

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	AlGaIn/GaN系HEMTにおけるオーミック電極のコンタクト抵抗低減に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	武井優典
Author(English)	Yusuke Takei
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10218号, 授与年月日:2016年3月26日, 学位の種類:課程博士, 審査員:筒井 一生,若林 整,渡辺 正裕,大見 俊一郎,角嶋 邦之,羽田野 涉
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10218号, Conferred date:2016/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 系 HEMT におけるオーミック  
電極のコンタクト抵抗低減に関する研究

2016 年 3 月

東京工業大学大学院 総合理工学研究科

物理電子システム創造専攻

武井 優典

指導教員：筒井 一生 教授

## 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1-18</b>
1.1 背景	2
1.2 パワーデバイスに期待される役割	3
1.3 ワイドバンドギャップ半導体のパワーデバイスへの期待	4
1.4 GaN デバイスと SiC デバイスの比較	5
1.5 AlGaIn/GaN ヘテロ構造による 2DEG 発生モデル	7
1.6 AlGaIn/GaN 系 HEMT の課題	8
1.7 AlGaIn/GaN HEMT へのオーミックコンタクトの現状	10
1.8 ノンアロイ型電極材料の抵抗値が高い原因と AlGaIn 層厚におけるトレードオフ	13
1.9 本研究の目的	15
1.10 本章の参考文献	15
<b>第 2 章 試料作製方法及び評価方法</b>	<b>19-35</b>
2.1 本研究で用いた基板	20
2.2 試料作製方法	20
2.3 実験装置	22
2.3.1 オゾン酸化装置	22
2.3.2 電子線リソグラフィ	23
2.3.3 原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope : AFM)	23
2.3.4 エリプソメトリー	24
2.3.5 XPS	25
2.3.5.1 XPS の原理	25
2.3.5.2 XPS の結果からの組成比計算方法	26
2.3.5.3 XPS の結果からの膜厚計算方法	26
2.3.6 van der Pauw 法	27
2.3.7 TLM 法	29
2.4 シミュレーション方法	32
2.4.1.1 Polarization model	32
2.4.1.2 Schrodinger-Poisson model	33
2.5 本章の参考文献	34

<b>第 3 章</b>	<b>コンタクト抵抗の AlGa<sub>N</sub> 層厚依存性</b>	<b>36-62</b>
3.1	はじめに	37
3.2	オゾン酸化エッチング法による AlGa <sub>N</sub> 層のエッチング	37
3.2.1	オゾン酸化エッチング法について	37
3.2.2	オゾン酸化エッチング法による AlGa <sub>N</sub> 層エッチングの最適化	38
3.2.3	オゾン酸化エッチング法による AlGa <sub>N</sub> 層の表面モフォロジーの変化	41
3.2.4	オゾン酸化前後での AlGa <sub>N</sub> 層の組成比の変化と酸化層厚の XPS による評価	42
3.2.5	オゾン酸化エッチング法による 2DEG 濃度の AlGa <sub>N</sub> 層厚依存性の評価	47
3.3	コンタクト抵抗の AlGa <sub>N</sub> 層依存性	49
3.3.1	デバイス作製方法	49
3.3.2	Mo/Al/Ti 電極の TEM 観察による評価	51
3.3.3	I-V 特性のアニール温度、AlGa <sub>N</sub> 層厚依存性	52
3.3.4	コンタクト抵抗のアニール温度依存性	55
3.3.5	コンタクト抵抗の AlGa <sub>N</sub> 層厚依存性	57
3.4	AlGa <sub>N</sub> /Ga <sub>N</sub> HEMT へのオーミックコンタクトの低抵抗化に向けて	58
3.5	本章のまとめ	61
3.6	本章の参考文献	61
<b>第 4 章</b>	<b>Metal/AlGa<sub>N</sub> 界面への凹凸構造導入による低抵抗化の実現</b>	<b>64-79</b>
4.1	Metal/AlGa <sub>N</sub> 界面への凹凸構造導入の意義	65
4.2	Metal/AlGa <sub>N</sub> 界面への凹凸構造導入による 2DEG 濃度シミュレーション	65
4.2.1	凹凸構造導入による凹凸部の高さを変化させたときの 2DEG 濃度分布	66
4.2.2	凹凸構造導入による凹凸部の幅を変化させたときの 2DEG 濃度分布	68
4.2.3	凹凸 AlGa <sub>N</sub> 構造の形状を変化させたときの 2DEG 濃度分布	69
4.3	Metal/AlGa <sub>N</sub> 界面への凹凸構造導入	71
4.3.1	凹凸構造導入のプロセスにおける問題点	71
4.3.2	AlGa <sub>N</sub> 層への凹凸構造導入のための RIE 条件探索	71
4.3.3	RIE によりエッチングされた AlGa <sub>N</sub> 層厚とコンタクト抵抗の関係	73
4.3.4	AlGa <sub>N</sub> 層への凹凸構造導入プロセス	74
4.3.5	AlGa <sub>N</sub> 層へ導入した凹凸構造	75
4.4	Metal/AlGa <sub>N</sub> 界面への凹凸構造導入による抵抗低減効果	76

4.5	本章のまとめ	79
4.6	本章の参考文献	79
<b>第5章</b>	<b>Metal/AlGaN 界面への凹凸構造導入による低抵抗化のメカニズム</b>	<b>80-95</b>
5.1	はじめに	81
5.2	最適な凹凸高さの検討	81
5.3	AlGaN 層への微細凹凸構造導入	83
5.3.1	AlGaN 層へ導入した凹凸パターン	83
5.3.2	AlGaN 層への微細凹凸構造導入の実験プロセス	85
5.3.3	微細化に向けた EB レジストプロセスの最適化	87
5.3.4	微細化した AlGaN 層凹凸構造の評価	88
5.4	AlGaN 層への微細凹凸構造導入による抵抗低減効果	89
5.5	凹凸構造導入による抵抗低減のメカニズムの考察	91
5.6	本章で得られた結論	98
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>99-105</b>
6.1	本研究で得られた結論	100
6.2	今後の展望	101
6.3	本章の参考文献	102
	本研究に関する発表	103
	謝辞	105

# 第 1 章

## 序論

## 1.1 背景

科学技術の発展、経済活動の拡大によって人類のエネルギー消費量は劇的に増加してきている。図 1.1[1.1]に示すように、冷暖房需要の増加、IT 革新によるコンピューターや通信機器の普及により、電力の使用量は増加しており、今後も電気の重要性はますます高まることが予想される。エネルギー消費は同時に二酸化炭素などといった温室効果ガスを排出する。昨今、人口増加と経済発展により温室効果ガス排出量は急増しており、今後さらに増大することは目に見えて明らかであり、エネルギー消費の抑制は世界にとって極めて重要な克服すべき課題である。

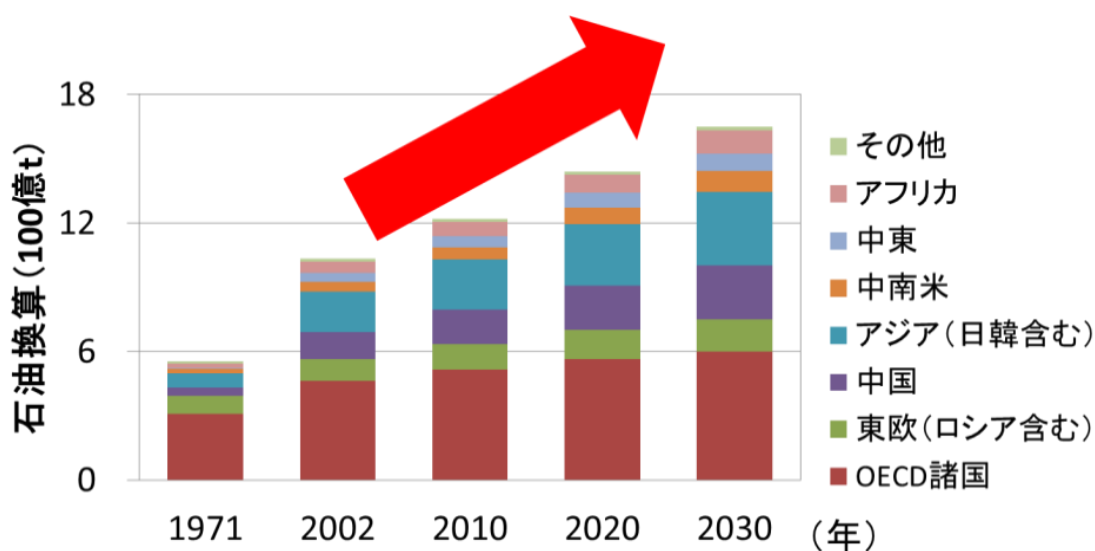


図 1.1 世界の一次エネルギー消費量の推移と見通し [1.1]

## 1.2 パワーデバイスに期待される役割

温室効果ガス排出量を低減するための対策は大きく分けて2つある。1つは発電の分野において、エネルギー源に石油などの化石燃料を用いることなく温室効果ガス排出量の少ないグリーンエネルギーとすることである。このためには、風力や風量、太陽光の再生可能エネルギー、原子力などへのエネルギー転換があげられる。しかし、エネルギー源の転換には長い時間を要する。よって、温室効果ガス排出量を低減するためのもう1つの対策として、エネルギー消費量を劇的に抑制することが早急の課題となる。現在、日本の一次エネルギー消費のうち、電気エネルギーの発生に使われる割合は益々増加する傾向にある。さらに、一次エネルギーの相当部分は電気エネルギーに変換され、図1.2のように電子、電気機器、動力、照明、熱として利用されている。それらの効率の良い使い方、電力系統・配電系との調和のとれた連携には、電力損失が少なく使い勝手かよく、コスト的にも負担が少ないパワーエレクトロニクスが必要である。このエネルギー変換にはインバータと総称される電力変換システムが利用され、ほぼすべてのエネルギー流通、消費にかかわっているため、インバータ変換損失を劇的に低減することは省エネルギーの核といえる。このインバータ用素子にはパワートランジスタが使用される。つまり、パワーエレクトロニクスが電力を効率よく制御する技術であるなら、パワーデバイスはその制御技術をサポートするキーコンポーネントのひとつとなる。したがって、インバータの電力変換効率を高めるため電力損失を限りなく減少させることがパワーデバイスの課題である。

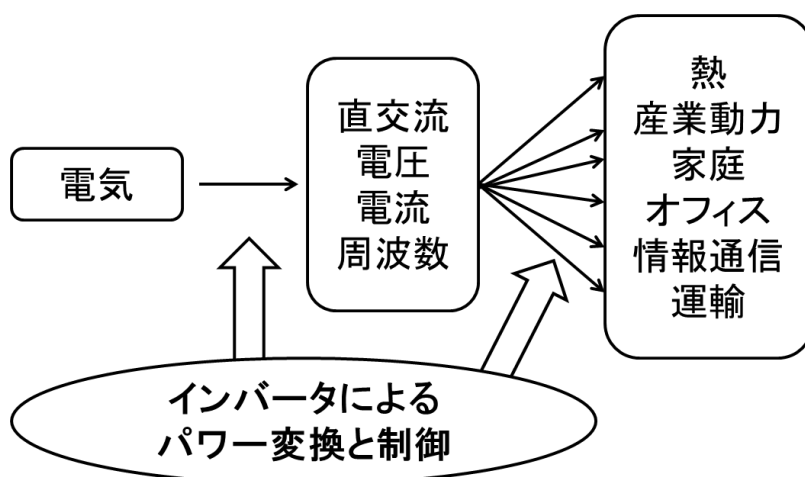


図 1.2 エネルギー流通と電力変換



### 1.3 ワイドバンドギャップ半導体のパワーデバイスへの期待

表 1.1 Si とワイドバンドギャップ半導体の基本物性値 [1.2]

	Si	4H-SiC	GaN
バンドギャップ[ev]	1.1	3.3	3.4
比誘電率	11.8	9.7	9.0
絶縁破壊電界[ $10^6$ V/cm]	0.3	2.5	3.3
電子移動度[ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	1400	850	900 <sup>※</sup>
電子飽和速度[ $10^7$ cm/s]	1.0	2.7	2.7
熱伝導率[W/cm K]	1.5	4.9	2.0

※AlGaN/GaN HEMTの場合2000

Si デバイスは特性限界に近づきつつあり、ワイドバンドギャップ半導体を用いた新しいパワーデバイスへの期待が高まっている。電子デバイスの性能は半導体材料の物性値に依存する。表 1.1 に Si およびワイドバンドギャップ半導体の基本物性一覧を示す [1.2]。パワーデバイスの観点からワイドバンドギャップ半導体と Si を比較する。絶縁破壊電圧 $V_B$ は (1.1) 式で与えられる [1.3]。

$$V_B = \frac{1}{2} E_C W_D \quad (1.1)$$

ここで、 $E_C$ は絶縁破壊電界、 $W_D$ はドリフト層（パワーデバイスの耐圧を保持する層）の厚さである。この式から、破壊電圧が同じであれば、絶縁破壊電界が大きいほうがドリフト層の長さを短くできる。ワイドバンドギャップ半導体において絶縁破壊電圧は Si より 10 倍程度高いため、ドリフト層の長さをおよそ 1/10 にすることができる。また、ドリフト層濃度 $N_D$ は (1.2) 式で与えられる [1.3]。

$$N_D = \frac{\epsilon E_C}{q W_D} = \frac{2\epsilon E_C^2}{q V_B} \quad (1.2)$$

ここで、 $\epsilon$ は誘電率、 $q$ は荷電粒子の電荷である。この式より、不純物濃度は絶縁破壊電界の 2 乗に比例するため、ワイドバンドギャップ半導体では、Si と比べ 2 桁多くドーピングすることが可能となる。

次に、オン抵抗（通電時の抵抗） $R_{ON}$ は (1.3) 式で与えられる。

$$R_{ON} = \frac{4V_B^2}{\epsilon\mu_n E_C^3} \quad (1.3)$$

ここで、 $\mu_n$ は電子の移動度である。この式より、電力変換時に熱損失の原因となるオン抵抗は絶縁破壊電圧の3乗に反比例することとなり、同じ破壊電圧であれば、ワイドバンドギャップ半導体のオン抵抗は、Siと比較して約1/1000にすることができる。このことは、損失が大幅に低減できることを意味する。さらにSiと比較して、ワイドバンドギャップ半導体は電子飽和速度が高いことから、高速応答が可能である。また、熱伝導が大きいことから、熱拡散がよく、またSiの3倍以上の禁制帯幅を持つため、高温環境でもキャリア密度変動が非常に小さく、安定動作するデバイスに本質的に適している。よって、ワイドバンドギャップ半導体では冷却機構が簡易化できる。以上のように、物性的な特徴から、ワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスが実現した場合、デバイス全体が小型・軽量化・低損失・高効率・冷却系の簡易化など、現状のSi半導体の性能を超える、高性能パワーデバイスの実現が期待できる。

