

## 〔研究〕

# ワイドギャップ半導体による高パワーデバイス特性の向上

## Improvement of High Power Device Characteristics by Using Wide Bandgap Semiconductors

吉田 貞史

S. YOSHIDA

Recently, crystal growth and device fabrication techniques of wide bandgap materials, like SiC, nitrides and diamond have been developed, and some advantages of high power devices using these wide bandgap materials have been demonstrated. Their large breakdown voltage and large saturation drift velocity as well as their large wide bandgaps bring about large tolerance of high power switching, resulting in the improvement of the specification of high power devices, such as FET and thyristors. The capability of high temperature operation of these devices is also good for high power devices. Superfast turn-on process of GaAs thyristors is explained by photon process due to high internal quantum efficiency of radiative recombination in direct bandgap materials, which is different from those of indirect ones, like Si, i.e., ambipolar diffusion model. Here, we will discuss what kinds of semiconductors are desired to fabricate electronic devices having hard specification, i.e., operating with high power, at high frequency and/or high temperatures, in terms of materials parameters. Next, the demand for the hard specification of the devices is discussed. Finally, the present state of the research on the device fabrication using wide bandgap semiconductors is reviewed.

### § 1 はじめに

エレクトロニクスの発展の結果、これまで半導体素子が用いられなかった領域へもその適用が広がりつつある。その結果、例えばより高温環境、あるいは放射線照射下といった厳しい環境での使用を要求されるようになった。一方、エネルギー供給では、その総量が年々増大しているばかりでなく、電気エネルギーへの依存の割合が年々大きくなっており、より多くの電気エネルギーの安定供給が社会の発展に不可欠となっている。そこでは、より高電圧、大電流、高速の電力制御が要求されている。それをより低損失で行うためには半導体素子の高パワー化、高周波化、低損失化が不可欠である。半導体素子のこのような厳しい仕様を追求する分野（ハードエレクトロニクス）ではSiの物性定数からくる限界が論じられるようになった。そこで、Siよりバンドギャップ、絶縁破壊電界などの物性パラメータの大きい半導体材料でこれらの素子を作ろうという試みがなされている<sup>1)</sup>。

一方、ワイドギャップ半導体であるSiC、窒化物半導

体、ダイヤモンド等の研究では最近結晶成長技術、あるいは素子化プロセス技術でくつかのbreak throughがなされ、それらを用いて種々の素子が作られ、そのSi素子に対する優位性が示されつつある<sup>2)</sup>。

大電力制御への半導体デバイスの適用に対しても、Siの物性値から来る素子の使用限界が感じられている。例えば、ターンオン時、ターンオフ時におけるSiの破壊耐量の不足による素子の破壊であり、それが使用限界をもたらしている<sup>3)</sup>。ここでは、パワー素子の特性向上という立場から、どのような物性を持つ半導体材料が期待されるかを議論する。次に、高温素子、高パワー素子、高周波素子へのニーズを論じ、最後にワイドギャップ半導体を用いたこれらの素子の開発の現状について概観する。

### § 2 どのような半導体が期待されるか

素子特性は、素子構造によって決まるものと素子材料によって決まるものとがある。現在、Si素子では、前者の立場から素子特性を改善する努力がなされている<sup>4)</sup>。しか

KEY WORDS : ワイドギャップ半導体, 高温素子, 高パワー素子, 高周波パワー素子

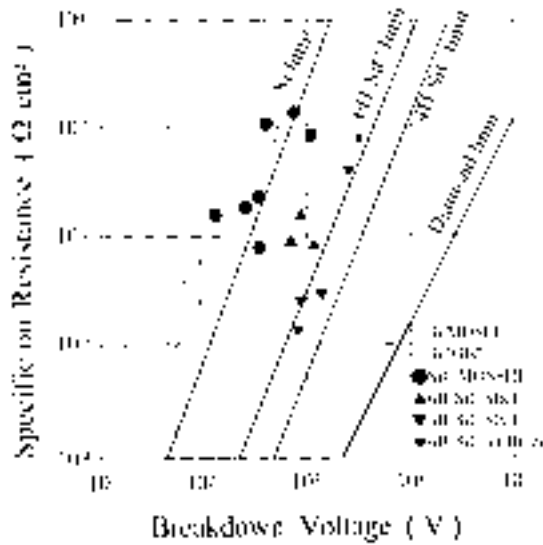


Fig.1 Specific-on-resistance versus breakdown voltage for Si and SiC power devices with the theoretical values (solid lines) and experimental data points.

し、ここでは、後者の立場から半導体パワー素子の特性向上を考えてみよう。

例えば、パワー素子のターンオン特性はオン状態の縦方向および横方向伝搬特性に依る。バイポーラトランジスタではカソード（エミッタ）とゲート（ベース）が楕状に細

かく入り組んでいるため、電子-正孔プラズマの発生が全体でおこり、横方向の伝搬は考慮する必要はない。しかし、電流密度が桁違いに大きい(GTO)サイリスタではオン状態はゲート電極が外部に取り出されている箇所の近傍でまず起こり、それが横方向に広がり、完全なオン状態となる<sup>5)</sup>。一部しかオンしていない状況でも、電子-正孔プラズマ自体の通電能力は大きいので、外部電源のインピーダンスが低い場合には巨大な電流が素子の一部に流れる。デバイスの放熱能力が小さい場合、デバイスの一部の温度が上昇しすぎて破壊に至ると考えられている。Si に比べて熱伝導度が大きく放熱能力の大きい材料、あるいはバンドギャップが大きく真性半導体温度が高い半導体では、高温まで安定な動作が可能で、破壊に対する耐量が大きくなると考えられる。

バンドギャップが大きく、絶縁破壊電界の大きい材料で Si を置き換えれば、素子の各層の厚さを薄くでき、また高濃度ドーピングが可能である。その結果として、高耐圧かつオン抵抗の小さい素子を作ることが出来る。すなわち、耐圧-オン抵抗のtrade-offから脱却でき、低損失高耐圧パワー素子が可能となる(Fig.1)。高温動作の制限の緩和も大電流密度動作に有利である。ターンオン特性を考えたとき、層厚が薄くできることは、オン状態の縦方向伝搬時間を小さくでき、電流の立ち上がり特性を向上することが出

Table 1 Materials parameters of semiconductors, Si, GaAs, SiC, GaN and diamond, and their figures of merit for power devices (figure of merit: Si=1).

Semiconductor	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	diamond
band gap $E_g$ (eV)	1.1135	1.428	3.02	3.39	5.470
crystal structure	diamond	zinblend	hexagonal	wurtzite	diamond
thermal conductivity $\kappa$ (W/cmK)	1.51	0.54	4.9	1.3	20.9
mobility $\mu$ electron (cm <sup>2</sup> /V s)	1500	8500	700	900	1800
hole	450	420	120	400	1600
dielectric const. $\epsilon_s$	11.9	12.91	9.66 <sup>a</sup> , 10.03 <sup>c</sup>	9.5 <sup>a</sup> , 10.4 <sup>c</sup>	5.93
$\epsilon_\infty$	11.6	11.10	6.52 <sup>a</sup> , 6.70 <sup>c</sup>	5.35 <sup>a</sup> , 5.35 <sup>c</sup>	5.76
saturated drift velocity $V_s$ (cm/s)	$1 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$	$2.5 \times 10^7$
breakdown field $E_B$ (V/cm)	$3 \times 10^5$	$6.5 \times 10^5$	$3.5 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$4 \times 10^6$
figure of merit					
Johnson's $M_J=(V_s/E_B)^2$	1	18.8	992	324	1,100
Key's $M_K=\kappa(V_s/\epsilon_s)^{1/2}$	1	0.52	6.4	1.05	37
$1/R_{on} \sim \epsilon_s \mu E_B^3$	1	62	602	141	1654
$f_{max} \sim \mu E_B E_g^{1/2}$	1	13.9	9.0	7.0	41

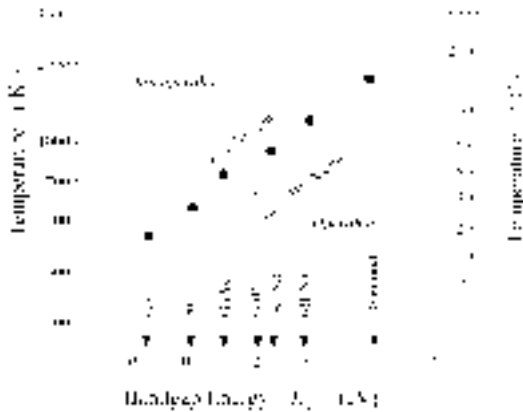


Fig.2 The temperatures where the reverse leak current at the pn junctions exceed  $10^{-3} \text{A/cm}^2$ , and those where the intrinsic carrier concentrations exceed  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  for various semiconductors.

