

第5章 各種要素技術の動向

5-1 高速信号処理技術、周辺技術の最新動向

(テーマ)	シリコンテクノロジーを中心とした高速信号処理技術、周辺技術の動向
(講師)	ルネサスエレクトロニクス株式会社 技術開発本部 システムコア開発統括部 統括部長 有本和民

LSI 技術の進展により、人が快適な生活を過ごすため、言い換えれば、技術が単なるビジネスから要求されるレベルを超えて、人を思いやる時代になっている。同時にコストパフォーマンスからエネルギーパフォーマンス(エコ、グリーン等で表現される高エネルギー効率指向)のほうに重要視される価値の変遷も起こっている。このような背景を踏まえ、マルチコア(複数の CPU による処理)を中核としたハードウェアとソフトウェアの協調設計による、高速信号処理技術、周辺技術の最新動向について述べる。

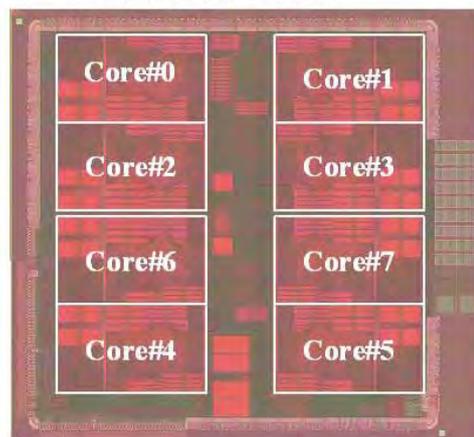
システムの高度化・複雑化の要求に対し、ハードウェアは、半導体の微細化の継続的な進展により1チップに搭載可能な CPU コア・IP の数は増加したが、トランジスタのリーク電流の増加を伴い、動作周波数向上以上に消費電力の増加をまねくため、動作周波数向上による処理性能向上からマルチコアによる処理性能向上が図られている。また制御用の処理を各 CPU に分散させることで、リアルタイム応答性能の向上も可能となる。微細化によりデバイス特性の製造ばらつきが大きくなる現象に対しても、さまざまな動作補償技術が取り入れられ、製造上の課題も克服されている。前述の高性能化は、低消費電力スケールデバイス・回路設計技術、アーキテクチャ設計、信号処理アルゴリズム等の各レイヤーの密な協調設計技術により実現されている。特に、画像処理等では、信号処理アルゴリズムの並列化が、システム全体の高エネルギー効率を実現している。一方、年を追うごとにソフトウェアの機能は増加し、ソフトウェアのテストおよびチューニング費用の増大を引き起こし、ソフトウェア開発コストはトータルシステムコストの60%を占める場合も出てきている。これに対し、マルチコアは、複雑化するシステム仕様に対し、ハードウェアやソフトウェアの各種レイヤーに API(Application Program Interface)を設けることにより、それらの再利用性を高めて、設計コスト低減、設計期間短縮を実現するプラットフォーム設計手法との整合性が高い。またマルチコア用のコンパイラ技術や検証技術も相まって進展している。

図1は 45nmCMOS で作製された8個の CPU を搭載した SoC(System On Chip)であり、このマルチ CPU チップの特徴は 各々の CPU を別々の動作周波数で動作させることができ、動作電力は動作周波数に比例する。データの一貫性を維持しつつ、処理の重いところはフルスピードで 中くらいの負荷のところは 負荷に応じた周波数で CPU を動作させることにより、低消費電力化を可能としている。一方、組み込み用途を中心に、より一層の高性能システムを低消費電力で実現していくために、ソフトウェアに対する柔軟性の高い CPU に加え、処理に合わせてハードウェア設

計された並列実行性が高く、電力性能効率が高いアクセラレータを付加するケースが増えている。しかし、処理に合わせたハードウェアなので、柔軟性がなく、機能拡張や仕様変更があると、ハードウェアの再設計という長い開発期間を必要とする。この二つの解の間には、柔軟性と性能効率・電力効率におけるトレードオフの関係がある。

ユビキタス時代の現在、処理に合わせてハードウェア設計をしたアクセラレータでは、モバイル機器やマルチメディア機器等の多様なアプリケーションに対応した新規アルゴリズム処理、新規コーディック方式等を組み合わせた協調設計で高性能、低電力を実現するが、継続的なシステム性能向上要求に対し、高速・低消費電力マルチコアCPUに加え柔軟性を高めたDSP やプログラマブルなアクセラレータの搭載が有力な解決策になっている。図2は、横軸が柔軟性、縦軸が並列実行性(性能効率)と低電力性となっていて、多様なアプリケーションに適したアクセラレータがマッピングされている。また並列性の少ない処理には、逐次処理部の性能向上に適した機能を搭載する。つまり組込み機器向けマルチコア技術は、アプリケーションの成熟度に応じて、種々の最適技術を組み合わせたヘテロジニアスなマルチコアが有力な解となっている。

マルチコア・アーキテクチャ (電力制御SoC)



ISSCC2008 論文番号4.5 (ルネサス他)から引用

図5-1 8CPU 搭載マルチコア SoC

あらゆる先端プロセッサ技術を組み合わせて、安全、安心、快適で、持続可能な社会を実現する。

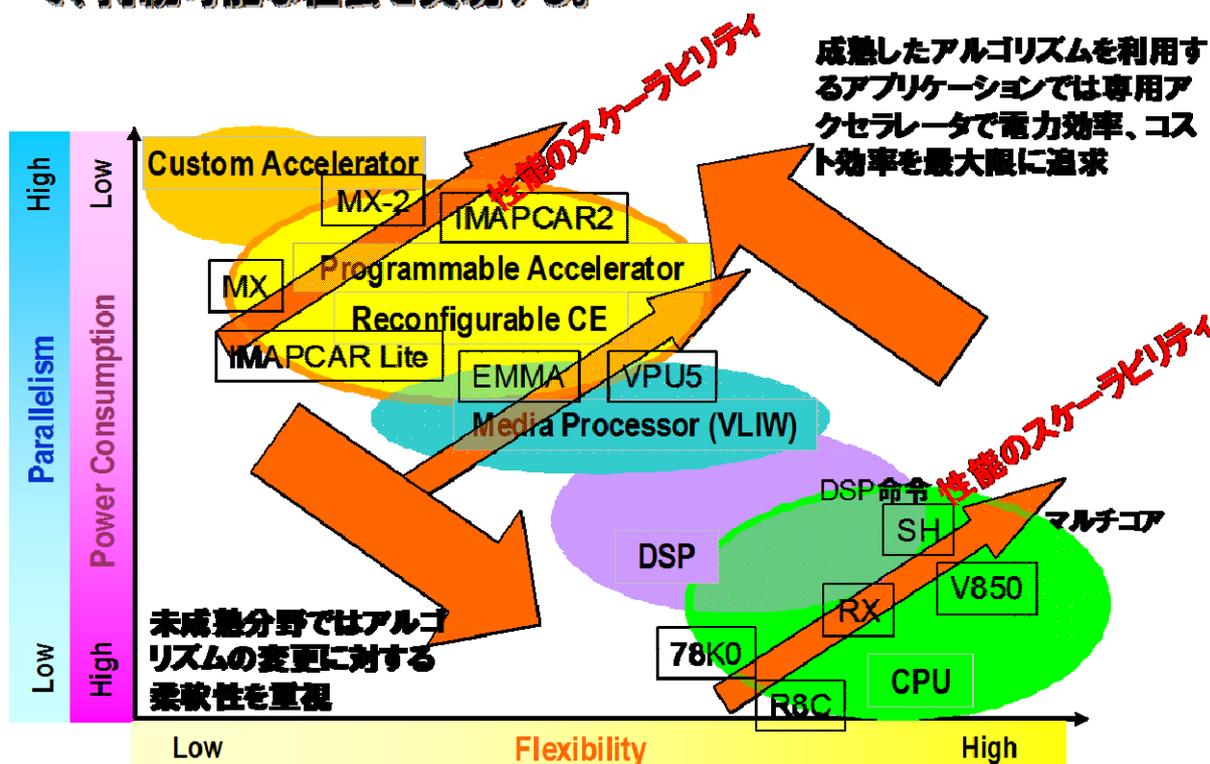


図5-2 ヘテロジニアス対応各種コア特性

今後は、マルチコアから、さらに搭載コア数の多いメニイコアの方向へ向かっていくが、多数のコア間を接続する NoC(Network On Chip)によるルーティング制御を中心に、メニイコアシステム向けの電力・性能制御技術を取り込んだ並列プログラム開発環境、シェアードメモリ、CPU 多重化による高信頼性技術等が重要な技術開発要素となり、システムの継続的・飛躍的な高性能化が実現されていくと考えられる。(図5-3参照)

マルチコアチップコネクション→メニイコアへ (ネットワーク部が主な技術課題に)

