

TR - O - 0056

48

MMIC非線形デバイス回路の研究

上綱秀樹

1993. 2. 19.

ATR光電波通信研究所

## 目次

1. 氏名.....	1
2. 所属.....	1
3. 研究テーマ.....	1
4. 滞在期間.....	1
5. 復帰先.....	1
6. 主な研究成果.....	2
6-1. 概要.....	2
6-2. 光・マイクロ波周波数混合.....	3
6-3. 超小型マイクロ波集積回路.....	23
7. まとめ.....	46
謝辞.....	46
研究発表リスト.....	46

1. 氏名

上綱 秀樹

2. 所属

株式会社 エイ・ティ・アール光電波通信研究所

無線通信第2研究室 研究員

3. 研究テーマ

MMIC非線形デバイス回路

4. 滞在期間

平成2年3月5日～平成5年2月26日

5. 復帰先

日本電信電話株式会社 無線システム研究所

〒238-03 神奈川県横須賀市武1-2356

TEL 0468-59-

## 6. 主な研究成果

### 6-1. 概要

A T Rでは、将来の移動通信用超小型端末を実現するため、モノリシックマイクロ波集積回路(MM I C)の研究を行ってきた[6-1-1]。ところで、これらの技術を適用して例えば腕時計サイズの超小型移動端末を実現した場合、その送信電力の低下を補い、かつ周波数の有効利用を図るため、無線電波の送受を行う無線基地局を数100メートル以下おきに配置するマイクロセル・ピコセルゾーン方式が有望視されている[6-1-2]。また、これらの無線基地局は莫大な数が必要となるため、同軸ケーブルや無線による給電に比べ、低損失、広帯域でかつ電磁干渉が少ない特長を有する光ファイバによる給電系が注目されている[6-1-2]。さらに、移動通信への需要の増大に応えると同時に、映像などの広帯域な信号の伝送も可能にするためには、現在の移動通信で実用に供されているU H F帯に比べて、本質的に広帯域であるミリ波等の超高周波無線信号を用いることが必要である[6-1-2]。

ハードウェアの観点からこれらのシステムを実現する上でのキーテクノロジーは、無線基地局においてミリ波の送受をサポートし得る装置(光送受信回路+高周波回路)を如何に小型・低コストで実現できるか?つまりこれらのコンポーネントのモノリシック集積化という点になる。

ところで、これらの要素技術のうち、光デバイス(L D、P D等)においては、研究段階ではミリ波帯まで動作するものが実現されつつあるが、市販レベルのデバイスの動作帯域は、現状では10G H z程度以下である。一方、電子デバイスは、ミリ波帯までの動作を得ることは比較的容易であり、またMM I C技術の進展により各種機能回路がチップレベルで実現されている。したがって、現在研究レベルにある超高速光デバイスを利用すれば、MM I Cとのハイブリッド構成により上記目的のコンポーネントは実現できる。

ここで光受信器に着目すると、光検出器を除く必要な回路は電子回路であるので、光受信器の集積化をターゲットとしたMM I Cコンパチブルなデバイスの光検出機能の研究が精力的に行われている。また、これらのデバイスは、非線形特性を有しており光検出機能と周波数変換機能を同時に合わせ持つこともできる(光マイクロ波ミキサ)。光マイクロ波ミキサを用いれば単に装置構成を簡単にできるだけでなく、アップコンバータとして用いることにより、光ファイバリンクを構成する光デバイスの動作帯域に関わらず光受信器において超高周波無線信号を得ることができる。つまり市販レベルの光デバイス(発光素子)とMM I Cプロセスを用いた光/マイクロ波周波数変換器により小型・低コストな光ファイバリンク、光受信器を構成できる。

本研究では、MM I Cプロセスを用いたモノリシック高機能光マイクロ波ミキサの実現を最終ターゲットとして、光/マイクロ波デバイスの光・マイクロ波周波数混合特性の評価、およびこれらのデバイスをハイブリッド回路等のマイクロ波機能回路と組み合わせ、不用なスプリアスをフィルタなしに抑圧できる光ファイバリンク構成法の検討を進めた。

またMM I Cの分野では、これまで検討されていなかった数G H z帯の受動回路やMM I C遅延線の実現を目指した超小型MM I C遅延線路の提案、および従来のL U F E Tでは実現不可能な同相/逆相以外の信号分配機能を持つアクティブ信号分配回路の構成法を提案し、試作によりこれらの回路の優れた特性を実証した。

### 参考文献

[6-1-1] 徳満

「A T Rにおける高周波回路の研究 -超小型・高機能MM I C-」

A T Rテクニカルレポート、TR-O-0023、1990.3.

