

第5章

GaN エピタキシャル層の結晶欠陥と 電気的特性への影響

— 使用基板材料によるドーピング特性 および深い準位などの結晶欠陥の違い —

5.1 はじめに

Si 基板上の GaN およびその混晶は、サファイア基板に比較して良好な熱伝導性と大口径ウエハが使用可能であること、そして大きなコストメリットが見込まれることから、オプトエレクトロニクスや電子デバイスへの応用として大きな関心が持たれてきている[1,2]。一方、これらの電気的特性に関する理解を深めることは材料の品質、デバイス特性の向上の意味で重要である。これまで MOVPE 法を用いた GaN エピの成長条件において、GaN への不純物の取り込み、あるいはこれらの不純物の役割、カーボンの電子トラップへの影響などに関し、いくつかの報告が成されてきている[3-5]。また、使用した基板材料の違いとして、サファイア基板上や GaN 独立基板上に成長させた n-GaN 中のネットドーピング濃度について、転位密度との関係についても調査されている[6]。しかしながら、Si 基板上に成長させた GaN 中の深い準位などの欠陥に関しての報告はわずかしかない[7,8]。

この章では、Si(111)基板上およびサファイア上に成長させた n-GaN でのネットドーピング特性をはじめとする電気的特性について、結晶性、不純物濃度および DLTS 法により測定した深い準位密度の観点から考察し、両者の比較を試みた。特に半導体としての基本特性であるキャリア濃度や移動度、そしてそれらの温度依存性を評価し、転位をはじめとする結晶欠陥との関係を考察した。さらに、代表的な電子デバイスのひとつである HEMT としての基本性能を調べるため、AlGaIn/GaN HEMT 構造エピを Si 上およびサファイア上に成長させ、それらを実際にプロセス加工

してデバイスを形成した上で、それぞれのHEMT特性を比較した。

5.2 実験方法

4インチ(111)面のSi基板上、および2インチc面サファイア基板上に第2章で述べたように水平フロー型のMOVPE装置にてn-GaNを成長させた。これらのエピ構造を図5.1に示す。

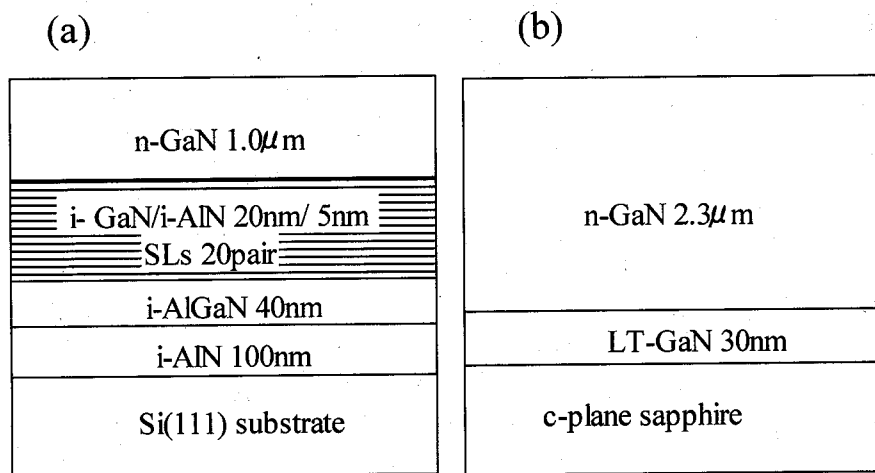


図 5.1 シリコン基板上(a)およびサファイア基板上(b)の n-GaN エピタキシャル層構造

Si基板上に1 μm厚のn-GaNを成長させるため、本研究では第2章で述べたi-GaN/i-AlN系20ペアの超格子構造のバッファ層を使用した。比較のためn-GaNを、30nm厚の通常使用される低温成長Ga_{0.99}N_{0.01}バッファ層を成長させたc面サファイア上に、2.3 μmの厚さで成長させた。これら両方のn-GaNは、成長温度、圧力、n型のドーパントガスである水素希釈ベースのSiH₄の流量などの各種成長条件を同一にしてある。ネットドーピング濃度N_d-N_aは、C-V法により測定した。ここで、N_dはドナー濃度、N_aはアクセプター濃度を表す。不純物濃度はSIMS分析により求めた。さらにX線回折によるn-GaNの結晶性の評価、Hall効果測定によるキャリア移動度の評

価を合わせて行った。DLTS法の測定は、ナノメトリクス社製 DL8000により、90～600Kの範囲で静逆バイアス電圧、充填電圧は、それぞれ-2V、0Vで測定を行った。この逆バイアス電圧の場合、エピのキャリア濃度から空乏層の厚さは、およそ100nmと見積もられる。充填パルス時間 (filling pulse time: t_p) は0.1msとし、トラップを電子で満たした後、放出時間幅 (emission period time: t_w) を50msとした。さらにAlGaIn/GaN HEMT構造エピをSi基板およびサファイア基板上に作製し、デバイスプロセスを経た後、HEMTとしての各種電気的特性評価を行った。

5.3 結果と考察

5.3.1 ネットドーピング濃度に関する不純物濃度依存性

n-GaNに対するSiのドーピング量の制御は、MOVPEでのエピタキシャル成長中の SiH_4 の流量を変化させて行う。この場合、 SiH_4 の流量とGaNエピ層中に取り込まれるSiの濃度は、比例関係にある。しかし、取り込まれたSiがn-GaN中のキャリアとなるわけではなく、各種条件でそのドーピング効率が異なって来ることがわかった。 SiH_4 の流量を変化させドーピング濃度をいくつか変えた場合の N_d-N_a 、すなわちネットドーピング濃度を図5.2に示す。

サファイア上のn-GaNは、 10^{16}cm^{-3} 台半ばから $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ までにわたり、ほぼSi濃度と比例関係にあるのに対し、Si上のn-GaNの場合、Si濃度が $3\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 以下になると比例関係のラインからのずれが大きくなっていき、特にSi濃度が $1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ を下回る濃度では、 N_d-N_a は激減し $1\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 以下となる。n-GaN成長中に取り込まれるSi濃度は、両方のサンプルにおいて同一であり、 SiH_4 の流量に比例している。それにもかかわらず、Si基板上のn-GaNでこのような低Si濃度側でのネットキャリア濃度の大幅な低下を示す事は、強い補償が生じていると予想される。

Si以外の不純物濃度について、SIMS分析を行った結果について、刃状転位密度に対してプロットしたのが図5.3である。刃状転位密度に関しては第2章で述べたように、(1000)面のX線ロックアップカーブの半値幅から求めた。C濃度については両方の試料に対し、この転位密度の範囲では大きな差は見られない。CはGaN中ではアクセプターとして作用することが知られているが、本実験結果を見るとSi基板上

n-GaNのC濃度が $2.7 \sim 4.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ であるのに対し、サファイア上のn-GaNでは $8.5 \sim 10 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ となっており、むしろSi基板上的C濃度の方が低くなっている。従って、ドナーを補償するアクセプターはC以外のものも存在すると考えられる。