①マルチコア用動作環境

ハードウェア構造と課題

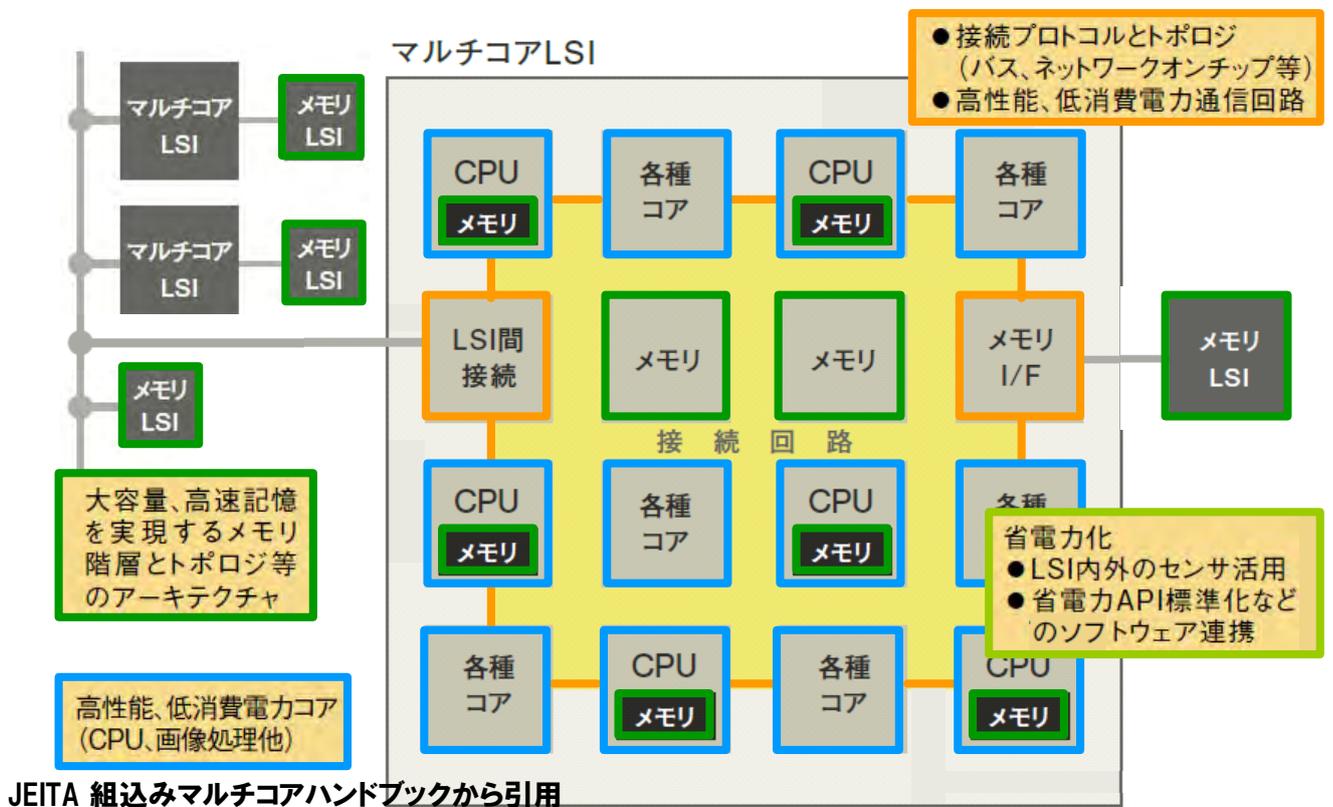


図5-3 メニイコア構成図

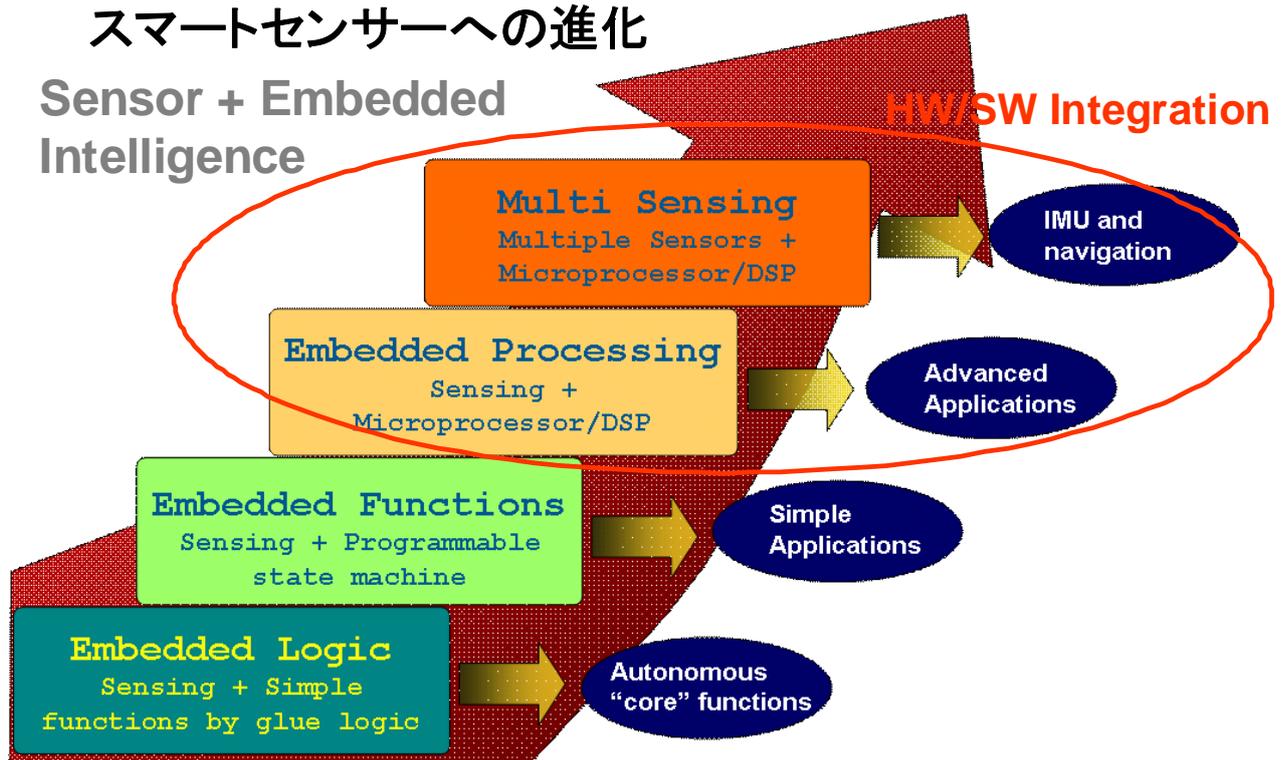
半導体デバイスは今まで Moore の法則の下、スケーリングを進めてきたが、微細化デバイスの物理的限界や製造コスト等の経済的要因から、今後のシステムオンチップ化が、微細化を継続する More Moore と異種デバイスを融合する More Than Moore の2つの解になっていく。

特に組み込みアプリケーションでは、異種デバイス融合によりシステムの高性能化を推進していくと考えられる。従来 System In Package Chip (SiP) と呼ばれ、SoC とメモリをひとつのパッケージに

封止していたが、今後は、各種センサー、MEMS、高周波化合物半導体デバイス等を一体化してパッケージすることで、システムの小型化、低消費電力化、低コスト化を推進していく。この場合単なる物理的な一体化だけでなく、異種デバイスの互いの利点を融合し新しいシステムを実現する真の一体化が重要となる。チップ間通信機構をベースにセンサー等と回路とを融合するためのアーキテクチャ、回路モデリング、テスト、ソフトウェア等の技術が、異種デバイスの新しいアプリケーションを創造していくと考えられる。TSV (Through Silicon Vias)とフレキシブルインターコネクトによるCMOS SoCと多数のセンサー・MEMSの3次元実装によるインテリジェントセンシングシステムが構築されていく。(図5-4参照)

テラヘルツ時代においては、物理層を介して受け渡しされる膨大なデータに対し、各アプリケーションに要求される信号処理速度性能要求に対し、エネルギー効率を最大にする、信号処理、電力制御、フレキシブル技術、異種デバイス融合実装技術等が、マルチコア、メニコア技術を核にしたプラットフォーム上で実現されていくと予想される。

Fusion of MEMS and CIRCUIT スマートセンサーへの進化



ISSCC2010 Evening Session ES.3より引用

図5-4 異種デバイス融合の進化

5-2 THz エレクトロニクス時代における化合物半導体デバイス技術

(テーマ) THzエレクトロニクス時代における化合物半導体デバイス技術
(講師) NTT フォトニクス研究所 所長 榎木孝知

【概要】

高性能デバイス特性、多様なアナログ特性を必要とするTHzエレクトロニクスに対して、ヘテロジニアス集積で各種デバイスの性能を最大限に発揮することが求められる。現状、ヘテロジニアス集積は米国を中心に研究が加速している。欧米では軍用に高速化デバイスの開発がのぞまれ、異業種の各社がプロジェクトに参加する形で連携し高速・小型化を実現している。逆に国内は、既存の応用を目指したデバイス開発が主で、高性能デバイスによる新規応用や市場の形成等の開発が停滞している。持続的なデバイス開発には、開発に見合う市場が必要であるが代替技術の台頭や、市場規模の成長を待ちきれないなど、現状では新規開発が困難である。長期的な高い目標を掲げて、開発段階から異業種間で連携し、技術の高度化と技術融合を試みる必要がある。

