

TR-O-0137

29

自己発振型光マイクロ波ミキサ

澤田 久

1996. 3.19

ATR光電波通信研究所

自己発振型光マイクロ波ミキサ

目次

1	まえがき	2
2	自己発振型光マイクロ波ミキサ A(整合回路付き)	2
2.1	設計	2
2.2	光マイクロ波ミキシング特性	3
2.2.1	IF 周波数 (f_{IF}) 依存性	3
2.2.2	IF 入力パワー (P_{IF}) 依存性	4
3	自己発振型光マイクロ波ミキサ B(整合回路なし)	5
3.1	設計	5
3.2	負性抵抗特性設計実測比較	6
3.3	光マイクロ波ミキシング特性	7
3.3.1	バイアス依存性および f_{IF} 依存性	7
3.3.2	P_{IF} 依存性	9
3.3.3	照射光強度 (P_{opt}) 依存性	9
3.3.4	発振周波数の高調波とのミキシング	10
3.4	光マイクロ波ミキサおよび光検波器との比較	11
4	バランス型自己発振型光マイクロ波ミキサ	14
4.1	設計	14
4.2	各部分回路の設計実測比較	15
4.3	光マイクロ波ミキシング特性	19
5	まとめ	22
	謝辞	
	参考文献	

1 まえがき

ATR 光電波通信研究所では、将来の移動体通信システムとして光ファイバミリ波リンクの検討を進めてきた [1]。これはミリ波無線通信技術と光ファイバ通信技術の融合であり大容量、高速移動通信システムを実現するための重要な技術であると考えられる。

光ファイバミリ波リンクでは、無線部分で使用するミリ波信号により変調された光を光ファイバにより伝送し、これを受けて無線基地局でミリ波に変換して送信する方法 [2] と、ファイバ中は中間周波数で変調された光を伝送し、無線基地局においては電気信号への変換とミリ波への周波数変換を行なう方法 [3] が考えられる。ミリ波を直接伝送する前者の方法と比較して、中間周波数で伝送する後者の方法は、無線基地局に周波数変換器が必要となる反面、電気 / 光、光 / 電気変換部に要求される帯域は狭くなり、LD 直接変調が可能となって制御基地局の構成が簡単になるという利点がある。したがって、中間周波数で変調した光信号を伝送する場合、無線基地局の小型化が重要になってくる。

そこで単一のトランジスタに光検波、発振、周波数変換の 3 つの機能を集約した、自己発振型光マイクロ波ミキサ (以下 soemix と表す) を提案し、中間周波数帯の強度変調光を検波し、ミリ波帯に近い周波数への周波数変換が可能であることを実証した。

本テクニカルレポートは HBT を用いた自己発振型光マイクロ波ミキサの設計および特性評価に関してまとめたものである。

2 自己発振型光マイクロ波ミキサ A (整合回路付き)

2.1 設計

回路構成を図 1 に示す。回路はエミッタに容量性スタブを接続し、ベース側に誘電体共振器を有する直列帰還型回路である。図 1 において点線部からベース側を見たときの反射係数が所望の周波数 (10GHz) で正の利得を持つように回路を最適化している。誘電体共振器は直径 7.75mm、高さ 3.10mm、比誘電率 24 であり、HBT のエミッタサイズは $3.4\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 1$ 本である。図 2 にモジュールの写真を示す。本回路を発振器として動作させた場合、バイアス点 $V_{be}=1.3\text{V}$ $V_{ce}=3\text{V}$ コレクタ電流 $I_c=19\text{mA}$ において、発振周波数 9.25GHz、発振出力 -2.8dBm を得た。

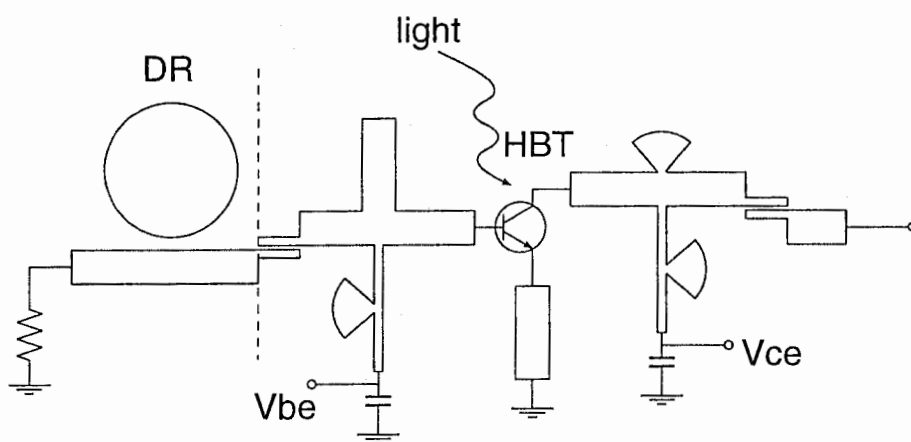


図 1: 回路構成

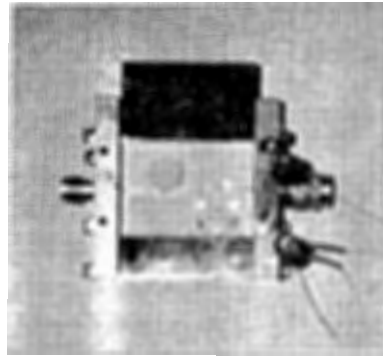


図 2: モジュール写真
アルミナ基板サイズ: 29.8mm×20mm

2.2 光マイクロ波ミキシング特性

光マイクロ波ミキサ特性評価系を図 3 に示す。LiNbO₃ 光導波路型外部変調器 (EOM) を用いて、サブキャリア周波数 IF で強度変調された 0.83μm 光を HBT の電極近傍に照射し、LO ± IF における出力レベルをスペクトラムアナライザで測定した。

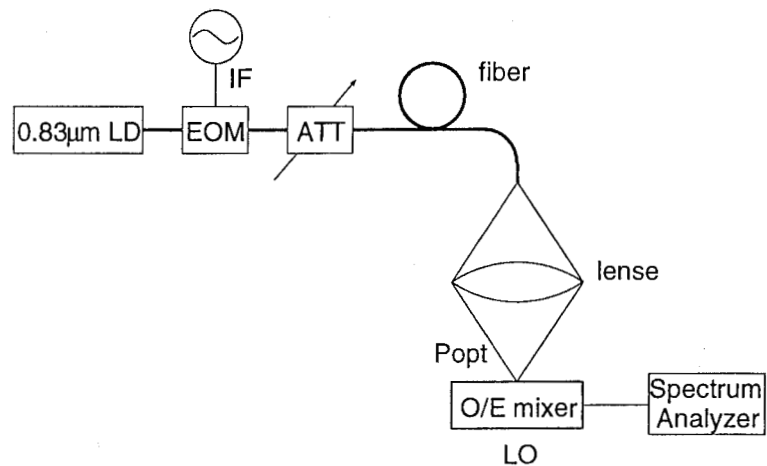


図 3: 評価系
LD: 住友セメント製
EOM: 住友セメント T.MZ 0.85-5 MZ2-35-47 No.292

2.2.1 IF 周波数 (f_{IF}) 依存性

照射光強度 0.598mW、EOM への IF 入力パワー 11.8dBm のときの IF 周波数依存性を図 4 に示す。 $f_{IF}=1.25\text{GHz}$ の時に最大の検出レベルが得られた。

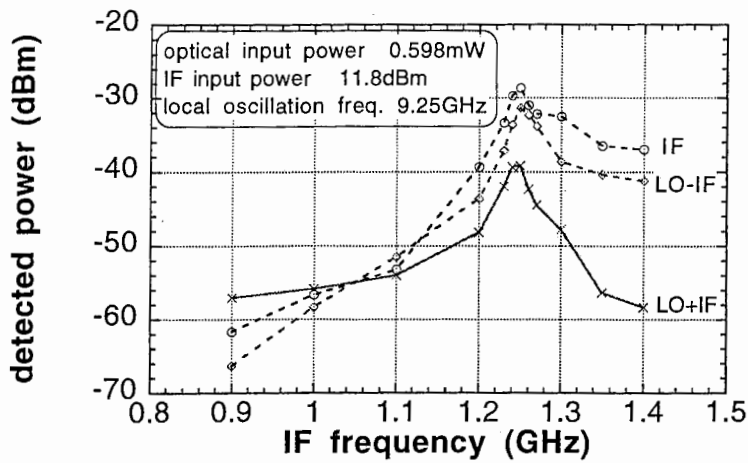


図 4: IF 周波数依存性

2.2.2 IF 入力パワー (P_{IF}) 依存性

IF 周波数を 1.25GHz、照射光強度を 0.598mW に固定し、EOM への IF 入力レベルを変化させたときの光マイクロ波ミキシング特性を図 5 に示す。IF 入力レベル 11.8dBm のとき LO-IF レベル -31.5dBm、LO+IF レベル -39.3dBm が得られた。EOM への IF 入力が 0dBm を超えると徐々に飽和が起こる傾向が見られる。