[6-1-2] 小川、竹中、長谷川、馬場、上綱

「光ファイバミリ波パーソナル通信システム」

1990電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、B-736、1990.

## 6-2. 光・マイクロ波周波数混合

光デバイス (LD、PD等) の非線形性を用いることにより、発光/受光機能とマイクロ波周波数変換機能を光デバイスに集約することができる (光マイクロ波ミキサ)。また、マイクロ波デバイスである、MESFET、HEMT等の光検出機能と非線形性を利用することにより、これらのデバイスも光マイクロ波ミキサとして動作する。さらに、光マイクロ波ミキサをアップコンバータとして利用することにより、市販の安価な光デバイスを用いて光ファイバリンクの等化伝送帯域を拡大することができる。

しかし、これらの光マイクロ波ミキサにおいては、非線形動作による不用なスプリアスの処理が問題となり、出力端子にフィルタ等が必要になり、装置の簡易化、集積化が制限される。そこで、光マイクロ波ミキサとハイブリッド回路などのマイクロ波機能回路を組み合わせた光ファイバリンク構成法を検討し、市販の光デバイスとマイクロ波機能回路のハイブリッド構成により、その基本動作を実験的に確認した。さらにMMICコンパチブルなデバイスであるHEMTを光マイクロ波ミキサとして利用し、受動回路とモノリシック集積化した30GHz帯イメージ抑圧型光・マイクロ波周波数アップコンバータを設計・試作し、良好な動作を確認した。

以下に報告者が関与した本分野の外部発表論文を、光/マイクロ波デバイスの光・マイクロ波周波数混合特性の評価、光ファイバリンク構成法、モノリシック光マイクロ波ミキサに分類して記す。

### i) デバイスの評価

#### [6-2-1] 上綱、小川、赤池

「PINフォトダイオードの光入射時の電流-電圧特性」

1991電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、C-56、1991.

#### [6-2-2] 上綱、馬場、小川

「HEMT MMICの光・マイクロ波周波数混合特性とその応用に関する検討」

1992電子情報通信学会春季全国大会講演論文集、C-96、1992.

#### [6-2-3] 上綱、小川

「受光素子の光・マイクロ波周波数混合特性の光ファイバ無線通信リンクへの適用」

電子情報通信学会技術研究報告 (アンテナ、超伝導、マイクロ波)、MW92-5、1992.4.

#### [6-2-4] 小川、上綱、馬場、末松、赤池

「Millimeter-Wave Subcarrier Transmission Using Optoelectronic Mixing and Optical Heterodyne Techniques」

1992 URSI Int. Symp. on Signals, Systems and Electronics, pp.561-564, Sept. 1992.

#### [6-2-5] 小川、上綱、馬場、末松

「Optical/Microwave Monolithic Integrated Circuits」

1992 Microwave Workshop & Exhibition (MWE'92) Dig., pp.191-196, Sept. 1992.

#### [6-2-6] 小川、馬場、上綱、Polifko、竹中

「Optical/Microwave Circuit Technologies for Microwave and Millimeter-Wave Fiber Optic Links」

1992 Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP'92) Proc., pp.825-828, Sept. 1992.

#### [6-2-7] 上綱、馬場、小川

「HEMTの光・マイクロ波周波数混合に関する一検討」

1992電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、SC-1-5、1992.

[6-2-8] 小川、上綱、Polifko

「Fiber Optic Microwave Subcarrier Transmission Links Using Laser Diodes as Resistive Mixers」

IEICE Transactions on Electronics, vol.E76-C, no.2, pp.251-256, Feb. 1993.

