

ワイドバンドギャップ半導体デバイスの基礎 Basics of Wide Bandgap Semiconductor Devices

上田 大助

Daisuke Ueda

京都工芸繊維大学

Kyoto Institute of Technology

概要

GaN 系半導体デバイスは青色 LED [1]が産業的な成長を遂げるに従って、結晶成長やプロセス技術が蓄積され、電子デバイスへの展開が期待されるようになった。電子が走行する電極間距離を短くしても高電圧を支えられるワイドバンドギャップ半導体の物性的な特徴は電力デバイスとして多くの可能性を与える。特に高周波パワーアンプ[2]や電力変換システム[3]に用いると、変換効率の高いシステムを実現できることが期待される。パワーデバイスの開発の歴史は、トランジスタが発明された直後まで遡ることができる。SiC 半導体は超高耐圧化の Breakthrough を成し遂げたが、GaN デバイスは Consumer 用途への期待が高い。本基礎講座では GaN を用いるパワーデバイスについて材料物性からデバイス応用までの概略を紹介する。

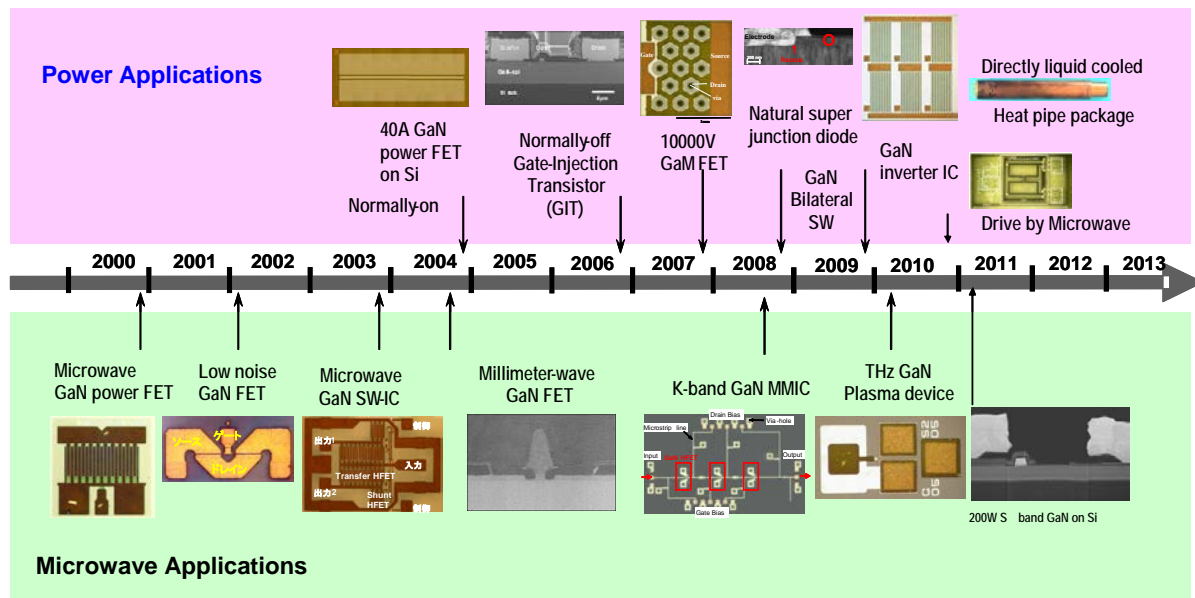


図1 Panasonic における GaN 半導体デバイスの開発経緯

Abstract

The history of the development of the power device, can be traced back to just after the transistor was invented. Silicon power devices, which have many different device structures, has been put to practical use for a variety of applications. In recent years, there arises a movement of wide bandgap semiconductor to renovate power electronics, which can realize high voltage blocking capability with relatively thin epitaxial layers that eventually reduce the conduction loss. Although the first implementation of those the trial is using SiC material, gallium nitride (GaN) one also become a candidate of those power switching device owing to the material maturity by the rapid progress of blue LEDs. In this seminar, general background of GaN device starting from the material properties to the device applications of GaN-based ones.