## 1.4 GaN デバイスと SiC デバイスの比較

次世代パワーデバイスとして、SiC や GaN が盛んに研究開発されており、両者の利点・欠点が議論されている。Si や SiC パワーデバイスは、破壊電圧、オン抵抗で有利な縦型構造が用いられているが、GaN は現状、サファイア、Si 等の異種基板上に作製したエピ層を用いる必要があり、現状では実用化されているのは横型デバイスに限られる。図 1.3 [1-4]は、Si およびワイドバンドギャップ半導体である SiC、GaN の破壊電圧・オン抵抗のトレードオフ特性を比較したものであるが、この図によると、横型でも GaN は SiC に比べ十分低いオン抵抗が実現できることが示されている。以上より、基本物性からみると、GaN は SiC よりも本質的には次世代パワーデバイスとして期待される材料である[1.5][1.6]。

また、これらの性能比較は、いずれもバルク材料のものであるが、GaN の場合、後述するように AlGaIn/GaN ヘテロ接合による2次元電子ガス層(2DEG)が形成でき、その高移動度・高電子密度を駆使し、低いオン抵抗が実現できる。この点は SiC では事実上困難な大きな特長である。さらに、AlGaIn/GaN 系デバイスは、青色 LED[1.7]などで大量に生産されており、関連プロセス技術、生産技術が進歩している。また、GaN エピ層は、Si 基板上に成長できることから、高口径化・低価格化が可能であるため、

コスト的なメリットも GaN の方が高い。近年では 200mm の Si ウェハ上の AlGaN/GaN エピ基板においては、面内不均一が 5% 以下かつウェハ割れも 2% と高品質な基板を作製できており [1.8]、また 300mm の Si 基板を適用する研究開発も進んでいる [1.9]。一方、SiC 基板の成長法は、SiC には常圧において化学量論組成をもつ液相がないために気相による成長（昇華法）しかなく大口径化が難しく [1.10]、大量生産、低価格化にはまだ課題がある。以上の観点から、SiC と比較して、GaN はパワーデバイス用半導体として優位性を多く持っている。

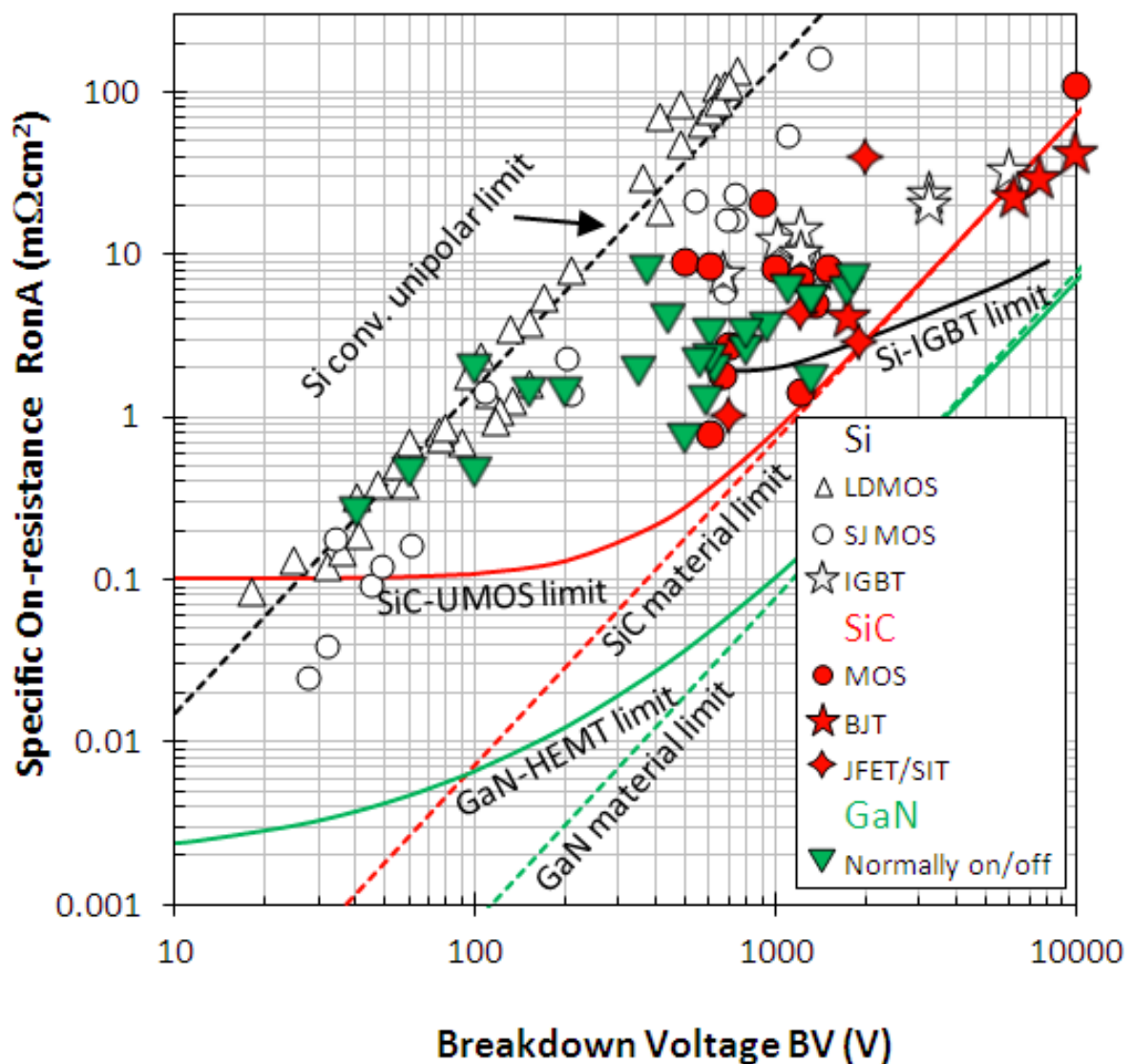


図 1.3 Si、SiC、GaN の破壊電圧・オン抵抗のトレードオフ特性比較 [1.4]

しかし、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT は Si 基板上に作製されており、その耐圧は形成する Ga<sub>N</sub> の層厚で決まってしまう[1.11]。そのため、現状は耐圧が 1000V 以下にとどまっています。一方、SiC は熱伝導率が高く SiC 基板上に縦型構造を形成するため高電圧・大電流用途に適している。そのため、Ga<sub>N</sub> は 1000V 以下で Si では実現できない高周波動作の民生応用を、SiC は 1000V 以上でより大電力の応用で棲み分けがされている[1.12]。

## 1.5 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ構造による 2DEG 発生モデル

前節までで述べたように Ga<sub>N</sub> 系デバイスはパワーデバイスとして期待できる材料である。さらに、Ga<sub>N</sub> は、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ構造での 2DEG の存在が示され[1.13]、移動度の増大が確認された。図 1.4 に、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合のエネルギーバンド構造を示す[1.14]。Ga<sub>N</sub> 結晶の内部では、イオン半径の大きな Ga 原子 (0.62 Å) と小さな N 原子 (0.11 Å) が互いにやや歪んだ正四面体配置に整列するため、自発分極が発生する。また、Ga<sub>N</sub> の上にボンド長の短い AlGa<sub>N</sub> 薄膜を成長すると、AlGa<sub>N</sub> 薄膜に発生する引っ張り歪みによって piezo 分極がさらに加わる。この二つの分極効果により、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合の界面に正の固定電荷が発生し、これに対応して Ga<sub>N</sub> 内には図 1.5 のように自由電子からなる 2DEG 層が誘起される[1.15]。また、2DEG の濃度は AlGa<sub>N</sub> 膜厚依存性があり、AlGa<sub>N</sub> 膜厚 5 nm ほどでほぼ枯渇することもわかる。

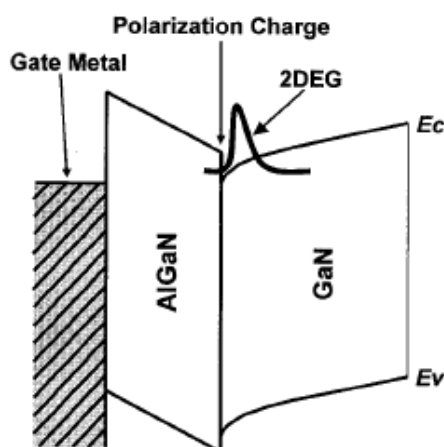


図 1.4 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合による 2次元電子ガス (2DEG) 層の発生 [1.14]

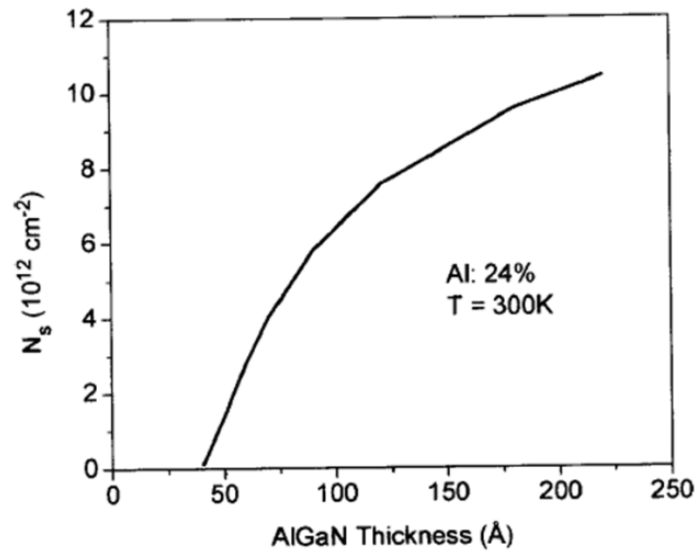


図 1.5 2DEG 濃度の AlGaN 膜厚依存性[1.15]

## 1.6 AlGaN/GaN 系 HEMT の課題

1.4 節にて、GaN 横型デバイスのオン抵抗は非常に低くできることを述べた。しかし、現状はまだ性能を生かし切れていない。図 1.6 に GaN 横型デバイスの現状のオン抵抗と理論値との比較を示す。図中の黒点は報告されているオン抵抗である[1.16-1.21]。また、図中の黒点線は図 1.3 の H. Ohashi らによって示されている、横型 GaN デバイスの限界値[1.4]である。このように、現状のデバイスのオン抵抗は理論限界に比べて 1 桁以上高い状況にある。

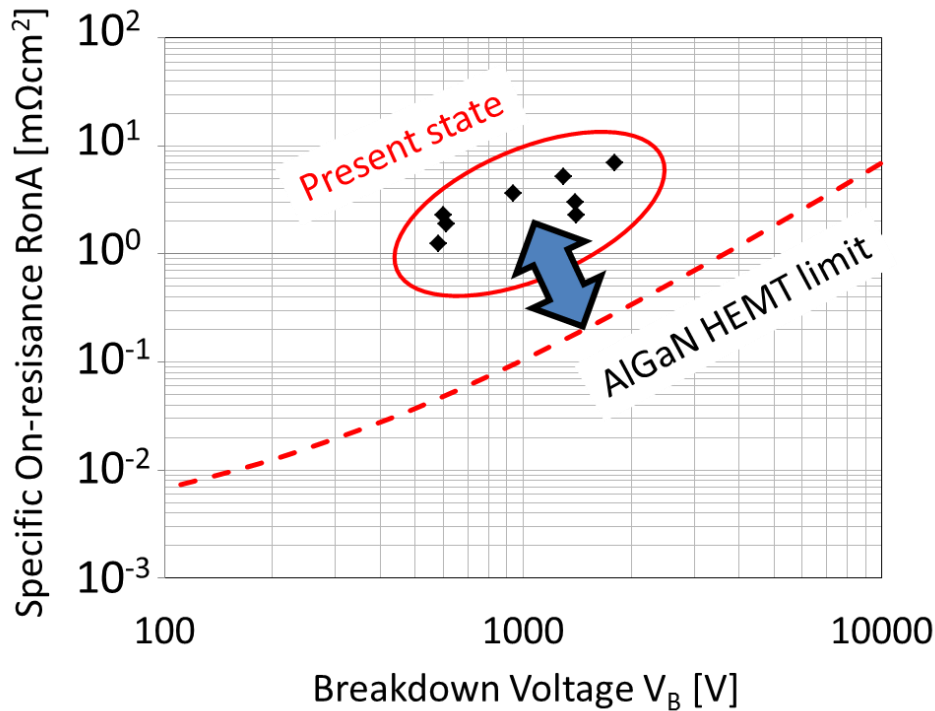


図 1.6 GaN 横型デバイスの現状のオン抵抗（赤点線）と限界値（黒点）との比較 [1.4, 1.16-1.21]

このように理論限界と大きく異なる原因としては、N. Tipirneni らによって示されている、(1.4)式[1.22]によって説明することができる。

$$R_{ONA} = \left( 2R_C + R_{SH} \times \frac{V_B}{E_C} \right) \times \left( \frac{V_B}{E_C} + \frac{2R_C}{R_{SH}} \right) \quad (1.4)$$

この式の  $R_C$  はコンタクト抵抗 [ $\Omega$ mm]、 $R_{sh}$  はチャネルのシート抵抗 [ $\Omega$ /sq] である。なお、 $E_C$  も現状の横型デバイスでは表面の局所的な絶縁破壊が避けられず物性値 (3.3 MV/cm) を生かし切れておらず、実験的に求められた  $E_C$  (0.8 MV/cm [1.23]) を使用して計算を行っている。また、シート抵抗は 350  $\Omega$ /sq を使用している[1.22]。この式から計算したオン抵抗を図 1.7 に示す。図中のオレンジ、青、赤、緑の実線は  $R_C$  がそれぞれ 2  $\Omega$ mm、1  $\Omega$ mm、0.5  $\Omega$ mm、0.1  $\Omega$ mm の場合の値であるが、コンタクト抵抗を 1~2  $\Omega$ mm とすると、比較的实验値とよく合う。また、1.4 節にて、GaN は 1000V 以下の民生応用にて SiC との棲み分けが行われていくと述べたが、この領域において、コンタクト抵抗を 0.1  $\Omega$ mm まで低減すると 2  $\Omega$ mm の場合と比較して、オン抵抗を 77% (600V) ~63% (1000V) 低減することが可能となり、コンタクト抵抗低減は重要な課題といえる。