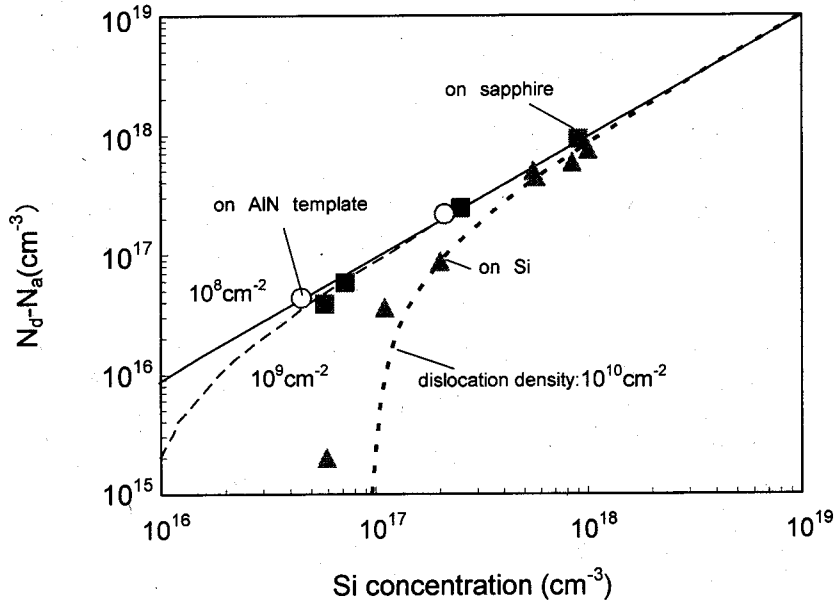


図 5.2 n-GaN 中の Si 濃度とキャリア濃度 ($N_d - N_a$) の関係

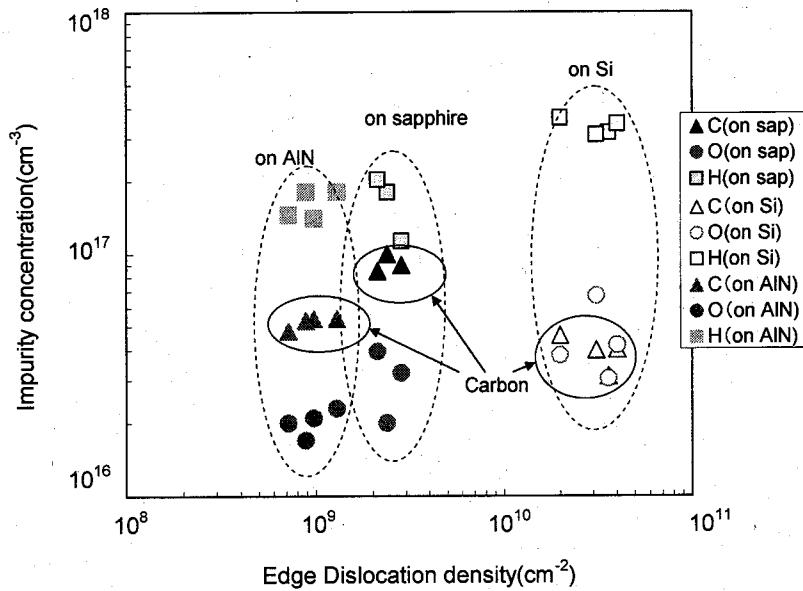


図 5.3 n-GaN 中の刃状転位密度と各不純物の密度の関係

このアクセプターとして考えられるのは、上記の結果からしても不純物ではなく、結晶欠陥に起因するものと推定される。その中では、Olilaらが陽電子消滅を用いて調査したGaサイトの空孔(V_{Ga})[9]や、刃状転位が主だったものとされている。n-GaN中の刃状転位については、負の電荷を持っていること[10,11]や、電子トラップとして働くことが計算や実験などから求められている。また、刃状転位は電子の移動度やキャリア濃度に大きく影響を及ぼすが、らせん転位はそれほどではない事も示されている[12]。Weimann[13]や、Elsner[14]らは、刃状転位の転位芯をGaサイトの空孔(V_{Ga})と考えた場合、 V_{Ga} および O_N 、そしてそれらの関与する複合欠陥 $V_{Ga}-O_N$ などが深いアクセプター準位を形成するとしている。刃状転位周りのダングリングボンドの様子やその分子モデル[13,14]をそれぞれ図5.4(a),(b)に示す。これに電子が捕獲されると V_{Ga} の周りのNのダングリングボンドにおいて持ち上げられた価電子帯のギャップを生み、すなわち、転位芯の周りでGaNが空乏化していると推定している(図5.5)。

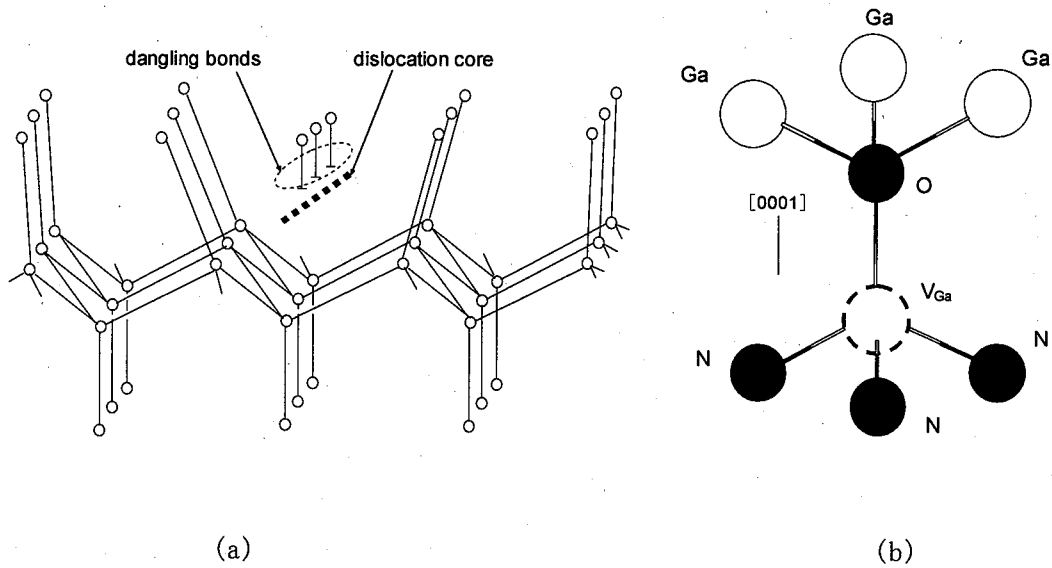


図 5.4 転位芯とダングリングボンドの様子(a)[13]と $V_{Ga}-O$ 複合欠陥のモデル(b)[14]

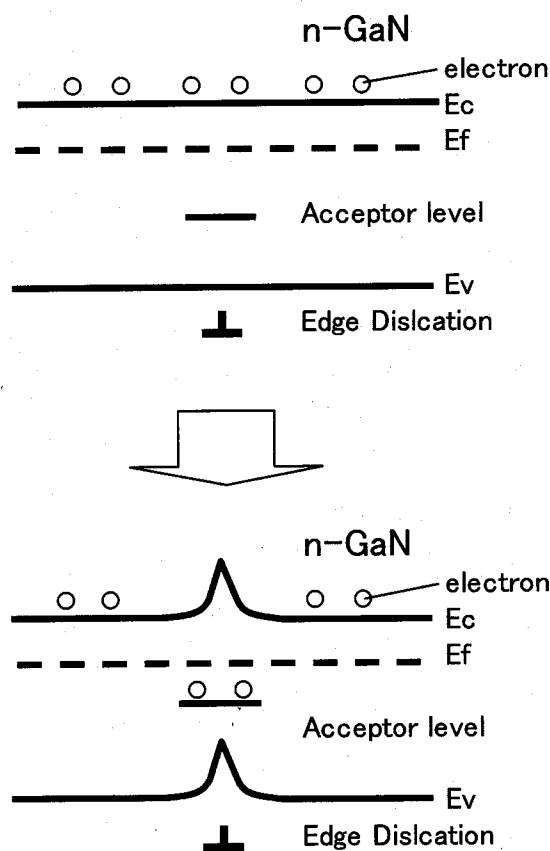


図 5.5 n-GaN 中の刃状転位周辺のモデル図

また Weimann は、イオン化された不純物密度がトラップ密度より小さければ、すべてのキャリアはトラップされ、絶縁性を示すようになるため、転位密度はドーピングされた不純物とフリーキャリア密度との関係に影響を及ぼし、転位密度が高くなるほど、低濃度のドーピング領域でのフリーキャリア密度の低下を引き起こすと述べている [13]。さらにこれをイオン化されたドナーの数からトラップされた電子の数を差し引いて得られたフリーキャリア密度とトラップ充填率の関係を考慮したモデルから導出した結果を本実験結果のグラフ上に示したのが図 5.1 中の曲線である。それぞれの曲線は、 $10^7 \sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$ の転位密度 1 桁毎に引いてあるが、本実験における n-GaN 成長に用いた基板種毎の転位密度、AlN テンプレート上: 10^8cm^{-2} 、サファイア基板上: 10^9cm^{-2} 、Si 基板上: $\sim 10^{10} \text{cm}^{-3}$ と良い一致が見られる。同様に You らは、刃状転位