1. GaN 材料

一般的に半導体デバイスの動作周波数を高めるには、キャリアが飽和速度 v_{sat} で走行するとして、電極間隔 l を狭めることが必要になる。然しながら、電極間隔を狭めれば、絶縁破壊電圧は低下する。このため、耐圧 V_B と遮断周波数 f_T の間に Johnson's limit と呼ばれる trade-off の関係が生じる[4]。臨界電界強度を E_c とすれば、この関係は下記ようになる。

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{v_{sat}}{2\pi l} \quad (1)$$

$$V_B \cdot f_T = \frac{E_c \cdot v_{sat}}{2\pi} \quad (2)$$

Johnson's limit は耐圧と遮断周波数の trade-off となる指標で、Si 及び GaN 系材料では 300GHzV と 90,000GHzV となる。この差は特に PA への応用を考える場合に重要になる。即ち、GaN 材料は高周波デバイスへ適用した場合、これまでの化合物半導体デバイスをも凌ぐ特性を有する。これらの物性定数を末尾の表 1 にまとめる。

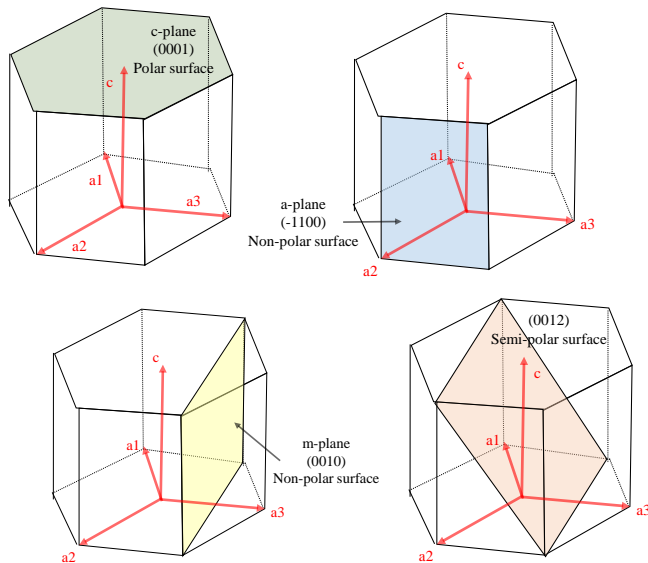


図2 GaN 系半導体の結晶面

GaN 系の結晶構造は一般的に六方晶系であり、デバイス作成には図2に示されるような面方位のものが使用される。また、GaN 系材料はNの電気陰性度が大きいため、その内部に自発分極が存在する。図3はc面 GaN 結晶の分極方向が異なる GaN 結晶を示したものである。

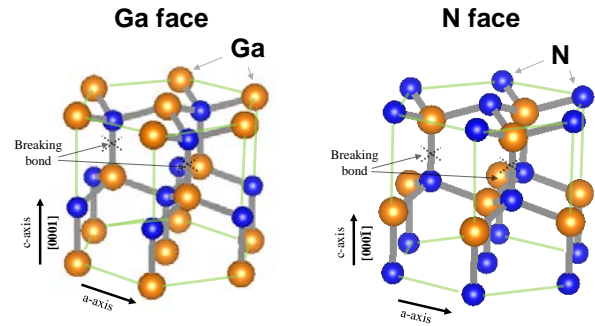


図3 GaN 結晶 c 面における非対称構造

ワイドバンドギャップ半導体の格子定数とバンドギャップの関係を図1に示す。様々な混晶が存在するが、格子定数が許容される範囲でヘテロ接合が実現され、様々なデバイスが試作されている。

