

第 5 世代移動通信システム用ミリ波帯RFICとその半導体技術

電子応用技術R&Dセンター 山口 陽

Millimeter-wave-band RFIC technologies for 5G systems

Y. Yamaguchi

本稿では、第 5 世代移動通信システム用ミリ波帯RFICに用いられる半導体技術について述べた。具体的には、半導体の主流であるBulk CMOS技術、Bulk CMOSの高周波特性を向上させたSOI CMOS技術、Bipolar技術をベースに高周波特性を向上させたSiGe BiCMOS技術について解説した。また、それぞれの技術を用いて作成されたミリ波帯RFICの例を取り上げた。

This paper describes semiconductor technologies for millimeter-wave-band RFICs used in 5G mobile communication systems. Specifically, this paper explains bulk CMOS technology, the mainstream semiconductor fabrication process, SOI CMOS technology that improves the high-frequency characteristics of bulk CMOS, and SiGe BiCMOS technology to that enhances the high-frequency characteristics based on bipolar technology. This paper also discusses millimeter-wave-band RFICs developed using each technology.

1. ま え が き

2019 年より世界各国で順次第 5 世代移動通信システム（以下 5 Gと略す）によるサービスが開始されている。第 1 世代移動通信サービスは、1979 年に当時の日本電信電話公社（以下NTTと略す）により、民間用のセルラー方式による自動車電話サービスとしては世界で初めて開始された。その後、1991 年 4 月に超小型アナログ携帯電話が発売され、本格的な携帯電話の時代に入った。そして、1993 年に第 2 世代移動通信サービスとしてデジタル方式によるサービスが、2001 年からIMT- 2000 として国際電気通信連合（International Telecommunication Union: ITU）で標準化された第 3 世代移動通信サービスが開始された。このように、概ね 10 年おきに世代が変わってきており、1980 年代が第1世代、1990 年代が第 2 世代、2000 年代が第 3 世代、2010 年代が第 4 世代と位置づけられている。しかし、細かく見ると、もっと段階的に進歩していることが分かる。例えば、第 3 世代の技術を取り入れたcdmaOneのサービスは 1998 年に開始されている。また、3.5 世代と呼ばれるHigh Speed Packet Access (HSPA) は2003 年に、3.9 世代と呼ばれるLong Term Evolution (LTE) は 2009 年に、LTE-Advancedは 2012 年にThird Generation Partnership Project (3 GPP) において策定さ

れている。第 5 世代移動通信システムも同様に段階的に進歩していくと考えられる。その一例として、2019 年 10

表 1 WRC-19でIMTに特定された周波数の詳細¹⁾

Table 1. Details of frequencies identified for IMT at WRC-19.

	第一地域 (欧州、 ロシア諸国、 アラブ、 アフリカ) 122 カ国	第二地域 (南北 アメリカ) 35 カ国	第三地域 (アジア・ 太平洋) 36 カ国
24.25 -27.5 GHz	グローバル特定		
37- 43.5 GHz	グローバル特定		
45.5- 47 GHz	50 カ国に特定 (欧州の一部、 ロシア諸国、 アラブ、 アフリカ地域)	1 カ国に特定 (ブラジル)	2 カ国に特定 (イラン、 韓国)
47.2- 48.2 GHz	62 カ国に特定 (欧州の一部、 ロシア諸国、 アラブ、 アフリカ地域)	地域全体に特定	7 カ国に特定 (オーストラリア、 韓国、インド、 イラン、日本、 マレーシア、 シンガポール)
66- 71 GHz	グローバル特定		

