

## 産業界の技術動向

# 第5世代無線通信普及に向けた課題と取組み

所属 ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社 アナログ LSI 事業部

谷 口 理

## 1. はじめに

第5世代無線通信(5G)に対応した携帯端末が各通信キャリアから発売され、国内でもいよいよ5Gサービスが始まった。国内キャリアによる5Gサービスエリアの例では、2020年12月時点で、4Gサービスが地図上全領域で展開されているのに対し、5Gサービスエリアは非常に限定的となっている。今後、徐々にエリアを拡大し2021年5月時で都心部に広く展開し、2023年度に展開率97%を目指す計画となっている[1、2]。4G同等の通信サービス環境が構築されるのは2024年頃になり、構築に伴って様々なサービスが提供されると考えられ、大変楽しみなところである。データトラフィックの爆発的な増加、Internet of Thingsと呼ばれる多数のセンシング・通信デバイスの接続といった無線通信動向予測を背景に5G通信に関する議論が凡そ10年前から始まり[3、4]、2016年頃から携帯電話システムの国際標準仕様を策定する3rd Generation Partnership Project[5]にて本格化した。図1に示すように最高伝送速度20Gbps、接続端末密度 $10^6$ 台/km<sup>2</sup>、遅延1msec等と、4G性能を大きく上回る意欲的な性能指標がユースケースに応じて設定されている[6]。2020年時点での商用サービスは、昨年策定されたenhance mobile broadbandの仕様の一部に基づくものであり、残る技術仕様、課題整理が3GPPにて継続されている。

5Gでは4Gの利用周波数(最大3.6GHz)を、FR1(Frequency Range1, 0.45GHz-6GHz、サブ6とも呼ばれる)やFR2(24.25GHz-52.6GHz、ミリ波)にまで拡張し、更なる伝送速度・通信容量向上を図っている。図2に主な地域において使用が想定されている周波数帯を示す[7]。各国の事情により利用周波数帯にずれがあるもののFR1および2を用いる想定となっている。また、既にFR3(6-24GHz)やさらにFR2よりも高い52.6-71GHz利用の議論も3GPPにて始まっている。この利用周波数の拡張は、基地局だけでなく携帯端末に対して様々な技術的課題解決を要請しており、以下に詳しく述べる。

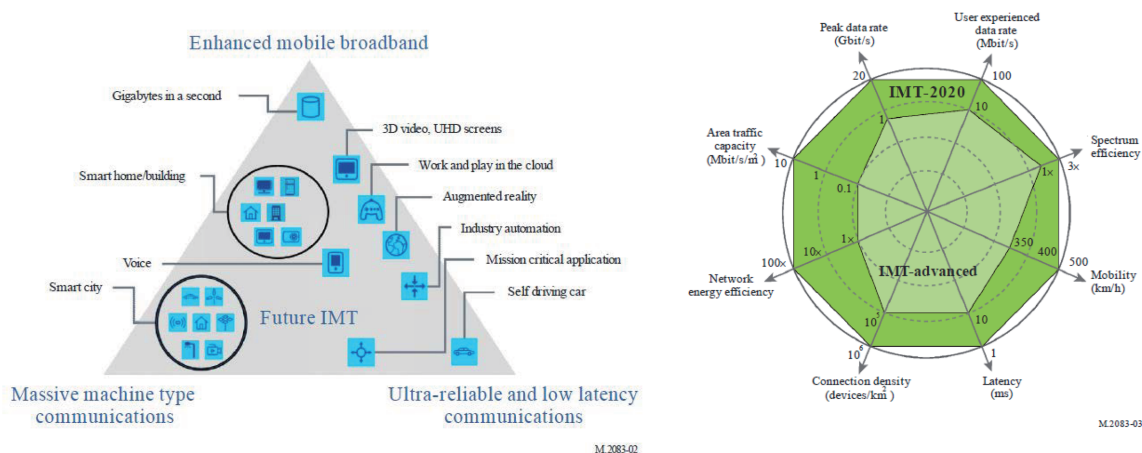


図1 5Gの主なユースケースと性能指標<sup>[6]</sup>

(IMT-AdvancedがLTE-Advancedの、IMT-2020が5Gの目標仕様を表す)