## ii) 光ファイバリンク構成法

[6-2-9] 上綱、馬場、小川

「HEMT MMICの光・マイクロ波周波数混合特性とその応用に関する検討」

[6-2-2] と同じ

[6-2-10] 上綱、小川

「受光素子の光・マイクロ波周波数混合特性の光ファイバ無線通信リンクへの適用」

[6-2-3] と同じ

[6-2-11] 小川、上綱

「Fiber Optic Microwave Links Using Balanced Laser Harmonic Generation, and Balanced/Image Cancellation Laser Mixing」

1992 IEEE MTT-S International Microwave Symp. Dig., pp.559-562, June 1992.

[6-2-12] 上綱、小川

「Fiber Optic Microwave Links Using Image Canceling Photodiode Mixing」

1992 Asia-Pacific Microwave Conference Proc., pp.309-312, Aug. 1992.

[6-2-13] 上綱、小川

「Fiber Optic Balanced Photodiode Mixing Links」

1992 Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP'92) Proc., pp.829-832, Sept. 1992.

[6-2-14] 小川、上綱

「レーザダイオードの非線形特性を用いた光ファイバリンクの検討」

1992 電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、SC-1-7、1992.

[6-2-15] 小川、上綱

「Fiber Optic Microwave Links Using Balanced Laser Harmonic Generation, and Balanced/Image Cancellation Laser Mixing」

IEEE Transactions on Microwave Theory Tech., vol.MTT-40, no.12, pp. - , Dec. 1992.

[6-2-16] 上綱、小川

「Fiber Optic Microwave Links Using Balanced/Image Canceling Photodiode Mixing」

IEICE Transactions on Electronics, vol.E76-C, no.2, pp.264-270, Feb. 1993.

[6-2-17] 小川、上綱、Polifko

「Fiber Optic Microwave Subcarrier Transmission Links Using Laser Diodes as Resistive Mixers」

[6-2-8] と同じ

## iii) モノリシック光マイクロ波ミキサ

[6-2-18] 上綱、馬場、小川

「MMICプロセスを用いたモノリシックイメージ抑圧型光・マイクロ波周波数アップコンバータ」

1993 電子情報通信学会春季全国大会講演論文集、C-61、1993.

[6-2-19] 上綱、小川

「Monolithic Image Rejection Optoelectronic Up-Converters that Employ the MMIC Process」

1993 IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symp., June 1993 (to be published).

このうち、光ファイバリンク構成法に関する論文 [6-2-16] を以下に示す。

### SUMMARY

This paper proposes fiber optic link configurations for use in microwave and millimeter-wave transmission. Higher frequencies, such as millimeter-waves, are well suited to transmission of broadband signals. Photodiodes can operate simultaneously as optical detectors and microwave frequency mixers thanks to their inherent nonlinearities. This allows us to increase the output radio frequency. But, this also generates undesired spurious frequencies, necessitating the use of microwave filters. We discuss here two fiber optic link configurations, i.e., balanced/image canceling photodiode mixing links utilizing the combination of microwave functional components and optical devices to suppress the local/image frequency without filters. These configurations are experimentally investigated at microwave frequencies and local/image frequency suppression is successfully demonstrated.

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

### 6-3. 超小型マイクロ波集積回路

本研究では、従来のMMICにおいて未開拓の分野であった数GHz帯の受動回路やMMIC遅延線の実現を目指した新しいMMIC遅波線路の提案、および従来のLUFETでは実現不可能な同相/逆相以外の信号分配機能を持つアクティブ信号分配回路の構成法を検討した。

このうち、MMIC遅波線路では、トリプレート線路とエレベータコプレーナ線路を用いたダブルクロスタイ遅波線路(DCT-SLW)、2重トリプレート構造を用いたメアンダ型DCT-SLWの構成法を提案し、多層化プロセスにより試作を行った。その結果、従来のMMIC遅波線路と比較してそれぞれ、1/5、1/10以下の小型化を実現した。さらに多層スパイラルインダクタを適用した集中定数型DCT-SLWにより、遅波率(自由空間波長/線路内波長)30、特性インピーダンス $77\Omega$ の優れた特性を実現した。また、この集中定数型DCT-SLWを薄膜マイクロストリップ(TFMS)線路と比較した結果、占有面積および損失の観点から優れていることも確認した。