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
5G	Fifth Generation Mobile Communication System	第5世代移動通信システム
ITU	International Telecommunication Union	国際電気通信連合
3GPP	Third Generation Partnership Project	移動通信システムの仕様の検討・作成を行う標準化プロジェクト
WRC	World Radiocommunication Conference	世界無線通信会議
cdmaOne	cdmaOne	クアルコムが開発したCDMA方式の通信技術。一般に2.5世代と言われる。
HSPA	High Speed Packet Access	W-CDMAを拡張した高速パケット通信規格。一般に3.5世代と言われる。
LTE	Long Term Evolution	3GPP Release.8で策定された移動通信技術。一般に3.9世代と言われる。
LTE-Advanced	Long Term Evolution Advanced	第4世代移動通信システムで用いられているLTEをさらに高速化した通信技術
RFIC	Radio Frequency Integrated Circuit	高周波用アナログ集積化回路
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	P型とN型の相補型酸化膜半導体
SOI	Silicon On Insulator	MOSトランジスタの下に酸化膜絶縁層を設け高速化、低消費電力化する技術
SIMOX	Separation by Implanted Oxygen	酸素イオン注入と熱処理によりSOIウエハを製造する技術
BiCMOS	BiCMOS	BipolarとCMOSの両方のトランジスタを同じウエハに製造する半導体技術
LO	Local Oscillator	局部発振器。その出力信号にも同じ略号を使用することが多い
TRX	Transceiver	送受信回路

月28日から11月22日にエジプトで開催された世界無線通信会議（World Radiocommunication Conference: WRC）で特定された周波数を表1に示す。24.25 - 27.5 GHz, 37 - 43.5 GHz, 66 - 71 GHzのグローバル特定に加え、45.5-47 GHz, 47.2 - 48.2 GHzが一部地域に特定されている¹⁾。また、次回以降のWRCにおける新たな周波数追加も検討されている。

本稿では、この5Gに関連する技術のうち、ミリ波帯 Radio Frequency Integrated Circuit (RFIC) 技術に焦点をあて、その基本となる半導体技術とそれらを用いた5G用ミリ波帯RFICの例について述べる。

2. ミリ波帯半導体技術とその特徴

従来は、ミリ波帯RFICではIII-V族化合物半導体であるGaAs ICが主流であった。このGaAs ICは高周波特性に優

れ、また耐圧も高いため、低雑音増幅器に用いても電力増幅器に用いても高い性能を見込むことができるが、デジタル回路を作成することができないという問題がある。これに対し、Si半導体の代表格であるComplementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) ICは、デジタル回路に向いており、半導体の微細化技術の進展による高周波特性の向上に伴い、ミリ波帯RFICの開発が行われるようになった。しかし、微細化には耐圧の低下が伴うため、微細化以外の技術でSi半導体の高周波特性を向上させる試みも行われてきた。その1つが、Silicon On Insulator (SOI) 技術である。SOIは、導電性が高いSi半導体において、トランジスタの下に酸化膜による絶縁層を作成し、高速化、低消費電力化をはかる技術である。製法はいくつか種類があるが、そのうちの1つであるSeparation by Implanted Oxygen (SIMOX) は、Siウエハに酸素イオンを注入し、内部に絶縁層（酸化膜）を作成する技術で、NTTや