【内容】

化合物半導体の高電子移動度チャネルとゲート長の微細化により 300GHz 帯の LNA(Low Noise Amp: 低雑音増幅回路)、NF(Noise Figure: 雑音指数)4dB 以下を実現できる可能性がある。既に周波数特性は到達されており、NF は低減に向けた開発に着手すれば 2 年程度で実現可能と考えられる。寄生素子の低減が可能となれば、2THz 級の帯域も期待できる。Rg、Rs、Rd をどのように低減するかが技術課題である。

信号源と検出器は必須のデバイスであり、300GHz 以下では化合物トランジスタが有利である。300GHz 超の領域では UTC-PD(Uni-Traveling-Carrier Photodiode: 単一走行キャリア・フォトダイオード)や RTD(Resonant Tunnel Diode: トンネル共鳴ダイオード)が世界最高出力である。NTT フォトニクス研究所と、東工大は室温において 1.04THz を約 7 μ W の出力で発生させるデバイスを実現した。

Si 系のトランジスタは高速化が期待される一方で耐圧の低下が課題であり、研究トレンドは CNT(Carbon nanotube: カーボンナノチューブ)、グラフェン、化合物 MOS、スピンなどの新原理や新材料の開拓に動いている。InP 系 HEMT(High Electron Mobility Transistor: 高電子移動度トランジスタ)や HBT(Heterojunction Bipolar Transistor : ヘテロ接合バイポーラトランジスタ)は耐圧と高周波特性のトレードオフマージンが大きく、欧米は軍事向けに高速化を継続開発している。米国は DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)が COSMOS(Compound Semiconductor Materials on Silicon)プロジェクトを実施しており、小型、高性能化の実現に向け、異業種間の連携、ヘテロジニアス集積に取り組んでいる。欧州ではテラビットイーサネットのプロジェクト GALACTICO が異業種間を結び研究開発を行っている。

一方で国内は開発が停滞しているのが現状である。持続的なデバイス開発には、開発に見合う市場と、戦略に沿った開発が必要であるが、各大学、各社が個別に研究している現状では、市場規模の成長を待ちきれない、一定市場に複数企業が参入しパイを分割する、代替技術の台頭など、新規開発を継続的に実行することが困難となってきている。国内においても、長期的に高い目標を掲げ、開発段階から異業種間で連携して、技術の高度化と技術融合を試みる枠組みが必要である。

※ 次のページに説明資料を掲載する。

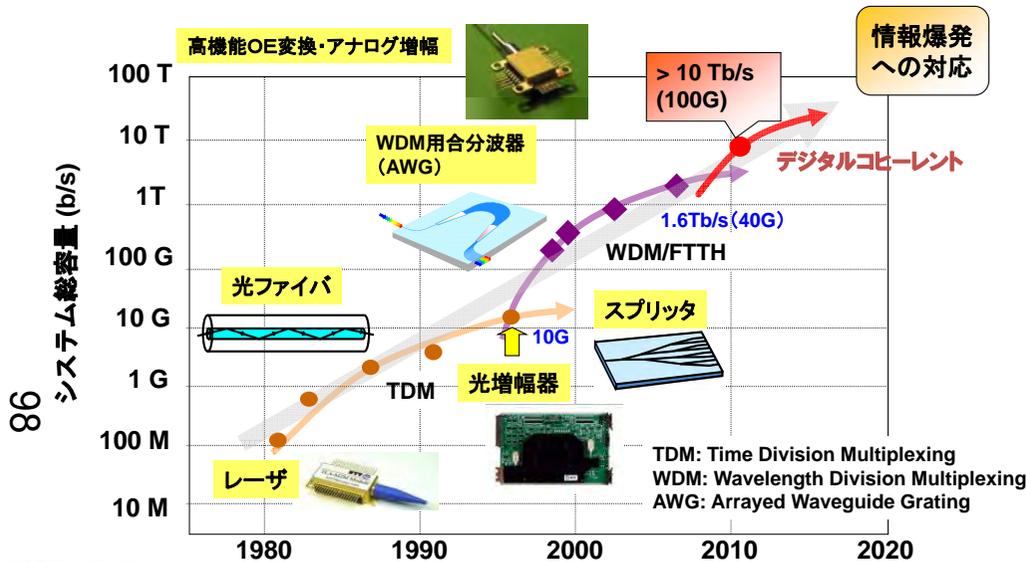
THzエレクトロニクス時代における 化合物半導体デバイス技術

NTTフォトニクス研究所
榎木孝知
2011. 1. 14

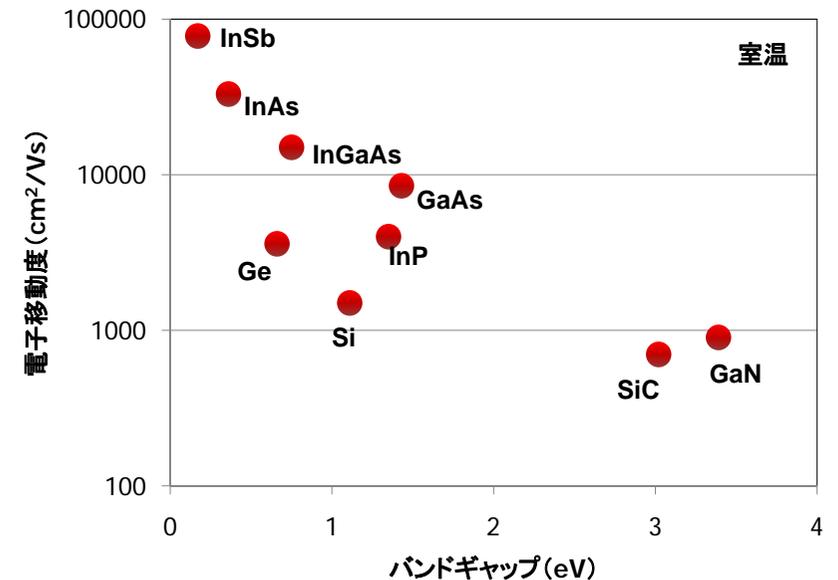
- ◆ 通信を支えるハードウェア技術
- ◆ 高周波化合物半導体電子デバイスの役割
- ◆ 高周波化合物半導体電子デバイスの現状と可能性
- ◆ 海外での取り組み例
- ◆ 持続的なデバイス開発の課題