	<1GHz	3GHz	4GHz	5GHz	24-30GHz	37-50GHz	64-71GHz	>95GHz
	600MHz (2x35MHz)	900MHz (2x30MHz) (B41/n41)	3.1-3.45GHz 3.45-3.55GHz 3.55-3.7GHz 4.98GHz	3.7-4.94GHz	5.9-7.1GHz	24.25-24.45GHz 24.75-25.25GHz 27.5-28.35GHz	37-37.6GHz 37.6-40GHz 47.2-48.2GHz	57-64GHz 64-71GHz >95GHz
	600MHz (2x35MHz)		3.475-3.65GHz 3.65-4.0GHz			26.5-27.5GHz 27.5-28.35GHz	37-37.6GHz 37.6-40GHz	57-64GHz 64-71GHz
	700MHz (2x30 MHz)		3.4-3.8GHz	5.9-6.4GHz	24.5-27.5GHz		57-66GHz	
	700MHz (2x30 MHz)		3.4-3.8GHz		26GHz		57-66GHz	
	700MHz (2x30 MHz)		3.4-3.8GHz		26GHz		57-66GHz	
	700MHz (2x30 MHz)		3.46-3.8GHz		26GHz		57-66GHz	
	700MHz (2x30 MHz)		3.6-3.8GHz		26.5-27.5GHz		57-66GHz	
	700MHz	2.5/2.6GHz (B41/n41)	3.3-3.6GHz	4.8-5GHz	24.75-27.5GHz		40-43.5GHz	
	700/800MHz	2.3-2.39GHz	3.4-3.42GHz 3.42GHz 3.7GHz 4.0GHz	5.9-7.1GHz	25.7-26.5GHz 26.5-28.9GHz 28.9-29.5GHz	37.5-38.7GHz	57-66GHz	
			3.6-4.1GHz	4.5-4.9GHz	26.6-27GHz 27-29.5GHz		39-43.5GHz 57-66GHz	
	700MHz		3.3-3.6GHz		24.25-27.5GHz 27.5-29.5GHz		37-43.5GHz	
			3.4-3.7GHz		24.25-27.5GHz		39GHz 57-66GHz	

図2 各地域で5G通信周波数割り当て<sup>[7]</sup>  
 (— Licensed、— Unlicensed、— Existing band)

## 2. 5G 携帯端末における課題

### サブ6

端末の機能は、音声通話、テキスト配信、静止画視聴・撮影、動画視聴・撮影と通信環境の向上に伴って高度化し、ディスプレイサイズの大型化により利便性向上に繋がっている。最新のハイエンドスマートフォンでは、ディスプレイサイズは6~7インチに達しており、このサイズ拡大はイメージセンサーの大型化や多数化による撮像機能向上や大型バッテリーによる使用時間の確保に充てられている。通信機能に着目すると、4Gでは通信容量拡大のため、MIMOやキャリアアグリゲーション等、複数のアンテナを用いる技術が導入された。加えてWi-FiやBluetooth、GPS等、様々な通信機能に対応するため、端末筐体内に設置されるアンテナや通信用ICの数が急増した。図3-aに端末に用いられる典型的な通信回路構成を示す。信号処理を行うBase Band部、デジタル信号とアナログ信号変換と周波数変換を行うRF IC部、そして高周波アナログ信号の増幅を行うRF Front End部(図の破線部内)から成っている。図3-bは4G端末の典型的な通信ブロックを示しており、異なる周波数帯や通信方式に対応するため、多数のアンテナやICが用いられている様子が見て取れる[8]。アンテナの周波数で決まる物理的なサイズのため、員数増加に伴い筐体内でのスペース確保が課題となったことから、対策としてアンテナをレーザー描画により筐体の一部に形成するLaser Direct Structuring技術が導入された(図4)[9]。5Gサブ6の導入により、端末のサイズ制約の中、更なるアンテナ数増加と周波数帯域拡大のためアンテナ特性の劣化が避けられず、通信品質の低下を招く要因になっており、その対策が急務となっている。

### ミリ波

ミリ波は1GHzと広い帯域(サブ6最大100MHz)利用により高速データ伝送が可能である一方、大気や遮蔽物による伝搬損失が増加する[10]。その対策として図5に示すアレーアンテナを用いて電波放射特性に指向性を持たせ、所望の方向にのみ高い放射特性を得るビームフォーミング技術と位相器を利用して放射方向を最適化するビームステアリング技術が、5Gミリ波向けに導入されている[11]。更に、周波数30GHz以上では波長が10mm以下となりアンテナとIC間の伝送線路損失も無視できず、線路長を短縮し損失を抑えるためにアレーアンテナ基板の裏面にICを実装する構造が提案されている。図6-aに基地局用アレーアンテナの例を示す。アレーアンテナ基板のサイズ制約が小さい基地局では、32~128本の多数のアンテナを同時に利用し、端末との通信を行っている。

