバの分散値は1.5 μm帯では14 ps/km·nmであり、1.5 μm帯で50 GHzのミリ波は0.4 nmに相当する。従って、p = 5.6 ps/kmとなり、ミリ波帯での1周期は約3.6 kmとなり、その距離毎に受信強度が変化する。

ちなみにSSBの様にキャリアの片側のみに変調信号がある場合には、受信後の出力は、

$$P_{\text{out_SSB}} = \frac{-m \cdot \sin(\omega_m \cdot t + p \cdot (\omega - \omega_m))}{8}$$

となり、時間遅れにより位相のみが変化し、強度は一定である。

この結果より、基本的には光ファイバとして分散シフトファイバを使用するか1.3 μm帯の光源を使用しなければならない。また、適切な光ファイバの長さを選択すれば通常のシングルモードファイバでも伝送は可能である。今回の計算は純粋なミリ波のキャリア伝送を仮定して計算を行ったが、実際には、ミリ波信号はデジタルなどの信号により変調されており、ある帯域を持っている。厳密な結果を得るためにはそのような状態での計算が行うことが必要である。

5 空間伝搬

放射部でのC/Nが十分高いので空間伝送部でのC/N劣化は、受信電力が小さくなることにより熱雑音や初段のアンプの発生する雑音との差が小さくなることにより生じる。受信電力はアンテナの理論より容易に導き出すことができる⁵³。

$$P_r = P_t \cdot G_r \cdot G_t \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2$$

- P_r : 受信パワー
- λ : 波長
- G_r : 受信アンテナゲイン
- G_t : 送信アンテナゲイン
- d : 送受間距離
- P_t : 送信パワー

目標となるキャリア全電力と1 Hz当りの雑音電力の比は94 dB以上である。ここで、熱雑音電力は -174 dBm/Hzであり、受信機のNFを8 dBとすると、最小受信電力は、-72 dBmとなる。上式より受信電力の距離およびアンテナ利得依存性の計算結果を図84に示す。

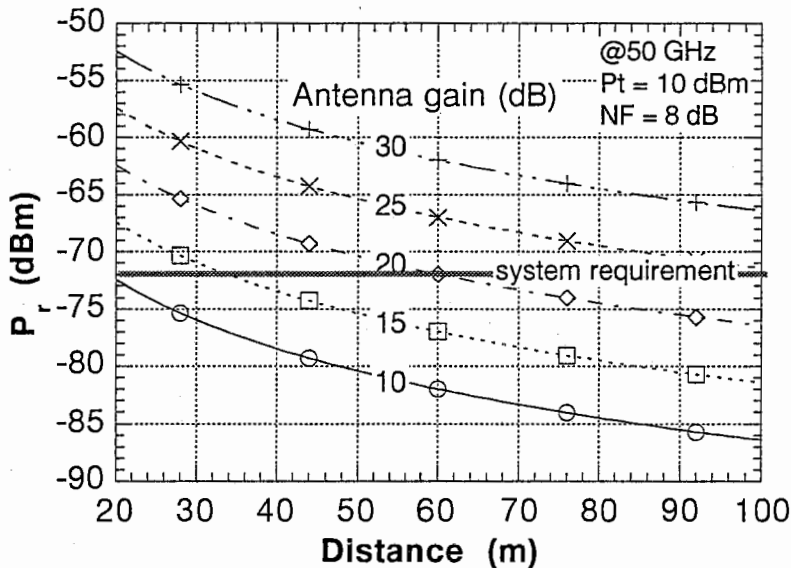


図 84 受信電力の伝送距離依存性

図より、アンテナ利得が15 dBでも30 m、20 dBなら60 mの伝送が可能であることがわかる。

次にアンテナパターンの設計が必要となる。移動体通信の場合、正確なアンテナ方向の調整は望めない。比較的広いアンテナパターンが必要である。さらに無線基地局のアンテナは、距離による受信強度が補正できるようなアンテナパターンが望ましい。先に示した、光/ミリ波無線リンクの将来像の図1ではアン

⁵³ 例えば「新しいアンテナ工学」, 後藤 尚久著, p. 11, オーム社

テナが真下を照射するような絵が描かれていたが、実際にはセルのエッジにビーム中心が向いているほうが望ましい(図85)。

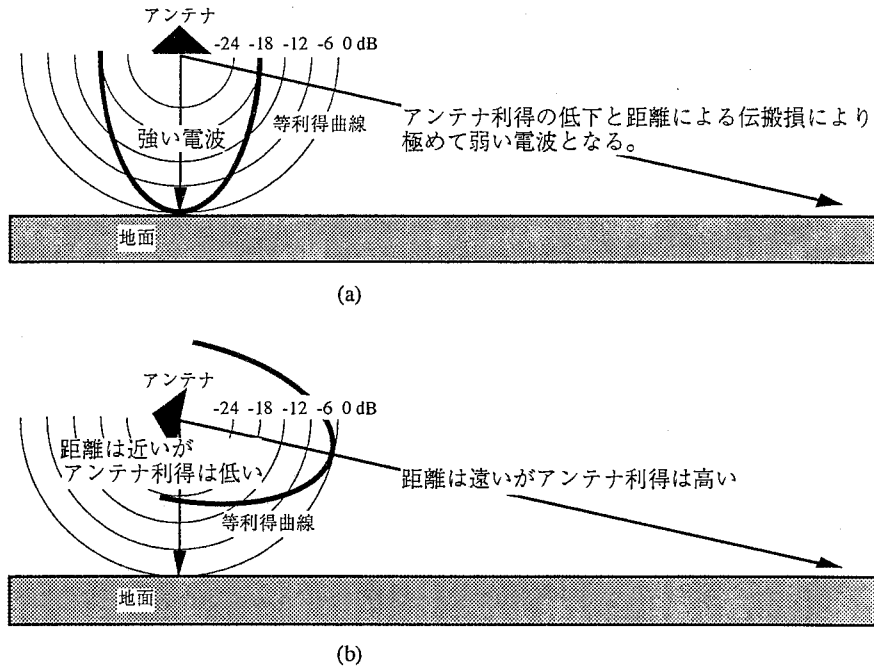


図 85 無線基地局アンテナ設置法

次にどのようなアンテナパターンが必要であるかを考える。円開口のアンテナにおける電界分布Eは、

$$E = \pi \cdot d^2 \cdot J_1(u) / u$$

$$u = d / \lambda \cdot \sin(\phi)$$

- d : 開口部の直径
- $J_1()$: Bessel関数
- λ : 波長
- ϕ : ビーム角

で表される。第1ローブの形状は、円開口アンテナ、方形アンテナ、平面アンテナ等でほぼ相似形である。図86に種々のビーム幅のアンテナのパターンを示す。さらに、図85の(b)において、セルエッジまでの距離がアンテナの高さの10倍であった場合、受信電力の距離依存性を最も遠い場所での受信電力に対する相対値として図87に示す。

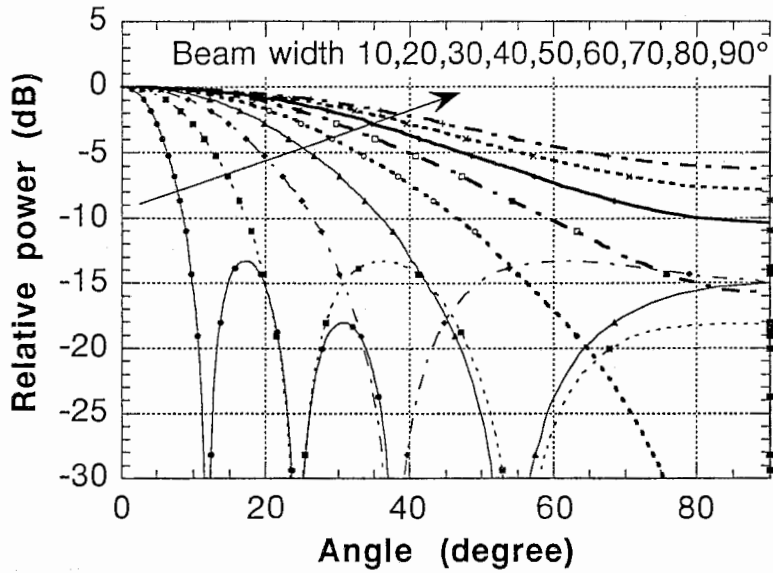


図 86 ホーンアンテナのビーム特性

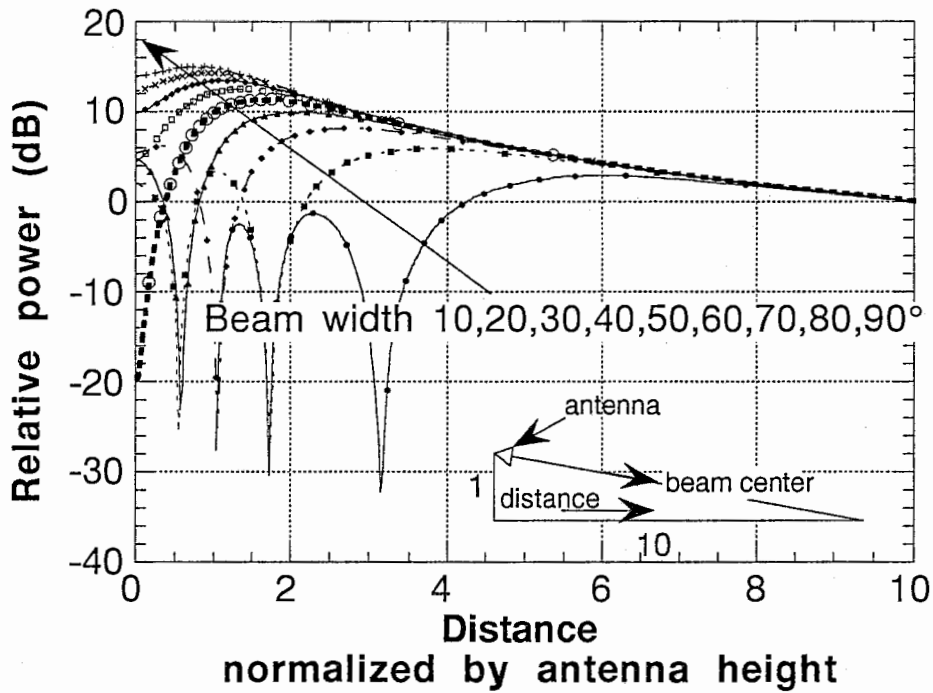


図 87 受信電力の距離依存性

垂直平面上のアンテナパターンは、1)距離によらずできるだけ一定の受信電力が得られる、2)電柱などのアンテナ固定物に対する放射電力が小さい(固定物からのマルチパスを低減するため)の2点が重要である。そのような条件は図87より、50度程度のビーム幅を持つアンテナ(図中でやや太めの線で示されている)が望ましいと考えられる。50度のビーム幅を持つアンテナを図85(b)に示す配置にすることにより、受信強度の距離依存性も12 dB程度に押さえられている(無指向アンテナでもこの条件では20 dBの差が生じる)。

次に、アンテナ利得の水平方向および垂直方向のビーム幅依存性を図88に示す。ビームにより切り取る球面と球表面全体との比より計算しているため、通常用いられるピークの利得ではなく、利得は3 dBビーム領域の平均利得を示している。

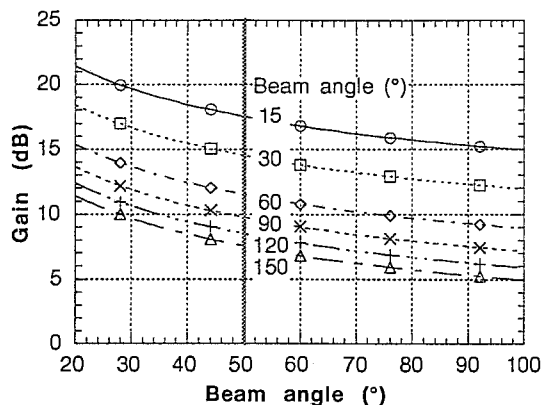


図 88 アンテナ利得のビーム幅依存性

また、水平平面上のアンテナパターンとしては3ビームセルなら120度ビーム幅、4ビームセルなら90度ビーム幅が必要になる。垂直平面上でのビーム幅が50度の場合には、アンテナ利得はそれぞれ約8.5 dBと約9.5 dBとなる。

次に、携帯局のアンテナを考える。本来は無指向性あるいは半空間における無指向性が望ましいが、先の検討で示したように、最低でも送受合わせて15 dB程度が必要とされるため、ビームを絞らなければならない。例えば、ラップトップコンピュータのようなものでアンテナを基地局方向だけ合わせたい合わせる様にコンピュータを置いたと仮定すると、水平方向のビーム幅は30度程度あれば実用的であると考えられる。垂直方向にビーム幅が狭いと、距離に応じてアンテナの角度調整を行わなければならないので、90度程度が必要と考えられる。その場合のアンテナ利得は図88より、12 dBとなる。

基地局側で8-10 dB、携帯局側で12 dBのアンテナ利得が得られるので、送受あわせて20 dB程度のアンテナ利得が得られる。アナログ伝送では伝送距離を延ばすことは現状では困難であるが、デジタル伝送では、マージンを考えても50 m程度の伝送が可能となる。

屋外での使用環境では、実際の受信電力は空気等の吸収により若干弱められるが、25 mm/hの降雨条件でも、50 GHz程度では15 dB/km程度なので、我々のシステムのように伝送距離が50 m程度であれば、ロスが2 dB程度となる。

これまでの計算はすべてホーンアンテナの放射パターンを用いて行われているが、将来的には任意の放射パターンが得られ、かつ、ややロス気になるものの比較的低コストな誘電体レンズアンテナを用いればさらに、システム的设计に余裕ができるものと考えられる⁵⁴。

⁵⁴ C. A. Fernandes, et al., "Shape coverage of elongated cells at millimetrewaves using a dielectric lens antennas", 25th European Microwave Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 66-70, 1995

3dBビーム平均利得の求め方(1)
 ---円開口アンテナ---

通常の立体角の計算を行う。

暗部の面積を考える。

暗部の直径は $r \cdot \sin \theta$ 、

従って周囲長は $2\pi r \cdot \sin \theta$ 、幅は $r d\theta$

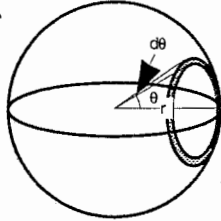
従ってその部分の面積は $r^2 \cdot \sin \theta d\theta$

これを0から θ まで積分して、

$$S = \int_0^{\theta} 2\pi r^2 \cdot \sin \theta d\theta = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta)$$

球全体の面積との比 p は、

$$p = 1/2(1 - \cos \theta)$$



参考

3dBビーム平均利得の求め方(1)

---方形開口アンテナ(近似計算)---

斜線部 S の面積を考える。

斜線部と暗部を合わせた面積は、球全体の面積 $4\pi r^2$ の $\phi/2\pi$ であるので $2\phi r^2$ となる。一方、円 a あるいは b の面積 t はそれぞれ立体角 φ の面積 $2\pi r^2 (1 - \cos(\varphi))$ になる。

$$\varphi = (\pi - \theta) / 2$$

$$t = 2\pi r^2 (1 - \cos((\pi - \theta) / 2))$$

従って一つの暗部の面積 u は、

$$u = r^2 (1 - \cos((\pi - \theta) / 2)) \phi$$

それゆえ

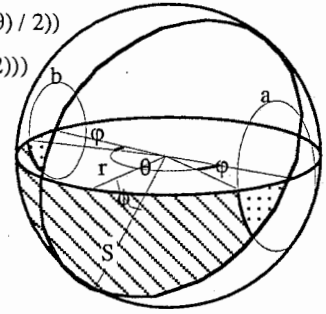
$$S = 2\phi r^2 - 2\phi r^2 (1 - \cos((\pi - \theta) / 2))$$

$$= 2\phi r^2 (1 - (1 - \cos((\pi - \theta) / 2)))$$

$$= 2\phi r^2 \cos((\pi - \theta) / 2)$$

球全体の面積との比 p は、

$$p = \cos((\pi - \theta) / 2) \phi / (2\pi)$$



6.1 概要

システムの実現性を実証するためにモデルシステムを構築した。モデルシステムで検討する項目は、

- 1)100 Mbps以上の超高速デジタル通信
- 2)アナログ通信とデジタル通信の同時通信
- 3)マイクロセルの実現性の評価
- 4)複数セルの構築

である。これらの項目を検討できる様に図89に示すシステムを構築した。多重方式、信号形式等を表5,6にまとめる。

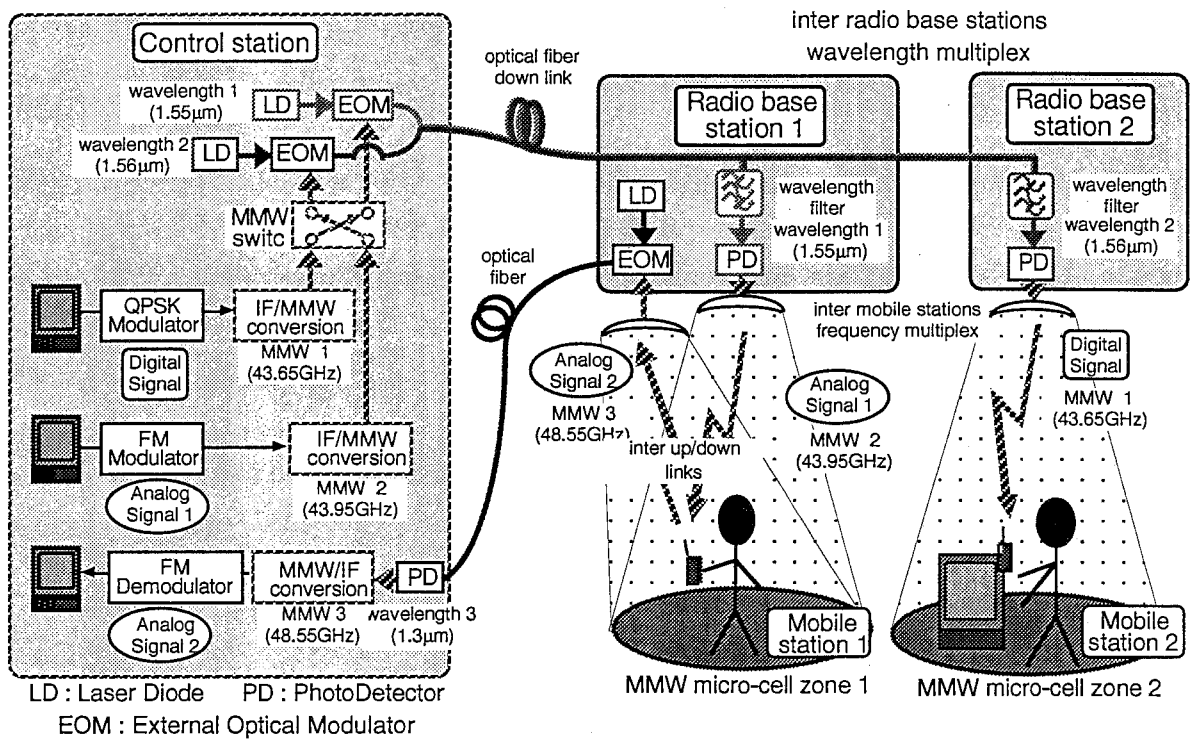


図 89 モデルシステム構成図

表5 多重方式

○多重方式

光ファイバ伝送	無線基地局間	波長多重
	上り/下り回線間	別ファイバ
空間伝送	移動局間	周波数分割
	上り/下り回線間	周波数分割

表6 信号形式

○信号形式

アナログ	変調方式	無線周波数	最大周波数偏移
下り回線	FM	43.95 GHz	8 MHzp-p
上り回線	FM	48.55 GHz	8 MHzp-p
デジタル	変調方式	無線周波数	伝送ビットレート
下り回線	QPSK	43.65 GHz	118.125 Mbps
NTSC信号を色搬送波の3倍(10.7386 MHz)、8bitでサンプリング			

6.2 波長多重の構成

波長多重を行うためにDFBレーザと波長フィルタを用いた。波長多重でまず検討しなければならない項目は2つのレーザの波長間隔である。システムのC/Nとして15 dBが不可欠なため、マージンを考え2チャンネル間に20 dB程度のアイソレーションが必要である。電気で20 dBは光では10 dBあればよい。光フィルタの10 dB帯域は約3 nm程度で、20 dB帯域でも5 nm程度なので、レーザの波長安定度を考えても2つの波長間は5 nmも離れれば十分である。

さらに、光関係の部品として、合波/分波器がある。今回はファイバ融着型のものを用いたが、このタイプの合波器は3 dBの損失が存在する。また、分波器も波長によらず均等に分配し、不用な波長はフィルタで除去される構成となるので、ここでも3 dBの損失となる。光区間の検討で計算したように光で6 dBの損失は電気では12 dBの損失となり、かなり大きな損失となる。合波の方法として、ファイバ融着型の合波以外に1) 偏波合成、2) 波長合成がある。偏波合成は損失なく合成するものである。波長合成は多層化膜の波長選択制御の反射板を用いて合成するもので、この方式も原理的には損失が存在しない。また、分波に関しては、波長フィルタの反射波を次の無線基地局に分配することにより損失をなくすることができる。実際にシステムを作る際には、光での損失を如何に小さくするかが極めて重要である。

6.3 システム評価

今回のシステムでは、アナログ伝送とデジタル伝送を行った。評価は本システムではデジタル伝送のビットエラーレート、また、アナログ伝送については一世代前の0.8 μm 帯でのシステムで行った。

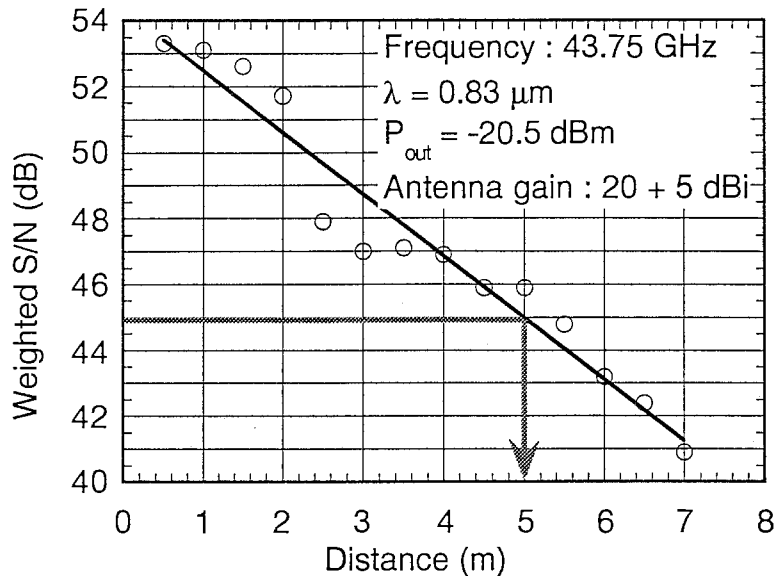


図 91 評価S/Nの伝送距離依存性

測定結果を図91に示す。システム設計の段階では、評価S/N = 40 dBで50 m程度の伝送距離を仮定していたが、測定結果からアンテナ出力10 dBm、アンテナ利得送受で20 dBiの場合に伝送距離が何倍になるかを示す係数 n を計算すると、

$$n = 10 \frac{(10 - (-20.5)) - ((20 + 5) - 20)}{2 \times 10} = 18.8$$

となる。この結果から、評価S/N = 40 dBなら140 m、評価S/N = 45 dBでも94 mの伝送距離を持つことになる。変復調器として用いているパソリンクの感度が非常に高いため、マルチパスやミリ波の漏洩信号が評価S/N大きく影響する。従って、そのようなことを考慮した再測定が必要と思われる。

次にデジタル伝送の結果を図92に示す。デジタル伝送のC/Nは復調器直前にHP社製の雑音干渉テストセット (HP3708A) を挿入して雑音を付加することにより変化させた。また、アンテナとしては、ビーム幅14度で円偏波のホーンアンテナを送受共に用いた。同じアンテナで直線偏波でのBER特性も円偏波のそれと一致することより空間伝送部でのマルチパスは全く生じていないことが確認されている。

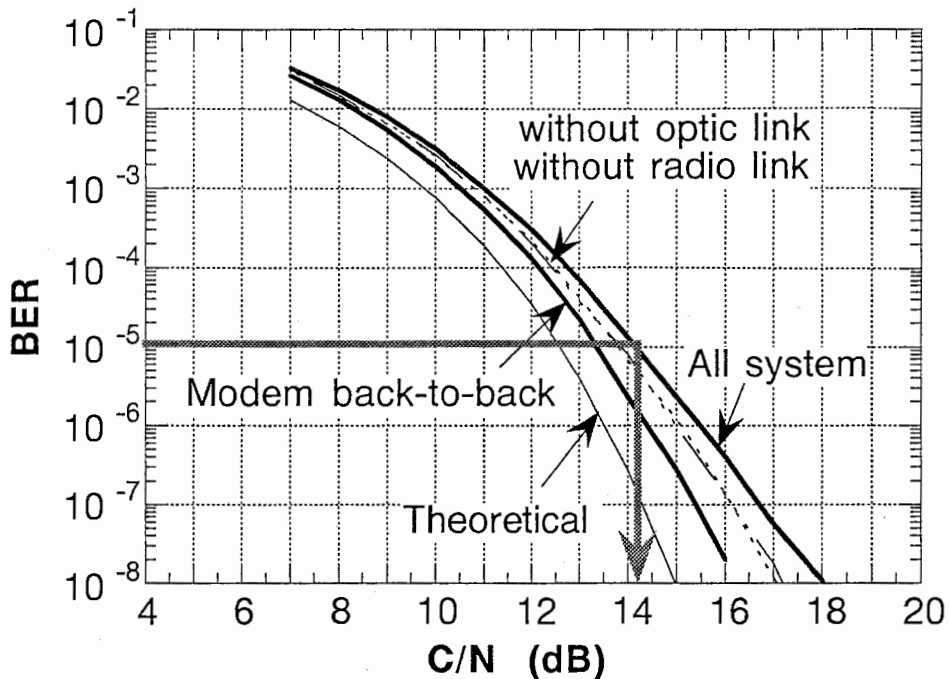


図 92 BER特性の受信C/N依存性

システム設計段階では、BER=10⁻⁵を得るために必要なC/Nとして15 dBを仮定していたが、実測では14.2 dBで良いことが判明した。変復調器折り返しに比べて劣化量が1 dB以内と比較的良好な特性であった。また、BER=10⁻⁹程度まではフロアも生じていない。さらに、光区間を除いた系、あるいは空間伝送区間を除いた系のBER特性もシステム全体のそれとあまり差が生じておらず、この実験状態では、光区間および空間伝送区間ではほとんど劣化要因がないことがわかる。実際にはほぼエラーフリーの状態まで確認はしているが、復調器のPLLが受信信号の位相雑音に影響を受け、たまにバースト状にエラーが生じることが観測された。また、復調器にはAGCがついているにもかかわらず、BERが入力電力により変化する現象が見られた。100 Mbpsを越える復調器は現状では極めて高い技術レベルを必要とするため、今後さらなる改良が必要である。図93, 94にシステム全体を通過後(復調器入力)のスペクトルを、図95にI信号のアイパターンを示す。

次にダイナミックレンジを考える。無線基地局のアンテナ出力部で全キャリア電力に対する1 Hz当りの雑音電力(C/N)は123 dBであった。システムとして必要なC/Nが94 dB、受信機のNFを8 dBと仮定するとダイナミックレンジは123 - 94 - 8 = 21 dBとなる。一般的には移動体通信ではダイナミックレンジは40 dB程度が必要とされているが、それには到達していない。しかし、アンテナ設計の章で述べたように距離による受信レベル変動は12 dBに押さえることが可能なので、基本的には実用レベルである。また、これまでの種々の計算で受信機のNFを8 dBと仮定していきながら、実際の受信機のNFは21 dB程度であった。初段のアンプのNFは公称値は7 dB程度であるが、受信機全体のNFが著しく劣化していた。原因は不明である。