を単独トラップが直線上に配列したものと見なした「Read ポテンシャル」と呼ばれるモデルで同様の解析を行っている[15]。

5.3.2 転位密度の Hall 移動度へ与える影響

また、図 5.5 に各サンプルの Hall 効果測定から求めた室温に於けるキャリア濃度と Hall 移動度の関係についてのデータを示す。サファイア基板上または AlN テンプレート上の n-GaN は、 10^{18} から 10^{16}cm^{-3} の範囲ではキャリア濃度が減少するに従い、Hall 移動度は 300 から $600 \text{cm}^2/\text{Vs}$ と増加するのに対し、Si 基板上の n-GaN については、同程度のキャリア濃度範囲でキャリア濃度が減少するにつれて、Hall 移動度は 200 から $70 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度に減少している。これは、サンプル間の転位密度の違いによると考えられる。転位が移動度に影響を与えるモデルとしていくつか示されており、電子がトラップされると転位芯が負にチャージした状態となり[16]、これがクーロン散乱を引き起こし、キャリアの移動度に影響を与えるようになるとしている。Youらは、遮蔽された転位と無限半径のポテンシャルから得られるポアソン方程式を解いた「BG (Bonch-Bruevich and Glasko) モデル」を用いて、転位密度を考慮したキャリア濃度と移動度の関係を求めた[15]。これを図 5.6 に示す。本研究での実験結果とモデルから求めた曲線とは多少乖離が見られるが、モデルの転位密度から計算される曲線と実際の基板種が異なる3種類のサンプルのデータと概ね合致しており、 10^{10}cm^{-2} 台の転位密度の Si 基板上 n-GaN は低キャリア濃度側で Hall 移動度の著しい減少が見られる。

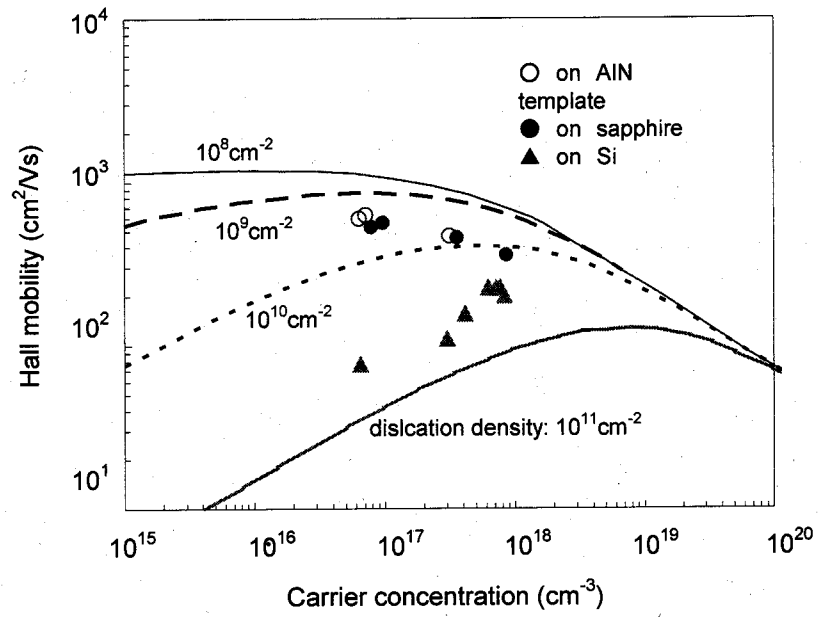


図 5.6 成長基板の異なる n-GaN におけるキャリア濃度と移動度の関係

図中の曲線は、転位密度毎のシミュレーションによる結果[15]

5.3.3 キャリア濃度および Hall 移動度の温度依存性

5.3.3.1. n-GaN のキャリア濃度、Hall 移動度の温度依存性

サファイア上および Si 基板の n-GaN について、Hall 効果測定により Hall 移動度ならびにキャリア濃度の温度特性を、10~300K の温度範囲にて測定した。図 5.7 に、キャリア濃度、図 5.8 に移動度について、それぞれ温度依存性を示す。

キャリア濃度については、基板種に関わらずキャリア濃度が同程度であれば同様の温度挙動を示し、室温付近で約 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のものは、温度の低下とともに減少していく。また、同じく室温付近で約 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のものは、一旦減少するものの 90K 前後で極小となった後、再び上昇に転じ、30K 付近で飽和している。Molnar らは、ECR-MBE (electron cyclotron resonance microwave plasma-assisted molecular beam epitaxy) により作製した GaN (室温におけるネットキャリア濃度: $5.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) の Hall 効果測定結果を、ドナー不純物帯内およびそれと同様に伝導帯内での電子の輸送で説明される「two-band」モデルを用いてこれらを解析している。ドナー濃度 (N_d) が高くなると (一般的には $N_d > 10^{19} \text{cm}^{-3}$)、ドナーの波動関数の重なりが大きくなり不純物帯を構成する [17]。ある温度で伝導帯に励起されたキャリアの濃度 n_c 、移動度 μ_c とし、励起されずに欠陥に残されたキャリアの濃度 n_d と移動度 μ_d とし、 n_c 、 n_d 、 μ_c 、 μ_d をそれぞれ計算した値とを比較すると高温側では n_c が、低温側では n_d が支配的になっている。この結果は図 5.5 の室温でのキャリア濃度がおよそ $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のサファイア上および Si 基板の n-GaN 試料、両者における挙動を説明できる。