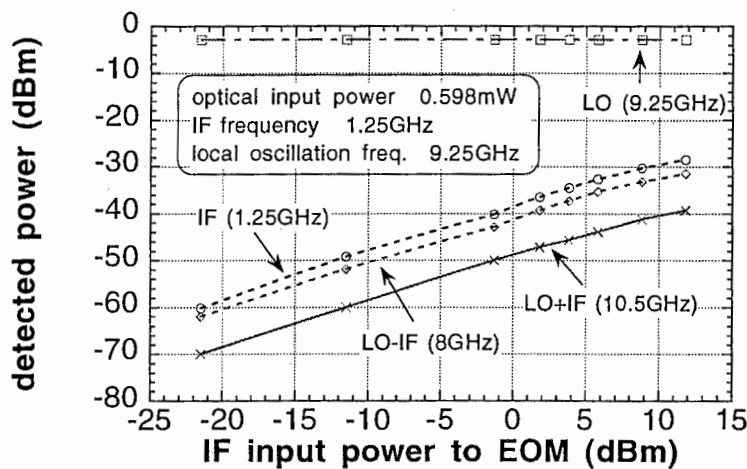


図 5: IF 入力パワー依存性

3 自己発振型光マイクロ波ミキサ B(整合回路なし)

3.1 設計

sooemixA では f_{IF} 依存性の原因がはっきりしなかった。そこで今回は整合回路、バイアス給電回路、DC 阻止回路を基板上に設けず、すべて 50Ω 線路により回路を構成し、バイアスはバイアス T にて給電する形をとった。なお HBT のエミッタサイズは $2\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 1$ 本であり、誘電体共振器は直径 7.35mm 、高さ 2.94mm 、比誘電率 24 である。モジュール概観を図 6 に、回路構成および評価系を図 7 に示す。

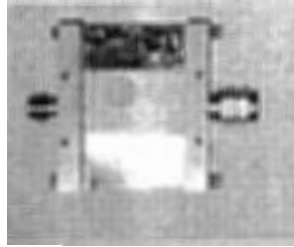


図 6: モジュール写真
アルミナ基板サイズ: $24.8\text{mm} \times 15\text{mm}$

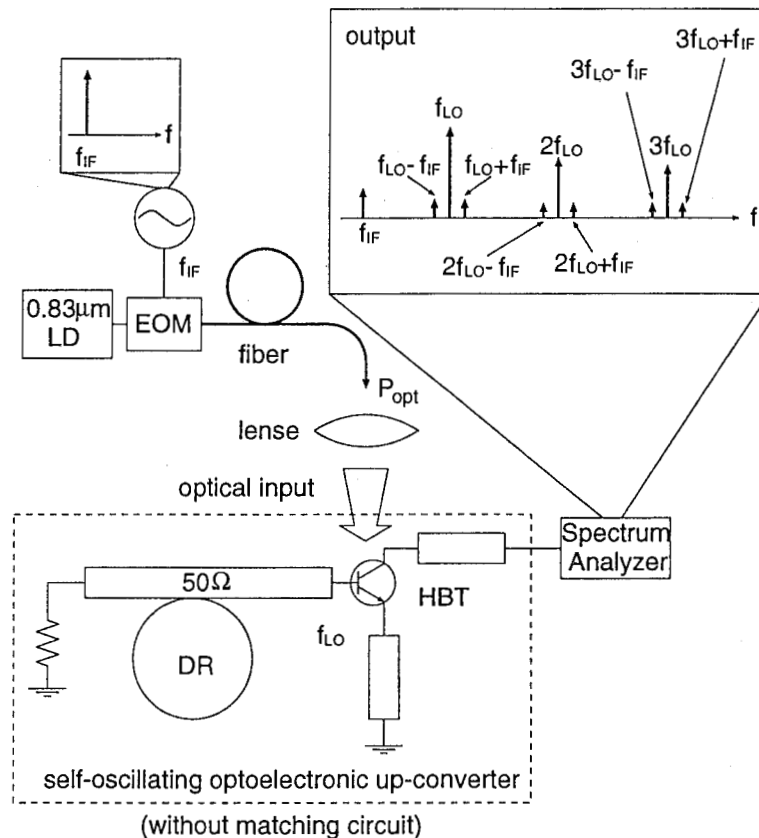


図 7: 回路構成および評価系
LD: SDL5431-B

3.2 負性抵抗特性設計実測比較

ベース側から見たときの反射係数 S_{11} について、設計値と実測値の比較を図8に示す。図中 calc が設計値、meas(UTF) は基板を WILTRON 社 UNIVERSAL TEST FIXTURE を用いて測定した値、meas(V connector) は基板をヒートシンクにのせ入出力端に V コネクタを取りつけた状態 (モジュール化した状態) で測定した値である。バイアスは $(V_{ce}[\text{V}], I_b[\mu\text{A}]) = (4, 50)$ であり、設計に用いたトランジスタの S パラメータは組み立てたトランジスタそのものの実測データではなく、同種のものの実測データを用いている。 S_{11} が最大となるピーク周波数に関しては設計と実測はよく一致している。設計に用いたネットリストを図9に示す。

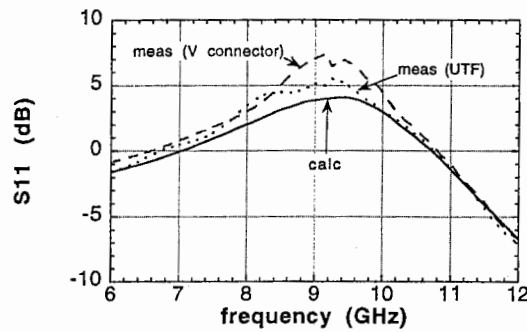


図 8: 負性抵抗特性の設計実測比較

```

! FILE NAME /usr2/home/sawada/soemix/sx1fuseicmp.ckt
! SX1
! calculation & measurement
DIM
  lng um
  cap pf
  ind nh
VAR
! negative resistance
w0=360
lb=400
lc=400
le=400
! lfb=4170
l11=0
l12=4100
lout=0000
lvia=0.01
lboffset=150
lcoffset=150
leoffset=100
EQN
  l14=19000-lboffset
  l01=5300-lcoffset
  lfb=4170-leoffset
CKT
  msub er=9.90 H=381 T=3 rho=1 rgh=0
  tand tand=0.008
! measured value
s1p 1 0 &
  /usr2/home/sawada/hbt_spar/2k10k1/nrutf/nr24v50.s1p
defip 1 measutf
s2p 1 2 0 &
  /usr2/home/sawada/hbt_spar/2k10k1/nrj1g/sx14v50.s2p
def2p 1 2 measj1g1
! negative resistance ckt

s2p 1 2 3 &
  /usr2/home/sawada/hbt_spar/2k10k1/no0/2k4v050.s2p
wire 1 4 d=20 l^lb rho=1 af=0 co=0a1=0 a2=0
wire 2 5 d=20 l^lc rho=1 af=0 co=0a1=0 a2=0
wire 3 6 d=20 l^le rho=1 af=0 co=0a1=0 a2=0
wire 3 6 d=20 l^le rho=1 af=0 co=0a1=0 a2=0
mlin 6 60 w^w0 l^lfb
mstep 60 61 w1^w0 w2=1500
mlin 61 62 w=1500 l=70
ind 62 0 l^lvia
  mloc 4 w^w0 l^lboffset
  mloc 5 w^w0 l^lcoffset
  mloc 6 w^w0 l^leoffset
def2p 4 5 nr
! output (collector side)
mlin 1 2 w^w0 l^l01
def2p 1 2 coll
! nr with output
nr 1 2
coll 2 3
def2p 1 3 nrcoll
! nr with in out (look from base side)
mlin 8 10 w^w0 l^l14
nrroll 10 12
def2p 8 12 nrcale
FREQ
  sweep 5.05 15.05 .1
OUT
  measutf db[s11] gr1
  measj1g1 db[s11] gr1
  nrcale db[s11] gr1
GRID
  range 5 15 1
  gr1 -10 10 2

```

図 9: soemixB 設計用ネットリスト

3.3 光マイクロ波ミキシング特性

3.3.1 バイアス依存性および f_{IF} 依存性

バイアスによるミキシングレベルの比較を図 10 に示す。基本波との光マイクロ波ミキシング成分 ($LO \pm IF$) に注目した場合、 $(V_{ce}, I_b) = (0.6, 70)$ の時に最大レベルが得られ、その次に $(4, 50)$ (ピンチオフ近傍) において高いミキシングレベルが得られた。

$(V_{ce}, I_b) = (4, 40), (0.6, 70)$ の時の f_{IF} 依存性を図 11 に示す。図 11 には発振周波数の第 2 高調波とのミキシング特性を同時に示している。 $(V_{ce}, I_b) = (0.6, 70)$ のほうが $LO \pm IF$ レベルは大きいだが $2LO \pm IF$ レベルについては 10dB 程度低くなっている。これ以降は高調波とのミキシングでも高いレベルが得られる $(V_{ce}, I_b) = (4, 50)$ にのみ注目して検討を行なうものとし、図 12 に IF 入力パワー 10dBm、照射光強度 0.806mW の時の基本波および 2 倍高調波との光マイクロ波ミキシング特性を示す。

