

Fan Out Wafer Level Package技術による テラヘルツ対応アンテナ一体型モジュール

Terahertz Antenna Integration Module Using Fan-Out Wafer-Level Package Technology

● 石橋大二郎

● 中田義弘

あらまし

300 GHzから3 THzまでの超高周波領域に属するテラヘルツ波と呼ばれる電波は、超高速無線通信や高解像度なイメージセンサーへの応用が期待されている。このような周波数帯域では、半導体チップの接合に利用されるはんだ接合やワイヤボンディングなどの必要不可欠な構造が、モジュールの高周波特性に悪影響を与えることが知られている。筆者らは、それらの影響を抑制するモジュール構造として、次世代のパッケージング技術の一つであるFOWLP(Fan Out Wafer Level Package)を応用したテラヘルツ対応アンテナ一体型モジュール技術を開発した。異なる素子をモールド樹脂で一体化して封止し、再配線技術により素子間を短距離に接続するFOWLP技術を適用することによって、テラヘルツ波帯の周波数で動作する半導体チップとアンテナの接続構造の短距離化および低損失化を実現した。

本稿では、FOWLP技術を応用したテラヘルツ対応アンテナ一体型モジュールについて述べる。

Abstract

It is expected that terahertz wave, which has frequencies between 300 GHz and 3 THz, will be applied to ultrahigh-speed wireless communication, high-resolution imaging sensors, and so on. In that frequency range, connection structures between electronic devices such as soldering balls and bonding wires badly affect the high-frequency characteristics of a terahertz module. The authors developed a terahertz antenna integration module structure to which fan-out wafer-level package (FOWLP) technology was applied as a module structure that was not affected in this way. The FOWLP technology integrates different chips with a mold resin, and connects them using redistribution layer (RDL) technology. With this technology, the connection length and the loss of the connection structure between the chip and the antenna were reduced. Degradation of the RF characteristics due to the modularization was prevented as a result, and this means that small devices can be used for terahertz communication.

ま え が き

近年、通信分野においては、コンテンツ容量の増大に伴う無線通信の高速化要求や、800 MHz、2 GHzなどのマイクロ波帯の周波数が逼迫^{ひっぱく}していることから、より高い周波数の電波の応用研究が注目を集めている。特に、およそ300 GHzから3 THzの周波数を持つ電波はテラヘルツ波と呼ばれ、その特徴を利用したアプリケーションの研究開発が盛んに行われている。

アプリケーションの一例として、光ファイバーに匹敵する超高速な無線通信が挙げられる。電波の高周波化に伴い、占有できる周波数帯域は増加する。通信速度は、一般に使用できる周波数帯域に比例して高まるため、周波数が高い方がより高速な無線通信を実現できる。例えば、80 GHz前後のミリ波帯を利用することで、LTE（2 GHz帯）の約30倍である10 Gbpsという高速な無線通信が可能になる。更に、ミリ波より高い周波数を持つテラヘルツ波を使用することで、数十Gbpsから数百Gbpsという非常に高速な無線通信が実現できると言われている。⁽¹⁾ 現在の電波法においては、275 GHz以下の周波数に対して用途が割り当てられている。⁽²⁾ 一方、テラヘルツ波帯である300 GHz以上の周波数帯に対しては、標準化団体において利用を検討している段階であり、今後幅広い周波数帯域の中で高速無線通信に適した周波数帯を利用できる可能性がある。

テラヘルツ波の活用が期待されているのは無線通信分野に限らない。例えば、セキュリティ分野においては、隠匿された危険物の検知への応用が期待されている。従来、赤外線やX線を用いたセキュリティチェックが空港などで実施されているが、比較的波長の長い赤外線カメラは透過性が低く、衣服の下に隠し持った危険物の検知が困難である。また、これらの検知が可能であるX線は、被曝の危険性から安易に人体へは照射できない。

これに対し、ミリ波やテラヘルツ波は、赤外線よりも長い波長を有することから衣服などを透過でき、また人体に対して安全である。実際に、ミリ波イメージセンサーは海外の一部の空港で運用されている。テラヘルツ波はミリ波より更に波長が短く、より高分解能な検査が可能となるため、

多種の危険物を検出できる技術として期待されている。そのほかにも、構造体内部に生じた微小なクラック（ひび）の検査ができるため、例えば橋梁や道路、公共施設などの建造物において、劣化の早期発見が可能となる。また、医療やバイオ、農業、食品などの様々な分野においても応用が期待されている。