光ファイバ伝送実用システムの進展

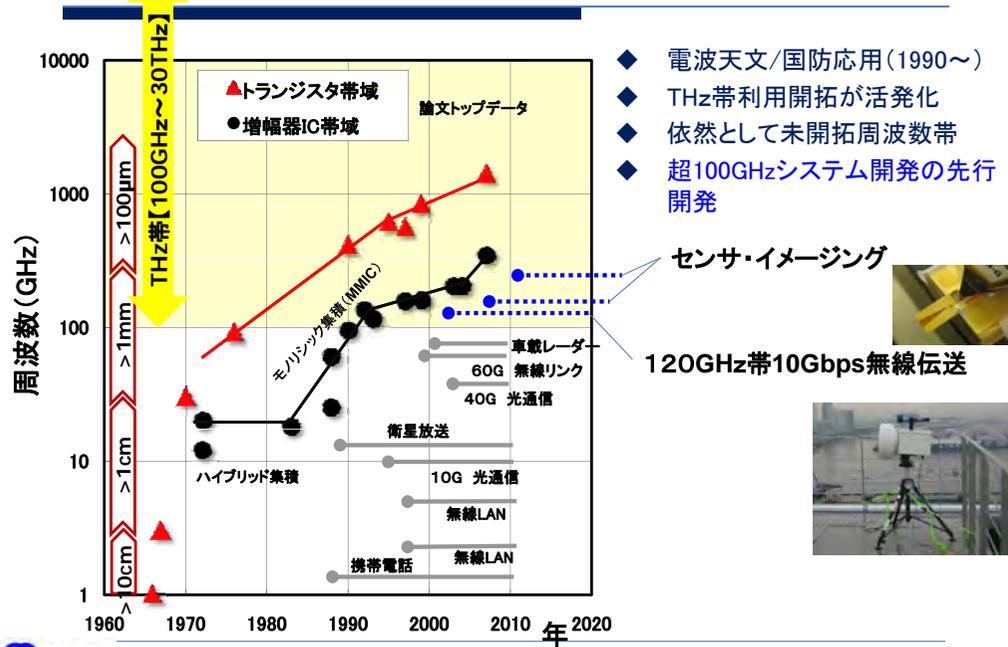
光の物理資源(時間・波長・位相・偏波・振幅・空間)を活用して、情報伝送



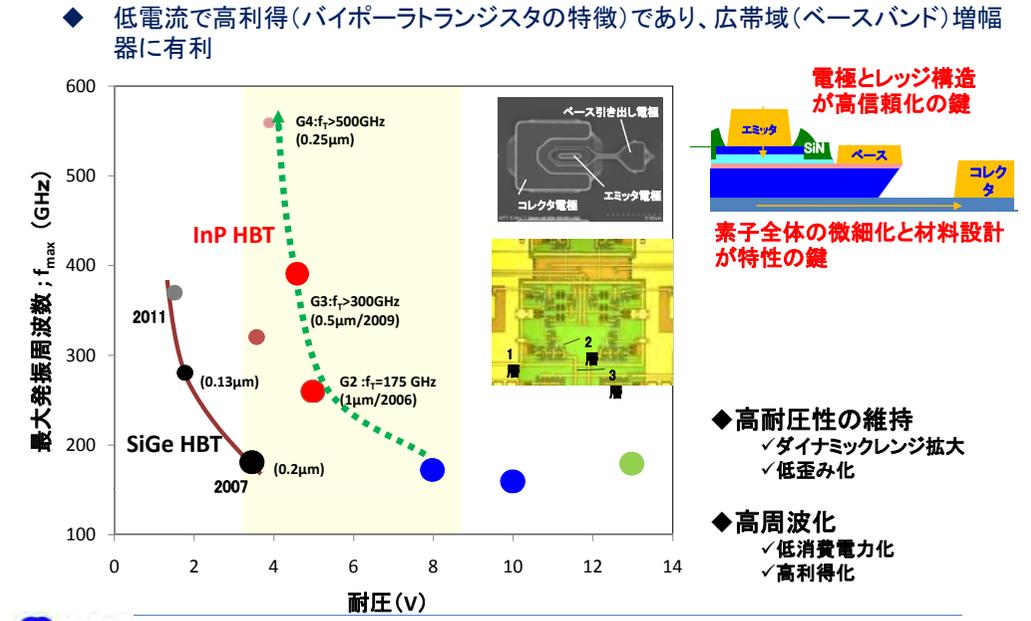
半導体の電子移動度



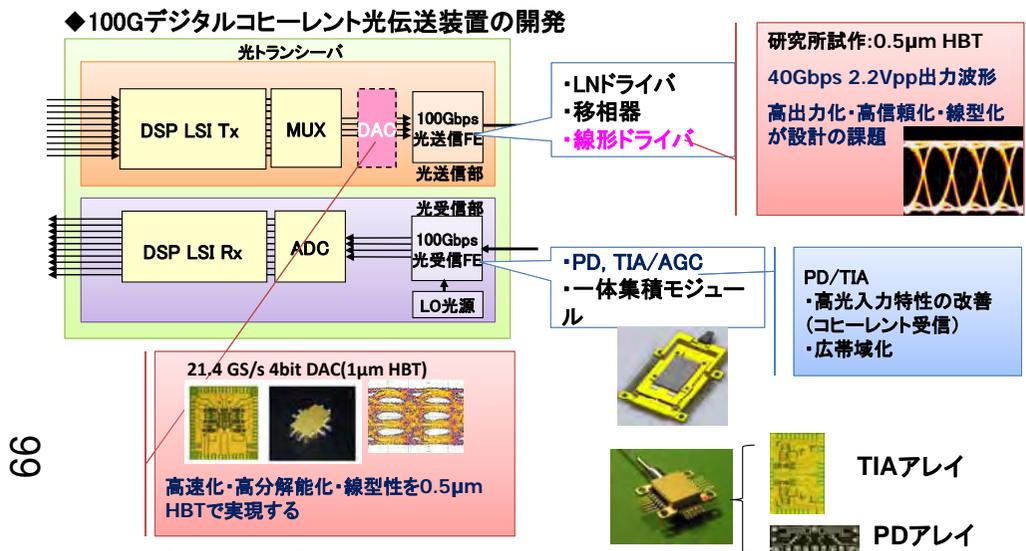
超100GHz(THz)エレクトロニクス



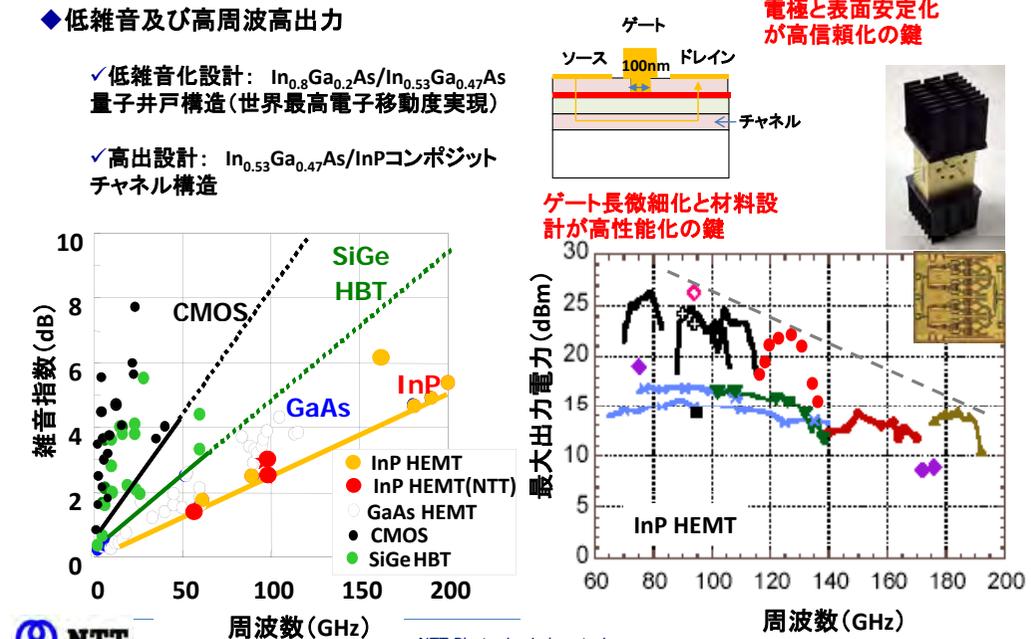
InP系HBT(光通信IC)



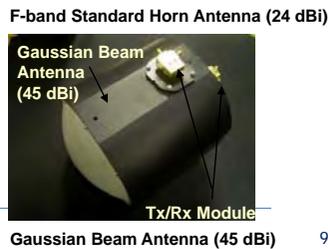
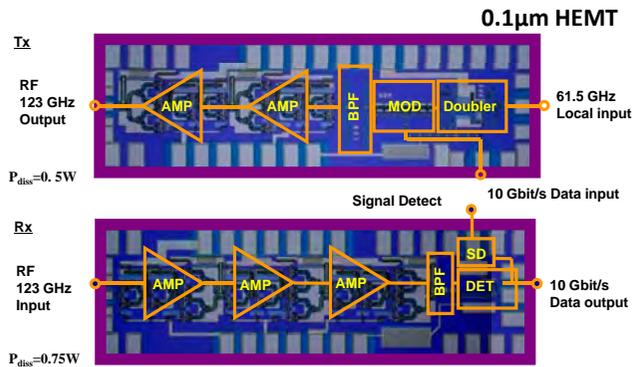
次世代伝送システムを支える高速光エレクトロニクス技術



InP系HEMT(ミリ波IC)

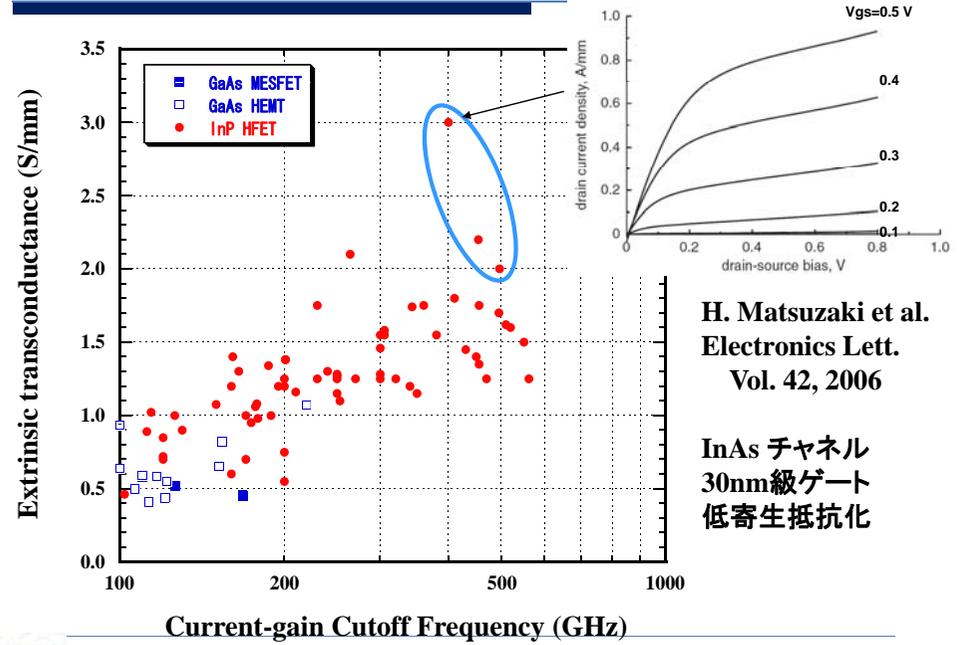


120-GHz帯無線伝送応用



非圧縮高精細映像伝送実験
(NTT マイクロシステムインテグレーション研究所: 総務省 受託開発)

f_t and g_m of HEMT



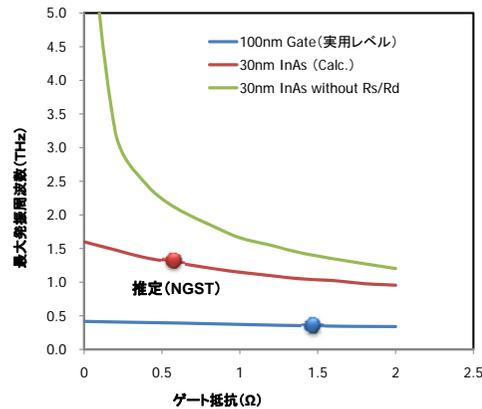
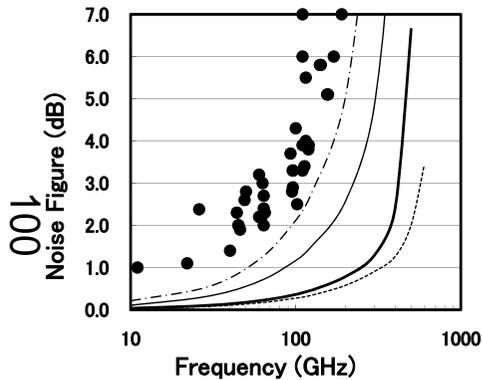
H. Matsuzaki et al.
Electronics Lett.
Vol. 42, 2006