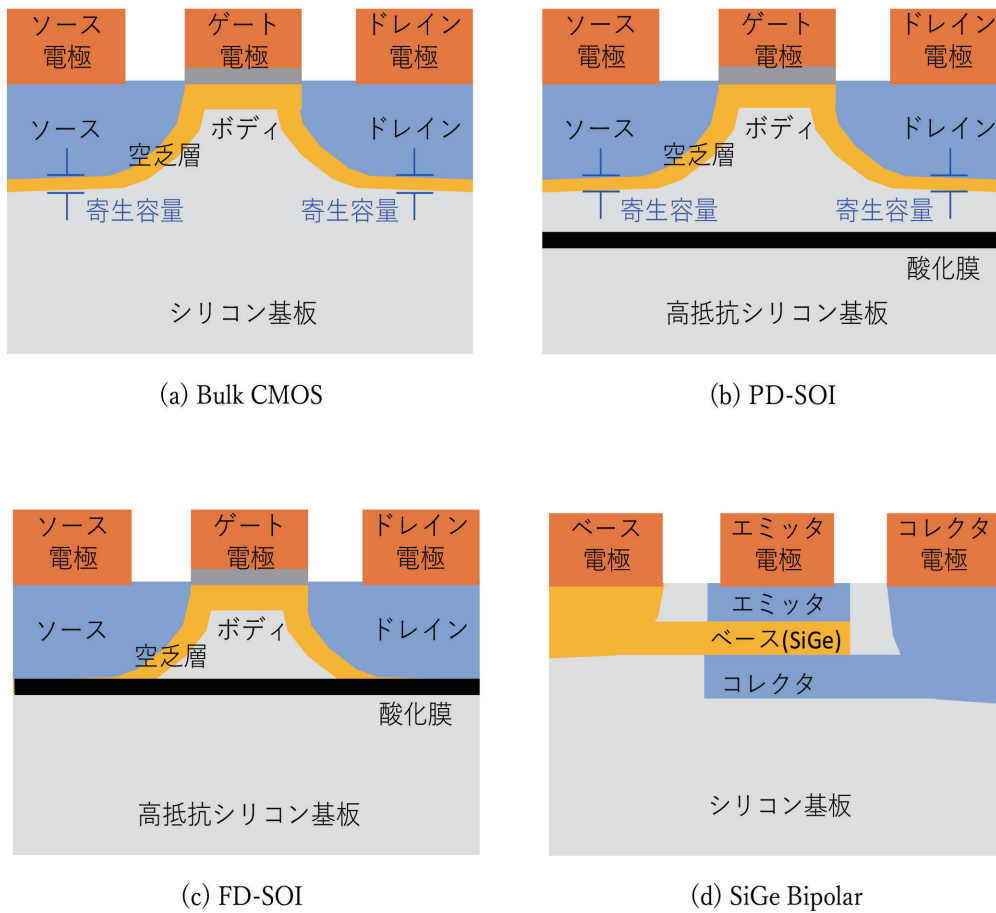


図1 各種Siトランジスタ構造の模式図

Fig. 1. Simplified Si transistor structures.

International Business Machines Corporation (以下IBMと略す) などによって開発されてきた^{2) 3)}。このSOI技術には、大きく分けて完全空乏型 (Fully Depleted : FD) SOIと部分空乏型 (Partially Depleted : PD) SOIの2種類がある。図1にその違いを示す。図1(a)は通常のCMOS (Bulk CMOS) トランジスタの模式図である。導電性の高いSi基板との間に寄生容量ができ、高周波電流のリークが生じ、高周波特性や消費電力特性の悪化を招く。これに対し、図1(b)がPD-SOIである。トランジスタの下に絶縁層を設けることにより寄生容量を小さくできるため、高周波特性を向上できる。しかし、寄生容量が残るため、特性向上は限定的となる。図1(c)がFD-SOIである。トランジスタの直下に絶縁層を設けることにより、完全に絶縁分離するため、寄生容量をほぼ無くすることができ、さらに高周波特性を向上できる。ただし、トランジスタを作成する非常に薄い層の直下に絶縁層を作成する必要があるため、製造は難しく、ウエハコストが高くなる。SOI技術は、IBMの流れをくむGlobalFoundries社 (以下GFと略す) が力を入れている。GFの提供しているファブドリサービスのうち、45 nm SOIはPD-SOI技術、22 nm SOIはFD-SOI技術を用

いている。

Si半導体の高周波特性を向上させる別の試みとして、SiGe Bipolar技術がある。これはSi半導体に、同じく半導体であるGeを注入し、結晶構造に歪を持たせることにより、電子の移動度を高速化し、高周波特性を向上させる技術である。その構造の模式図を図1(d)に示す。MOSトランジスタは通常は横方向に電流の流れが生じるように製造するが、Bipolarトランジスタは通常は縦方向に製造する。もともとBipolarトランジスタはMOSトランジスタと比較し、低雑音、高利得であるが、このうちのベースの層にGeを注入し、高周波特性をさらに向上させている。ただし、Bipolarトランジスタはデジタル回路には不向きである。このため、通常はCMOSと組み合わせたBiCMOSとして製造されている。これにより工程が多くなり製造コストがBulk CMOSに比べて高くなるが、高周波特性が向上しているため世代の古い (微細化の度合いが低い) 技術でミリ波帯RFICを製造できるので、マスクのコストは安くなる。表2に各Si半導体技術の特徴をまとめる。

表2 各種Si半導体技術の特徴
Table 2. Features of Si technologies.