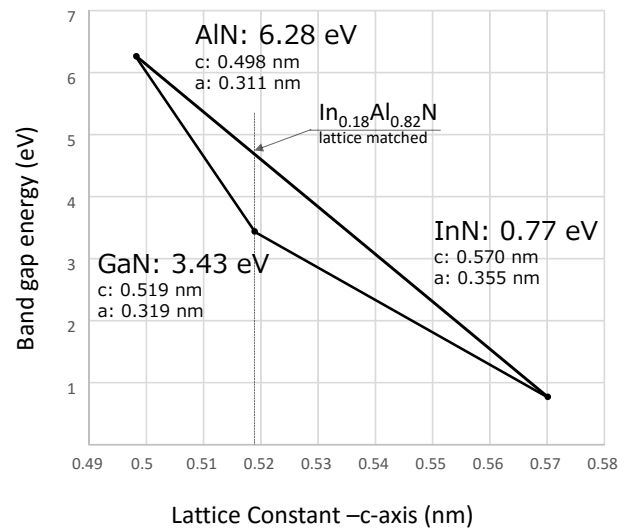


図4 GaN 系半導体の格子定数とバンドギャップ

このような自発分極に加えて、格子定数の差によって生じる結晶歪によってピエゾ分極が生じる。これらの合成による分極は固定電荷であるが、それを中和するために界面に移動可能なキャリアが生成される。このように GaN 系のヘテロ接合を用いることでドナーやアクセプタなどのドーパントの存在しない状態でもヘテロ界面にキャリア生起できるのが GaN 系半導体の1つの重要な特徴になっている[5]。

図5は GaN 系半導体の混晶材料と GaN 基板との界面に生起されるキャリア密度の関係を、AlGaIn, InAlIn, InGaIn について計算したものである。

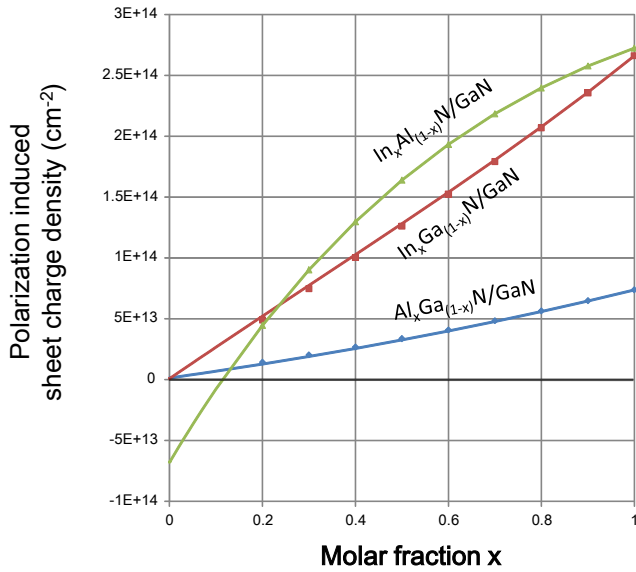


図5 分極によって生起されるキャリア密度

2. GaN 系 FET

一般的に Ga 面上に成長された AlGaIn と GaN ヘテロ接合におけるバンド構造とキャリア分布は図6のようになる。

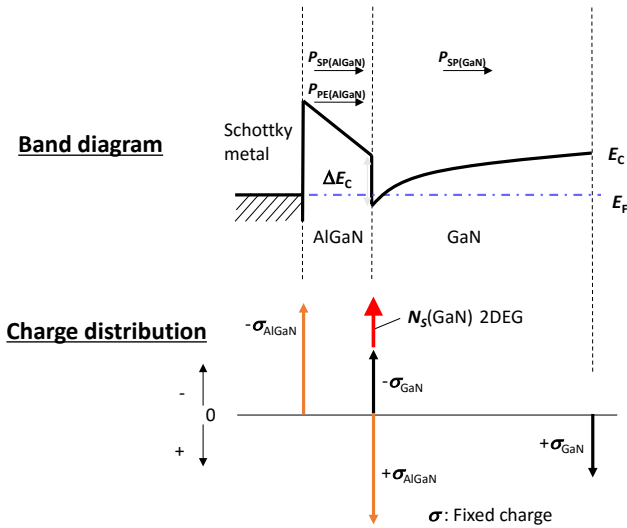


図6 AlGaIn/GaN ヘテロ構造と分極電荷

デバイス構造は従来の GaAs/AlGaAs HFET 構造と同様のものである。ただし、現在母材料となる基板が存在しないので、サファイヤ、SiC、Si 基板を用いて開発が進められている。以下は Si (111) 基板上に成長された AlGaIn/GaN パワーHFET の特性例である[2]。