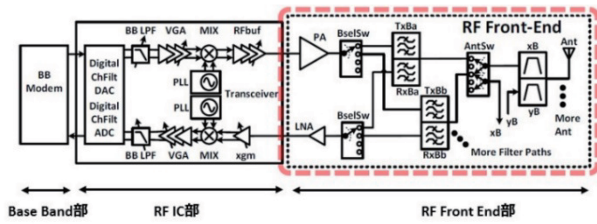


図 3-a 端末用通信回路構成 [8]

PA: Power Amplifier  
 LNA: Low Noise Amplifier  
 SW: Switch, Ant: Antenna  
 Tx: Transmitter, Rx: Receiver  
 LB: Low Band, MB: Middle Band,  
 HB: High Band  
 PAID: Power Amp. integrated Duplexer  
 PAM: Power Amp. Module  
 DRx: Discontinuous Reception  
 GPS: Global Positioning System  
 LAA: licensed Assisted Access

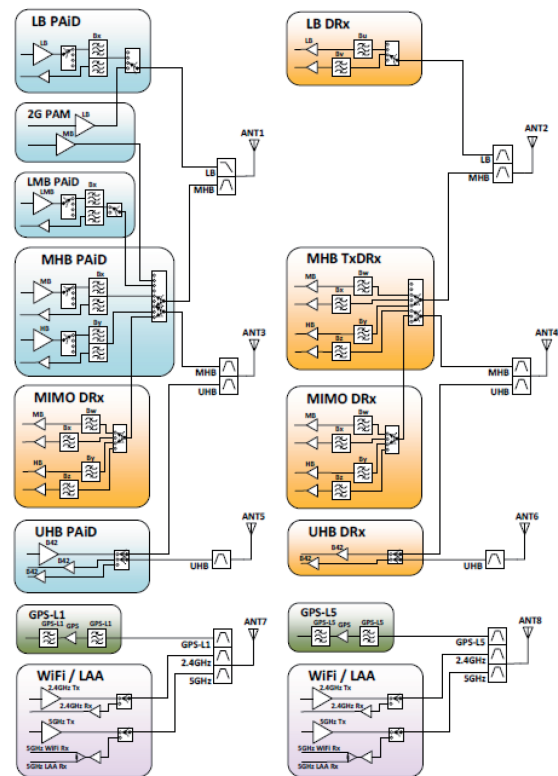


図 3-b 典型的な 4G 端末 RF Front End ブロック [8]

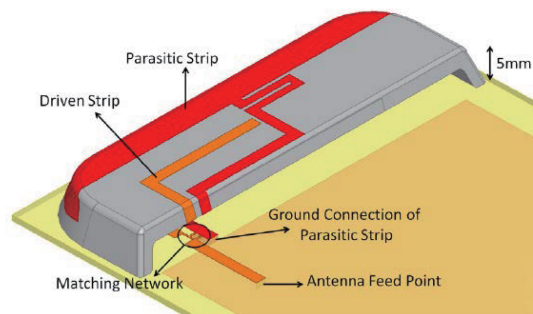


図 4 レーザー描画アンテナ例 [9]

一方、筐体内スペースが限られる端末ではアンテナ基板サイズへの制約が非常に厳しく、多数のアンテナを同時に用いて高いアンテナ利得を得ることが難しい。一例として商用化された 5G 端末に広く導入されているミリ波アンテナモジュールを図 6-b に示す [12]。1x4 アレーアンテナを有する約 4mmx23mm サイズのモジュールとなっており、端末の筐体側面に沿うように置かれている。ミリ波伝搬に大きな影響を与える顔や手を避けつつ最適な伝搬状態を維持しながら基地局との通信を行うため、2 から 4 の複数モジュールを筐体内に配置する必要があり、アンテナモジュールの小型化要求に拍車をかけている。電源制御 IC と高周波 IC はアレーアンテナと基板を挟んで逆側面に実装されており、スイッチやパワーアンプを含む高周波 IC には 40nm プロセスによる Si 基板上 Metal Oxide Semiconductor (MOS) Transistor が用いられている [13]。アンテナ数が限られ良好なアンテナ利得を得ることが難しい端末では、高周波信号増幅を担うパワーアンプの性能が基地局との通信エリアやバッテリーの持ちを確保する上で非常に重要となっている。