InAs チャンネル
30nm級ゲート
低寄生抵抗化

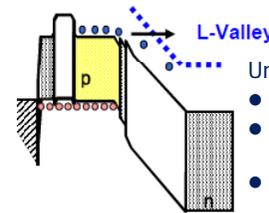
極限性能(計算値)

- 高電子移動度チャンネル(InAs, In_xGa_{1-x}As, x>0.53) と50nm以下のゲート長微細化 → 300GHz帯 LNA NF<4dB)の可能性
- R_g, R_s, R_d等寄生素子低減のエンジニアリングで2THz級の帯域も期待できる

Reported
L_g=150nm(InGaAs) f_T/f_{max}=172/530GHz
L_g=100nm(InGaAs) f_T/f_{max}=240/650GHz
L_g=50nm(InGaAs) f_T/f_{max}=334/776 GHz
L_g=50nm(InAs) f_T/f_{max}=440/878 GHz

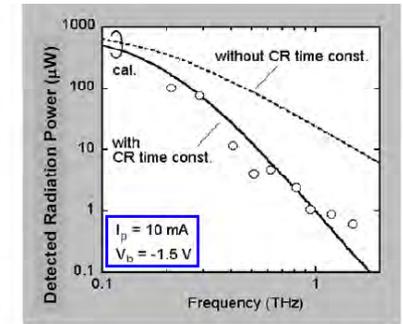
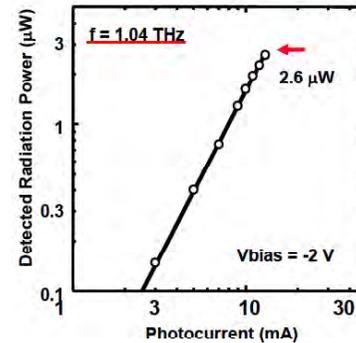
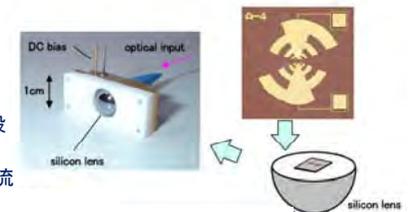


THz帯フォトミキサ



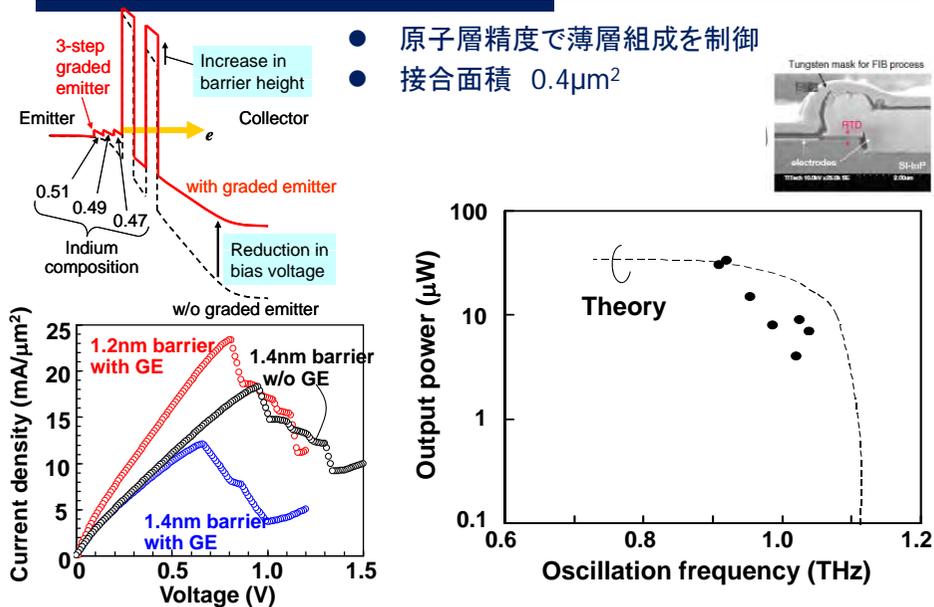
Uni-Traveling Carrier Photo Diode

- 高速動作に有利な電子電流
- 走行時間短縮のバンドプロファイル設計
- 電子の滞留が少なく、効率的に光電流を外部に取り出せる (高速・高出力)



H. Ito, T. Furuta, F. Nakajima, K. Yoshino, and T. Ishibashi, J. of Lightwave Tech. Vol. 23,12, p.4016, 2005

THz帯信号源 (RTD)



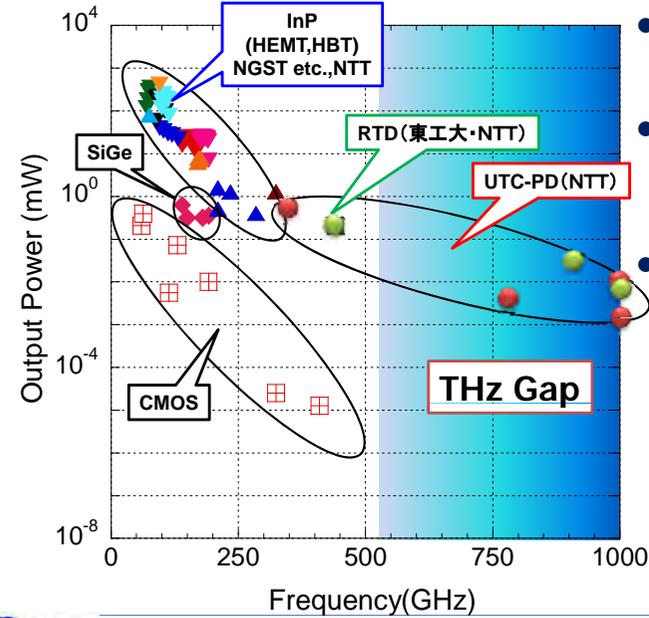
- 原子層精度で薄層組成を制御
- 接合面積 0.4μm²

S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama and H. Yokoyama, Appl. Phys. Lett. 97 (2010) 242102



NTT Photonics Laboratories

テラヘルツギャップを埋めるデバイス技術



- 信号源と検出器は、周波数利用開拓の必須デバイス
- 300GHz以下では、化合物トランジスタが圧倒的に高出力
- 300GHz以上では、UTC-PDやRTDが世界最高出力



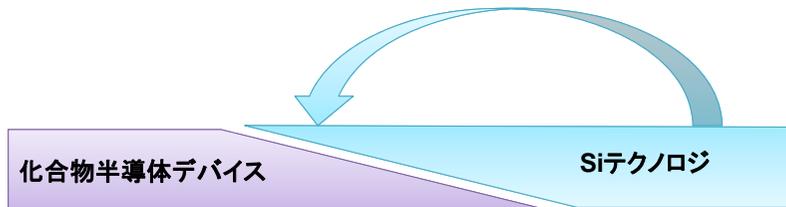
NTT Photonics Laboratories

従来の周波数開拓モデル



- 新材料研究
- 新原理導入
- ニッチユーザ探索
- 信頼性・製造体制
- 代替技術
- 大型設備投資
- 量産・低コスト化
- サプライチェーン
- 高機能化
- 製造体制維持

