

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月29日現在

機関番号：15501
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2009～2011
課題番号：21560355
研究課題名（和文） 第4世代移動通信システム対応超小型非可逆伝送素子の研究
研究課題名（英文） Study on small isolator for 4 <sup>th</sup> generation wireless communication system
研究代表者 山本 節夫 (YAMAMOTO SETSUO) 山口大学・大学院理工学研究科・教授 研究者番号：30182629

研究成果の概要（和文）：強磁性共鳴近傍を動作点とする3種類のアイソレータ：ボトムマウント型マイクロストリップ・アイソレータ、トップマウント型マイクロストリップ・アイソレータ、トップマウント型コプレーナウェーブガイド・アイソレータを提案した。本アイソレータは、450 MHz から 4.6 GHz にわたりチューニングでき、良好な非可逆伝送特性が実現できる。素子試作実験によって非可逆伝送特性が実証された。アイソレータの設計方法も明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Three types of isolator operating in the vicinity of ferromagnetic resonance point: bottom mount type microstrip isolator, top mount type microstrip isolator and top mount type coplanar waveguide isolator, were developed. FEM electromagnetic simulation showed that the isolators are tunable in the frequency region from 450 MHz to 4.6GHz, and excellent nonreciprocal transmission characteristics are obtainable. Nonreciprocal transmission characteristics of the isolator were actually confirmed using the isolator fabricated in trial. Design scheme of the isolator was also derived.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：アイソレータ・非可逆伝送素子・非可逆回路素子

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 社会的背景

非可逆伝送素子（アイソレータ）は、バイアス磁場が印加されたフェライト中における磁気モーメントの歳差運動と高周波磁場との相互作用を利用して、マイクロ波などの

高周波電力を1方向にのみ通し、逆方向への通過は阻止する、いわゆる非可逆的な伝送特性を持つ電子素子である。アイソレータは主として携帯電話端末など移動体通信機器の送信回路の最終増幅段とアンテナスイッチとの間に配置されて、(i)アンテナから送信

部に逆流する高周波電力から送信部を保護する、(ii)送信回路からみたアンテナ側の負荷変動を抑制して、送信機電力増幅段の電源効率の低下を防止するとともに消費電力を減少させる、(iii)高品質な通信を確保する、などの目的で用いられている。

携帯電話端末では小型化・薄型化・多機能化が急速に進み、そこに内蔵される電子素子についても小型化・低背化・モジュール化・集積化が強く要求されている。ところが、現行の携帯電話端末用アイソレータは、世界最小サイズの製品においても 3.2mm×2.5mm×1.2mm ほどの大きさがあり（本研究の開始時点の状況）、他部品と比較すると小型化・低背化が非常に遅れており、小型化が可能なアイソレータを提案し、開発する必要があった。

## (2) 学術的背景

研究代表者は平成 13 年頃よりアイソレータの小型化・低背化に関する研究を行ってきた。従来の携帯電話用アイソレータが複雑な伝送線路をもつ集中定数型を採用しているのに対して、線路構造が簡単なマイクロストリップ線路を採用した分布定数型のアイソレータを提案し、特許出願した。

この超小型アイソレータは以下の 4 点に技術的に重要かつユニークなポイントがある。

- ① 従来製品の複雑な形状の伝送線路を排除し、単純な構成のマイクロストリップを採用した点、
- ② YIG フェライト、金属磁石、ヨークなどの付加部品を基板の裏側から後付けするという発想によって大幅な低背化を実現し、集積化も可能な構造とした点、
- ③ 正円偏波と負円偏波に対する透磁率の差が大きな領域 (above resonance) を使用するとともに、 $\epsilon$  と  $\mu$  による波長短縮効果も活用して、横方向サイズの大幅な小型化を可能にした点、
- ④ 上記の③を実現するために、動作点を YIG フェライトの強磁性共鳴付近の領域に設定する点。ただし、共鳴損失の影響を回避するために、 $\Delta H$  が小さな YIG 単結晶フェライトを使用する。

## 2. 研究の目的

本研究は、前述の強磁性共鳴近傍を動作点とするアイソレータを研究対象として、

- (1) このアイソレータを実際に試作して性能実証を行うこと、
- (2) 次世代にあたる第 4 世代移動通信システム (IMT-Advanced) の規格に対応できるアイソレータを提案すること、
- (3) このアイソレータの設計指針を確立する