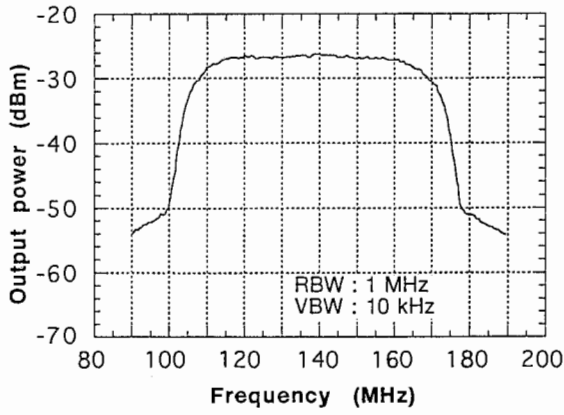


図 93 復調器入カスペクトル (1)

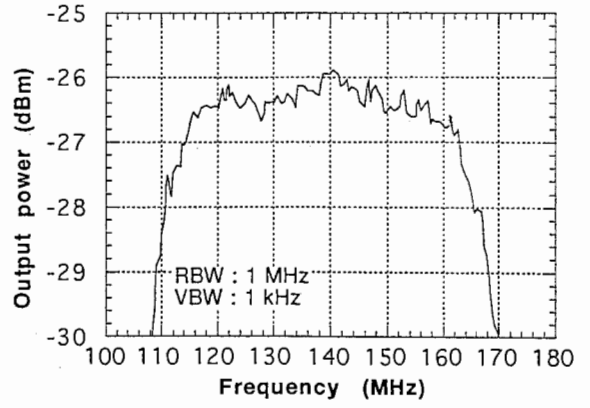


図 94 復調器入カスペクトル (2)

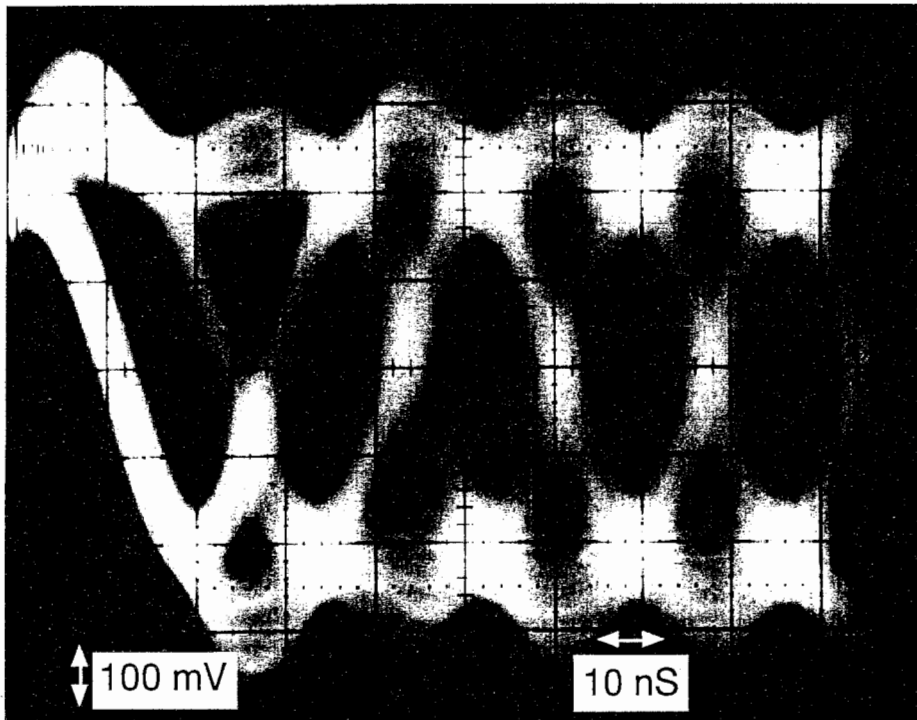


図 95 アイパターン

6.4 考察

まず、システム全体のBER特性劣化原因を考える。BER特性が劣化する要因は数多く存在し、それらの分類を示す⁵⁵。

⁵⁵ "デジタルマイクロ波通信", 桑原守二監修, pp. 254, 企画センター

表8 BER特性劣化要因

発生場所	劣化要因		劣化の種類
変調器	変調器位相誤差		波形歪み
	変調器過渡特性		
	パルス幅変動		
送信器	非直線性		角度変動
	帯域制限		
伝送路	伝搬歪み		識別レベル変動
受信器	帯域制限		
復調器	基準搬送波位相誤差		識別レベル変動
	復調器レベル変動		
識別器	識別器レベル変動		クロック位相誤差
	識別器不確定幅		
	クロック位相誤差		

表からわかるようにBER特性の劣化要因の大部分は変復調器にあり、途中の伝送路で発生する劣化の種類は基本的に波形歪みである。途中の伝送路での劣化要因をもう少し説明すると、

- 1) 高調波歪みよる信号の劣化
- 2) マルチパスなどのシステム内での多重反射
- 3) 帯域内での振幅歪み
- 4) 帯域内での遅延歪み

4)はネットワークアナライザで測定した範囲ではほとんど問題のないレベルであった。また、2)は伝搬方向が天井から45度程度の角度で伝搬しているため比較的反射が生じにくいこと、円偏波のアンテナと直線偏波のアンテナで比較をした場合にもBER特性に差が生じていないので、問題ないと考えられる。従って、1)と3)が劣化に影響していると考えられる。

次に、劣化量として伝送路の特性としては通常変復調器折り返しに対する劣化量を考えるが、実際には、変復調器折り返しと単純に比較することは好ましくない。これは、先にあげた劣化要因の内3)、4)を変調器出力ですでに持っている場合に、伝送路でそれらを補正してしまうことがあるからである。従って、本当に比較しなければならないのは変復調器のみが本質的に持っている劣化(例えば復調器レベルや識別レベル変動、クロック位相誤差など)のみによるBER特性とシステム全体の特性となる。

そこで、変調器の出力部のスペクトルを図97,98に示す。このスペクトルより振幅の1次歪みと2次歪みを計算するとそれぞれ0.12と0.005となった。この歪みにより生じるC/N劣化量は0.3 dB程度と見積もられる(図101)。また、遅延時間歪みは、ロールオフフィルタに2 nS程度(図99)、140 MHzのバンドパスフィルタに3 nS程度のリップル(図100)が存在する。これにより生じる遅延歪み量は、1次歪みが0.1、2次歪みが0.1程度となる。遅延歪みがBERに与える影響を示すデータが掲載されている文献を見付けることができなかったの

で、阪大の塚本先生の手持ちデータ(図102)で計算すると、C/Nの劣化量としては、1次歪みで0.6 dB、2次歪みはデータがないがおそらく1 dB程度と考えられる。これらの値から、振幅および遅延歪みによる影響を差し引くと、変復調器折り返しではQPSK理論値よりも良好な特性を示す。実際には、それぞれの歪みによる影響は単純な和でない、歪みの状況に種々の仮定が導入されているなどのことにより実際の値と一致しないと考えられる。等化器を用いて振幅歪みを変化させて変復調器折り返しのBER特性を評価した(図103)。振幅歪みを補整することにより変復調器折り返しに比べてBER = 10⁻⁵点で0.4 dB程度の特性改善が得られた。また、この特性改善量は理論的な値と比較的よく一致している。遅延歪みに関する検討は行えていないが、変復調器のみが本質的の持つ劣化は極めて少ないと考えられる。

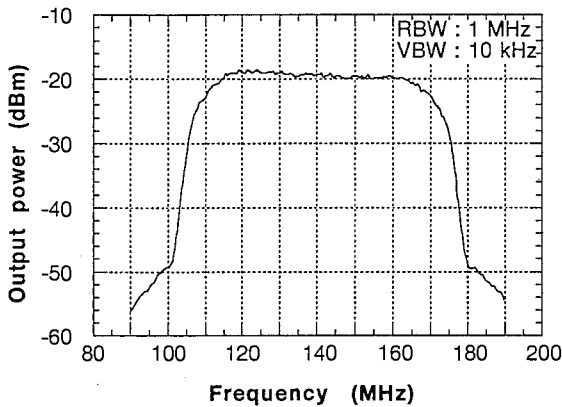


図 97 変調器出力スペクトル (1)

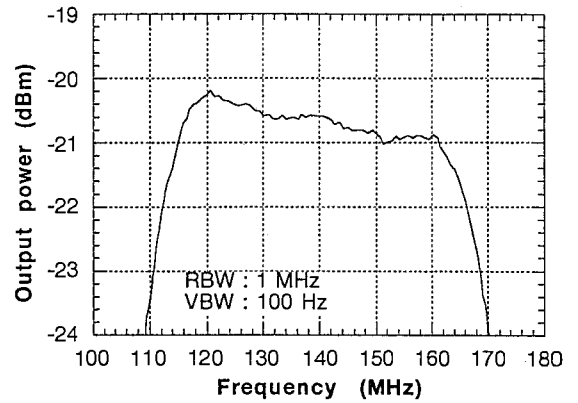


図 98 変調器出力スペクトル (2)

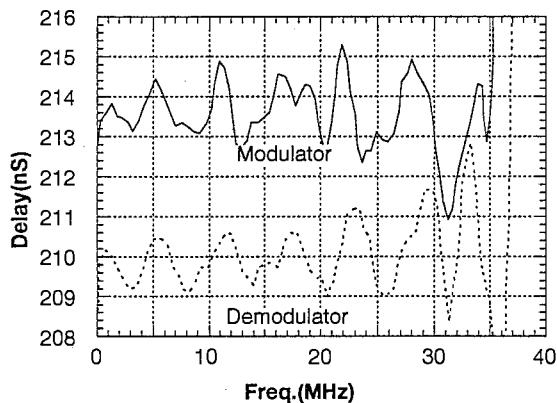


図 99 ロールオフフィルタ遅延特性

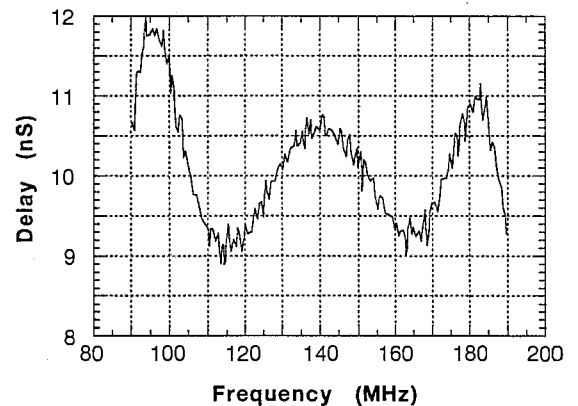


図 100 140 MHzバンドパスフィルタ遅延特性

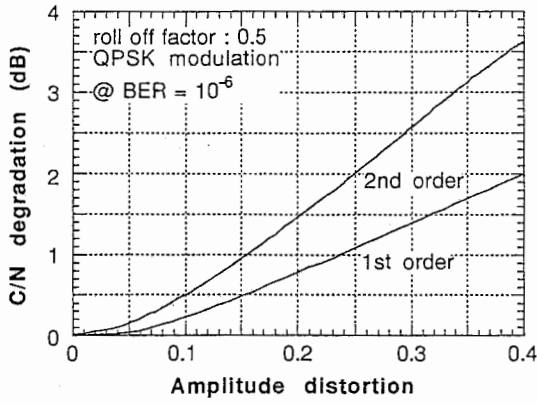


図 101 等価C/N劣化量の振幅歪み依存性

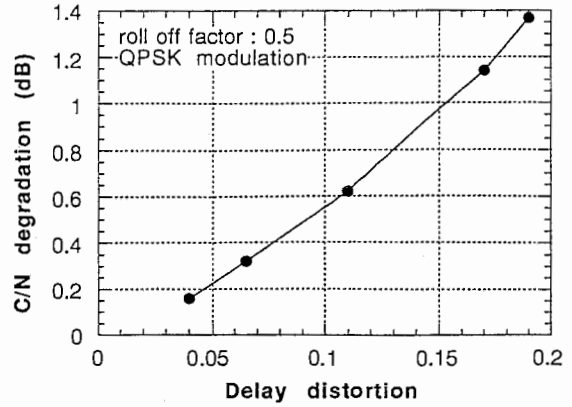


図 102 等価C/N劣化量の遅延歪み依存性

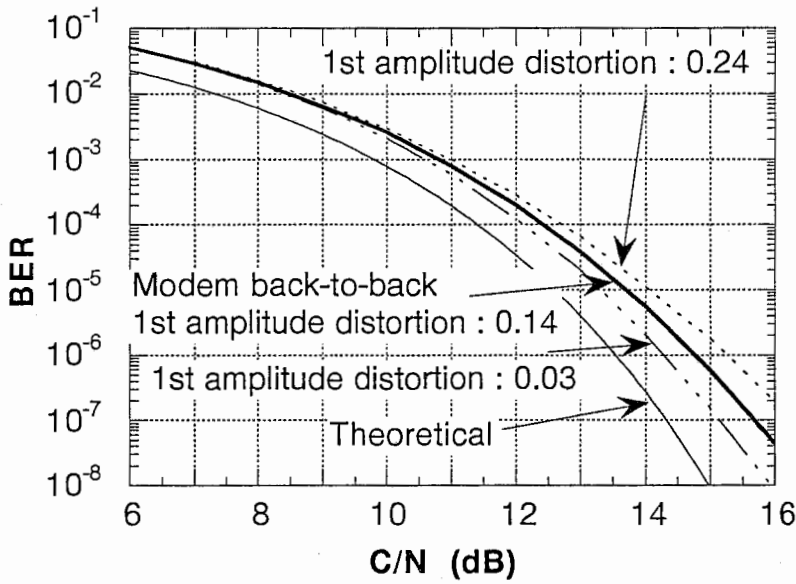


図 103 BER特性の振幅歪み依存性

これらの結果から考えると、システムのBER特性の比較はQPSK理論値に対して行うことが必要であると考えられる。QPSKの理論値からの劣化を考えると、BER=10⁻⁵で1.7 dBとなっている。

システム全体を伝送後の復調器直前のスペクトルでは、振幅歪みはあまり見られない(図93, 94参照)。また、先に述べたように、遅延歪みもほとんど存在しない。これら以外に劣化要因として考えられるのは伝送系の非直線性による影響である。

アンプ等の非直線性により信号波形の頭が押さえられた様な形になり、波形歪みを生じ、アイの開口が悪くなることにより劣化を生じる。そこで、非線形性の指標であるIM₃を変化させながらシステムのBER特性を評価した。IM₃を変化させる方法は、空間放射までの利得をアンプのバイアスを変えることにより変化させ、受信器のアンプの利得調整により復調器入力電力を一定にした。また、比較用に変復調器の間にIF帯のアンプと可変アッテネータをアンプの前後に入れ、そのアンプの飽和を利用して変復調器折り返しに近い状況でのBERのIM₃依存性を測定した。それらの結果を図104に示す。

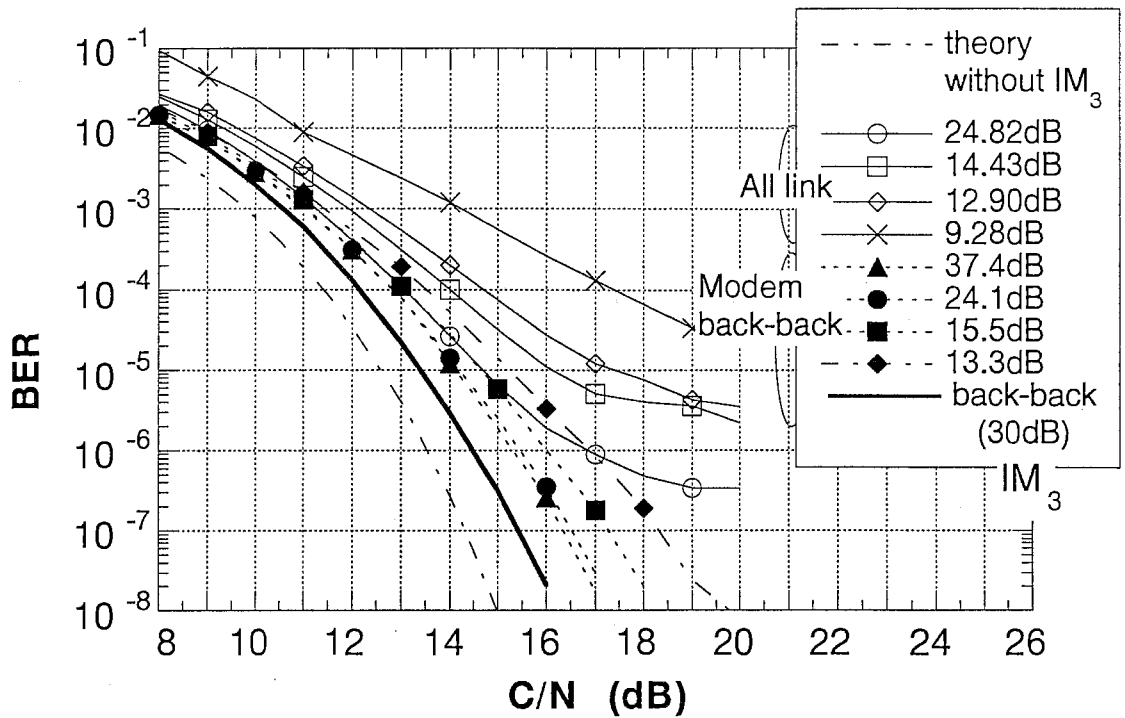


図 104 BER特性のIM₃依存性

IM₃が小さくなればなるほどBER特性は劣化している。また、システム全体と、変復調器折り返しでは、やや差があるものの傾向としては同じである。変復調器折り返しでは、全くアンプが入っていない状況ではIM₃自身は30 dB程度であるにもかかわらず、途中のアンプのIM₃が37 dBであっても、BER特性が劣化している。現在のところ原因は不明である。

また、今回は非線形性の指標としてIM₃を用いたが、飽和レベルからのバックオフで測定することも可能である。現状では、非線形性がBERに与える影響を定量的に解析することは極めて困難と思われるが、実測例はいくつか報告されている^{56,57}。

今回の測定では、BER = 10⁻⁶台とBER = 10⁻⁷台にややフロアが見られる。ここで、BER特性の劣化としてC/Nの固定劣化とフロアについて少し考えてみる。

まず、C/Nの測定方法は現在は復調器入力部で信号がないときの雑音電力と信号の電力の比を測定している。従って、信号自身に含まれる雑音成分や波形歪みは測定されていない。

エラーを引き起こす要因と劣化の種別を表にあげたが、それらの劣化は時間的に変化するものと変化しないものが存在する。

時間的に変化しない劣化要因は、しきい値と信号間の距離が狭くなったことに対応し、その劣化は等価的にC/Nの劣化となる。しきい値/信号間の距離が変化した場合にBER特性がどのように変化するかは、例えばQPSKとBPSKのBER特性を比較すればよい。この場合には単純にC/Nの値を3 dB変化させるだけである。実際には、しきい値/信号間の距離の変化の仕方によりBER特性に与える影響はやや異なると思われるが、傾向としては、BER特性がグラフ上で右側にシフトする。

次に時間的に変化する劣化要因の場合には、見掛け上は別の雑音成分が付加されているように見える。

⁵⁶ "デジタル無線通信", 室谷正芳, 山本平一著, pp. 67-69, 産業図書

⁵⁷ "デジタルマイクロ波通信", 桑原守二監修, pp. 258-261, 企画センター

さらに別のエラー要因として、ベースバンドの低い周波数帯での特性が悪いと、低い周波数成分を含むビットパターン、すなわち同じ符号が連続するパターンの時のみエラーを生じる。PLLによるキャリア再生を行っている場合にも同様の傾向が生じる。このような場合には、BERはそのパターンを含む確率に依存する。エラーレートカウンタで乱数の符号長を長くしたり、0挿入を行えばより明確に測定することができる。

3つのそれぞれでBER特性がどのように変化するかを図105に示す。

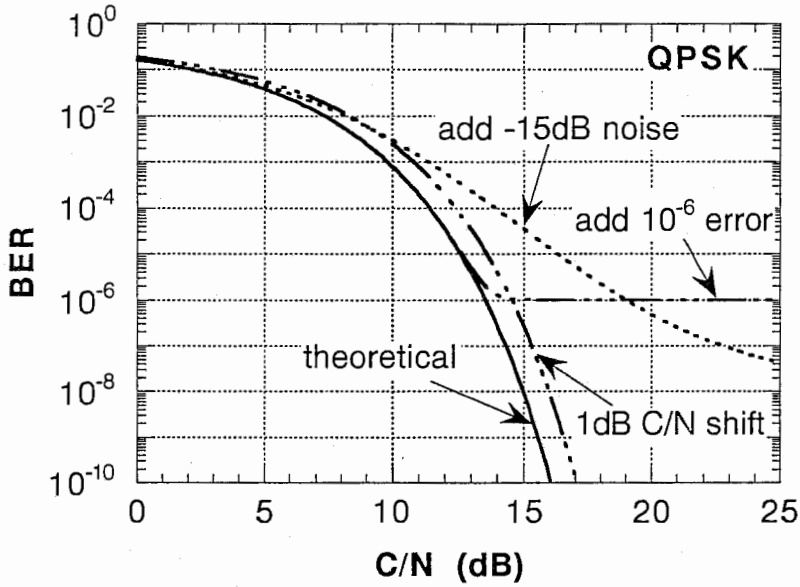


図 105 各種劣化によるBER特性の変化

今回の測定で見られるフロアは、一定雑音が付加された場合と同じような挙動をしている。また、 IM_3 の値によりフロアとなるBERが異なっているので、アンプの飽和による波形歪みでのBER劣化というよりは、 IM_3 の影響で信号帯域に雑音が落ち込んできていると考えられる。

7 まとめ

将来のパーソナル大容量・高速伝送を実現するための光/ミリ波無線リンクのモデルシステムの構築と、それにかかわるシステム設計、効率化の研究を行った。

効率化についてはまだ検討段階で具体的な結果というものがあまり得られていないので、今後さらに実験が必要である。

モデルシステム構築についてはまだ一部検討が残っているものの、一応のシステムレベルでの解析ができ、実際のデータ伝送も良好に行うことができ、当初の目的であった実現性の実証はできたと思われる。

実際に実用化するうえで最も障害になるのはマルチパスなど空間伝送部分であると思われる。ミリ波での伝搬の研究が進展することが望まれる。

謝辞

この研究を進めるに当り、研究の基礎を築き議論、指導をしていただいた末松氏(元ATR光電波通信研究所、現シャープ株式会社)、無線通信について基礎的な情報を提供していただいた大阪大学塚本先生、多忙な中色々な議論、指導をしていただいた稲垣主任研究員、井上研究員、澤田研究員、柴田研究員、土居研究員、宮崎研究員(以上50音順)に深謝いたします。また、日頃ご指導頂く、ATR光電波通信研究所猪股社長、小川室長、ならびに今井主任研究員、皆川主任研究員に深謝いたします。

資料

主要な参考図書および文献

無線通信理論

「通信方式 情報伝送の基礎」

B. P. Lathi著、 山中惣之助/宇佐美興一訳、マグローヒル ブック株式会社

「詳解 デジタル・アナログ通信方式」(上・下)

B. P. Lathi著、 山中惣之助/宇佐美興一訳、ホルト・サウンダース

「デジタル通信技術の基礎と応用 - 広がる光ファイバ、衛星通信の世界 -」

Harold B. Killen著、情報通信システム研究会訳、企画センター

デジタル無線通信

「デジタル無線通信」

室谷正芳、山本平一著、産業図書

「デジタルマイクロ波通信」

桑原守二監修、企画センター(残念ながら現在販売されておらず)

「情報ネットワーク技術-無線データ通信入門解説」

無線データ通信研究会編著、ソフト・リサーチ・センター

光通信

「光ファイバ通信光学」

ジャード・カイザー著、山下栄吉訳、産業図書

「光ファイバ通信システム入門」

ウィリアム・B. ジョーンズ, Jr. 著、菊池和朗訳、HBJ出版局

常にチェックした雑誌(重要なものから順に)

電子情報通信学会学会誌

たまに特集号が出るので要チェック。

信学技報

日本語でかなり丁寧に書かれていることが多く重要。

常にチェックしていたのは、マイクロ波、光通信システム、無線通信システム、電子デバイス、光エレクトロニクス、レーザ・量子エレクトロニクス

Proceedings of the IEEE

サマリー的な論文で、基本から教科書のように書かれているので非常に重要。ただし、関連のある内容は比較的少ない。

Journal of Lightwave Technology

光全般に関する論文。光関連では最も重要な雑誌。

IEEE Photonics Technology Letters

光全般に関するレター。最近の雑誌であるが、Lightwave Technologyと同様光関連では最も重要な雑誌。

IEEE Journal of Quantum Electronics

デバイスに関する論文。やや物性および理論寄りであるが、受光素子、変調素子などのデバイスの論文が多く掲載されている。

IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques

高周波回路全般に関する論文。マイクロ波全般に関しては最も重要な雑誌。

IEEE Transactions on Electron Devices

デバイスに関する論文。デバイスに関しては最も重要な雑誌。

IEEE Electron Device Letters

デバイスに関するレター。Electron Devicesと同様デバイスに関しては最も重要な雑誌。

Electronics Letters

電気に関するレター。デバイスからシステムまであらゆることを網羅している。

Journal of Optical Communications

最近の雑誌で比較的丁寧に書いてある

Applied Optics

光物性関連および理論的検討

Microwave Journal, Microwave & RF

マイクロ波関連の学術でなく一般の雑誌であるが、その分素人にも比較的分かりやすく書いてあるので重宝する。年1回程度無料購読の案内があるのでそのときに頼めばただで購読可能。また、広告も部品購入に役立つことが多く、情報が豊富。

OPTRONICS

日本の一般の光関連の雑誌で、色々な内容をサマリー的に素人に分かりやすくまとめてあるので、非常に重宝。広告も部品調達に役に立つ。

• **Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors**

A. F. Salem and K. F. Brennan,

"Theoretical Study of the Response of InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors",
J. Quantum Electron., Vol. 31, No. 5, pp. 944-953, 1995

E. H. Böttcher, D. Kuhl, F. Hieronymi, E. Dröge, T. Wolf, and D. Bimberg,

"Ultrafast Semiinsulating InP:Fe-InGaAs:InP:Fe MSM Photodetectors: Modeling and Performance",
J. Quantum Electron., Vol. 28, No. 10, pp. 2343-2357, 1992

D. L. Rogers,

"Integrated Optical Receivers using MSM Detectors",
J. Lightwave Technol., Vol. 9, No. 12, pp. 1635-1638, 1991

J. B. D. Soole and H. Schumacher,

"InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors for Long Wavelength Optical Communications",
J. Quantum Electron., Vol. 27, No. 3, pp. 737-752, 1991

J. B. D. Soole and H. Schumacher,

"Transient-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodetectors",
IEEE Trans. Electron. Devices, Vol. 37, No. 11, pp. 2285-2290, 1990

S. J. Wojtczuk, J. M. Ballantyne, S. Wanuga, Y. K. Chen,

"Comparative Study of Easily Integrable Photodetectors",
J. Lightwave Technol., Vol. LT-5, No. 10, pp. 1365-1370, 1987

• **Other Photodetectors**

K. Kato,

"Long-Wavelength Photodetectors for Ultrawide-Band Systems",
IEICE Trans., Electron., Vol. E79-C, No. 1, pp. 14-20, 1996

M. Y. Frankel, T. F. Carruthers, C. S. Kyono,

"Analysis of Ultrafast Photocurrent Transport in AlInAs-GaInAs Heterojunction Bipolar Transistors",
J. Quantum Electron., Vol. 31, No. 2, pp. 278-285, 1995