101

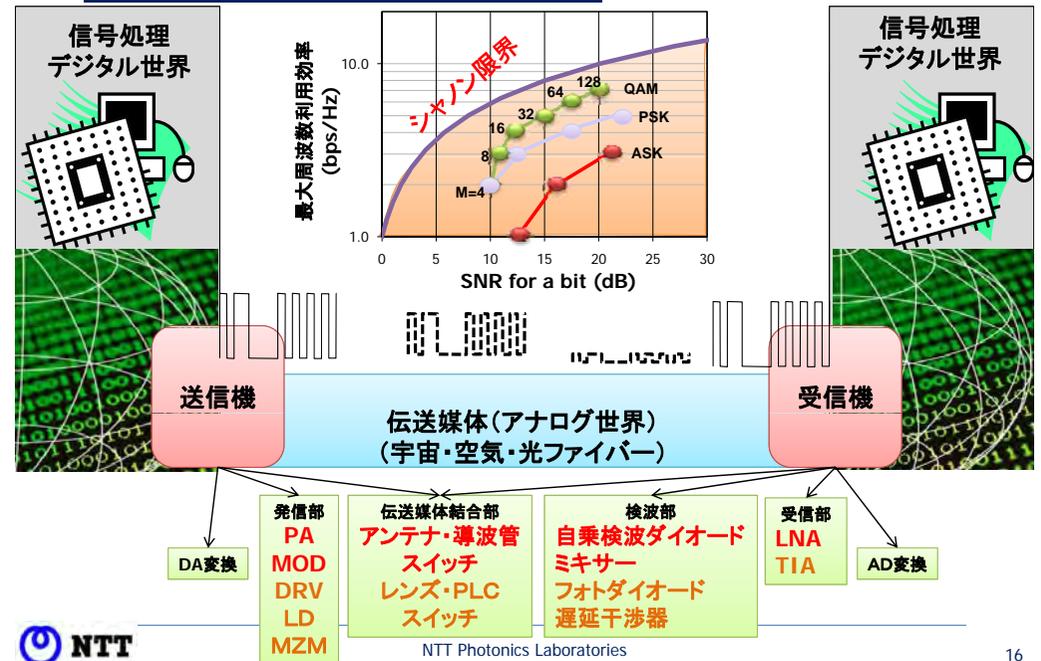


市場開拓で役割を終える化合物テクノロジーは、継続的に技術進化可能か？



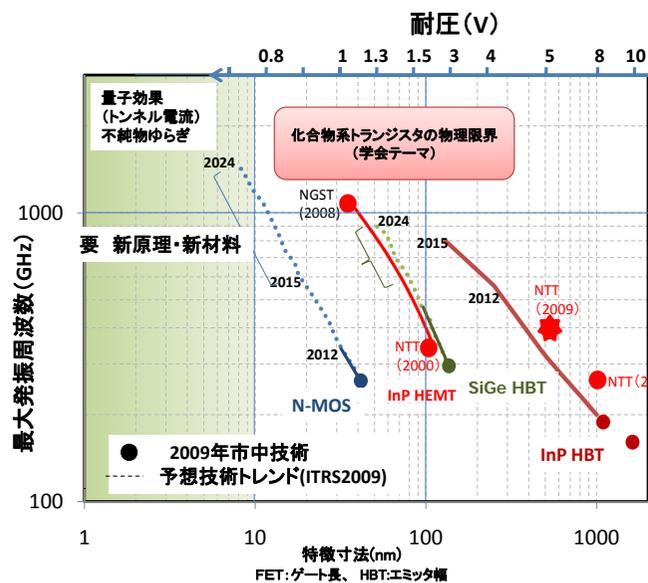
NTT Photonics Laboratories

通信用インターフェースの高性能化



NTT Photonics Laboratories

ナノテクノロジーと高速トランジスタの技術動向



- ◆ アナログフロントエンド用デバイスとしての性能指標
 - ✓ 最大発振周波数(利得)
 - ✓ 耐圧(ダイナミックレンジ・出力)
 - ✓ 雑音(感度)
 - ✓ 歪み
 用途に応じた多様な要求性能
- ◆ Si系トランジスタ高速化は期待されるが、耐圧の低下は必至
 - ✓ 新原理・新材料の開拓は今後の課題(Beyond CMOS)であり、世界中の半導体研究者が注力(CNT, Graphen, 化合物MOS, Spin)
- ◆ InP系HEMT/HBTは、耐圧と高周波特性のトレードオフマージンが大きい。
 - ✓ 欧米は、軍事向けに高速化継続
 - ✓ 国内のデバイス開発は停滞



Monolithic v.s. Hybrid

ICレベル	Monolithic	Hybrid
アナログ性能	○	◎
回路設計性	◎	○
サイズ	◎	○
信頼性	◎	○
量産性(コスト)	◎	○

高均一化
高密度配線

サブシステムレベル	More Moore	Heterogeneous (実装)
アナログ性能	○	◎
回路設計性	◎	△
サイズ	◎	△
信頼性	◎	△
量産性(コスト)	× ~ ◎ (市場規模・歩留まり)	△

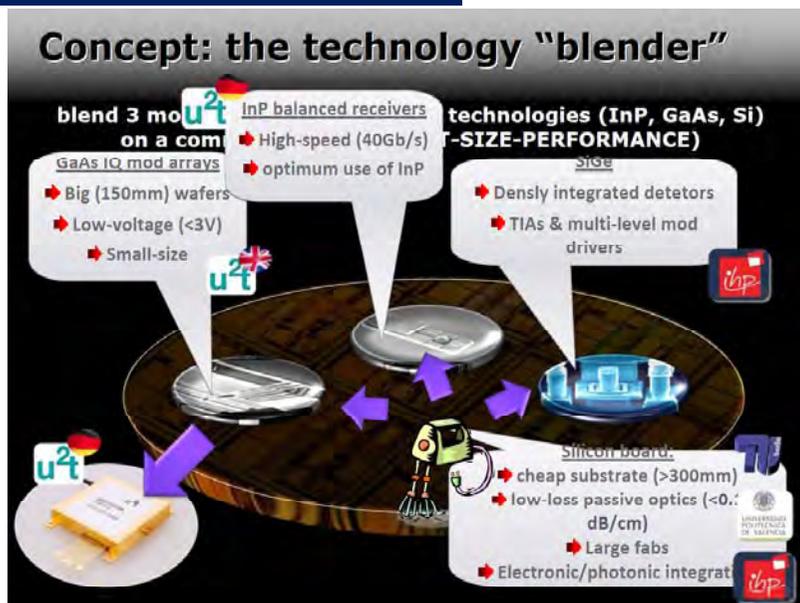
各ICの性能を引き出す新実装(集積化)技術の開発が必須

More than Moore

SoC可能なアナログ・デジタルシステムは、Siのアナログ特性と市場規模により決まる多様且つハイエンドなシステムには、Siと化合物の融合(ヘテロジニアス集積)が必要



欧米の取り組み



COSMOS in DARPA

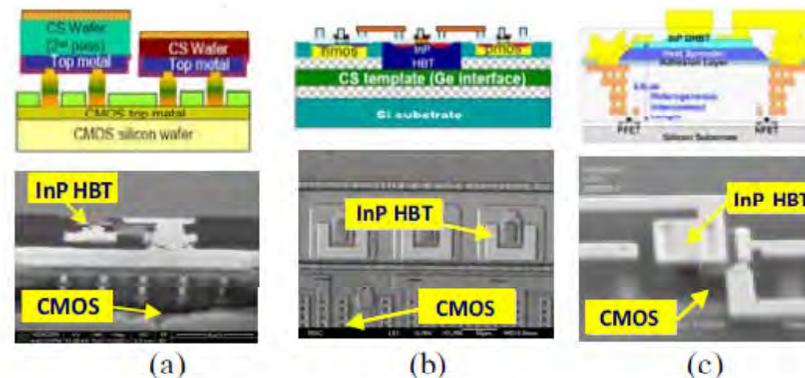


Figure 1. Heterogeneous integration processes: (a) micrometer scale assembly, (b) epitaxial layer printing, and (c) monolithic epitaxial growth.

THzエレクトロニクス時代のデバイス開発の課題

- 究極的高性能デバイス特性を必要とするTHzエレクトロニクス
- 米国を中心に研究加速
- 多様なアナログ特性に対応するため、ヘテロジニアス集積で各種デバイスの性能を最大限に発揮する

- 新規周波数開拓は新市場開拓
持続的なデバイス開発には、見合う市場が必須
 - 戦略の沿ったデバイス開発
 - 十分な市場規模までの成長を待ちきれない
 - 代替技術の台頭
 - 一定市場に複数企業が参入しパイ分割
 - 新規開発が困難

- Pioneer/Frontierとして開発段階から異業種連携と技術融合にチャレンジ

5-3 ライフ分野への活用に向けて求められる要素技術

ライフ分野においては、診断画像・遺伝子・疾患履歴などの個人情報、データベースと医師の間、医師同士の間、医師と患者の間、で通信するニーズが高まっている。経済産業省がとりまとめた技術戦略マップには、高解像度画像(動画)を含めた検査結果を利用しながら双方向コミュニケーションを行う時代の到来が予測されている[1]。近年、このような予測は絵空事ではなくなっている。例えば韓国政府は、大容量データサーバーとスマートフォン端末を用いて多当事者間のリアルタイム情報共有を追求し、特に医療分野の質を向上させる取り組みを始めている。この取り組みでは、さらなるリアルタイム性のニーズに対して、現状よりも高速・大容量通信ネットワークが必要であることが顕らかになりつつある。

本節では、韓国での事例や世界の医療機器業界の動向を参考として、テラヘルツ帯通信をライフ分野へ活用する際に求められる要素技術についてまとめる。尚、これまでの議論と同様、信号素子や検出素子といった高速・大容量を特長としたテラヘルツ帯通信を実現させる為の基本的な要素技術は本節からは省き、ライフ分野特有の要素技術に焦点を当てる。以下、テラヘルツ帯通信の使用シーンを、①(遠隔)診療、②手術(治療)、③その他、に分けて要素技術を考える。