文献 13 によれば、MOS Transistor パワーアンプの出力は 5mW 程度と低く、同時に複数のパワーア

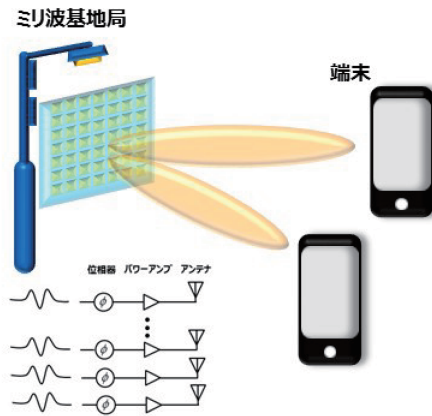


図5 アレーアンテナによるビームフォーミング技術  
(文献<sup>[11]</sup>を参考に筆者が作成、多数アンテナ狭ビームを形成、位相器により放射方向を制御)

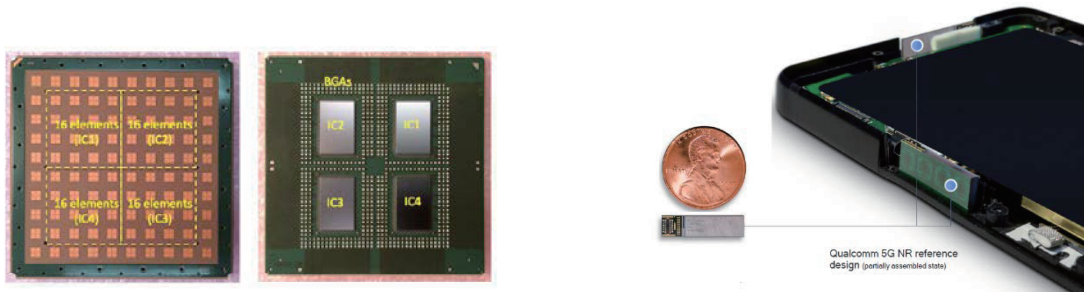


図6-a 基地局向けアンテナモジュールの例<sup>[11]</sup> 図6-b 端末用ミリ波アンテナモジュールの例<sup>[12]</sup>  
(図左側がパッチアレーアンテナ、右側は裏側のIC) (筐体外側に向けて1x4アレーアンテナが見える)

ンプを用いて出力を得ているが、十分とは言えずミリ波通信普及に向け広い通信エリアを確保できないことが心配される。エリア確保のために多数のミリ波基地局を設置することは通信キャリアの経済合理性を損ない、延いては限定エリアのみのミリ波サービスに繋がる恐れがある。更に、パワーアンプの効率はバッテリーの持ちや発熱に大きな影響を与えるため、出力と効率の両立も課題となっている。

以上、サブ6では増加の一途であるアンテナ数と周波数帯に対応する高性能アンテナが、ミリ波では通信エリアやバッテリーの持ち確保のための高性能パワーアンプが課題となっている。以下では、課題克服に向け、アンテナチューニング技術とパワーアンプ技術への取組みを前者に対するソニーの取組みとともに紹介したい。

### 3. アンテナチューニング技術とソニーの取組み

4Gやサブ6向けアンテナに対し、単一アンテナで複数の周波数帯を賄う手法としてアンテナチューニング技術が提案されている。チューニング技術には、図7に示すインピーダンスチューニングとアパーチャーチューニングと呼ばれる手法がある。前者は例えば複数から成るキャパシタバンクをスイッチで切り替え、アンテナと高周波回路の整合を取る手法である。一方、後者はインダクタなどを切り替え、電氣的にアンテナ長を変化させる手法である [14]。いずれも周波数や外乱に対してアンテナインピーダンスを適切に保ち、良好なアンテナ特性を得る為、受動素子等を切り替える多ポートスイッチが用いられている。この受動素子と多ポートスイッチから成るチューニング技術により1アンテナで複数の周波数帯に対応することを可能とし、アンテナの省スペース化と高効率化に寄与する。多ポートスイッチには、高周波スイッチとして高い性能が求められ、オン時の抵抗、オフ時の容量や、オンまたはオフ時の歪特性が課題となる。要求性能を満たすため半導体スイッチや Micro Electro Mechanical Systems ス