Y. Leblebici, M. S. Ünlü, S.-M. Kang, and B. M. Onat,

"Transient Simulation of Heterojunction Photodiodes - Part I: Computational Methods",
J. Lightwave Technol., Vol. 13, NO. 3, pp. 396-405, 1995

M. S. Ünlü, B. M. Onat, and Y. Leblebici,

"Transient Simulation of Heterojunction Photodiodes - Part II: Analysis of Resonant Cavity Enhanced
Photodetectors",
J. Lightwave Technol., Vol. 13, NO. 3, pp. 406-415, 1995

H. Fukano, Y. Takanashi, and M. Fujimoto,

"High-Speed InP-InGaAs Heterojunction Phototransistors Employing a Nonalloyed Electrode Metal as a Reflector",

J. Quantum Electron., Vol. 30, NO. 12, pp. 2889-2895, 1994

Y. Zebda and O. Qasaimeh,

"Frequency Response and Quantum Efficiency of PIN Photodiode",

J. Opt. Commun., Vol. 15, No. 5, pp. 185-189, 1994

J. E. Bowers and C. A. Burrus, Jr.,

"Ultrawide-Band Long-Wavelength p-i-n Photodetectors",

J. Lightwave Technol., Vol. LT-5, No. 10, pp. 1339-1350, 1987

• Receivers for Subcarrier Transmissions

B. J. Markey, D. K. Paul, R. Razdan, B. A. Pontano, and N. K. Dutta,

"Impedance-Matched Optical Link for C-Band Satellite Applications",

IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 43, No. 9, pp. 960-965, 1995

M. S. Park and R. A. Minasian,

"Ultra-Low-Noise and Wideband-Tuned Optical Receiver Synthesis and Design",

J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 2, pp. 254-259, 1994

M. S. Park and R. A. Minasian,

"Low-noise Optical Receiver Network Synthesis using General Noise Figure Concept",

J. Opt. Commun., Vol. 15, No. 2, pp. 52-55, 1994

A. S. Daryoush, E. Ackerman, N. R. Smart, S. Wanuga, and D. Kasemset,

"Interfaces for High-Speed Fiber-Optic Links: Analysis and Experiment",

IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 39, No. 12, pp. 2031-2044, 1991

M. V. Schneider

"Reduction of Special Noise Density in p-i-n-HEMT Lightwave Receivers",

J. Lightwave Technol., Vol. 9, NO. 7, pp. 887-892, 1991

K. L. Alameh and R. A. Minasian,

"Tuned Optical Receivers for Microwave Subcarrier Multiplexed Lightwave Systems",

IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 38, No. 5, pp. 546-551, 1990

N. Takachio and K. Iwashita,

"A Novel Resonance-Type Optical Receiver for High-Speed Optical Heterodyne Transmission System",

J. Lightwave Technol., Vol. 7, No. 9, pp. 1371-1378, 1989

G. Jacobsen, J.-X. Kan, and I. Garrett,

"Tuned Front-End Design for Heterodyne Optical Receivers",

J. Lightwave Technol., Vol. 7, No. 1, pp. 105-114, 1989

T. E. Darcie, B. L. Kasper, J. R. Talman, and C. A. Burrus, Jr.,

"Resonant p-i-n-FET Receivers for Lightwave Subcarrier Systems",

J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 4, pp. 582-589, 1988

· External Modulators

O. Mitomi, K. Noguchi, and H. Miyazawa,

"Design of Ultra-Broad-Band LiNbO₃ Optical Modulators with Ridge Structure",
IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 43, No. 9, pp. 2203-2207, 1995

R. L. Jungerman, C. Johnsen, D. J. Mcquate, K. Salomaa, M. P. Zurakowski, R. C. Bray, G. Conrad, D. Cropper, and
P. Hernday,

"High-Speed Optical Modulator for Application in Instrumentation",
J. Lightwave Technol., Vol. 8, No. 9, pp. 1363-1370, 1990

T. Sueta and M. Izutsu,

"Integrated optic Devices for Microwave Applications",
IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 38, No. 5, pp. 477-481, 1990

L. Thylén,

"Integrated Optics in LiNbO₃: Recent Developments in Devices for Telecommunications",
J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 6, pp. 847-861, 1988

S. Y. Wang and S. H. Lin

"High-Speed III-V Electrooptic Waveguide Modulators at $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ",
J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 6, pp. 758-770, 1988

T. H. Wood,

"Multiple Quantum Well (MQW) Waveguide Modulators",
J. Lightwave Technol., Vol. 6, No. 6, pp. 743-757, 1988

R. C. Alferness,

"Waveguide Electrooptic Modulators",
IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-30, No. 8, pp. 1121-1137, 1982

· C/N estimation

A. Peled, J. Zohar, and J. Gavan,

"A Unified Method for Design and Analysis of Analog/Digital Fiber Optic Communication Links",
J. Opt. Commun., Vol. 15, No. 3., pp. 104-111, 1994

E. Yoneda, K. Suto, K. Kikushima, and H. Yoshinaga,

"All-Fiber Video Distribution (AFVD) Systems Using SCM and EDFA Techniques",
J. Lightwave Tehcnol., Vol. 11, No. 1, pp. 128-137, 1993

E. Ackerman, S. Wanuga, D. Kasemset, A. S. Daryoush, and N. R. Samant,

"Maximum Dynamic Range Operation of a Microwave External Modulation Fiber-Optic Link",
IEEE Trans Microwave Theory Tech., Vol. 41, No. 8, pp. 1299-1306

T. E. Darcie and G. E. Bodeep,

"Lightwave Subcarrier CATV Transmission Systems",
IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 38, No. 5, pp. 524-533, 1990

- A. S. Daryoush, E. Ackerman, R. Saedi, R. Kunath, and K. Shalkhauser,
 "High-Speed Fiber-Optic Links for Distribution of Satellite Traffic",
 IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 38, No. 5, pp. 510-517, 1990
- C. H. Cox III, G. E. Betts, and L. M. Johnson,
 "An Analytic and Experimental Comparison of Direct and External Modulation in Analog Fiber-Optic Links",
 IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 38, No. 5, pp. 501-509, 1990
- P. M. Hill and R. Olshansky,
 "A 20 CHannel Optical Communication System Using Subcarrier Multiplexing for the Transmission of Digital
 Video Signals",
 J. Lightwave Technol., Vol. 8, No. 4, pp. 554-560, 1990
- W. I. Way,
 "Subcarrier Multiplexed Lightwave System Design Considerations For Subcarrier Loop Applications",
 J. Lightwave Technol., Vol 7, No. 11, pp. 1806-1818, 1989
- R. Olshansky, V. A. Lanzisera, P. M. Hill,
 "Subcarrier Multiplexed Lightwave Systems for Broad-Band Distribution",
 J. Lightwave Technol., Vol. 7, No. 98, pp. 1329-1341, 1989

• Others

- J. B. Georges, D. M. Cutrer, O. Solgaard, and K. Y. Lau,
 "Optical Transmission of Narrowband Millimeter-Wave Signals",
 IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 43, No. 9, pp. 2229-2240, 1995

学会

IEEE MTT-S International Microwave Symposium (MTT-S)

マイクロ波関連最大の国際会議。Exhibitionも併設され、情報収集には非常に有効。12月頭の締め切り (A4×2ページ提出後、A4×4ページを提出) で、翌年5月末ぐらいにアメリカで開催。

European Microwave Conference (EuMC)

ヨーロッパで行われるマイクロ波の国際会議。1996年からはExhibitionも併設される予定。2月頭の締め切り (A4×3ページを提出後、6月ぐらいにA4×6ページを提出) で翌年9月頭にヨーロッパで開催。

Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)

4-6月に締め切り (A4×4ページのみ) で、12月ぐらいにアジアで開催。4年に1度は日本で開催。

Microwave Workshop (MWE)

日本でAPMCが開催されない年に日本で行われるマイクロ波の会議。Exhibitionも併設されるが規模は
 かなり小さい。チュートリアルが比較的充実しているので、勉強に行くには良い。

Optical Fiber Communication Conference (OFC)

光ファイバ通信関連最大の国際会議。Exhibitionも併設される。2月にアメリカ (主に西海岸) で開催。

部品購入について

今回のモデルシステムで種々の部品を購入したので、その購入先や性能についての情報をまとめる。

アンプ

ミリ波のアンプはアメリカのMilliWave社のものを使用した。扶桑商事、総合電子、理経など数多くの代理店が取り扱っている。現在のところ扶桑商事がいちばん安い。

ミリ波のアンプとしては、アメリカのDBS Microwave社(総合電子、理経が取り扱い)もあるが、カタログスペックを比較するとMilliWave社の方が良い。また、いずれの会社も基本的には受注生産で、スペックもカタログ外でも対応してくれる。ただし、新規スペックに対しては開発費をとられるので割高。

現在ATRで購入しているのは2種類で、

1) Frequency : 40 - 50 GHz, Gain > 30 dB, NF < 10 dB

2) Frequency : 30 - 52 GHz, Gain > 40 dB, NF < 8 dB

1)が130万円、2)が160万円程度。

また、測定にはHPのアンプを使用している。

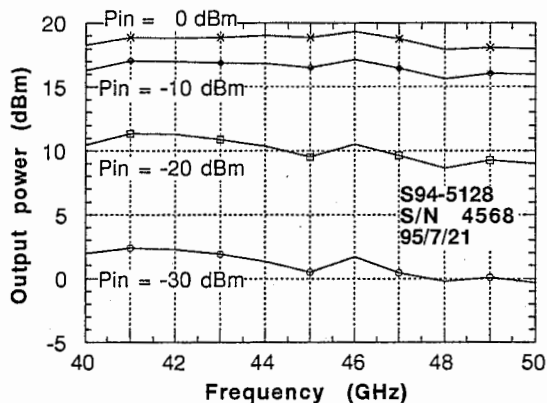


図 106 MilliWave社製HPA特性 (1)

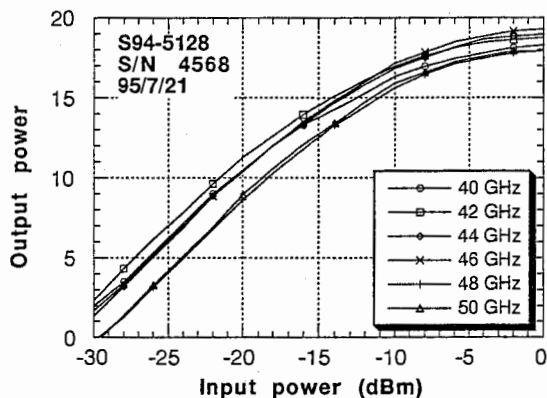


図 107 MilliWave社製HPA特性 (2)

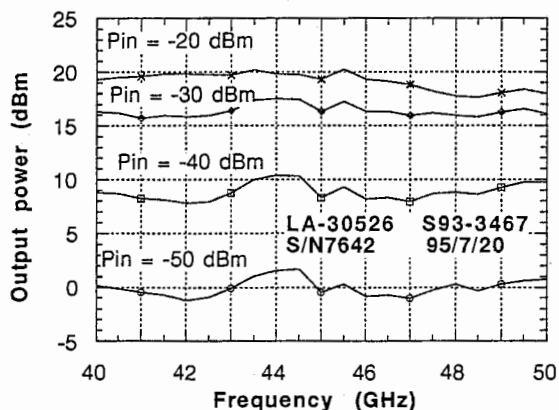


図 108 MilliWave社製LNA特性 (1)

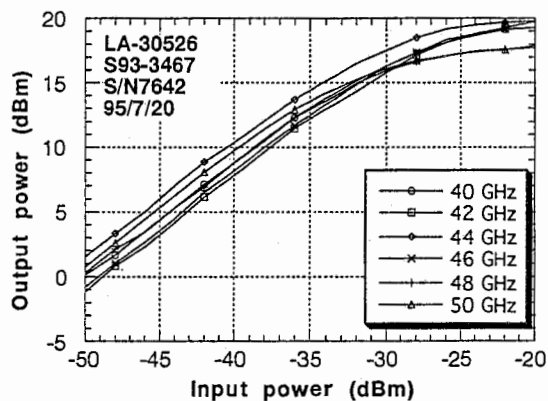


図 109 MilliWave社製LNA特性 (2)

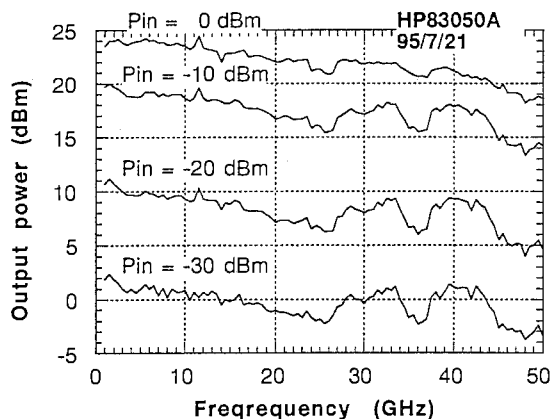


図 110 HP83050A特性 (1)

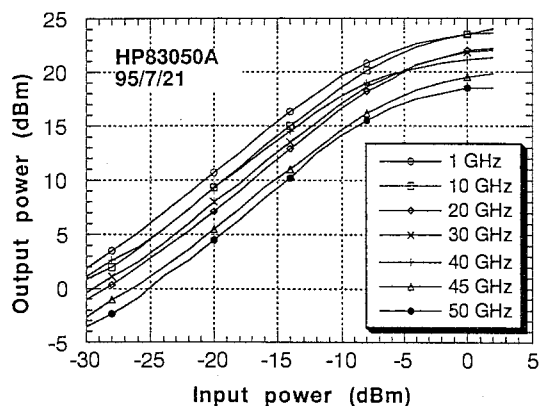


図 111 HP83050A特性 (1)

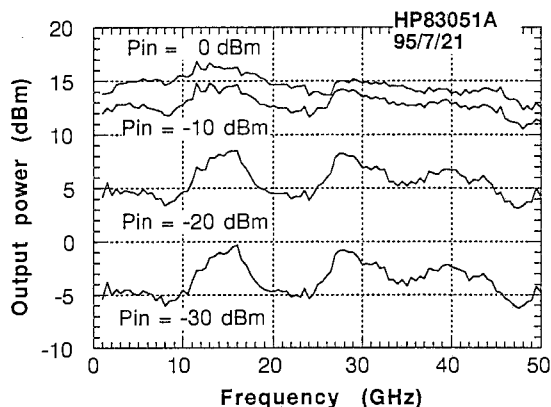


図 112 HP83051A特性 (1)

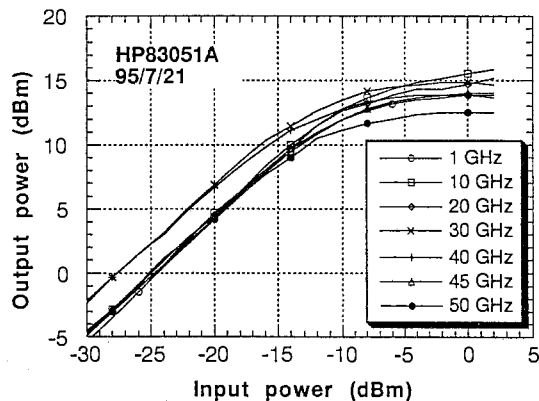


図 113 HP83051A特性 (2)

マイクロ波のアンプはかなり多くの会社で作っており、特にどこが良いという情報は無い。R&Kなどの国産の会社も対応が良いかもしれない。

今回のデジタルの伝送系でいくつかのマイクロ波、IFのアンプを使用しているが、アンプによりBER特性が1桁程度変動した。詳細な検討は行っていないので、原因は不明。

導波管部品

導波管部品は、HP, Willtron, Hughes, MDTなどの会社がある。同軸導波管変換はWiltron (アンリツが取り扱い) が最も安い。

他の導波管部品として、ミキサはSpacek Labs社 (理経が取り扱い) を使用した。導波管ミキサ唯一のダブルバランス型ということで選定した。しかし、実測してみるとアイソレーションがかなり悪く、ダブルバランスであることのメリットはほとんどなかった。原因の一つはアイソレータである。メーカー側でのミキサの測定は入出力ポートすべてにアイソレータを入れて測定している。もう一つの原因は、信号レベルである。メーカー側の測定条件は、LO入力カタログどおりに15Vバイアスで10mW入力、信号入力も0dBmと大きな値を用いている。図に2種類のミキサの種々の特性を示す。アイソレーション、変換ロスともに、測定条件により大きく変化していることがわかる。また、アイソレータを入れて測定していないため、周波数特性もあまり良好ではない。

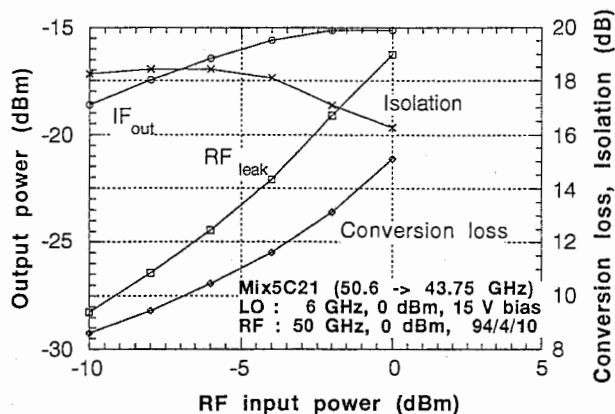


図 114 Spacek社製down converter特性 (1)

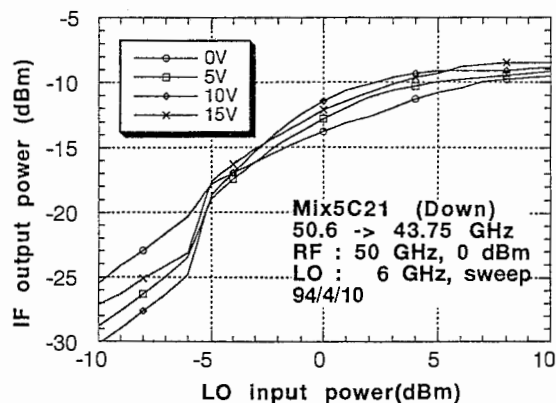


図 115 Spacek社製down converter特性 (2)

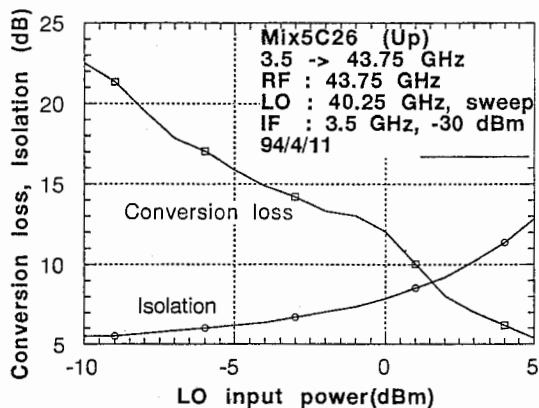


図 116 Spacek社製up converter特性 (1)

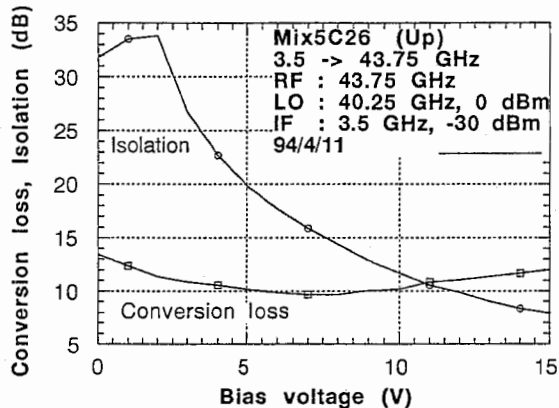


図 117 Spacek社製up converter特性 (2)

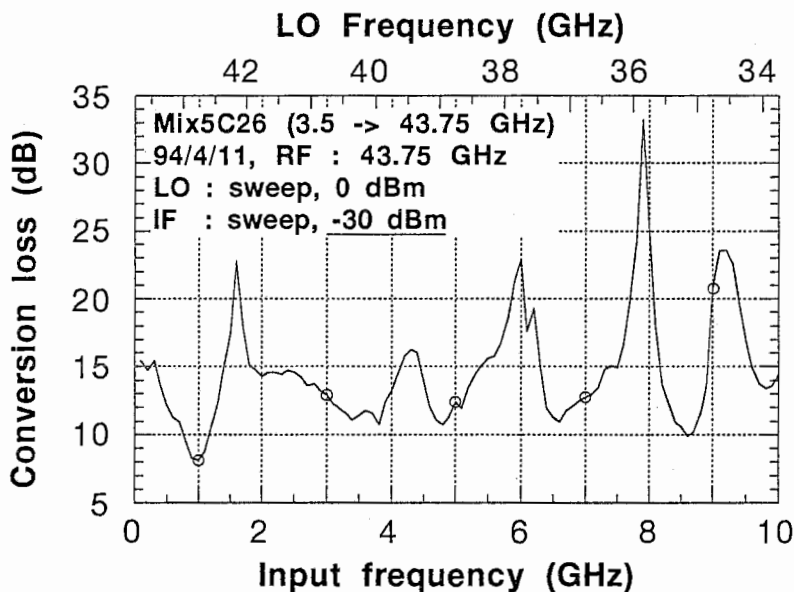


図 118 Spacek社製up converter特性 (2)

光関連

長波長帯のDFBレーザは以前はGEC-Marconi社(オプトサイエンス取扱)がハイパワーなので購入していたが、1)納期が守れず非常に時間がかかる、2)カタログ値は平均値あるいはベスト値なので、実際の商品は性能がやや悪い場合が多い、3)量子効率が低く、非常に大電流(350 mA)が必要などの理由であまり勧められない。最近になって、国産でかなりハイパワーのレーザが販売されている。最近購入しているのは松下のレー

で、カタログ上は8 mWの出力であるが、実際は20 mW程度出ている。また、そのときの電流も150 mAと低くて使いやすい。また、波長指定にも応じてくれる。高出力という面では沖のマルチモードレーザも30 mWと使いやすい。

短波長帯のレーザは高出力なものとしては、SDL (Spectra Diode Labs) のチップが高出力で、一応シングルモードである。チップ状では使いにくいので、ファイバ接続(ファイバピグテールと呼ぶ)を行うのは、Seastar Optics社(ハイテック、オプトサイエンス取扱)が良い。長波長帯でのファイバピグテールの結合損失は通常50 %程度であるが、ハイパワー短波長レーザの結合効率はかなり低く、30 %程度である。

レーザの駆動電源は旭データシステムズのALP-7033CAが駆動電流500 mAで、出力パワーの直読や変調端子などの機能を備えて20万円以下とお勧めである。形状も小さく、スイッチ等の配置もよく、使い勝手も良好である。

光の波長フィルタはサンテック社製が比較的使いやすい。偏波依存性がほとんどなく、波長も目盛りでだいたい知ることができ、フィルタによる反射光も取り出すことができるなど高機能である。シングルキャビティとダブルキャビティで各種半値幅を選択することができる。やや挿入損失が大きい。

また、基本的に光関連部品はファイバ結合型を購入しているが、その際に、できれば偏波保存ファイバにした方が将来の実験に役立つことが多いと思われる。

そのほか

ミリ波用のケーブルはInsulated Wire社(扶桑商事取扱)が安くて使いやすい。Vコネクタ付のケーブルなので60GHzまで使用可能。

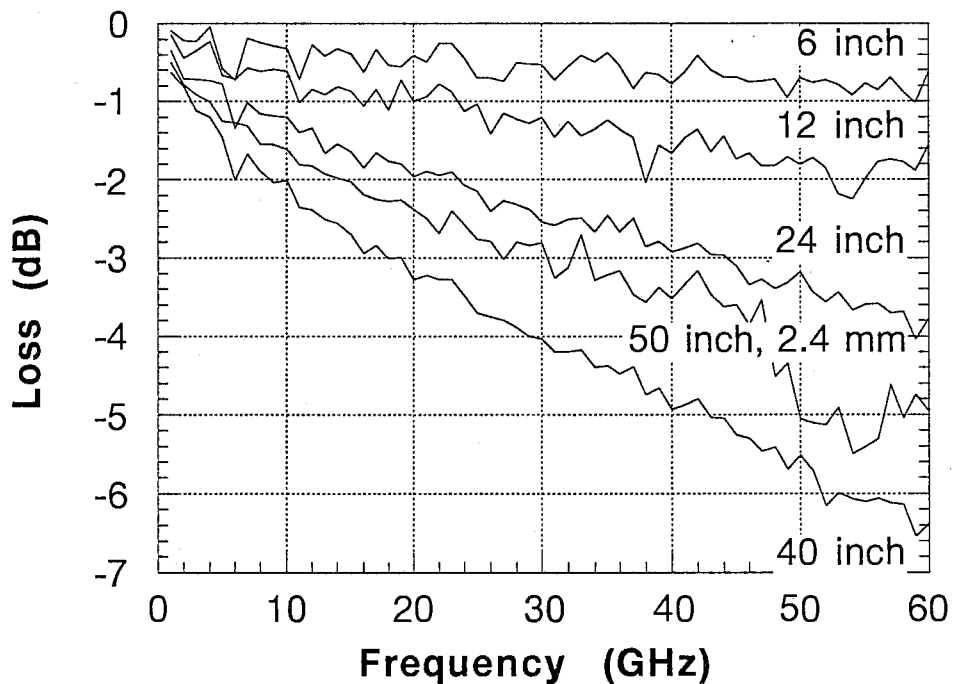


図 119 Insulated Wire社製ケーブル特性

(1) 本人分

- [1] N. Imai, H. Kawamura, E. Suematsu, E. Ogawa,
"Millimeter Wave Personal Communications System Using Fiber-Optic Links",
1994 IEEE MTT-S Topical Meeting on Optical Microwave Interactions (OMI94),
November 1994, Ile de France, France, pp. 141-144
- [2] 川村博史、末松英治、今井伸明、
"45 - 50 GHz モノリシックHFET/MSM受光器",
電子情報通信学会技術研究報告、1995年6月22日、豊橋技術科学大学、
信学技報MW95-44,OPE95-27(1995-06)
- [3] H. Kawamura, E. Suematsu, N. Imai,
"A 45 - 50 GHz monolithic integrated HFET/MSM OEIC receiver",
25th European Microwave Conference 1995(25th EuMC), September 1995, Bologna, Italy, pp. 990-995
- [4] 川村博史、末松英治、今井伸明、
"45-50GHzモノリシックHFET/MSM受光器",
電子情報通信学会 秋季エレクトロニクスソサエティ大会、1995年9月5-8日、
中央大学 理工学部、C-51
- [5] 川村博史、皆川晃、今井伸明、小川英一、
"ミリ波光ファイバリンクによる広帯域デジタル伝送",
平成7年電気関係学会関西支部連合大会、1995年11月11-12日、京都大学、S44
- [6] 川村博史、今井伸明、小川英一、
"光/ミリ波無線リンクを用いた超高速広帯域伝送",
電子情報通信学会 春季エレクトロニクスソサエティ大会、1996年3月28-31日、東京工業大学、
シンポジウム SB-5
- [7] H. Kawamura, N. Imai, E. Ogawa, H. Inomata,
"High-speed data transmission using millimeter-wave fiber-optic links",
XXVth General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI),
August 28 - September 5, 1996, Lille, France (招待論文)
- [8] H. Kawamura, N. Imai, E. Ogawa, H. Inomata,
"High-speed data transmission using millimeter-wave fiber-optic links",
IEICE Trans. on Communications, (投稿予定)