診療の現場では、診断画像・遺伝子・疾患履歴などの個人情報が収められたデータベースと医師の間の通信が主となり、遠隔診療の現場では、これに医師と患者の間の通信が加わる。このような場面では、認証技術(セキュリティ)が必須の要素技術となる。ライフ分野において、取り扱われる情報の多くは、個人のプライベートな情報である。従って、データベースへアクセスする際、高度な暗号化技術や個人認証技術が必要となる。具体的には、パスワード・指紋・虹彩などを組み合わせた小型で簡易な認証端末(ソフト)が必要となる。

また、診療の現場には医師、看護師、患者、患者の家族など多くの人が存在する。そのような環境の下でテラヘルツ帯通信を行うには、SAR の問題をクリアにしておかなければならない。現在、有用な SAR データベースは構築できておらず、通信手段の標準化や規格化を含めた対応が必要となる。

一方、手術室に代表される治療の現場では、データベースと医師の間の通信、医師同士の通信、医療機器間の通信が主となる。近年では、多種・多量の高解像度動画を活用しながら手術を行う「インテリジェント手術室」や遠隔手術装置などが活用されはじめ、これらはライフ分野における大容量・高速通信の代表的なシーンとなっている。このような手術室では、多くの医療機器が同時に動作しており、テラヘルツ帯通信を行うには EMC 技術の構築が必要不可欠である。また、近年の医療機器は小型化・省電力化のトレンドにあり、テラヘルツ帯通信を医療機器市場に投入する際には、通信に関わる部品(モジュール)の小型化・省電力化が課せられることが予想される。さらに、医療機器は標準化や規格化が遅れている機器分野である。従って、多様な規格の元で製造された医療機器でテラヘルツ帯通信を可能にするには、テラヘルツ帯通信モジュールと医療機器を接続するアダプタモジュール(ドライバ)が多種必要になることが予想される。

テラヘルツ帯通信をライフ分野で活用するためのその他の必要な取り組みとして、法整備が挙

げられる。ライフ分野で取り扱われる情報の多くは、プライベートな情報である。これらの情報は、本人や担当医師に代表される認証(ID)を持つ当事者によってのみアクセスされるべきであり、前述の様に、認証技術が必要である。また、個人情報をごどのような条件の元でデータベースに保存するのか、保存は誰が行うのか、どのように保存するのか、他記録媒体への保存を認めるか、どのような暗号化を行うか、万が一漏洩した場合の対処方法はどのようなのか、責任者は誰か、などといった個人情報の保護に関する法整備が必要不可欠である。一般に、法整備作業には多くの時間を費やす為、テラヘルツ帯通信が普及する早い段階から着手する必要がある。

以上をまとめると、テラヘルツ帯通信をライフ分野へ活用するために必要な要素技術は、表5-1の様にまとめられる。テラヘルツ帯通信を可能とする基盤技術の他に、表5-1に挙げた要素技術を構築することで、患者やその家族を含めた人々のQOL(Quality Of Life)の向上、迅速判断を可能にすることによる予防医療や低侵襲医療の発展、業務効率向上や重複検査の削減等による医療費削減、などへテラヘルツ帯通信が貢献することが期待される。

表5-1 テラヘルツ帯通信をライフ分野へ活用するために必要な要素技術

利用シーン	要素技術	備考
(遠隔)診察	セキュリティ技術	暗号化 個人認証
	SAR 技術	SAR データベース
手術(治療)	EMC 技術	EMC データベース
	(部品やモジュールの) 小型化・省電力化	
	規格が多様な医療機器と通信機器の間のアダプタモジュール	ドライバ
その他	法整備	個人情報の保護

<参考文献>

[1] 経済産業省(編),「技術戦略マップ2010」,(2010).

5-4 グリーン分野への活用に向けて求められる要素技術

テラヘルツ無線によるグリーン ICT(省エネ)分野への貢献として、高速・大容量性を活かしたビット当たりの情報伝達エネルギーの低減や、無線化による生産・物流エネルギーの低減があげられる。また、超高周波であること故の波長短縮スケールリングによる部品のダウンサイジング効果を

活かした、無線通信機器自体の小型化・省電力化も期待される。具体的な例としては、ショッピングや商取引のオンライン化、テレワーク、TV 会議などによる人・物の移動コスト/エネルギー低減、音楽や映像コンテンツの媒体レス配信による生産エネルギー/物流コスト/部材資源の削減、などがあげられる。これらは有線でも可能であるが、配線の煩わしさからの解放や場所を選ばないなどの利便性を考えると、ユーザ端末とのインターフェースの部分が無線で実現できる方が好ましい。

一方、光ファイバによる基幹系の通信速度が Tbps 超ひいては 10Tbps 超の領域に入っていく中で、今後は無線においてもユーザ当たり 1Gbps ひいては 100Gbps を超える通信速度が必要になっていくと考えられるが、占有可能な周波数帯域幅の制約から、現在商用化されている 60GHz といったミリ波帯を利用した無線通信システムではこのような超高速無線通信を実現するのは困難であり、テラヘルツ帯の利用が期待される。また、テラヘルツ無線通信では、同一容量のデータなら他の無線方式に比べ極めて短時間で送受信を完了できるため、通信機器の送受信に係る動作時間を短くすることも可能(ノーマリオフ通信ともいえる)であり、時間当たりの消費電力を時間積算したエネルギーの観点からの通信機器自体の省エネ効果も期待できる。

上記のようなグリーン ICT 分野でテラヘルツ無線を活用していくための高周波・無線部の技術要件、要素技術には以下のようなものがあげられる。

無線通信装置の消費エネルギーは通信時間(動作時間)と消費電力の積分量であるため、テラヘルツ無線の高速・大容量伝送による省エネポテンシャルを最大限に引き出すためには、通信装置の低消費電力化が重要となる。ビット当たりの消費エネルギーの観点からは、個々の送受信用デバイス、回路、伝送線路基板、及びこれらを組み合わせた送受信部トータルでの低消費電力化・低損失化が必要となる。また、テラヘルツ無線の普及のためには、携帯端末や家庭内 AV 機器といった民生用途への浸透も必要であると考えられ、デバイスの高性能化とともに、集積化技術等の小型化、生産性向上、低コスト化を視野に入れた技術開発も重要となる。

また、超高周波のテラヘルツ波では、60GHz 帯ミリ波通信と同様あるいはそれ以上に、電波としての高い直進性に起因する人・物等の障害物による通信遮断に対する回避技術が必要であり、高品質の無線リンクを確保するためのビームステアリング等の高機能アンテナ技術及びその制御技術が必要になると考えられる。

送受信回路は、受信用低雑音増幅器、検波器、送信用電力増幅器、発振器、アンテナ、などで構成され、これら回路を構成するデバイスとしては、GaAs, InP, InAs, GaN などの化合物半導体系 HEMT, HBT や、Si RF-CMOSFET、SiGe HBT などが用いられる。半導体材料自体の物性から、同程度の半導体加工プロセスであれば化合物半導体の方が高周波性能に優れているため、性能面では化合物半導体系デバイスが先行し、Si デバイスは、得意とする微細加工技術を活かした高周波化が図られることで、所定の性能を満たしかつコストパフォーマンスが重視される用途で化合物半導体デバイスからの置き換えがあるものと考えられる。

デバイスの性能指標としては、受信用途では受信感度に係る雑音指数(NF)、増幅器の電力利

得や駆動能力に係る電流遮断周波数(f_t)、最大発振周波数(f_{max})が代表的なものであり、送信用途では f_t 、 f_{max} 、電力付加効率、出力電力、などが代表的なものとなる。

送受信回路において、受信回路では後段の付加雑音による SN 比の悪化を抑圧するための低雑音電力増幅器、また送信回路では信号レベルをアンテナからの所定送信電力に引き上げるために高出力電力増幅器が必要となるが、増幅用デバイスの利得が小さいと所定の電力利得を得るために増幅器の段数を増やす必要がある。増幅段数の増加は消費電力を増やすことでもあり、また付加雑音の増加にもつながるため、なるべく少ない増幅段数で増幅器を構成できることが望ましい。そのためにはデバイスの高利得化すなわち f_t 、 f_{max} の向上が必要となる。特にテラヘルツ帯においては、送受信回路の動作周波数に対してデバイスの f_t 、 f_{max} がそれほど高くないのが現状であり、 f_t 、 f_{max} の向上は重要な技術課題である。また、個々の増幅段においては、低い NF や高い電力付加効率を得るための低損失インピーダンス整合回路技術も重要となる。そのためには、基板、あるいは半導体チップ上伝送線路の低損失化技術も必要となる。ミリ波帯では、市販のオレフィン系ポリマー樹脂を、高周波での低損失性に着目して伝送線路基板に転用し、低損失・低コスト化を実現した例があるが、テラヘルツ帯においてもこのような性能・コストバランスに優れた基板材料の探索・開発が望まれる。

また、化合物半導体は Si に比べてウエハも小口径かつ高価であるため、使用するデバイス数を少なくしてチップサイズの縮小を図ることが低コスト化の点でも重要と考えられる。

一般にデバイスの利得は周波数に対して 6dB/オクターブで低下するため、実用性を考慮すると f_t 、 f_{max} は動作周波数に対して数倍高いことが望まれる。動作周波数が 150GHz であれば 500GHz 程度の f_t 、 f_{max} 、動作周波数が 300GHz であれば 1THz 程度の f_t 、 f_{max} が望まれる。InP 系 HEMT では、学会報告レベルでは $f_t=500\text{--}600\text{GHz}$ が報告されている。NF については、InP、InAs あるいは InGaAs 系 HEMT で 100GHz において 2-3dB の報告がある。また、InP HBT MMIC で 324GHz において NF=4.8dB の報告もある。