来ると考えられる。飽和ドリフト速度が大きいこともキャリアの拡散速度が大きくなり、オン状態伝搬時間短縮に有効であると思われる。このような観点から、ワイドギャップ、絶縁破壊電界大、高温安定、熱伝導度大、飽和ドリフト速度大の半導体への置き換えはパワー素子には多くのメリットがあると考えられる<sup>6,7)</sup>。

一方、GaAsはSiに比べれば大きなバンドギャップを持つが、SiCや窒化物に比べるとさほど大きくない。しかし、GaAs素子ではSiより2桁小さいスイッチング時間が報告されている。これは、オン状態の伝搬がキャリアの拡散ではなく光の伝搬によっているからだと考えられている。その意味で、直接遷移型であるGaAsも高速パワー素子材料として有利であると言える。

Table 1 にSi, GaAs および代表的ワイドギャップ半導体であるSiC, GaN, ダイヤモンドの物性値を示す。SiC, GaN, ダイヤモンドはいずれもSiに比べてバンドギャップ  $E_g$  が大きいだけでなく、絶縁破壊電界  $E_b$ 、飽和電子ドリフト速度  $V_s$  が大きい。また、SiCとダイヤモンドは熱伝導度  $\kappa$  がSiより数倍大きい。これらの物性定数を組み合わせると、素子特性に対する性能指数がいくつか提案されている。その代表的なものにJohnson指数<sup>8)</sup>とKey指数<sup>9)</sup>がある。前者は  $M_j \sim (E_b V_s)^2$  で与えられ、高速・大電力素子としての、後者は  $M_k \sim \kappa (V_s / \epsilon_s)^{1/2}$  で与えられ、高速・高集積素子としての性能指数を与える。また、パワー素子のオン抵抗の逆数  $1/R_{on} \sim \epsilon_s \mu E_b^3$  及び最大動作周波数  $f_{max} \sim \mu E_b E_g^{1/2}$  の指数も提案されている<sup>10-12)</sup>。Table 1 にこれらの値をSiを1として示した。絶縁破壊電界の値などまだ正確な値が得られていないため、どのような値を用いて計算するかによって指数の値が大きく変化するが、Siに比べればワイドギャップ半導体はいずれも大きな指数を持っていることがわかる。

半導体素子作製には物性値だけでなく、素子構造作製プ

ロセスからの要請も重要である。例えば、大型の良質な単結晶基板が得られるか、得られない場合にはそれに代わる他の基板上へのヘテロエピタキシャル成長が可能か、p,n両伝導型の制御が可能か、接触抵抗の小さいオーミック電極や、耐圧の高いショットキー電極が形成できるか、ゲート形成や素子分離のための絶縁層形成ができるかなども問われる。ワイドバンドギャップ半導体材料に関するプロセス技術の開発の現状と開発すべき課題については、「ワイドギャップ半導体デバイス化材料技術の現状と課題」<sup>13)</sup>を参照されたい。

### § 3 高温素子

半導体素子の温度を上昇させると、まず、pn接合のリーク電流が増加し、pn接合による素子分離が困難になる。素子分離をpn接合を用いず、絶縁物等を挟むことによって行ったとしても、さらに温度を上げると、いわゆる真性半導体領域となり、ドーピングによるキャリア濃度の制御が出来なくなり、半導体素子としての機能が失われる。Fig.2は種々の半導体のpn接合のリーク電流が $10^{-3} \text{A/cm}^2$ になる温度、及び、熱励起キャリア濃度が $10^{15} \text{cm}^{-3}$ になる温度をプロットしたものである。バンドギャップの大きい半導体ほど高温まで動作することがわかる。半導体素子の温度が上がる原因は素子使用環境、すなわち高温雰囲気での使用の場合だけではない。素子自身の電力損失による発熱も素子温度を上げる。この場合、半導体では温度が高いほど抵抗が下がるため、素子に流れる電流によるジュール熱で素子が加熱されると、抵抗が下がってさらに電流が流れ、その結果また温度が上昇して、ついには熱暴走を起こす可能性がある。素子の電力損失を小さくして発熱を抑える努力はもちろんであるが、素子内部で発生した熱を効率よく外に取り出すことが出来れば、熱暴走を防ぐことが出来る。すなわち、素子を構成する半導体の熱伝導度が大きいことも重要である。

Fig.3は高温動作を要求する分野をまとめたものである。自動車や航空機のエンジン近く、あるいは各種高温炉近く、石油探査、地熱探査などの探査井戸、さらには金星や太陽探査等の分野で半導体センサー、プロセッサ、通信機器の高温動作が要求されている<sup>14)</sup>。Si半導体素子ではその使用温度は通常125℃までとされている。素子の信頼性を考えて、マージンがとってあるが、基本的に、この温度を決めているのはpn接合の逆電圧リーク電流である<sup>10)</sup>。pn接合を用いないユニポーラ素子では200℃程度までは可能であろう。また、SOI構造ではもう少し高い300℃程度まで使用可能であると言われている。特殊な例として、400℃まで動作するSi IIL素子が報告されている<sup>15)</sup>。

しかし、300 以上で安定に動作するには、接合温度の上昇を考えたとき、500 程度の温度に耐える必要がある。そのような領域ではやはりワイドギャップ半導体が必要である<sup>16)</sup>。以下に材料別の高温素子の現状を概観する。また、Table 2 に素子特性をまとめて示した<sup>17)</sup>。

3.1 GaAs素子

GaAsはSiに比べればバンドギャップが大きく、Siに比べて真性半導体温度が高いため、高温動作が可能であり、原理的には400 動作が可能である。後述の高周波パワー素子も高い電流密度が要求されるため、素子の発熱が問題となり、高温動作が可能であることは素子応用上有利である。ただし、高温動作には、電極などの耐熱性も重要である。耐高温ショットキー電極としてW-Si、Ti-W、LaB<sub>6</sub>-WSi<sub>n</sub>等が提案されており、それぞれ400 , 750 , 400 の耐熱性が示されている。また、耐高温オーミック電極ではPd-In、Pd-In-Ge、Mo-Ge-W、Ni-Ge(Au)-W等が提案されており、いずれも400 までの耐熱性が示されている<sup>16)</sup>。素子では、GaAs MESFETオペアンプやJFETで350 動作が報告されている。JFETの方がMESFETに比べて高温で漏れ電流が小さいという結果も報告されている。バンドギャップの点ではGaP (E<sub>g</sub> ~ 2.0eV)の方がGaAs より高温動作に有利である<sup>18)</sup>。また、ヘテロバイポーラトランジスタHBT (GaP/AlGaAsなど)も高温動作素子として有望視されている<sup>18)</sup>。

3.2 窒化物半導体素子

GaN等の窒化物はバンドギャップが大きく、また高温で安定なため、高温素子材料として適している。また、他のIII-V族化合物半導体と同様、AlGaN、InGaN等の混晶との

ヘテロ構造が作製可能で<sup>19)</sup>、GaN-JFETやMESFETとともに、AlGaN/GaN-HFET、MODFET(HEMT)<sup>20)</sup>、HBT等が試作されている。高温動作では、GaN JFETで350 動作、AlGaN/GaN MODFETで400 で800時間動作<sup>21)</sup>、500 動作<sup>22)</sup>、GaN/SiC HBTで500 動作<sup>23)</sup>などが報告されている。HFETでは25 でf<sub>T</sub>=22GHz、f<sub>max</sub>=70GHzであったが、300 でf<sub>T</sub>=5GHz、f<sub>max</sub>=4GHzになったことが報告されている<sup>24)</sup>。

3.3 SiC素子

SiCはSiに比べてバンドギャップが2~3倍(ポリタイプによる)、熱伝導度が3.5倍大きいことや、熱的・化学的に極めて安定な半導体であるため、高温、高放射線あるいは化学的に活性な場所(例えば高温で大気中)でも安定に動作する「耐環境性」素子材料として注目されてきた。そして、多くの素子形態でその耐高温性が示されている。例えば、6H-SiC JFETで600 , 6H-SiC MOSFETで400 , 耐圧1130Vの4H-SiC pn接合ダイオードで400 , 900V耐圧の4H-SiCサイリスタで350 , 6H-SiC MOSFETを用いたモノリシックオペアンプで350 などの高温動作が報告されている<sup>17)</sup>。耐熱性を決めているのは、現状ではSiC自身ではなく、電極などの高温安定性である。また、高温でSiO<sub>2</sub>の耐圧の予想外の低下も報告されている。一方、6H-SiC MOSFETが中性子線5 x 10<sup>15</sup>cm<sup>-2</sup>照射下で300 でも安定であったという耐熱・耐放射線性も報告されている<sup>25)</sup>。耐放射線性を決めているのも現状ではSiCパルク物性ではなく、SiC/SiO<sub>2</sub>界面あるいはSiO<sub>2</sub>層の特性である。