(2) 共同研究者分

- [1] 皆川 晃、川村博史、今井伸明、小川英一、
"ミリ波パーソナル通信用光ファイバリンク",
輻射科学研究会 例会, RS 94-12, pp. 1-9, 1994/10
- [2] N. Imai, H. Kawamura, E. Ogawa,
"Millimeter Wave Personal Communications System Using Fiber-Optic Links",
Optical Fiber Communication Conference (OFC) '95 Workshop, 1995/02
- [3] 今井伸明、川村博史、松井一浩、小川英一、末松英治、
"パーソナル通信用光/マイクロ・ミリ波変換回路およびミリ波ファイバリンク",
電子情報通信学会、マイクロ波・光エレクトロニクス共催研究会, LQE 94-83,
pp.79-84,1995/06
- [4] 下津臣一、及川 哲、斉藤 勉、川村博史、萩原淳一、箕輪純一郎、
"LiNbO₃導波路型超高速変調器の特性",
電子情報通信学会、光通信システム/光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス共催研究会,
OCS 95-61, pp. 25-30, 1995/09
- [5] N. Imai, H. Kawamura, T. Imaoka, E. Ogawa,
"Millimeter Wave Personal Communications System Using Fiber-Optic Links",
4th International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC '95), pp. 491-495,
1995/11

特許

「半導体電界吸収型光変調装置」 特願平08-005634 (1996年1月17日出願)

最後にこれまで収集した文献リストと取引をした業者リストを添付する。文献は光関連、高周波関連などがかなり幅広く収集しているので、量が多いが参考まで。業者リストは担当者等の変動があるかと思われるので、連絡する際にはもう一度確認していただきたい。

Title	page	Authors	memo	equations
LT13	977	Detailed Noise Statistics for an Optically Preamplified Direct Detection Receiver S.L.Danielsen,B.Mikkelsen,T.Durhuus,C.Joergensen,K.E.Stubkjaer	Denmark Univ.	
LT13	889	WDM Systems with Unequally Spaced Channels F.Forghieri,R.W.Tkach,A.R.Chraplyvy	ATT	
LT13	841	Four-Photon Mixing and High-Speed WDM Systems R.W.Tkach,A.R.Chraplyvy,F.Forghieri,A.H.Gnauck,R.M.Derosier	ATT	
LT13	606	Field Effect Transistor-Self Electrooptic Effect Device (FET-SEED) Differential Transimpedance Amplifiers for Two-Dimensional Optical Data Links R.A.Novotny,M.J.Wojcik,A.L.Lentine,L.M.F.Chirovsky,L.A.D'Asaro,M.W.Focht,G.Guth,K.G.Glogovsky,R.Leibenguth,M.T.Asom,J.M.Freund	ATT	
LT13	592	Simultaneous Measurement of the Linewidth, Linewidth Enhancement Factor α , and FM and AM Response of a Semiconductor Laser U.Kruger,K.Kruger	Berlin Inst.	
LT13	517	High-Performance Compact Optical WDM Transceiver Module for Passive Double Star Subscriber Systems I.Ikushima,S.Mimi,T.Hamaguchi,M.Suzuki,N.Maeda,H.Kodera,K.Yamashita	Hitachi	
LT13	396	Transient Simulation of Heterojunction Photodiodes - Part I:Computational Methods Y.Lebblebici,M.S.Unlu,S.Kang,B.M.Onat	Illinois Univ.	
LT13	406	Transient Simulation of Heterojunction Photodiodes M.S.Unlu,B.M.Onat,Y.Lebblebici	Illinois Univ.	
LT13	216	Results of Benchmark Tests for Different Numerical BPM Algorithms H.P.Nolling,R.Marz	Siemens	
LT12	2131	InGaAsP Channel HFET's on InP for OEIC Applications P.Berthier,L.Giraudet,A.Scavennec,D.Rigaud,M.Valenza,J.I.Davies,S.W.Bland	CNET	
LT12	638	A Monolithically Integrated Photoreceiver Compatible With InP/InGaAs HBT Fabrication Process E.Sano,M.Yoneyama,H.Nakajima,Y.Matsuoka	NTT	
LT12	503	Velocity-Matching in Millimeter Wave Integrated Optic Modulators With Periodic Electrodes J.H.Schaffner,R.R.Hayes	Hughes	
LT12	343	Packaging Technology for a 10-Gb/s Photoreceiver Module Y.Oikawa,H.Kuwatsuka,T.Yamamoto,T.Ihara,H.Hamano,T.Minami	Fujitsu	
LT12	254	Ultra-Low-Noise and Wideband-Tuned Optical Receiver Synthesis and Design M.S.Park,R.A.Minasian	Sydney Univ.	ampの入力をnoise matching.
LT11	1601	High-Bandwidth OEIC Receivers using Heterojunction Bipolar Transistors:Design and Demonstration K.D.Pedrotti,R.L.Pierson Jr.,N.H.Sheng,R.B.Nubling,C.W.Farley,M.F.Chang	Rockwell	量子効率と反射係数、吸収係数の式
LT11	367	Design Considerations for Wide-Band p-i-n/HBT Monolithic Transimpedance Optical Receivers M.Govindarajan,S.R.Forrest		
LT11	309	Microwave/Millimeter-Wave Frequency Subcarrier Lightwave Modulations Based on Self-Sustained Pulsation of Laser Diode X.Wang,G.Li,C.S.Ih		
LT11	128	All-Fiber Video Distribution (AFVD) Systems Using SCM and EDFA Techniques E.Yoneda,K.Suto,K.Kikushima,H.Yoshinaga	NTT	
LT11	76	Optimization of Fiber Amplifier SCM Lightwave Video Systems Using Direct and External Modulation K.E.Alamch,R.A.Minasian	Sydney Univ.	
LT11	7	Fundamental Nonlinear Distortions in Analog Links with Fiber Amplifiers C.Y.Kuo	ATT	
LT11	3	Intermodulation Distortion in High Dynamic Range Microwave Fiber-Optic Links with Linearized Modulators J.H.Schaffner,W.B.Bridges	Hughes	
LT10	1597	Use of Active Loads with MSM Photodetectors in Digital GaAs MESFET Photoreceivers R.B.Darling,H.J.Hyoung,K.J.Kuhn	HP	active loadによる改善
LT10	933	A High-Speed Eight-Channel Optoelectronic Integrated Receiver Array Compromising GaInAs p-i-n PD's and AlInAs/GaInAs HEMT's H.Yano,M.Murata,G.Sasaki,H.Hayashi	Sumitomo Elec.Industry	
LT10	908	A 1550-nm Millimeter-Wave Photodetector with a Bandwidth-Efficiency Product of 2.4 THz D.Wake	BT	
LT10	367	Multichannel System Design Using Optical Preamplifiers and Accounting for the Effects of Phase Noise, Amplifier Noise, and Receiver Noise G.Jacobsen	TFL	
LT9	1635	Integrated optical receivers using MSM detectors D.L.Rogers	IBM	noiseの式、MSM形状と容量、帯域の式 $\ln^2=4kT/R(1+2qI+4kT\omega^2(Cd+Camp)/gm, \Gamma=1.8, f3dB=0.4v/d,v=10^7$
LT9	1200	High-Performance, High-Reliability InP/GaInAs p-i-n Photodiodes and Flip-Chip Integrated Receivers for Lightwave Communications O.Wada,M.Makiuchi,H.Hamaguti,T.Kumai,T.Mikawa	Fujitsu	
LT9	887	Reduction of Spectral Noise Density in p-i-n-HEMT Lightwave Receivers M.V.Schneider	ATT	ampの入力をnoise matching
LT9	251	Long-Haul Coherent Optical Fiber Communication Systems Using Optical Amplifiers S.Ryu,S.Yamamoto,H.Taga,N.Edagawa,Y.Yoshida,H.Wakabayashi	KDD	
LT8	1584	Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical-Fiber Nonlinearities A.R.Chraplyvy	ATT	
LT8	1363	High-Speed Optical Modulator for Application in Instrumentation R.L.Jungerman,C.Johnsen,D.J.McQuate,K.Salomaa,M.P.Zurakowski,R.C.Bray,G.Conrad,D.Cropper,P.Hernday	HP	2-tone法によるEOM周波数特性評価
LT8	1027	High-Speed InGaAlAs/InAlAs Multiple Quantum Well Optical Modulators K.Wakita,L.Mitomi,H.Asai,Y.Kawamura,M.Naganuma	NTT	NTTのEA-EOM
LT8	912	Wide-Bandwidth Receiver/Photodetector Frequency Response Measurements Using Amplified Spontaneous Emission from a Semiconductor Optical Amplifier E.Eichen,J.Schlafer,W.Ridcut,J.McCube	GTE	光アンプのSpontaneous EmissionによるPD帯域評価法
LT8	554	A 20-Channel Optical Communication System Using Subcarrier Multiplexing for the Transmission of Digital Video Signals P.M.Hill,R.Olshansky	GTE	CNRの式 $CNR=[1/2(modulation\ depth \cdot Idc)^2 \cdot R]/[NF \cdot kT \cdot B + RIN \cdot Idc^2 \cdot R \cdot B]$

LT 7	2078	High-Sensitivity Lumped-Element Bandpass Modulators in LiNbO ₃	G.E.Betts,L.M.Jhonson,C.H.Cox III		
LT 7	1806	Subcarrier Multiplexed Lightwave System Design Considerations For Subscriber Loop Applications	W.I.Way	Belcore	CNRの式
LT 7	1510	Optoelectronic Integrated Receivers on InP Substrates by Organometallic Vapor Phase Epitaxy	G.Sasaki,K.Koike,N.Kuwata,K.Ono	Sumitomo Elec.Industry	
LT 7	1432	Ultrawide Bandwidth Optical Receivers	J.L.Gimlett	Belcore	matchingによる帯域拡張
LT 7	1371	A novel resonance-type optical receiver for High-speed optical heterodyne transmission systems	N.Takachio,K.Iwashita	NTT	Lによる resonant
LT 7	1329	Subcarrier Multiplexed Lightwave Systems for Broad-Band Distribution	R.Olshansky,V.A.Lanzisera,P.M.Hill	GTE	FMによるNTSC信号伝送(衛生放送)では、 $w \leq CNR = (m)^2 2R / (2NFkTB)$
LT 7	966	Performance of InGaAs and InP Junction Field-Effect Transistors for Optoelectronic Integrated Circuits.II. Optical Receiver Analysis	D.C.W.Lo,S.R.Forrest		FETのノイズ解析
LT 7	957	Performance of InGaAs and InP Junction Field-Effect Transistors for Optoelectronic Integrated Circuits.I. Device Analysis	D.C.W.Lo,S.R.Forrest		
LT 7	105	Tuned front-end design for heterodyne optical receivers	G.Jacobsen,J.-X.Kan,I.Garrett	Telecom in Dent	Lによる resonant
LT 7	92	Wide-Band Frequency-Response Measurement of Optical Receivers Using Optical Heterodyne Detection	S.Kawanishi,A.Takada,M.Saruwatari	NTT	Optical Heterodyne法によるPD帯域評価
LT 6	1665	Fiber-Optic Multigigabit GaAs MIC Front-End Circuit with Inductor Peaking	N.Ohkawa	NTT	ampのL peaking
LT 6	1507	GaInAs Monolithic Photoreceiver Integrating p-i-n/JFET with Diffused Junctions and a Resistor	J.-C.Renaud,N.L.Nguyen,M.Allovon,P.Blancconier,S.Vuye,A.Scavannec	CNET	
LT 6	847	Integrated optics in LiNbO ₃ : Recent Developments in Devices for Telecommunications	L.Thylen	Ericsson	
LT 6	758	High Speed III-V Electrooptic Waveguide Modulators at $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$	S.Y.Wang,S.H.Lin	HP	
LT 6	743	Multiple Quantum Well (MQW) Waveguide Modulators	T.H.Wood	ATT	
LT 6	582	Resonant p-i-n-FET receivers for lightwave subcarrier systems	T.E.Darcie,B.L.Kasoer,J.R.Talman,C.A.Burris	ATT	伝達関数よりamp周波数特性設計
LT 6	399	Monolithic Integration of a GaInAs p-i-n Photodiode and an Optical Waveguide: Modeling and Realization Using Chloride Vapor Phase Epitaxy	M.Erman,P.Jury,R.Gamonal,J.-L.Gfentner,P.Stephan,C.Guedon		
LT 6	273	Fiber-Optic Transmissions of Microwave 8-Phase-PSK and 16-ary Quadrature-Amplitude-Modulated Signals at the 1.3- μm Wavelength Region	W.I.Way	ATT	
LT 6	64	On the Choice of Optimum FET Size in Wide-Band Transimpedance Amplifiers	A.A.Abidi	UCLA	入力FET gate幅最適化
LT 5	1377	Bandwidth Measurements of Ultrahigh-Frequency Optical Detectors Using the Interferometric FM Sideband Technique	E.Echen,A.Silletti	GTE	高解像度光スペアナで光領域でのsidebandによる帯域評価
LT 5	1365	Comparative Study of Easily Integratable Photodetectors	S.J.Wojtczak,J.M.Ballantyne,S.Wanuga,Y.K.Chen	GE	
LT 5	1351	Multigigabit-per-Second Avalanche Photodiode Lightwave Receivers	B.L.Kasper,J.C.Campbell	ATT	
LT 5	1339	Ultrawide-Band Long-Wavelength p-i-n Photodetectors	J.E.Bowers,C.A.Burris	ATT	
LT 5	1325	A 1.3- μm 35-km Fiber-Optic Microwave Multicarrier Transmission System for Satellite Earth Stations	W.I.Way,R.S.Wolff,M.Krain	Bell Commun.	
LT 5	1103	Subcarrier Multiplexing for Multiple-Access Lightwave Networks	T.E.Darcie	ATT	
LT 5	373	Optimum Design of a 4-Gbit/s GaAs MESFET Optical Pre-amplifier	R.A.Minasian	Melbourne Univ.	
LT 5	340	A 2-GHz Optical Receiver Using Commercially Available Components	A.Azizi,L.Altwegg	Hasler Research Lab.	
LT 4	1694	Monolithic Four-Channel Photodiode/Amplifier Receiver Array Integrated on a GaAs Substrate	O.Wada,H.Hamaguchi,M.Makiuchi,T.Kumai,M.Ito,K.Nakai,T.Holmatsu,T.Sakurai	Fujitsu	APDモジュール化
LT 3	1248	Monolithic Optoelectronic Integration: A New Component Technology for Lightwave Communications	S.R.Forrest	ATT	
LT 3	729	A Monolithic Silicon Photodetector/Amplifier IC for Fiber and Integrated Optics Application	D.H.Hartman,M.K.Grace,C.R.Ryan	Motorola	
LT 3	608	A p-i-n Bipolar Receiver for Submarine Systems Application	M.J.O'Mahony,D.J.Justice,P.Holmes	BT	
LT 3	308	A 1.3- μm Microwave Fiber-Optic Link Using A Direct-Modulated Laser Transmitter	W.E.Stephens,T.R.Joseph	TRW	
LT 2	512	Linear Interferometric Modulators in Te:LiNbO ₃	C.H.Bulmer,W.K.Burns		
LT 2	369	Wavelength Multiplexing Components-A Review of Single-Mode Devices and Their Applications	G.Winzer	Siemens	noise低減のための受信amp設計
LT 2	243	Receiver Design for high-Speed Optical-Fiber Systems	T.V.Nuoi	TRW	
Title	page	Title	Authors	memo	equations
JOC15	231	20 GHz Bandwidth High Dynamic Range 1.3 μm Buried Heterostructure Laser Modules	D.A.Atlas,B.deLury,A.Rosiewicz,R.anock	Lasertron	

JOC15	214	10 Gbit/s Optical Transmission beyond Dispersion Limit	L.A.Ims,O.Tveito		
JOC15	185	Frequency Response and Quantum Efficiency of PIN Photodiode	Y.Zebda,O.Qasaimeh	Jordan Univ.	
JOC15	104	A Unified Method for Design and Analysis of Analog/Digital Fiber Optic Communication Links	A.Peled,J.Zohar J.Gavan	Tel-Aviv Univ.	
JOC15	52	Low-noise optical receiver network synthesis using general noise figure concepts	M.S.Park,R.A.Minasian		ampの入力をnoise matching
JOC14	217	Coding to Improve Receiver Sensitivity for the Optical Intensity Modulation Direct-Detection Systems	J.Wu,J.Wu	Tiwan Univ.	
JOC14	75	Optical Preamplifier in Noncoherent Space Communications	V.K.Jain	Delhi Inst.	

Title	page	Title	Authors	memo	equations
AO34	1544	InGaAs/InAlAs quantum-well electroabsorption waveguide modulators with large-core waveguide structure: design and characterization	M.K.Chin,W.S.C.Chang	California Univ.	
AO34	927	Optimum optical local-oscillator power levels for coherent detection with photodiodes	J.F.Holmes,D.J.Rask	Oregon Inst.	
AO26	3676	Intermodulation distortion and compression in an integrated electrooptic modulator	B.H.Kolner,D.W.Dolfi	HP	
AO19	3496	Temporal and frequency response of avalanche photodiodes from noise measurements	T.Andersson,A.R.Johnston,H.Eklund	Chalmers Univ.,California IT.,Ericsson	
AO17	68	Calibration of optical modulator frequency response with application to signal level control	S.Uehara	NTT	AM法による特性測定

Title	page	Title	Authors	memo	equations
PTL7	582	Compensating the Compensator: A Demonstration of Nonlinearity Cancellation in a WDM Systems	A.H.Gnauck,R.M.Jopson,R.M.Derosier	ATT	
PTL7	567	Fiber-Optic Microwave Link with Monolithic Integrated Optoelectronic Up-Converter	Q.Z.Liu,R.Davies,R.I.MacDonald		
PTL7	549	Low-Noise, High-Transimpedance Si-Bipolar AGC Amplifier for 10 Gb/s Optical-Fiber Links	M.Neuhauser,M.Moller,H.-M.Rein,H.Wernz		
PTL7	546	Compressive Strained Multi-Quantum-Well Waveguide Photodetectors for Coherent Receivers	A.Ferreras,O.Anton,F.Rodriguez,E.Gomez-Salus,J.L.deMiguel,F.Hernandez-Gil		
PTL7	543	700 Mb/s Monolithically Integrated Four-Channel Receiver Array OEIC Using Ion-Implanted InGaAs JFET Technology	D.Romer,Ch.Lauterbach,L.Hoffmann,J.W.Walter,H.Huber,G.Ebbinghaus	Siemens	
PTL7	508	Monolithic Optoelectronic Circuit Design and Fabrication by Epitaxial Growth on Commercial VLSI GaAs MESFETs	K.V.Shenoy,C.G.Fonstad,Jr,A.C.Grot,D.P.saltis		
PTL7	473	1.55- μ m Polarization-Insensitive Optical Amplifier with Strain-Balanced Superlattice Active Layer	A.Godefroy,A.LeCorre,F.Clerot,S.Salaun,S.Loualiche,J.C.Simon,L.Henry,C.Vaudry J.C.Keromnes,G.Joulic,P.Lamouler	CNET	
PTL7	458	Very Large Bandwidth Strained MQW DFB Laser at 1.3 μ m	T.R.Chen,J.Ungar,X.L.Yeh,N.Bar-Chaim	Ortel	
PTL7	431	Multichannel Millimeter Wave Subcarrier Transmission by Resonant Modulation of Monolithic Semiconductor Lasers	J.B.Georges,D.M.Cutrer,M.-H.Kiang,K.Y.Lau	UCLA	
PTL7	424	A Low-Noise Broad-Band GaAs MESFET Monolithic Distributed Preamplifier	A.P.Freundorfer,P.Lionais		
PTL7	421	Inductive Bandwidth Enhancement of Sub- μ m InAlAs/InGaAs MSM Photodetectors	D.Kuhl,E.H.BOtcher,F.Hieronymi,E.Droge,D.Bimberg	Bertin Univ.	
PTL7	418	Improvement Error Correction Technique for On-Wafer Lightwave Measurements of Photodetectors	P.Debie,L.Martens,D.Kaiser	Alcatel	
PTL7	415	Extrinsic Frequency Response of a Wide-Bandwidth Metal Semiconductor Metal Diode	H.leong,A.M.Ferendeci,X.L.Cao,H.E.Jackson		
PTL7	412	Travelling-Wave Photodetectors with 172-GHz Bandwidths and 76-GHz Bandwidth-Efficiency Product	K.S.Giboney,R.L.Nagarajan,T.E.Reynold,S.T.Allen,R.P.Mirin,J.W.Rodwell,J.E.Boyers		
PTL7	360	GaAs MQW Modulators Integrated with Silicon CMOS	K.W.Goossen,J.A.Walker,L.A.D'Asaro,S.P.Hui,B.Tseng,R.Lcibenguth,D.Kossives,D.D.Bacon,D.Dahringler,L.M.F.Chirovsky A.L.Lentine,D.A.B.Miller	ATT	
PTL7	254	Fabry-Perot Laser Diode Modeling	D.E.Dodds,M.J.Sieben		
PTL7	224	Dispersion Compensation for 10 Gb/s Lightwave Systems Based on a Semiconductor Mach-Zehnder Modulator	J.C.Cartledge,H.Debregeas,C.Rolland		
PTL7	185	Monolithic Integration on InP of a Wannier Stark Modulator with a Strained MQW DFB 1.55- μ m Laser	M.Allovon,S.Fouchet,J.-C.Harmand,A.Ougazzaden,B.Rose,A.Glouk hian,F.Devaux	CNET	

PTL7	182	A 12-Gb/s High-Performance, High-Sensitivity Monolithic p-i-n/HBT Photoreceiver Module for Long-Wavelength Transmission Systems	L.M.Lunardi,S.Chandrasekhar,A.H.Gnauc k,C.A.Burns,R.A.Hamm,J.W.Sulhoff,J.L.ATT Zyskind	
PTL7	173	Ultrafast Recovery Time in a Strained InGaAs-AlAs p-i-n Modulator	H.Wang,P.Likamwa,M.Ghisoni,G.Parry,P .N.Stavrinou,C.Roberts,A/Miller	
PTL7	170	High-Speed MQW Electroabsorption Optical Modulators Integrated with Low-Loss Waveguides	T.Ido,H.Sano,M.Suzuki,S.Tanaka,H.Inou e	Hitachi
PTL7	167	Nearly Chirp-Free Electroabsorption Modulator Using InGaAs-InGaAlAs-InAlAs Coupled Quantum Wells	H.Q.Mou,T.Y.Chang	ATT
PTL7	104	2 x 10 Gbit/s WDM 1310-nm Optical Transmission over 63.5-km Standard Single-Mode Fiber Using Optical Pre-amplifier	H.de Waardt,L.F.Tiemeijer,B.H.Verbeek	
PTL6	1488	Performance of Pre-amplified Direct Detection Systems Under Influence of Receiver Noise	N.G.Jensen,E.Bodtker,G.Jacobsen,J.Stran dgerg	
PTL6	1430	27-dB Gain Unidirectional 1300-nm Polarization-Insensitive Multiple Quantum Well Laser Amplifier Module	L.F.Tiemeijer,P.J.A.Thijs,T.V.Dongen,J.J .M.Binsma,E.J.Jansen,A.J.M.Verboven	Philips
PTL6	1421	Impedance Characteristics of Quantum-Well Lasers	S.Weisser,J.Esquivias,P.J.Tasker,J.D.Rals ton,B.Romero,J.Rosenzweig	
PTL6	1324	Fully passivated AR coated InP/InGaAs MSM photodetectors	St.Kollakowski,U.Schade,E.H.Bottcher,D .Bimberg	passivationによる内部gain抑制
PTL6	1268	50-Mb/s Diffuse Infrared FreeSpace Link Using On-Off Keying With Decision-Feedback Equalization	G.W.Marsh,J.M.Kahn	IBM
PTL6	1258	High-Frequency Photodiode Characterization Using a Filtered Intensity Noise Technique	D.M.Baney,W.V.Sorin,S.A.Newton	HP
PTL6	1207	Strained InGaAs/InAlAs MQW Electro-Absorption Modulators with Large Bandwidth and Low Driving Voltage	T.Ido,H.Sano,D.J.Mass,S.Tanaka,A.Takai	Hitachi
PTL6	1203	Full Polarization Insensitive of a 20 Gb/s Strained-MQW Electroabsorption Modulator	F.Devauz,S.Chelles,A.Ougazzaden,A.Mir cea,M.Carre,F.Huet,A.Carenco,Y.Sorel,J. F.Kerdiles,H.Henry	CNET
PTL6	1150	A Fiber Distribution System for Microcellular Radio	J.Wu,J.-S.Wu,H.-W.Tsao	Taiwan Univ.
PTL6	963	7.1 GHz bandwidth monolithically integrated InGaAs/InAlAs PIN-HBT transimpedance photoreceivers	J.Cowles,A.L.Gutierrez- Aitken,P.Bhattacharya,G.I.Haddad	Michigan Univ... transimpedanceの式
PTL6	960	A WDM Receiver Photonic Integrated Circuit With Net On-Chip Gain	J.- M.Verdiell,T.L.Koch,B.I.Miller,M.G.You ng,U.Koren,F.Storz,K.F.Brown-Goebeler	SDL
PTL6	817	A High Speed Burst Mode Optoelectronic Integrated Circuit Photoreceiver Using InP/InGaAs HBT's	L.Lunardi,S.Chandrasekhar,R.G.Awartz, R.A.Hamm,G.J.Qua	ATT
PTL6	814	InP-Based 10-GHz Bandwidth Polarization Diversity Heterodyne Photoreceiver with Electrooptical Adjustability	F.GhirardJ.Brandon,F.Huet,M.Carre,J.T homas,A.Bruno,A.Carenco	CNET
PTL6	811	High Quantum Efficiency and Narrow Absorption Bandwidth of the Wafer-Fused Resonant InGaAs Photodetectors	I.- H.Tan,J.J.Dudley,D.I.Babie,D.A.Cohen,B .D.Young,E.L.Hu,J.E.Bowers,B.I.Miller, U.Koren,M.G.Young	ATT
PTL6	754	Reduction of Four-Wave Mixing Crosstalk in WDM Systems Using Unequally Spaced Channels	F.Forghieri,R.W.Tkach,A.R.Chraplyvy,D. Marcuse	
PTL6	750	Optical Modulation Depth Improvement in SCM Lightwave Systems Using a Dissymmetrization Scheme	L.Pophillat	CNET
PTL6	722	Optimization of high-speed MSM photodetectors	J.Burm,K.I.Litvin,W.J.Schaff,L.F.Eastma n	Cornell Univ. MSM形状と帯域
PTL6	719	110-GHz,50%-efficiency mushroom-mesa waveguide p-i-n photodiode for a 1.55- μ m wavelength	K.Kato,A.Kozen,Y.Muramoto,Y.Itaya,T. Nagatsuma,M.Yaita	NTT
PTL6	639	Effects of High Space-Charge Fields on the Response of Microwave Photodetectors	K.J.Williams,R.D.Esman,M.Dagenais	
PTL6	635	Ion Implantation Enhanced Metal-Si-Metal Photodetectors	A.K.Sharma,K.A.M.Scott,S.R.J.Brueck,J. C.Zolper,D.R.Myers	
PTL6	632	Noise Performance of Separate Absorption Grading, Charge and Multiplication InP/InGaAs Avalanche Photodiodes	J.Yu,L.E.Tarof,R.Bruce,D.G.Knight,K.Vi suvanatha,T.Baird	Bell-Northern
PTL6	282	Theoretical Performance of 10 Gb/s Lightwave Systems Using a III-V Semiconductor Mach-Zehnder Modulator	J.C.Cartledge,C.Rolland,S.Lemerle,A.Sol heim	Bell-Northern
PTL6	59	Integration of Waveguides and Photodetectors in SiGe for 1.3 μ m Operation	A.Splett,T.Zinke,K.Petermann,E.Kasper, H.Kibbel,H.-J.Herzog,H.Presting	Berlin Univ.
PTL5	1316	High-Speed Monolithic p-i-n/HBT and HPT/HBT Photoreceivers Implemented with Simple Phototransistor Structure	S.Chandrasekhar,L.M.Lunardi,A.H.Gnauc k,R.A.Hamm,G.J.Qua	ATT
PTL5	1313	Application of Indium-Tin-Oxide with Improved Transmittance at 1.3 μ m for MSM Photodetectors	J.-W.Seo,C.Caneau,R.Bhat,I.Adesida	Bell Commun.