一方、MMICアクティブ信号分配回路では、FET位相反転回路と位相調整回路を組み合わせ、7.2-21.6GHzの周波数範囲で位相差 $90^\circ$ の同振幅信号を分配できるMMIC $90^\circ$ 信号分配回路を実現した。

さらに、考案した遅波線路の各種マイクロ波回路への適用、および遅波線路に用いたエレベータコプレーナ線路の応用も検討した。

以下に本分野に関わる外部発表論文を遅波線路(含むマイクロ波回路への適用)、アクティブ信号分配回路、エレベータコプレーナ線路の応用に分類して記す。

#### i) 遅波線路

[6-3-1] 上綱、小川

[Novel Slow-Wave Meander Lines Using Multilayer MMIC Technologies]  
IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol.2, no.1, pp.8-10, Jan. 1992.

[6-3-2] 上綱

[超小型MMIC用ダブルクロスタイ遅波線路]  
電子情報通信学会技術研究報告(マイクロ波、無線通信)、MW92-42、1992.5.

[6-3-3] 上綱、小川

[Reduced-Size Double Crosstie Slow-Wave Transmission Lines for MMICs]  
IEICE Transactions on Electronics, vol.E75-C, no.6, pp.721-728, June 1992.

[6-3-4] 上綱、小川

[Characterization and Application of Lumped Double Crosstie Slow-Wave Transmission Lines]  
IEICE Transactions on Electronics, vol.E76-C, no.6, June 1993 (to be published).

#### ii) アクティブ信号分配回路

[6-3-5] 上綱、小川

[Ultra-Wideband MMIC Active Power Splitters with Arbitrary Phase Relationships]  
IEEE Transactions on Microwave Theory Tech., vol.MTT-41, no.9, Sept. 1993 (to be published).

#### iii) エレベータコプレーナ線路の応用

[6-3-6] 上綱

[超小型MMIC用ダブルクロスタイ遅波線路]  
[6-3-2]と同じ



[6-3-7] 上綱、小川

[Reduced-Size Double Crosstie Slow-Wave Transmission Lines for MMICs]

[6-3-3] と同じ

[6-3-8] 上綱

[A Very Small, Low-Loss MMIC Rat-Race Hybrid Using Elevated Coplanar Waveguides]

IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol.2, no.8, pp.337-339, Aug. 1992.

このうち、遅波線路に関する論文 [6-3-3] を以下に示す。

### SUMMARY

This paper proposes three configurations of slow-wave transmission lines for MMICs, i.e. double crosstie slow-wave transmission line (DCT-SLW), meander-like DCT-SLW and lumped DCT-SLW. The DCT-SLW is based on periodic structures and triplate structures. The meander-like DCT-SLW realizes a drastic size reduction in the DCT-SLW using a meander configuration of inductive and capacitive transmission lines. The multilayer spiral inductors are introduced to obtain high impedance characteristics of the meander section. The lumped DCT-SLW achieves a large slow-wave factor of 30. These proposed structures are analytically and experimentally investigated, and excellent performance is obtained. It is also shown that the proposed DCT-SLWs are superior to thin film microstrip (TFMS) lines with the same insertion phase, as regards size.

[REDACTED]

## 7. まとめ

報告者がATR在任中に担当した、光・マイクロ波周波数混合、光ファイバリンク構成法、およびMMICに関して述べた。光・マイクロ波周波数混合では、最終目標であった、MMICプロセスを用いたモノリシック光マイクロ波ミキサを設計・試作し、その基本動作を確認することができた。また、MMICでは、オリジナリティのある回路構成法を提案し、試作によりその優れた特性を実証した。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、御指導頂いた古濱社長、赤池前室長、小川英一室長、小川博世主幹員ならびに無線通信第2研究室の皆様感謝します。

## 研究発表リスト

### (1) 誌上論文

[1] 上綱 秀樹、小川 博世

[Novel Slow-Wave Meander Lines Using Multilayer MMIC Technologies]  
IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol.2, no.1, pp.8-10, Jan. 1992.

[2] 上綱 秀樹、小川 博世

[Reduced-Size Double Crosstie Slow-Wave Transmission Lines for MMICs]  
IEICE Transactions on Electronics, vol.E75-C, no.6, pp.721-728, June 1992.