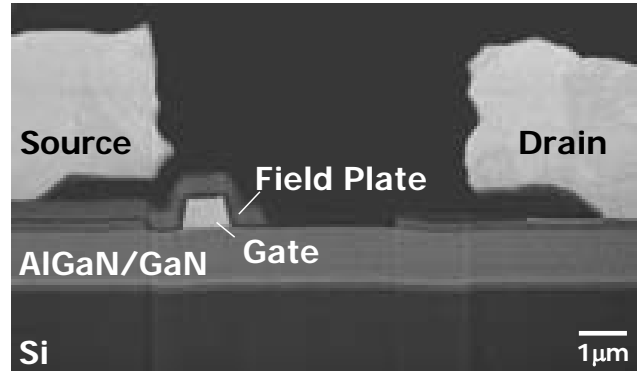


図7 Si 上の AlGaIn/GaN HFET の断面 SEM

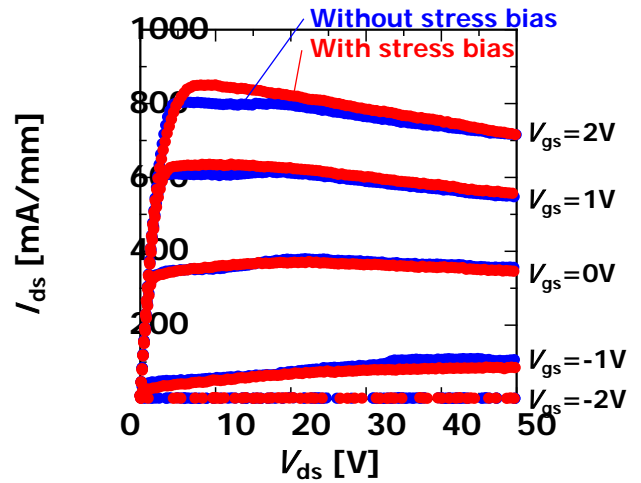


図8 電流コラプス抑制された AlGaIn/GaN on Si HFET の電流・電圧特性

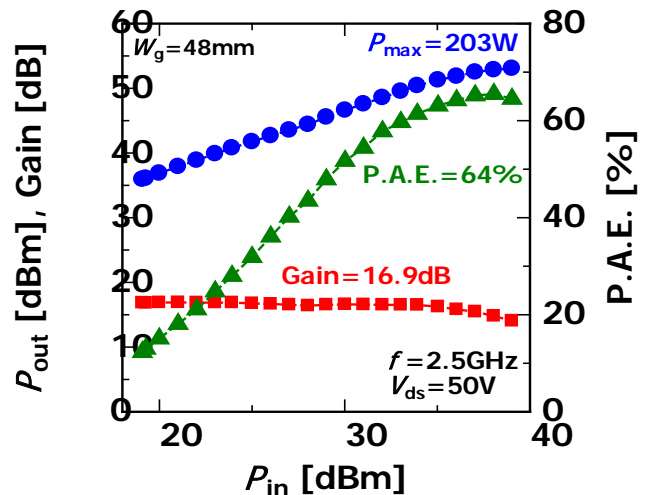


図9 試作した GaN/AlGaIn HFET の入出力特性

Parameters	Symbol	Unit	Si	GaAs	AlN	InN	GaN	SiC	Diamond
crystal structure	-	-	diamond	zincblend	wurtzite	wurtzite	Hexagonal, cubic	Hexagonal, cubic	diamond
density	-	g/cm ³	2.328	5.32	3.26	6.81	6.1	3.21	3.515
mole	-	g/mol	28.086	144.64	40.9882	128.83	83.73	40.097	12.011
atomic density	-	atom/cm ³	5.00E+22	4.42E+22	4.79E+22	3.18E+22	4.37E+22	4.80E+22	1.76E+23
lattice constant	-	Å	5.43095	5.6533	3.1114/a, 4.9792/c	3.544/a, 5.718/c	Hex 3.189/a, 5.185/c, Cubic 4.52	(6H)3.086/a, 15.117/c, (4H)3.073/a, 10.053/c, (3C)4.3596/a, 3.073/c	3.567
melting point	-	°C	1,415	1,238	2,200	1,100	2,573, @60kbar	2,830	4,373, @125kbar
specific heat	-	J(g · °C)	0.7	0.35	0.748	0.296	0.431	0.2	0.52
linear thermal expansion coefficient	-	°C ⁻¹	2.6E-06	6.9E-06	5.27E-6/a 4.15E-6/c	3.8E-6/a 2.9E-6/c	5.6E-6/a 3.2E-6/c	~5E-6	8.0E-07
thermal conductivity	-	W/(cm · °C)	1.5	0.46	2.85		2.1	2.3~4.9	6~20
transition	-	-	indirect	direct	direct	direct	direct	indirect	indirect
bandgap energy	E _g	eV	1.12	1.42	6.2	0.65	3.39(H)	3.02/6H 3.26/4H 2.403/3C	5.46~5.6
energy separation	Γ-L, Γ-X	eV	indirect	Γ-L0.29, Γ-X0.48	Γ-ML 0.7 Γ-K 1.0	Γ-A >0.7 Γ-Γ>1.1 Γ-K >2.7	Γ-Γ'1.9 Γ-M 2.1	indirect	indirect
dielectric constant	ε _r	-	11.7	12.9, 10.89@RF	8.5	15.3	12	10.0(6H) 9.7(4H)	5.7