PTL5	1310	108-GHz GaInAs/InP p-i-n photodiodes with integrated bias tees and matched resistors	Y-G.Wey, K.S. Giboney, J.E. Bowers, M.J. W. R. Odwell, P. Silvestre, P. Thiagarajan, G. Y. Robinson	California Univ.	広帯域matching抵抗付きPIN
PTL5	1288	20 Gbit/s Operation of a High-Efficiency InGaAsP/InGaAsP MQW Electroabsorption Modulator With 1.2-V Drive Voltage	F. Devaux, F. Dorgeuille, A. Ouguzaden, F. Huet, M. Carre, A. Carreno, M. Henri, Y. Sorel, J.-F. Kerdiles, E. Jeanny	CNET	
PTL5	1210	Epitaxial Lift-Off GaAs/AlGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors with Back Passivation	M.C. Hargis, R.E. Camahan, J.S. Brown, N. M. Jokerst		表面単位による内部gain
PTL5	1008	A Novel Photodetector Frequency Response Measurement Technique Using an Electrooptic Modulator	K. Benterud, J. Conradi	Bell-Northern	
PTL5	913	High-Performance Monolithic PIN-MODFET Transimpedance Photoreceiver	A.L. Gutierrez-Aiken, P. Bhattacharya, Y.C. Chen, D. Pavlidis, T. Brock	Michigan Univ.	
PTL5	910	high-performance Large-Area InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors	F. Hieronymi, E.H. Botcher, E. Droge, D. Kuhl, D. Binberg	Berlin Univ.	表面にbarrier低下を引き起こす薄層
PTL5	794	Grating Demultiplexer Integrated with MSM Detector Array in InGaAs/AlGaAs/GaAs for WDM	M. Fallahi, K.A. McGreer, A. Delage, I.M. Templeton, F. Chatenoud, R. Barber		
PTL5	779	Increased Linear Dynamic Range by Low Biasing the Mach-Zehnder Modulator	M.L. Farwell, W.S.C. Chang, D.R. Huber	Hughes	
PTL5	682	A Monolithically Integrated Frequency Mixing Photoreceiver	Y.K. Chung, S.R. Forrest		
PTL5	679	MMIC tuned front-end for a coherent optical receiver	A.K. Petersen, A.M. Jagd, F. Ebskamp	Denmark Univ.	L peaking
PTL5	675	High-Speed and Low-Dark-Current Flip-Chip InAlAs/InAlGaAs Quaternary Well Superlattice APDs with 120 GHz Gain-Bandwidth Product	I. Watanabe, S. Sugou, H. Ishikawa, T. Anan, K. Makita, M. Tsuji, K. Taguchi	NEC	
PTL5	574	Millimeter Wave, Multigigahertz Optical Modulation by Feedforward Phase Noise Compensation of a Beat Note Generated by Photomixing of Two Laser Diode	O. Solgaard, J. Park, J.B. Georges, P.K. Pepeljugoski, K.Y. Lau		
PTL5	514	High-Efficiency Waveguide-Coupled $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ InGaAs/GaAs MSM Detector Exhibiting Large Extinction Ratios at L and X Band	W. Ng, A. Narayanan, R.R. Hayes, D. Persechini, D. Yap	Hughes	
PTL5	511	Ultrafast Long-Wavelength Photodetectors Fabricated on Low-Temperature InGaAs on GaAs	L.F. Lester, K.C. Hwang, P. Ho, J. Mazurowski, J.M. Ballingall, J. Sulliff, S. Gupta, J. Whitaker, S.L. Williamson	GE	
PTL5	163	A 10 Gb/s High Sensitivity, Monolithically Integrated p-i-n-HEMT Optical Receiver	Y. Akatsu, Y. Miyagawa, Y. Miyamoto, Y. Kobayashi, Y. Akahori	NTT	
PTL5	161	Ultralow Noise 10 Gb/s p-i-n-HEMT Optical Receiver	M.S. Park, R.A. Minasian	Sydney Univ.	ampの入力をnoise matching
PTL5	70	Nonlinearity of p-i-n Photodetectors	R.R. Hayes, D.L. Persechini	Hughes	
PTL2	923	20 GHz optical analog link using an external modulator	G.E. Betts, C.H. Cox III, K.G. Ray	MIT	
PTL1	404	High-performance optical analog link using external modulator	G.E. Betts, L.M. Johnson, C.H. Cox III, S.D. Lowney		

Title	page	Title	Authors	memo	equations
QE31	1504	High-Frequency, High-Efficiency MSM Photodetectors	J. Burm, I. Litvin, D.W. Woodard, W.J. Schaff, P. Mandeville, M.A. Jaspán, M.M. Gitlin, L.F. Eastman	Cornell Univ.	
QE31	1484	Millimeter-Wave Asymmetric Fabry-Perot Modulators	C.C. Barron, C.J. Mahon, B.J. Thibault, G. Wang, W. Jiang, L.A. Coldren, J.E. Bowers	ATT	
QE31	1418	Equivalent Circuit Model of Quantum-Well Lasers	M.F. Lu, J.S. Deng, C. Juang, M.J. Jou, B.J. Lee		
QE31	944	Theoretical Study of the Response of InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors	A.F. Salem, K.F. Brennan		
QE31	278	Analysis of Ultrafast Photocurrent Transport in AlInAs-GaInAs Heterojunction Bipolar Transistors	M.Y. Frankel, T.F. Carruthers, C.S. Kyono	Motorola	
QE30	2889	High-Speed InP-InGaAs Heterojunction Phototransistors Employing a Nonalloyed Electrode Metal as a Reflector	H. Fukano, Y. Takanashi, M. Fujimoto	NTT	
QE29	1387	A Wide-Bandwidth Low-Noise InGaAsP-InAlAs Superlattice Avalanche Photodiode with a Flip-Chip Structure for Wavelengths of 1.3 and 1.55 μm	T. Kagawa, Y. Kawamura, H. Iwamura	NTT	
QE28	2728	A High-Efficiency 50 GHz InGaAs Multimode Waveguide Photodetector	K. Kato, S. Hata, K. Kawano, J. Yoshida, A. Kozen	NTT	Dr.Katoの50GHzPIN-PD
QE28	2358	Nanoscale Tera-Hertz Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors	S.Y. Chou, M/Y/Liu	IBM	25nm finger, 100 GHz
QE28	2343	Ultrafast semiinsulating Inp:Fe-InGaAs:Fe-InP:Fe MSM photodetectors: Modeling and performance	E.H. Botcher, D. Kuhl, F. Hieronymi, E. Droge, T. Wolf, D. Binberg		MSM model, 2倍の内部gain

QE27	773	A Monolithic Long Wavelength Photoreceiver Using Heterojunction Bipolar Transistor	S.Chabdrasekhar,B.C.Johnson,E.Tokumitsu,A.G.Dentai,C.H.Joyner,A.H.Gnauck,J.S.Perino,G.J.Qua	ATT		
QE27	769	Monolithically Integrated MSM-Transimpedance Amplifier Grown by MBE for 1.0-1.6 μm Operation	H.S.Fuji,S.Ray,T.J.Williams,H.T.Grien,J.P.Harrung,R.R.Daniels,M.J.LaGasse,D.L.West	Boeing West		
QE27	737	InGaAs metal-semiconductor-metal photodetectors for long wavelength optical communications	J.B.D.Sooles,H.Schumacher	Bellcore	MSMの構造と容量、帯域、3倍のgain	豊富なdata
QE27	654	High-Speed III-V Semiconductor Intensity Modulator	R.G.Walker	GEC-Marconi		
QE27	641	Semiconductor Photonic Integrated Circuits	T.L.Koch,U.Koren	ATT		
QE27	626	Low-Loss III-V Semiconductor Optical Waveguides	R.J.Deri,E.Kapon	Bellcore		
QE24	198	Picosecond Optical Sampling of GaAs Integrated Circuits	K.J.Weingarten,M.J.W.Rodwell,D.M.Bloom	IBM		
QE22	1073	Low dark current GaAs MSM photodiodes using WSix contacts	M.Ito, O.Wada	Fujitsu	内部gainの3つの要因,MSM容量	$C=e0(1+er)\pi/2/\ln(2\text{sqrt}((1+k)/(1-k)))(N-1)L_k-tan2(\pi/4G/(E+G))$
QE22	902	LiNbO3 Travelling-Wave Light Modulator/Switch with an Etched Groove	H.Haga,M.Izutsu,T.Sueta	Osaka Univ.		
QE22	805	Recent Progress in Optoelectronic Integrated Circuits	O.Wada,T.Sakurai,T.Nakagami	Fujitsu		
QE22	79	Electrooptic sampling in GaAs integrated circuits	B.H.Kolner,D.M.Bloom	HP,Stanford Univ.		
QE20	723	Broad-Band Guided-Wave Electrooptic Modulators	R.A.Becker			
QE18	718	Characteristics of Gbit/s Optical Receiver Sensitivity and Long-Span Single-Mode Fiber Transmission at 1.3 μm	J.Yamada,T.Kimura	NTT		
QE18	582	Direct Frequency Modulation in AlGaAs Semiconductor Lasers	S.Kobayashi,Y.Yamamoto,M.Ito,T.Kimura	NTT		
QE17	974	Optical Multi/Demultiplexers for Single-Mode Fiber Transmission	R.Watanabe,Y.Fujii,K.Nosu,J.Minowa			
QE16	754	Traveling Wave Optical Modulator Using a Directional Coupler LiNbO3 Waveguide	K.Kubota,J.Noda,O.Mikami			

Device

Title	page	Title
E76B	1078	
E76C	183	High-Speed TeLiNbO3 and Semiconductor optical Modulators
E76C	214	Design of Ultrawide-Band, High-Sensitivity p-i-n Photodetectors
E76C	251	Fiber Optic Microwave Subcarrier Transmission Links Using Laser Diodes as Receiving Mixer
E76C	257	Comparison of Traveling Wave External Modulator
E76C	264	Fiber Optic Microwave Links Using Balanced/Image Canceling Photodiode Mixing

Authors	memo	equations
K.Kawano		
K.Kato,S.Hata,K.Kawano,A.Kozen	NTT	
H.Ogawa,H.Kamitsuna,D.Plifko	NTT	50GHz PIN PD $1/f3dB^2=1/ft^2+1/fRC^2$
D.Plifko,H.Ogawa	ATR	
H.Kamitsuna,H.Ogawa	ATR	

Title	page	Title
EDL16	253	Optical Heterodyne Detection and Microwave Rectification Up to 26 GHz Using Quantum Well Infrared Photodetectors
EDL16	175	A Novel High-Speed Silicon MSM Photodetector Operating at 830 nm Wavelength
EDL16	106	High-Speed Metal-Semiconductor-Metal Photodiodes with Er-doped GaAs
EDL14	335	High-Speed AlGaAs/GaAs Multi-Quantum-Well Phototransistors with Tunable Spectral Response
EDL13	350	DC and Microwave Performance of a 0.1-μm Gate InAs/InAlAs MODFET
EDL13	143	650-A Self-Aligned-Gate Pseudomorphic AlInAs/GaInAs High Electron Mobility Transistors
EDL12	527	1.3-μm P-I-N Photodetector Using GaAs with As Precipitates (GaAs:As)
EDL12	483	0.33-μm Gate-Length Millimeter-Wave InP-channel HEMT's with High ft and fmax
EDL12	244	60-GHz Noise Performance of Ion-Implanted InGaAs MESFET's
EDL12	23	60-GHz Pseudomorphic AlGaAs/InGaAs Low-Noise HEMT's
EDL11	585	94-GHz 0.1-μm T-Gate Low-Noise Pseudomorphic InGaAs HEMT's
EDL11	496	60-GHz Power Performance of Ion-Implanted InGaAs/GaAs MESFET's
EDL11	334	Lateral High-Speed Metal-Semiconductor-Metal Photodiodes on High-Resistivity InGaAs
EDL10	461	Epitaxial n+ Layer GaAs Mesa-Finger Interdigital Surface Photodetectors
EDL10	449	Millimeter-Wave Ion-Implanted Graded InGaAs MESFET's Grown by MOCVD
EDL10	417	High-Speed GaInAs MISIM Photodetectors with Dielectric-Assisted Schottky Barriers
EDL10	386	Quarter-Micrometer Gate Ion-Implanted GaAs MESFET's with an ft of 126 GHz
EDL10	336	A Superlattice GaAs/InGaAs-on GaAs Photodetector for 1.3-μm Applications
EDL10	267	Subpicosecond InP-InGaAs Heterostructure Bipolar Transistors
EDL10	206	Ultrahigh-Frequency Performance of Submicrometer-Gate Ion-Implanted GaAs MESFET's
EDL10	165	60-GHz Pseudomorphic-MODFET Low-Noise MMIC Amplifier
EDL10	95	High-Performance Millimeter-Wave Ion-Implanted GaAs MESFET's
EDL10	20	Fabrication of p-i-n Photodetectors on LPE-Grown Substrates
EDL 9	647	Microwave Performance of AlInAs-GaInAs HEMT's with 0.2- and 0.1μm Gate Length
EDL 9	607	An Investigation of the Optoelectronic Response of GaAs/InGaAs MSM Photodetectors
EDL 9	527	105-GHz Bandwidth Metal-Semiconductor-Metal Photodiode
EDL 9	521	Ultra-Low-Noise Characteristics of Millimeter-Wave High Electron Mobility Transistors
EDL 9	515	High-Speed 1.3-μm GaInAs Detectors Fabricated on GaAs Substrates
EDL 9	447	Monolithic Integration of InGaAs p-i-n Photodetector with Fully Ion-Implanted InP JFET Amplifier
EDL 9	269	Optimization of the Optical Sensitivity of p-i-n FET Receivers
EDL 9	226	Top-Illuminated InGaAs/InP p-i-n Photodiodes with a 3-dB Bandwidth in Excess of 26 GHz
EDL 9	203	Millimeter-Wave GaAs Power FET with a Pulse-Doped InGaAs Channel
EDL 9	171	5.2-GHz Bandwidth Monolithic GaAs Optoelectronic Receiver
EDL 5	531	Monolithic Integration of a Metal-Semiconductor-Metal Photodiode and a GaAs Preamplifier
EDL2	112	Frequency and Pulse Response of a Novel High Speed Interdigital Surface Photodetector (IDPC)

Authors	memo	equations
M.C.Liu,G.E.Jenkins,E.R.Brown,K.A.Mcintosh,K.B.Nichols,M.J.Manfra		
H.C.Lee,B.V.Zeghbrock	Colorado Univ.	
S.Sethi,T.Brock,P.K.Bhattacharya,J.Kim,S.Williamson,D.Craig,J.Nees	Michigan Univ.	
W.Q.Li,M.Karakucuk,P.N.Freeman,J.R.East,G.I.Haddad,P.K.Bhattacharya	Michigan Univ.	
D.Yang,Y.C.Chen,T.Brock,P.K.Bhattacharya	Michigan Univ.	
L.D.Nguyen,A.S.Brawn,M.A.Thompson,L.M.Jelloian,L.E.Larson,M.Matloubian	Hughes	
A.C.Warren,J.H.Burroughes,J.M.Woodall,D.T.MacTurff,R.T.Hodgson,M.R.Mellich	IBM	
L.Aina,M.Burgess,M.Maattingly,J.M.O'Connor,A.Meerschaert,M.Tong,A.Ketterson,J.Adesida	Allied-Signal Aerospace	
C.L.Lau,M.Feng,J.Schellenberg,P.Brussenback,T.Lepkowski,T.Hwang,C.Ito	Ford	
K.L.Tan,R.M.Dia,D.C.Streit,L.K.Shaw,A.C.Han,M.D.Sholley,P.H.Luu,T.Q.Trinh,T.Lin,H.C.Y.en	TRW	
K.L.Tan,R.M.Dia,D.C.Streit,L.Lin,T.Q.Trinh,A.C.Han,P.H.Liu,P.D.Chow,H.C.Yen	TRW	
M.Feng,C.L.Lau,T.R.Lepkowski,P.Brussenback,J.M.Schellenberg	Ford	
C.J.Wei,D.Kuhl,E.H.Boetcher,D.Bimberg,E.Kuphal	Berlin Univ.	内部gain、slow break down、50fF以下
R.B.Darling,B.Nabet,J.E.Samaras,S.Ray,E.Carter	Washington Univ.	
G.W.Wang,M.Feng,R.Kaliski,Y.P.Liaw,C.Lau,C.Ito	Ford	
W.K.Chan,G.Chang,R.Bhat,N.E.Schlotter,C.K.Nguyen	Bellcore	2.2倍の内部gain、55fF
G.W.Wang,M.Feng	Ford	
M.Zingibl,J.C.Bischoff,D.Theron,M.Hlegems		
Y.Chan,R.N.Nottenburg,M.B.Panish,R.A.Hamm,D.A.Humphrey	ATT	
G.W.Wang,M.Feng,C.L.Lau,C.Ito,T.R.Lepkowski	Ford	
G.M.Metxe,A.Cornfeld,E.Carlson,G.Dahrooge,E.Chang,J.Singer,J.Bass,H.Hung,T.Lee	COMSAT	
G.W.Wang,M.Feng,C.L.Lau,C.Ito,T.Lepkowski	Ford	
T.Sukegawa,M.Kimura,A.Tanaka	Shizuoka Univ.	
U.K.Mishra,A.S.Brown,S.E.Rosenbaum,C.E.Hooper,M.W.Pierce,M.J.Delancy,S.Vaughn,K.White	Hughes	
H.Schumacher,H.P.Leblanc,J.Soolo,R.Bhat	Bellcore	3倍の内部gain
B.J.V.Seghbrock,W.Patrick,J.-M.Halbout,P.Vettiger	IBM	105GHzBW、12fF、
K.G.Duh,S.J.Liu,L.F.Lester,P.C.Chao,P.M.Smith,M.B.Das,B.R.Lee,J.Bullingall	GE	
D.L.Rogers,J.M.Woodall,G.D.Pettit,D.Meinturf	IBM	soft break down、内部gain
S.J.Kim,G.Guth,G.P.Vella-Coleiro,C.W.Seabury,W.A.Sponsler,B.J.Rhoades	ATT	
G.P.Vella-Coleiro	ATT	受光感度解析
D.Wake,L.C.Blank,R.H.Walling,I.D.Henning	BT	
B.Kim,H.Shih,M.Wurtele,H.Q.Tsering	TI	
C.S.Harder,B.V.Zeghbrock,H.Meier,W.Patrick,P.Vettiger	IBM	
M.Ito,O.Wada,K.Nakai,T.Sakurai	Fujitsu	3.3倍の内部gain
C.W.Slayman,L.Figueroa	Hughes	avalanche gain

Title	page	Title
ED42	828	High Optical Power Nonlinear Dynamic Response of AlInAs/GaInAs MSM Photodiode
ED42	231	Cutoff Frequency and Responsivity Limitation of AlInAs/GaInAs MSM PD Using a Two Dimensional Bipolar Physical Model
ED42	31	Optical Control and Injection Locking of Monolithically Integrated InGaAs/InAlAs MODFET Oscillators

Authors	memo	equations
I.S.Ashour,J.Harari,J.-P.Vilcot,D.Decoster		
I.S.Ashour,H.E.Kadi,K.Sherif,J.-P.Vilcot,D.Decoster		
D.Yang,P.Battacharya,R.Lai,T.Brock,A.Paoletta	Michigan Univ.	

Device

ED41	162	Design and Performance Analysis of InP-Based high-Speed and High-Sensitivity Optoelectronic Integrated Receivers	E.John,M.B.Das	Pennsylvania Univ.
ED40	2204	Analysis of the Transistor-Related Noise in Integrated p-i-n-HBT Optical Receiver Front-End	Q.Z.Liu,D.L.Pulfrey,M.K.Jackson	
ED40	1406	A MODFET-Based Optoelectronic Integrated Circuit Receiver for Optical Interconnects	A.A.Ketterson,J.-W. Seo,M.H.Tong,K.L.Nummila,J.J.Morikuni,K.-Y.Cheng,S.-M.Kang,I.Adesida	Illinois Univ. NFBamp の G $G_{\text{eff}} = R_{\text{fb}} / (1 + 1/A)$
ED40	1087	Studies of High-Speed Metal-Semiconductor-Metal Photodetector with a GaAs/AlGaAs/GaAs Heterostructure	J.Lu,R.SurrIDGE,G.Pakulski,H.vanDriel,J.M.Xu	Toronto Univ. HMSM, bias vs. Cap
ED39	2254	An Ultra-High-Speed Optoelectronic Integrated Receiver for Fiber/Optic Communications	H.Yano,G.Sasaki,M.Murata,H.Hayashi	Sunimoto Elec. G _{測定結果} , PIN(50TF)
ED39	1355	Theoretical Analysis of the Influences of Barrier-Enhancement Layers on Transient Responses of MSM Photodetectors	E.Sano	NTT
ED39	1282	Noise Characterization of an InGaAs Interdigitated Metal-Semiconductor-Metal Photodetector (MSM-PD)	J.S.Parker,G.Bosman	Florida Univ.
ED39	1028	High-Performance Undoped InP/n-InGaAs MSM Photodetectors Grown by LP-MOVPE	C.-X.Shi,D.Grutzmacher,M.Stollenwerk,Q.-K.Wang,K.Heime	Shanghai Jiao Tong Univ.
ED39	553	Time and Frequency Response of Avalanche Photodiodes with Arbitrary Structure	G.Kahraman,B.E.A.Saleh,W.L.Sargeant,M.C.Teich	Wisconsin Univ.
ED38	1879			
ED38	1874			
ED38	1721			
ED38	1324	Monolithically Integrated InP-Based Front-End Photoreceivers	Y.Zebda,L.Lai,P.Bhattacharya,D.Pavlidis,P.R.Berger,T.L.Brock	Michigan Univ.
ED38	1133			
ED38	1130			
ED37	2292	Narrow-Gate InGaAs Junction Field-Effect Transistors as Tunable Resistors for Long-Wavelength Integrated Optical Receivers	D.C.W.Lo,J.J.Brown,J.T.Gardner,Y.K.Chung,C.-D. Lee,S.R.Forrest	Suthem California Univ.
ED37	2285	Transit-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodetectors	J.B.D.Sooile,H.Schumacher	Bellcore
ED37	1964	A Device Model for Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors and its Applications to Optoelectronic Integrated Circuit Simulation	E.Sano	NTT
ED36	2236	Millimeter-Wave Power Operation of an AlGaAs/InGaAs/GaAs Quantum Well MISFET	B.Kim,R.J.Maty,M.Wurtel,K.Bradshaw,M.A.Khatibzadeh,H.Q.Tserng	
ED36	659	High-Performance AlGaAs/InGaAs MSM Photodetectors Grown by OMCVD	W.-P.Hong,G.-K.Chang,R.Bhat	Bell Commun.
ED35	1439	Monolithically Integrated Receiver Front End; InGaAs p-i-n Amplifier	C.-L.Cheng,R.P.H.Chang,B.Tell,S.M.Z.Parker,Y.Ota,G.P.Vella-Coleiro,R.C.Miller,J.L.Zilko,B.L.Kasper,K.F.Brown-Goebler,V.D.Mattera Jr.	ATT
ED35	1284			
ED35	604	High-Frequency Performance Limitations of Millimeter-Wave Heterojunction Bipolar Transistors	M.B.Das	Pennsylvania Univ.
ED31	1766	GaAs Optoelectronic Mixer Operation at 4.5 GHz	D.K.W.Lam,R.I.MacDonald	
ED29	266	An Analysis of the Performance of Heterojunction Phototransistors for Fiber Optic Communications	R.A.Milano,P.D.Dapkus,G.E.Stillman	Illinois Univ.
ED15	173	Properties of Alternately Charged Coplanar Parallel Strips by Conformal Mappings	Y.C.Lim,R.A.Moore	
Title	page	Title	Authors	memo equations
EL31	975	High power modulator integrated DFB laser incorporating strain-compensated MQW and graded SCH modulator for 10 Gbit/s transmission	K.Morito,K.Sato,Y.Kotaki,H.Soda,T.Sahara	Fujitsu
EL31	970	38 GHz optical harmonic mixer for millimetre-wave radiowave systems	D.Mathoorasing,C.Lazmierski,J.F.Cadiou,E.Penard,P.Legaud,J.Guena	CNET
EL31	921	Low noise fibre optic receiver operating from 2 to 20 GHz	J.Hankey,G.M.Foster,S.J.Boreley,R.H.Wallis,S.J.Holmes	GEC-Marconi
EL31	915	GaAs/AlGaAs electro-optic modulator with bandwidth > 40 GHz	R.Spickerman,N.Dagli,M.G.Peters	California Univ.
EL31	755	15 GHz monolithic MODFET-MSM integrated photoreceiver operating at 1.55 μm wavelength	P.Fay,W.Wohlmut,I.Adesida,C.Caneau	Illinois Univ.
EL31	733	Ultrafast millimetre-wave signal generation using hybrid modelocking of a monolithic DBR laser	D.Y.Kim,M.Peluse,Z.Ahmed,D.Novak,H.-F.Liu,Y.Ogawa	Melbourne Univ.
EL31	589	Novel HEMT layout: The RoundHEMT	M.Marso,K.Schimpf,A.Fox,A.van der Hart,H.Hardtgegen,N.Hollfelder,P.Kordos,H.Luth	
EL31	548	Dynamic range performance of a high speed high saturation InGaAs/InP pin waveguide photodetector	A.R.Williams,A.L.Kellner,P.K.L.Yu	California Univ.
EL31	397	Comparison of photodiode frequency response measurements to 40 GHz between NPL and NIST	A.D.Gifford,D.A.Hampshyre,P.D.Hale	
EL31	364	Compact optical millimetre-wave source using a dual-mode semiconductor laser	C.R.Lima,P.A.Davies,D.Wake	BT
EL31	318	Direct determination of source, drain and channel resistances of HEMTs	Y.Zhu,Y.Ishimaru,M.Shimizu	Sharp
EL31	315	High extinction ratio GaAs/AlGaAs electroabsorption modulators integrated with passive waveguides using impurity-free vacancy diffusion	P.Cusumano,T.Krauss,J.H.Marsh	
EL31	289	Semiconductor lasers as integrated optoelectronic up/down-converters	E.L.Portnoi,V.B.Gor'inkel,D.A.Barrow,I.G.Thayne,E.A.Avrutin,J.H.Marsh	
EL31	274	AlGaInAs/InP 1.5 μm MQW DFB laser diodes exceeding 20 GHz bandwidth	F.Steinigen,H.L.Hartnagel,H.Hillmer,R.Losch,W.Schlapp,H.Walter,R.Gobel,E.Kuphal,H.Burkhard	
EL31	67	1.3 μm monolithic integrated optoelectronic receiver using an InGaAs MSM photodiode and AlGaAs/GaAs HEMTs grown on GaAs	V.Hurm,W.Benz,M.Bertho,T.Fink,M.Haupt,P.Hofmann,T.Jakobus,K.Kohler,M.Ludwig,B.Raynor,J.Rosenzweig	Fraunhofer Inst.
EL31	51	2.4 Gbit/s repeaterless transmission over 306 km non-dispersion-shifted fibre using directly modulated DFB-LD and dispersion-compensating fibre	M.Kakui,T.Kato,T.Kashiwada,L.Nakazato,C.fukuda,M.Onishi,M.Nishimura	Sunimoto Electric Indust.
EL31	49	10 Gbit/s four-channel wavelength- and polarisation-division multiplexing transmission over 240 km with 0.5 nm channel spacing	K.Sekine,S.Sasaki,N.Kikuchi	Hitachi
EL31	23	Absolute voltage measurements on III-V integrated circuits by internal electro-optic sampling	L.Duvillaret,J.-M.Lourtioz,L.Chusseau	
EL30	2070	Noise and small signal performance of three different monolithic InP-based 10 Gbit/s photoreceiver OEICs	D.Kaiser,F.Besca,H.Großkopf,I.Gyuro,J.-H.Reemtsma,W.Kuebart	

