

第5章 Si-MMIC とその応用

見本

このPDFは、CQ出版社発売の「実用マイクロ波技術講座-集積回路と応用-第6巻」の一部分の見本です。内容・購入方法などにつきましては是非以下のホームページをご覧ください。
<http://www.cqpub.co.jp/hanbai/books/79/79761.htm>

5.1 Si-MMIC の特徴と課題

Si-MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)は、(1)大量生産した場合、GaAs-MMIC に比べて低製造コストであること、(2)p-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)あるいは pnp BJT(Bipolar Junction Transistor)の組み合わせにより高機能なバイアス回路、制御回路が実現でき、自己バイアス調整機能を持つ MMIC が実現可能であること、(3)PLL(Phase Locked Loop)回路、ベースバンド回路、ロジック回路など、これまで Si-IC として集積化されてきた回路との集積化、チップ統合化が可能であり、送受信部のシステム・オン・チップが実現可能であることから、小形、低コストを要求される 1~6GHz 程度までの携帯電話などの移動体通信端末¹⁾²⁾³⁾⁴⁾、Bluetooth や無線 LAN (Local Area Network) 端末⁵⁾⁶⁾⁷⁾、ETC (Electronic Toll Collection system) 車載機⁸⁾などの用途に向けて、急速に開発が進められている。

(1)の低製造コストという点に関しては、GaAs-MMIC に比べて数倍安価であるものの、製造に使用する Si プロセス、ウェハサイズ、および、MMIC の生産規模に依存する。通常、Si-MMIC には最新の Si プロセスを使用するため、ウェハサイズは比較的大きく、大量生産が要求されることが多い。このため、Si-MMIC は、携帯電話をはじめとする移動体通信端末用の用途に適していると考えられている。近年、SiGe HBT(Hetro-junction Bipolar Transistor)プロセス⁹⁾¹⁰⁾や、超微細 CMOS プロセス¹¹⁾¹²⁾が開発されており、これらプロセスを用いることにより、トランジスタの高周波性能は、マイクロ波帯で使用可能なレベルとなってきた。しかし、トランジスタの耐圧が低く、高出力・低ひずみな特性が得にくいことなどの問題点も抱えている。

(2)の自己バイアス調整機能を持つ MMIC が実現可能という点に関しては、定電流、定電圧源などの回路をバイアス回路として使用できるため、温度、トランジスタばらつきに対して自己調整可能な回路を容易に実現できる。さらに、これらとアナログ演算回路などを組み合わせることにより、より高機能なバイアス調整機能を実現することも可能である。

見本

(3)の送受信部のシステム・オ
現可能という点に関しては、(2)で述べたような無調整化した回路を使用する必要がある。各 Si プロセス毎に実現に適した回路ブロックをもとにシステムチップ化が進められている。

5.2 章では、Si-MMIC プロセスの現状と動向を述べ、プロセス技術の進展によるトランジスタ性能の改善について述べる。通常の Si プロセスでは、低抵抗 Si 基板を用いるため、伝送線路や受動回路素子の損失が GaAs に比べて非常に大きく²⁾、Si-MMIC のオンチップ整合回路、バイアス回路を実現する上で、大きな課題となっている。5.3 章では、伝送線路、受動回路素子の低損失化の方策について述べる。5.4 章において、定電流、定電圧源などのバイアス回路を組み合わせることで新たな機能を実現した例を含めて Si-MMIC 開発例を示す。低損失なオンチップ整合回路を持つ Si-MMIC の実現例についても述べる。

5.2 Si-MMIC プロセスの現状と動向

5.2.1 Si-MMIC プロセスの種類とその特徴

1990 年代に Si-MMIC は、次世代の移動体通信端末用 MMIC として注目されるようになってきた。表 5.1 は、Si-MMIC に用いられているプロセスの種類とその特徴、主な用途を示したものである。この表に取り上げたものは、通常のアナログあるいはデジタルの Si-IC プロセスをベースにしたものであり、この他に、高周波高出力増幅器に特化したプロセスとして、高出力増幅器用の Bipolar、MOS (LDMOS を含む) などがある。Si-MMIC に用いられるプロセスとしては、Bipolar、CMOS、BiCMOS、および Bipolar、BiCMOS の Bipolar Junction Transistor (BJT) を SiGe HBT (Hetero-junction Bipolar Transistor) で置き換えた SiGe、SiGeCMOS あるいは SiGeBiCMOS が挙げられる。

図 5.1 は、毎年米国で開催されるマイクロ波関連の国際学会である Microwave Theory and Techniques Society (MTT-S) International Microwave Symposium および IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium における Si-MMIC (Si-RFIC 含む) のプロセス別発表件数の推移を 1996 年から 2001 年にわたり示したものである。Si-MMIC に関する発表は、ここ数年、毎年約 1.5 倍のペースで発表件数が増加し続けている。1996 年には、ほとんどが BiCMOS プロセスを用いたものであったが、1998 年以降、急激に増加した件数のほとんどは、SiGe (SiGeCMOS を含む)