[3] 上綱 秀樹

[A Very Small, Low-Loss MMIC Rat-Race Hybrid Using Elevated Coplanar Waveguides]  
IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol.2, no.8, pp.337-339, Aug. 1992.

[4] 小川 博世、上綱 秀樹

[Fiber Optic Microwave Links Using Balanced Laser Harmonic Generation, and  
Balanced/Image Cancellation Laser Mixing]  
IEEE Transactions on Microwave Theory Tech., vol.MTT-40, no.12, pp. - , Dec. 1992.

[5] 上綱 秀樹、小川 博世

[Fiber Optic Microwave Links Using Balanced/Image Canceling Photodiode Mixing]  
IEICE Transactions on Electronics, vol.E76-C, no.2, pp.264-270, Feb. 1993.

[6] 小川 博世、上綱 秀樹、David Polifko

[Fiber Optic Microwave Subcarrier Transmission Links Using Laser Diodes as Resistive  
Mixers]  
IEICE Transactions on Electronics, vol.E76-C, no.2, pp.251-256, Feb. 1993.

[7] 上綱 秀樹、小川 博世

[Characterization and Application of Lumped Double Crosstie Slow-Wave Transmission  
Lines]  
IEICE Transactions on Electronics, vol.E76-C, no.6, June 1993 (to be published).

[8] 上綱 秀樹、小川 博世

[Ultra-Wideband MMIC Active Power Splitters with Arbitrary Phase Relationships]  
IEEE Transactions on Microwave Theory Tech., vol.MTT-41, no.9, Sept. 1993 (to be  
published).

## (2) 学会報告 (査読あり)

[9] 小川 博世、上綱 秀樹

[Fiber Optic Microwave Links Using Balanced Laser Harmonic Generation, and Balanced/Image Cancellation Laser Mixing]

1992 IEEE MTT-S International Microwave Symp. Dig., pp.559-562, June 1992.

[10] 小川 博世、馬場 清一、上綱 秀樹、David Polifko

[Ka-Band FM Video Subcarrier Transmission Using Monolithic Integrated HEMT Photodetector]

4th Optoelectronic Conference (OEC'92), July 1992.

[11] 上綱 秀樹、小川 博世

[Fiber Optic Microwave Links Using Image Canceling Photodiode Mixing]

1992 Asia-Pacific Microwave Conference Proc., pp.309-312, Aug. 1992.

[12] 小川 博世、上綱 秀樹、馬場 清一、末松 英治、赤池 正巳

[Millimeter-Wave Subcarrier Transmission Using Optoelectronic Mixing and Optical Heterodyne Techniques]

1992 URSI Int. Symp. on Signals, Systems and Electronics, pp.561-564, Sept. 1992.

[13] 小川 博世、馬場 清一、上綱 秀樹、David Polifko、竹中 勉

[Optical/Microwave Circuit Technologies for Microwave and Millimeter-Wave Fiber Optic Links]

1992 Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP'92) Proc., pp.825-828, Sept. 1992.

[14] 上綱 秀樹、小川 博世

[Fiber Optic Balanced Photodiode Mixing Links]

1992 Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP'92) Proc., pp.829-832, Sept. 1992.

[15] 上綱 秀樹、小川 博世

[Monolithic Image Rejection Optoelectronic Up-Converters that Employ the MMIC Process]

1993 IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symp., June 1993 (to be published).

[16] 小川 博世、馬場 清一、末松 英治、上綱 秀樹、David Polifko

[A Comparison of Noise Performance Between a PIN Diode and MMIC HEMT and HBT Optical Receivers]

1993 IEEE MTT-S International Microwave Symp., June 1993 (to be published).

## (3) 学会報告 (査読なし)

[17] 小川 博世、竹中 勉、長谷川 隆夫、馬場 清一、上綱 秀樹

[光ファイバミリ波パーソナル通信システム]

1990 電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、B-736、1990.

[18] 小川 博世、長谷川 隆夫、馬場 清一、上綱 秀樹、竹中 勉

[多層化MMICおよびミリ波MMIC伝送線路]

平成3年電気・情報関連学会連合大会、S22-5、1991.