テラヘルツ波における課題

現在、テラヘルツ波を活用した機器で最も普及しているのは、光学技術の応用により開発されたものであるが、光路長の制御にプリズムやミラーなどが必要であることから機器の大型化が避けられない。このため、小型化が要求される通信分野に適用することは困難である。これに対し、テラヘルツ波のほかの発振手法である化合物半導体などを用いた半導体チップは、機器の小型化や省電力化に寄与できる。しかし、この技術は光学技術を用いた発振手法と比較して、超高周波化が困難であった。ところが、近年では1 THz以上の信号の発振を可能とする半導体チップが報告されており⁽³⁾、近い将来テラヘルツ波を送受信できる半導体チップモジュールが実用化されると考えられる。そのような半導体チップモジュールでは、アンテナや増幅器などの素子を接続するための電気回路が必要となるが、マイクロ波やミリ波の回路技術をそのまま適用することは困難である。これは、電気回路上で信号の波長が短くなることが原因の一つである。

例えば、10 GHzのマイクロ波の波長は3 cmであり、1 mmの配線中では直流信号と見なせるのに対して、300 GHzのテラヘルツ波の波長は1 mmであり、同じ1 mmの配線中であっても交流信号として扱う必要がある {図-1 (a)}。一般に、回路構造の寸法による影響が無視できなくなるのは、波長の1/20から1/10程度と言われている。テラヘルツ波帯では波長が1 mm以下になるため、この影響が無視できなくなる寸法は数十 μm と非常に微細となる。これにより、チップ間のプリント配線板上の配線における損失などが問題になるのはもちろんのこと、マイクロ波帯などでは無視できるプリント配線板と半導体チップを接合するはんだ接合やワイヤボンディングなどの部分でさえ、特性に悪