と CMOS である。90 年代半ばまで、当最も高速なトランジスタであった BJT を用いて Si-MMIC の開発が試みられたものの、GaAs 系のデバイスに対する高周波特性の不足のため、あまり実用化は進まなかった¹³⁾。しかし、90 年代後半より、SiGeHBT の実用化¹⁰⁾、CMOS プロセス微細化に伴う FET の高周波化¹¹⁾¹²⁾により、これらトランジスタを用いた Si-MMIC の開発が、実用化に向けて大きく進展しており、これが、国際学会での発表件数の急激な増加につながっている。

表 5.1 Si-MMIC プロセスの種類とその特徴、主な用途

プロセスの種類	特徴	主な用途
Bipolar	BJT のプロセス。通常 npn と pnp の 2 種類の BJT が使用可能	アナログ IC、(高速ロジック IC)
BiCMOS	CMOS と BJT を同一チップ上に構成できるプロセス	アナログ/ディジタル混合 IC
CMOS	CMOS を用いた低消費電力ロジック用プロセスとして発展。ゲート微細化により高速化され、高周波アナログ用としても注目。耐圧に難あり。	ロジック IC、(近年高速ロジック IC、高周波アナログ IC)
SiGe	Bipolar プロセスの高速 npn BJT を npn SiGeHBT で置換したもの	高周波アナログ IC、高速ロジック IC
SiGeBiCMOS (あるいは SiGeCMOS)	BiCMOS プロセスの高速 npn BJT を npn SiGeHBT で置換したもの	高速アナログ/ディジタル混合 IC

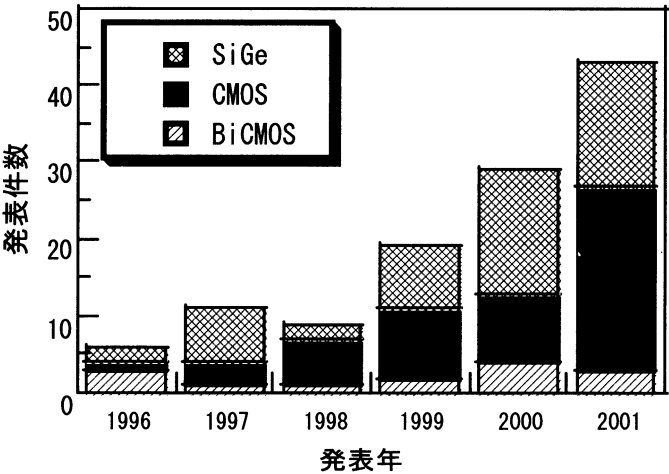


図 5.1 マイクロ波関連国際学会における Si-MMIC のプロセス別発表件数の推移

5.2.2 SiGe プロセス

SiGeHBT は、Si/SiGe のヘテロ接合を用いたものであり、通常の Si-BJT のプロセスに Ge をドーピングした膜を作成するプロセスを追加することで、比較的容易に実現できる。このため、従来の Bipolar プロセスを SiGe プロセス、BiCMOS プロセスは SiGeCMOS(あるいは SiGeBiCMOS) プロセスに変更することができたため、新規製造ラインを導入することなく、旧来の Si プロセスに一部変更を施すことで、Si-MMIC 用プロセスに変身させることができる。Si のバンドギャップは約 1.11V、Ge は約 0.66V であるため、Si に Ge をドーピングすることで、バンドギャップを変えることができ、エミッタを Si、ベースを SiGe とすることで、図 5.2 に示すようなヘテロ接合が実現できる。ヘテロ接合とすることで、ベースのキャリア濃度を上げてもエミッタ注入効率が下がりにくいため、注入効率を高く保ったまま、高電流増幅率を得ることが可能となる。なお、通常の SiGeHBT の場合、Ge のドーピングは 20%程度が上限となっているが、カーボンをドーピングした SiGe:C HBT の場合、Ge のドーピング量を上げることが可能となるため、近年注目されている¹⁴⁾。トランジスタサイズの微細化、および、ドーピングプロファイルを含めたヘテロ接合の最適化により、100GHz を超える遮断周波数 f_t (Cut-off Frequency)、最大発振周波数のものが報告されている¹⁵⁾。また、 f_t が 20GHz 程度のものであれば、コレクタ-エミッタ間耐圧(BV_{ceo})も 10V 程度のものが得られており、2GHz 帯で 1W 程度の高出力増幅器の報告がなされている¹⁶⁾。NFmin (Minimum Noise Figure)についても良好な値が報告されており、2GHz 帯であれば、GaAs MESFET(Metal-Electrode Semiconductor FET)とほぼ同程度の特性が得られている。

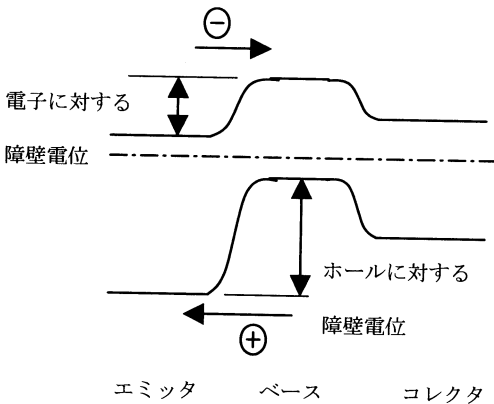


図 5.2 SiGeHBT のエネルギーバンド図