こと、  
を目的とした。

## 3. 研究の方法

研究期間（平成 21～23 年度の 3 年間）の間に以下の研究成果を得ることを目指した。

- (1) 新提案のアイソレータを実際に試作して、性能を実証する。

目標とする伝送特性としては、実用的なレベルを考慮して、アイソレーション（逆方向）は 16dB 以上、挿入損失（順方向）0.4dB 程度以下とする。

- (2) 第 4 世代移動通信システムの周波数帯に対応したアイソレータを提案する。

新提案のアイソレータについて設計に成功しているのは研究開始時点では 2 GHz のみであった。そこで本研究では、現行の第 3 世代 (IMT-2000) よりもさらに高速移動・高データ伝送レートを可能にする第 4 世代移動通信システム (IMT-Advanced) の周波数帯に対応したアイソレータを設計する。

- (3) 新提案のアイソレータの設計指針を確立する。

バイアス磁場と動作周波数の関係や、伝送線路の最適化設計など、新提案のアイソレータについてその基本的な設計指針・設計手法を確立する。

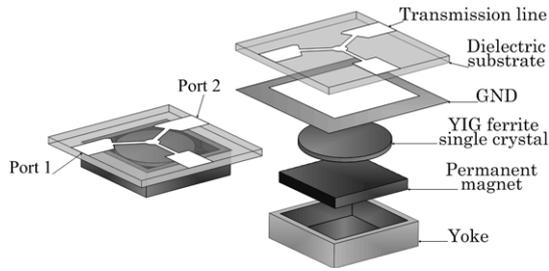
アイソレータの設計には、3 次元有限要素法にもとづいた高周波電磁界シミュレータ (HFSS) を使用した。アイソレータの試作は、伝送線路の形成にフォトリソグラフィを用いて行い、試作した素子の伝送特性はマイクロプローバとネットワークアナライザを用いて測定・評価した。

シミュレーション結果と素子試作結果を総合して、本提案アイソレータの設計指針を導出した。

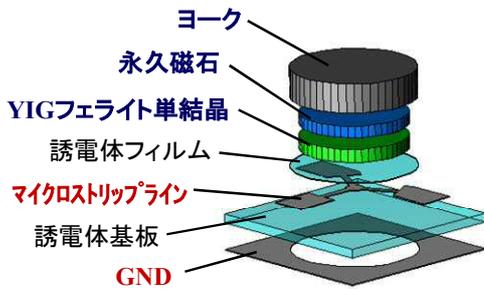
## 4. 研究成果

- (1) 本研究対象とするアイソレータの基本構造

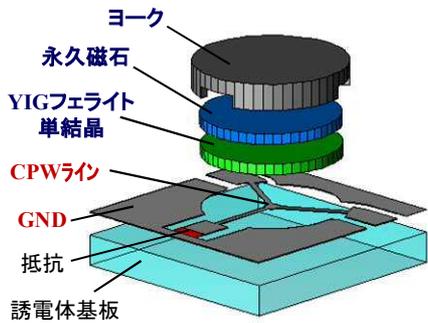
研究代表者が既に発明していたアイソレータ (図 1(a) のボトムマウント型マイクロストリップ・アイソレータ) に加えて、本研究においては新たに 2 種類のアイソレータ (トップマウント型マイクロストリップ・アイソレータ (図 1(b)) およびトップマウント型コプレーナウェーブガイド・アイソレータ (図 1(c))) を考案し、研究の対象とした。



(a) ボトムマウント型マイクロストリップ・アイソレータ



(b) トップマウント型マイクロストリップ・アイソレータ



(c) トップマウント型コプレーナウェーブガイド・アイソレータ

図 1 対象としたアイソレータの基本構造

図 1(a)のボトムマウント型マイクロストリップ・アイソレータは、Y 接合線路-誘電体基板-接地面からなるマイクロストリップ線路を基本として、誘電体基板の接地面側に YIG フェライト単結晶、永久磁石、ヨーク（鉄）を取り付けたものである。電磁波が YIG フェライト単結晶の中に浸透して伝搬するように、YIG フェライト単結晶に接する部分の接地面を切り欠き、永久磁石およびヨークを電氣的に接地している点が重要である。

図 1(b)のトップマウント型マイクロストリップ・アイソレータは、アイソレータの突出部（ヨーク部）が基板の上部（伝送線路側）に突出した構造のものである。ジャイロ磁気効果を利用してアイソレータとしての非可逆的な伝送特性を得るためには、フェライト材の中に電磁波を通過させる必要がある。マイクロストリップ Y 接合線路の上部に単にフェライトを置いただけでは、電磁波の大半のエネルギーは伝送線路と接地面の間、すなわ