3.4 ダイヤモンド素子

ダイヤモンドは最もバンドギャップ、熱伝導度が大き

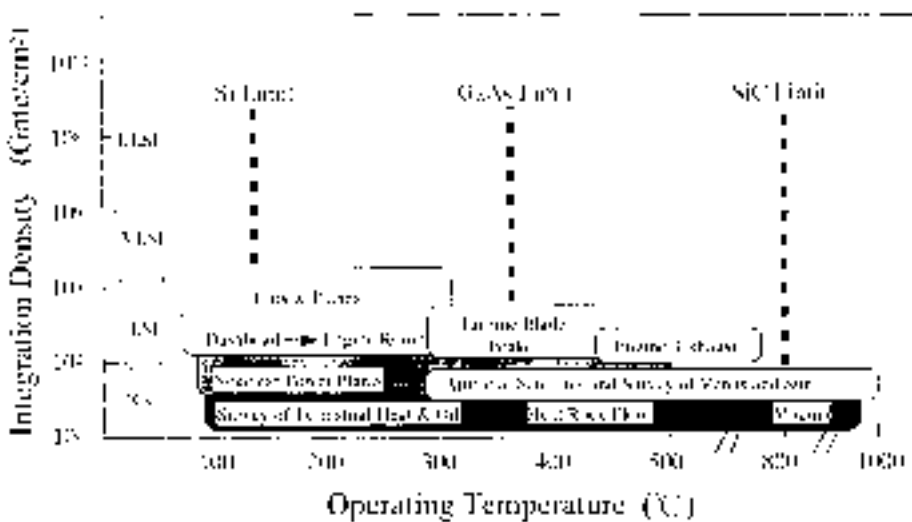


Fig.3 Applications of high temperature devices with theoretical temperature limits for Si, GaAs, and SiC devices.

Table 2 Specification and structures of high temperature devices.

Semiconductor	Device Structure	Max.Operation Temp.( )	Characteristics	Ref.(year)	
GaAs	MESFET	500	$\ell_g=0.5\mu\text{m}, \ell_w=10\mu\text{m}$	Wurfl (1995)	
	GaAs/AlGaAs HBT	250		Wurfl (1996)	
	JFET	350		Zolper (1996)	
	HFET	400	Ring Osc.	Baier (1994)	
	MESFET Op Amp	350	$\ell_g=2\mu\text{m}, f_T=7\text{GHz}$	Baureis(1996)	
	MMIC	300	AlAs/GaAs SL	Wurfl (1996)	
GaP	BJT	450		Zipperian (1981)	
	Thyristor	500	$V_B=280\text{V}$	Keune (1972)	
GaP/AlGaAs	HBT	550		Zipperian (1983)	
Nitrides	MODFET	300	$g_m=120, f_T=36.1\text{GHz}$	Khan (1996)	
		400	800hr.	Yoshida (1997)	
		500		Aktas (1996)	
	MESFET	500	$g_m=10\text{mS/mm}(400 )$	Binari (1997)	
	GaN/SiC HBT	500		Pankove (1996)	
SiC	4H-pn JD	400	$V_B=1130\text{V}$	Palmour (1994)	
	4H-pnJD	600		Neudeck (1996)	
	6H-JFET	600	30hr Buried-gate	Neudeck (1994)	
	6H-JFET	400	Implanted-gate n-chan.	Sheppard (1997)	
	6H-MOSFET	400	$\mu_{\text{chan}}=60\text{cm}^2/\text{Vs} (400 )$	Billon (1994)	
	4H-UMOSFET	300	150V,3.3V(100A/cm <sup>2</sup> )	Palmour (1994)	
	4H-UMOSFET	350	260V,18mW/mm	Palmour (1996)	
	6H-Thyristor	500	160V,3V(100A/cm <sup>2</sup> )	Palmour (1994)	
	4H-Thyristor	350	900(700)V,2(6)A	Palmour (1996)	
	6H-MOSFET Op Amp	350	monolithic Op Amp	Brown (1994)	
	6H-MOSFET ICs	300	monolithic IC $V_B=80\text{V}$	Siergiej (1994)	
SiC	4H-JFET Op Amp	350		Dillard (1996)	
	6H-MOSFET	300	neutron $5 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$	McGarrity (1996)	
	Diamond	MESFET	400	$g_m=1\text{mS/mm}$	
		MISFET	550	$g_m=174\text{mS/mm}$	Dreifus (1994)
		Digital Logic	400		Holms (1994)
	Si	SOI CMOSFET	300		Gingerich (1994)
		SOI CMOS Op Amp	250	>2000hr.	Gingerich (1994)
		SOI CMOS SRAM	250	>500hr, 64k	Brusius (1994)
		IIL	462	250 >4000hr	Migitaka (1996)

く、高い動作温度が期待される。しかし、p型層しか得られていないため、作製された素子は全てユニポーラ型のFETである<sup>26)</sup>。ホモエピ膜を用いたMESFETで400 で  $g_m=1\text{mS/mm}$ の値が得られている。蒸着SiO<sub>2</sub>層をゲート絶縁層に用いたMISFETでは550 動作、 $g_m=1.7\text{mS/mm}$ が得られている<sup>27)</sup>。また、簡単なロジック回路の高温動作も報告されている。ダイヤモンドは700 以上の高温では大気中で燃えてしまうので、パッシベーションが必要である。最近、表面p型層を用いた素子が試作されているが、その高温動作も議論されている。

#### § 4 高パワー素子

Fig.4は高パワーを必要とする分野を電力と周波数とを縦横軸にして示したものである。大電力・低周波数領域では電力系統や電車など、中電力域では電気自動車や産業用各種モータ制御のインバーターが、そして小電力・高周波領域ではエアコン等の家電製品の電源系統が考えられる。Fig.5にはそれぞれの分野をカバーするSiデバイスを示した。Siデバイスでは現在Siリミットへの領域拡大をねらった研究がなされているが、図に見るように、現状でかなりSiリミットに近づいているので、大幅な改善は困難である

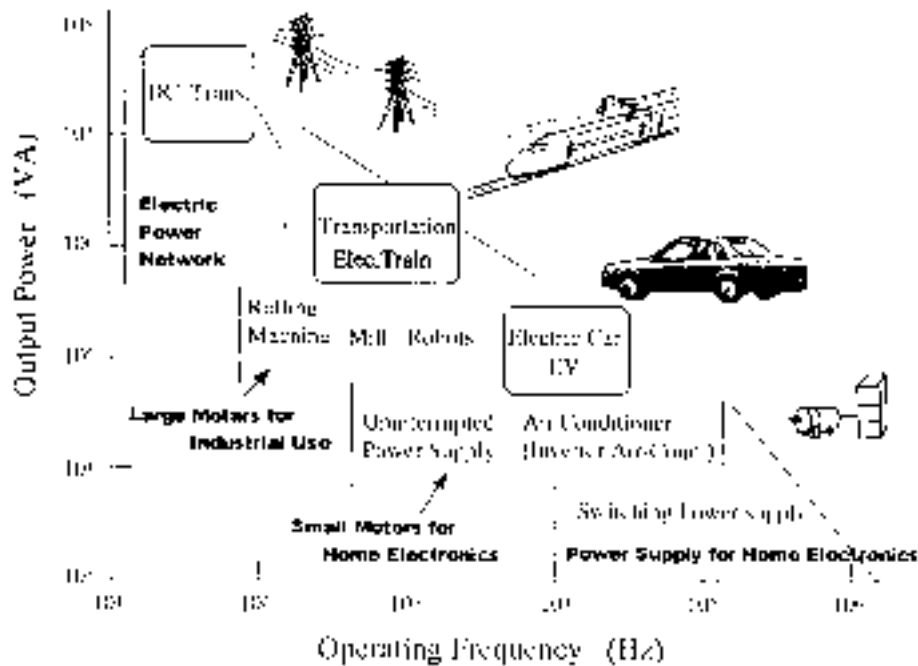


Fig.4 Applications of high power devices.