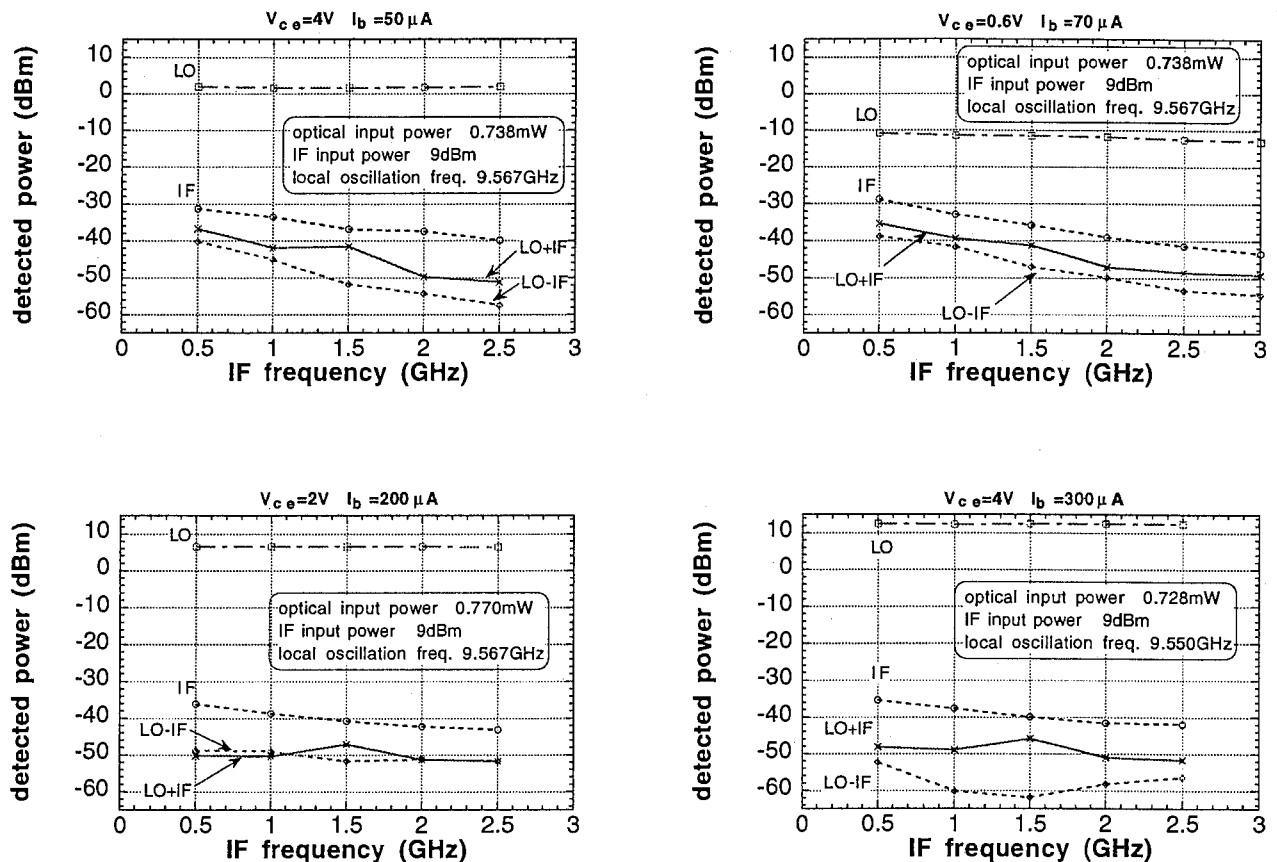


図 10: バイアスによる光マイクロ波ミキシング特性比較

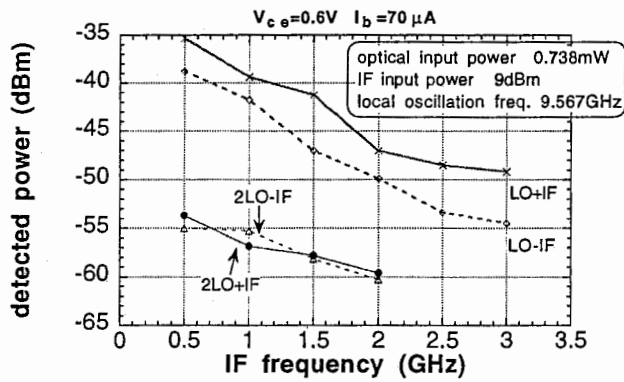
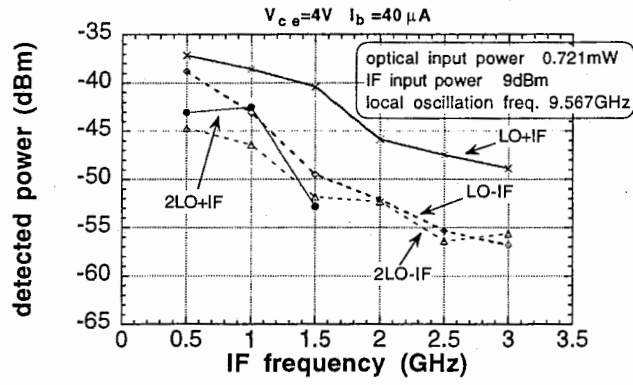


図 11: バイアスによる2倍高調波との光マイクロ波ミキシング特性比較

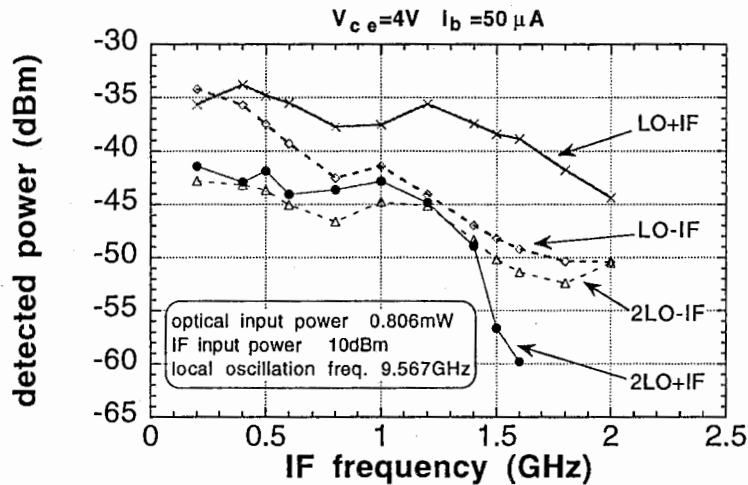


図 12: 基本波および2倍高調波との光マイクロ波ミキシング特性

3.3.2 P_{IF} 依存性

$f_{IF}=0.2\text{GHz}, 1\text{GHz}$ の時の P_{IF} 依存性をそれぞれ図 13 および図 14 に示す。いずれの f_{IF} についても $P_{IF}=10\text{dBm}$ 近傍で飽和している。特に $f_{IF}=0.2\text{GHz}$ では $P_{IF}=10\text{dBm}$ になると検出レベルが減少しており、過変調となっているものと考えられる。線形に増加している部分の傾きは $\tan\theta = 1$ である。

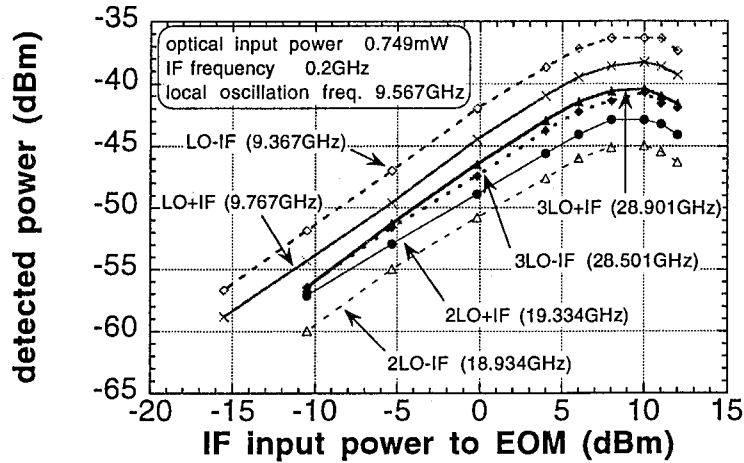


図 13: 光マイクロ波ミキシング特性の IF 入力依存性 (1)