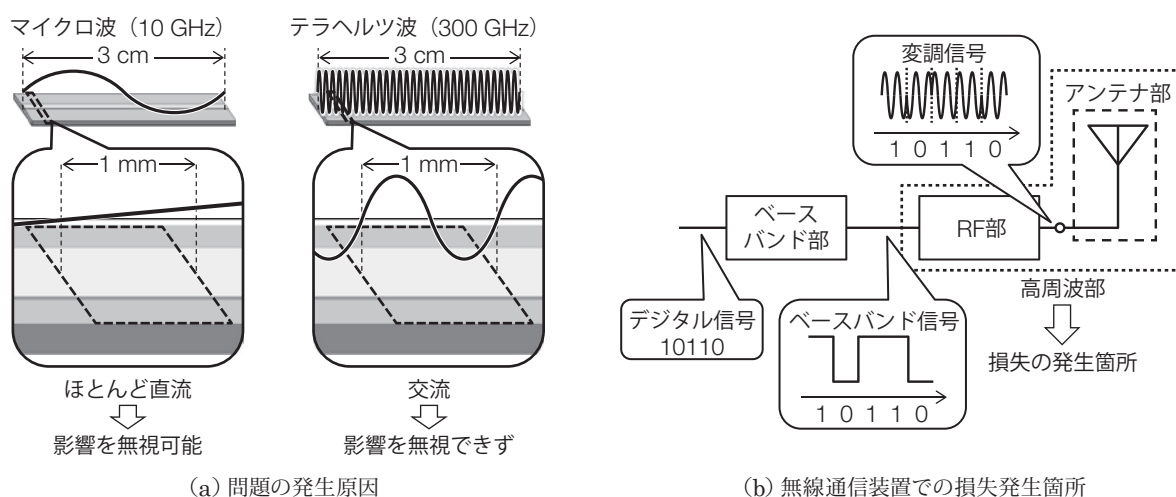


図-1 テラヘルツ波における問題

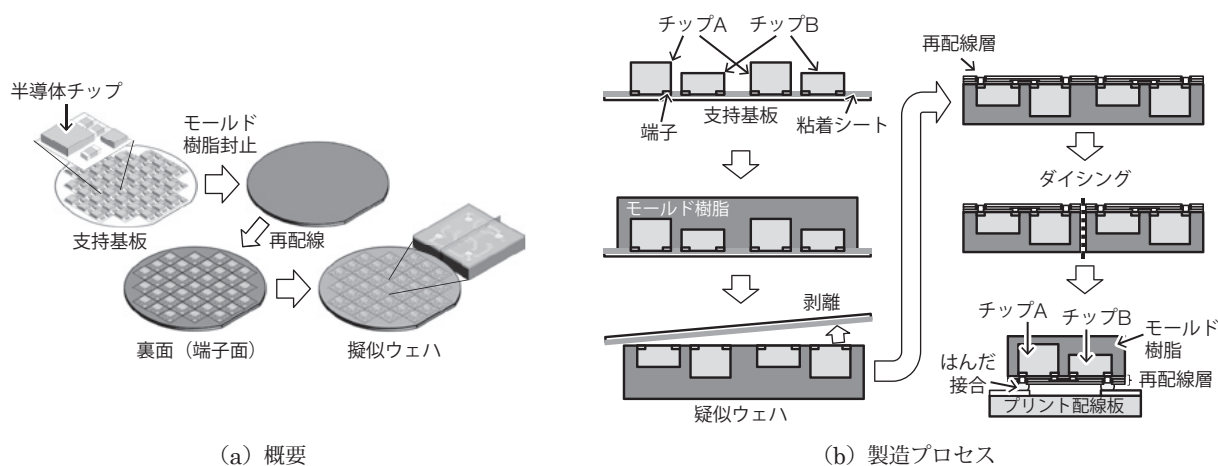


図-2 FOWLP技術

影響を与える恐れがある。

無線通信モジュールは、送受信する基となる信号を形成するベースバンド部と、ベースバンド信号の変調や受信信号の復調、信号の増幅を行うRF部、および電波を送受信するアンテナ部で形成される {図-1 (b)}。RF部とアンテナ部、およびその間の回路を流れる変調信号は高周波信号として取り扱う必要があるため、その部分では上述した配線や接合部の影響が問題となる。したがって、無線通信の品質を確保するためには、この部分の低損失化が重要な課題である。これを解決するためには、各素子を十分低損失化するだけでなく、各素子の特性や形状を踏まえた上で、適切なモジュールの接続構造を決定することが重要である。

筆者らは、次世代のパッケージング技術として期待されているFOWLP (Fan Out Wafer Level Package)⁽⁴⁾を応用し、テラヘルツ波帯で動作するアンテナと半導体チップを短距離かつ低損失に接続できるアンテナ一体型モジュール技術を開発した。

FOWLP技術

FOWLP技術とは、半導体チップや受動部品などの部品をモールド樹脂により一体化したパッケージの形態であり {図-2 (a)}、主に携帯電話やスマートフォンに内蔵するプロセッサの高密度集積に利用されている。FOWLPの基本的な製造プロセスは、個片化 (ウェハを切り分けて半導体チップの1個片

を形成する作業)してから樹脂で封止する通常のパッケージと異なり、このパッケージでは複数のチップを大きなウェハ形状に樹脂で封止した疑似ウェハを作成し、再配線技術と呼ばれるプロセス技術により半導体チップや受動部品間を接続した後に個片化する。この技術では、通常のパッケージに必要なパッケージ基板が不要となることから、モジュールの薄型化と低コスト化、配線の短距離化などが特長として挙げられる。特に、再配線技術により形成した配線は、はんだやワイヤなどを用いずに部品間を接続できることから、超高周波帯における低損失な実装技術として注目を浴びている。

FOWLP技術の製造プロセスを図-2 (b) に示す。まず、FOWLP内に封止する電子部品を支持基板の表面に配置する。支持基板上には粘着シートが貼り付けられており、これにより部品を固定する。その後、モールド樹脂で封止し、支持基板を剥離させて疑似ウェハを形成する。再配線層は、電子部品の端子が露出している面に形成される。再配線層が形成された疑似ウェハをダイシングにより個片化することで、複数の部品を一体化したパッケージが得られる。

アンテナ一体型モジュール構造

アンテナ一体型モジュール構造を設計するためには、テラヘルツ波に適したアンテナを検討する必要がある。通常、ミリ波より高い周波数の信号

の伝送には、低損失を実現するために導波管と呼ばれる中空の伝送線路が使用されている。ホーンアンテナは、その導波管の延長として容易に接続できることから、システム全体を低損失化できる。テラヘルツ波帯でも優れた特性を有するホーンアンテナは容易に設計できるが、実用的な特性を得るためには寸法を数波長程度と大型にする必要があるため、小型に集積することは困難である。