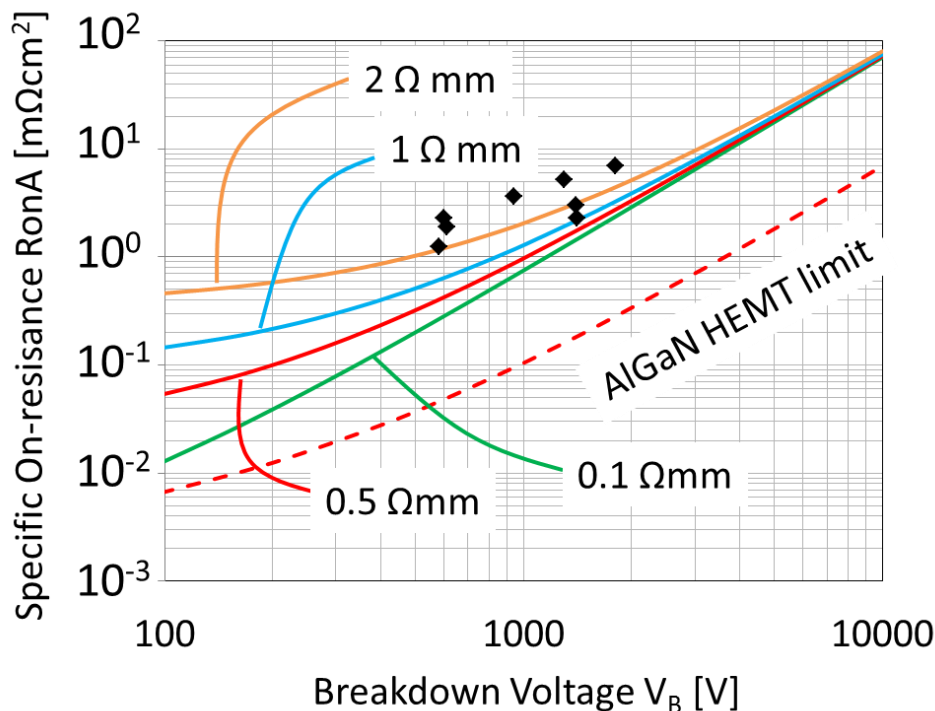


図 1.6 GaN 横型デバイスの現状のオン抵抗 (赤点線) と限界値 (黒点) との比較 [1.4, 1.16-1.21]  
 図中の実線は N. Tipirneni らの計算式[1.22] からコンタクト抵抗を変化させて計算したもの

## 1.7 AlGaN/GaN HEMT へのオーミックコンタクトの現状

本節では、現状のオーミックコンタクトについて述べる。

現在広く用いられている電極材料としては、Au/X/Al/Ti (X: Mo[1.24], Ni[1.25], Ta[1.26]) を堆積後、アニールを行うことで、 $0.5 \Omega \text{mm}$  以下の低抵抗を容易に得ることができている。

L. Wang らの報告 [1.24] ( $0.176 \Omega \text{mm}$ ) によると、低抵抗化のメカニズムとして、図 1.8 の白矢印で示された AlGaN 層中の貫通転移が低抵抗化に大きく寄与している。貫通転移に沿って、Ti と AlGaN が局所的なアロイ化を起こし TiN islands が形成される。また TiN と AlGaN 層の間には Au shell が形成される。これにより電子は TiN islands を介して 2DEG へ接近することが可能になり低抵抗が実現可能とされている。

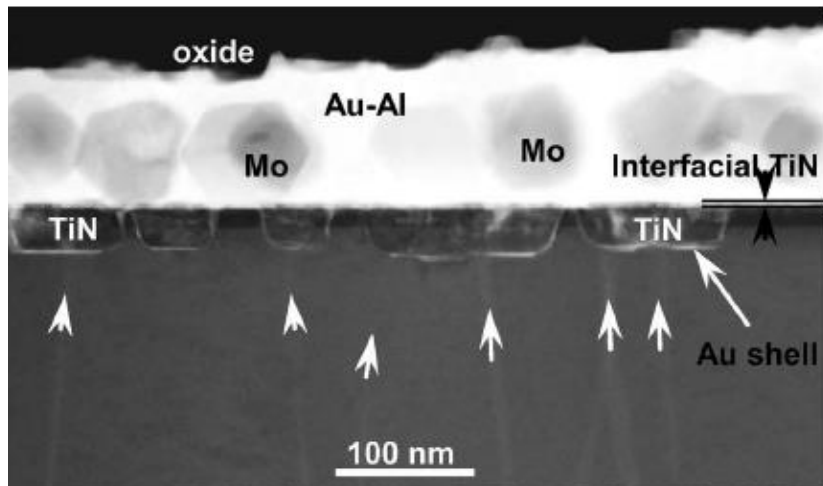


図 1.8 Au/Mo/Al/Ti 電極による低抵抗オーミックコンタクト形成後の TEM 像[1.24]

しかし、このような局所的な貫通転移を介したオーミックコンタクトは、今後基板の品質があがり貫通転移が減少してくるとオーミックコンタクトを取りにくくなることが予想される。また、制御が難しいアロイ化によって低抵抗を得ているため、更なる低抵抗化が難しいという問題もある。

また、M. Piazza[1.27]らの報告によると、340°Cでアニールを長時間行うと、Au が結晶中へ拡散していくことでデバイス特性が劣化してしまい、図 1.9 のようにコンタクト抵抗が上昇していくことも明らかになっている。

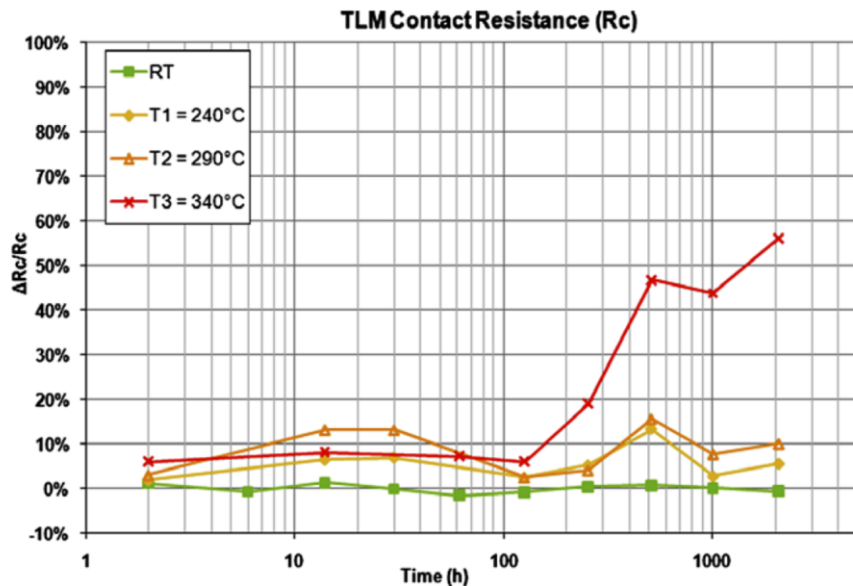


図 1.9 Au を含むオーミックコンタクトにおける長時間低温アニールによるコンタクト抵抗の上昇[1.27]



以上のような観点から、Au を使用したオーミックコンタクトは容易に  $0.5 \Omega \text{ mm}$  以下の低抵抗が容易に得られるものの、アロイ化の制御が難しいといった点やデバイス劣化の点から Au を使用しないオーミックコンタクトが求められる。

現状、Au を使用しないオーミックコンタクトは、低仕事関数金属である Al/Ti や Al/Ta 系の積層電極が広く研究されている [1.28-1.30]。この積層電極のアニール後の TEM 像を図 1.10 に示す。図 1.8 と大きく異なり、高温熱処理を行っても電極と AlGaN 層とで局所的な合金化は起こっていない。本論文ではこのような電極材料をノンアロイ型と定義する。こういった系の電極材料において、Al/Ti (Ta) 電極の役割は大きく、AlGaN 層から窒素を引き抜き Al-Ti-N 系の反応層が形成されるという報告が多数ある [1.31-1.33]。窒素空孔は、AlGaN 中に浅い準位を形成し、ドナーとして機能し、これにより低抵抗が得られるといわれている。

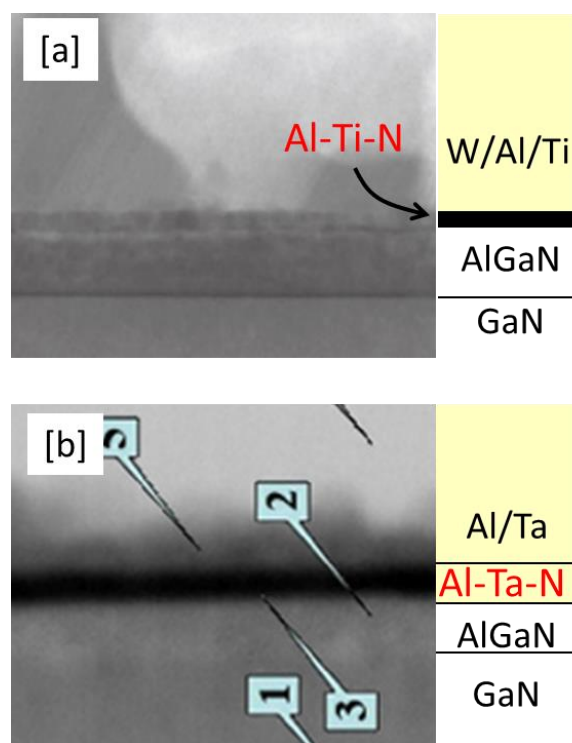


図 1.10 (a)Ti/Al [1.28]、(b)Ta/Al [1.29]系電極材料における高温アニール後の TEM 像

これらの電極材料のコンタクト抵抗値を表 1.2 に示す。Au を使ったオーミックコンタクトでは容易に  $0.5\Omega\text{mm}$  以下を得ることができていたが、それと比べると抵抗値が高く、ノンロイ型電極材料におけるコンタクト抵抗低減は重要な課題であるといえる。

表 1.2 Ti/Al や Ta/Al 系ノンアロイ電極材料におけるコンタクト抵抗値の報告例

	$R_c(\Omega \cdot \text{mm})$	ref
Pt/Ni/Al/Ti (50/40/60/20nm)	0.60	[1.28]
W/Al/Ti (20/100/20nm)	0.65	[1.29]
Ta/Al/Ta (200/280/10nm)	0.28	[1.30]

## 1.8 ノンアロイ型電極材料の抵抗値が高い原因と AlGaN 層厚におけるトレードオフ

以上のように、オン抵抗を考えた時、コンタクト抵抗低減は重要な課題であるが、ノンアロイ型電極材料によるコンタクト抵抗値は高く、抵抗値を低減しなければならない。この材料系の抵抗値が高い原因として、オーミックコンタクト形成を考えた際、図 1.11 のように電極と 2DEG 層の間にはワイドバンドギャップの AlGaN 層が存在し、これを挟んでオーミックコンタクトを形成している。AlGaN 層はバリアとして機能してしまうため薄い方が望ましいが、一方薄くすると図 1.5 のように AlGaN 層を薄くすると 2DEG 濃度が低下してしまうといったトレードオフ関係があることが予想される。

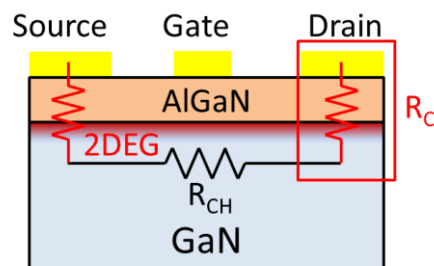


図 1.11 AlGaN/GaN HEMT におけるオーミックコンタクト

これらのことをもとにコンタクト抵抗成分を AlGaN 層厚への依存性の有無でモデル化すると図 1.12 のようになると考えられる。また、各抵抗成分の相対関係を図 1.13(a)~(c)に示す。 $R_{C_{Metal/AlGaN}}$ は Metal/AlGaN 界面での障壁による抵抗で、これは AlGaN 層厚によらず一定 (図 1.13(a)) と考えられる。次に、 $R_{C_{AlGaN}}$ は AlGaN 層が厚いほど抵抗値が高くなっていくと予想される (図 1.13(a))。最後に、 $R_{C_{2DEG}}$ はアクセス先の 2DEG への抵抗成分と考えており、図 1.13(b)に示したように 2DEG 濃度は AlGaN 層厚を薄くすると減少していき、5 nm ほどで枯渇してしまう。そのため、抵抗としてみると AlGaN 層が薄くなると高くなっていくことが予想される。一方、2DEG 濃度は AlGaN 層厚が厚くなると高くなっていくが、厚い領域での上昇は緩やかである。そのため、抵抗としてみると、低く飽和傾向を示すことが予想される。これらの 3 つの抵抗成分の和が  $R_c$  になり、図 1.13(c)に示すように何らかの極値を持つ形が予想される。一方、いずれかの抵抗成分が他の抵抗成分に比べ小さくなると、この形は変化することが考えられる。