デバイスの到達可能性能については、ゲート長を 50nm 以下に微細化し、ゲート抵抗、ソース抵抗、ドレイン抵抗等の寄生成分を低減することで、2THz 級の f_{max} を実現可能とのシミュレーションによる試算報告もあり、今後の微細加工技術、および低寄生 RLC 成分デバイス構造設計技術の進展が望まれる。

微細化すると電極間の電界強度の増大によってデバイスの耐圧が低下し、動作可能電圧も低下するため、信号増幅時にデバイスが扱える最大電圧振幅も低下する。そのため、所定の出力電力を得るためには、電圧振幅が低下する分を電流振幅の増加で補わなければならない。Si や GaAs、InP 系といったバンドギャップが 1V 程度とそれほど大きくない半導体では、テラヘルツ帯に対応できるレベルまで配線ルールを微細化すると耐圧は 2V あるいは 1V にも満たない可能性がある。特に、送信用電力増幅器においては受信回路に比べて出力電力が格段に大きいため、電流振幅の増大はトランジスタサイズ(総ゲート幅)の増大につながり、チップサイズ増大によるコストアップ、および寄生成分増大による利得低下の要因になる。

また、デバイスの入出力インピーダンスが低いとインピーダンス整合回路を構成する受動素子

に流れる高周波電流振幅が大きくなるため、受動素子の寄生抵抗成分による損失が増大する。デバイスの動作電圧の低下による電圧振幅の減少と電流振幅の増大は回路のインピーダンスが低下することも意味しており、インピーダンス整合回路での損失増大にもつながる。したがって、送信用電力増幅器は携帯端末のバッテリー電圧と同程度の 3V 程度かそれ以上で動作させたい。動作電圧を中心に電圧が振れるとすると、デバイスの耐圧は電源電圧の 2 倍以上あることが望まれる。このような要望を実現する半導体材料として、GaN に代表されるバンドギャップが 3V を超える窒化物系ワイドバンドギャップ半導体が注目されており、AlGaN/GaN、AlInN/GaN HEMT で、200GHz を超える $f_{t,max}(V_{dd}=4V)$ が報告されるようになってきている。今後のさらなる性能向上が期待される。

テラヘルツ帯という超高周波では信号の検出自体が非常に困難になるが、最近のトピックスとして、GaN 系 HEMT でプラズモン共鳴による増幅効果を利用することと、ゲート電極をアンテナとして兼用してアンテナとデバイス間の伝送線路を削減することで伝送ロスを低減し、かつソース、ドレイン電極を無給電アンテナとして機能させて反射ロスを低減することによって、室温動作でテラヘルツ波の検出感度を従来比で 2 ケタ向上させた報告がある。テラヘルツ波でのイメージングや分光用途に開発されたものであるが、通信等、他用途への応用の可能性もあり注目される。

デバイス性能以外では、テラヘルツ帯では信号の波長が 1mm 以下になってくることにより、配線・電極接続の位置ずれや寄生成分が送受信回路の高周波特性に大きな変動・悪化を来たすようになるため、高精度・低寄生成分の実装技術も不可欠となる。たとえば、217-330GHz に対応する導波管(EIAJ 規格:WRI-2600)では、内径寸法が 0.864mm × 0.432mm と、マイクロ波やミリ波帯に比べて小型であり、携帯機器等の民生用途への適用には好適であるが、小型であるが故にデバイスあるいは基板配線と接続するための位置合わせ精度の要求も厳しくなるため、ミリ波帯以上に高精度な実装技術が必要となる。位置合わせ精度や寄生成分という点では、導波管に限らず、HEMT などのデバイス上の電極と基板配線との接続にも小電極面積・極短距離かつ接続位置ばらつきが少ない実装技術が必要である。接続方法としては、ワイヤやリボンによるボンディング、バンプによるフリップチップ接続などがあるが、寄生成分の発生や接続部の特性ばらつきに対する性能感度がミリ波帯以上に敏感になるため、電磁界シミュレーションなども活用した接続部の高周波特性の高精度モデル化技術・接続構造の設計/最適化技術の開発も必要となる。

寄生成分を低減し、小型化を図るためには能動素子と伝送線路等の受動素子をチップ上に集積化したモノリシック IC 構成にすることがスマートな方法と考えられる。しかし、先に述べたように化合物半導体は高価であるため、受動部品のモノリシック化はチップ面積増大によるコストアップにつながる懸念がある。一方、個別部品のマルチチップ構成では寄生成分や実装工程で生じる特性劣化・ばらつき増大による歩留まり低下等のコストアップ懸念もあり、どこまでをモノリシック化するかについては、実用性にも配慮してコストパフォーマンスを加味した設計技術開発も必要となる。また、将来を見据えた取り組みとして、化合物半導体の優れた高周波特性と Si 半導体の低コスト性や大規模集積性といった各々の長を最大限に活用するため、化合物半導体チップ/

エピ層部を Si 集積回路チップに貼り付ける、あるいは Si 基板上の一部に化合物半導体エピ層を直接形成する、といったヘテロジニアスインテグレーション技術の研究も DARPA の先導で行われている。

テラヘルツ帯無線の実用化においては、計測技術も重要な開発課題になると考えられる。テラヘルツ帯での高精度な計測技術は、デバイス及び送受信回路の性能を正しく評価すること自体に必要とされるとともに、これらデバイス、送受信回路の高性能化に向けた技術開発を加速するためのデバイス、回路素子の高精度モデル化技術を構築していくためにも重要である。また、テラヘルツ無線システム及び無線装置の適合技術基準の確立・標準化を推進していく上でも、高精度・高確度で再現性に優れた計測器・計測技術の開発が望まれる。

5-5 まとめ

テラヘルツ無線通信に期待されていることは、数十 Gbps にもおよぶ超高速な無線通信であり、大容量データも瞬時に送ることができることであろう。そのような高速な無線通信を実現するためには、テラヘルツ波発生素子、検出素子、高速変調をコントロールする高速ドライバーIC、300GHz 帯で動作するアンプ等が真っ先に思い浮かべられる。しかし、実際に超高速無線を実現させるためには、瞬時に送られてきたデータを瞬時に処理や記憶できる要素の開発も忘れてはならない。

これまでのメモリ技術については Moore の法則に従うかのように、主に Si の微細加工技術に支えられる形で発展してきたが、微細化により動作周波数が向上するメリット以上に消費電力の増加を招くためにマルチコアによる処理能力の向上が図られている。さらなる高性能化の解として異種デバイスを融合する More Than Moore が重要となる。高周波特性に優れた化合物半導体デバイスや、各種センサ、MEMS 等を一体化することで互いの利点を融合し、システム全体として高機能化を図ることが重要である。

無線通信のコンポーネントに目を向けると、300GHz 帯で利用可能な低ノイズ増幅回路(LNA)の実現も、化合物半導体の微細加工により実現が見えてきている。また、UTC-PD 技術を用いた 300GHz 帯無線通信の成功例や、共鳴トンネルダイオードを用いた室温での 1.04THz 発振実現など、テラヘルツ無線通信実現に向けて期待が持てる報告が出てきている。しかしながら、アメリカの DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)やヨーロッパの GALACTICO が中心となって欧米では国を挙げての開発に取り組んでいるが、日本国内では各大学、各企業が個別に研究しているというのが現状である。国内においても開発段階から異業種間での連携や技術融合を試みる枠組みが必要である。

テラヘルツ無線通信実現のためには要素技術の開発が必要不可欠ではあるが、利用シーンに応じた要素技術への要求を把握しておくことも重要である。今年度の本検討委員会においては、主に「ライフ分野」と「グリーン分野」に注目して議論がなされた。

ライフ分野においては、CT や MRI などの診断画像、遺伝子情報、患者の疾患履歴などの情報

を、医療機器-医師、データベース-医師、医師-医師、医師-患者等の通信するニーズが高まっている。特に診断画像は高精細な画像が要求されており、通信によって扱うためには高速な通信の実現が必須となる。特に最近注目を集めている「インテリジェント手術室」においては複数の医療機器が同時に動作しており、それらのデータを高精細でなおかつ瞬時に集めることが求められている。このような利用シーンは、テラヘルツ無線通信が利用される代表的なものであると考えられる。ただし、医療情報はプライバシーにかかわる情報であるので、通信のセキュリティを確保する技術も必要になる。

テラヘルツ無線通信は大容量データも瞬時に送れることから、送受信に要する時間が圧倒的に短くなる。したがって動作時間を短くすることができるので、省エネという観点からも貢献できる可能性がある。通信機器の省エネ化という直接的な効果だけではなく、高速無線通信による遅延のないリアルタイムな遠隔会議等が可能になれば、会議のために人が移動するためのコストやエネルギーをも省くことが可能となる。現時点では、これらは単にテラヘルツ無線通信が実現し得る高速性という観点のみから指摘されていることであり、実現のためには発振器や増幅器などの各素子、変調・復調回路、アンテナなどの要素技術それぞれの高効率化と、システム全体としての高効率化を実現することが不可欠となる。