Device

EL30	2066	Controlling the chirp in electroabsorption modulators under digital modulation	J.A.J Fells,I.H.White,M.A.Gibson,R.V.Penty,G.H.B.Thompson,A.P.Wright,R.A.Saunders,C.J.Armi stead	BNR	
EL30	2064	23 GHz bandwidth monolithic photoreceiver compatible with InP/InGaAs double-heterojunction bipolar transistor fabrication process	E.Sano,M.Yoneyama,S.Yamahata,Y.Matsuoka	NTT	
EL30	1796	Resonant-cavity-enhanced pin photodetector with 17 GHz bandwidth-efficiency product	C.C.Barron,C.J.Mahon,B.J.Thibault,G.Wang,W.Jiang,L.A.Coldren,J.E.Bowers	California Univ.	
EL30	1795	InGaAs/InAlAs multiquantum well electroabsorption phase modulator module	S.Yachida,Y.Tada,I.Kotaka,K.Wakita	NTT	
EL30	1711	InGaAs/InAlAs multiquantum-well waveguided pin photodiodes with wide tunability and avalanche multiplication	K.Wakita,I.Kotaka,A.Kozen	NTT	
EL30	1622	15 Gbit/s optical receiver using waveguide pin photodiode	Y.Miyamoto,K.Hugimoto,K.Kato	NTT	
EL30	1347	Experimental optimization of MQW electroabsorption modulators with up to 40 GHz bandwidths	F.Devaux,P.Vorles,A.Ougazzaden,M.Carre,F.Huet	CNET	
EL30	1247	Large-area low-capacitance InP/InGaAs MSM photodetectors for high-speed operation under front and rear illumination	F.Hieranumi,E.H.Botcher,E.Droge,D.Kuhl,St.Kollakowski,D.Bimberg		
EL30	355	Low dark current and high linearity InGaAs MSM photodetectors	J.-I.chyi,E.-S.Wei,J.-W.Hong,W.Lin,Y.-K.Tu	NTT	
EL30	267	11 GHz ultrawide-bandwidth monolithic photoreceiver using InGaAs pin PD and InAlAs/InGaAs HEMTs	Y.Akahori,M.Ikeda,A.Kohzen,Y.Akatsu	NTT	
EL30	83	InGaAs pin photodiodes grown by liquid-phase epitaxy using erbium gettering	W.-J.Ho,M.-C.Wu,Y.M.Lin		
EL30	59	Distribution of 60 GHz signals to more than 1000 base stations	H.Schmuck,R.Heidenmann,R.Hofstter	Alcatel	
EL29	2217	Optically-biased,edge-coupled InP/InGaAs heterojunction phototransistors	D.Wake,D.J.Nelson,M.J.Harlow,I.D.Henning	BT	
EL29	2205	Substrate integrated transition between a planar millimetre wave antenna and hermetically sealed integrated circuits	U.Meier,H.Muller		
EL29	1879	Zero-bias edge-coupled InGaAs photodiodes in millimetre-wave radio-fibre systems	D.Wake,N.G.Walker,I.C.smith	BT	
EL29	1874	High-sensitivity 10 Gbit/s optical receiver with superlattice APD	H.Ishikawa,J.Watanabe,T.Suzaki,M.Tsuji,S.Sugou,K.Makita,K.Taguchi	NEC	
EL29	1721	Less than 3 pA/Hz over 1-800 MHz noise current spectral density optical receiver for SCM-CATV systems	L.Pophillat,R.David	CNET	
EL29	1133	Monolithic GaAs/AlGaAs on MESFET photoreceiver using a single molecular beam epitaxy growth step	D.Nichols,N.K.Sutta,P.R.Smith,D.Silvco,A.Y.Cho	ATT	monolithic PIN&MESFET
EL29	1130	Lifetime limited ultrafast response of metal-semiconductor-metal photodetectors on InGaAs/GaAs-ON-GaAs superlattice	J.Hugi,C.Dupuy,R.Sachot,M.Ilegems		
EL29	234	Low noise near infra-red detection system using InGaAs pin photodiode	I.Mizumoto,S.Mashiko	Tohoku Univ.	
EL29	187	New simple method for simulating optical front end receivers	M.Hogdal		transimpedance測定, noise計
EL29	179	New compensation method for tuned optical receivers with feedback	E.Drijver		
EL29	147	Noise performance of a GaAs MESFET as an optical detector and as an optoelectronic mixer in analogue optical links	Z.Urey,D.Wu,N.J.Gomes,P.A.Davies		
EL29	9	14 GHz bandwidth MSM photodiode AlGaAs/GaAs HEMT monolithic integrated optoelectronic receiver	V.Hurm,M.Ludwig,J.Rosenzweig,W.Benz,M.Bertho,R.Bosch,W.Bronner,A.Hulsmann,K.Kohler,B.Raynor,J.Schneider	Fraunhofer Inst.	transimpedanceとnoiseの結果
EL28	1759	Proposal for Ti:LiNbO3 optical modulator with modulation bandwidth of more than 150 GHz	K.Noguchi,K.Kawano	NTT	
EL28	1197	50 GHz velocity-matched broad wavelength LiNbO3 modulator with multimode active section	D.W>Dolli,T>R>Ranganath	HP	
EL28	1167	Noise characterization of Si/SiGe heterojunction bipolar transistors at microwave frequencies	H.Schmacher,U.Erben,A.Gruhle	Ulm Univ.,Daimler Benz	
EL28	826	40 GHz, low half-wave voltage Ti:LiNbO3 intensity modulator	G.K.Gopalakrishnan,C.H.Bulmer,W.K.Burns,R.W.McElhanon,A.S.Greenblatt		
EL28	120	High performance 10 Gbit/s pin-FET optical receiver	E.M.Kinber,B.L.Patel,I.Hardcastle,A.Hadjifiofiou	BNR	transimpedanceとnoiseの結果
EL27	2162	High-speed and low-driving-voltage InGaAs/InAlAs multiquantum well optical modulators	I.Kotaka,K.Wakita,K.Kawano,M.Asai,M.Nagamura	NTT	
EL27	1073	50 GHz InGaAs edge-coupled pin photodetector	D.Wake,T.P.Spooner,S.D.Perrin,I.D.Henning	BT	
EL27	734	8.2 GHz bandwidth monolithic integrated optoelectronic receiver using MSM photodiode and 0.5 μm recessed-gate AlGaAs/GaAs HEMTs	V.Hurm,J.Rosenzweig,M.Ludwig,W.Benz,M.Bertho,A.Huelsmann,G.Kaufel,K.Koehler,B.Rau nor,J.Schneider	Fraunhofer Inst.	
EL27	70	Integrated optical mixer for RF applications	D.Uttanchandani,H.S.Ai-Raveshidy	Strathclyde Univ.	
EL26	2054	Fiber/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network	A.J.Cooper	BT	
EL26	1166	Monolithic integration of 1.5 μm optical preamplifier and pin photodetector with a gain of 20 dB and a bandwidth of 35 GHz	D.Wake,S.N.Judge,T.P.Spooner,M.J.Harlow,W.J.Duncan,I.D.Henning,M.J.O'Mahony	BT	
EL26	612	Noise behavior of InAlAs/GaInAs MSM photodetectors	H.Schmacher,J.B.D.Soule,H.P.Lebanc,R.Bhat,M.A.Koza	Bellcore	
EL26	35	10 GHz bandwidth low-noise optical receiver using discrete commercial devices	M.A.R.Violas,D.J.T.Heatley,A.M.O.Duarte,D.M.Beddown		impedance整合, noise電流
EL25	1549	Low-voltage, 50 Ω, GaAs/AlGaAs travelling-wave modulator with bandwidth exceeding 25 GHz	R.G.Walker,I.Bennion,A.C.Carter	Plessey	
EL25	1382	New travelling-wave electrode Mach-Zehnder optical modulator with 20 GHz bandwidth and 4.7 V driving voltage at 1.52 μm wavelength	K.Kawano,T.Kitoh,H.Jumonji,T.Nozaawa,M.Yanagibashi	NTT	
EL25	67	Interpretation of signal/noise ratio expressions in FM video transmission	F.C.V.Mendis	BT	
EL24	1574	Noise characteristics of GaAs metal-semiconductor-metal photodiodes	O.Wada,P.R.Haycocks,T.Hori		内部gain, noiseは低biasではす
EL24	528	40 GHz electro-optic modulator with 7.5 V drive voltage	D.W.Dolli,M.Nazarathy,R.L.Jungerman	HP	40GHz 7.5V LNEOM, AM法によ
EL23	1196	60-channel FM video subcarrier multiplexed optical communication system	R.Olshansky,V.A.Lanzisera	GTE	
EL23	787	Improved design of tuned optical receivers	G.Jacobsen,J.X.Kan,I.Garrett	Denmark Univ,BT	
EL23	785	Transformer-Tuned Front-ends for Heterodyne Optical Receivers	J.X.Kan,I.Garrett,G.Jacobsen	Denmark Univ,BT	
EL23	527	110 GHz high-efficiency photodiodes fabricated from indium tin oxide/GaAs	D.G.Parker,P.G.Say,A.M.Hansom,W.Sibbett	GEC-Marconi	
EL23	434	Noise Performance of Gbit/s Tuned Optical Receivers	J.X.Kan,G.Jacobsen,E.Bodiker	Denmark Univ,BT	
EL23	281	Low-noise 8 GHz pin/FET optical receiver	J.L.Gimlett	Bell Commun.	Inductive peaking
EL22	1119	Optical transmission using PSK-modulated subcarriers at frequencies to 16 GHz	J.E.Bowers	ATT	

EL22	917	Coaxially mounted 67 GHz bandwidth InGaAs PIN photodiode	R.S.Tucker,A.J.Taylor,C.A.Burros,G.Eisenstein,J.M.Wiesenfeld	ATT
EL22	633	Millimetre-waveguide-mounted InGaAs photodetectors	J.E.Bowers,C.A.Burros,F.Mitschke	ATT
EL22	164	400 Mbit/s optical FSK transmission experiment over 270 km of single-mode fibre	K.Iwashita, T.Imai,T.Matsumoto,G.Motosugi	NTT
EL21	812	InGaAs PIN photodetectors with modulation response to millimetre wavelengths	J.E>Bowers,C.A.Burros	ATT
EL21	665			
EL21	262	Improved Very-high-speed packaged InGaAs pin punch-through photodiode	C.A.Burros,J.E.Bowers,R.S.Tucker	ATT
EL20	314	Monolithically integrated InGaAs-pin/InP-MISFET photoreceiver	K.Kasahara,J.Hayashi,K.Makita,K.Taguchi,A.Suzuki,H.Nomura,S.Matsumoto	NEC
EL19	848	Optical injection locking of X-band FET oscillator using coherent mixing of GaAlAs lasers	L.Golberf,C.Rausher,J.F.Weller,H.F.Taylor	
EL19	554	100 GHz bandwidth planar GaAs Schottky photodiode	S.Y.Wang,D.M.Bloom	HP
EL19	106	Analogue optical link for multichannel frequency-modulated television transmission	T.T.Thung,T.K.Lim,F.V.C.Mendis	Singapore Univ.
EL18	453	Experimental comparison of a germanium avalanche photodiode and InGaAs PINFET receiver for longer wavelength optical communication systems	D.R.Smith,R.C.Hooper,P.P.Smyth,D.Wake	BT
EL18	116	New method for measuring ultrawide frequency response of optical detectors	L.Piccarini,P.Spano	
EL17	688	Symmetrical Mott Barrier as a fast photodetector	C.J.Wei,H.-J.Klein,H.Beneking	
EL16	713	High sensitivity InP/InGaAs heterojunction phototransistor	J.C.Campbell,A.G.Dentai,C.A.Burros,J.F>Ferguson	ATT
EL16	353	Integrated InGaAs p-i-n F.E.T. photoreceiver	R.F.Leheny,R.E.Nahory,M.A.Pollack,A.A.Ballman,E.D.Beebe,J.C.DeWinter,T.J.Martin	Bell

Title	page	Title	Authors	memo	equations
European Gallium Arsenide Applications Symposium 1992					
		Adjustable Bandwidth GaAs Monolithic Transimpedance Amplifier with AGC for O/E Receiver up to 2.5 Gbit/s	J.M.H-Munos,J.Gonzalez,J.L.Conesa	Telefonica	transimpedance,noise
		Test set-ups for fast measurement of monolithic integrated circuits from on-wafer to system. Application to a novel GaAs monolithic transimpedance amplifier for high speed optical communication systems	P.Dorta,M.Salazar-Palma,J.A.Casao,J.L.Caceres,J.Perez	Madrid Univ.	
		MMIC technology in Europe for millimeterwave applications	H.Dambkes,L.-P.Schmidt	DaimlerBenz	
		A GaAs monolithic V-band receiver for space communications	D.Payne,R.Hicks,R.Lampert,E.Stewart,B.VanLeeuwen,L.Raffaelli		
		InP-based devices and circuits for high performance microwave/millimeter wave applications	P.T.Greiling	Hughes	
		Perspectives of multi-heterojunction HFET's for power amplification in millimeter wave range	Y.Crosnier,D.Theron,B.Bonte,T.Coupez	Lille Univ.	
		Bias conditions for accurate parasitics evaluation of microwave MESFETs up to MM-wave frequencies	G.Leuzzi,K.Deiseroth,F.Giannini,B.DeSantis	Roma Univ.	
		60 GHz low noise HEMT MMIC amplifiers and their characterization	P.Bourne,E.Paris,T.Redon	Thomson	
		A small-signal and noise model for the physics-based design and optimization of GaAs MESFET's for hybrid and monolithic MIC's	G.Ghione,F.Bonani,M.Pirola,C.U.Naldi		
		An investigation of microwave packaging and associated bonding techniques	C.Westcott	Spartan Microwave	
		High bit rate four phase MMIC remodulation demodulator and modulator	A.Primerose,J.Graffeuil,L.Lapierre,J.Sombrin,J.C.Lalaurie,J.Larroque		
		A compact X-band GaAs monolithic balanced FET mixer	I.D.Robertson,A.H.Aghvami	London Univ.	
		CAD-oriented HEMT models from noise and scattering measurements	A.Caldeml,G.Martines,M.Sannino		
		A CAD-oriented quasi-physical HEMT noise model for device design and optimization	F.Bonani,G.Ghione,C.U.Naldi		transimpedance,noiseの式
		An overview of GaAs MMICs reliability	F.Magistralli	Alcatel	
		An investigation on the reliability of AlGaAs/GaAs HEMT's	G.Brambilla,A.D'Ambrosio,G.Fattore,P.Galante,C.Tedesco,G.Castellana	Siemens	
		Microwave characterization and comparison of performance of GaAs based MESFETs,HEMTs,HBTs operating at high ambient temperature	K.Fricke,W.Y.Lee,J.Wurfl,V.Krozer,H.L.Hartnagel		
		C.A.D for Broad-Band Multistage Microwave Transimpedance Amplifier	A.O.Ngongo,A.Perenec,R.Soures,P.Jarry		

Title	page	Title	Authors	memo	equations
PI79	253	Recent Advances in Long-Wavelength Semiconductor Lasers for Optical Fiber Communication			
PI75	1498	Single-Mode Fiber Components			
PI75	1488	Optoelectronic Integrated Circuits			
PI75	1472	Integrated Optics Approach for Advanced Semiconductor Lasers			
PI71	692	Long-Wavelength Optical Fiber Communication			
PI70	788	Thermal Noise in Nonlinear Resistive Devices and its Circuit Representation			

Title	page	Title	Authors	memo	equations
SAC11	1118	Optical fiber feeder for microcellular mobile communication systems(H-015)	M.Shibutani,T.Kanai,W.domom,K.Emura,J.Namiki	NEC	
VT44	268	Polarization Dependence of Multipath Propagation and High-Speed Transmission Characteristics of Indoor Millimeter-Wave Channel at 60 GHz	T.Manabe,K.Sato,H.Masuzawa,K.Taira,T.Ihara,Y.Kasashima,K.Yamaki	CRL	
VT43	140	An Experimental Study of the Propagation of 55 GHz Millimeter Waves in an Urban Mobile Radio Environment	H.J.Thomas,R.S.Cole,G.L.Siqueria	London Col.	

Device

Title	page	Title	Authors	memo	equations
APL64	1389	Improved performance of large-area InP/InGaAs metal-semiconductor-metal photodetectors by sulfur passivation	U.Schade,St.Kollakowski,E.H.Bottcher,D.Bimberg	Berlin Univ.	passivationによる内部gain抑圧
APL59	1984	375-GHz-bandwidth photoconductive detector	Y.Chen,S.Williamson,T.Brock,F.W.Smith,A.R.Calawa	Michigan Univ.	375GHz MSM
APL54	567	Dynamic behavior of photocarriers in a GaAs metal-semiconductor-metal photodetector with sub-half-micron electrode pattern	W.C.Koscielniak,J.L.Pelouard,M.A.Littlejohn	North California	時間応答、モデル
APL50	1631	Optical intensity modulation to 40 GHz using a waveguide electro-optic switch	S.K.Korotky,G.Eisenstein,R.S.Tucker,J.J.Veselka,G.Raybon	ATT	
APL37	597	Picosecond optical sampling technique for measuring the speed of fast electro-optic switch/modulators	R.C.Alferness,N.P.Economou,L.L.Buhl	ATT	

Title	page	Title	Authors	memo	equations
-------	------	-------	---------	------	-----------

回路

Title	Page	Title	Authors	memo	equations
MTT43	1216	Determination of InP HEMT Noise Parameters and S-Parameters to 60 GHz	R.T.Webster,A.J.Slobodnik Jr,G.A.Roberts		
MTT43	1010	A W-Band Source Module Using MMIC'S	H.Wang,K.W.Chang,D.Smith,G.S.Daw,K.L.Tan,A.K.Oki,B.R.Allen	TRW	
MTT43	1001	A Novel Monolithic HBT-p-i-n-HEMT Integrated Circuit with HBT Active Feedback and p-i-n Diode Variable Gain Control	K.W.Kobayashi,D.C.Streit,D.K.Umemoto,A.K.Oki	TRW	
MTT43	730	Planar Microwave and Millimeter-Wave Lumped Elements and Coupled-Line Filters Using Micro-Machining Techniques	C.-Y.Chi,G.M.Rebeiz		
MTT43	721	Millimeter-Wave On-Wafer Waveform and Network Measurements Using Active Probes	R.Y.Yu,M.Reddy,J.Pasi,S.T.Allen,M.Case,M.J.W.Rodwell	California Santa Barbara Univ.	
MTT43	705	Si/SiGe MMIC's	J.-F.Luy,K.M.Strohm,H.-E.Sasse,A.Schuppen,J.Buechler,M.Wollitzer,A.Gruhle,F.Schaffle,U.Guettich,A.Klaaßen	Dainler-Benz	
MTT43	523	Optimum Design of Coplanar Waveguide for LiNbO3 Optical Modulator	X.Zhang,T.Miyoshi	Kobe Univ.	
MTT43	518	MMIC Compatible Lightwave-Microwave Mixing Technique	A.Paoletta,S.Malone,T.Berceli,P.R.Herzfeld		
MTT43	213	Modelling Drain and Gate Dependence of HEMT 1-50 GHz, Small-Signal S-Parameters, and D.C. Drain Current	S.J.Mahon, D.J.Skellen		
MTT42	2027	Heterodyne Reception of Millimeterwave-Modulated Optical Signals with an InP-Based Transistor	C.Rausher,K.J.Williams		
MTT42	518	20-GHz 5-dB Gain Analog Multipliers with AlGaAs/GaAs HBT's	K.Osafune,Y.Yamauchi	NTT	
MTT42	2	Monolithic Ultra-Broadband Transimpedance Amplifiers Using AlGaAs/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors	N.Nagao,T.Suzaki,M.Soda,K.Kasahara,T.Takeuchi,K.Honjo	NEC	
MTT41	1299	Maximum dynamic range operation of a microwave external modulation fiber-optic link	Edward Ackerman,Stephen Wanuga,Dumrong Kasemset,Afshin S. Daryoush,Naranjan R. Samant	GE,Drexel Univ.	EOM,PDと整合した場合のfiber-linkのgain,noiseを定量化
MTT41	1087	Large-Signal HBT Characterization and Modeling at Millimeter Wave Frequencies	D.A.Teeter,J.R.East,G.I.Haddad	Michigan Univ.	
MTT40	2285	Millimeter-Wave Fiber Optics Systems for Personal Radio Communication	H.Ogawa,D.Polifko,S.Banba	ATR	
MTT40	2278	Fiber Optic Microwave Links Using Balanced Laser Harmonic Generation, and Balanced/Image Cancellation Laser Mixing	H.Ogawa,H.Kamitsuna	ATR	
MTT40	1722	Large signal analysis of optical directional coupler modulators	Muhammad Taber Abucla'atti	Kind Fald Univ.	
MTT40	1681	Analytical Model for Optically Generated Currents in GaAs MESFETS	A.Madjar,P.R.Herzfeld,A.Paoletta	Drexel Univ.	
MTT40	910	Improvements in fiber-optic transmission of multi-carrier TV signals	T.Berceli,I.Frigyes,P.Gottwald,P.R.Herzfeld,F.Menyel	Budapest Univ.	
MTT39	2045	Fiber-Optic Microwave Transmission Using Harmonic Laser Mixing, Optoelectronic Mixing, and Optically Pumped Mixing	H.Ogawa,Y.Kamiya	ATR	
MTT39	2031	Interfaces for high-speed fiber-optic links:Analysis and experiment	A.S.Daryoush, E.Ackerman, N.R.Samant, S.Wanuga, D.Kasemset	GE	
MTT39	1595	Spectral-Domain Analysis of Coplanar Waveguide Travelling-Wave Electrodes and Their Applications to Ti:LiNbO3 Mach-Zehnder Optical Modulators	K.Kawano,T.Kitoh,H.Jumonji,T.Nozawa,M.Yanagibashi,T.Suzuki	NTT	
MTT39	1247	Measurement and Analysis of GaAs MESFET Parasitic Capacitance	R.Anholt,S.Swirhum	Honeywell	
MTT39	1243	Equivalent-Circuit Parameter Extraction for Cold GaAs MESFET's	R.Anholt,S.Swirhum	Honeywell	
MTT39	775	Advances in Millimeter-Wave Subsystems in Japan	S.Kitazume,H.Kondo	NEC	
MTT39	768	Millimeter-Wave Components and Subsystems Built Using Microstrip Technology	D.A.Williams	GEC Plessey	
MTT39	759	Millimeter-Wave Technology Advances Since 1985 and Future Trends	H.H.Meinel	Deutsche Aerospace	
MTT39	755	A Review of the Panel Discussion on Advances in Millimeter-Wave Subsystems-1990	J.B.Horton	TRW	
MTT39	224	High-Frequency Equivalent Circuit of GaAs FET's for Large-Signal Applications	M.Bertho,R.Bosch	Fraunhofer	
MTT38	1986	5-100 GHz InP Coplanar Waveguide MMIC Distributed Amplifier	R.M.-Ahy,C.K.Nishimoto,M.Riazat,M.Glenn,S.Silverman,S.-L. Weng,Y.-C. Pao,G.A.Zlasiuk,S.G.Bandy,Z.C.H.Tan	Varian	
MTT38	1900	A 10 Gb/s Optical Heterodyne Detection Experiment Using a 23 GHz Bandwidth Balanced Receiver	N.Takachio,K.Iwashita,S.Hata,K.Onodera,K.Katsura,H.Kikuchi	NTT	23GHz/Transimpedance amp
MTT38	1468	Full-Wave Analysis of Conductor Losses on MMIC Transmission Lines	W.Heinrich		
MTT38	662	Reduced Insertion Loss of X-Band RF Fiber-Optic Links	H.B.aue,t,D.B.Huff,G.J.Stern,I.L.Newberg	Ortel	
MTT38	608	Millimeter-Wave Generation and Characterization of a GaAs FET by Optical Mixing	D.C.Ni,H.R.Fetterman,W.Chew	UCLA	
MTT38	577	Optical Control of Microwave Semiconductor Devices	A.J.Seeds,A.Augusto	Univ.College London	
MTT38	546	Tuned Optical Receivers for Microwave Subcarrier Multiplexed Lightwave Systems	K.L.Alameh,R.A.Minasian		
MTT38	524	Lightwave Subcarrier CATV Transmission Systems	T.E.Darcie,G.E.Bodeep	ATT	
MTT38	510	High-speed fiber-optic links for satellite traffic	A.S.Daryoush,E.Ackerman,RSaedi,R.Kanath,K.Shaulkhauser		
MTT38	501	An analytic and experimental comparison of direct and external modulation in analog fiber-optic links	C.H.Cox III,G.E>Betts,L.M.Johnson	MIT	
MTT38	477	Integrated Optic Devices for Microwave Applications	T.Sueta,M.Izutsu	Osaka Univ.	