また、指向性の高い電波を通信用途で運用する場合には、アンテナをアレイ化（並列配置化）する必要があるため、それに適したアンテナ構造が必要である。そのため、開発したモジュール構造では平面アンテナの一種であるパッチアンテナを用いた。パッチアンテナは非常に単純な構造であり、モジュールを複数並べることで容易にアレイ化できる。また、再配線技術による形成も可能であることから、一体化モジュールに適したアンテナであると言える。

今回開発したアンテナ一体型モジュールの構造を図-3 (a) に示す。本モジュールは、前述のように半導体チップとアンテナまでを接続するMSL (Microstrip Line) と呼ばれる伝送線路を再配線技術によって接続しているため、はんだ接合と比較して接合部の伝送損失を低減できる。また、半導体チップとアンテナの間のMSLの距離も、はんだ接合と比較して近距離に配置できるため、伝送線路の損失も低減できる。

アンテナ部の構造としては、パッチアンテナの

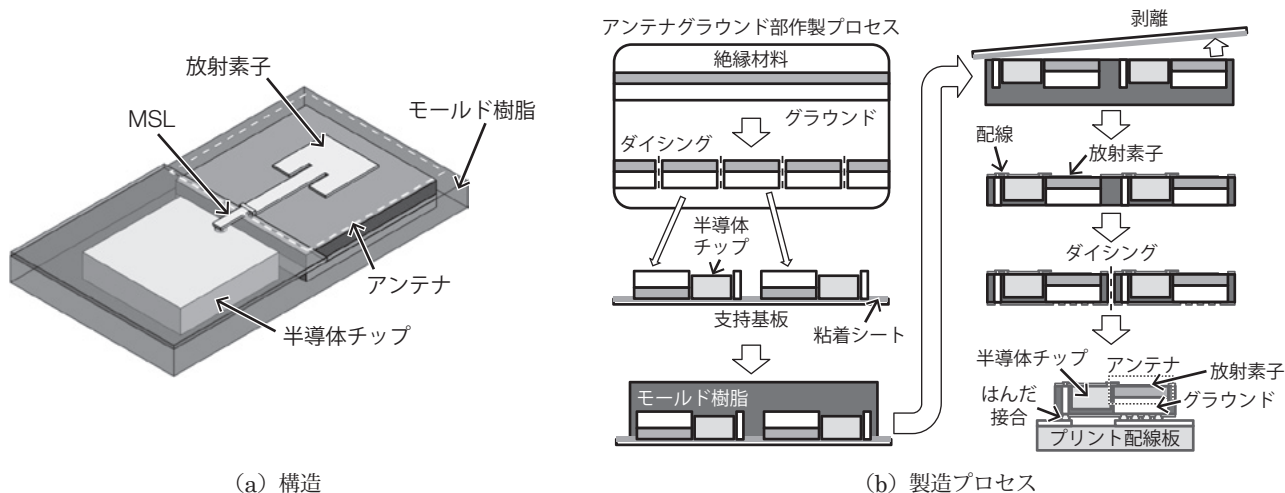


図-3 アンテナ一体型モジュール

グラウンドがモールド樹脂内に埋め込まれており、放射素子は表面側に再配線技術によって形成されている。埋め込む放射素子とグラウンドとの間に絶縁材料が必要であるが、放射素子とグラウンドの距離は埋め込む絶縁材料の厚みで調整できるため、その距離を任意に設計できる。更に、埋め込む絶縁材料にプロセス上要求される特性はないため、再配線技術には通常利用されない低損失な絶縁材料が使用できる。

今回開発したアンテナ一体型モジュール構造の製造プロセスを図-3 (b) に示す。基本的には、図-2 (b) に示した通常のFOWLPのプロセスと同一であるが、モールド内部にアンテナ構造を埋め込むために、絶縁樹脂とグラウンドが一体化になったブロックを半導体チップとともにモールド樹脂に封止するプロセスを開発した。埋め込むブロックは、グラウンドとなる金属の板に絶縁樹脂を積層し、それをダイシングすることで得られる。