スイッチが用いられており、半導体スイッチ用デバイスとして GaAs High Electron Mobility Transistor (HEMT) や Si on Insulator (SOI) 基板上 MOS Transistor が用いられている。

ソニーは高周波スイッチ技術に 90 年代初頭から取り組んできた。まず、GaAs 基板に対して p 型ドーパントである Zn の拡散によってトランジスタゲート領域に pn 接合を形成する GaAs Junction Field Effect Transistor (JFET) 技術を立ち上げ、携帯端末用高周波スイッチビジネスに参入した (図 8) [15]。当初は、使用周波数帯が限られておりアンテナチューニング向けスイッチは不要であったが、アンテナの送受信切り替え用スイッチとしての高い性能が市場で評価を得た。その後、端末通信性能の進展により高周波スイッチの損失、歪特性の継続的向上が求められる中、JFET よりも電子輸送特性に優れた Pseudomorphic HEMT (PHEMT) に Zn 拡散 pn 接合形成技術を展開し (JPHEMT)、2000 年代から 3G 通信、更に 4G 通信と、端末通信向け高周波スイッチとして広く用いられてきた [16]。この JPHEMT は、良好な電子輸送特性によるオン電流特性と pn 接合ゲートによる低いリーク電流特性から高周波スイッチだけでなく高周波パワーアンプとしても高い性能を示した [17]。

2010 年代初頭からデジタル、IC 向けに導入が進んでいた Silicon On Insulator (SOI) 基板を用いて高周波スイッチの商用化に取り組んだ。SOI 基板はスイッチ特性低下につながる Si 基板の寄生成分を回避でき、微細プロセスによるスイッチ小型化や JPHEMT スwitch では困難なスイッチと駆動回路のオンチップ化を実現できること、更に 200mm 大口径基板によるコストメリットから、GaAs スwitch からの置き換えが進むとともにパワーアンプなどの他の高周波 IC 応用が進んでいる [18]。徒に微細化することはスイッチ小型化に寄与する反面、耐圧、ハンドルパワーやプロセスコストで課題となる。先に紹介したアンテナチューニング技術では、回路構成によっては 100V 以上の耐圧がスイッチに求められる。そこでソニーでは、130nm 世代のプロセスを用いてデバイス構造の最適化を行い、優れた高周波特性と高耐圧特性とを両立し、高性能アンテナチューニング用スイッチを実現した [19]。

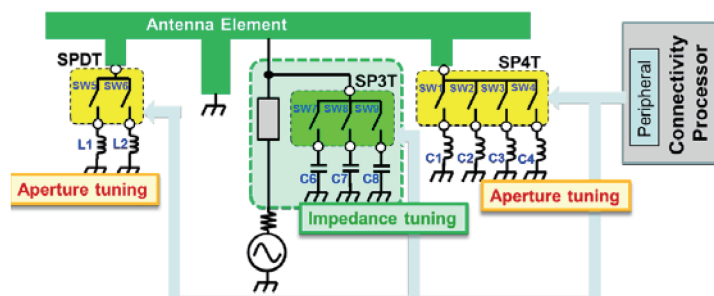


図 7 アンテナチューニング構成例<sup>[19]</sup>  
(SPDT: Single Pole Dual Throw)

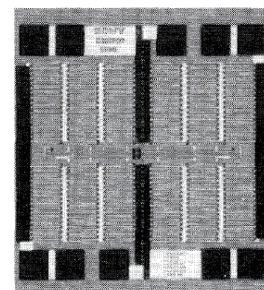


図 8 ソニー JFET SW 例<sup>[15]</sup>  
(サイズ 1.13mmx1.15mm)

### ミリ波パワーアンプ

図 4 でみた 4G 向けパワーアンプでは、周波数、出力において要求性能が厳しい箇所に Si MOS Transistor に代えて高出力、高効率な GaAs HBT によるパワーアンプが用いられている。