回路

MTT38	467	Optical Synchronization of Millimeter-Wave Oscillators for Distributed Architectures	A.S.Daryoush	GE
MTT37	2142	A Monolithic 60 GHz Diode Mixer and IF Amplifier in Compatible Technology	B.Adeiseck,A.Colquhoun,J.-M. Dieudonne,G.Ebert,K.-E.Schmegner,W.Schwab,J.Selders	Telefunken
MTT37	1340	Modeling of Noise Parameters of MESFET's and MODFET's and Their Frequency and Temperature Dependence	M.W.Pospieszalski	
MTT37	1217	Optical Receiver and Modulator Frequency Response Measurement with a Nd:YAG Ring Laser Heterodyne Technique	T.S.Tan,R.L.Jungerman,S.S>Elliott	HP 変調器の周波数特性測定法
MITT35	1444	Microwave Performance of an Optically Controlled AlGaAs/GaAs High Electron Mobility Transistor and GaAs MESFET	R.N.Simons	NASA FETampのnoiseの式 $i^2=4kTgm*1.1dF$
MTT30	1121	Waveguide Electrooptic Modulators	R.C.Alferness	Bell Laboratories
MTT29	629	GaAs FET Ultrabroad-Band Amplifiers for Gbit/s Data Rate Systems	K.Honjo, Y.Takayama	NEC 抵抗&整合回路による超広帯域アンプ

Title	Page	Title	Authors	memo	equations
SC29	1577	Si-Analog IC's for 20 Gb/s Optical Receiver	M.Soda,H.Tezuka,F.Sato,T.Hashimoto,S.Nakamura,T.Tatsumi,T.Suzaki,T.Tashiro	NEC	
SC29	328	A Monolithic GaAs Receiver for Optical Interconnect Systems	J.Choi,B.J.Sheu,O.T.-C.Chen	UCLA	
SC28	622	A Monolithic GaAs-on-Si Receiver Front End for Optical Interconnect Systems	G.N.Nasserbakhht,J.W.Adkisson,B.A.Wooley,J.S.Harris,Jr,T.I.Kamins	Stanford Univ.	
SC26	1834	Monolithic GaAs Transimpedance Amplifiers for Fiber-Optic Receivers	N.Scheinberg,R.J.Bayruns,T.M.Laverick	Anadegics	
SC21	324	A Variable Transimpedance Preamplifier for Use in Wide Dynamic Range Optical Receivers	K.Tamashita,T.Kinoshita,Y.Takasaki,M.Maeda,T.Kaji,M.Maeda	Hitachi	
SC19	986	Gigahertz Transresistance Amplifiers in Fine Line NMOS	A.A.Abidi	ATT	

学会

Title	Page	Title	Authors	memo	equations
1995					
MTTS95	9	A 1.9 GHz-band ultra low power consumption amplifier chip set for personal communications	M.Muraguchi,M.Nakatsugawa,H.Hayashi,M.Aikawa	NTT Wireless Systems Labs.	
MTTS95	45	Ultra-high speed cryogenic laser diodes for broadband optical fiber link applications	R.- C.Yu,R.Nagarajan,T.Reynolds,J.E.Bowers,M.Shakouri,J.Park,K.L.Lau,C.- E.Zah,W.Zou,J.Merz	Conducts Inc.	
MTTS95	49	Analytical model with empirical verification for heterojunction bipolar transistors under illumination	L.E.M.deBarros Jr,A.Paoletta,P.R.Herezfeld,P.Enquist	Drexel Univ.	
MTTS95	53	1x8 metal -semiconductor-metal photodetector and HEMT receiver array with 5 GHz bandwidth	T.Seniuk,Q.Z.Liu,G.D.Cormack	Telecommunications Research Labs.	
MTTS95	61	Measurement of intermodulation distortion in optical diodes	B.Kanack	TI	
MTTS95	65	Photonic Switched True Time Delay Beam Forming Network Integrated on Silica Waveguide Circuits	K.Horikawa, I.Ogawa,H.Ogawa,T.Kitoh	NTT Wireless Systems Labs.	
MTTS95	83	GaAs MMIC based components and frontends for millimeterwave communication and sensor system	H.Deambkes,B.Adelseck,L.P.Schmidt,J.Schroth	Daimler Benz	
MTTS95	123	A PMHFET based MMIC gate mixer for Ka-band application	M.Matthes,J.-M. Dieudonne,W.Siebler,L.Klapproth	Berlin Univ.,Daimler Benz	
MTTS95	131	Monolithic mixers with MESFETs technology to up and down convert between C and V band	J.P.Torres,F.Fortes,M.J.Rosario,J.M.Dieudonne,J.C.Freire	,Daimler Benz	
MTTS95	159	Travelling-wave photodetectors	K.Giboney,J.Bowers,M.Rodwell	California Univ.	
MTTS95	163	Travelling-wave optoelectronic devices for microwave applications	D.Jager,R.Kremer,A.Stoer		
MTTS95	169	High density microwave packaging program	E.D.Cohen		
MTTS95	173	High density microwave packaging program phase 1 - Texas Instruments/Martin Marietta team	J.A.Reddick H.R.K.Peterson,M.Land,W.R>Kritzler,P.Piacente,W.P.Kornrumpf	TI,	
MTTS95	177	The Westinghouse High Density Microwave Packaging Program	J.A.Costello,M.Kline,F.Kuss,W.Marsh,R.Kam,B.Fasano,M.Berry,N.Koop man	Westinghouse Electric	
MTTS95	181	High density microwave packaging for T/R modules	J.Wooldridge	Hughes	
MTTS95	219	Distributed Optical Receiver Preamplifier with Unequal Gate/Drain Impedances	.Darwazeh,P.Moreira,A.Borjak,J.O'Reilly	MIT	
MTTS95	247	Integrated laser/modulators for high capacity WDM transmission systems	W.T.Tsang,J.E.Johnson,P.A.Morton,T.Tanbun- Ek,S.N.G.Chu,W.D.Johnston	ATT	
MTTS95	251	Ultra wide electrical bandwidth GaAs/AlGaAs electrooptic modulators	N.Dagli,R.Spickerman,S.Sakamoto,M.Peters	California Univ.	
MTTS95	255	High-Speed Directional Coupler Modulator with Velocity-Matched Electrode Structure	M.Yu,A.Gopinath	Minnesota Univ.	
MTTS95	259	Integrated optic distributed Bragg reflector Fabry-Perot modulator for microwave applications	S.H.Kravitz,G.R.Hadley,G.A.Vawter,R.F.Corless,R.E.Smith,J.R.Wendt,J.C .Word,T.M.Bauer	Drexel Univ.	
MTTS95	401	Recent advances on millimeterwave PCN system development in Europe	H.H.Meinel		
MTTS95	405	Recent activities on millimeter wave indoor LAN system development in Japan	Y.Takimoto	Milliwave	
MTTS95	409	Advanced MMIC components for Ka-band communications systems. A survey	J.-M. Dieudonne,B.Adelseck,P.Narozny,H.Dambkes	Daimler Benz	
MTTS95	413	Microwave and millimetre-wave technology requirements for the European fourth framework programme	J.G.Gardiner	Bradford Univ.	
MTTS95	423	W-Band Integrated Monopulse Radar Transceiver	P.Toulios,T.-H.Shu,J.Nabarro,R.Knox	Epsilon Lambda Electronics Corp.	
MTTS95	427	A 40 to 50 GHz HEMT test fixture	A.Prabhu,N.Erickson	Massachusetts Univ.	
MTTS95	431	Manufacturable and Reliable MillimeterWave HJFET MMIC Technology Using Novel 0.15µm MoTiPtAu Gates	Y.Hori,G.Onda,M.Funabashi,H.Mizutani,K.Maruhashi,A.Fujihara,K.Hosoy a,T.Inoue,M.Kuzuhara	NEC	
MTTS95	435	A high performance, high yield, dry-etched, pseudomorphic HEMT for W-band use	N.I.Cameron,N.R.S.Taylor,H.McLelland,M.Holland,I.G.Thayne,K.Elgaids .P.Beaumont	Glasgow Univ.	
MTTS95	541	60-GHz monolithic oscillator using InGaP/InGaAs/GaAs HEMT technology	Y>Kawasaki,K.Shirakawa,Y.Ohashi,T.Saito	Fujitsu	
MTTS95	545	New insight in operation principles and accurate design of fundamental and harmonic millimeter-wave oscillators	M.Curov		
MTTS95	557	Absolute loss measurement of highly reflective samples by using a high Q gaussian beam open resonator at short millimeter wave frequency	T.Matsui,M.Kiyokawa,K.Araki	CRL	
MTTS95	611	New MODFET small signal circuit model required for millimeter-wave MMIC design: Extraction and validation to 120 GHz	P.J.Tasker,J.Braunstein	Fraunhofer Inst.	
MTTS95	615	An improved GaAs MESFET model for the pulsed I-V measurement	K.Fujii	Japan Radio	
MTTS95	619	High-frequency large-signal physical modeling of microwave semiconductor devices	M.A.AISunaidi,S.M.El-Ghazaly	Arizona State Univ.	
MTTS95	623	A table based bias and temperature dependent small signal and noise equivalent circuit model	.B.Winson,S.M.Lardizabal,L.Dunleavy	South Florida Univ.	
MTTS95	689	C Comparison of Low Frequency Noise in GaAs and InP-based HBTs and VCOs	J.Cowles,L.Train,T.Block,D.Streit,C.Grossman,G.Chao,A.Oki	TRW	
MTTS95	697	Comparison of the phase noise performance of HEMT and HBT based oscillators	X.Zhang,D.Sturzebecher,A.S.Daryoush	Drexel Univ.	
MTTS95	705	High Efficiency Amplifier Using Rectangular Waveform	S.Toyoda	Osaka Univ.	

MTTS95	713	RF-Stressed Life Test of Pseudomorphic InGaAs Power HEMT MMIC at 44 GHz	C.H.Chen,G.Zell,Y.Saito,H.C.Yen,R.Lai,K.Tan,J.Loper	TRW
MTTS95	717	Comprehensive experimental investigation of gate current limitation effects on power GaAs FETs RF performances	N.Constantin,F.M.Ghannouchi	
MTTS95	721	A Study of Class C Operation of GaAs Power HBTs	F.Ali,A.Gupta,M.Salib,B.Veasel	Westinghouse Electric
MTTS95	935	Ultra-low noise HEMT device models:Application of on-wafer cryogenic noise analysis and improved parameter extraction techniques	J.J.Bautista,M.Hamai,M.Nishimoto,J.Laskarp,Szudlik,R.Lai	TRW
MTTS95	939	A novel millimeter-wave HEMT noise modeling procedure	M.D.DuFault,J.Z.Lin,A.K.Sharma	TRW
MTTS95	1033	Fully integrated nonlinear modeling and characterization system of microwave transistors with on-wafer pulsed measurements	J.P.Tessier,J.P.Viaud,J.J.Raouz,R.Quere	IRCOM
MTTS95	1037	A novel computerized multiharmonic active load-pull system for the optimization of high efficiency operating classes in power transistors	F.Blache,J.M.Nebus,Ph.Bouysse,J.P.Villotte	IRCOM
MTTS95	1041	A 0.5-50 GHz on-wafer, intermodulation, load-pull and power measurement system	M.Demmler,B.Hughes,A.Cognata	Fraunhofer Inst.
MTTS95	1045	On-wafer Calibration Techniques for Measurement of Microwave Circuits and Devices on Thin Substrate	J.Pla,W.Struble,G.Colomb	Raytheon
MTTS95	1053	High-Frequency On-Wafer Testing with Freely Positionable Silicon-on-Sapphire Photoconductive Probers	T>Pfeifer,H.-M.Heiliger,E.Stein von Kamienski,H.G.Roskos,H.Kurz	
MTTS95	1077	Modeling and electrical characterization of parasitic effects for GaAs integrated circuits. Experimental validation and CAD formulas	N.Hassaine,M.Lecours,G.Y.Deisle	
MTTS95	1081	Modeling and Simulation of Switching Noise Including Power/Ground Plane Resonance for High Speed GaAs FET Logic (FL) Circuits	J.-M.Jong,V.Tripathi	Oregon State Univ.
MTTS95	1117	A Monolithic W-band High-gain LNA/Detector for Millimeter Wave Radiometric Imaging Applications	D.C.W.Lo,G.S.Dow,B.R.Allen,L.Yujiri,M.Mussetto,T>W>Huang,H.Wanf, M.Biedenbender	TRW
MTTS95	1125	A C-Band 4-Stage Low Noise Miniaturized Amplifier Using Lumped Elements	Y.Tsukahara,S.Chali,Y.Sasaki,K.Nakahara,N.Andoh,H.Matsubayasi,N.Tanino,O,Ishihara	Mitsubishi
MTTS95	1143	GaAs MMIC thermal modeling for calculation of accurate channel temperatures	V.J.Ferrara,A.Garnett,S.Park,A.B.Solan	Lockheed Sanders Inc.
MTTS95	1165	A fiber-optic link utilizing subcarrier transmission and reception of microwave signal	G.K.Gopalakrishnan,K.J.Williams,R.P.Moeller,W.K.Burns,R.D.Esman	
MTTS95	1169	Characterization of fiber optic microwave link with monolithic integrated optoelectronic upconverter	Q.Z.Liu,T.Davies,R.I.MacDonalk	
MTTS95	1173	Signal and noise analysis of external modulation fiber optic link with optical component and arbitrary lossless matching circuits	E.I.Ackerman,J.L.Prince,J.A.MacDonald	Martin Marietta Labs.
MTTS95	1177	Application of Semiconductor Optical Amplifiers to Microwave Signal Processing	H.Ogawa,K.Horikawa,H.Kamitsuna,O.Kobayashi,Y.Imazumi,I.Ogawa	NTT Wireless Systems Labs.
MTTS95	1231	A Heterojunction Bipolar Transistor Large-Signal Model for High Power Microwave Applications	A.Samelis,D.Pactidis	Michigan Univ.
MTTS95	1235	A novel extraction method for accurate determination of HBT large-signal model parameters	D.-W.Wu,M.Fukuda,Y.-H.Yun	M/A-COM
MTTS95	1283	Demonstration of photonically-controlled GaAs digital/MMIC for RF optical links	A.Brunel,S.-L.G.Chu,S.E.Davis,A.Kelsey,M.O'Connell,J.A/Ruiz,R.C.Sharp,J.W.Smith,K.Tabatabaie-Alavi	Raytheon
MTTS95	1287	Optical control of MMIC oscillators and model parameter analysis of an illuminated FET at the Ka- and V-band	S.Kawasaki,M.kimura,H.Shiomi,T.Wakabayashi,M.Funabashi,K.Ohata	Tokai Univ.
MTTS95	1291	Reduced phase noise in microwave oscillators due to optical signal injection	S.M.Genco,A.R.Mickelson	Zybek Advanced Products,Inc.
MTTS95	1295	Dynamic characterization of optical-microwave transducers	T.Bercei,B.Cabon,A.Hilt,A.H.Quoc,E.Pic.S.Tedjini	Budapest Univ.
MTTS95	1307	Real frequency method applied to broad-band laser command circuit design with lumped and distributed elements	D.L.Berre,A.Pereñnc,N.Julien,S.Toutain,R.Lefevre,D.Lemailet,R.Soares	
MTTS95	1431	Low-frequency noise in millimeter-wave Si/SiGe Heterojunction Bipolar Transistors	R.Plana,B.V.Haaren,J.P.Roux,L.Escotte,A.Gruhle,H.Dietrich,J.Graffeul	
MTTS95	1471	Development of Broadband Coaxial Components for a 0.04 to 110 GHz Measurement System	B.Oldfield	Wiltron
MTTS95	1499	Bandwidth Improvements for Loaded-Line Traveling Wave Electro-optic Modulators	C.L.Goldsmith,R.Magnusson	TI
MTTS95	1597	94 GHz power amplifier using PHEMT technology	L.Marosi,M.Sholley,J.Goel,A.Faris,M.Siddiqui,D.I.Stones,K.Tan	TRW
MTTS95	1631	77 GHz Monolithic MMIC Schottky- and PIN-Diode switches Based on GaAs MESFET and Silicon STMMWIC Technology	A.Klaassen,J.-M. Dieudonne	Daimler Benz
MTTS95	1639	51 GHz Frontend with Flip Chip and Wire Bond Interconnections from GaAs MMICs to a Planar Patch Antenna	G.Baumann,H.Richter,A.Baumgartner,D.Fertling,R.Heilig,D.Hollmann,H.Muller,H.Nechansky,M.Schlichtweg	Alcatel,Fraunhofer Inst.
MTTS95	1643	An Inverted Microstrip Line IC Structure for ultra high-speed Applications	S.Yamaguchi,Y.Imai,T.Shibata,T.Otsuji,M.Hirano,E.Sano	NTT LSI
	1994			
MTTS94	131	Ka-Band Monolithic VCOs for Low Noise Applications Using GaInP/GaAs HBTs	U.Guttich,J.M.Dieudonne,K.Riepe,A.Marten,H.Leier	Daimler Benz
MTTS94	159	Resonant enhancement of a LiNbO3 traveling modulator for low-loss analog fiber-optics	G.K.Gopalakrishnan,w.k.Burns	Naval Research Lab.
MTTS94	163	Optical frequency modulation link for microwave signal transmission	B.Cai,A.J.Seeds	Univ.College London
MTTS94	167	Signal and noise analysis of direct modulation fiber optic link with optical component and arbitrary lossless matching circuits	J.A.MacDonald,E.I.Ackerman,J.L.Prince	Martin Marietta Labs.

学会

MTTS94	459	A monolithic 2-52 GHz HEMT matrix distributed amplifier in coplanar waveguide technology	R.Heiling,D.Hollmann,G.Baumann	Alcatel	
MTTS94	639	Technology and demonstrator of the RACE project "Mobile broadband system"	A.Plattner		
MTTS94	1113	Novel Fiber Optic BPSK and QPSK Modulation Links	H.Ogawa,K.Hirokawa,Y.Nakasuka	NTT Radio Commun.Sys.	
MTTS94	1711	Rigorous Field Theory Analysis of Flip-Chip Interconnections in MMICs using the FDTLM Method	H.Jin,R.Vahldieck,H.Minkus,J.Huang	Victoria Univ.	
MTTS94	1755	Si/SiGe MMIC Technology	J.-F. Luy,K.M.Strohm,E.Sasse	Daimler Benz	
	1993				
MTTS93	225	A Comparison of Noise Performance between a PIN Diode and MMIC HEMT and HBT Optical Receivers	H.Ogawa,S.Banaba,E.Suematsu,H.Kamitsuna,D.Polifko	ATR	
MTTS93	719	High-performance fiber-optic links for microwave applications	C.H.Cox III	MIT	
MTTS93	723	Balanced receiver external modulation fiber-optic link architecture with reduced noise figure	E.Ackerman,S.Wanuga,J.MacDonald,J.Prince	GE	
MTTS93	1047	11 GHz bandwidth GaAs MESFET/MSM OEIC receivers	J.S.Wang,C.G.Shih,W.H.Chang,J.Middleton,P.J.Apostolakis,M.Freq	Illinois Univ.	11GHzMSM/MESFET,Gt data
MTTS93	1055	A LiNbO3 microwave-optoelectronic mixer with linear performance	G.K.Gopalakrishnan,W.K.Burns,C.H.Bulmer	Maryland Advanced	
MTTS93	1063	High Speed Optical Detectors for Monolithic Millimeter Wave Integrated Circuits	K.Litvin,J.Burn,D.Woodard,W.Schuff,L.F.Eastman	Cornel Univ.	
MTTS93	1067	Reactively matching optoelectronic transceivers on InP substrate for 6 GHz operation	S.Maricot,J.P.Vilcot,D.Decoster,J.C.Renaud,D.Rondl,P.Hrtz,R.Blondeau,D.de Cremoux		reactive matching
	1992				
MTTS92	85	An enhanced GaAs monolithic transimpedance amplifier for low noise and high speed optical communications	J.A.Casao,P.Dorta,J.L.Caceres,M.Salazar-Palma,J.Perez	Madrid Univ.	Gt,S21,noise data
MTTS92	89	An Ultra Broadband GaAs MESFET Pre-amplifier IC for a 10 Gb/s Optical Communication System	M.Miyashita,K.Macnura,K.Yamamoto,T.Shimura,M.Nogami,K.Motoshima,T.Kitayama,Y.Mitsuhi	Mitsubishi	Gt,S21,noise data
MTTS92	349	Attenuation of millimeterwave coplanar lines on gallium arsenide and indium phosphide over the range 1-60 GHz	W.H.Haydi,J.Braunstein,T.Kitazawa,M.Schlechtweg,P.Tasker,L.F.Eastman	Cornel Univ.,Faunhofer Univ.,Ibaragi Univ.	
MTTS92	555	Fiber Optic Millimeter-Wave Subcarrier Transmission Links for Personal Radio Communication Systems	H.Ogawa,D.Polifko	ATR	
MTTS92	559	Fiber Optic Microwave Links Using Balanced Laser Harmonic Generation, and Balanced/Image Cancellation Laser Mixing	H.Ogawa,H.Kamitsuna	ATR	
MTTS92	567	On-Wafer Characterization, Modeling, and Optimization of InP-based HEMTs, pin-Photodiodes and Monolithic Receiver-OEICs for Fiber-Optic Communication	D.Kaiser,H.Grosskopf,I.Gyuro,U.Koerner,W.Kuebart,J.-H.Reemisma,H.Eisele	Alcatel	
	1991				
MTTS91	255	Monolithic Ultra-broadband Transimpedance Amplifier using AlGaAs/GaAs HBTs	N.Nagano,T.Suzuki,A.Okamoto,K.Honjo	NEC	Gt,Gain
MTTS91	297	Interfaces for high-speed fiber-optic links	A.S.Daryoush,N.Samant,E.Ackerman,S.Wanuga,D.Kasemset	GE	
MTTS91	301	Component technology for 40 GHz fiber optic systems	I.Bennion,A.Curter,A.Moseley,D.Wale,R.Walker	Pressey	
MTTS91	303	Ultrahigh Speed Optical Transmission Systems in Japan	K.Nakagawa,K.Hohkawa,K.Hagimoto	NTT Transmission Systems Labs.	
MTTS91	307	Performance improvements in fiber-optic links for multi-carrier TV transmission	T.Bereci,I.Frigyes,P.Gottwald,P.R.Herczfeld,F.Mernyei	Budapest Univ.	
MTTS91	317	Comparison of two architectures for fiber optic distribution inside Ka-band communication satellites	D.M.Polifko,A.S.Daryoush	Drexel Univ.	
MTTS91	491	Multigigahertz monolithic GaAs optoelectronic receivers using 0.2 μm gate-length MESFETs	R.H.Walden,W.W.Hooper,C.S.Chou,C.Ngo,R.WongQuen,R.A.Metzger,F.Williams,L.E.Larson,R.Blumgold	Hughes	$Gt \sim Rf/(1+1/A), R_{in} \sim Rf/(1+A), f_{3dB} \sim (1+A)/(2\pi Rf(C_{in} + (1+A)Cf))$
MTTS91	585	A 7-13 GHz low-noise tuned optical front-end amplifier for heterodyne transmission system application	F.Ebskamp,G.Schleflerup,M.Hogdal	Denmark Univ.	
MTTS91	593	Fiber Optic Microwave Transmission Using Harmonic Modulation and Optoelectronic Mixing/Optically Pumped Mixing	H.Ogawa,Y.Kamiya	ATR	
	1990				
MTTS90	149	A 10 Gb/s optical heterodyne detection experiment using a 23 GHz bandwidth balanced receiver	N.Takachio,K.Iwashita,S.Hata,K.Katsura,K.Onodera,H.Kikuchi	NTT	23GHztransimpedance
MTTS90	153	A high-gain directly modulated L-band microwave optical link	E.Ackerman,D.Kasemset,S.Wanuga,D.Hogue,J.Komiak	GE	
MTTS90	157	Low-loss analog fiber-optic links	C.H.Cox III,D.Z.Tsang, L.M.Johnson,G.E.Betts	MIT	
	1989				
MTTS89	689	A theoretical and experimental comparison of directly and externally modulated fiber-optic links	C.H.Cox III,L.M.Johnson,G.E.Betts	Lincoln Labs.	
MTTS89	693	Long microwave delay fiber optic link for radar testing	L.L.Newberg,C.M.Gee,G.D.Thurmond,H.W.Yen	Hughes	
MTTS89	697	Multi-gigabit fiber-optic video distribution network using BPSK microwave subcarriers	D.D.Thang	GTE Labs.	
MTTS89	703	Integrated fiber optic transmission of FM HDTV and 622 Mb/s data	C.N.Lo,L.S.Smoot	Bellcore	
MTTS89	801	High performance V-band low noise amplifiers	S.Vaughn,K.White,U.K.Mishra,M.J.Delaney,P.Grelling,S.Rosenbaum	Hughes	
MTTS89	805	High-Performance InP-based HEMT Millimeter-wave Low-Noise Amplifiers	K.H.G.Duh,P.C.Chao,P.Ho,M.Y.Kao,P.M.Smith,J.M.Ballingall,A.A.Jabra	GE	

MTTS89	809	Q-band coplanar waveguide amplifier	G.S.Dow,T.N.Ton,K.Naukano	TRW	
MTTS89	813	Millimeter-wave Noise parameters of high performance HEMT's at 300 K and 17 K	S.Weinreb,R.Harris,M.Rothman	National Radio Astronomy Observatory	
MTTS89	817	Possibility of silicon monolithic millimeterwave integrated circuits	S.A.Campbell,A.Gopinath	Minnesota Univ.	
MTTS89	835	Large-signal characterization of millimeter-wave transistors using an active load-pull measurement system	R.Actis,R.A.McMorrin,R.A.Murphy,M.A.Hollis,R.W.Chick,C.O.Bozler,K.B.Nichols	MIT	
MTTS89	1163	Microwave characteristics of GaAs MMIC integratable optical detectors	P.C.Claspy,S.M.Hill,K.B.Bhasin	NASA	
MTTS89	1167	Distortion characteristics in directly modulated laser diodes by microwave signal	M.L.Majewski,L.A.Coldren	Queensland Univ.	
MTTS89	1171	Microwave characteristics of planar electrooptic modulator	R.Delruc,E.Palczy,J.F.Legier,P.Pribetich,P.Kennis		
MTTS89	1183	Direct Measurement of the Optimum Source impedance for Minimum Noise Figure 1988	O.Ishikawa,H.Yagita,T.Tanbo,T.Onuma	Matsushita	
MTTS88	801	Impedance of GaAs P-I-N diodes	A.Gopinath	Minnesota Univ.	
MTTS88	959	Optical control of a GaAs MMIC transmit/receive module	A.Paoletta,P.R.Herczfeld	Drexel Univ.	
MTTS88	979	High signal to noise operation of fiber optic links to 18 GHz	H.Blauevelt,K.Lau	Ortel	
MTTS88	983	High speed fiber optic links for short-haul microwave applications	I.Koffman,P.R.Herczfeld,A.S.Daryoush	Drexel Univ.	
MTTS88	1063	A 100-kHz - 22-GHz instrumentation photoreceiver	D.J.Derickson,C.M.Miller,R.L.Van Tuyt	HP	
MTTS88	1067	Calibration of optical receivers and modulators using an optical heterodyne technique	T.S.Tan,R.L.Jungerman,S.S.Elliott	HP	Heterodyne法による光部品測定

Title	Page	Title	Authors		memo	equations
1995		IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium				
	7	Low-Cost High-Volume RF Products: Dream, Anticipation, or Reality?	A.M.Pavio	Motorola		
	11	Lightwave communication ICs beyond 10 Gb/s - Design and measurement challenges	T.Ohtuji,Y.Imai,E.Sano	NTT LSI Labs.		
	45	A high performance transceiver chipset for millimeter-wave commercial digital communication systems	A.K.Sharma,D.M.Smith,M.V.Aust,R.H.Katz,J.Yonaki,R.B.Womack,M.D.Bledenbender	TRW		
	49	Millimeter wave phase locked oscillator for mobile communication systems		Thomson		
	53	Ka-Band MMIC-Based Transceiver For Battlefield Combat Identification System	G.Nesbit,T.Dere,D.English,V.Purdy,B.Parrish	TRW		
	59	High-sensitive W-band MMIC radiometer modules	B.Kane,S.Weinreb,E.Fischer,N.Byer	Martin Marietta Lobs.		
	63	A Fully Passivated Ultra Low Noise W-Band Monolithic InGaAs/InAlAs/InP HEMT Amplifier	G.I.Ng,R.Lai,Y.Hwang,H.Wang,D.C.W.Lo,T.Bloch,K.Tan,D.C.Streit,R.M.Dia,A.Freudenthal,P.D.Chow,J.Berenz	TRW		
1995		1995 Microwave Systems Conference				
	3	Recent advances on millimeterwave PCN system development in Europe	H.H.Meinel	Daimler-Benz		
	7	Recent activities on millimeter wave indoor LAN system development in Japan	Y.Takimoto	Milliwave		
	11	Advanced MMIC components for Ka-band communications systems. A survey	J.-M.Dieudonne,B.Adelseck,P.Narozny,H.Dambkes	Daimler-Benz		
	65	State-of-art semiconductor devices for mobile communication systems in Europe	E.Pettenpaul,K.J.Schopf	Siemens		
	73	Mixed technologies for microwave multichip module (MMCM) applications - A review	J.-L.Foure,A.Dravel,J.-P.Cazenave,R.Funck	Dassault Electronique		
	83	GaAs MMIC based components and frontends for millimeterwave communication and sensor systems	H.Diemkes,B.Adelseck,L.P.Schmidt,J.Schroth	Daimler-Benz		
	115	Imaging Applications of Millimeter Wave Sensors in Robotics and Road Traffic	J.B.Detlefsen	Muchen Univ.		
	239	Optical millimeter-wave generation and transmission technologies for mobile communications, an overview	R.P.Braun,G.Grodkopf,D.Rohde			
	247	Over-temperature noise modeling of PHEMTs	A.Boudiaf,C.D.-C.Allier			

Title	Page	Title	Authors		memo	equations
1994						
EuMC24	34	Models for non linear frequency domain simulation of microwave fiber-optics links	C.Rumelhard,M.Zahzouh			
EuMC24	136	Nonlinear transistor modelling based on measurements results	R.Quere,J.P.Viaud,J.P.Teyssier,J.Obregon			
EuMC24	208	Microwave and millimeterwave HBT development in Japan	K.Honjo	NEC		