ち誘電体基板内に分布し、フェライト内にはほとんど侵入しない。そこで、フェライトに対向した基板の接地面の一部を取り除いた（接地面に円形のスリットを設ける）構造とした。また、フェライト内への電磁波の侵入をより確実にするため、フェライトの上部に金属製の永久磁石とヨークを置き、これらの表面は高伝導性材でメッキし、かつビアを通して電氣的に接地することとした。

図 1(c)のトップマウント型コプレーナウェーブガイド・アイソレータは、図 1(b)のトップマウント型アイソレータを基本にしつつ、伝送線路をマイクロストリップラインからコプレーナウェーブガイド（以下、CPW という）に変更したモデルである。CPW を導入することで伝送線路と GND を同一平面上にプリントされることになり、ヨークの接地が容易になる。また、基板加工も片面で済むという利点がある。ヨークにはポート取り出しのための窓を設けた。

### (2) アイソレータの試作による性能実証

ボトムマウント型アイソレータを試作し、ネットワークアナライザを用いて S パラメータの周波数特性を計測した。その結果、周波数 2 GHz 帯において、挿入損失 0.9 dB、アイソレーション 11 dB という明瞭な非可逆伝送特性が確認され、強磁性共鳴近傍を動作点とする本アイソレータの有効性が確認された。

### (3) IMT-Advanced（第 4 世代移動通信システム）の規格に対応したアイソレータの提案

2007 年に開催された世界無線通信会議、WRC-07 において第 4 世代移動通信システム（IMT-Advanced）に使用する世界共通の周波数帯として、3.4 GHz ~ 3.6 GHz, 2.3 GHz ~ 2.4 GHz, 698 MHz ~ 806 MHz, 450 MHz ~ 470 MHz といった 4 つの周波数帯に決定された。これに高速無線 LAN（5 GHz 帯）の用途も含めると、下は 450 MHz から上は 5 GHz 付近までの周波数にわたって本アイソレータを設計できることが望まれる。

#### ① ボトムマウント型マイクロストリップ・アイソレータ

FEM シミュレーションで得られたアイソレータの伝送特性を図 2 に示す。1.95 GHz 付近に明瞭な非可逆的伝送特性が確認できる。挿入損失 0.41 dB、アイソレーション 30.1 dB という良好で実用的な特性が得られた。

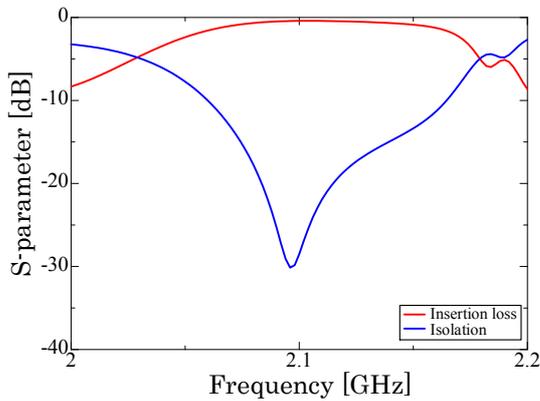


図2 ボトムマウント型マイクロストリップ・アイソレータの伝送特性 (2 GHz 付近に設計)

図3に示すように、非可逆的な伝送特性が得られる周波数(動作周波数)は、基本的にはYIGフェライトに印加するバイアス磁場の強さによって大きく変えることができる。

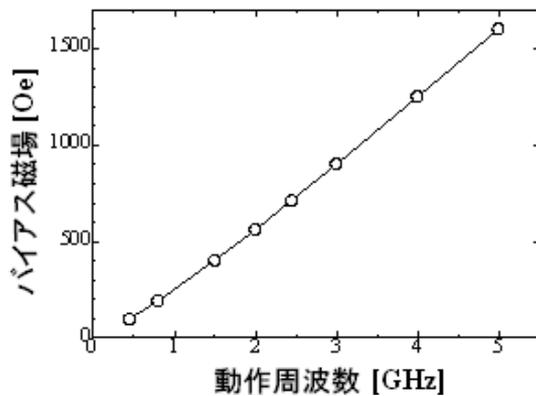


図3 バイアス磁場と動作周波数の関係

本提案のアイソレータの場合、素子の構造および主要部の寸法はそのままにして、バイアス磁場の調整で動作周波数を450 MHzから4.9 GHzまで変えた場合に、1.5 dB以下の挿入損失と10 dB以上のアイソレーションが得られることがわかった(図4)。