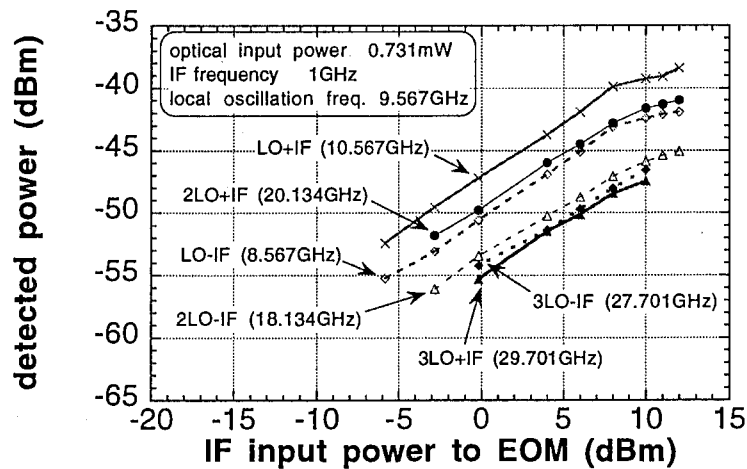


図 14: 光マイクロ波ミキシング特性の IF 入力依存性 (2)

3.3.3 照射光強度 (P_{opt}) 依存性

$f_{IF}=0.2\text{GHz}, 1\text{GHz}$ の時の P_{opt} 依存性をそれぞれ図 15 および図 16 に示す。いずれの場合も検出レベルの飽和は見られず、受光器の二乗検波特性に従い傾き $\tan\theta = 2$ で増加している。

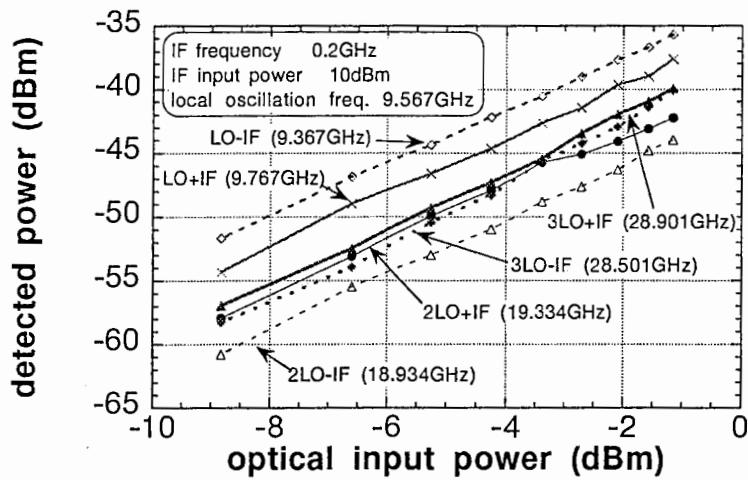


図 15: 光マイクロ波ミキシング特性の照射光強度依存性 (1)

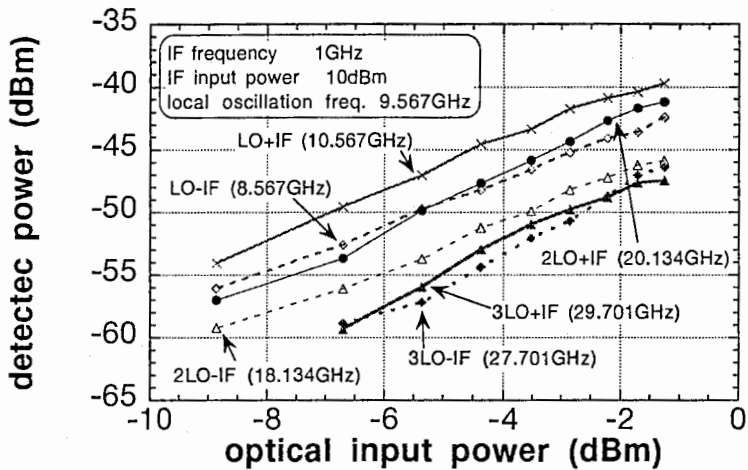


図 16: 光マイクロ波ミキシング特性の照射光強度依存性 (2)

3.3.4 発振周波数の高調波とのミキシング

これまで示してきたように発振周波数とのミキシングだけでなく、高次の高調波とのミキシングも可能である。図 15 に示した $f_{IF}=0.2\text{GHz}$, $P_{IF}=10\text{dBm}$ で P_{opt} を変化させたときの光マイクロ波ミキシング特性を、ミキシング成分 (LO-IF, 2LO-IF, 3LO-IF) と発振周波数成分 (LO, 2LO, 3LO) との比であらわした結果を図 17 に示す。基本波とのミキシングレベル (LO-IF) に比べて検出レベルそのものは劣るものの、本来不要な発振成分との比では高調波とのミキシング成分のほうが優れている。

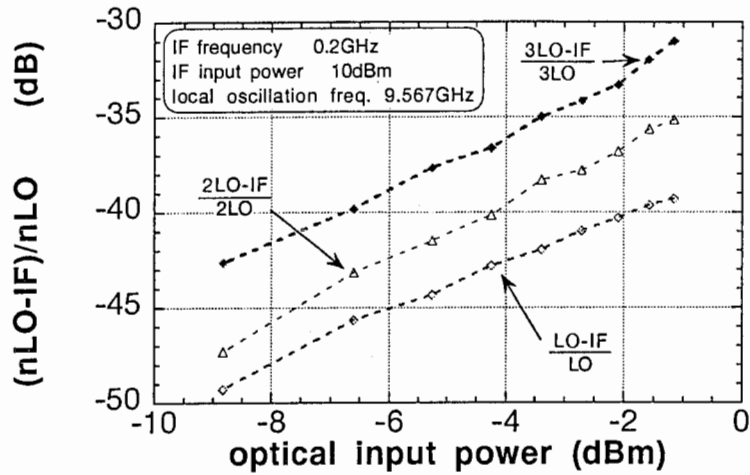


図 17: ミキシング成分と発振周波数成分との比

3.4 光マイクロ波ミキサおよび光検波器との比較

図 18に、外部から LO 信号を供給する通常の光マイクロ波ミキサ (oemix と表す) および光検波器の評価系を示す。oemix について LO 信号周波数 $f_{LO}=9.567\text{GHz}$ (sooemixB の発振周波数と同じ) とした場合 LO 信号パワーを変化させた時の光マイクロ波ミキシング特性を図 19 に示す。RF プロブへの入力パワーが 0dBm を越えるとミキシングレベルが飽和する。

f_{IF} を変化させた時の自己発振型光マイクロ波ミキサ (sooemix) と oemix との比較を図 20 に示す。oemix において P_{LO} to probe=0dBm とあるのは図 19 において $LO\pm IF$ レベルが飽和する時の LO 信号パワーである。 $f_{IF} < 0.5\text{GHz}$ では両側波帯ともに sooemix のほうが優れている。 $f_{IF} > 0.5\text{GHz}$ になると sooemix の $LO-IF$ は oemix に比べ明らかに劣化するが、 $LO+IF$ は oemix と同程度の検出レベルが得られている。これより sooemix が oemix と同程度の検出レベルが得られることがわかった。

sooemix、oemix および光検波器 (直接検波) の検出レベル比較を図 21 に示す。各データ点の x 座標は、光検波器では変調周波数 f_{RF} そのものを、oemix および sooemix ではミキシング成分の周波数を表している。oemix については変調周波数は $f_{IF}=0.2\text{GHz}$ で固定し LO 周波数 f_{LO} を変化させている。LO 信号パワー P_{LO} は RF プロブへの入力パワーが 0dBm となるようにした。sooemix については $LO\pm IF$ 、 $2LO\pm IF$ 、 $3LO\pm IF$ を $f_{IF}=0.2\text{GHz}, 1\text{GHz}$ の場合について示している。光検波器については最大検出レベルが得られるバイアスを設定している。 $LO\pm IF$ 、 $2LO\pm IF$ については直接検波および oemix と同程度の検出レベルであるが、 $3LO\pm IF$ については直接検波および oemix よりも優れた検出レベルが得られた。