と思われる。一方、SiC等のワイドギャップ半導体を用いた素子ではSi素子で不可能なIの領域の開拓が可能となる。また、SiC素子の低損失という特質を生かすことが出来れば、Siデバイスの領域IIでも、Si素子の置き換えも考えられる。

パワーデバイスの耐圧を上げるには、ドリフト領域の厚さを大きくすることと、キャリア濃度を下げることが有効である。しかし、この結果、素子のオン抵抗が大きくなり、損失が大きくなる。5kV耐圧のSi-MOSFETを作るとすれば、ドリフト層厚 $550\mu\text{m}$ 、キャリア濃度 $10^{13}\text{cm}^{-3}$ が必要で、そのオン電圧(50A/cm<sup>2</sup>での電圧ドロップ)は250Vにも達し、実用は困難である。Fig.1にはSi-MOSFETのオン抵抗の耐圧依存性の理論値が示されている。現在開発されているSi素子ではSiリミットに極めて近い値まで来ていることがわかる。そこで、少数キャリアの注入によってオン抵抗を下げようと言うGTOサイリスタやIGBT等が開発され、Si MOSFETのリミットを越える低オン抵抗素子を実現されている。しかし、このような構造の素子ではMOSFETに比べて動作速度が遅くなり、高周波使用が困難である<sup>28)</sup>。例えば、現在のSi IGBTの動作周波数は10kHz程度である。MOSFETをバンドギャップと絶縁破壊電界の大きいSiCで作製すればSiに比べて2~3桁オン抵抗が下がることが予想される。例えば、5kV耐圧のSiC MOSFETに必要なドリフト層厚は $50\mu\text{m}$ 、キャリア濃度は $10^{15}\text{cm}^{-3}$ となり、そのオン電圧は2.6V(50A/cm<sup>2</sup>)と見積もられる。この値は同耐圧のSi MOSFETの1/100以下で、Si GTOやSi IGBTの値よりもさらに小さい<sup>29)</sup>。すなわち、

SiCを用いれば、低損失かつ高速動作の高耐圧パワー素子を作ることが出来る。もちろん、SiCでバイポーラ系のIGBTを作製すれば、さらに低損失になることが予測されている<sup>30)</sup>。

#### 4.1 SiC素子

近年、6H-, 4H-SiCウエハが市販されるようになってから、多くのSiCパワー素子が試作報告されている<sup>31)</sup>。主な素子特性をTable 3に示す。耐圧は年々向上しているが、その扱う電流値はまだ小さい。電流密度の値はほぼ理論値に達しているため、全電流値が小さい主な原因は、素子面積がとれないことである。すなわち、素子面積をある程度小さくしなければ高耐圧が得られていないのが現状である。基板結晶、エピ層の高品質を行い結晶欠陥密度を下げることが、素子実用化への大きなキーファクターであると思われる。

##### (1) ダイオード

pn接合ダイオードでは、n<sup>+</sup>の基板に $45\mu\text{m}$ 厚のn-ベース層ならびに $2\mu\text{m}$ 厚のp<sup>+</sup>層をエピタキシャル成長させ、耐電圧4.5kVの6H-SiC pn接合ダイオードが実現されている<sup>32)</sup>。ベース層を $85\mu\text{m}$ 、メサ構造で、イオン注入で作製したp<sup>+</sup>層を用いたJTEターミネーションで耐圧、5.5kV、オン電圧5.4V(100A/cm<sup>2</sup>)<sup>33)</sup>、プレーナ構造で耐圧3kV、オン電圧3.6Vの値が報告されている<sup>34)</sup>。また、ショットキーダイオード(SBD)では耐電圧3kVでオン抵抗 $34\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ の素子<sup>35)</sup>をはじめ数多くの試作例が報告さ

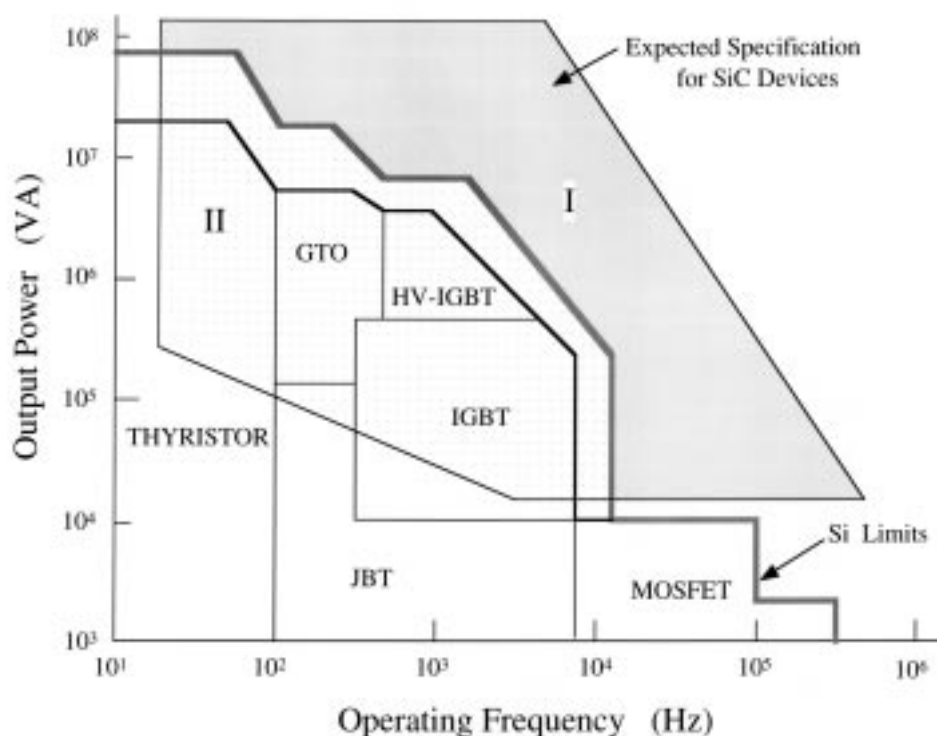


Fig.5 Out-put power versus switching frequency of Si power devices with the expected specifications of SiC devices.

れている。報告されている値はオン抵抗あるいはオン電圧で理論値の2~3倍、耐圧で90%程度に達しており、SiCリミットにかなり近づいている。このため、例えば、Si IGBTのフライホイールダイオードとして近々実用化されるのではないかとされている。しかし現状では素子面積が小さく、せいぜい数mm<sup>2</sup>で、オン電流は1~6A程度である。結晶品質の向上が待たれている。また、耐圧の向上には素子終端処理技術の開発が不可欠である。最近、低リーク電流、高速・高温動作を目指してpn接合ダイオードとSBDを重ね合わせたようなJBSD(Junction Barrier Schottoky Diode)のアイデアも出されている<sup>36)</sup>。

(2) MOSFET

SiCの大きな特徴は熱酸化すればSiO<sub>2</sub>層が形成され、Si同様MOS構造が出来ることであり、このことを用いたMOSFETの研究が数多くなされてきた。MOSFET構造には縦型でトレンチを持つU-MOSFETとプレーナ形のD(double-implanted)-MOSFETがある。まず前者の構造で高耐圧、低オン抵抗素子作製の試みがなされた。1993年耐圧50Vの6H-SiC UMOSが作られたが、オン抵抗は38mΩcm<sup>2</sup>と大きく、Siリミットをも越えていない。1995年には4H-SiCで260V, 18 mΩcm<sup>2</sup>, 1997年にはドリフト層厚12μm, チャンネル長4μmのU-MOSで室温耐圧1400V, 100 でのオン抵抗75 mΩcm<sup>2</sup>の値が報告されている<sup>37)</sup>。一方、DMOSでは1996年耐圧 750V, オン抵抗 125

mΩcm<sup>2</sup>, 1997年ドリフト層厚10μm, チャンネル長5μmで耐圧900Vが報告されている<sup>37)</sup>。このように、耐圧は年々着実に向上してきている。縦型素子の場合、耐圧はエピ層厚で決まる。市販のエピ層厚15μmでは2kV程度が限界であり<sup>29)</sup>, より厚いエピ層成長が待たれている。これに対し、横型素子のLDMOS構造では耐圧が向上が期待できる。最近耐圧2.6kVのLDMOSFETが報告されている<sup>38)</sup>。

一方、オン抵抗の方はまだ理論値よりかなり高い。その最大の原因はチャンネル移動度が数~10cm<sup>2</sup>/Vsとバルクの移動度に比べて非常に小さいことである。しかし、最近いくつかSiリミットを越えるような低オン抵抗素子が相次いで報告された。反転型チャンネルに代わって蓄積型チャンネルを用いることによってチャンネル移動度の向上が図られている。そのひとつの試みは、UMOS構造においてトレンチの側壁にエピタキシャル層を成長させ、それをチャンネルに用いるEC(Epi-channel)-FETで、チャンネル移動度108cm<sup>2</sup>/Vsが得られ、耐圧450Vでオン抵抗10.4 mΩcm<sup>2</sup>の値が報告されている<sup>39)</sup>。また、UMOS-ACCUFET(Accumulation Field Effect Transistor)<sup>40)</sup>や、埋め込みp層を用いるplanar-ACCUFETが試作されており、後者ではチャンネル移動120cm<sup>2</sup>/Vs, 耐圧350Vでオン抵抗25mΩcm<sup>2</sup>の値が報告されている<sup>41)</sup>。

(3) SIT

MOSゲートではなく、pn接合をゲートとするSITは高周

Table 3 Specification and structures of high power SiC devices.