	Bulk CMOS	SOI CMOS	SiGe BiCMOS
利点	<ul style="list-style-type: none"> ・ CMOS のみの製造のため、製造コストが低い ・ 微細化された世代を使うため、デジタル回路は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 寄生容量が小さい ・ 製造コストが Bulk CMOS と同程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高周波特性が良い ・ マスクコストが低いので初期投資が小さい
欠点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微細化された世代を使うため、初期投資が大きい ・ 微細化された世代を使うため、出力電力が小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微細化された世代を使うため、初期投資が大きい ・ ウェハコストが高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Bipolar と CMOS の両方を製造するため、製造コストが高めとなる

3. 5G用ミリ波帯RFIC

図2に、5G向けアンテナモジュールの構成例を示す⁴⁾。図の一番右に示されているアレイアンテナによって受信された信号は、フロントエンド部の低雑音増幅器によって増幅されたのち、RF Beamformerで位相を調整して合成される。合成後の信号は、無線周波数から中間周波数に変換され、ADCによってデジタル信号に変換され、信号処理される。またデジタル部で生成された信号は、DACによってアナログ信号に変換され、無線周波数に変換された後、RF Beamformerで位相調整された信号に分割される。分割された信号は、フロントエンド部の電力増幅器によって増幅され、アレイアンテナから送信される。

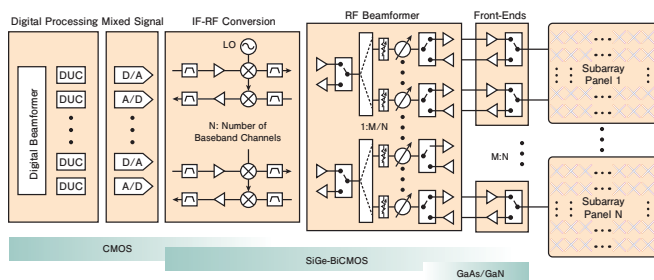


図2 5G向けアンテナモジュールの構成例⁴⁾

Fig. 2. Simplified block diagram of mmWave phased array using hybrid beamforming.

2章で述べたとおり、ミリ波帯RFICを製造するための半導体技術には各種あり、それぞれの技術を用いたRFICの開発が行われている。文献4から引用した図2には、各機能ブロックと対応する半導体技術が記載されているが、あくまで一例であり、ブロックの分け方や適用する半導体技術は必ずしもこのとおりではない。以下、実際の適用例

について述べる。東京工業大学と日本電気株式会社は65nm Bulk CMOS技術を用い、4並列の送受信回路（以下TRXと記述する）を搭載したRFICを開発している⁵⁾。このRFICは、IF-RF ConversionからFront-Endsまでの機能を搭載し、局部発振信号（以下LOと記述する）の位相を変えるLO位相方式を用い小型化していることを特徴としている。また、Samsung社は28nm Bulk CMOS技術を用い、IF-RF ConversionからFront-Endsまでの機能のうち送信部分のみを16並列で搭載したRFICを開発している⁶⁾。一方、MixComm社はGFの45nm PD-SOI技術を用い、RF BeamformerとFront-Endの機能を搭載した8TRXのRFICを開発している⁷⁾。このSOI技術では微細化による出力電力低下を補うため、縦積みにするなどによりSOI上の電力増幅器を高出力化する研究もなされている⁸⁾。他方、高周波特性に優れたGaAs ICやGaN ICなどでも5G用ミリ波帯RFICが開発されているが、デジタル回路が作成できないため、電力増幅器のみ、低雑音増幅器のみ、あるいは電力増幅器と低雑音増幅器とスイッチを搭載したものが主流である。

これらに対し、IBM社とEricsson社がSiGe BiCMOS技術を用いて図2のIF-RF ConversionからFront-Endsまでの機能を搭載したRFICを共同開発している⁹⁾。このRFICは、移相器として実時間遅延回路を用いており、ビーム整形に優れている。また、32TRXを搭載するなど、他の部分の完成度も非常に高く、このRFICについて記述した論文はIEEEの論文賞を受賞している。フジクラでは、この技術をベースとして、高周波特性は同等の特性を保ちつつ、64素子のアンテナモジュールに換算した場合にICサイズならびに消費電力を半分に削減したRFICをIBMと共同開発中である。