このように、コンタクト抵抗低減には AlGaN 層厚依存性があることが予想され、これを明らかにすることは低抵抗化の指針を得る上で重要であるといえる。

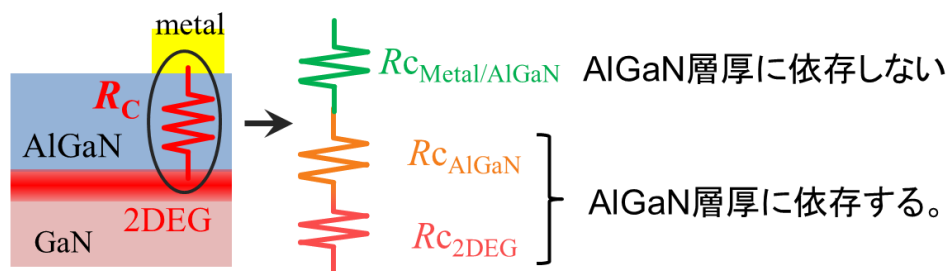


図 1.12 ノンアロイ型電極材料におけるオーミックコンタクトの抵抗成分モデル

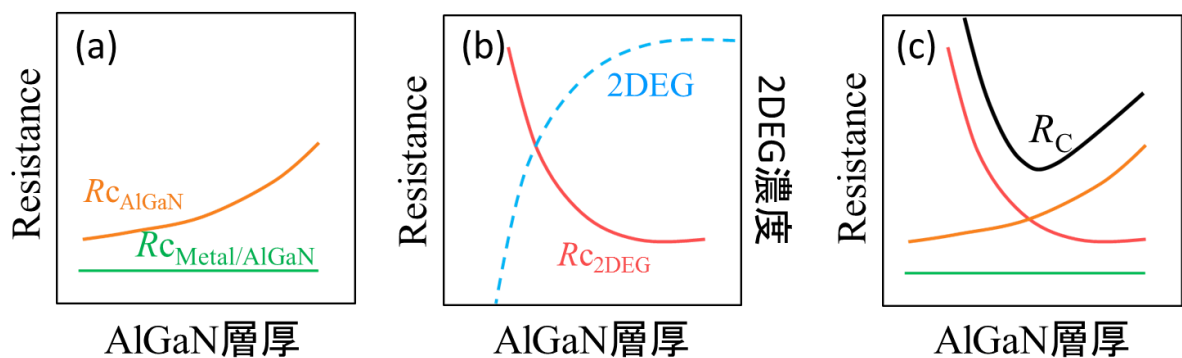


図 1.13 各抵抗成分の AlGaN 層厚依存性の概念図

(a)  $R_{C_{AlGaN}}$  と  $R_{C_{Metal/AlGaN}}$ 、(b)  $R_{C_{2DEG}}$

(c) 3 つの抵抗成分の和である  $R_c$

## 1.9 本研究の目的

AlGaIn/GaN 系 HEMT へのノンアロイ型電極材料におけるコンタクト抵抗低減は重要な課題である。この系の電極材料においては、電極と 2DEG の間にワイドバンドギャップのバリアとして機能する AlGaIn 層があり、なおかつ 2DEG 濃度も AlGaIn 層厚で変化するというトレードオフ関係が低抵抗化の足枷になっていると考えられるが、明確なことは明らかになっていない。そこで本研究では、まずこのトレードオフ関係を明らかにしていくと共に、モデルの妥当性を示していく。そしてこのモデルからコンタクト抵抗が高い要因を明らかにし、それを低減するためにどういったことを行えば低抵抗化が目指せるかという指針を立てることを目的とした。更に、このトレードオフ関係を克服する新しい提案を行い、この提案による低抵抗化の実証を行うことも目的とした。

## 1.10 本章の参考文献

- [1.1] IEA World Energy Outlook 2004
- [1.2] 大橋 弘通, 葛原 正明 編著 “パワーデバイス” 丸善株式会社 (2011)
- [1.3] S. M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.”, (Wiley Interscience, 1981)
- [1.4] H. Ohashi, "Power devices now and future, strategy of Japan", Proceedings of the 2012 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs 3-7 June (2012) – Bruges, Belgium
- [1.5] 吉田 清輝, “GaN を用いた電子デバイス”, 応用物理学会誌, 第 68 巻, 第 7 号, p787 (1999)
- [1.6] 吉田 清輝, “ハイパワー AlGaIn/GaN HFET”, 電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス J86-C(4), 412 (2003)
- [1.7] S. Nakamura, M. Senoh and T. Mukai, “High - power InGaIn/GaN double - heterostructure violet light emitting diodes”, Jpn. J. Appl. Phys., **32**, L8 (1993)
- [1.8] S. L. Selvaraj, A. Kamath, W. Wang, Z. Chen, K. T. Win, T. S. Phua and G. Q. Lo, “Process Uniformity and Challenges of AlGaIn/GaN MIS-HEMTs on 200-mm Si (111) Substrates Fabricated with CMOS-Compatible Process and Integration”, Journal of Electronic Materials, **44**, 2679 (2015)
- [1.9] 日経エレクトロニクス 編, “パワー半導体4.0”, no1150, p40, 日経BP社, (2014)

- [1.10] 日経エレクトロニクス 編, “次世代パワー半導体 存在感増すSiCとGaN,” 日経BP社, 2012
- [1.11] N. Ikeda, S. Kaya, L. Jiang, Y. Sato, S. Kato and S. Yoshida, “High power AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET with a high breakdown voltage of over 1.8 kV on 4 inch Si substrates and the suppression of current collapse”, Power Semiconductor Devices and IC's, 2008. ISPSD '08. 20th International Symposium on 287 (2008)
- [1.12] 上田 哲三, 高橋 理, 海本 博之, 神澤 好彦, 澤田 和幸, 山崎 晃, “車載応用に向けての次世代パワーデバイス – GaN, SiC”, Panasonic technical journal 61(1), 67 (2015)
- [1.13] M. Asif Khan, J. M. Van Hove, J. N. Kuznia and D. T. Olson, “High electron mobility Ga<sub>N</sub>/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N heterostructures grown by low - pressure metalorganic chemical vapor deposition”, Appl. Phys. Lett., **58**, 2408 (1991)
- [1.14] 葛原 正明, “窒化物半導体トランジスタへの期待と将来展望”, 電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス J90-C(12), 960 (2007)
- [1.15] D. Qiao, L. Jia, L. S. Yu, P. M. Asbeck, S. S. Lau, S.-H. Lim, Z. Liliental-Weber, T. E. Haynes and J. B. Barner, “Ta-based interface ohmic contacts to AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures”, J. Appl. Phys. **89**, 5543 (2001)
- [1.16] Y. Ohmaki, M. Tanimoto, S. Akamatsu and T. Mukai, “Enhancement-Mode AlGa<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High Electron Mobility Transistor with Low On-State Resistance and High Breakdown Voltage”, Jpn. J. Appl. Phys., **45**, 1168 (2006)
- [1.17] W. Saito, T. Nitta, Y. Kakiuchi, Y. Saito, K. Tsuda, I. Omura and M. Yamaguchi, “Suppression of Dynamic On-Resistance Increase and Gate Charge Measurements in High-Voltage Ga<sub>N</sub>-HEMTs With Optimized Field-Plate Structure”, Electron Devices, IEEE Transactions on, **54**, 1825 (2007)
- [1.18] C. S. Suh, Y. Dora, N. Fichtenbaum, L. McCarthy, S. Keller and U. K. Mishra, “High-Breakdown Enhancement-Mode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs with Integrated Slant Field-Plate”, Electron Devices Meeting, 2006. IEDM '06. International., 1, (2006)
- [1.19] N. Ikeda, Y. Niiyama, H. Kambayashi, Y. Sato, T. Nomura, S. Kato and S. Yoshida, “Ga<sub>N</sub> Power Transistors on Si Substrates for Switching Applications”, Proceedings of the IEEE, **98**, 1151 (2010)

- [1.20] F. Medjdoub, J. Derluyn, K. Cheng, M. Leys, S. Degroote, D. Marcon, D. Visalli, M. V. Hove, M. Germain and G. Borghs, "Low On-Resistance High-Breakdown Normally Off AlN/GaN/AlGaN DHFET on Si Substrate", *Electron Device Letters, IEEE*, **31**, 111 (2010)
- [1.21] O. Seok, W. Ahn, M.-K. Han and M.-W. Ha, "High-breakdown voltage and low onresistance AlGaIn/GaN on Si MOS-HEMTs employing an extended tan gate on HfO<sub>2</sub> gate insulator", *Electronics Letters*, **49**, 425, (2013)
- [1.22] N. Tipirneni, A. Koudymov, V. Adivarahan, J. Yang, G. Simin and M. Asif Khan, "The 1.6-kV AlGaIn/GaN HFETs", *Electron Device Letters, IEEE*, **27**, 716 (2006)
- [1.23] N. Tsurumi, Y. Uemoto, H. Sakai, T. Ueda, T. Tanaka and D. Ueda, "GaN Transistors for Power Switching and High Frequency Applications", *Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, CSIC '08. IEEE* (2008)
- [1.24] Liang Wang, F. M. Mohammed and I. Adesida, "Formation mechanism of Ohmic contacts on AlGaIn/GaN heterostructure: Electrical and microstructural characterizations", *J. Appl. Phys.*, **103**, 093516 (2008)
- [1.25] S. Arulkumaran, S. Vicknesh, N. G. Ing, S. L. Selvaraj and T. Egawa, "Improved Power Device Figure-of-Merit ( $4.0 \times 10^8 \text{ V}^2 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ) in AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors on High-Resistivity 4-in. Si", *Appl. Phys. Express* **4**, 084101 (2011)
- [1.26] C. Wang and N. Kim, "Electrical characterization and nanoscale surface morphology of optimized Ti/Al/Ta/Au ohmic contact for AlGaIn/GaN HEMT", *Nanoscale Res Lett*, **7**, 107 (2012)
- [1.27] M. Piazza, C. Dua, M. Oualli, E. Morvan, D. Carisetti, F. Wyczisk, "Degradation of TiAlNiAu as ohmic contact metal for GaN HEMTs", *Microelectronics Reliability*, **49**, 1222 (2009)
- [1.28] Z. Liu, M. Sun, H. S. Lee, M. Heuken and T. Palacios, "AlGaIn/AlN/GaN High-Electron-Mobility Transistors Fabricated with Au-Free Technology", *Applied Physics Express*, **6**, 9 (2013)
- [1.29] M. V. Hove, S. Boulay, S. R. Bahl, S. Stoffels, X. Kang, D. Wellekens, K. Geens, A. Delabie and S. Decoutere, "CMOS Process-Compatible High-Power

Low-Leakage AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MISHEMT on Silicon”, IEEE Electron Device Lett, **33**, 667 (2012)

[1.30] A. Malmros, H. Blanck and N. Rorsman, ”Electrical properties, microstructure, and thermal stability of Ta-based ohmic contacts annealed at low temperature for Ga<sub>N</sub> HEMTs”, Semicond. Sci. Technol, **26**, 075006 (2011)

[1.31] S. Ruvimov, Z. L. Weber, J. Washburn, D. Qiao, S. S. Lau and P. K. Chu, “Microstructure of Ti/Al ohmic contacts for n-AlGa<sub>N</sub>”, Appl. Phys. Lett. **73**, 2582 (1998).

[1.32] Z. H. Liu, S. Arulkumaran and G. I. Ng, ”Temperature dependence of Ohmic contact characteristics in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors from –50 to 200 °C”, Appl. Phys. Lett. **94**, 142105 (2009).

[1.33] L. Wang and F. M. Mohammed, ”Differences in the reaction kinetics and contact formation mechanisms of annealed Ti/Al/Mo/Au Ohmic contacts on n-Ga<sub>N</sub> and AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> epilayers”, J. Appl. Phys. **101**, 013702 (2007)

## 第 2 章

### 試料作製方法及び評価方法



## 2.1 本研究で用いた基板

本研究では、Al の組成比 25%、AlGa<sub>N</sub> 層厚 30 nm の AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> on Si(111)基板を使用した。図 1 に AlGa<sub>N</sub> 基板表面の AFM 像を示すが、結晶欠陥に対応するものと思われる穴が存在している。この欠陥密度は約  $10^9/\text{cm}^2$  であり、Si 基板上の AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 基板としては極めて一般的な値である[2.1]。

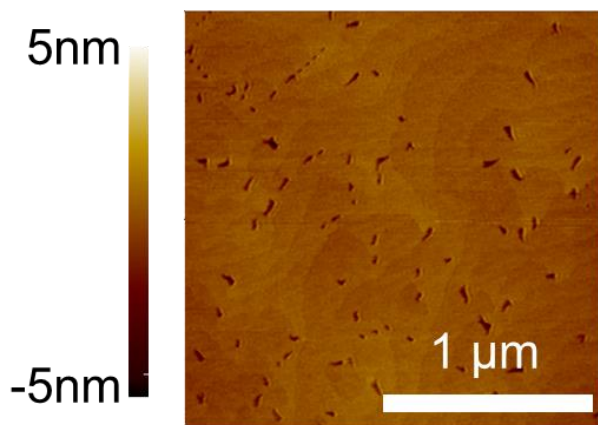


図 2.1 本研究で用いた AlGa<sub>N</sub> 基板の AFM 像

## 2.2 試料作製方法

本研究では、後述する TLM 法にてコンタクト抵抗値を評価した。本節では試料作製方法について述べるが、各章ごとでプロセスに違いがあるため、各章で共通の部分のみを本節で述べる。

図 2.2 は試料作製プロセスフローである。まず、アセトン、エタノールで有機洗浄し、図 2.2(a)のようにメサ形成用のパターニングを行った。その後、図 2.2(b)のように Cl<sub>2</sub> ガスによる RIE にて AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 層を約 50 nm エッチングした。エッチングされた領域は AlGa<sub>N</sub> が全てエッチングされたため、2DEG が枯渇する。これによりメサ形成が可能である。

そして、アセトン、エタノールでレジストを除去した後、図 2.2(c)のように PECVD (液体 TEOS(Tetra Ethyl Ortho Silicate)源)にて SiO<sub>2</sub> を 100nm 堆積した。これは完成した試料をアニールする際の保護膜として使用した。

その後、図 2.2(d)のように BHF によるコンタクトホール形成を行った。ここでは、PECVD で AlGaN 基板に SiO<sub>2</sub> を堆積する際、同時に Si 基板にも同様の SiO<sub>2</sub> を堆積しておき、その基板を BHF でエッチングする時間を変え、エリプソメトリーで SiO<sub>2</sub> の層厚を評価し、エッチングレートを算出した。

(a) メサ形成用のパターニング



(b) Cl<sub>2</sub>ガスによるRIEにてメサ形成



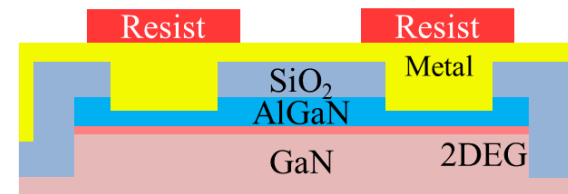
(c) SiO<sub>2</sub>(100 nm) 堆積



(d) BHFによるコンタクトホール形成



(e) 電極堆積後、電極エッチング



(f) 完成



図 2.2 TLM 測定を行うためのデバイス作製手順

その後、アセトン、エタノールでレジストを除去した後、DHFにてコンタクトホール  
の洗浄を行い、電極材料として Mo/Al/Ti をスパッタリング法によって堆積した。そ  
して、図 2.2(e)のように測定電極として残す部分をレジストで保護し、Cl<sub>2</sub> ガスによる  
RIEにて電極部以外の電極をエッチングした。なお、SiO<sub>2</sub>はCl<sub>2</sub>ガスによるRIEではエ  
ッチングされない。以上のようにしてデバイス作製を行った。