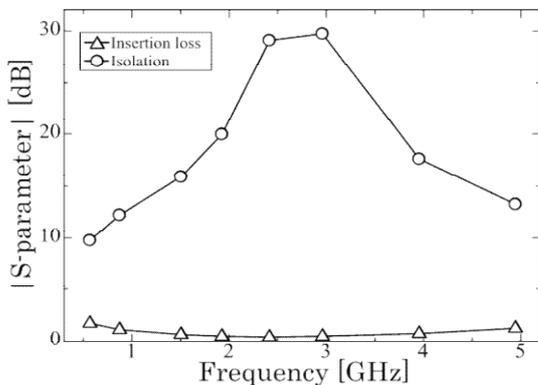


図4 動作周波数を変えた時の伝送特性

図5に示すように、4 GHz帯でも良好な非可逆伝送特性が得られた。

本提案アイソレータの場合には、バイアス磁場を低下させて動作周波数を低周波数側にシフトさせたときに、実効透磁率が增大するとともに、正円偏波と負正円偏波に対する透磁率の差が増大する傾向がある。正円偏波と負正円偏波に対する透磁率の差が増大することは、フェライト中を伝搬する電磁波は短い進行距離の中で大きく曲がることになり、素子サイズを大きくしなくても済む。また、実効透磁率が増加することは、波長の短縮効果が強まることを意味し、素子の小型化に有利である。この2つの要因が、本アイソレータにおいて、バイアス磁場のみの調整で動作周波数を変えた場合にも良好な非可逆伝送特性が得られる理由である。

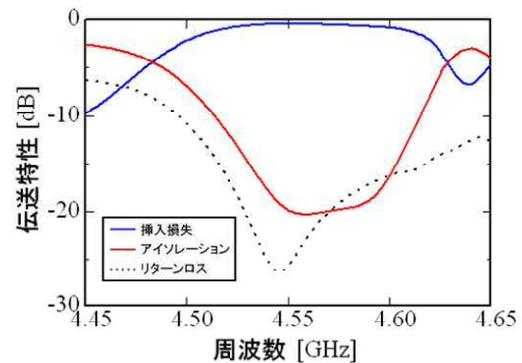


図5 ボトムマウント型マイクロストリップ・アイソレータの伝送特性 (4.6 GHz 付近に設計)

素子サイズ	1.8 mm × 0.20 mm <sup>2</sup>
フェライトサイズ	1.6 mm × 0.10 mm <sup>2</sup>
周波数	4.55 GHz
挿入損失	0.40 dB
アイソレーション	19.9 dB

## ② トップマウント型マイクロストリップ・アイソレータ

トップマウント型マイクロストリップ・アイソレータの伝送特性をシミュレーションした結果を図6に示す。2 GHz付近に挿入損失0.27 dB、アイソレーション8.2 dBの明瞭な非可逆的伝送特性が得られることが確認された。

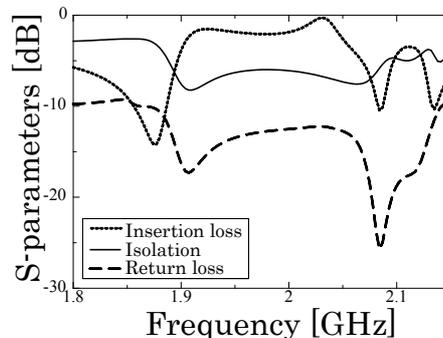


図6 トップマウント型マイクロストリップ・アイソレータの伝送特性 (2 GHz 付近に設計)

③ トップマウント型コプレーナウェーブガイド・アイソレータ  
 トップマウント型コプレーナウェーブガイド・アイソレータの伝送特性をシミュレーションした結果を図7と図8に示す。動作周波数が2 GHz帯および4 GHz帯ともに、明瞭な非可逆伝送特性が得られた。

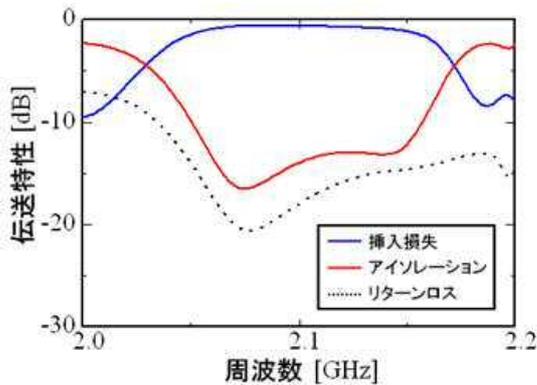


図7 トップマウント型コプレーナウェーブガイド・アイソレータの伝送特性 (2 GHz 付近に設計)