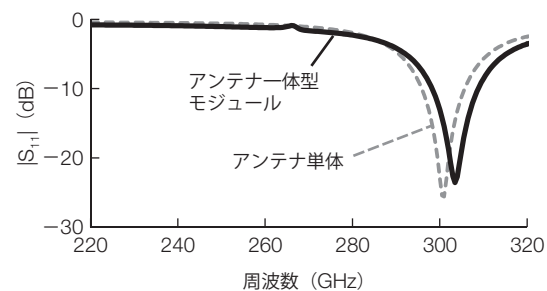
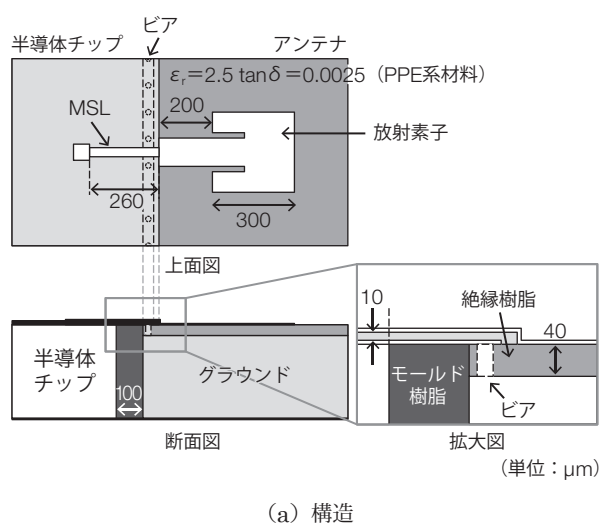
モールド樹脂で封止し、支持基板を除去した後、再配線技術を用いて半導体チップと放射素子を接続する伝送線路とともに、絶縁樹脂が露出す

る面に放射素子を形成する。その後は、通常のFOWLP技術のプロセスと同様にダイシングして個片化することでモジュールを得る。通信装置として使用する場合には、モジュールをプリント配線板にはんだ接合などで実装する必要がある。開発したモジュールでは、RF部とアンテナ部を一体化しているために、はんだ接合部は損失の原因とならずに良好な高周波特性を実現できる。

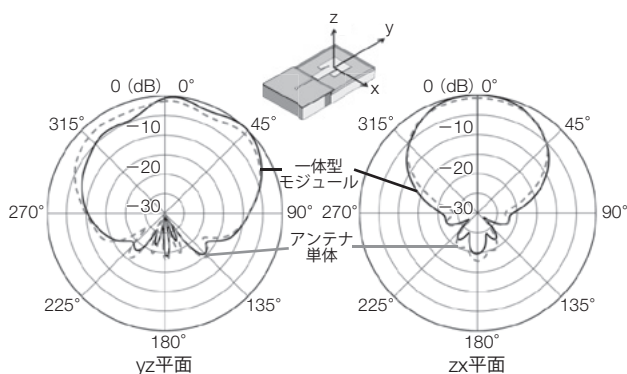
モジュール設計と試作

本章では、開発したアンテナ一体型モジュール構造の試作結果について述べる。なお、特に断りのない限り、以下の設計は有限要素法を利用した電磁界解析を用いて行った。

設計したアンテナ一体型モジュールの寸法を図-4 (a) に示す。ここでは、アンテナを300 GHzで動作するように設計した。絶縁材料には、10 GHzで比誘電率(ϵ_r) 2.5, 誘電正接($\tan\delta$) 0.0025のポリフェニレンエーテル (PPE) 系の有機材料を利用している。絶縁材料の厚さはアンテナの放射効率に影響を与えるため、最大の放射効率を得



(b) 反射特性



(c) 放射指向性

図-4 設計アンテナ一体型モジュール

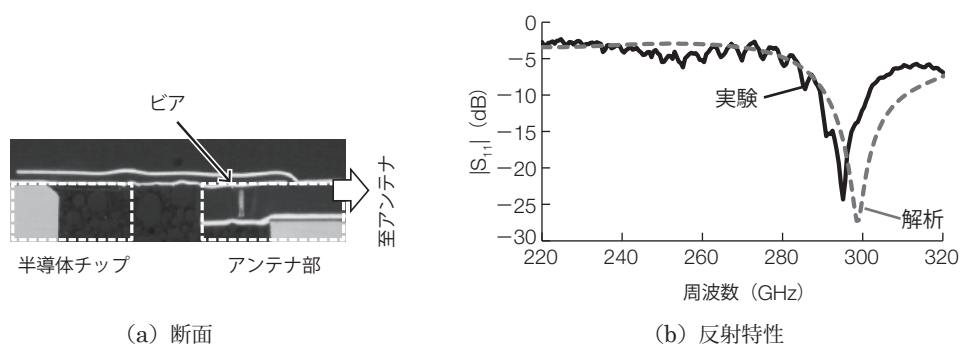


図-5 試作モジュール

られるように厚さを40 μm とした。アンテナの放射素子となるパッチの寸法はおよそ300 μm □であり、これは共振周波数300 GHzでの波長のおよそ半分程度の寸法である。