ミリ波パワーアンプにおいても、Si MOS パワーアンプの性能向上に加えて、SiGe や GaAs、InP、GaN 等の化合物半導体を用いたパワーアンプが検討されている [20]。GaAs 等の III-V 族化合物半導体は、高い電子輸送特性とワイドギャップによる高いハンドルパワーからミリ波パワーアンプとしても良好な特性を示すことが報告されている [21]。図 9 に各材料によるパワーアンプの飽和出力と動作周波数の関係を示す。パワーアンプを実現するデバイス構造としては、MOS、HBT、HEMT 等様々な選択肢があるが、この図では材料や構造に依存する動作電圧やデバイスサイズを区別していない点に注意されたい。5G ミリ波パワーアンプ向けに検討が進む代表的なデバイスの特徴比較を table I に示す。

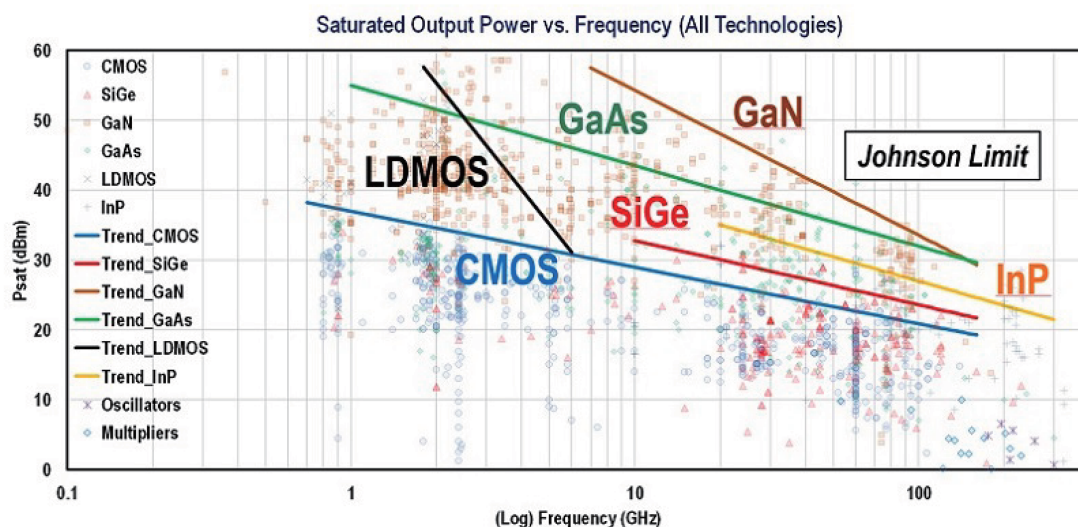


図9 各材料を用いて作製されたパワーアンプ IC の飽和出力と動作周波数のトレンド<sup>[21]</sup>

Table I ミリ波パワーアンプ向けデバイス比較

	Si	SiGe	GaAs	InP	GaN
基板	300mm Si	300mm Si	150mm GaAs	100-150mm InP	150mm SiC or 150-200mm Si
基板コスト	Cheap	Cheap	Expensive	Very expensive	Very expensive Cheap
デバイス構造	MOS	Bipolar	PHEMT	HBT	HEMT
動作電圧 [V]	≤ 4	≤ 6	≤ 6	≤ 5	~30
ハンドルパワー	Low	Low	Medium	Medium	High
効率	Low	Good	Very good	Excellent	Excellent
デバイスサイズ	Small	Small	Medium-large	Medium	Medium

InP HBT は基板の価格やプロセス中に割れ易く収量を上げにくいという課題があり、これまで少量専用品としての実績のみとなっている。コストに厳しく大量生産を前提とする端末向けパワーアンプでは、このハードルをクリアできるかが課題となっている。端末向け高周波スイッチ、パワーアンプ IC としての実績と性能の両立視点から GaAs パワーアンプへの期待が大きく、ゲート長 150nm プロセスによる GaAs PHEMT を用いた検討が進められている [22]。文献 22 では、高出力、高効率な GaAs PHEMT パワーアンプを Si MOS パワーアンプの代わりに用いることで、アンテナ数を 4 から 2 に減らしながらも同等のアンテナ放射特性を維持しつつアンテナモジュールの小型化と低消費電力化を両立できたことを報告している。GaN HEMT は放熱性のよい SiC 基板上に成膜したウエハを用いて高出力と高効率を両立し、従来 Si LDMOS (Laterally Diffused MOS) が用いられてきた 4G 基地局向けパワーアンプの置き換えが進んでおり [23]、この流れは 5G 基地局においても同様と思われる。一方、端末用パワーアンプ向けには、SiC 基板の価格が課題となって導入が難しい。基板に関しては安価な Si 基板が選択肢となるが、いずれの基板上に形成した GaN HEMT も 30V 程度の動作電圧を前提としており、バッテリー駆動のため 5V 以下の動作電圧を前提とする端末向けパワーアンプでは良好な特性実現が難しく検討が進んでいない。