素子サイズ	2.0 mm × 0.25 mm <sup>†</sup>
フェライトサイズ	1.8 mm × 0.15 mm <sup>†</sup>
周波数	2.09 GHz
挿入損失	0.58 dB
アイソレーション	15.6 dB

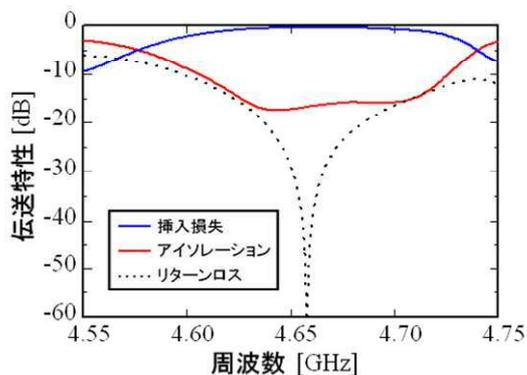


図8 トップマウント型コプレーナウェーブガイド・アイソレータの伝送特性 (4.6 GHz 付近に設計)

素子サイズ	1.4 mm × 0.23 mm <sup>†</sup>
フェライトサイズ	1.2 mm × 0.10 mm <sup>†</sup>
周波数	4.66 GHz
挿入損失	0.39 dB
アイソレーション	16.5 dB

#### ④ バイアス磁場可変機構

提案アイソレータのマルチバンド化実現のため、バイアス磁場可変機構を2種類考案し、特許出願した。そのうちの一つは、永久磁石の作る磁場 (強度は固定) と電磁石の磁場 (強度はコイルに流す電流によって可変) を重畳させる方法であり、もう一つは磁気回路を変える方法である。後者は、図9に示す

ように、永久磁石とフェライト部の間に、直径可変な軟磁性円板を配置するものである。軟磁性円板の直径に依存して磁気回路が変化し、図10に示すように、バイアス磁場強度を広範囲 (100~1200 Oe と1桁以上) に変えることができるのが特徴である。モデル実験によってもこの磁場可変機構の有効性を検証できた。

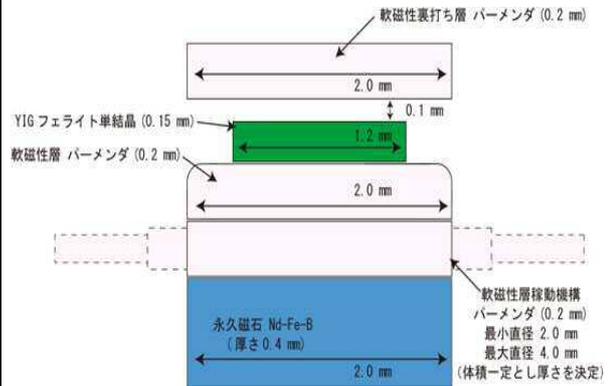


図9 軟磁性円板の半径変化によるバイアス磁場可変機構

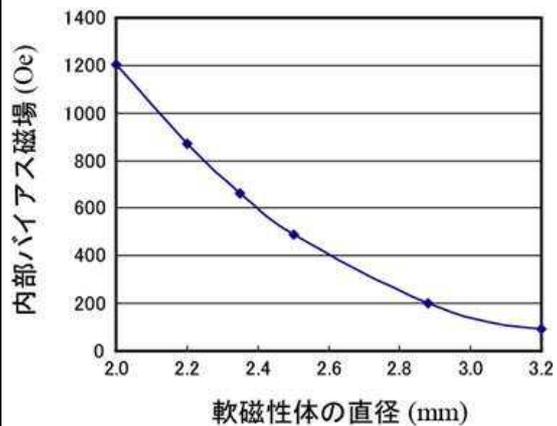


図10 軟磁性円板の直径とバイアス磁場強度の関係 (シミュレーション結果)

#### (4) 新提案アイソレータの設計指針の確立

本原理・構造のアイソレータにおいては、いったん基本構造が定まれば、極めて広範囲周波数域に対しても、動作周波数のチューニングはバイアス磁場の調整で対応できること、挿入損失等の低減等、非可逆伝送特性の改善には特性インピーダンスの微調整が必要であり、それには線路幅等の最適化、フェライト部への電磁波の浸透度合いの最適化等が効果的であることが明らかになった。