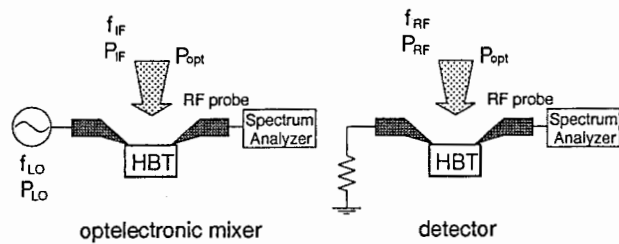


図 18: 光マイクロ波ミキサおよび光検波器評価系

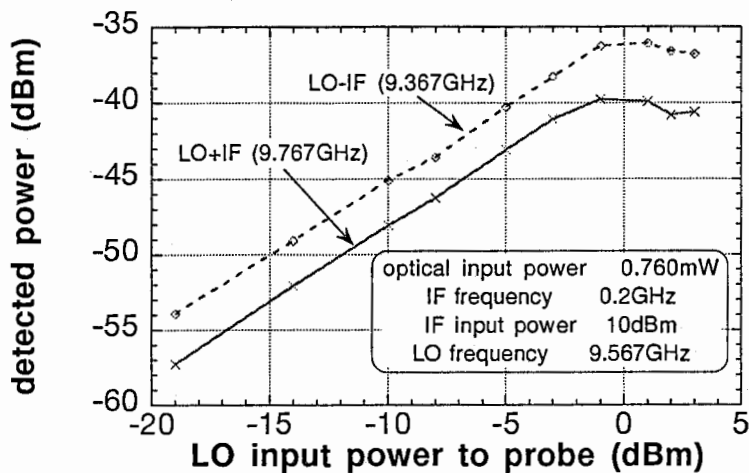


図 19: 光マイクロ波ミキサ LO 入力依存性

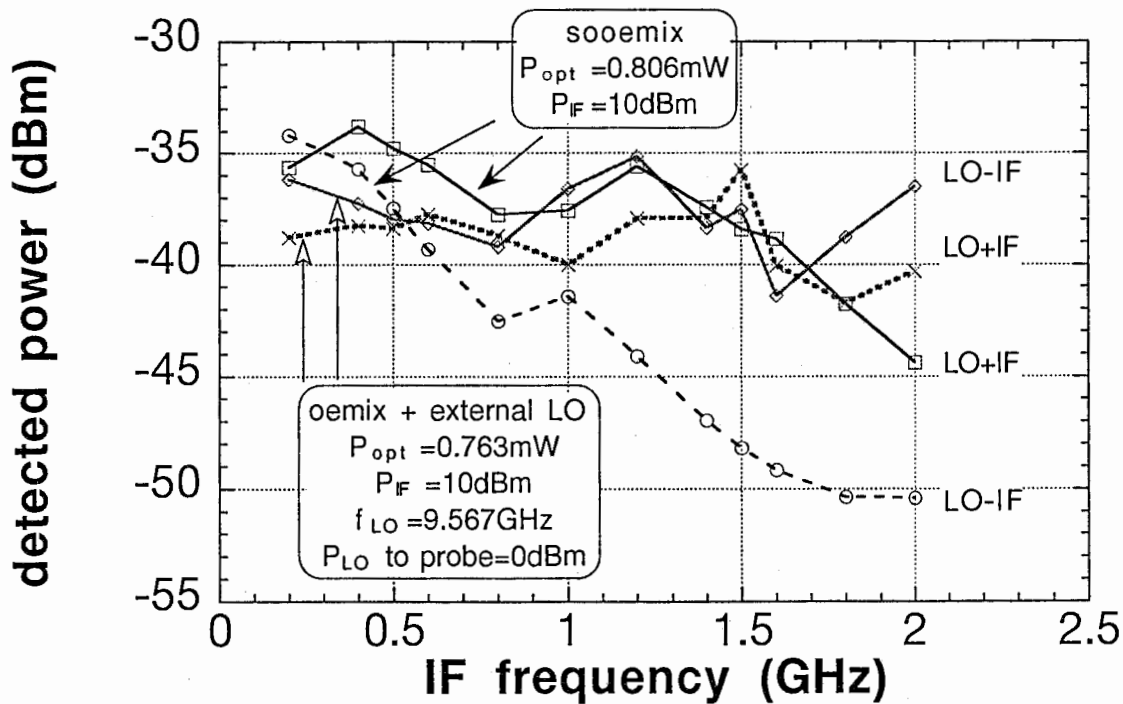


図 20: 光マイクロ波ミキサとの比較 (f_{IF} 依存性)

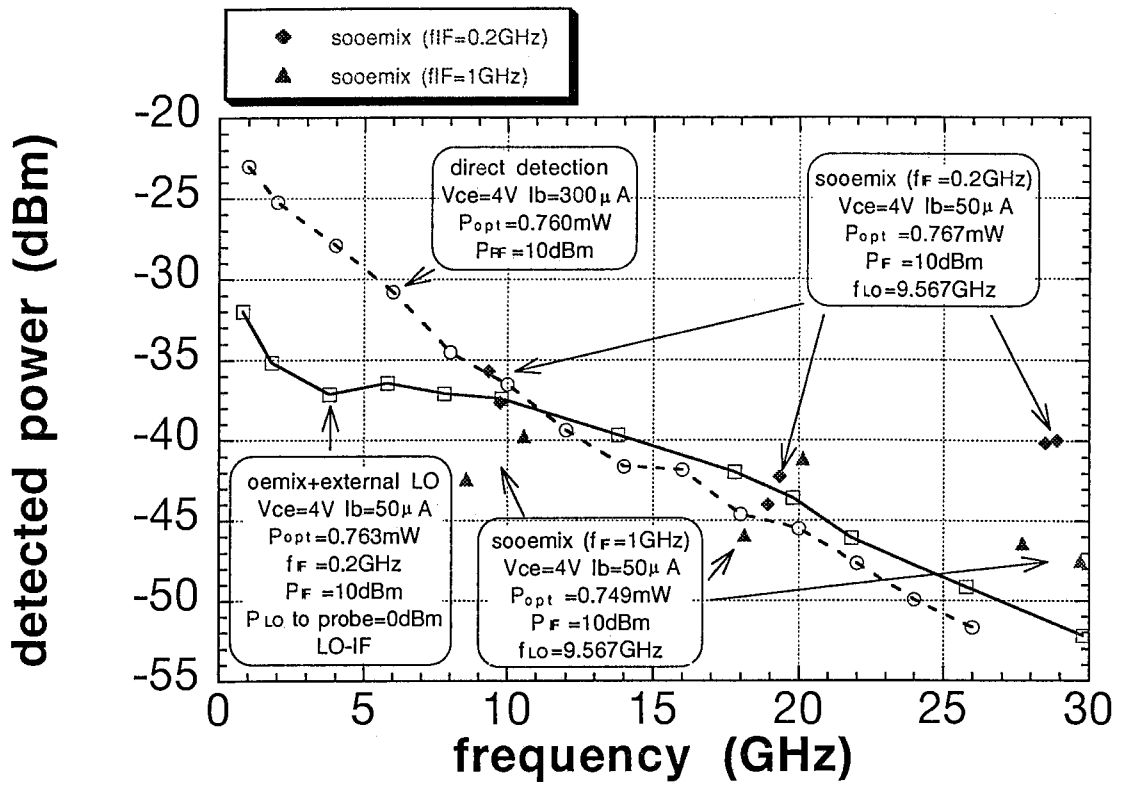


図 21: 受光器、光マイクロ波ミキサとの比較

4 バランス型自己発振型光マイクロ波ミキサ

ここでは発振周波数成分抑圧のため sooemix を 2 つ用いてバランス化させた回路の設計を行った。回路の概要を図 22 に示す。DR を各 HBT に対して共通にすることで各々の発振成分 LO は互いに逆相となる。各 HBT には互いに逆相となるよう強度変調した光を照射する。各 sooemix の出力を同相合成することにより LO は打ち消され LO±IF は同相となり、LO±IF のみを取り出すことが原理的に可能となる。

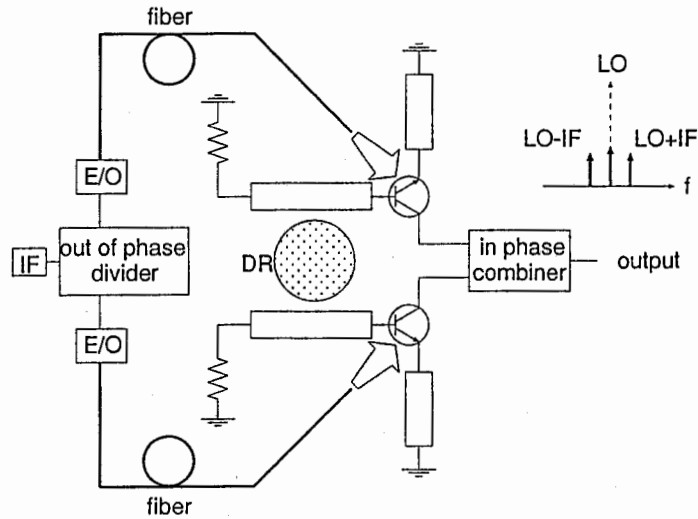


図 22: バランス型 sooemix

4.1 設計

回路構成を図 23 に示す。トランジスタは sooemixB に用いたものと同じエミッタサイズの HBT を用い、ベース側の終端は抵抗体を用いスルーホールにて接地している。整合回路は設けず、バイアス給電回路および DC 阻止回路を基板上に付加している。図 24 にモジュール写真を示す。