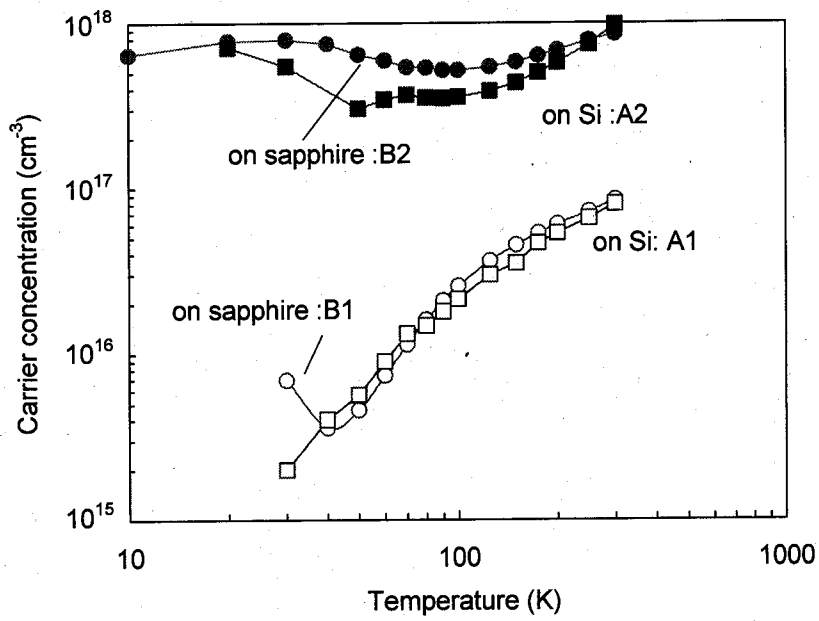


図 5.7 キャリア濃度の測定温度依存性

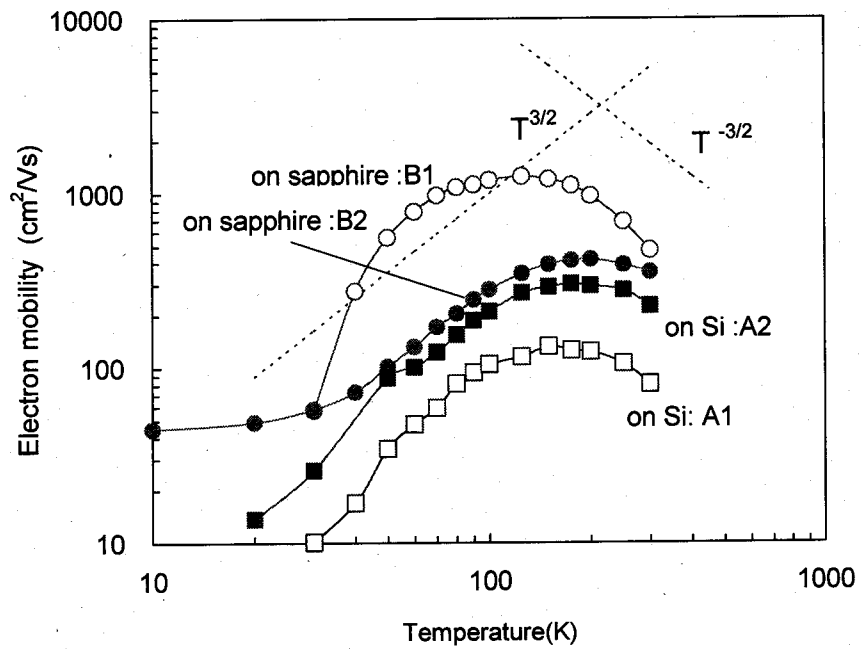


図 5.8 移動度の測定温度依存性

EshighiらもMOVPEにてサファイア基板上に作製したn-GaN(室温でのネットキャリア濃度: $8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)について測定を行い、同様に「two-band」モデルを用いてこれらを解析している[18]。それによると、低温域で見られるキャリア濃度の上昇は、浅い不純物帯内でのキャリアの移動と輸送 (transfer and transport) に関係し、深い準位は低温での輸送 (transport) の役割は担わないとしている。キャリア濃度が高い ($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 試料とキャリア濃度が低い ($1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 試料の間で、温度の低下に伴うキャリア濃度の減少から増加に転じる温度域が異なるのは、上記の「two-band」モデルから考えると、伝導帯内のキャリア濃度 n_c が支配的だったものが不純物帯内のキャリア濃度 n_d が優勢に転じる状態 (図 5.9) とすると、不純物濃度が高い方がより高い温度域で増大に転じるためと説明できる。

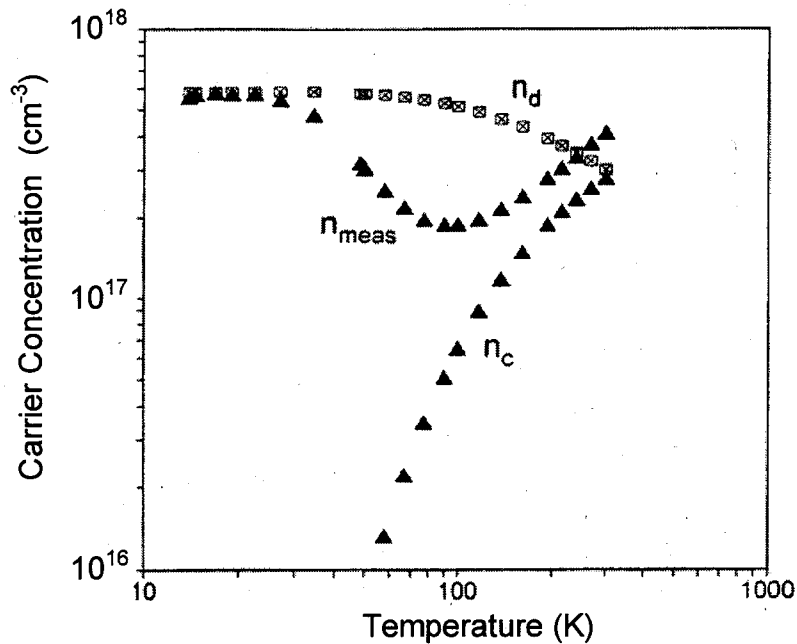


図 5.9 伝導帯内のキャリア濃度 n_c 、不純物帯内のキャリア濃度 n_d および実測値 n_{meas} の温度依存性[18,20]

5.3.3.2. ドナーの活性化エネルギー

図 5.10 に温度の逆数に対してプロットした各サンプルのキャリア濃度を示す。式 (5.1) に示すように、各試料における Si ドナーの活性化エネルギー (ΔE_D) を求めた。

$$n(T) = n_0 \exp\left(\frac{-\Delta E_D}{k_B T}\right) \quad (5.1)$$

キャリア濃度が低い ($1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 試料は、基板種にかかわらず 16meV であり、Ng ら[19]ともほぼ同等 (13-15meV) の値となった。キャリア濃度が高い ($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 試料は、サファイア基板上のものが 10meV、Si 基板上のものが 24meV となった。これを Noh らが解析しているように[20]、キャリア濃度に対して活性化エネルギーをプロットする(図 5.11)と、サファイア基板上のものは Goetz らのデータとほぼ一致するが、Si 基板上のものはむしろ Molnar ら[21]の ECR-MBE でのデータに似て増加の挙動を示している。彼らの仮説としては N サイトの空孔 (V_N) が起因しているとしているが、この試料の結晶性が X 線ロックアップカーブ半値幅で 10~20min すなわち 600~1200arcsec であることからすると、転位密度の大きさ、または転位に関する欠陥密度が関与しているものとも考えられる。Goetz らは、この起源を n 型のバックグラウンドにもなっている N サイトの酸素 (O_N) であろうとしている[22]。