## 2.3 実験装置

本節では、デバイスを作製するにあたり使用した実験装置について述べる。

### 2.3.1 オゾン酸化装置

詳細は第 3 章にて述べるが、オゾン酸化エッチング法で AlGa<sub>N</sub> 層をエッチングする  
際、AlGa<sub>N</sub> 表面の酸化には、図 2.3 (a) の SAMCO 社製の UV-1 装置を用いた。装置は  
図 2.3 (b) のような構造をしている。図 2.3 (c) に示すように、UV-1 は残留溶剤、フ  
ォトレジストなどの有機物を基板から除去またはクリーニングするための洗浄装置で  
あり、紫外線とオゾン、ヒーターを組み合わせる。オゾンは広義の活性酸素で  
あり、フッ素に次ぐ強い酸化力を持つ。ヒーターは 300°Cまで使用することができ、こ  
の装置を用いて、基板の酸化を行った。

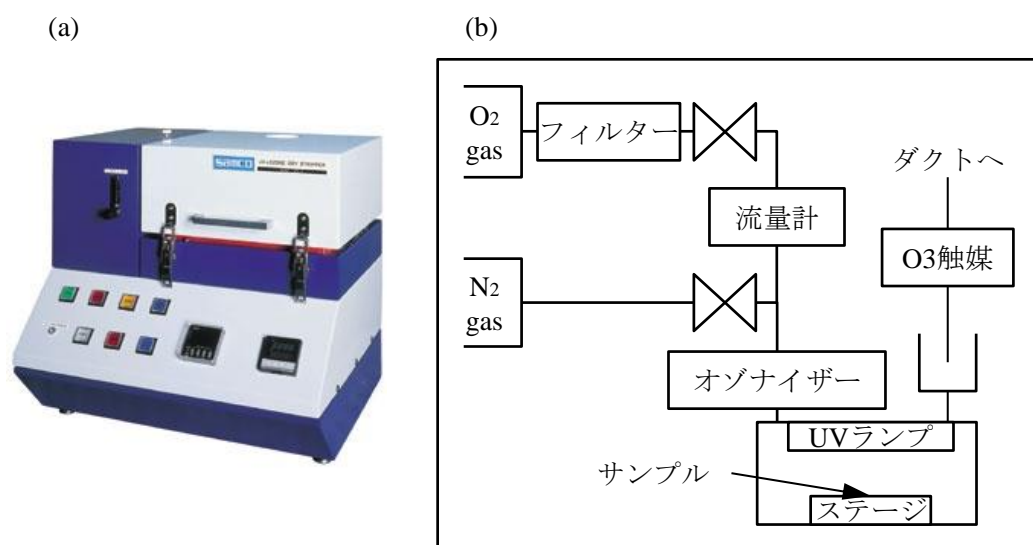


図 2.3 オゾン酸化エッチングに用いた SAMCO 社製 UV-1 Ozone Stripper

(a) 装置外観 (b) 装置内部構成 (c) 装置原理

### 2.3.2 電子線リソグラフィー

本研究では、TLMパターンを作製する際に光リソグラフィーを使用した。第5章にて凹凸構造を導入する際、数 $\mu\text{m}$ ~数百 $\text{nm}$ の加工を行うために、加工精度の問題から電子線リソグラフィーの露光装置を組み合わせて使用した。電子線リソグラフィーとは、光リソグラフィーがマスクを通して光で感光材料にパターンを転写する方式なのに対し、電子線を用いてマスクを介さずに直接描画する方式である。光を用いてパターンニングする場合はその解像度は光の波長によって制限され、本研究室の装置だと $5\mu\text{m}$ 程度の加工が限界となる。それに対して電子線の場合には波長が問題にならないほど小さいためにその加工限界はレンズの偏光系の収差で決まり数 $10\sim$ 数 $100\text{nm}$ の加工が出来ることが特徴である。

### 2.3.3 原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope : AFM)

本研究では、第3章、第4章でのエッチング条件を変えたAlGaIn基板試料表面のエッチング後の平坦性を調べるためや、第4章、第5章でのAlGaIn凹凸構造の高さの評価にAFMを用いた。

AFMは試料の凹凸を $\text{\AA}$ オーダーで検出可能であり、且つ詳細な数値解析をすることも可能であり、表面分析をする際に非常に有効な手法となりうる。測定には、DFM (dynamic force microscope) モード (タッピングモードとも呼ばれる) という、探針を高周波で強制振動させ、試料表面を走査する方法を用いた。このモードでは、探針が試料表面に断続的に接触するため摩擦が生じにくく、摩擦によるカンチレバーの変位が凹凸像に混入することがないので、精度の高い測定が可能であるAFMは垂直方向の分解能に優れているが、水平方向の分解能については探針先端の曲率半径 (本研究では曲率半径 $10\text{nm}$ の探針を使用) に依存するのでその精度について注意が必要である。基板表面の評価には、(2.1)式で与えられる二乗平均面粗さ(Root Mean Square : RMS)を出すことで評価を行った。なお、この(2.1)式から、補正がうまくいかず、本来水平なはずの面がななめになってしまうと、RMS値は大きくなることもわかる。そのため、RMS値は補正がきちんとできているか評価する指標にも使用した。

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.1)$$

( $\bar{x}$  は  $N$  個のデータ ( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ) の平均値)

### 2.3.4 エリプソメトリー

エリプソメトリーとは、光の反射によって生じる偏光状態の変化を測定して、材料の光学的特性や表面膜厚を求める方法である。一般的に、光を物質に照射した場合、入射光の偏光状態と反射光の偏光状態は異なるため、この変更状態の差から反射表面の状態を計測する。各層の複素屈折率、測定時の光の入射角、波長が既知であれば、エリプソパラメータを測定することによって膜厚を計算することができる。第 3 章にて、AlGaIn/GaN ヘテロ構造の AlGaIn 層厚を測定するためにエリプソメトリー（大塚電子株式会社製 FE-5000）を使用した。しかし、AlGaIn のパラメータが不明だったため、有効媒質近似（Effective Medium Approximation : EMA）モデルを使用し、既知なパラメータである AlN : 25%、GaN : 75% のように体積分率で混合することでパラメータを設定した。

また、AlGaIn のバンドギャップは約 4.1 eV、GaN のバンドギャップは約 3.4 eV であるため、300~365 nm 付近の波長の光を吸収してしまいフィッティングに誤差が生じるため、図 2.4 のように 400~800 nm の領域の波長でフィッティングをかけ膜厚計算を行った。

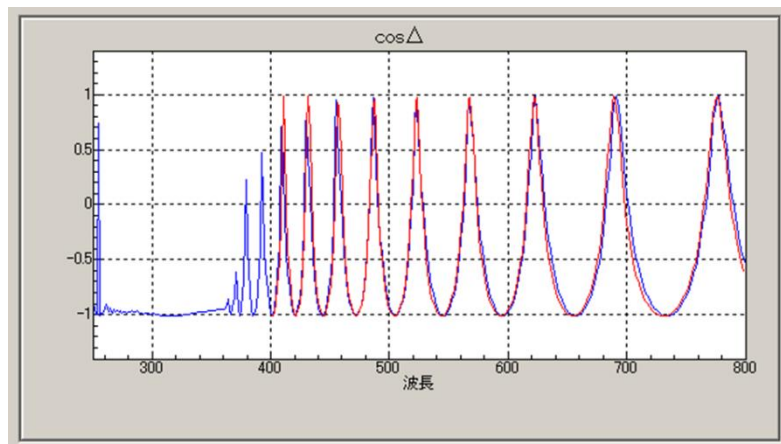


図 2.4 膜厚計算のためのフィッティングの様子

## 2.3.5 XPS

### 2.3.5.1 XPSの原理

第3章にて、酸化前後での AlGaIn 層の表面の組成を調べるために XPS を使用した。

XPS は光電効果を利用した表面分析手法の一つで[2.2]、X 線照射により試料表面から放出される光電子は対象となる原子の内殻電子に起因するものであり、その原子の化学結合状態を調べることができる。束縛電子の結合エネルギーを  $E_b$ 、照射 X 線のエネルギーを  $h\nu$ 、放出された光電子の運動エネルギーを  $E_k$ 、仕事関数を  $\phi$  とすると、

$$E_b = h\nu - E_k - \phi \quad (2.2)$$

と表される。電子の運動エネルギーはフェルミレベルから測定すると物質間の比較がしやすいので、この場合は、

$$E_b = h\nu - E_k \quad (2.3)$$

となる。この模式図を図 2.5 に示す。

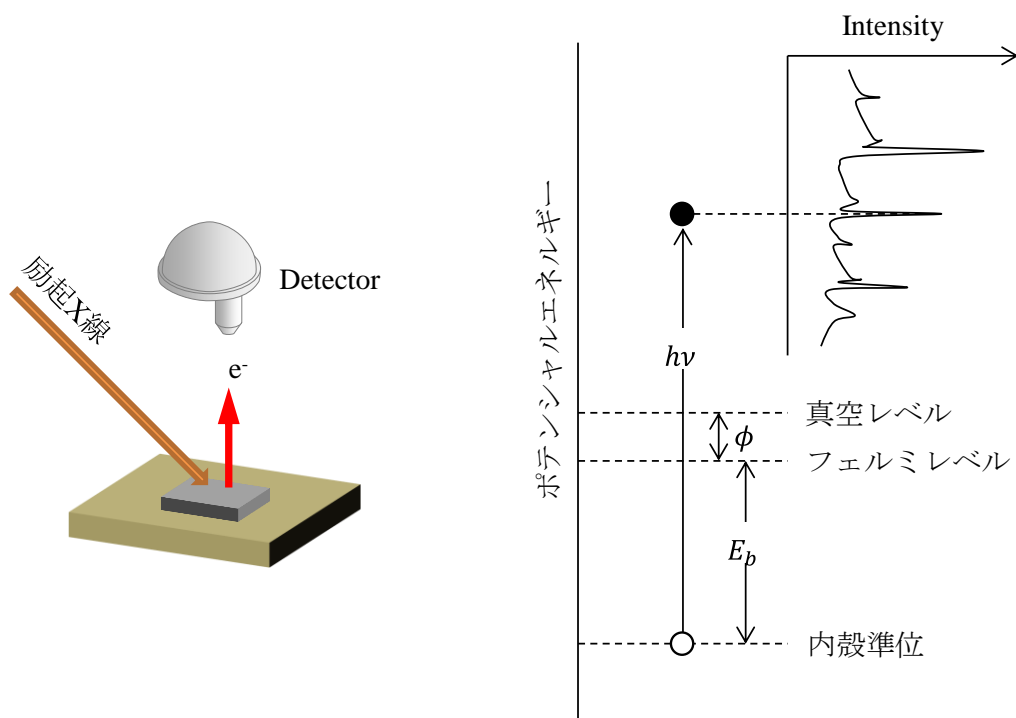


図 2.5 光電子分光法の模式図

図 2.5 からわかるように、観測されるエネルギー分布は物質の内殻や価電子帯の情報をもっている。したがって式(2.3)から  $h\nu$  が一定であれば結合エネルギー  $E_b$  が求まる。結合エネルギーは元素およびその電子状態等に依存する値であるため、元素同定（定性分析）が可能であると同時に、ピーク面積の比から対象とする組成比（定量分析）も知る

ことができる。今回 Al 励起の X 線 (1486.6 eV) を使用し、検出領域は 100 μm φ、検出深さは約 2 nm (取出角 15 度) の条件にて、AlGaIn 基板最表面の測定を行った。

### 2.3.5.2 XPS の結果からの組成比計算方法

XPS における組成比の比較には、光電子ピーク面積をもとに行った。ピーク面積は原子濃度および注目電子の感度に比例するため、ピーク面積  $A$  を相対感度係数  $RSF$  で割った値は原子濃度に比例する。よって、(2.4) 式より測定元素の組成比の和を 100 atomic% とした相対比較が行える。

$$C_i = \frac{A_i/RSF_i}{\sum_j A_j/RSF_j} \times 100 \quad (2.4)$$

### 2.3.5.3 XPS の結果からの膜厚計算方法

XPS の検出深さ以下の、均一で平滑な表面薄膜に対しては、基板および表面薄膜からの光電子の信号強度比を用いて、その膜厚を計算することができる。

図 2.6 のように均一で平滑な厚さ  $d$  の表面薄膜を有する試料において、薄膜および基板から得られる光電子強度  $I$  は、試料通過中に一定減衰を受けて、それぞれ (2.5) (2.6) 式のように表される。なお、以下の式では、薄膜および基板から得られる光電子の平均自由行程はほぼ同じとし、光電子の弾性散乱の効果および取り込み立体角の幅は無視している。

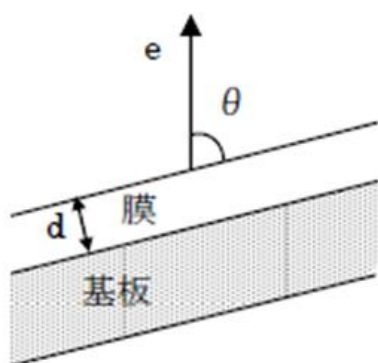


図 2.6 表面薄膜の模式図

式中の文字の定義

- $I$  = 光電子強度
- $i$  = 純物質の光電子強度
- $\lambda$  = 平均自由行程
- $\theta$  = 光電子の脱出角度
- $\sigma$  = 光イオン化断面積
- $D$  = 装置関数
- $N$  = 原子密度
- $n$  = 密度
- 添字  $f$  = 表面薄膜
- 添字  $s$  = 基板

$$I_f = \frac{i_f}{\lambda} \cdot \int_0^{d/\sin\theta} e^{-u/\lambda} du \quad (2.5)$$

$$I_s = \frac{i_s}{\lambda} \cdot \int_{d/\sin\theta}^{\infty} e^{-u/\lambda} du \quad (2.6)$$

より、 $\frac{I_f}{I_s} = \frac{i_f}{i_s} \cdot (e^{d/\lambda \sin\theta} - 1)$ となる。

ここで、 $i \propto N \cdot \sigma \cdot \lambda \cdot D$ より、 $\frac{i_f}{i_s} = \frac{N_f}{N_s} = \frac{n_f}{n_s}$ であるので、 $d$ は以下のように求まる。

$$d = \lambda \cdot \sin\theta \cdot \ln\left(\frac{I_f}{I_s} \cdot \frac{n_s}{n_f} + 1\right) \quad (2.7)$$