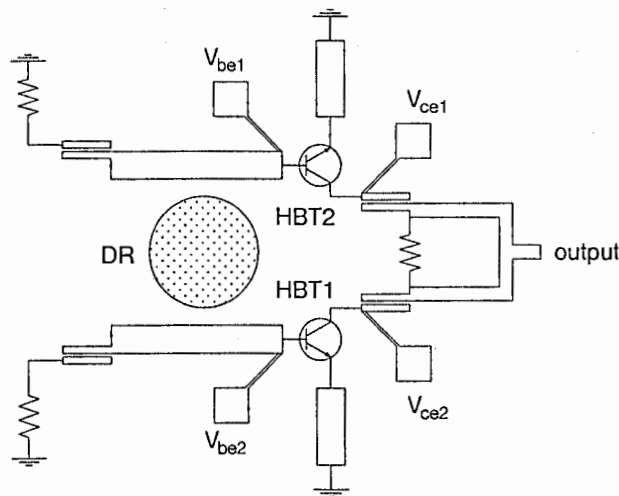


図 23: バランス型 sooemix 回路構成

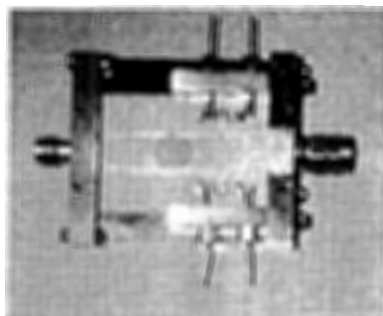


図 24: バランス型 soemix モジュール写真
アルミナ基板サイズ：34.8mm×23.9mm

4.2 各部分回路の設計実測比較

回路には 50Ω 終端、DC 阻止回路、同相合成回路を含んでいるので各要素回路ごとに個別に基板を作製しその実測値と設計値の比較を行なった。各回路を図 25 に示す。

(a) 終端回路

図 26 に終端回路のリターンロス特性を示す。設計値と比べて 15dB 程度リターンロスが悪い。スルーホールと抵抗との間の metal がずれの原因であると考えられるが、設計値を実測値と一致させることはできなかった。

(b) DC 阻止回路

図 27 に DC 阻止回路の反射 (S11) および通過 (S21) 特性を示す。DC から 20GHz にかけては設計値とほぼ一致する。

(c) 同相合成回路

図 28 にアイソレーション特性、通過特性を示す。計算値に関しては終端部を (a) 終端回路で測定した実測データを用いている。いずれも 20GHz までは設計値とほぼ一致する。

上記 3 種のネットリストおよび soemix 全体の設計に用いたネットリストを図 29,30,31,32 に示す。

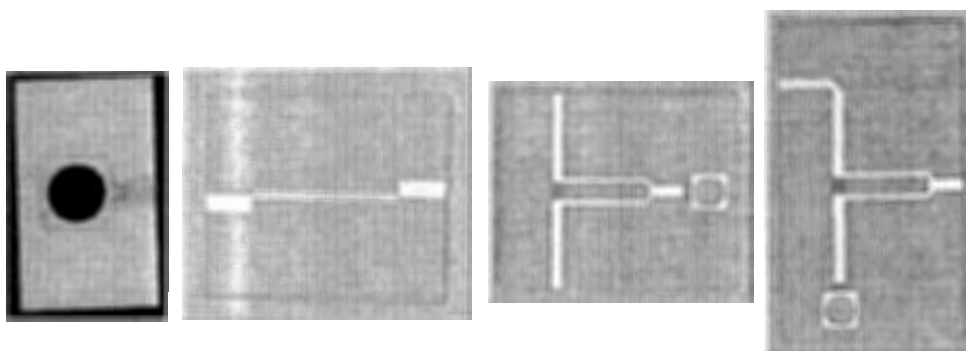


図 25: 要素回路写真

左から終端回路 (2.42mm×3.96mm)、DC 阻止回路 (5.19mm×4.36mm)、同相合成回路 [アイソレーション評価用](8.14mm×6.55mm)、同相合成回路 [挿入損失評価用](6.22mm×10.63mm)

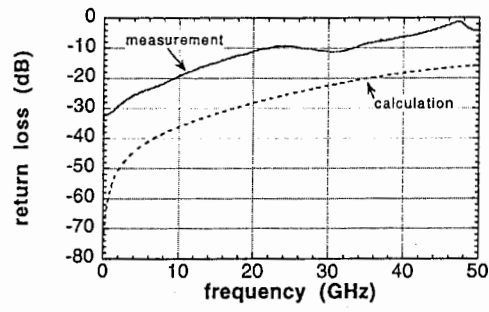


图 26: 终端回路实测计算比较

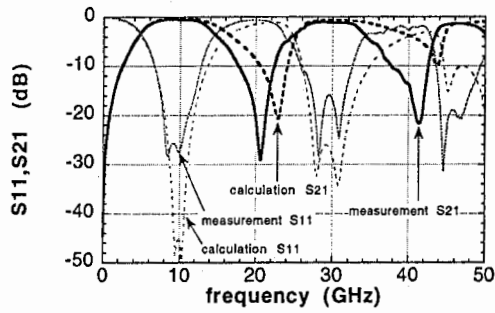


图 27: DC 阻止回路实测计算比较

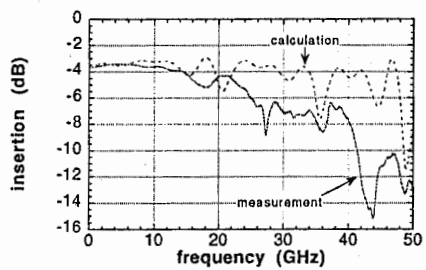
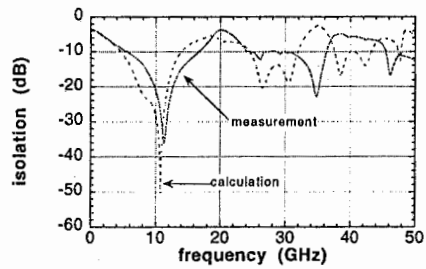


图 28: 同相合成回路实测计算比较

```

! FILENAME :termteg.ckt
! 1995 11 30
!
DIM
freqghz
lng um
cap pf
ind nh
CKT
MSUB ER=9.9H=381 T=3 RHO=1 RGH=0
TAND TAND=0.008
!measured value
slp 1 0 /usr2/home/sawada/socemix/spar/termpl.slp
deflp1 measpl
m1in 1 2 w=360 l=500
res 2 30 r=50
m1in 3 3 w=1200 l=100
shor 3
! via 3 4 d1=1000 d2=1000 h=381 t=3 w=1200
! mloc 3 w=1200 l=100
! mloc 3 w=1200 l=100
! mloc 3 w=1200 l=100
! shor 4
deflp1 calc
FREQ
sweep 0.05 50.05 0.1
OUT
calc db[s11]gr1
measpl db[s11]gr1
GRID
range 0 50 5
gr1 -60 0 5

```

図 29: 終端回路ネットリスト

```

! FILENAME dccut.ckt
! DC CUT FILTER
!
DIM
lng um
cap pf
ind nh
VAR
wfil#38.160 370
sfil#38.140 200
lfil=3190
CKT
msub er=9.90H=381 T=3 rho=1 rgh=0
tand tand=0.008 !at10MHz
!measured value
s2p 1 2 0 &
/usr2/home/sawada/socemix/spar/dccut.s2p
def2p 1 2 meas
!dccutfilttexteg
mcfil1 1 2 w*wfil s*sfil l*lfil w1^wo w2^wo
def2p 1 2 dccutfil
m1in 1 2 w=360 l=1000
dccutfil2 3
m1in 3 4 w=360 l=1000
def2p 1 4 calc
m1in 1 20 w=360 l=1000
mstep 20 2 w1=360 w2=60
dccutfil2 3
mstep 3 30 w1=60 w2=360
m1in 30 4 w=360 l=1000
def2p 1 4 calcstep
FREQ
sweep 0.0549.950.1
OUT
meas db[s11]gr1
meas db[s21]gr1
calc db[s11]gr1
calc db[s21]gr1
! calcstepdb[s11]gr1
! calcstepdb[s21]gr1
! dccutfikb[s11]gr1
! dccutfikb[s21]gr1
GRID
range 0 50 5
gr1 -40 0 5

```

図 30: DC 阻止回路ネットリスト

```

! FILENAME :
! /usr2/home/sawada/socemix/divteq.ckt
! WILKINSON POWER DIVIDER
! 1995 9 23
! HISASHI SAWADA
DIM
lng um
cap pf
VAR
w0=360
la=1000
lb=0
w1=160 !160--9.567G 170--28.701G
lq=3120 !3120-9.567G 1000--28.701G
lq1=97 !120-23.4314575
lq2=2877 !2900-23.4314575
! lb1=2922 !2975-52.72077938
! lb1=2762 !2975-160-52.72077938
! lb2=1747 !1800-52.72077938
mb=0.646 10.646
CKT
msub er=9.9 h=381 t=3 rho=1 rgh=0
tand tand=0.008
!!#measured value
s2p 1 2 0 &
/usr2/home/sawada/socemix/spar/diviso.s2p
def2p 1 2 isomeas
s2p 1 2 0 &
/usr2/home/sawada/socemix/spar/divthru.s2p
def2p 1 2 thrumeas
slp 1 0 &
/usr2/home/sawada/socemix/spar/termpl.slp
deflp1 termmeas
!!!!
m1in 1 2 w=360 l=500
res 2 30 r=50
m1in 3 3 w=1200 l=1000
shor 3
deflp 1 termcalc
m1in 1 2 w^w0 l^la
mtee 33 3 2 w1^w1 w2^w1 w3^w0
m1in 3 4 w^w1 l^lq1
mbend 4 5 w^w1 ang=90 m^mb
m1in 5 8 w^w1 l^lq2
mtee 6 7 8 w1^w0 w2^w0 w3^w1
m1in 33 34 w^w1 l^lq1
mbend 35 34 w^w1 ang=90 m^mb
m1in 35 38 w^w1 l^lq2
mtee 36 37 38 w1^w0 w2^w0 w3^w1
m1in 7 9 w^w0 l=2815!2975-160
m1in 36 39 w^w0 l=2815!2975-160
res 6 37 r=100
def2p 9 39 isocalc
FREQ
sweep 0.0550.050.1
OUT
isocalc db[s21]gr1
isomeas db[s21]gr1
thrucalc db[s12]gr2
thrumeas db[s21]gr2
GRID
range 0 50 5
gr1 -40 0 5
gr2 -20 -0 2