本アイソレータの設計の流れを図11に示す。

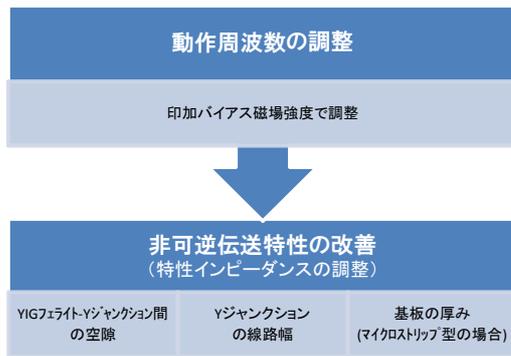


図 11 アイソレータ設計の流れ図

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 山本節夫、アイソレータの小型化、日本磁気学会 まぐね、査読有、Vol. 15、No. 10、2010、pp. 450-456 (2010).
- ② H. J. Cha, T. Sato, T. Kanewaki, T. Tanaka, H. Kurisu, and S. Yamamoto, Proposal of Multi-frequency-band Operation of Bottom Mounting Type Integrated Isolator, Transactions of the Materials Research Society of Japan, MRS-J, 査読有, Vol. 34, No. 3, 2009, pp. 411-414.

[学会発表] (計 7 件)

- ① K. Nishijima, Non-reciprocal Transmission Characteristics of extremely small Isolator Mounted on Coplanar Waveguide, 22<sup>st</sup> Academic Symposium of MRS-Japan 2011 Abstracts, R-23-B, ABS-R20, Dec 21, 2011, 横浜情報文化センター, 横浜市.
- ② A. Yoshida, Isolator for Triple Band Operation in IMT-Advanced Scheme, 22<sup>st</sup> Academic Symposium of MRS-Japan 2011 Abstracts, R-P14-M, ABS-R7, Dec 20, 2011, 横浜情報文化センター, 横浜市.
- ③ A. Yoshida, Non-reciprocal Transmission Characteristics of Coplanar Waveguide Isolator, 20<sup>th</sup> Academic Symposium of MRS-Japan 2010 Abstracts, O-13-M, p. 345, Dec. 22, 2010, 横浜市開港記念館, 横浜市.
- ④ 山本節夫、薄型アイソレータの研究、電気学会高周波マイクロ磁気応用技術調査専門委員会、第 13 回委員会研究報告 13-3, May. 28, 2010, 日本交通協会 特別会議室, 東京.
- ⑤ T. Sato, Design of Coplanar Waveguide Isolator for 4<sup>th</sup> Generation Mobile Communication System, エーブガイド型

アイソレータの設計, 第 19 回日本 MRS 学術シンポジウム, Program and Abstracts, Dec. 8, 2009, 横浜情報文化センター, 横浜市.

- ⑥ Setsuo Yamamoto, Proposal of Small-Sized Microstrip Isolators, MRSJ The 20<sup>th</sup> Anniversary Symposium, Materials for 21<sup>st</sup> Century, Program and Abstracts, IP-13, p. 21, Dec. 6, 2009, Yokohama Media and Communications Center, 横浜市.
- ⑦ A. Yoshida, Improvement in Non-reciprocal Transmission Characteristics of Top Mount Isolator, MRSJ The 20<sup>th</sup> Anniversary Symposium, Materials for 21<sup>st</sup> Century, Program and Abstracts, p. 40, CP-26, Dec. 6, 2009, Yokohama Media and Communications Center, 横浜市.

[図書] (計 1 件)

- ① 山本節夫、他、(株)ティー・アイ・シー、特集 パルス通電場プロセッシング I II - 実用材料・デバイスへの応用 (3), “電子・情報デバイス部材への応用,” マテリアル インテグレーション, Vol. 23, No. 8, 2010, pp. 37-45.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 非可逆回路素子

発明者: 安藤 朗、山本節夫、栗巢普揮

権利者: 国立大学法人山口大学、双信電機株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2011-120781

出願年月日: 23 年 5 月 30 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 節夫 (YAMAMOTO SETSUO)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 30182629

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

佐藤知大 (SATO TOMOHIRO)

山口大学・大学院理工学研究科・学生

吉田明広 (YOSHIDA AKIHIRO)

山口大学・大学院理工学研究科・学生

西嶋開平 (NISHIJIMA KAIHEI)

山口大学・大学院理工学研究科・学生