このようにして得られた (2.7) 式に各パラメータを代入することにより、表面薄膜の見積もりを行うことができる。ただ、この方法においては膜の均一性・平均自由行程・さらに波形解析を用いる場合はそれにかかわる種々の条件も、膜厚見積もり値に大きな影響を与えるので、計算値は目安である。

### 2.3.6 van der Pauw 法

第3章にてオゾン酸化エッチング法でエッチングしていったAlGaIn基板の2DEG濃度を評価するためにvan der Pauw法によるシート抵抗測定とホール効果測定を行った。

#### (a) シート抵抗測定

シート抵抗測定は、接触抵抗の影響をほとんど受けることなく簡単な機構で素子抵抗を測定可能なvan der Pauw法[2.3]を用いた。van der Pauw 法は、

- (1) 周辺長に比べて、電極が十分に小さい
- (2) 材料は均質で試料の厚みも均一
- (3) 試料に穴などが開いていない
- (4) 試料は面内で等方性がある

以上の条件を満たした試料で測定可能である。

van der Pauw法パターンには4つの電極が形成されており、これに電流源と電圧計を図2.7に示した4種類の接続パターンで接続し、シート抵抗を測定する。例えば図2.17のA、Bパターンの際に、測定される2つの特性抵抗( $R_A, R_B$ )を定義すると、シート抵抗

$R_s$  とは式(2.8)の関係がある。 $R_A = \frac{V_{BC}}{I_{AD}}$ 、 $R_B = \frac{V_{AD}}{I_{BC}}$  のとき、



$$\exp\left(-\pi \frac{R_A}{R_S}\right) + \exp\left(-\pi \frac{R_B}{R_S}\right) = 1 \quad (2.8)$$

もし、試料の形状が4回回転対称であれば、相反定理により、 $R_A = R_B$ とみなせるので、式(2.8)は次のように示すことができ、式(2.9)のように、シート抵抗 $R_S$ を求めることができる。

$$2 \exp\left(-\pi \frac{R_A}{R_S}\right) = 1, \quad \ln 2 - \pi \frac{R_A}{R_S} = 0 \rightarrow R_S = \frac{\pi}{\ln 2} R_A \quad (2.9)$$

本研究では、高い測定精度が必要である。そこで、それぞれのパターンの時に、測定電流を正負に流し、特性抵抗 $R_A, R_B$ は、それらの平均を用いている(式(2.11))。

$$R_{+A} = \frac{V_{BC}}{I_{AD}}, R_{-A} = \frac{V'_{BC}}{I_{DA}}, \quad R_{+B} = \frac{V_{AD}}{I_{BC}}, R_{-B} = \frac{V'_{AD}}{I_{CB}} \quad (2.10)$$

$$R_A = \frac{R_{+A} + R_{-A}}{2}, \quad R_B = \frac{R_{+B} + R_{-B}}{2} \quad (2.11)$$

また、電流源と電圧計を入れ替えたパターン (Aパターン→Cパターン, Bパターン→Dパターン) が存在するので、それぞれのシート抵抗 $R_{SA}, R_{SB}, R_{SC}, R_{SD}$ を求め、それらの平均をそのサンプルのシート抵抗 $R_S$ としている(式(2.12))。

$$R_S = \frac{R_{SA} + R_{SB} + R_{SC} + R_{SD}}{4} \quad (2.12)$$

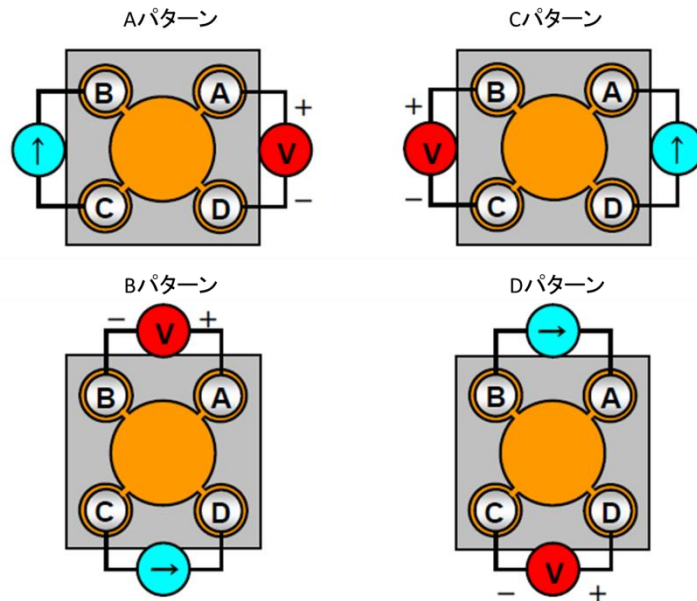


図2.7 シート抵抗測定の接続パターン

(b) ホール効果測定

$R_s$  測定後にホール効果測定を行うことでシートキャリア濃度  $n_s$ 、移動度  $\mu$  を求めることができる。これらをホール電圧  $V_H$  から求める式を式(2.13),(2.14)に示す。

$$n_s = \frac{IB}{qV_H} \quad (2.13) \quad , \quad \mu = \frac{V_H}{R_s IB} = \frac{1}{qR_s n_s} \quad (2.14)$$

本研究においてHall電圧  $V_H$  は、電圧  $V_y$  をそのまま用いるのではなく誤差となる要因を排除し、より精度よく算出している。その方法について以下に記す。

実際には、測定される電圧  $V_y$  は、求めたいHall電圧  $V_H$  の他に、 $V_x$  (4つの電極の位置、形状の不均一性により生じる電圧)、や  $V_{ex}$  (測定機器のオフセットや配線の熱起電力)が加わっているため、Hall電圧  $V_H$  を正確に得るために、式(2.15)のように4つの平均をとって、 $V_x, V_{ex}$  をキャンセルしている。

$$V_H = \frac{V_y(+,+) - V_y(+,-) - V_y(-,+) + V_y(-,-)}{4} \quad (2.15)$$

### 2.3.7 TLM 法

TLM 法とは、Transmission Line Model の略であり、薄膜状サンプルのコンタクト抵抗を評価するのに用いられる測定法 (図 2.8) である。電極とその直下の半導体層を図 2.9 に示すような伝送線回路と等価と考えて解析する方法である。

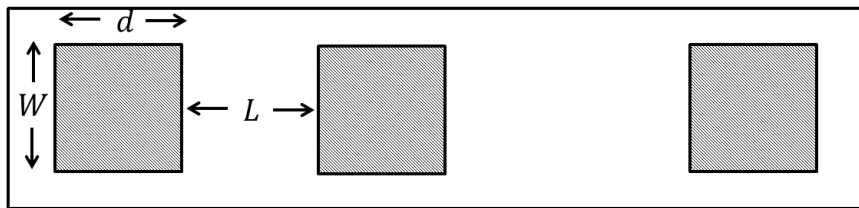


図 2.8 TLM パターン

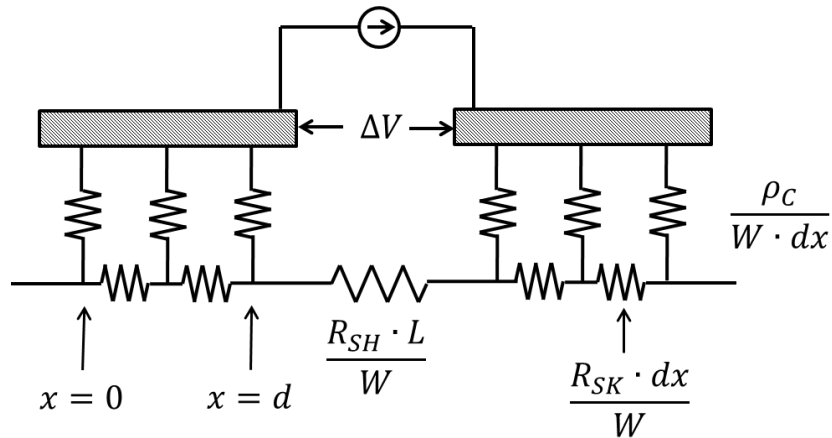


図 2.9 伝送線回路の様子

半導体に電極（幅： $W$ 、長さ： $d$ ）を  $L$  だけ離して配置し、距離の異なる電極間の I-V 特性を測定することで全抵抗  $R_T$  を導き出す。2 つの電極間で計測される全抵抗  $R_T$  は、電極と半導体の界面に存在する接触抵抗  $R_C (=R_{SK}L_T/W)$  の 2 倍と、半導体層のシート抵抗 ( $R_{SH}/W$ ) の和となり、(2.16) 式のように表される。ここで  $R_{SK}$  は電極直下の半導体層のシート抵抗、 $L_T$  は伝搬長を表している。

$$R_T = 2 \frac{R_{SK}L_T}{W} + \frac{R_{SH}}{W} L \quad (2.16)$$

次に伝搬長  $L_T$ [2.4]について説明する。

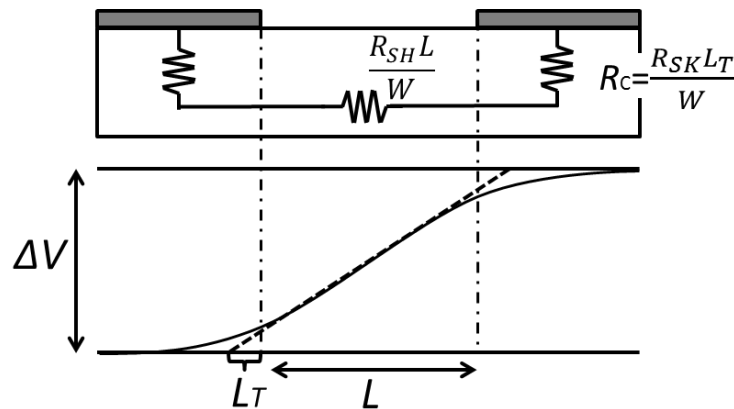


図 2.10 伝搬長と電圧の関係

伝搬長は図 2.10 に示すように 2 つの電極に電圧を加えた時に金属直下に入り込む距離を示している。実際、この電極直下への入り込みは曲線となるが、TLM 法では点線で示されているように直線の過程を前提としており、図に示されている  $L_T$  がここでの伝

搬長となる。また、 $R_C (=R_{SK}L_T/W)$  より、 $L_T$ はコンタクト抵抗が下がっていくと短くなっていくこともわかる。

最後に測定した全抵抗  $R_T$  からコンタクト抵抗を算出する方法について説明する。図 2.11 のように (2.2) 式で表される全抵抗  $R_T$  を縦軸に、横軸に距離  $L$  をプロットすることで直線と縦軸との交点が  $2R_C$  となる。

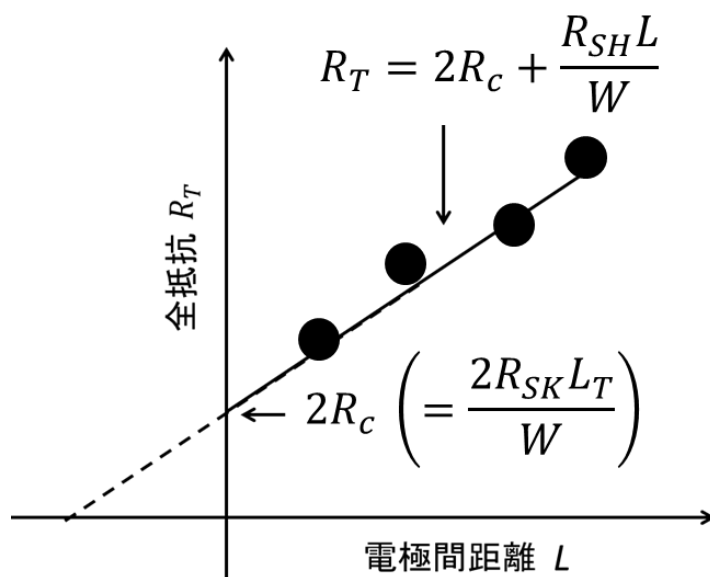


図 2.11 全抵抗  $R_T$  と電極間距離の測定

このようにして求めた接触抵抗  $R_C$  に金属の幅  $W$  をかけることで、コンタクト抵抗 [ $\Omega$  mm] を算出した。TLM 法を用いて面積比抵抗 [ $\Omega \text{ cm}^2$ ] を評価する場合、 $R_{SH}=R_{SK}$  という近似を使う。本研究では電極直下のみをエッチングによって薄くしたり、AlGaIn 層へ凹凸構造を導入したため、 $R_{SH} \neq R_{SK}$  である。そのため本研究では  $\Omega \text{ mm}$  で表されるコンタクト抵抗で評価を行った。

## 2.4 シミュレーション方法

本研究では、Silvaco 社製の TCAD を用いて、第 4 章にて AlGa<sub>N</sub> 構造を変えたときの 2DEG 濃度依存性の評価を行った。以下に使用したソフトを示す。Atlas (ver.5.18.3.R)は、実際にデバイスシミュレーションを行うソフトである。DevEdit (ver.2.8.10.R)は、Atlas では描けない複雑な構造を持つデバイスを構築したり、任意の場所に任意のサイズのメッシュを構築することができるソフトである。DeckBuild (ver.3.42.2.R)は書いたソースを読み込み、Atlas 等のソフトと繋ぐソフトである。

### 2.4.1 本研究で使用したシミュレーションモデル

#### 2.4.1.1 Polarization model

本研究では、“Polarization”、“Calc.strain”モデルを使用して分極の計算を行った。Polarization は分極を自動的に計算し、分極電荷を発生させるモデルである。

ここで、Polarization モデルでどのような計算を行っているかを示す。分極  $P$  は次の式(2.17)のように定義される。

$$P = P_{sp} + P_{pe} \quad (2.17)$$

ここで  $P_{sp}$  は自発分極、 $P_{pe}$  はピエゾ分極である。自発分極については材料ごとにほぼ決まった固定の値であり、本研究でも default の値をそのまま利用しているので、ピエゾ分極についてのみ考える。ピエゾ分極の式は次の式(2.18)のようにかける [2.5]。

$$P_{pe} = 2 \frac{a_s - a_0}{a_0} (E_{31} - \frac{C_{13}}{C_{33}} E_{33}) \quad (2.18)$$