学会

EuMC24	332	A 30-to-60-GHz Monolithic HEMT Frequency Doubler	Y.Kawasaki,K.Shirakawa,Y.Ohashi,T.Saito	Fujitsu	
EuMC24	355	Modeling of 0.15 μm dual gate PM-HEMTs by using experimental extraction	D.Langrez,E.Delos,G.Salmer		
EuMC24	361	Design, fabrication, and performance of monolithic dielectrically stabilized PM-HFET oscillators up to 60 GHz	U.Guttich,J.Wenger	Daimler Benz	
EuMC24	366	Thin-film Multilayer Technology for Microwave Applications	D.Ferling,H.Richter	Alcatel	
EuMC24	534	GaAs MESFET Technology based MMICs for Millimeter-Wave Front-ends	J.-M. Dieudonne,A.Khaassen,U.Guttich,B.Adelseck,J.Schroth,J.Splettslifer,A/Colquhoun	Daimler Benz	
EuMC24	560	Wide-band monolithic modulator in GaAs/AlGaAs-technology	W.Ehrlinger,W.Bischof,K.Haug,A.Huelsmann,M.Schlechtweg	Fraunhofer	
EuMC24	636	Nonlinear monolithic circuits in coplanar waveguide technology for receiver applications up to 55 GHz	D.Hollmann,G.Baumann,R.Heiling	Alcatel	
EuMC24	648	8-12 GHz VCO with SiGe Heterojunction Bipolar Transistor	A.Gruhle,H.Kibbel,R.Speck	Daimler Benz	
EuMC24	776	Modeling of PIN photodetectors for microwave and high power applications	J.Hararo,F.Joumet,O.Rabii,J.Van de Castele,L.Joannes,J.P.Vilcot,D.Decoster,C.Dalle,M.R.Friscourt		
EuMC24	805	A Novel MMIC Balanced FET Mixer with Superior Performance	A.H.Barce,I.D.Robertson	King's College London	
EuMC24	1325	Large-Signal Modeling of Millimeter-Wave HEMTs	R.Singh,C.M.Snowden	Leeds Univ.	
EuMC24	1465	Millimeter-wave fiber optic technologies for subcarrier transmission systems	N.Imai,S.Banba,E.Suematsu,H.Sawada	ATR	
EuMC24	1477	Voltage Dependence of the Optical Response of a Pseudomorphic HFET-Photodetector	A.Bangert,J.Rosenzweig,R.Bosch,W.Bronner,K.Kohler,B.Raynor	Fraunhofer	
EuMC24	1679	A new optical reception method using microwave subcarriers	T.Berceli	Budapest Univ.	
EuMC24	1703	Experimental comparison of three different circuit concepts for a monolithic 10 Gb/s InP-based receiver-OEIC	D.Kaiser,F.Besca,H.Großkopf,F.Grotjahn,W.Kuebart,J.-H.Reemtsma,I.Gyuro	Alcatel	
	1993				
EuMC23	223	Design data for millimeter wave coplanar circuits	W.H.Haydi,W.Heinrich,R.Bosch,M.Schlechtweg,P.Tasker,J.Braunstein		
EuMC23	257	A 50-GHz low-noise amplifier designed using noise parameters from an equivalent circuit	K.Ishii,T.Yamamoto,Z.Ohashi,N.Okubo,M.Shigaki	Fujitsu	
EuMC23	311	Noise performance of MMIC HBTs as photodetectors	E.Suematsu,H.Ogawa	ATR	
EuMC23	317	A new high-efficiency optical-microwave mixing procedure	T.Berceli,P.R.Herczfeld,A.Paoletta	Budapest Univ.	
EuMC23	361	De-embedding of on-wafer lightwave measurements performed on a monolithic 10 Gb/s InP receiver-OEIC	D.Kaiser,H.Großkopf,F.Grotjahn,I.Gyuro,W.Kuebart,J.-H.Reemtsma,H.Eisele	Alcatel	
EuMC23	364	A monolithic 1-55 GHz HEMT distributed amplifier in coplanar waveguide technology	R.Heiling,D.Hollmann,G.Baumann	Alcatel	
EuMC23	394	Low phase noise PM-HFET oscillators with dielectric stabilization for Ka- and W-band frequencies	U.Guttich,J.Wenger	Daimler Benz	
EuMC23	734	Novel wideband optical receiver MMIC including two-channel integrated detector	U.Lott,R.Hugli		
EuMC23	747	Fundamental properties of HEMT photodetector for use in fiber optic links	S.Banba,E.Suematsu,H.Ogawa		
	1992				
EuMC22		Noise Performance of MMIC HBTs as Photodetectors	E.Suematsu,H.Ogawa	ATR	
EuMC22	330	A comparison between three GaAs monolithic transimpedance amplifiers for optical communication systems	J.A.Casao,P.Dorta,J.L.Caceres,M.Salazar-Palma,J.Perez,G.Orengo,C.Paoloni,F.Giannini	Madrid Univ.	
EuMC22	758	Millimeter-Wave MIC and MMIC Amplifiers using Pseudomorphic HEMT	K.Shibata,H.Yoshinaga,T.Shino,S.Hori	Toshiba	
EuMC22	1065	Tuned Optical Front-end MMIC Amplifiers for a Coherent Optical Receiver	A.K.Petersen,A.M.Jagd	Denmark Univ.	
			Authors		memo equations
MWE92	191	Optical/Microwave Monolithic Integrated Circuits	H.Ogawa,H.Kamisuna,S.Banba,E.Suematsu	ATR	
MWE92	299	Millimeter-wave Fiber Optic Technologies for Cellular Personal Communications	D.M.Polifko,H.Ogawa	ATR	
MWE91	127	Fiber Optic Link for Microwave/Millimeter Wave Transmission	D.M.Polifko,H.Ogawa	ATR	
			Authors		memo equations
APMC94	287	Determination of optimum gate width for millimeter-wave low noise amplifiers	K.Maruhashi,Y.Ando,K.Onoda,M.Kuzuhara	NEC	
APMC94	295	Millimeter-Wave Monolithic Low-Noise Amplifiers	K.Nakahara,Y.Itoh,Y.Horie,T.Sakura,T.Katoh,N.Yoshida,T.Takagi	Mitsubishi	
APMC94	299	60 GHz MMIC Downconverter Using a HEMT Active-Gate Mixer	T.Saito,N.Hidaka,Y.Ohashi,T.Shimura,Y.Aoki	Milliwave	

APMC94	959	Drain-to-gate distance response for GaAs MESFET photodetector	T.Shimizu,M.Nakatsugawa,H.Ohtsuka	NTT Wireless Systems Labs.
APMC94	979	Automatic Wavelength-Offset Control (AWOC) for Improving the C/N of Optical Fiber Microwave Links	T.Futakata,Y.Tarusawa,T.Nojima	NTT Mobile Communications Network Inc.
APMC94	1159	Photodetection Characteristics of AlGaAs/GaAs HBTs with Various Photo-Coupling Electrode Structures	H.Kamitsuna,Y.Yamauchi,H.Ogawa	NTT Wireless Systems labs.
APMC92	307	High-Speed Optoelectronic Components for Microwave and Millimeter-Wave Applications	R.S.Tucker	Melbourne Univ.
APMC92	309	Fibre Optic Microwave Links Using Image Canceling Photodiode Mixing	H.Kamitsuna,H.Ogawa	ATR
APMC92	313	A GaAs monolithic Transimpedance Amplifier for Optical Communication Systems	J.A.Casao,P.Dorta,J.L.Caceres,M.Salazar-Palma,J.Perez	Madrid Univ. $G_t, noise d, Z_t = R_f / (1 + 1/A + R_f(Z_i/A))$
APMC92	855	High Accuracy Measurement of PIN Diode Parameters in Microwave Region	K.FUJii,Y.Hara,H.Ishikawa	Japan Radio
APMC90	207	State of the Art of Optical-Microwave Interaction Devices	P.R.Herczfeld	Drexel Univ.
APMC90	555	A High-Speed and Low-Driving Voltage InGaAs/InAlAs MQW Optical Modulator	O.Mitomi,I.Kotaka,K.Wakita,K.Kawano,S.Nojima,Y.Kawamura,H.Asai,M.Naganuma	NTT Opto-electronic Labs.
APMC90	571	An Analytical DC Model for the GaAs MESFETs as an Optical Detector	A.Madjar,P.R.Herczfeld,A.Paolleta	Drexel Univ
APMC90	575	A Proposed MISFET Photodetector	P.Chakrabarti,S.Kumar,P.K.Rout,B.G.Rappai	
GaAs89	185	A fully monolithic integrated 60 GHz receiver	A.Colquhoun,G.Ebert,J.Selders,B.Adelseck,J.M.Dicouanne,K.E.Schmegeer, W.Schwab	Telefunken
GaAs87	151	A monolithic integrated 35 GHz receiver employing a schottky diode mixer and a MODFET IF amplifier	A.Colquhoun,B.Adelseck	Telefunken
MSC95	83	GaAs MMIC based components and frontends for millimeterwave communication and sensor system	H.Daembkes,B.Adelseck,L.P.Schmidt,J.Schroth	Daimler-Benz
OFC88	WQ21	Two-tone measurements of optical modulator response	R.L.Jungerman,R.C.Brau,E.R.Ehles,C.A.Johnsen,T.S.Tan	HP

Year	MW	RCS	OCS	ED	OQE	OPE	LQE	題名	著者名	機関名
95	74							FET大信号解析における任意負荷の表現	赤池正巳、小川健、田辺好幸、西尾剛、奥泉良一	東京理科大
95	73							900MHz帯低電圧動作線形増幅器シミュレ	中原和彦、望月満、片山秀昭、花井宏親、伊藤康之、高木直、三井康郎	三菱電機
95	72							移動帯通信用ハワートHBTの熱解析と電力特性	金昌佑、三好陽介、高橋秀樹、羽山信幸、後藤典夫、本城和彦	日本電気
95	71							Dual Gate HEMTを用いたQ帯低雑音可変利得増幅器	柏卓夫、加藤隆幸、吉田直人、小丸真喜雄、谷野憲之、高木直、石原理	三菱電機
95	70							ミ波帯ヘテロ接合FET MMIC電圧制御発振器	大畑恵一、船橋政弘、井上隆、丸橋建一、細谷健一、葛原正明	ミリウエイブ
95	69							スリット付き積層型ウレキソソテ'イ'イ'タ'とそれを用いた3次元MMIC1ナフ'受信機	西川健二郎、豊田一彦、鴨川健司、徳光恒雄	NTTワイヤレスシステム研究所
95	66							低損失マイクロ波アクティブインダクタに関する一検討	林等、村口正弘	NTTワイヤレスシステム研究所
95	64							準光学ロク'ヘ'リ'ナフSISミキ	船澤佳徳、野口卓、川上彰、王鎮	郵政省通信総合研究所
95	63							150GHz帯SIS受信機の開発	岩下浩幸、砂田和良、川辺良平、稲谷順司	国立天文台
95	62							並列2接合を用いた100GHz帯SISミキ	史生才、野口卓、岩下浩幸、稲谷順司	国立天文台
95	57							衛星通信の技術動向	鯨島秀一	NTTワイヤレスシステム研究所
95	56							ミ波帯内の自動評価技術	加藤隆幸、柏卓夫、松林弘人、井上晃、高木直、石原理	三菱電機
95							18	DFB-LD/変調器集積化光源における低電圧・高出力化の検討	山崎裕幸、山口昌幸、飯田康隆、非元康雅、小松啓郎	NEC
95							17	負のチャープを持つ1.55μm帯電界吸収型光強度変調器の基本特性	山田光志、中村幸治、松井康浩、国井達夫、堀川英明、小川洋	沖電気工業
95							16	10Gb/s用MQW構造変調器集積化DFBレーザ	森戸健、佐藤恵二、小滝裕二、佐原リヤト	富士通
95	43						26	低温成長InGaAs/InAlAs MQWを用いた超高速光増幅器	高橋亮、河村裕一、岩村英俊	NTT光エレクトロニクス研究所
95	42						25	超高速LiNbO3光変調器	三冨修、野口一人、宮澤弘	NTT光エレクトロニクス研究所
95	35						18	光マイクロ無線通信方式の技術動向	小牧省三	大阪大学
95	17							移動帯通信の技術動向	山本平一	奈良先端科学技術大学院
95	13							60GHz帯MMIC広帯域高出力増幅器	井上隆、船橋政弘、大畑恵一、細谷健一、丸橋建一、牧野洋一、水谷浩、葛原正明	ミリウエイブ
95	12							多層構造を用いたミ波帯MMIC平衡型増幅器	今岡俊一、馬場清一、今井伸明	ATR
95	10							ミ波帯リッジ型MMICスリット	松井一浩、皆川晃、今井伸明	ATR
94			104					マルチキャリア情報伝送プラットフォーム実現のためのマルチキャリア多重技術の検討	土門渉、渋谷真、江村克己	日本電気
94			100					ブランチインテグレーション並み補償回路を適用したMQW-EA外部変調器によるSCM伝送実験	石井隆典、首藤晃一、佐藤憲史	NTTネットワークシステム研究所
94			99					150nm光ファイバ伝送装置の開発	吉田寿朗、石原正、金沢章弘、佐々木千春、柳下山紀夫、朱家幹司	日本電気
94			98					QAM500ch光伝送方式の開発	前田和貴、布施優、増田浩一、工藤義春、藤戸克行	松下電器産業
94	152	135						電波の人体影響とSAR計算	藤原修	名古屋工業大学
94	151	134						ミ波帯近距離伝搬波利用システムの研究開発動向	井原俊夫	郵政省通信総合研究所
94	138			151				ミ波帯MMIC誘電体共振発振器	船橋政弘、大畑恵一、井上隆、細谷健一、丸橋建一、葛原正明、金川潔、小林裕夫	ミリウエイブ
94	137				150			InAlAs/InGaAs/InP HEMTを用いた50GHz帯MMIC低雑音増幅器のゲート深さに対する感度解析	榎田洋太郎、榎本孝知、石井康信	NTT LSI研究所
94	136				149			W帯低雑音MMIC増幅器	吉永浩之、川崎久夫、安部文一郎、柴田清裕、徳田博邦	東芝
94	128				141			ミリ波応用システムの開発・実用化動向	瀧本幸男	ミリウエイブ
94	127				140			移動帯通信用携帯端末の小型、省電力化技術の動向	佐川守一、牧本三夫	松下電器産業
94						105		半導体レーザの雑音解析	中平勝也、大幡浩平、水野秀樹	NTTワイヤレスシステム研究所
94	94							フィルタ機能付き高利得・高感度モリソクHBT光検出器/光マイクロ波ミキ	上綱秀樹、山内佳紀、小川博世	NTTワイヤレスシステム研究所
94		115						光ファイバマイクロ無線通信方式におけるマルチキャリア変調器間の干渉の検討	岡田常雄、岡田実、小牧省三	大阪大学
94	72							ミリ波帯モノリシック低雑音増幅器	伊藤康之、中原和彦、堀家淑恵、佐倉武志、吉田直人、加藤隆幸、高木直、伊東康之	三菱電機
94	48							日本におけるミリ波応用システムの開発	瀧本幸男、井上明彦	ミリウエイブ
04	17							MESFETの光制御に関する一考察	中井賢也、鳥崎仁司、堤誠	京都工業繊維大学
93			100					サブキャリア光伝送の無線システムへの適用	大塚裕幸、大本隆太郎、清水達也	NTT無線システム研究所
93				101				室内無線通信システムへの空間伝送光通信方式の適用に関する一検討	東原芳樹、池田豊、塚本勝俊、森永規彦	大阪大学
93								QPSK多波伝送における周波数間隔と飽和特性の影響	岡村浩志、田中宏昌	NHK技術部

93	161		V帯モノリシック低雑音増幅器	中原和彦、伊藤康之、堀家淑恵、吉田直人、佐倉武志、巳浪裕之、高木直	三菱電機	
93	144	95	60GHz帯屋内伝搬特性と高速伝送特性の偏波依存性	真鍋武嗣、佐藤勝善、増沢博司、平和昌、井原俊夫、笠島善憲、山本克則	郵政省通信総合研究所	
93		83	60GHz帯室内受信電力分布特性	平和昌、藤原和紀、増沢博司、真鍋武嗣、水野光彦、笠島善憲、山本克則	郵政省通信総合研究所	
93	118	161	ミリ波応用システムを実現するための化合物半導体への期待	瀧本幸男、井上明彦、大畑恵一、齊藤民雄	ミリウエイブ	
93		68	光マイクロ波方式の60GHz帯における同一チャネル干渉に関する検討	朴潤賢、宮本伸一、小牧省三、森永規彦	大阪大学	
93		41	10Gb/s光伝送用送信・受信モジュール	峯尾尚之、山田光志、古川暎三、小林信夫、長井清、尾関幸宏、坂井俊二、牛窪孝	沖電気工業	
93		42	GaAs MESFET ICを用いた10Gbit/s 1.3μm帯LDとAPDとAPDとAPD	宮本裕、萩本和男、大畑正信、香川俊明、都築信頼、恒次秀起、西功雄	NTT伝送システム研究所	
93		85	光/マイクロ波融合領域の最近の研究動向	小川博世	NTT無線システム研究所	
93		86	縦接続型光外部変調器を用いたマイクロ波伝送の検討	中須賀好典、堀川浩二、小川博世	NTT無線システム研究所	
93		87	ミリ波帯マイクロセルラ無線システム用"光"基地局	ハワード・トマス	ATR	
93		73	56	光電気混在回路シミュレーション	佐野栄一、米山幹夫	NTT LSI研究所
93	39	29	HBT光検波機を用いたマイクロ波/ミリ波光ファイバリンクの伝送特性	末松英治、馬場清一、小川博世、今井伸明	ATR	
93	31	14	平衡型光外部変調器を用いたミリ波サブキャリア方式	ハワード・トマス	ATR	
92		174	超高速受信OEICアレイ	西山直樹、佐々木吾郎、矢野浩、村田道夫	住友電気工業	
92		61	124	コヒーレント光通信用GaAsアナログICの基本特性	山崎浩行、田中和夫、笠島正明、中村浩、前田英成、青木周生	沖電気工業
92		80	ミリ波帯無線搬送波・光り伝送システムの最適変調方式	原田博司、李靖珍、小牧省三、森永規彦	大阪大学	
92		54	54	10Gb/s光伝送用受信モジュール	長井清、小林信夫、尾関幸宏、古川暎三、坂井俊二、牛窪孝、秋山正博	沖電気工業
92		55	55	InGaAs MSM PD特性のバリエーション構造依存性	佐野栄一、米山幹夫、榎本孝知、玉村敏昭	NTT LSI研究所
92	56	43	マイクロ波・ミリ波デバイスによる光検出の検討	馬場清一、上綱秀樹、小川博世	ATR	
92	37	15	ミリ波サブキャリア伝送用光ファイバリンクの検討	小川博世、テグワット・ネリワ、馬場清一	ATR	
92		10	低雑音・広帯域ミックス型GaAs光通信用前置増幅器IC	御神村泰樹、稲野滋、鈴木富博	住友電気工業	
91	136	153	ミリ波帯モノリシック低雑音増幅器	植卓夫、中原和彦、細木健治、加藤隆幸、小崎克也、巳浪裕之、長浜弘毅、三井康郎	三菱電機	
91		66	131	High Speed Modulation Characteristics of Millimeter-Wave Fiber Optic Links	D.Polifko, H.Ogawa	ATR
91		65	130	光ファイバを用いたミリ波信号伝送ファイバ系の検討	小川博世、テグワット・ネリワ、上綱秀樹	ATR
90		128	InP系受光OEICの高感度化	内田直人、赤堀裕二、池田睦夫、幸前篤郎、天明二郎、吉田淳一、国分利直、首藤晃一	NTT光エレクトロニクス研究所	
90	97		60GHz帯低雑音増幅器	安部文一郎、増田和俊、生熊良行、川崎久夫、柴田清裕	東芝	
88		108	光受信機のOEIC化	牧内正男、浜口久志、和田修	富士通	
88		109	GaAs-on-InP材料を用いた長波長OEIC	鈴木明、伊東朋弘、鹿田実	日本電気	
88		110	マイクロ波移動帯通信システムにおける光ファイバリンクの特性の検討	渋谷真、金井敏仁、土門渉、江村克己	日本電気	

取引先

会社名	担当者名	TEL	FAX	所属	秘書	扱品目
京都光学	谷賀	075-781-1170				ニコン
Motorola		06-305-7223		無線		
丸文		075-212-5566 075-223-6841		京都営業所		Motorola社
松定プレジジョン株式会社	西村 健一	0775-61-2111	0775-61-2112	本社営業		APD電源
NTTパナソニック	脇田	0462-40-2821				電解吸気型EOM
アンテナ技研		048-685-1300	048-684-4144	業務部営業グループ		7777、マイクロ波部品
E&Cエンジニアリング		06-358-2977	06-358-2977	マーケティング部		電波吸気体、電波暗室
		0462-25-8852	0462-24-1348	技術第2課		
島田理化学工業		06-312-6875	06-361-2752	大阪営業所電子営業部電子営業課		導波管部品、ホーンアンテナ
宮崎電線工業		06-362-5071	06-362-5074	大阪支店営業課テレビ受信システム担当		セラミックテープ加工
日本写真印刷	森 康二	075-823-5252	075-823-5322	電子事業本部 関西営業部		HIC基板
雄島試作研究所	野田	(0422) 52 0167	(0422) 54 2632	雄島試作研究所社長		
国華電機	森田	0742-33-9931	0742-33-9902			線材、金属加工
旭立電設	井上 昇	キョウリフテック 06-931-2545	06-933-3021			
浜松ホトニクス	高田	053-434-6811	053-433-8031	システム第2営業部		PCM Modem
	犬塚勝英	053-435-1560	053-435-1574	第2設計部 第4部門		PCM光映像伝送装置
営電		03-3424-4651	03-3418-3119			回路設計
日本通信機株式会社	石川、中島(技術)	0462-86-6603	0462-86-1297	本社営業		回路設計、変復調器
電商	高橋	03-3436-0041	03-3437-0413			Mini circuit
村エントマイクロエプ	北村	0748-36-7861	0748-36-7863	本社営業		
アドバンテス		06-385-6611	06-385-6618	営業本部第2営業部大阪営業所		
ソニーテクノロジ	竹澤	075-212-2990	075-212-2993			
カスケードマイクロテック	根岸 一樹	03-3320-6410	03-3320-6475			
YHP	幸 裕	ミキエック 075-211-5174	075-211-2833	第2営業 近畿・中部計測G 室野 商子		
	加藤 伸之	06-301-9703	06-301-9741	電子計測営業本 第2営業部高周波テスタメント		MDS,Libra
YHP MAcenter	佐野	0120-421-345	0120-421-678	Measurement assistant center		
アンリツ	岸田	075-344-0111	075-344-2000	京都支店		
	茶木 蔵	チキキオキム 06-391-8811	06-391-8600	関西支店 システムエンジニアリング		
テクノ電子	古志 勝巳	06-477-2900	06-477-2901	計測器部 営業		電子部品
ニッポウ	池谷	06-374-0861				家電製品
セキナトロ	小原	06-386-1232	06-386-7033	大阪営業所		
理経	勝野	03-3345-2185	03-3345-2167	電子部品営業部 電子部品課		
扶桑商事	吉田 正樹	06-301-0777	06-301-3769			
総合電子	栗原、石井、米本(技術)	0423-37-4411	0423-37-1919			

取引先

会社名	担当者名	TEL	FAX	所属	秘書	扱品目
住友大阪セメント	高野 亮太郎	03-3296-9865	03-3295-5953	光電子事業部		EOM,Filter
住友大阪セメント	菊池 努	03-3296-9743	03-3295-5953	光電子事業部		ORTEL
住友大阪セメント		053-435-1580		第2設計部	第4部門	
ジャパニオン	高田	048-268-2015	048-268-1001	O&E事業部	光部品担当	光ファイバ
(株)フューテック	鈴木、警城	03-3495-0381	03-3495-0399		システム	レーザー、P D
テック(株)	佐久間 康文	043-297-3755	043-297-3997			レーザー
信光社	林 順一	03-3562-3981	03-3561-0519	光デバイス・基板営業部		ISO
(株)サビニールボックス	喜安 林三	03-3764-2271	03-3764-2267	真空薄膜研究所	真空蒸着のみ	Filter
住友電工(株)	今村	06-220-4361	06-222-6244	大阪光システム営業部		カブラ
八洲電機(株)	笹岡	075-351-8321	075-341-2675			レーザー(日立)
(有)ネオトロン	小林 洋子	03-3760-0150	03-3760-1768			レーザー
フジトク(株)	安藤	03-3909-1791	03-3908-6450			フィルタ
サンテック	三田	0427-57-4492	0427-57-4519		システム	レーザー、PIN
島津製作所	平野 孝宗	075-823-1482	075-822-9401			ISO、合波器
昭和電線(株)	三上	03-3597-7105		光通信営業部		カブラ、合波器
ネオプト	刈田	0466-28-9876	0466-28-9877		EG&G	レーザー、フィルタ
丸文	松田 英樹	06-301-1541	06-301-1991	関西支社		エレメント社(レーザー)
東京インシステム	竹林	06-393-7411	06-393-7055	大阪営業所		ILXシステム社
京都セラミック	中野 泰弘	075-92-3851	075-592-4711	光部品営業部	関西営業課	カプラー、ISO
安藤電気		03-3733-1166	03-3739-7363			Filter
大崎電気工業		03-3757-8534	03-3757-8552	光事業推進室		カブラ
オプトライン		03-3981-4421	03-3989-9608			LD,Filter
光伸光学工業	碓井 貴子	0463-75-3331	0463-75-3535			LD,Filter
光洋		03-3213-1571	03-3284-0167			ISO、カブラ
富士電気化学	中野	03-5473-4668	03-3434-1375	電子CE販促部		ISO、キネレタ
		06-448-3121	06-443-1833	大阪営業所		
理経	脇田	03-3345-2184	03-3345-2167		光計測器課	
TEM(株)	長澤	03-5683-3771	03-5683-3773			EOM,Filter
光アトラス	平野	075-255-1781	075-255-1780	京都営業所		OKI
菱電商事(株)	広瀬	06-399-3433		半導体第一部第一課		三菱
都築電産(株)	渡辺	075-221-8731				富士通
三笠商事						NEC
古河電工	菅田、山口	03-3286-3404	03-3286-3707	ファイナル製品部		カブラ、分波器
応用光電研究室	井原	048-445-6911	048-445-6901			Filter,LD
サンテック(株)	安、杉本	0568-79-3535	0568-79-3538			レーザー
住友電工	澤田	045-853-7263				InP HBT
住友セメント	土田、松本	03-3296-9854	03-3295-5933	光電子事業部		EOM
	箕輪	0474-57-0904				EOM
	下津臣一	0474-57-0904	0474-57-3993	中央研究所(エレクトロニクス研)		0.83umLD
旭テックシステム		044-855-7222	044-855-7728			レーザー電源
ナムテック	黒沢	045-592-2401	045-592-2402			レーザー電源
ハイテック	峯田	(03)3372-8241	03-3372-8288			Seastar Optics
村トモインス	鶴野、村上	03-3356-1064	03-3356-3466			
インデコ	高橋	03-3818-4011				マイクロコア社
	田村 貴光、カミナ	06-356-9303				
ヒエン電工	松尾	06-683-6201	06-683-6207			住友電工光ファイバ

索引

2 tone法 (23)

3次複合歪み (26)

APD (39)

Bessel関数 (19)

CTB (26)

HPT (42)

LiNbO₃ (10)

Mach-Zehnder型光変調器 (10)

MSM-PD (38)

PIN-PD (38)

Responsivity (12)

RIN (15)

サイドバンド法 (23)

ショット雑音限界 (18)

チャープ量 (10)

トランスインピーダンスアンプ (13)

トランスインピーダンスゲイン (14)

位相変化量 (19)

外部変調 (10)

光ヘテロダイン法 (23)

光帯域 (9)

振幅歪み (70)

進行波型変調器 (11)

相対強度雑音 (15)

遅延歪み (70)

直接変調 (9)

電界吸収型光変調器 (10)

電気帯域 (9)

内部ゲイン (51)

入力換算雑音電流 (14)

半波長電圧 (10)

微分量子効率 (10)

評価S/N (4)

分散 (57)

変換効率 (12)

変調度 (9), (19)