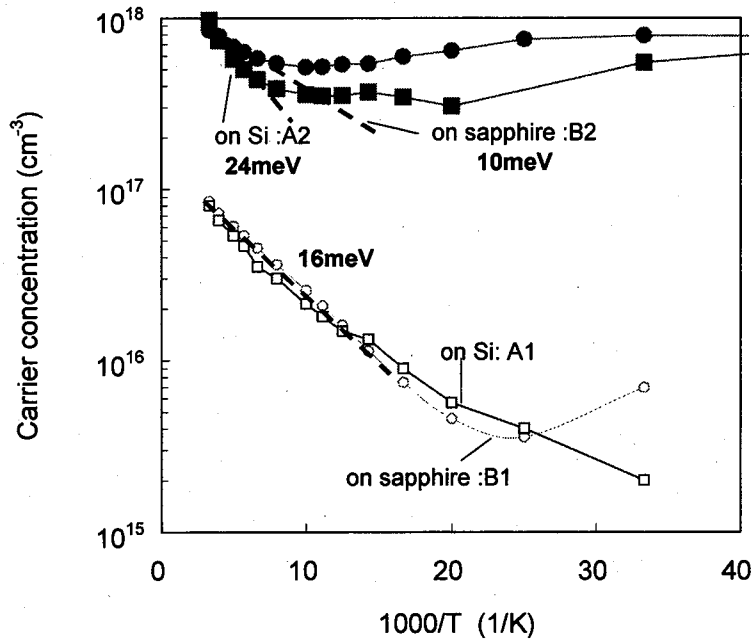


図 5.10 温度の逆数に対するキャリア濃度と活性化エネルギー

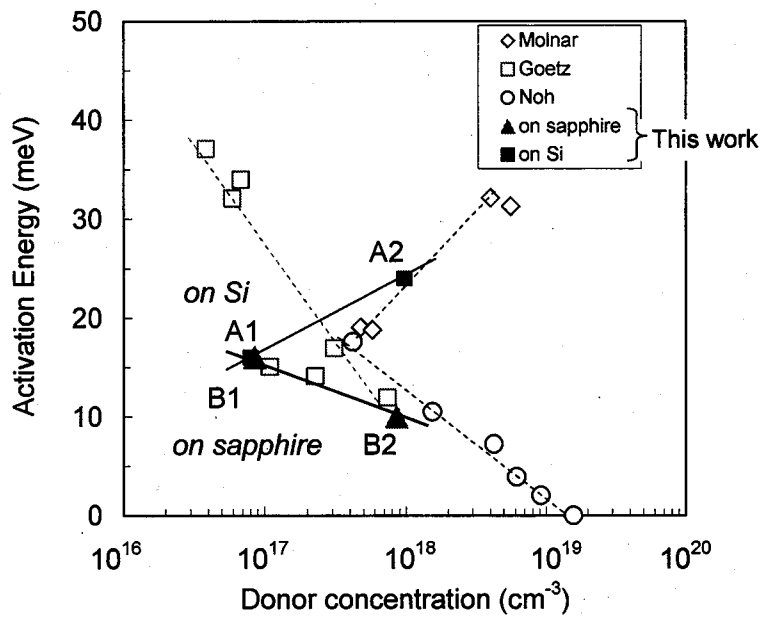


図 5.11 ドナー濃度に対する活性化エネルギー変化

5.3.4 移動度とキャリアの補償比

5.3.4.1 移動度

図 5.6 で示したように、室温付近でのキャリア濃度が高い ($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 試料の移動度は、基板種に因らず $220 \sim 350 \text{cm}^2/\text{Vs}$ で温度に対しほぼ似たような挙動を示しているが、室温でおよそ $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のものは、基板種、すなわちこの場合転位密度に大きく影響を受け、転位密度が高いと移動度は減少し、低ければ移動度は増大する。図 5.2 でも示したように、転位密度差が増大するほどそれらの移動度は大きくかけ離れたものになっている。

移動度は一般的に次の散乱機構の総和によって決まる。

光学フォノン散乱: μ_{po} 、中性不純物散乱: μ_{ni} 、音響フォノン散乱: μ_{ac} 、転位による散乱: μ_{dis} 、イオン化不純物散乱: μ_{ii} 、ピエゾ散乱: μ_{pe}

$$\frac{1}{\mu_T} = \frac{1}{\mu_{po}} + \frac{1}{\mu_{ni}} + \frac{1}{\mu_{dis}} + \frac{1}{\mu_{ac}} + \frac{1}{\mu_{ii}} + \frac{1}{\mu_{pe}} \quad (5.2)$$

イオン化不純物による散乱

$$\mu_{ii} = \frac{64\sqrt{\pi}\epsilon^2(2kT)^{3/2}}{N_i e^3 \sqrt{m^*}} \left\{ \ln \left[1 + \left(\frac{12\pi\epsilon kT}{q^2 N_i^{1/3}} \right)^2 \right] \right\} \quad (5.3)$$

ϵ : 半導体誘電率、 k : ボルツマン定数、 m^* : GaN における電子の有効質量、 e : 電子の電荷

このうち、 N_i はイオン化された不純物密度で以下の式で表す。

$$N_i = n + f \left(\frac{N_s}{d} \right) \quad (5.4)$$

ただし、 n : 電子密度、 f : 充満されたトラップの割合、 N_s : 単位面積あたりの転位密度、

d: 六方晶 GaN のc軸長

転位による散乱

$$\mu_{dist} = \frac{30\sqrt{2\pi}\epsilon^2 d^2 (kT)^{3/2}}{e^3 N_s f^2 \lambda_d \sqrt{m^*}} \quad (5.5)$$

λ_d はデバイスクリーニング長で次式で表される。

$$\lambda_d = (\epsilon kT / e^2 n)^{0.5} \quad (5.6)$$

音響フォノン散乱

$$\mu_{ac} = \frac{e\sqrt{8\pi} \left(\frac{h}{2\pi}\right)^4 C_{11}}{3(E_{ds})^2 (m^*)^{2.5} (kT)^{1.5}} \quad (5.7)$$

C_{11} : 半導体の平均長軸長弾性定数、 E_{ds} : 膨張した単位格子あたりの端部の移動距離 (acoustic deformation potential)

光学フォノン散乱については、

$$\mu_{op} = 0.199 \left(\frac{T}{300}\right)^{0.5} \left(\frac{e}{e_c}\right)^2 \left(\frac{m_0}{m^*}\right)^{1.5} (10^{22} M)(10^{23} V_a)(10^{-13} \omega_0) [\exp(z) - 1] G(z) \quad (5.8)$$

ここで e_c は、Callen effective charge で、次式で表される。

$$e_c = \sqrt{\frac{[MV_a(\omega_0^2)]\left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_\gamma}\right)}{4\pi}} \quad (5.9)$$

以上[18,22]を考慮すると、図 5.8 でわかるように移動度の温度依存性としては、サファイア基板上の低濃度 ($1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) n-GaN 試料を除き、低温側は不純物散乱が支配的で $T^{3/2}$ に比例する形になっている。対して高温側では $T^{-3/2}$ に比例するフォノン散乱が支配的になっている。Eshghi らは、図 5.12 に示すように、緩和時間近似 (relaxation time approximation : RTA) を使った解析で、導電帯と不純物バンドの密度を考慮したドリフト移動度 $\mu_{\text{Drift Mobility}}$ と見かけ上の Hall キャリア濃度を求めたが、全温度範囲で明らかに実験データと良く一致している[18]。本研究におけるサファイア基板上の低濃度 n-GaN 試料について、低温側の移動度の温度依存性が他のものに比較しても $T^{3/2}$ の関係が薄いことは、このキャリア濃度域、転位密度域では Eshghi らのモデルで説明されるような別の機構が移動度を定める要因として支配的であるといえる。

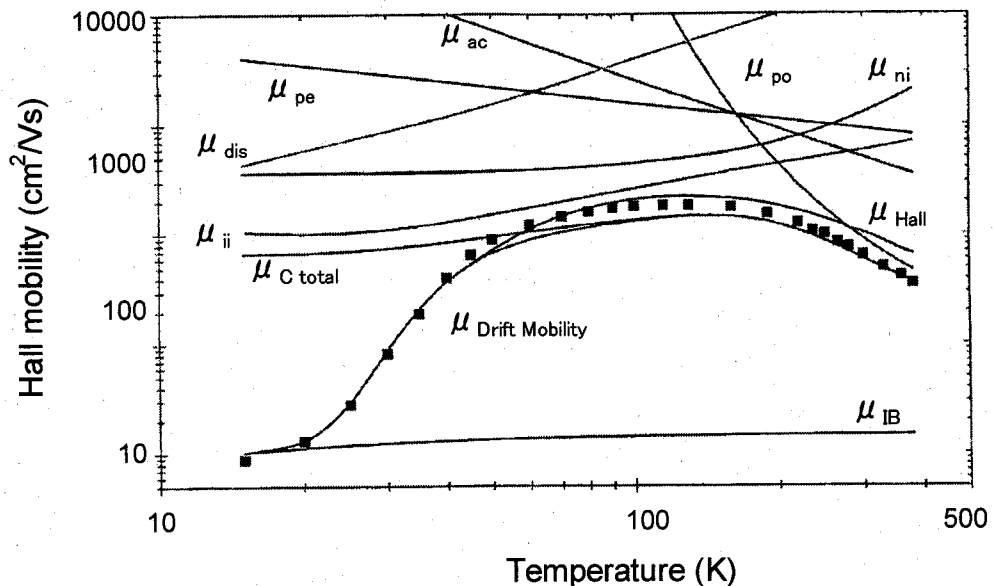


図 5.12 移動度の各成分因子と実際のデータとの比較 [18]