4. むすび

5Gに関連する技術のうち、ミリ波帯RFIC技術に焦点をあて、その基本となる半導体技術として、Bulk CMOS技術、SOI CMOS技術、SiGe BiCMOS技術について述べたのち、それぞれの技術を用いて開発された5G用ミリ波帯RFICについて述べた。各半導体技術はそれぞれ特徴を持っており、用途によって適宜選択する必要がある。ミリ波帯のアナログ信号に適用されるミリ波帯RFICについては、高周波特性が特に重要となる。また、次々と周波数が追加され、様々なラインアップを揃える必要があるため、初期投資が小さくて済むかどうかも重要な要素となる。これら観点から、5G用ミリ波帯RFICには、現時点ではSiGe BiCMOS技術が適していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 伊藤裕紀, 坂本信樹, 新博行, “2019年ITU無線通信総会 (RA-19), 世界無線通信会議 (WRC-19) 報告,” NTT DOCOMOテクニカル・ジャーナル vol.28, No.1, pp.42-47, April 2020.
- 2) K. Izumi, M. Doken, and H. Ariyoshi, “C.M.O.S. devices fabricated on buried SiO₂ layers formed by oxygen implantation into silicon,” *Electronics Letters*, vol.14, issue 18, pp.593-594, August 1978.
- 3) G.G. Shahidi, A. Ajmera, F. Assaderaghi, R.J. Bolam, E. Leobandung, W. Rausch, D. Sankus, D. Schepis, L.F. Wagner, K. Wu, and B. Davari, “Partially-depleted SOI technology for digital logic,” *Digest of 1999 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, pp.426-427, February 1999.
- 4) D. Danzillio, “Advanced GaAs integration for single chip mmWave front-ends,” *Microwave Journal*, May 2018.
- 5) J. Pang, R. Wu, Y. Wang, M. Dome, H. Kato, H. Huang, A. T. Narayanan, H. Liu, B. Liu, T. Nakamura, T. Fujimura, M. Kawabuchi, R. Kubozoe, T. Miura, D. Matsumoto, N. Oshima, K. Motoi, S. Hori, K. Kunihiro, T. Kaneko, and K. Okada, “A 28 GHz CMOS phased-array transceiver featuring gain invariance based on LO phase shifting architecture with 0.1-degree beam-steering resolution for 5G new radio,” *2018 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, June 2018.
- 6) Y. Cho, W. Lee, H. Park, B. Park, J. H. Lee, J. Kim, J. Lee, S. Kim, J. Park, S. Park, K. H. An, J. Son, and S.-G. Yang, “A 16-element phased-array CMOS transmitter with variable gain controlled linear power amplifier for 5G new radio,” *2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC)*, June 2019.
- 7) MixComm Inc., “Eight-channel front-end RFIC claims new record for 28 GHz power, efficiency and integration,” *Microwave Journal*, June 2020.
- 8) K. Ning, Y. Fang, N. Hosseinzadeh, and J. F. Buckwalter, “A 30-GHz CMOS SOI outphasing power amplifier with current mode combining for high backoff efficiency and constant envelope operation,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.55, issue: 5, May 2020.
- 9) B. Sadhu, Y. Tousi, J. Hallin, S. Sahl, S. K. Reynolds, Ö. Renström, K. Sjögren, O. Haapalahti, N. Mazor, B. Bokinge, G. Weibull, H. Bengtsson, A. Carlinger, E. Westesson, J.-E. Thillberg, L. Rexberg, M. Yeck, X. Gu, M. Ferriss, D. Liu, D. Friedman, A. Valdes-Garcia, “A 28-GHz 32-element TRX phased-array IC with concurrent dual-polarized operation and orthogonal phase and gain control for 5G communications,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.52, Issue 12, pp.3373-3391, December 2017.