以上、図 6-b で見た端末用小型ミリ波アンテナモジュールでは、パワーアンプ回路だけでなく AD/DA 変換等も取り込んだ多機能・小型 1 チップ実現が可能であるという特徴を背景に、Si MOS Transistor に

よる IC 導入が先行したと考えられる。一方で、MOS パワーアンプの性能には課題があり、より高性能なパワーアンプとして GaAs PEHMT やこの特性を凌駕する新しいデバイスの登場が期待されている。

## 5. 結び

今年度より商用化が開始された 5G では、4G を大きく凌駕する性能仕様を実現するため、新たに FR1 (サブ 6)、2 (ミリ波) 周波数帯が導入された。導入に伴い追加されるアンテナやモジュールを設置するスペースを端末筐体内に確保することが課題となっており、対策としてサブ 6 と 4G アンテナとの共用化とミリ波パワーアンプ高性能化によるモジュール小型化が検討されている。受動素子と多ポートスイッチを組み合わせるアンテナチューニング技術によるアンテナ共用化検討では、我々も SOI スイッチを用いた取り組みを開始している。高出力、高効率ミリ波パワーアンプ実現に向け、Si CMOS パワーアンプの性能向上に加えて GaAs PHEMT などの III-V 族化合物半導体デバイスの検討が進められている。本格的な 5G 普及には今暫く時間が掛かると思われるが、そこに向けた技術開発は既に活況を呈しており、我々も様々な取り組みを進めている。

## 6. 参考文献

1. NTT Docomo HP, <https://www.nttdocomo.co.jp/area/servicearea/?rgcd=03&cmcd=5G&scale=2048000&lat=35.690767&lot=139.756853>.
2. NTT Docomo, [https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/binary/pdf/library/presentation/200825/200825\\_qa.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/ir/binary/pdf/library/presentation/200825/200825_qa.pdf).
3. Cisco, Visual Networking Index Global Mobile Data Traffic Forecast for 2013 to 2018.
4. NTT Docomo white paper, [https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper\\_5g/DOCOMO\\_5G\\_White\\_PaperJP\\_20141006.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf).
5. 3rd Generation Partnership HP, <https://www.3gpp.org/>.
6. Recommendation ITU-R M.2083-0 IMT Vision, [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf).
7. Qualcomm-tech, <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/spectrum-for-4g-and-5g.pdf>.
8. D. R. Pehlke *et al.*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 5G Summit, 2020.
9. A. Cihangir *et al.*, RADIOENGINEERING, vol. 25, No. 3, pp. 419-428, 2016.
10. T. S. Rappaport *et al.*, IEEE Access, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
11. A. V. Garcia, <http://www.5gsummit.org/reston/slides/IEEE5GSummitRestonDrGarcia.pdf>.
12. Qualcomm-tech, <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-nr-mmwave-deployment-strategy-presentation.pdf>.
13. S. Shakib *et al.*, IEEE Trans. Micro. Theory Techn., vol. 67, no. 7, pp. 2946-2963, 2019.
14. A. Kuchikulla, <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/4-things-to-know-about-antenna-tuning-in-4g-5g-smartphones>.
15. K. Kohama *et al.*, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 31, No. 10, pp. 1406-1411, 1996.
16. K. Kohama *et al.*, IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Sympo., pp. 509-512, 2005.
17. J. C. Clifton *et al.*, European Microwave IC Conference, pp. 524-527, 2013.
18. J. Costa, IEEE MTT-S International Microwave Sympo., pp. 445-448, 2007.
19. H. Kawasaki, International RF-SOI Workshop, 2017.
20. D. Y. C. Lie *et al.*, Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 2018, pp.1-16, 2018.
21. Georgia Tech Electronics and Micro-System Lab, [https://gems.ece.gatech.edu/PA\\_survey.html](https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html).

22. N. Cho *et al.* IEEE MTT-S International Microwave Sympo., We2F-1, 2020.
23. S. Nakajima *et al.*, Int. Elect. Dev. Lett., 14.2, 2018.