ここで  $a_s$  は層間での格子定数の平均値を、 $a_0$  は熱平衡時の格子定数を表している。そのため  $\frac{a_s - a_0}{a_0}$  の項は格子のずれの割合（応力に直結する値）を意味する。 $E_{31}$ 、 $E_{33}$  はそれぞれ圧電定数を、 $C_{13}$ 、 $C_{33}$  はそれぞれ弾性定数を表す。自発分極も含めたこれら全てのパラメータは Al 組成に線形に依存するため、この計算方法で分極の Al 組成依存性が現れる。分極電荷の Al 組成依存性を図 2.12 に示す。この分極電荷により内部電界が AlGa<sub>N</sub> に発生し、高濃度な 2DEG が AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ界面に生成される。また、Calc.strain は応力を計算するモデルであり、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 界面のようにピエゾ分極を考える場合は必要となるモデルである。

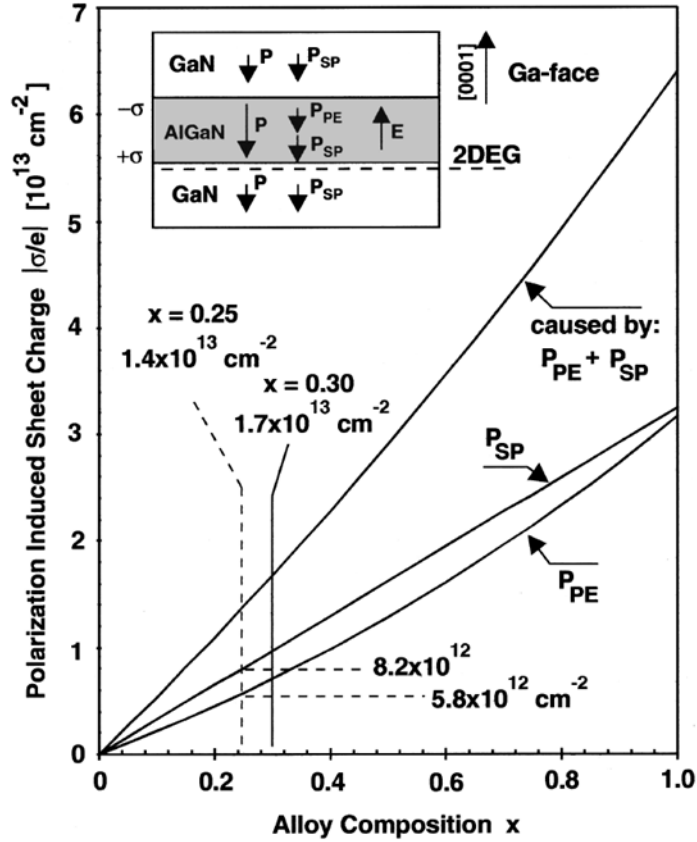


図 2.12 Al の比率を変化させたときの分極電荷量[2.5]

### 2.4.1.2 Schrodinger-Poisson model

2DEG の量子効果を評価するために、Schrodinger-Poisson model を使用した。量子化された 2DEG は Schrodinger 方程式と Poisson 方程式の連立方程式からシミュレーションすることができる。

Schrodinger 方程式は(2.19)式のようにかける。

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi(x, y, z) + V\Psi(x, y, z) = E\Psi(x, y, z) \quad (2.19)$$

ここで、 $\Psi$  は波動関数、 $V$  はポテンシャルエネルギー、 $m$  は質量、 $\hbar$  はプランク定数、 $E$  はエネルギー固有値である。

Poisson 方程式は(2.20)式のようにかける。

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.20)$$

ここで、 $V$  はポテンシャルエネルギー、 $\rho$  は電荷密度、 $\epsilon_0$  は真空誘電率である。

図 2.13 に AlGaN 層厚 7 nm の場合の計算結果を示すが、Schrodinger-Poisson model を使用することで、青線のように量子効果による電子の浸み込みをシミュレーションすることができる。なお、参考として、赤線に Poisson model のみを用いた場合の結果を合わせて示す。

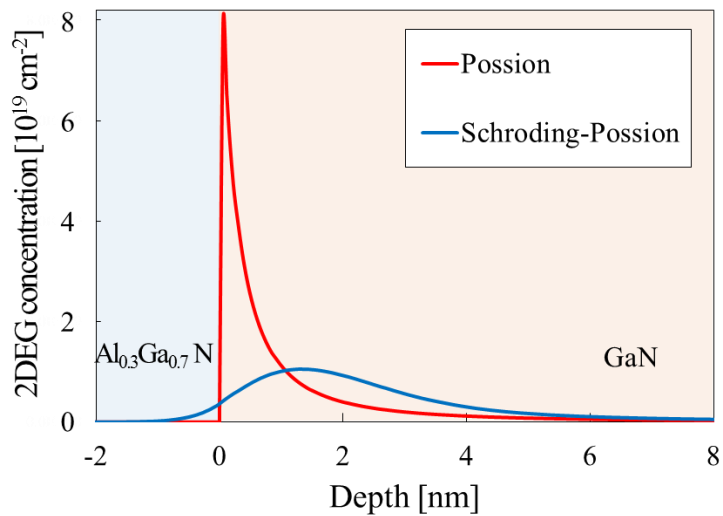


図 2.13 Poisson model (赤線) と Schrodinger-Poisson model (青線) から計算された 2DEG 濃度分布

## 2.5 本章の参考文献

- [2.1] W.A. Sasangka, G.J. Syaranamual, C.L. Gan and C.V. Thompson, “Origin of Physical Degradation in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> on Si High Electron Mobility Transistors under Reverse Bias Stressing”, Reliability Physics Symposium (IRPS), 2015 IEEE International, 6C.3.1 (2015)
- [2.2] 日本表面科学会, “X線光電子分光法”, 丸善株式会社, 1998
- [2.3] L.J. van der Pauw, “A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape”, Philips Research Reports, **13**, 1 (1958)
- [2.4] H. H. Berger, “Models for contacts to planar devices”, Solid State Electronics, **15**, 145 (1972).
- [2.5] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff and L. F. Eastman, “Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N<sup>-</sup> and Ga-face AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures”, J. Appl. Phys., **85**, 3222 (1999)



## 第 3 章

# コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性

### 3.1 はじめに

1.8 節にて、コンタクト抵抗には AlGa<sub>N</sub> 層厚依存性があることを予測した。この予測のもと、本章ではコンタクト抵抗の AlGa<sub>N</sub> 層厚依存性を実験的に明らかにし、コンタクト抵抗の成分分析を行い、コンタクト抵抗の低抵抗化への指針をたてる。

### 3.2 オゾン酸化エッチング法による AlGa<sub>N</sub> 層のエッチング

#### 3.2.1 オゾン酸化エッチング法について

コンタクト抵抗の AlGa<sub>N</sub> 層厚依存性を測定するにあたり、同一基板の AlGa<sub>N</sub> 層をエッチングによって薄くしていった。AlGa<sub>N</sub> や Ga<sub>N</sub> のエッチングには一般的に RIE のようなプラズマによるエッチングが一般的であるが、プラズマによる基板へのダメージや、RIE のガス種によって表面ラフネスが大きく変化する[3.1]など問題がある。

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> の別のエッチング方法として、基板表面を酸素プラズマによって酸化し、その酸化層を HF もしくは HCl によって除去するという方法も報告されており、この手法では一回のエッチングで除去される層厚が一定であり、酸化と酸化層除去の繰り返し回数でエッチング深さを制御可能である[3.2][3.3]。しかし、酸化時にプラズマを用いるため、RIE と同様にプラズマによるダメージが懸念される。

そこで、酸化方法をオゾン雰囲気中での酸化にすることで、プラズマの影響を受けずにエッチングができると考えた。本論文では本手法を「オゾン酸化エッチング法」と呼ぶ。オゾン酸化エッチング法の概念図を図 3.1 に示す。まず、SAMCO 社製の UV-1 装置を用い基板表面をオゾン雰囲気中で酸化を行い、基板表面に酸化層を形成した。その後、36% HCl に基板を 5 分浸すことによって、酸化層の除去を行った。これを繰り返し行うことで、1 回あたり安定したレートで AlGa<sub>N</sub> 層のエッチングができると考えられる。

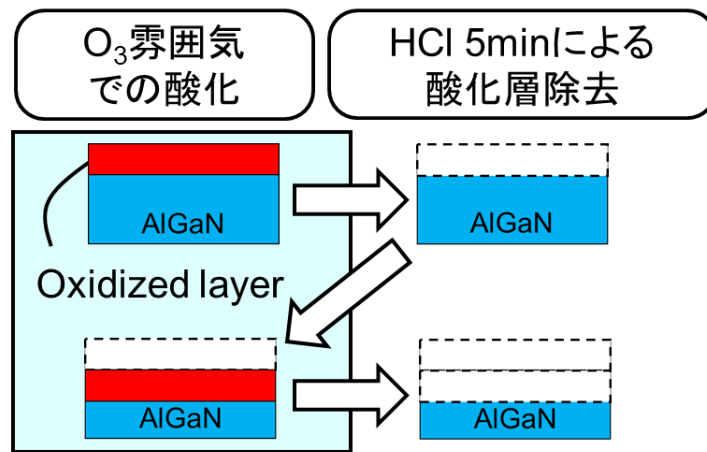


図 3.1 オゾン酸化エッチング法の概念図

### 3.2.2 オゾン酸化エッチング法による AlGaN 層エッチングの最適化

まず、図 3.2 に、レジストマスクによる Line/Space 形成を行った後に、オゾン酸化時間 3 分、酸化時の温度を常温にて 40 回繰り返しエッチングした後の AFM 像を示す。図中の白い突起は、段差計測の際に発生してしまう探針のオーバーシュートによるものである。エッチング深さは 3.6nm であり 1 回あたりのエッチングレートに直すと 0.1 nm/cycle 以下という非常に遅いエッチングレートであり、30 nm ある AlGaN 層のエッチングに使用するには不適である。そこで、条件の最適化を行い、プロセスに使用できる条件探索を行った。

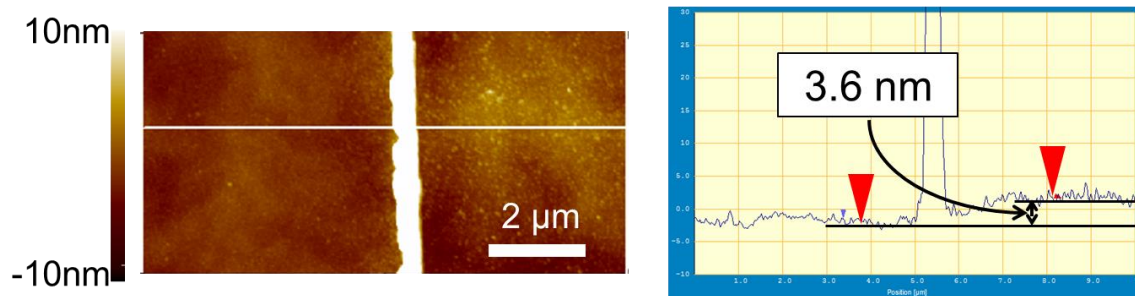


図 3.2 オゾン酸化時間 3min 室温にて 40 回オゾン酸化エッチングした後の AFM 像

1回の酸化で形成される酸化層の厚さを増やすために、オゾン酸化時の温度を 300°C にし、酸化時間を変えてエッチングを行った。300°Cの高温では、フォトレジストによる Line&Space パターンを用いることができない。そこで、30 nm ある AlGaIn 層をエッチングしていき、残った AlGaIn 層厚をエリプソメトリーで測定することでエッチング量を評価した。図 3.3、図 3.4 に酸化時の温度を 300°C に固定し、酸化時間を変化させたときの結果を示す。図 3.3、図 3.4 はそれぞれ、酸化時間 7.5 分、30 分で行った時のエッチング回数とエッチング深さの関係をプロットしたものである。いずれの結果も比例関係が見られ、1回あたり安定したレートでエッチング可能と分かる。また、酸化時間を長くした方がエッチングレートは増加するが、1回のエッチングに酸化時間を 30 分かけるのは、非常に時間がかかってしまい現実的でない。