5.3.4.2 移動度に対する補償比の関係

第5.3.1節で述べたように、基板種の違いによるn-GaN中の転位密度の差が、ネットドーピング特性に影響を及ぼしていることが確認された。この節では、移動度と補償比の関係やそれに関連する補償機構について考察する。

第5.3.1節、図5.2で示したように、転位密度が他の使用基板のものに比べて高いSi基板上のn-GaNは、Siのドーピング濃度が $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下になると、キャリアとして測定される濃度がドーピング濃度を下回りだし、さらにドーピング濃度が低下し、 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下になるとキャリア濃度は1桁以上低下するようになる。つまり、ドーピングしたSi濃度に対して、キャリアとして観測される濃度が1桁以上も小さくなっている。これは先にも述べたように強い補償が働いている事を示唆しており、刃状転位が関与する結晶欠陥がアクセプターとして作用していると考えられる。Si以外のドナーについては、そのキャリアの起源として窒素サイトの空孔(V_N)や酸素が考えられてきた。浅いドナーとして、酸素の活性化エネルギーが29meVと求められたとの報告もある[23]。

ここで、全ドナーと全アクセプターの補償比($\theta : \theta = N_a / N_d$)からアクセプターの濃度について検討した。Chinらは変分原理(variational principle)と呼ばれる手法を用いて、GaNをはじめ、InN、AlNを含めて、キャリア濃度と移動度の関係を補償比で解析した[10]。この結果に本研究の実験で得られたデータを合わせると、図5.13のようになる。これを見ると、サファイア基板上、AlNテンプレート上のn-GaNについては、キャリア濃度が $7 \times 10^{16} \sim 8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の範囲において $\theta = 0.3 \sim 0.6$ のラインにほぼ乗った形になっている。ここで実際、補償比 θ から N_d 、 n から N_a を求めてみると、

$$N_a = \theta N_d \quad \text{かつ} \quad N_a = N_d - n \quad (5.10)$$

これより、

$$N_a = \frac{\theta}{1-\theta} n \quad (5.11)$$

となり、仮に $n=8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 $\theta = 0.4$ とすると、 N_a は $5.3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ となる。これに対し Si 基板上的 n-GaN は、キャリア濃度が $7 \sim 8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 付近では $\theta = 0.6$ 程度であるが、低濃度側になるに従って θ が高い方向にずれてしまう。例えばキャリア濃度 n が $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の試料中の補償比がグラフより 0.9 だと仮定すると、 N_a が $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で $n=N_d-N_a$ より、 N_a が $2.7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ あることになり、ドーピング Si 濃度が $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ であることから考えても、それ以外のドナー濃度をもたらす起源や兆候が見あらず、矛盾を生じてしまう。従って、このような高転位密度の材料に対しては、転位による散乱が大きく寄与しており、このモデルで補償比を見積もるのには適さないと言える。また、アクセプター濃度については別の手法で直接評価することも必要になってくる。

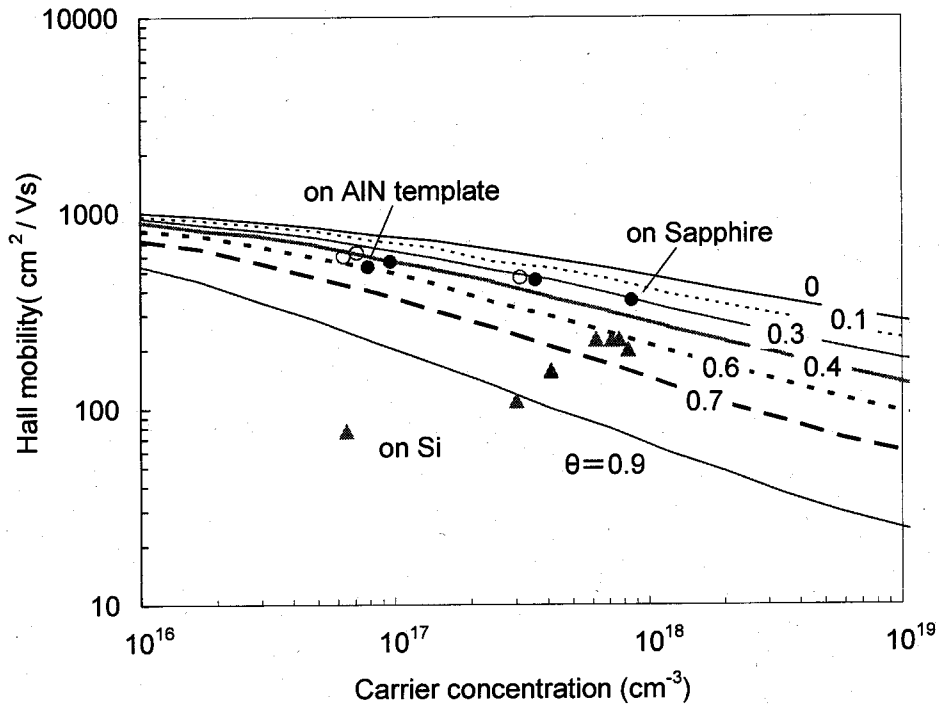


図 5.13 キャリア濃度と移動度の関係と補償比

5.3.5 DLTS測定による深い準位の評価

図 5.11 にSi基板上に成長させた n-GaN(a)、およびサファイア基板上的もの(b) についてそれぞれ測定したDLTSスペクトルを示す。ここで使用したサンプル中のキャリア濃度は、Si 基板上のものが $1.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ でサファイア基板上的ものが $2.4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ となっている。これらのスペクトルから Si 上のサンプルでは主に2つ以上のピークが、サファイア基板では3つのサンプルが観測された。それぞれをSi上ではE1、E2、E4、E5、サファイア上では E1、E2、E5 と名付けることにする。ここでも Hasse ら [24]が見いだしている、MOVPEによるn-GaN中の、エネルギー準位が0.67eVのE3に相当するピークは、Si上ではブロードなピークの中でその存在が明確ではなく、サファイア基板上的ものでは観測されなかった。これらのエネルギー準位 (E_i)、捕獲断面積 (σ)、トラップ濃度を表1に示す。

この結果より、この範囲で観測される深いドナー準位の濃度 N_i は、両者ともに最も多い準位のものでも $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 以下であり、従って $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以上存在する全ドナー濃度に対して与える影響は小さいと言える。