```

図 31: 同相合成回路ネットリスト

```

! FILENAME /usr2/home/sawada/sooemix/sooemix.ckt
! SINGLE TYPE SOOEMIX
! BALANCED TYPE SOOEMIX
! UNIT SOOEMIX
!
! 1995.9.20H.S
DIM
lng um
cap pf
ind nh
VAR
!dr equivalentckt
RDR=259.0
CDR=116.0
LDR=0.002184
!negativeresistance
w0=360
lb=400
lc=400
le=400
! lfb=4170
lfb20=1230
l11=0
l12=4100
lout=0000
lvia=0.01
lboffset=50
lcoffset=50
leoffset=30
!div
w1=160
l1a=1000
lq=3120 !3120-9.567G 1000--28.701G
lq1=97 !120-23.4314575
lq2=2877 !2900-23.4314575
lb1=2922 !2975-52.72077938
lb2=587 !640-52.72077938
mb=0.646 !0.646
!bias
WA=50
LA=3220
CA=200
RA=1000
!dcut
wfil=60
sfil=40
lfil=3190
!output (collectoside)
! lo1=1000
lo2=000
lo3=1500
!input (baseside)without dr
l11=500
l12=0000
l13=13720
! l14=1000
EQN
l14=1000-lboffset
lo1=1000-lcoffset
lfb=4170-leoffset
CKT
msub er=9.90H=381 T=3 rho=1 rgh=0
tand tand=0.008
!measured value
s2p 1 2 0 &
/usr2/home/sawada/hbt_spar/2k10k1/nrutf/nr74v42.s2p
def2p 1 2 measutf
! negativeresistanceckt
s2p 1 2 3 &
/usr2/home/sawada/hbt_spar/2k10k1/13438.s2p
wire 1 4 d=20 l^lbrho=1af=0 co=0al=0 a2=0
wire 2 5 d=20 l^lcrho=1af=0 co=0al=0 a2=0
wire 3 6 d=20 l^lcrho=1af=0 co=0al=0 a2=0
wire 3 6 d=20 l^lcrho=1af=0 co=0al=0 a2=0
m1in 6 60 w^w0 l^lfb
mstep 60 61 w1^w0 w2=1500
m1in 61 62 w=1500 l=70
ind 62 0 l^lvia
mloc 4 w^w0 l^lboffset
mloc 5 w^w0 l^lcoffset
mloc 6 w^w0 l^leoffset
def2p 4 5 nr
!div
m1in 1 2 w^w0 l^l1a
mtee 33 3 2 w1^w1 w2^w1 w3^w0
m1in 3 4 w^w1 l^lq1
mbend 4 5 w^w1 ang=90 m^mb
m1in 5 8 w^w1 l^lq2
mtee 6 7 8 w1^w0 w2^w0 w3^w1
m1in 33 34 w^w1 l^lq1
mbend 35 34 w^w1 ang=90 m^mb
m1in 35 38 w^w1 l^lq2
mtee 36 37 38 w1^w0 w2^w0 w3^w1
m1in 7 9 w^w0 l^lb1
mbend 9 10 w^w0 ang=90 m^mb
m1in 10 11 w^w0 l^lb2
m1in 36 39 w^w0 l^lb1
mbend 40 39 w^w0 ang=90 m^mb
m1in 40 41 w^w0 l^lb2
res 6 37 r=100
def3p 1 11 41 div
!biascircuit
m1in 1 2 w^wa l^l1a
m1in 2 3 w=2000 l=500
m1in 3 4 w=2000 l=1500
cap 4 0 c^ca
def2p 1 3 biasa
!dcut
mcfil 1 2 w^wfiles^sfil l^lfi w1^w0 w2^w0
def2p 1 2 dcutfil
!drequivalentcircuit
PRLC 1 2 R^RDR L^LDR C^CDR
DEF2P 1 2 DR
!output (collectoside)
m1in 1 2 w^w0 l^lo1
mtee 2 3 4 w1^w0 w2^w0 w3^wa
biasa 4 5
m1in 3 6 w^w0 l^lo2
dcutfil 6 7
m1in 7 8 w^w0 l^lo3
def3p 1 8 5 coll
!input (baseside)without dr
ind 1 0 l^lvia
res 1 2 r=50
m1in 2 3 w^w0 l^li1
dcutfil 4
m1in 4 6 w^w0 l^li2
m1in 6 7 w^w0 l^li3
mtee 7 8 9 w1^w0 w2^w0 w3^wa
m1in 8 10 w^w0 l^li4
biasa 9 11
def2p 10 11 basewdr
mtee 7 8 9 w1^w0 w2^w0 w3^wa
biasa 9 11
def3p 7 8 11 teebias
mtee 7 8 9 w1^w0 w2^w0 w3^wa
def3p 7 8 9 tee
!input (baseside)with dr
ind 1 0 l^lvia
res 1 2 r=50
m1in 2 3 w^w0 l^li1
dcutfil 4
m1in 4 5 w^w0 l^li2
dr 5 6
m1in 6 7 w^w0 l^li3
mtee 7 8 9 w1^w0 w2^w0 w3^wa
m1in 8 10 w^w0 l^li4
biasa 9 11
def2p 10 11 basewdr
!nrwith output
nr 1 2
coll 2 3 4
def2p 1 3 nrccoll
!nrwith inout (lookfrom base side)
m1in 2 3 w^w0 l^li1
dcutfil 4
m1in 4 6 w^w0 l^li2
m1in 6 7 w^w0 l^li3
mtee 7 8 9 w1^w0 w2^w0 w3^wa
m1in 8 10 w^w0 l^li4
biasa 9 11
nrccoll 10 12
def2p 2 12 nrbc
!nrwith inout div
nrbc 1 2
div 3 2 4
def3p 1 3 4 nrbediv
!RESONATOR CIRCUIT #1
MLIN 1 2 W^W0 L^L11
RES 1 0 R=50
DR 2 3
MLIN 3 4 W^W0 L^L12
DEF1P 4 RES01
!osc circuit
nr 1 2
m1in 2 3 w^w0 l^lout
res 3 0 r=50
def1p 1 nrwloss
resol 1
nr 1 2
m1in 2 3 w^w0 l^lout
def1p 3 osc
FREQ
sweep 5.0515.05 .2
OUT
! measutf db[s11] gr1
! measutf db[s21] gr1
! nr db[s11] gr1
! nrccoll db[s11] gr1
nrbc db[s11] gr1
! nrbc ang[s11] gr1a
coll db[s11] gr2
coll db[s21] gr2
coll db[s13] gr2
GRID
range 5 15 1
gr1 -5 5 1
! gr1a -10 10 5
gr2 -50 0 5
gr3 -50 50 10

```

図 32: バランス型 sooemix 回路設計用ネットリスト

4.3 光マイクロ波ミキシング特性

図 23 のような構成でそのまま実験しようとする と LD、EOM が 2 組 必要になる。2 組の EOM の特性 (光応答特性、EOM の光路長の違い) をそろえることは難しい。そこで図 33 に示すような実験系により評価を行なった。HBT への光照射はレンズではなく先球ファイバを用いている。光路 1 および光路 2 の光強度変調信号 (周波数 f_{IF}) の位相を逆相にするために光可変遅延器 (VODL) で光路長を変え、ATT により両光路の光パワーを等しくなるように調整している。評価の手順は以下の通りである。

- (1) 光を照射しない状態で各 HBT のバイアスを発振出力が最小となる (バランス化する) ように調整する。
- (2) VODL の空間長 D を適当な値 (たとえば $D=0\text{mm}$) にして path 2 のみ光照射したときの LO-IF を測定する。
- (3) path 1 のみ光照射し、LO-IF が (2) で測定した LO-IF レベルになるように ATT を調整する。
- (4) path 1、path 2 ともに光照射して LO-IF レベルを測定する。
- (5) (4) での検出レベルが (2)(3) のレベルに比べて最も増大 (理論的には 6dB 増大) するように ATT、 D を調整しながら (2) ~ (4) を繰り返す。