Device	Structure	polytype	Blocking Voltage	Max. current	$R_{on}$ ( $m\Omega\text{-cm}^2$ )	$V_{drop}$ ( $100A/cm^2$ )	Temp.	Ref.(year)
pn Junction Diode	mesa	6H-	4.5kV	80mA		6V		Kordina (1995)
		4H-	3.4kV			6V		K.Rottner (1997)
	mesa 100 $\mu\text{m}\phi$ planer 1mm <sup>2</sup>	4H-	5.5kV	10mA		5.4V		Singh (1998)
			3.0kV	2A		3.6V		
SBD	1.0mm $\phi$ 1.2mm <sup>2</sup> 7mm <sup>2</sup>	6H-	2.0kV					Neudeck (1994)
			3.0kV	1A	30	7.1V		
		4H-	1.2kV	2.5A		1.05V		Milehner (1997)
	300 $\mu\text{m}\phi$ 1mm $\phi$	4H-	1.0kV	6.0A		1.4V		
		4H-	3.0kV	70mA	34			Kimoto (1997)
		4H-	2.1kV	1A				Kimoto (1997)
		4H-	1.4kV		15			Alok (1994)
	230 $\mu\text{m}\phi$ 230 $\mu\text{m}\phi$	4H-	1.0kV		2			Raghunathan (1995)
		4H-	800V		1.4			Itoh (1995)
		6H-p	540V		70		250	Raghunathan (1997)
		4H-p	600V		25		250	Raghunathan (1997)
JBSD	4H- 6H-		>1.0kV	8		1.76V	300	Saxena (1997)
			1.4kV	19		3.1V		Dahlquist (1997)
MOSFET	UMOS	4H-	1.1kV	43		5V		-do-
		6H-	50V		38			Palmour (1993)
		4H-	170V	2	13.2			Palmour (1995)
		4H-	260V	0.1	18			Palmour (1995)
		4H-	1.4kV		74(100 )		100	Agarwal (1997)
		4H-	450V		10.4			Hara (1997)
	(EC-FET) (ACCUFET)	4H-	350V		25			Melloch (1998)
		DMOS	750V		125			Shenoy (1996)
	planerACCUFET6H LDMOS		900V					Agarwal (1997)
			1.1kV					Casady (1997)
JFET	Implanted-gate-n6H Buried-gate	6H	350V					Shenoy (1997)
			350V	18	4V(2800A/cm <sup>2</sup> )		155	Spitz (1997)
SIT	buried p-SIT	4H-	700V	60mA			400	Sheppard (1997)
		4H-	1.0kV		10			Ivanov (1997)
Thyristor	buried p-SIT	4H-	350V					Siergie (1995)
		4H-	900V	2A				Palmour (1996)
		4H-	700V	6A	0.8	3.7 V(1000A/cm <sup>2</sup> )		Palmour (1996)
	GTO	4H-	400V			4V(2800A/cm <sup>2</sup> )		Levinshtein (1997)
			500V	1.5A		8V(500A/cm <sup>2</sup> )		Agarwal (1996)
			600V	4A		11.5V(1600A/cm <sup>2</sup> )		Casady (1997)
		4H-	700V					Seshadri (1997)
	4H- 4H- 4H- 4H-		1.0kV	1A(260 × 260mm <sup>2</sup> )		3.5V(1000A/cm <sup>2</sup> )		Casady (1997)
			700V	(680 mm $\phi$ )				Casady (1997)
			600V	4A				Agarwal (1997)
IGBT				(simulation)			Rammugul (1996)	

波かつ高パワー素子として研究がなされている。シミュレーションによればSiC-SITで耐圧700V, 200A/cm<sup>2</sup>でのオン電圧0.25Vと小さいオン抵抗が予測されている(プレーナー形)<sup>42)</sup>。また、埋め込みp層のSITで耐圧1000V, オン抵抗10 mΩcm<sup>2</sup>の値が報告されている。一方、350V耐圧で38Wの素子を集積して、600MHz, 出力1kW, 1.3GHz, 400Wの大出力素子が作られている<sup>43)</sup>。これは放送用を目指したもので、一部では実際に放送局に供せられているとの報告もある。SITは縦型であるため電力がとれるが、高周波化が難しいと言われている。

#### (4) サイリスタ

SiCはSiやGaAsに比べて絶縁破壊電界が1桁大きいいため、ベース層を薄く、かつ高濃度に設計できるため、サイリスタの高速スイッチおよび、大電流密度時も低い残留電圧ドロップが期待される。また、熱伝導度が大きいことも高電流密度の動作を可能にする。最初のpnnp SiC サイリスタが1987年に試作された<sup>44)</sup>。npnpサイリスタは1991年に試作された<sup>45)</sup>。SiCは大きいバンドギャップを持つので、SiやGaAsサイリスタより高温で動作し、また耐放射線性もより大きいと期待される。SiCサイリスタで800K動作が報告されている<sup>46)</sup>。Levinshteinら<sup>447)</sup>はnpnp 4H-SiCサイリスタを作製し、そのターンオン特性を評価している。素子は、耐圧400V, 電流密度 $2.8 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>で順方向電圧降下4Vであった。ターンオンの立ち上がり時間 $\tau_r$ は15~20nsで、Siサイリスタより2桁小さい。これは、Siで同耐圧にするためには電圧ブロックnベース層厚が50~60μm, pベース層厚が8~10μm必要であるのに対し、SiCではそれぞれ4.5, 0.55μmと薄いからである。低ドープpベース層中の電子、および高ドープnベース層中の正孔の拡散係数をそれぞれ10cm<sup>2</sup>/s, 1.5cm<sup>2</sup>/sとすれば、 $\tau_r$ の計算値は3nsとなり、ほぼ実測値と一致する。Si, GaAsでは電圧が高くなると、電界の効果により $\tau_r$ が小さくなる。しかし、SiCサイリスタではほとんど変化がないことは説明できていない。パルス動作特性では、100nsパルスで電流密度 $1 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>が得られ、 $5 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>の高い電流密度の短パルスでも50~100nsで定常値に達したと報告されている。最近、耐圧900Vで2A級, 700Vで6A級の4H-SiCサイリスタが作られている。1000A/cm<sup>2</sup>でオン電圧は3.67V, オン抵抗は0.8 mΩcm<sup>2</sup>である。また、680μm径で耐圧600V, 4A級のGTO, 500V, 1.5A級GTOで500A/cm<sup>2</sup>, オン電圧8Vの値が報告されている<sup>48, 49)</sup>。GTOサイリスタは特に高温・大電流用に優れていると言われており、400Vでオン電圧は5Vに低下している<sup>50)</sup>。さらに、200V級の6H-SiC UMOS形のIGBTの報告もある<sup>30)</sup>。

## 4.2 GaAs素子

### (1) ショットキーダイオードSBD

GaAsはSiに比べてバンドギャップやキャリアの移動度が大きいため、Si-SBDより高耐圧、高速性のSBDが得られている。しかし、逆方向漏れ電流が大きいと言う問題があった。これは、Siに比べてGaAsの結晶欠陥密度や表面準位密度が大きいことによる<sup>51)</sup>。この問題は、Alショットキー電極周辺に酸化チタンの抵抗性ショットキー薄膜を配するREPS(resistive Schottky barrier field plate)構造の採用によって解決された。REPS構造により、耐圧180V, 順電圧0.90V, 順電流14A, 逆回復時間10ns以下という高速高耐圧SBDが作られている。Si上にヘテロエピタキシャル成長させたGaAsを用いたSBDでは、高価なGaAs基板を用いないことによる低コスト化とGaAsの熱伝導度が小さいという欠点をカバーするというメリットがある。

### (2) サイリスタ

Siサイリスタに対し、より高温動作、耐放射線性を求めてGaAsサイリスタが作られている<sup>52)</sup>。絶縁破壊電界、高電界でのキャリアのドリフト速度、キャリアの拡散定数がSiと同程度であるため、動作特性としては余り差がない<sup>53)</sup>。ただし、GaAsサイリスタのスイッチング速度は $10^{-10}$ 秒(subnanosecond)オーダーで、Siサイリスタのスイッチング時間の約1/50である。この値は、キャリアのベース走行時間 $\tau_{re} = W/V_s$  ( $W$ : ベース厚さ,  $V_s$ : 飽和ドリフト速度)より小さい。これはSiサイリスタのターンオン状態の伝搬の説明で提案されているfield model, diffusion model<sup>54)</sup>のいずれでも説明できない<sup>55)</sup>。この説明として、再結合放射の吸収と再放射が関係していると言うphoton mechanismが提案されている。なぜなら、GaAsは直接遷移型半導体で、放射再結合の内部量子効率が高いからである<sup>56)</sup>。

## 5 高周波パワー素子

Fig.6は高周波素子の応用分野を出力電力を縦軸に周波数を横軸にとって表したものである。高周波素子は主に通信分野で使用されており、低出力ではコードレス電話、PHSや携帯電話、携帯パソコンなどのいわゆる移動体通信の端末に用いられている。周波数は数100MHzから数GHzのマイクロ波領域である。数Wから数10Wの中間出力は移動体通信の基地局に、そしてそれ以上の高出力領域では通信衛星(衛星間や衛星-地上基地間)や放送局の分野となる。高出力としてはレーダへの応用もある。数10GHz領域のミリ波領域では衝突防止のための車々間通信や車庫入れのための短距離レーダ用などの応用が考えられている。さらに数100GHz領域では光通信などの超高速通信の応用が