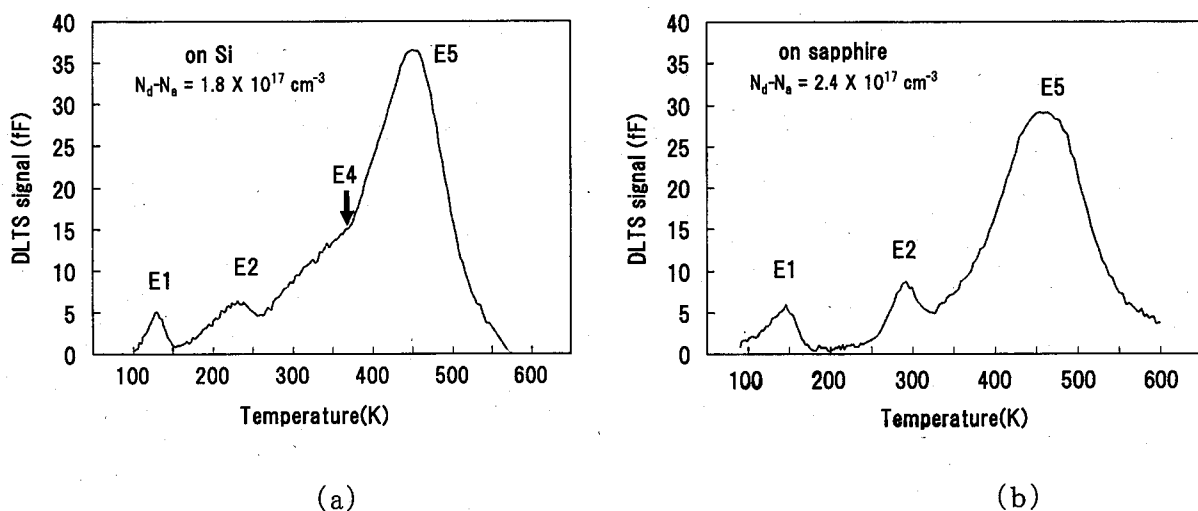


図 5.14 (a) Si 基板上 および (b)サファイア基板上 n-GaN の DLTS スペクトル

表 5.1 SLS/Si 上およびサファイア上の n-GaN の DLTS 測定結果

(E_a : activation energy, N_t : trap concentration, σ : capture cross section).

	Detected deep level								
	E1			E2			E5		
	E_a [eV]	σ [cm ²]	N_t [cm ⁻³]	E_a [eV]	σ [cm ²]	N_t [cm ⁻³]	E_a [eV]	σ [cm ²]	N_t [cm ⁻³]
on SLS(20pair)/Si	0.21	5.0×10^{-16}	9.2×10^{13}	0.43	1.2×10^{-15}	1.0×10^{14}	0.93	9.4×10^{-15}	6.4×10^{14}
on LTBL/Sapphire	0.22	3.2×10^{-17}	1.3×10^{14}	0.51	1.8×10^{-16}	1.9×10^{14}	1.02	1.3×10^{-14}	5.9×10^{14}

5.3.6 HEMT デバイス特性の評価

これまで述べてきた GaN エピタキシャル層中の電気的特性について、AlGaN/GaN HEMT 構造を、Si(111) 基板上および c-サファイア基板上に作製し、その HEMT 素子としての特性を比較した。

HEMT のエピタキシャル層構造は、図 5.15 に示すように、それぞれ先に述べた n-GaN の各試料での成長条件を、HEMT 構造エピの i-GaN 層に適応させて、Si 基板上、サファイア基板上にそれぞれ作製した。バッファ層構造もそれぞれ n-GaN の試験と同様に成長させ、その上に undope の i-GaN を、Si 基板上の場合は $1 \mu\text{m}$ 、サファイア基板上の場合は $3 \mu\text{m}$ の厚みで成長させ、最上層はどちらも Al 組成が 0.26、厚みが 25nm の AlGa_{0.26}N 層とした。次に HEMT デバイスのプロセスを施し、表面の AlGa_{0.26}N 上に Ti/Al/Ni/Au 製のソース、ドレイン、Pd/Ti/Au のゲートの各電極を、ゲート幅 (W_g) が $15 \mu\text{m}$ 、ゲート長 (L_g) が $2.0 \mu\text{m}$ 、ソース-ゲート間隔が $8.0 \mu\text{m}$ 、ソース-ゲート間隔が $3.0 \mu\text{m}$ となるように作製した。HEMT 素子の各特性についての測定は、半導体パラメータアナライザを用いて行った。この結果を表 5.2 に示す。

これによると、これらの DC 特性については、Si 基板上、サファイア基板上ともほぼ同程度の性能を示す事が確認された。これは、i-GaN の結晶性が両者の基板種類により異なるとしても、少なくとも HEMT 構造下で形成される 2次元電子ガス (2DEG) の特性としては、ほぼ同等となっていることも示されている。このことから Si 基

板上での GaN 系電子デバイスの実用化の可能性が示されたが、さらにデバイスとしての動的特性とエピ中の欠陥の種類や密度との対応について調査し、デバイス特性を向上させる上でも結晶欠陥の挙動や適正化について調査を進める必要がある。

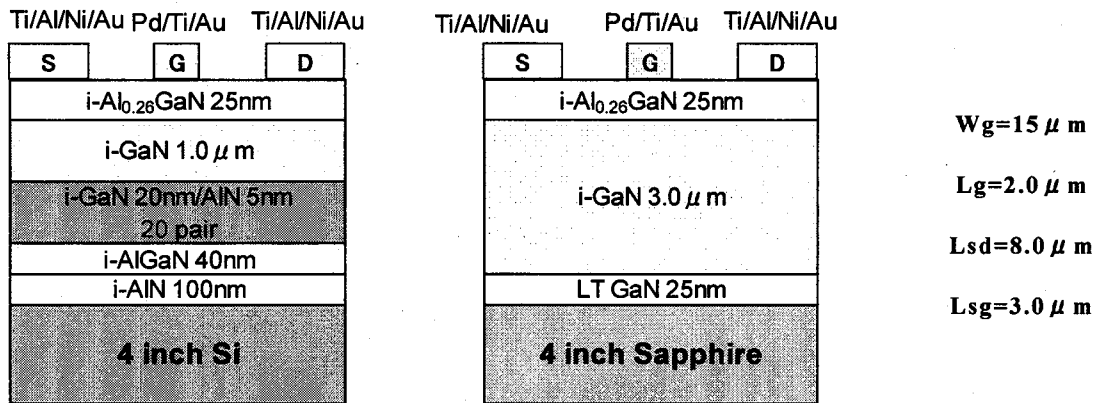


図 5.15 HEMT 特性評価用エピの構造

表 5.2 Si (111)基板上ならびにサファイア基板上に作製した AlGaIn/GaN HEMTs 構造の特性比較

	n_s (10^{13}cm^{-2})	2DEG Mobility at 300K (cm^2/Vs)	N_{D-2DEG} (10^{20}cm^{-3})	R_s (Ωmm)	V_{th} (V)	$I_{D\max}$ (mA/mm)	g_m (mS/mm)	V_B (V)
on Si (111)	1.3	1095	1.60	1.49	-2.2	480	188	260
on c-sapphire	1.2	1050	1.66	2.80	-2.5	528	143	300

5.4 第5章のまとめ

本章では、MOVPE法によりサファイア基板、AlNテンプレート、そしてSi基板上に作製成長させたn-GaNのエピタキシャル層の結晶欠陥と、キャリア濃度、移動度などの電気特性との関係を調べた。そして電子デバイスのひとつであるAlGaN/GaN HEMT構造エピをSi基板上ならびにサファイア上に上記n-GaNと同様のバッファ層構造を用いて作製し、デバイス特性との関連についても調査を行った。

まず、使用基板の種類に応じてその上に成長させたGaNの転位密度に応じてドーピング特性が異なることが確認された。これは、Siをドーパント不純物とした場合、転位密度の高いSi基板上のn-GaNにおいては 10^{17}cm^{-3} 以下のドーピング量では他の基板上のGaNと比較し、大幅なネットキャリア濃度の低下が見られた。これは主に刃状転位が関与するアクセプター準位による補償によるものと推定される。