光を照射しない場合の発振特性を表 1 に示す。表には基本発振周波数から 5 次高調波までを示す。 V_{bc1} を固定し V_{bc2} を増加させると発振出力が減少することから、各々の HBT による発振出力は互いに逆相となって打消しあっていることが分かる。変調周波数 $f_{IF}=1.0\text{GHz}, 1.5\text{GHz}, 2.0\text{GHz}$ の時の光マイクロ波ミキシングレベルを表 2, 3, 4 に示す。表中の P_{opt} はそれぞれ ATT, VODL 出力端でのパワーであり (先球ファイバからの出力ではない)、 P_{opt} が soemixB の実験時の数百 μW に比べて小さいのはコネクタ接続損を含む光路 1、2 の損失が大きいためである。path1 path2 の P_{opt} が必ずしも一致していないのは、

- ・コネクタの接続損の違い
- ・各 HBT の個体差
- ・各 HBT の光結合効率の違い
- ・各 HBT のコレクタ以降出力ポートまでの線路特性の不一致 (ワイヤボンド長さ等)

等によるものである。いずれの場合も各光路からの LO-IF レベルについては同相に近い状態で合成されることが分かる。LO との比 $\frac{LO-IF}{LO}$ は $-17 \sim -12\text{dB}$ となった。

比較のため、 $f_{IF}=1\text{GHz}$ のときの soemixB の場合の特性を表 5 に示す。soemixB の方が光照射強度 P_{opt} は大きい が、 P_{opt} が小さい程 $\frac{LO-IF}{LO}$ が劣化する (図 17 参照) ことから、バランス型にすることで LO との比が 30dB 程度改善されることがわかる。また $f_{IF}=1\text{GHz}$ のとき P_{IF} を変化させた時の LO \pm IF レベルを図 34 に示す。 $P_{IF}=10\text{dBm}$ を過ぎると飽和し始め、過変調となっているものと考えられる。線形に増加している部分の傾きは $\tan \theta = 1$ である。

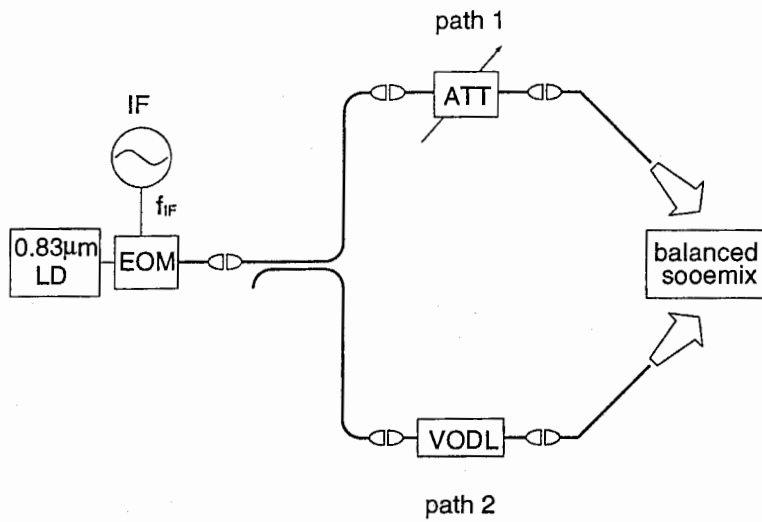


図 33: バランス型 soemix 評価系

LD : SDL5431-B

EOM : T.MZ 0.85-5 MZ2-35-47 No.585

先球ファイバ : HP Lightwave Probe LWT-LEN-MM

表 1: バランス型 soemix 発振特性

	V_{be} V	V_{ce} V	I_b mA	I_c mA		fund	2nd	3rd	4th	5th
HBT1	1.17	2.89	0.1557	14.763	f(GHz)	9.642	19.279	28.917	38.550	48.196
HBT2	1.28	2.95	0.1797	15.192	P(dBm)	-49.33	-41.17	-32.83	-36.33	-48.50

表 2: バランス型 soemix 光マイクロ波ミキシング特性 (1)

$f_{IF}=1.0\text{GHz}$ $P_{IF}=10\text{dBm}$

	path 1	path 2	path 1 & 2
LO(dBm)	-46.83	-49.17	-49.67
LO-IF(dBm)	-72.67	-72.67	-67.00
LO+IF(dBm)	-73.67	-72.67	-68.67
$P_{opt}(\mu\text{W})$	47	49	

$$\frac{LO-IF}{LO} = -17.33\text{dB}$$

表 3: バランス型 sooemix 光マイクロ波ミキシング特性 (2)

$$f_{IF}=1.5\text{GHz } P_{IF}=10\text{dBm}$$

	path 1	path 2	path 1 & 2
LO(dBm)	-43.00	-46.50	-48.33
LO-IF(dBm)	-66.50	-66.50	-60.67
LO+IF(dBm)	-67.33	-70.83	-63.83
$P_{opt}(\mu\text{W})$	69	88	

$$\frac{LO-IF}{LO} = -12.34\text{dB}$$

表 4: バランス型 sooemix 光マイクロ波ミキシング特性 (3)

$$f_{IF}=2.0\text{GHz } P_{IF}=10\text{dBm}$$

	path 1	path 2	path 1 & 2
LO(dBm)	-44.67	-46.67	-49.00
LO-IF(dBm)	-66.67	-66.50	-61.00
LO+IF(dBm)	-74.17	※	-73
$P_{opt}(\mu\text{W})$	62	76	

$$\frac{LO-IF}{LO} = -12.00\text{dB}$$

※ noise floor 以下のため測定不可能

表 5: sooemixB 光マイクロ波ミキシング特性

$$f_{IF}=1.0\text{GHz } P_{IF}=10\text{dBm}$$

LO(dBm)	-2.20
LO-IF(dBm)	-56.09
LO+IF(dBm)	-54.08
$P_{opt}(\mu\text{W})$	130

$$\frac{LO-IF}{LO} = -53.89\text{dB}$$

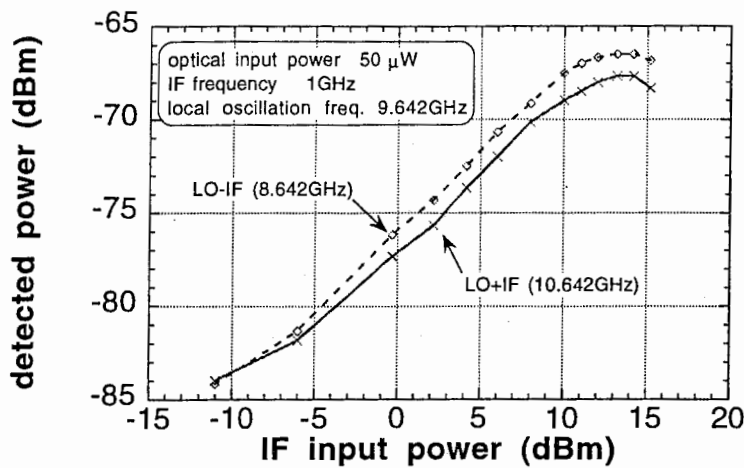


図 34: バランス型 soemix の P_{IF} 依存性

5 まとめ

単一の HBT に光マイクロ波ミキシング機能と発振機能を持たせた自己発振型光マイクロ波ミキサを提案した。従来の光マイクロ波ミキサと比較して同程度の検出レベルが得られること、高調波とのミキシングを用いれば光マイクロ波ミキサよりも優れた検出レベルが得られることがわかった。表 6 に得られたミキシングレベルを示す。

表 6: 光マイクロ波ミキシング特性 (soemixB)

f_{IF} GHz	P_{IF} dBm	P_{opt} mW	LO-IF	LO+IF	2LO-IF	2LO+IF	3LO-IF	3LO+IF
			dBm					
0.2	10	0.767	-35.7	-37.6	-44.0	-42.3	-40.1	-40.0
1.0	10	0.749	-42.4	-39.4	-45.9	-41.2	-46.4	-47.5

また 2 つの自己発振型光マイクロ波ミキサをバランス化させた回路の設計を行なった。バランス化させることで単独型の自己発振型光マイクロ波ミキサに比べて LO-IF 成分と LO 成分の比が 30dB 以上改善されることがわかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、直接ご指導頂きました今井主任研究員に深謝致します。また日頃から御指導頂く猪股社長、小川室長ならびに無線通信第二研究室の皆様に深謝致します。最後に、HBTを御提供頂きましたシャープ(株)技術本部の関係各位に感謝致します。

参考文献

- [1] H.Ogawa et al., "Millimeter-Wave Fiber Optics Systems for Personal Radio Communication", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.40, pp.2285-2293, Dec.1992
- [2] 末松 他, "HBT 受光器を用いたミリ波サブキャリア光ファイバリンクの伝送特性", 電子情報通信学会論文誌 C-1, Vol.J77-C-1, No.11, pp.659-670, (1994年11月)
- [3] E.Suematsu et al., "A Fiber Optic/Millimeter-Wave Radio Transmission Link Using HBT as Direct Photodetector and an Optoelectronic Upconverter", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.44, no.1, pp.133-143, Jan.1996