開発したモジュールの構造は前述のとおり、アンテナと半導体チップをモールド樹脂内に封止して、再配線技術によりアンテナと接続線路を形成した。半導体チップとアンテナとを接続する線路は50 Ω のインピーダンス特性を有するMSLとした。アンテナ部のMSLと接続する部分において配線の太さが不連続となっているが、この部分での反射は設計により十分抑制されていることを確認した。また、半導体チップ側のMSLのグラウンドとアンテナ側のグラウンドで導通させるために、アンテナ側の絶縁樹脂に100 μm 間隔で20 μm 径のビアを形成した。

以上の構造を想定して電磁界解析によってモジュールの特性を確認した。パッチアンテナとアンテナ一体型モジュールの反射特性を図-4 (b) に示す。反射特性は、入力ポートへの入力電力に対して、アンテナで反射して入力ポートに戻ってきた電力量の割合を示している。図-4 (b) は縦軸がデシベル表記であるため、値が0のときは電力が全て入力ポートに戻っており、値が小さくなるにつれて反射量が減少していることを意味している。周波数が300 GHzのときには反射がほとんどないことが分かる。これは、300 GHzにおいて入力電力がほとんど電波として放射されていることを示しており、このアンテナが300 GHzで動作していることが確認できた。パッチアンテナとアンテナ一体型モジュールの放射指向性を図-4 (c) に示す。アンテナ一体型モジュールの特性は、ほ

ぼパッチアンテナ単体の特性と一致しており、今回設計したアンテナ一体型モジュールの構造がアンテナ特性に大きな影響を与えないことが確認できた。

最後に、試作を行い電磁界解析の結果と実験結果を比較した。試作モジュールの断面を図-5 (a) に、反射特性を図-5 (b) 示す。図-5 (b) によると、実験結果と解析結果がほぼ一致していることが確認できた。多少の共振周波数のずれやリップル（波打つような波形の乱れ）などは、試作時の寸法のばらつきや配線の表面粗さがテラヘルツ波の領域では無視できない程度の大きさとなったために生じたものである。今後、これらの寸法精度や加工精度を向上させることが重要な課題である。

本試作により、今回開発したアンテナ一体型モジュールがテラヘルツ波領域においてパッチアンテナ単独に近い性能で動作することが確認でき、アンテナと線路の接合部の影響を抑制できるという有用性を示すことができた。

む す び

本稿では、テラヘルツ波領域を使用した次世代の超高速無線通信や、高解像度イメージセンサーに向けたテラヘルツ波アンテナ一体型モジュール構造について述べた。テラヘルツ波のような超高周波領域では、従来のはんだやワイヤなどによる実装形態では損失を抑えることができない。このため、FOWLP技術を利用してアンテナと半導体チップを近接させ、かつはんだなどを用いない構造で接続できるアンテナ一体型モジュール技術を開発し、テラヘルツ波帯で動作することを電磁界解析と実験により示した。

今後は、超高周波用半導体チップとして化合物半導体を用いて開発したアンテナ一体型モジュール構造を作製し、通信特性の検証を進める。また同時に、超高速無線通信を可能とするアレイアンテナ一体型モジュールを開発する。

参考文献

- (1) H. J. Song et al. : Present and future of terahertz communications. IEEE Trans. THz Sci. Technol., Vol.1, No.1, p.256-263 (September 2011).
- (2) 総務省：周波数割当計画. 2016年4月.
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/share/plan.htm>
- (3) M. Asada et al. : THz oscillators using resonant tunneling diodes at room temperature. In Proc. IRMMW-THz 2010, p.1-3 (September 2010).
- (4) T. Meyer et al. : Embedded Wafer Level Ball Grid Array (eWLB). Proc. 2008 10th Electron. Packag. Techn. Conf. (EPTC 2008), p.994-998 (December 2008).

著者紹介



石橋大二郎 (いしばし だいじろう)

デバイス&マテリアル研究所
デバイスイノベーションプロジェクト
高周波デバイス実装技術の研究開発に従事。



中田義弘 (なかた よしひろ)

デバイス&マテリアル研究所
デバイスイノベーションプロジェクト
次世代パッケージング技術の研究開発に従事。