次に、移動度のキャリア濃度依存性について、上記と同様に使用基板毎の特性を調べたところ、サファイア基板上のn-GaNではキャリア濃度低下に伴い不純物散乱が減少するため、移動度が増加するのに対し、転位密度が高いSi基板上のn-GaNはキャリア濃度低下とともに移動度も低下していくことが確認された。これは、アクセプターとして作用する転位芯による電子の散乱が、キャリア濃度低下に伴い支配的になってくるためと考えられ、通常の補償比を検討したモデルにも合わなくなることがわかった。

さらに、n-GaNでの成長条件をHEMT構造エピのi-GaNバッファ層に適応させて、Si基板上、サファイア基板上にそれぞれ作製し、両者のデバイス特性を比較したところ、転位密度が一桁以上異なるにもかかわらず、静特性としてはほぼ同一となることを確認した。

第5章 参考文献

- [1] A. Krost, and A. Dadgar, *Phys. Stat. sol. (a)* **194**, 361 (2002).
- [2] S. Lawrence Selvaraj, T. Ito, Y. Terada, and T. Egawa, *Appl. Phys. Lett.* **90** 173506 (2007).
- [3] D.D. Koleske, A.E. Wickenden, R.L. Henry, and M.E. Twigg, *J. Cryst. Growth* **242**, 55 (2002).
- [4] C. H. Seager, A.F. Wrgiht, J. Yu, W. Götz, and N. M. Johnson, *Appl. phys. J. Appl. Phys.* **92**, 6553 (2004).
- [5] O. Lopatiuk, L. Chernyak, Y. Feldman, and K. Gartsman, *Thin Sold Films* **515**, 4365 (2007).
- [6] S. Hashimoto, Y. Yoshizumi, T. Tanabe, and M. Kiyama, *J. Cryst. Growth* **298**, 871 (2007).
- [7] P. Muret, Ch. Ulzhöfer, J. Pernot, Y. Cordier, F. Semond, Ch. Gcquière, and D. Thèron, *Superlatt. Microstract.* **36**, 435 (2004).
- [8] T. Ito, Y. Terada and T. Egawa, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **1068**, C06-09 (2008).
- [9] J. Oila, J. Kivioja, V. Ranki, K. Saarinen, D. C. Look, R. J. Molnar, S. S. Park, S. K. Lee, and J. Y. Han, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3433 (2003).
- [10] V. W. L. Chin, T. L. Tansley, and T. Osothchan, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 7365 (1994)
- [11] B. S. Simpkins, E. T. Yu, P. Waltereit, and J. S. Speck, *J. Appl. Phys.* **94**, 1448 (2003).
- [12] D. G. Zhao, H. Yang, J. J. Zhu, D. S. Jiang, Z. S. Liu, S. M. Zhang, Y. T. Wang, and J. W. Liang, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 112106 (2006).
- [13] N. G. Weimann, L. F. Eastman, D. Doppalapudi, H. M. Ng, and T. D. Moustakas, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3656 (1998).
- [14] J. Elsner, R. Jones, M .I. Heggie, P. K. Sitch, M. Haugk, and T. Frauenheim, S.

- oberg, P. R. Briddon, Phys. Rev. B **58**, 12571 (1998).
- [15] J. H. You, J-Q. Lu, and H. T. Johnson, J. Appl. Phys. **99**, 33706 (2006).
- [16] D. Cherns and C. G. Jiao, Phys. Rev. Lett. **87**, 205504 (2001).
- [17] 御子柴宣夫:「半導体の物理」、倍風館(1982).
- [18] H. Eshghi, D. Lancefield, B. Beaumont, and P. Gibart, Phys. Rev. **B216**, 733 (1999).
- [19] H. M. Ng, D. Doppalapudi, and T. D. Moustakas, N. G. Weimann, and L. F. Eastman, Appl. Phys. Lett. **73**, 821 (1998).
- [20] S. K. Noh, C-R. Lee, and S. E. Park, J. Korean Phys. Soc. **32**, 851 (1998).
- [21] R. J. Molnar, T. Lei, and T. D. Moustakas, Appl. Phys. Lett. **62**, 72 (1993).
- [22] W. Gotz, N. M. Johnson, C. Chen, H. Liu, C. Kuo, and W. Imler, Appl. Phys. Lett. **68**, 22 (1996).
- [23] J. C. Zolper, R. G. Wilson, S. J. Pearton and R. A. Stall, Appl. Phys. Lett. **68**, 1945 (1996).
- [24] D. Hasse, M. Schmid, W. Kürner, A. Dörnen, V. Härle, F. Scholz, M. Burkard, and H. Schweizer, Appl. phys. Lett. **69**, 2525 (1996).

第6章

総括

本研究では、MOVPE法により成長されたGaNエピタキシャル薄膜について、サファイア、AlNテンプレート、シリコンといった基板材料の違いや、エピタキシャル成長条件自体の違いによって、結晶中に導入される欠陥、深いエネルギー準位のエネルギー位置や密度について評価を行った。特に、MOVPE法によるSi基板上のGaNについてのDLTS法を用いた深い準位の評価は、これまで実施例が無く、本研究が初めてとなる。また、結晶性以外にもHall効果測定やデバイス特性について各種評価を行い、使用基板によってドーピング効率が異なることや、転位密度や深い準位などと結晶の電気特性との関係を考察した。

以降、各章別に結論をまとめる。

第2章では、本研究で使用したGaN薄膜の代表的製法の一つであるMOVPE法について、その概要と使用基板毎の特徴、使用した装置の概要を記した。第3章では、本研究におけるGaNエピタキシャル層の各種特性評価方法として、X線回折による転位密度など結晶性評価、DLTS法、PL法等について概要を述べた。

第4章では、n-GaNエピタキシャル層中の深い準位について、基板の材料の違いによる欠陥形成状態の差やエピ成長中の成長温度、圧力などの成長条件による差を評価し、それぞれの条件変化が各準位に対してどのような変化をもたらすかを調査した。ここでは、従来報告されている深い準位とほぼ同じエネルギー位置に、E1、E2、E4、E5がそれぞれ観測された。しかしながら、フィリングパルス時間 t_p に対する挙動を解析すると、転位密度と相関があり、転位線上に分布しているとする従来報告と異なる部分もあった。エピの成長条件との相関としては、概ね結晶性を悪くする方向へ成長条件を変更すると、深い準位の密度も増加する傾向にはあった。

そして第5章で、GaN エピタキシャル層中の電気的特性と結晶欠陥の関係を、ドーピング効率、移動度、転位密度との観点から調査してみたところ、Si基板上の n-GaN は転位密度がサファイア上のものより一桁高いためにこれらがアクセプターとしてドナーを補償するため、 10^{17}cm^{-3} 以下の不純物をドーピングしてもドーピング効率が大幅に低下してしまうことがわかった。加えて、この場合、移動度も大きく低下することがわかり、従来の転位密度との相関を示したモデルとほぼ一致した。これは、アクセプターとして作用する転位芯による電子の散乱が、キャリア濃度低下に伴い支配的になってくるためと考えられ、通常の補償比を検討したモデルにも合わなくなることも確認された。

以上、本研究の結果として、MOVPE 法により成長した GaN エピタキシャル層について、使用した基板材料の違いにより、ドーピング特性が異なるうえ、深い準位の種類と密度、キャリア濃度や移動度の温度依存性が異なること、そしてエピ成長温度や圧力など成長条件自体の違いが、いくつかの異なる深い準位の密度の差として現れることを見いだした。今後、得られた知見が活かされ、更なる調査の上、各種デバイス特性を向上させるための一助になることを期待したい。