期待されている。

一方、この分野の素子は、低出力領域では半導体素子を用いた固体増幅器(solid state power amplifier: SSPA)が、大出力領域では進行波管(TWTA)、マグネトロン、クライストロンなどの真空管が用いられている。機器の小型化、軽量化を目指してSSPA化が図られているが、そのためにはSSPAの大出力化が必要である<sup>57)</sup>。Fig.7に現在Si-SSPAおよびGaAs-SSPAがカバーしている領域を示した。GaAsは移動度が極めて大きく、GaAs MESFETは高周波域、特に数GHz以上の移動体通信の送受信用デバイスとして開発されている。一方、その低歪効果、低雑音特性から受信用フロントエンドトランジスタとして用いられている。通信用素子では更なる低損失化(バッテリーの寿命を延ばす)と、光通信や準ミリ波、ミリ波通信用に更に高周波での動作が要求されている。一方、TWTAの置き換えを狙う領域では高出力化が要求されている。

Fig.8はGaAsデバイスの出力・周波数限界を示したものである。1の領域では発熱が出力電力を制限し、3の領域では電流増幅率が性能の限界を与えている。そして、2の領域では出力パワーと周波数の積がキャリアの飽和ドリフト速度と絶縁破壊電界の積で制限されている(物性限界)。SiはGaAsに比べて熱伝導度が大きいので、高パワー化が可能であるが、移動度が小さく1GHz以上で急激に電流増幅率が低下する<sup>58)</sup>(これを素子の微細化で補ってSi素子を高周波化する試みが行われている)。3の領域では素子の微細化と移動度の向上が必要で、GaAsの

HFET, MODFET(HEMT), HBT, さらには移動度の大きいInGaAs, InPなどを用いた素子が開発されている。また、Si領域の高周波側への拡大でSiGe/Si系歪超格子を用いたHFETも作製されている。2の領域での限界を突破するにはキャリアの飽和ドリフト速度と絶縁破壊電界の値の大きい半導体材料、すなわちSiC、窒化物半導体、ダイヤモンドを用いることが考えられる<sup>59)</sup>。ただ、熱問題の解決には、基板を薄くして熱抵抗を下げるバイア・ホール技術PHS(plated heat sink)も有効である。また、高速化、微細化にはMMIC(monolithic microwave IC)が用いられている。GaAs MESFETの耐圧制限は上限が10V程度で、単体デバイスの出力上限は10~20W、電力密度上限は~1W/mm程度と見積もられている<sup>60)</sup>。Fig.9は高周波素子の電力密度をドレイン電圧の関数として示したものである。Si, GaAs, GaN, SiC素子の理論予測値と実際に試作されている素子の値を示した。また、Table 4に素子特性をまとめて示した。

5.1 SiC素子

SiCはGaAsやSiに比べて絶縁破壊電界、飽和ドリフト速度、熱伝導度が大きいので、高出力の高周波素子に適しており、動作平均電力を1桁以上向上できる可能性がある<sup>61), 62)</sup>。すなわち、周波数数10MHz~数GHz帯で出力数100W~数kW(出力電力密度数W/mm)の領域の素子実現が期待されている。SiC高周波素子としては、MESFET, SIT, JFETなどが報告されている。MESFETは微細加工が

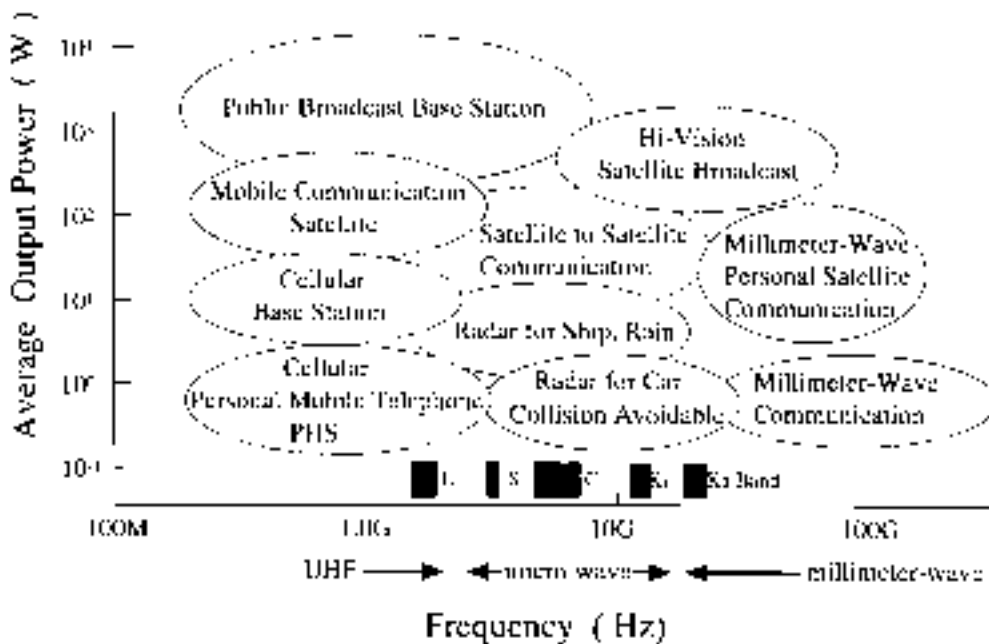


Fig.6 Applications of high frequency power devices.

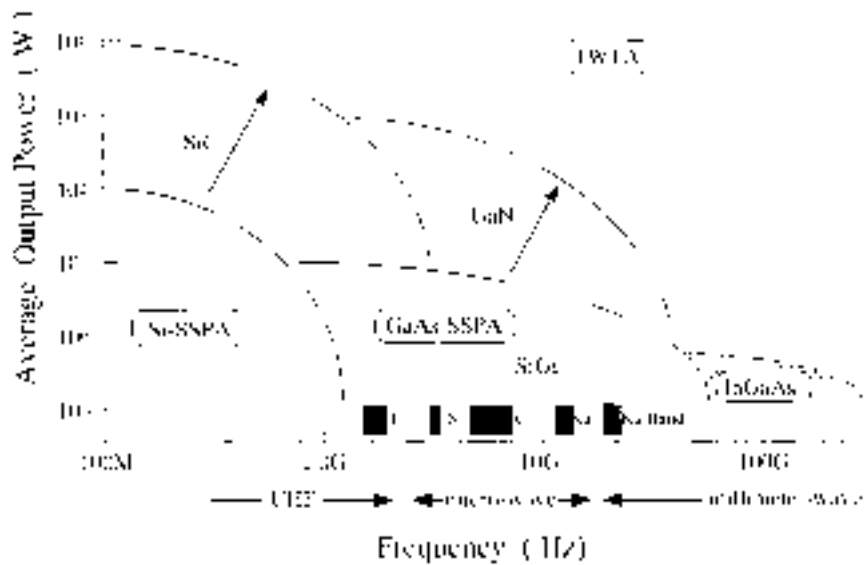


Fig.7 Average out-put power versus switching frequency of Si, GaAs and InGaAs devices with the expected specification of SiC and GaN high-frequency power devices.

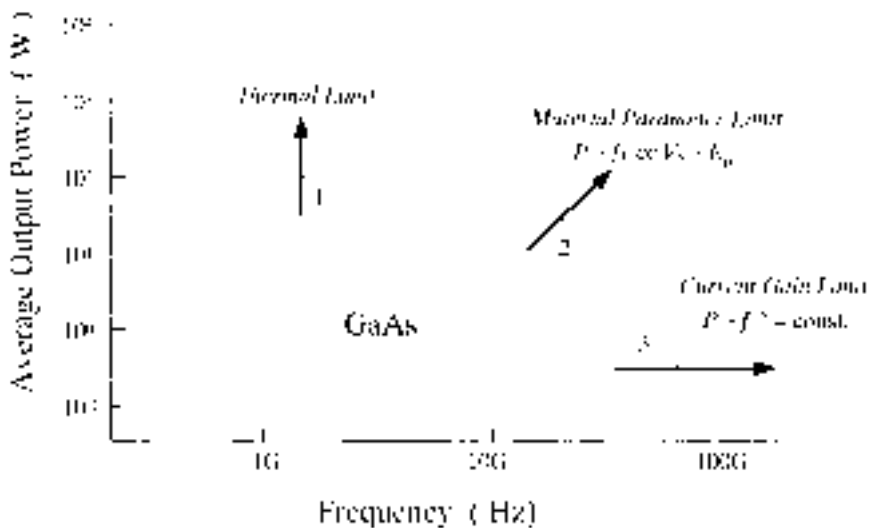


Fig.8 Specification limit of GaAs high frequency power devices.