[19] 上綱 秀樹、小川 博世、赤池 正巳

[PINフォトダイオードの光入射時の電流-電圧特性]

1991 電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、C-56、1991.

- [20] 小川 博世、馬場 清一、上綱 秀樹、竹中 勉  
「光マイクロ波集積回路の構成法」  
1992 電子情報通信学会春季全国大会講演論文集、C-94、1992.
- [21] 馬場 清一、上綱 秀樹、小川 博世  
「HEMT光応答の基礎検討」  
1992 電子情報通信学会春季全国大会講演論文集、C-95、1992.
- [22] 上綱 秀樹、馬場 清一、小川 博世  
「HEMT MMICの光・マイクロ波周波数混合特性とその応用に関する検討」  
1992 電子情報通信学会春季全国大会講演論文集、C-96、1992.
- [23] 末松 英治、馬場 清一、上綱 秀樹、小川 博世  
「マイクロ波HBT光検波器」  
1992 電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、SC-1-4、1992.
- [24] 上綱 秀樹、馬場 清一、小川 博世  
「HEMTの光・マイクロ波周波数混合に関する一検討」  
1992 電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、SC-1-5、1992.
- [25] 小川 博世、上綱 秀樹  
「レーザダイオードの非線形特性を用いた光ファイバリンクの検討」  
1992 電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、SC-1-7、1992.
- [26] 馬場 清一、上綱 秀樹、小川 博世  
「HEMT光応答を用いたMMIC光受信器」  
1992 電子情報通信学会秋季全国大会講演論文集、C-73、1992.
- [27] 上綱 秀樹、馬場 清一、小川 博世  
「MMICプロセスを用いたモノリシックイメージ抑圧型光・マイクロ波周波数アップコンバータ」  
1993 電子情報通信学会春季全国大会講演論文集、C-61、1993.

#### (4) 研究会報告 (査読なし)

- [28] 小川 博世、David Polifko、上綱 秀樹  
「光ファイバを用いたミリ波信号伝送フィード系の検討」  
電子情報通信学会技術研究報告 (光・量子、光通信)、OCS91-65、1991.11.
- [29] 上綱 秀樹、小川 博世  
「受光素子の光・マイクロ波周波数混合特性の光ファイバ無線通信リンクへの適用」  
電子情報通信学会技術研究報告 (アンテナ、超伝導、マイクロ波)、MW92-5、1992.4.
- [30] 上綱 秀樹  
「超小型MMIC用ダブルクロスタイ遅波線路」  
電子情報通信学会技術研究報告 (マイクロ波、無線通信)、MW92-42、1992.5.
- [31] 馬場 清一、上綱 秀樹、小川 博世  
「マイクロ波・ミリ波デバイスによる光検出の検討」  
電子情報通信学会技術研究報告 (光・量子、マイクロ波)、MW92-56、1992.6.
- [32] 小川 博世、上綱 秀樹、馬場 清一、末松 英治  
「Optical/Microwave Monolithic Integrated Circuits」  
1992 Microwave Workshop & Exhibition (MWE'92) Dig., pp.191-196, Sept. 1992.

- [33] 末松 英治、馬場 清一、上綱 秀樹、小川 博世  
「マイクロ波HBTの光検波器への適用」  
電子情報通信学会技術研究報告（衛星通信、マイクロ波）、MW92-76、1992.9.

(5) 特許

- [34] 上綱 秀樹、小川 博世  
「光制御マイクロ波集積回路」特願平 02-278515、1990.  
[35] 上綱 秀樹、小川 博世  
「マイクロ波遅波回路」特願平 04-046783、1992.  
[36] 上綱 秀樹、小川 博世  
「マイクロ波遅波回路」特願平 04-123723、1992.  
[37] 上綱 秀樹、小川 博世  
「光マイクロ波混合回路」特願平 04-180949、1992.  
[38] 上綱 秀樹、小川 博世  
「マイクロ波信号分配回路」1993.

(6) テクニカルレポート

- [39] 竹中 勉、馬場 清一、上綱 秀樹、小川 博世  
「1991年度MMIC研究成果報告」  
ATRテクニカルレポート、No. TR-O-0044、1992.3.