electron-affinity	χ	eV	4.05	4.07	1.9	5.8	3.4	4	(NEA)
intrinsic carrier density	n _i	cm ⁻³	1.45E+10	1.79E+06	9.40E-34	9.20E+02	1.67E-10	1.16E-8 (6H) 6.54E-7 (4H)	1.00E-26
effective density of states	N _c	cm ⁻³	2.80E+19	4.70E+17	4.10E+18	1.30E+18	2.24E+18	4.55E+19 (6H) 1.35E+19 (4H) 1.53E+19 (3C)	1.00E+20
effective density of states	N _v	cm ⁻³	1.04E+19	7.00E+18	2.84E+20	5.30E+19	1.16E+19	1.79E+19	1.00E+19
effective mass	m* _e	m* _e l/m ₀ m* _e t /m ₀	0.9163/l, 0.1905/t	0.067	0.4	0.1-0.05	0.2	1.5/l, 0.25/t	1.4/l, 0.36/t
effective mass	m* _h	m* _h l/m ₀ m* _h h/m ₀	0.16/l, 0.49/h	0.082/l, 0.45/h	0.6	1.65	0.6/h	0.8	0.7/l, 2.1/h
mobility	μ _e	cm ² /(V · s)	1,500	8,500	300	3,200	1,800	460~980	2,200
mobility	μ _h	cm ² /(V · s)	450	400	14	220	~5	20	1,800
lattice matching	-	-	~SiGe	AlAs, InGaP	~GaN	-	~SiC, sapphire	~GaN,AlN	-

表 1 各種半導体材料の物性値

3. まとめ

以上、GaN 系の電子デバイスについての概要を述べた。ここではサファイヤや Si(111)基板などの異種基板上に成長した Normally-on 型の GaN/AlGaN HFET の例を述べたが、Normally-off 化が可能な GIT 構造もパワーデバイスの 1 つの方向である。また、パワーデバイスは放熱性を考慮しなければならない。このため SiC 基板上の結晶成長やダイヤモンド基板上の実装技術も検討されている。最近では、比較的熱伝導性の高いバルク GaN 基板を用いた縦型パワーデバイスも研究されているが、MMIC へ適用する場合、半絶縁性の基板の実現が期待される。

参考文献

- [1] Shuji Nakamura, et al, CRC Press 2000
- [2] Satoshi Nakazawa, et al, SSDM, pp564-565, 2011
- [3] T. Morita, et al, APEC, IEEE, 2011
- [4] E.O. Johnson, RCA Review, pp.163-177, June 1965.
- [5] O. Ambacher, et al, J. Phys. Cond. Matt. 14, pp. 3399-3434, 2002
- [6] Y. Uemoto, et al, IEDM Tech. Digests, pp. 907-910, 2006