容易で高周波用に、SITは縦型素子であるので大電流用に、JFETはpn接合を用いているので高温用に向いていると言われている。MESFETでは6H-SiCから最近では4H-SiCを用いる場合が多く、サブミクロンゲートで10GHz以上の $f_T$ 、3W/mmを越える電力密度が達成されている。具体的には、ゲート長 $g_g=0.45\mu\text{m}$ 、ゲート幅 $w_g=250\mu\text{m}$ で $f_T=22\text{GHz}$ 、 $f_{\text{max}}=50\text{GHz}$ 、2.1GHzで出力15W<sup>63)</sup>、 $g_g=0.7\mu\text{m}$ 、 $w_g=322\mu\text{m}$ で $f_{\text{max}}=42\text{GHz}$ 、CW 850MHzで出力電力密度3.3W/mm、付加電力効率66.7%の高効率動作が報告されている<sup>64)</sup>。SITは縦型素子であるため大電力用には適しており、600MHzで225W(1.5W/mm)の高出力 4H-SiC SITが実現され、実用に近いレベルに達している<sup>65)</sup>。また、

JFETは高温環境動作に適しており、6H-SiC JFETで $f_T=7.3\text{GHz}$ 、 $f_{\text{max}}=9.2\text{GHz}$ 、850MHzで1.3W/mm、873Kまでの動作が確認されている<sup>66)</sup>。

### 5.2 GaN素子

KhanらによってAlGaIn/GaNヘテロ構造での変調ドープで2次元電子ガスの存在が示され、移動度の増大が確認されて示されて以来<sup>67)</sup>、これを利用した高周波(マイクロ波)素子がAlGaIn/GaN MODFET(あるいはHFET)構造で作製されてきた。現在、サブミクロンゲートで $f_T \sim 50\text{GHz}$ 、 $f_{\text{max}} \sim 100\text{GHz}$ 、 $g_m \sim 210\text{mS/mm}$ の値が報告されている。出力密度では、 $g_g=0.2\mu\text{m}$ 、 $f_T=50\text{GHz}$ の素子で3W/mm

Table 4 Specification and structures of high-frequency power devices.

Semicond.	Device structure	$f_T$	$f_{max}$	Power density	Output power	Ref.(year)	
Si	MOSFET				CW100W(800MHz)		
	BJT				20W(2GHz)		
GaAs	MESFET				40W(3GHz)		
					20W(20GHz)		
					0.1W(90GHz)		
SiC	MESFET	( $\ell_g=0.7\mu\text{m}$ )		( $\eta=54\%$ )	15W(2.1GHz)	Allen (1997)	
		( $\ell_g=0.45\mu\text{m}$ )	2.1W/mm(7GHz)			- do -	
			22GHz	50GHz			- do -
				42GHz	3.1W/mm(850MHz)		Moore (1997)
			10GHz	25GHz	6H		Sriram (1994)
			13.2GHz	42GHz	2.8W/mm(2.8GHz)		Sriram (1996)
		6GHz	20GHz	0.5W/mm	300mA/mm		Noblanc (1997)
		SIT		4GHz	1.2W/mm(500MHz)	225W	Siergiej (1995)
		JFET	7.3GHz	9.2GHz	1.3W/mm(850MHz)		Weitzel (1996)
	Nitrides	MESFET		17GHz	$g_m=20\text{mS/mm}$		Binari (1994)
HFET			4GHz	$g_m=27\text{mS/mm}$		Khan (1995)	
MODFET			77.5GHz				Burm (1996)
			46.9GHz	103GHz	3W/mm(18GHz)		Brun (1997)
			28GHz	40GHz			Nguyen (1997)
	IG-HFET			$g_m=235\text{mS/mm}$		Kawai (1997)	
TWTA					90W(Ku band)	NEC (1996)	

(18GHz), 2.6W/mm (10GHz)の値が報告されており, GaAsの出力密度を上回っている<sup>68)</sup>。MBEで作製したMODFET ( $\ell_g=0.25\mu\text{m}$ )でチャンネル移動度 $1,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ , シートキャリア密度 $1 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ で,  $f_T=28\text{GHz}$ ,  $f_{max}=40\text{GHz}$ ,  $g_m=120\text{mS/mm}$ ,  $I_{DSS}=750\text{mA/mm}$ の値が報告されている<sup>69)</sup>。また, AlNを絶縁層とするIG-HFETで,  $g_m=235\text{mS/mm}$ が得られている<sup>70)</sup>。GaNはGaAsより熱伝導度が大きく, また高温安定であるため, GaAsより高パワー出力が期待される。すなわち, 動作電圧10V以上の高周波パワー素子でサファイヤ上のGaN-HFETで数W/mm, 熱伝導度の大きいSiCを基板に用いることによりHFETで $\sim 15\text{W/mm}$ 程度の出力密度が期待されている(Fig.9)<sup>71)</sup>。すなわち, SiCがSi素子(数GHz以下の領域)の高パワー化に期待されているように, GaNはGaAs素子(数~数10GHz領域)の高パワー化に期待されている(Fig.7)。ただし, SiCもGaNもバンドギャップが大きいので動作電圧の大きい(> 10V)領域で有利となると思われる。

## 、6 終わりに

高温, 高パワー, 高周波のハードな仕様を要求する応用分野とそれに答えるワイドギャップ半導体を用いた素子開発の現状を見てきた。ハードな仕様を持つ素子自身のマーケットはメモリやプロセッサのそれに比べれば, さほど大きくはない。しかし, 素子がシステムの要である場合には, その開発の重要性は決して小さくはない。また, その開発は低損失電力変換などの省エネルギー, さらにCO<sub>2</sub>削減などの環境保全につながり, また耐環境性は社会のセキュリティに関係しており, その重要性は今後益々大きくなると考えられる。

始めにも述べたように, この研究開発分野では近年ワイドギャップ半導体の結晶成長及びデバイスプロセスにいくつかのbreak throughがなされたため, 素子化の研究が急ピッチでなされるようになった。そして, SiやGaAs素子を凌駕するような特性を持った素子試作の報告が相次いでなされている。その意味で, ワイドギャップ半導体の優位さ

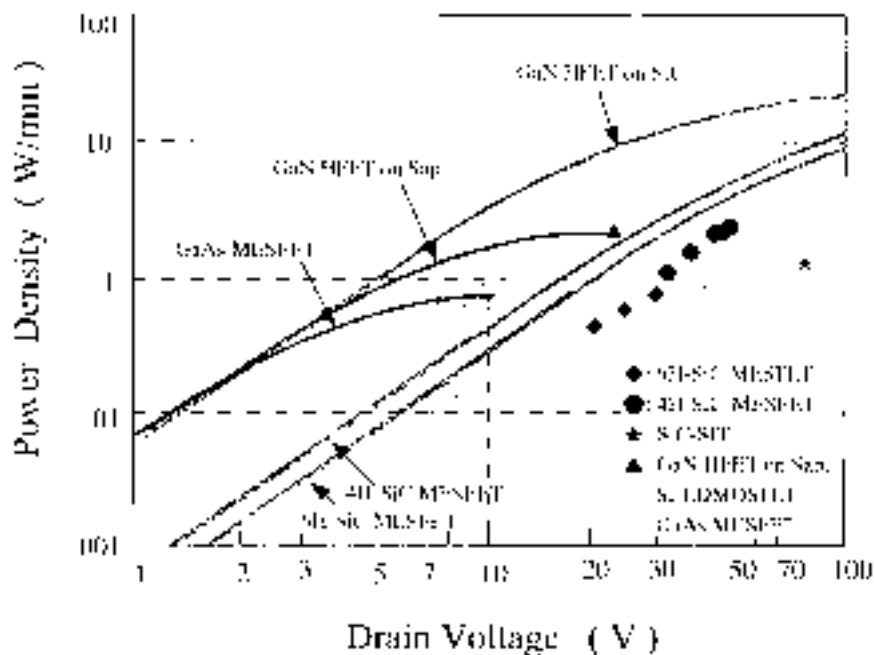


Fig.9 Output power density versus drain voltage for Si, SiC, GaN and GaAs high-frequency devices with the theoretical values (solid lines) and experimental data points.

が示されつつあるが、実用という点からはまだまだ開発すべき課題が多く残されており、一層の研究開発の進展が待たれる。

参 考 文 献

- 1) 吉田貞史：パリティー 11 (1995) 25.
- 2) 吉田貞史：電子情報通信学会誌 79 (1996) 1219.
- 3) 電気学会技術報告第710号(1999.1)「大電力パルス発生技術とそれをを用いたパワーデバイスの動向」.
- 4) B.J.Baliga: IEEE Trans.Electon Devices 43 (1996) 1717.
- 5) A.Zekry and W.Gerlach: IEEE Trans.Electon Devices ED-30 (1983) 104.
- 6) B.J.Baliga, M.S.Adler and D.W.Oliver: IEEE Elec.Device Lett. EDL-2 (1981) 162.
- 7) B.J.Baliga: J.Appl.Phys., 53 (1982) 1759.
- 8) E.O.Johnson: RCA Rev., 26 (1965) 163.
- 9) R.Keyes: Proc.IEEE 60 (1972) 225.
- 10) K.Shenai, R.S.Scott and B.J.Baliga: IEEE Trans.Electron Devices ED-36 (1989) 1811.
- 11) B.J.Baliga: IEEE Electron Device Letters, EDL-10 (1989) 455.
- 12) M.Bhatnagar and B.J.Baliga: IEEE Trans.Electron Devices ED-40 (1993) 645.
- 13) 吉田貞史：電子技術総合研究所彙報 to be published.
- 14) 高温素子の応用分野に関しては、例えば：S.Lande: 第7回高温エレクトロニクス研究会（宇宙科学研究所）(1997) p.29.
- 15) M.Migitaka: EFC on High Temperature Electronic Materials, Device and Sensors (San Diego, 1998).
- 16) J.Wurfl: 3rd HITEC (1996) Short Course.
- 17) 田島道夫: 高温エレクトロニクス研究会（宇宙科学研究所）報告書：第5回研究会：2nd High Temperature Electronics Conference (2nd HITEC, 1994), 第7回研究会：3rd HITEC(1996).
- 18) T.E.Zipperian, R.J.Ohaffin, and L.R.Dawson: IEEE Trans.Industrial Electronics IE-29 (1982) 129, T.E.Zipperian and L.R.Dawson: Appl.Phys.Lett., 39 (1981) 895, J.Appl.Phys., 54 (1983) 6019.
- 19) S.C.Binari, H.B.Dietrich, W.Kruppa, G.Kelner, N.S.Saks, A.Edwards, J.M.Redwing, A.E.Wickenden and D.D.Koleske: Proc. of 2nd Intern. Conf. on Nitride Semiconductors (Tokushima, 1997) 476.
- 20) M.A.Khan et al.: Inst.Phys.Conf.Ser.No.142 (1996) 985.
- 21) S.Yoshida: J.Appl.Phys. 81 (1997) 7966.
- 22) O.Aktas, Z.F.Fan, S.N.Mohammad, A.E.Botchkarev and H.Morkoc: Appl.Phys.Lett. 69 (1996) 3872.
- 23) S.C.Binari, K.Doverspike, G.Kelner, H.B.Dietrich, and A.E.Wickenden: Soid State Electronics 41 (1997) 177.
- 24) J.Pankove, S.S.Chang, H.C.Lee, R.J.MoInar, T.D.Moustakas, B.van Zehbroeck: Tech.Dig.IEDM (1994) 389, 3rd HITEC (1996).

- 25) McGarrity : 3<sup>rd</sup> HITEC (1996).  
 26) M.W.Geis: Proc.IEEE 79 (1991) 669.  
 27) D.L.Dreifus, A.J.Tessmer, J.S.Holms and L.S.Plano: 2nd HITEC (1994) VI29, VI35.  
 28) 上野勝典, 関康和: 応用物理 65 (1996) 143.  
 29) J.A.Cooper, Jr., M.R.Melloch, J.M.Woodal, J.Spitz, K.J.Schoen and J.P.Henning: Materials Science Forum 264-268 (1998) 895.  
 30) N.Rammungul, R.Tyagi, A.Bhalla, T.P.Chow, M.Ghezzi, J.Kretschmer and W.Hennessy: Inst.Phys.Conf.Ser.No142 (1996) 773.  
 31) C.E.Weitzel, J.W.Palmour, C.H.Carter, Jr., K.Moore, K.J.Nordquist, S.Allen, C.Thero and M.Bhatnagar: IEEE Trans.Electron Devices, ED-43 (1996) 1732.  
 32) E.Janzen et al. Inst.Phys.Conf.Ser.No.142 (1996) 653, O.Kordina, J.P.Bergman, A.Henry, E.Janzen, S.Savage et al.: Appl.Phys.Lett., 67 (1995) 1561.  
 33) R.Singh et al.: HITEC'98 (1998) p.86.  
 34) K.Rottner: Abs. ICSCIII-N'97 (Stockholm, 1997) p.136.  
 35) T.Kimoto, Q.Wahab, A.Ellison, U.Forsberg, M.Tuominen, R.Yakimova, A.Henry and E.Janzen: Materials Science Forum 264-268 (1998) 921.  
 36) F.Dahlquist, C.M.Zettering, M.Ostling and K.Rottner: Materials Science Forum 264-268 (1998) 1061.  
 37) A.K.Agarwal, J.B.Casady, L.B.Rowland, W.F.Valek and C.D.Brandt: Materials Science Forum 264-268 (1998) 989.  
 38) J.Spitz, M.R.Melloch, J.A.Cooper, Jr., and M.Capano: Materials Science Forum 264-268 (1998) 1005.  
 39) K.Hara: Materials Science Forum 264-268 (1998) 901.  
 40) M.R.Melloch, J.A.Cooper, Jr., and J.Spitz: HITEC'98 (1998) p.86.  
 41) J.N.Shenoy and B.J.Baliga: Materials Science Forum 264-268 (1998) 993.  
 42) T.Iwasaki, T.Oono, K.Asano, Y.Sugawara and T.Yatsuo: Materials Science Forum 264-268 (1998) 1085.  
 43) R.R.Siergiej, S.Sriram, R.C.Clarke, A.K.Agarwal, C.D.Brandt, A.A.Burk, Jr., T.J.Smith, A.Morse and P.A.Orphanos: Inst.Phys.Conf.Ser.No.142 (1996) 769.  
 44) V.A.Dmitriev et al.: Sov.Tech.Phys.Lett. 13 (1987) 6, Electron Lett., 24 (1988) 1032.  
 45) J.A.Edmond, J.W.Palmour, and C.H.Carter, Jr.: Inst.Semicond.Dev.Res.Symp. (1991) 487.  
 46) J.W.Palmour, J.A.Edmond, H.S.Kong and C.H.Carter, Jr.: Inst.Phys.Conf.Ser.No.137 (1994) 499, No.142 (1996) 813.  
 47) M.Levinshtein, J.W.Palmour, S.L.Rumyanetsev and R.Singh: IEEE Electron Devices, ED-44 (1997) 1177.  
 48) J.B.Casady et al.: IEEE Electron Device Lett. EDL-18 (1997).  
 49) J.B.Casady, A.K.Agarwal, L.B.Rowland, R.R.Siergiej, S.Seshadri, S.Mani, J.Barrws, D.Piccone, P.A.Sanger and C.D.Brandt: Materials Science Forum 264-268 (1998) 1069.  
 50) A.K.Agarwal et al.: Digest of IEDM (1996) 225.  
 51) 電気学会編: 「パワーデバイス・パワーICハンドブック」(1996) 99.  
 52) Z.I.Aiferov et al.: Sov.Phys.Semicond. 4 (1970) 479.  
 53) J.H.Hur et al.: IEEE Trans.Electron Device ED-37 (1990) 2520.  
 54) M.I.D'yakov and M.E.Levinshtein: Sov.Phys.Semicond. 12 (1978) 426.  
 55) S.N.Vainshtein, Yu V.Zhilyaev and M.E.Levinshtein: Sov.Phys.Semicond. 21 (1987) 77, *ibid* 22 (1988) 717.  
 56) A.G.Kechek and V.V.Rossin: Sov.Phys.Semicond. 18 (1984) 640.  
 57) 乙津祐一: 電子情報通信学会誌 77 (1994) 652.  
 58) 石井恭一 他: 電子情報通信学会論文誌B-I J75-B-I (1992) 763.  
 59) R.J.Trew, J.B.Yan, and P.M.Mock: Proc.IEEE 79 (1991) 598.  
 60) 太田順道: 電子情報通信学会論文誌 J81-C-II (1998) 17.  
 61) C.E.Weitzel: IEEE Electron device Lett. EDL-16 (1995) 51.  
 62) C.E.Weitzel: Materials Science Forum 264-268 (1998) 907.  
 63) S.T.Allen, R.A.Sadler, T.S.Aicorn, J.Sumakeris, R.C.Glass, C.H.Carter, Jr. and J.W.Palmour: Materials Science Forum 264-268 (1998) 953.  
 64) K.Moore: IEEE Electron Device Lett. EDL (1997).  
 65) R.R.Siergiej et al.: Tech.Digest of IEDM (1995) 353.  
 66) C.E.Weitzel: IEEE Trans.Electron Devices 43 (1990) 1732.  
 67) M.A.Khan et al.: Appl.Phys.Lett., 58 (1991) 2408.  
 68) Burn: Appl.Phys.Lett. (1996), IEEE Electron Device Lett. EDL (1997) .  
 69) N.X.Nguyen, C.Nuguyen and D.E.Grider: Proc. of ICNS'97 (1997, Tokushima) 488.  
 70) H. Kawai, M.Hara, F.Nakamura, T.Asatsuma,

T.Kobayashi, and S.Imanaga: J.Crys.Growth 189/190  
(1998) 738.

- 71) C.Weitzel, L.Pond, K.Moore and M.Bhatnagar: Mate-  
rials Science Forum 264-268 (1998) 969.  
(1999.2.12 受付)