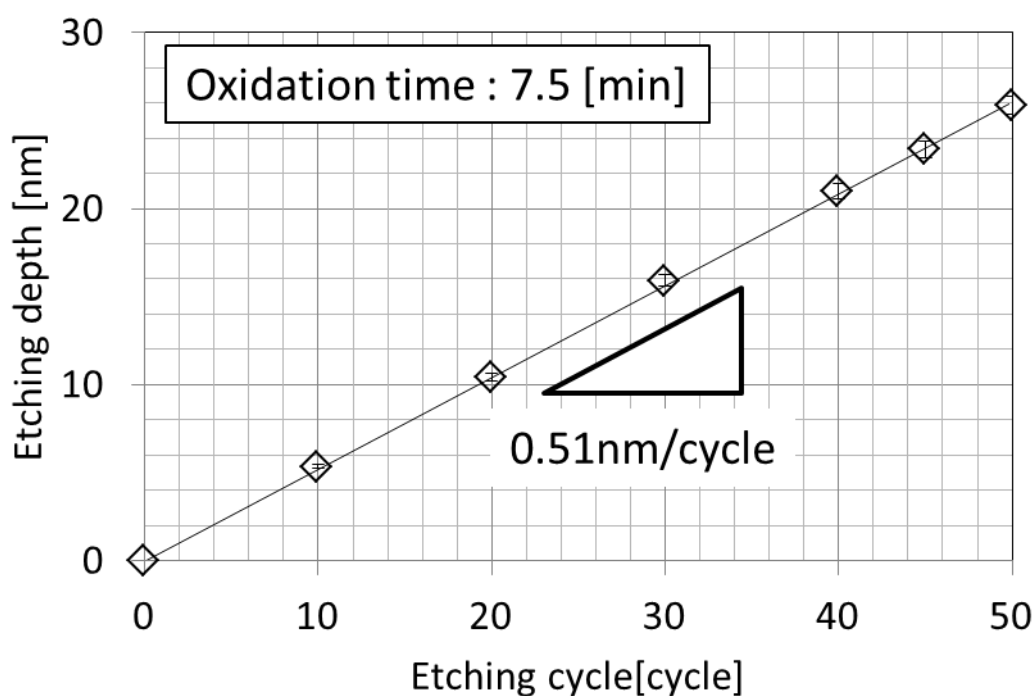


図 3.3 酸化時の温度 300°Cにおけるエッチング回数とエッチング深さの関係

1回あたりの酸化時間：7.5分

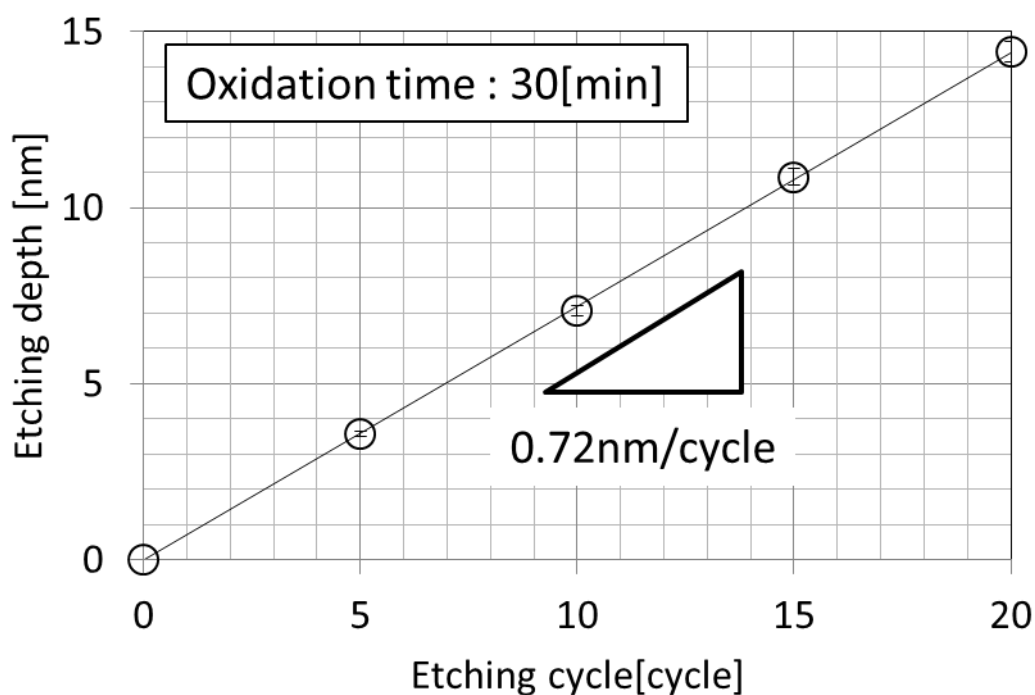


図 3.4 酸化時の温度 300°Cにおけるエッチング回数とエッチング深さの関係

1 回あたりの酸化時間： 30 分

そこで、次に、最適な酸化時間の検討を行った。図 3.5 に酸化時の温度を 300°C に固定し、1 回あたりの酸化時間を変えた時のエッチングレートを示す。酸化時間が 1 分以下の場合、エッチングレートは急峻に立ち上がっている。一方、5 分より長くすると、エッチングレートの酸化時間に対する上昇は緩やかである。以上のことから、酸化時間が 1 分以下の立ち上がり部においては、エッチングレートがばらつくことが懸念されたため、エッチングの酸化時間は、エッチングレートの酸化時間に対する上昇が緩やかな 7.5 分を採用した。

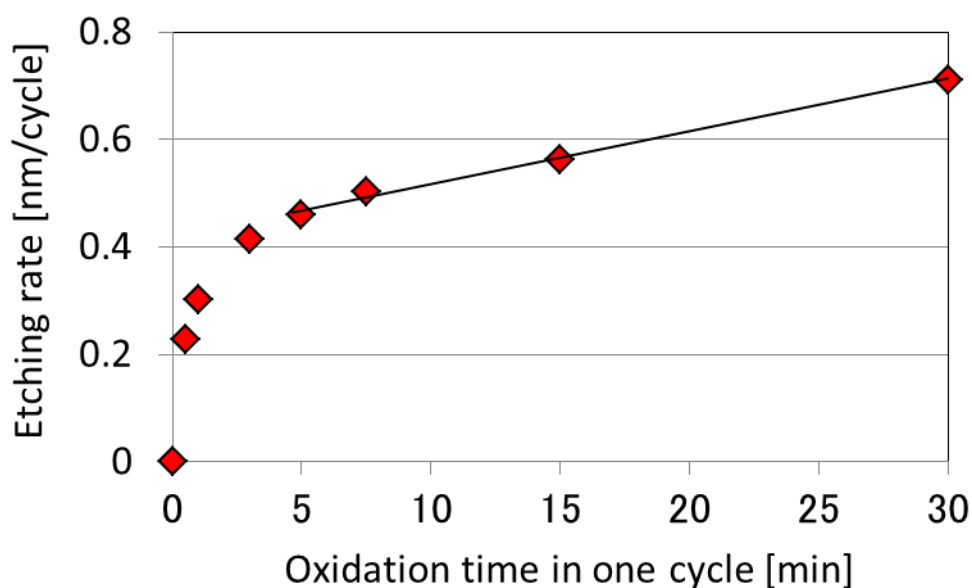


図 3.5 1 回あたりの酸化時間とエッチングレートの関係 (酸化温度 300°C)

### 3.2.3 オゾン酸化エッチング法による AlGaIn 層の表面モフォロジーの変化

次に、本条件でオゾン酸化エッチングを繰り返し行った際の、AlGaIn 層の表面モフォロジーの AFM 像を図 3.6 に示す。図 3.6(a)はエッチング前の自然酸化層を除去した直後の、(b)、(c)はそれぞれ 5nm、15nm エッチングした後の結果を示し、エッチング深さ、RMS、および結晶欠陥に対応するものと思われる穴の深さを併記している。AFM 像を見ると、欠陥の穴の大きさが広がっていることがわかる。AFM の探針の曲率半径が 10nm であり、穴の大きさの厳密な比較は難しいが、エッチング前の基板の穴の大きさは約 100~150nm である一方、15nm エッチング後の穴の大きさは約 200~300nm まで広がっている。しかし、穴の最大深さはエッチングを重ねていってもほとんど変化がみられなかった。穴が広がっていったため、繰り返しエッチング後の基板全体の RMS 値は高くなっていくが、一方、穴を除いた平坦面の RMS 値はほとんど変化せず、このことから、エッチング面の平坦性は高いといえる。

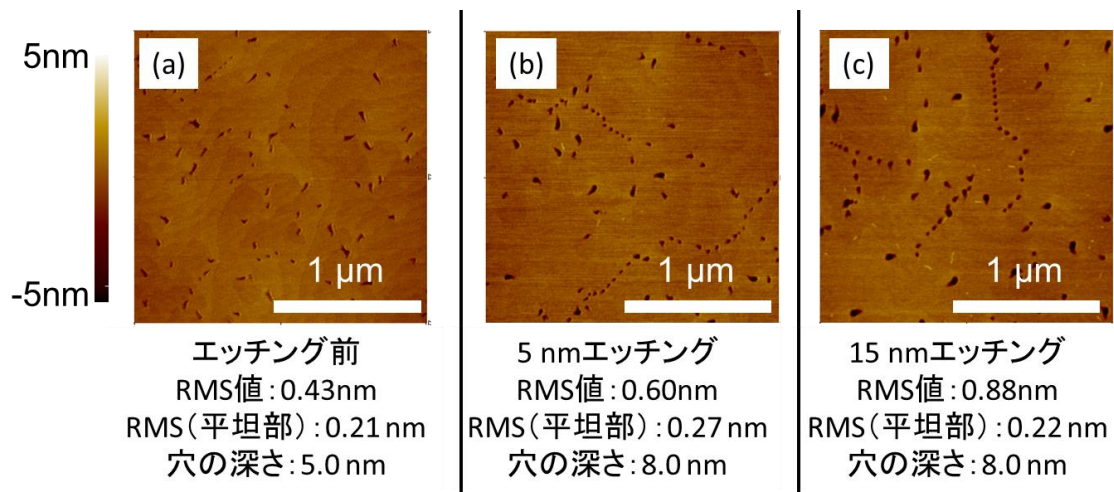


図 3.6 オゾン酸化エッチングを繰り返したときの表面モフォロジーの AFM 像

### 3.2.4 オゾン酸化前後における AlGa<sub>0.75</sub>N 層の組成比の変化と酸化層厚の XPS による評価

3.2.2 節より、オゾン酸化 7.5 分では、1 回のオゾン酸化により 0.51 nm の AlGa<sub>0.75</sub>N 層が酸化されエッチングにより除去されていることが明らかになった。本節では、酸化前後での Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N 層表面の組成比の変化や酸化層厚を XPS により評価を行った。

300°C 7.5 分でのオゾン酸化と 50% HF 5 分での酸化層除去を 3 回繰り返し、その後オゾン酸化 7.5 分を行った基板（以下酸化層あり）と、その後、酸化層除去を行った基板（以下酸化層なし）の 2 種類の基板を XPS による測定を行った。

図 3.7 に、XPS 測定により得られた酸化層なし基板、酸化層あり基板の Al 2*p*, Ga 2*p*<sub>3/2</sub> のスペクトルを、図 3.8 に同じく O 1*s*, N 1*s* のスペクトルを示す。Al 2*p*, Ga 2*p*<sub>3/2</sub>, O 1*s* のスペクトルはバックグラウンドカットを行っている。しかし、N 1*s* のスペクトルは 397eV 付近に半値幅約 2eV 程度のピークとして現れるが、今回使用した Al 励起の X 線では Ga Auger のピーク（403~390eV の非常にブロードな範囲に現れる）と重なってしまい精度は低い。

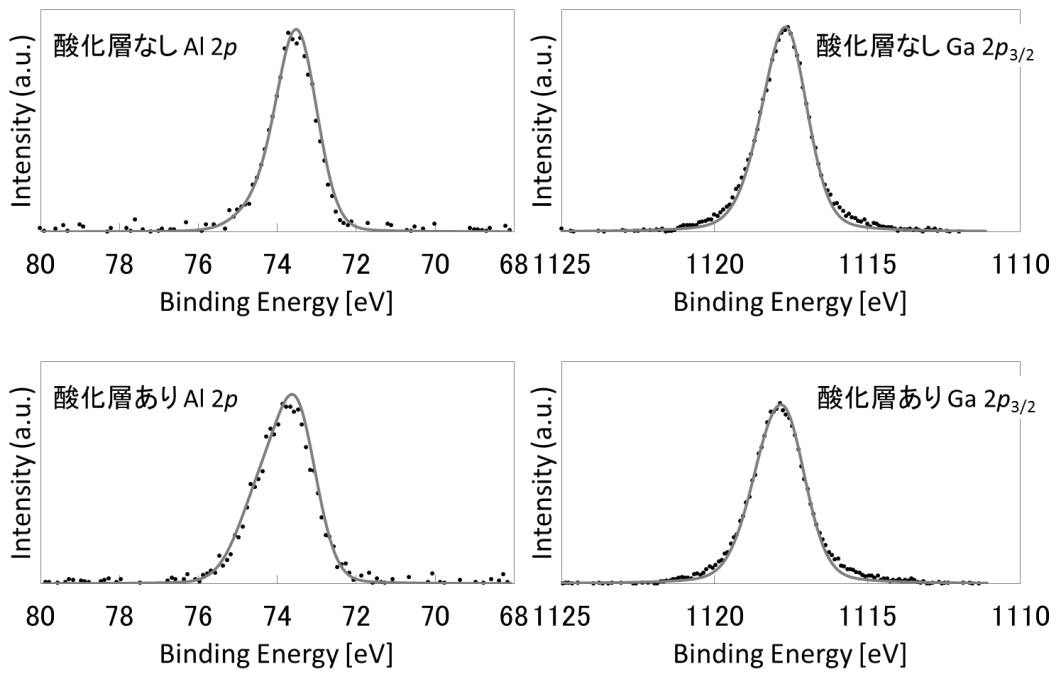


図 3.7 XPS 測定による Al 2p, Ga 2p<sub>3/2</sub> のスペクトル

(上：酸化層なし、下：酸化層あり)

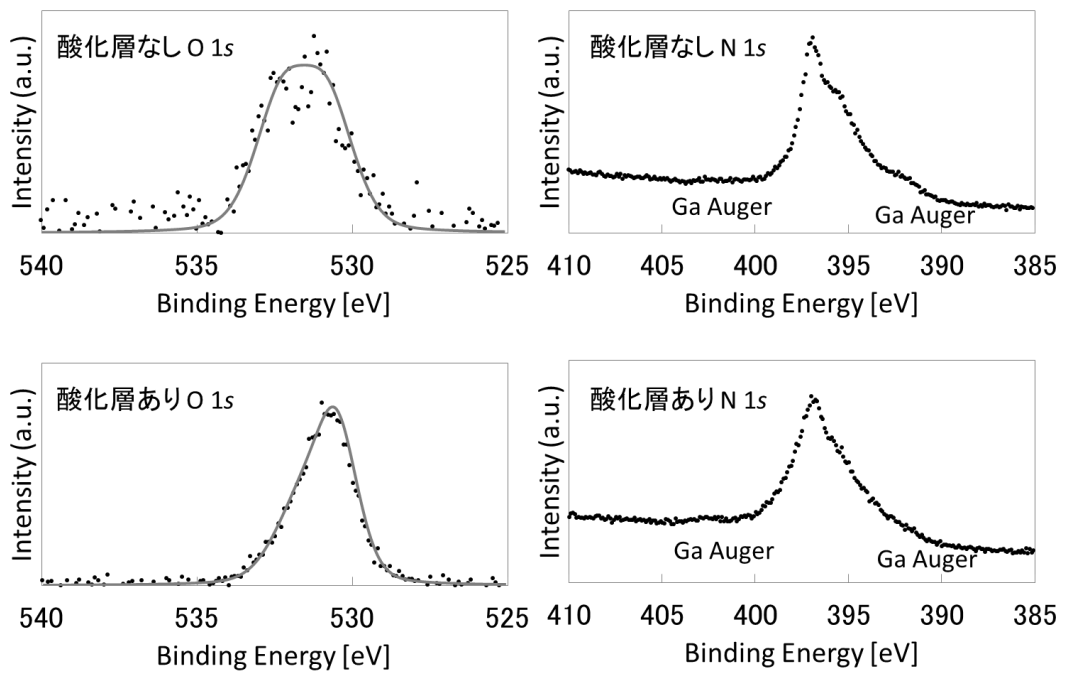


図 3.8 XPS 測定による O 1s, N 1s のスペクトル

(上：酸化層なし、下：酸化層あり)



これらのピークの積分強度から、Al, Ga, N, O の組成比の比較を行った。N 1s のスペクトルには Ga Auger のピークも含まれており、Ga Auger にあたる約 80% の積分強度を除外して組成比の比較を行っているため、N の精度は低い。評価した各ピークの積分強度を表 3.1 に示す。単位は Counts・eV/sec である。この結果に対し、表 3.2 の各ピークの相対感度係数で割ることで、表 3.3 に示す各成分の組成比を求めた。表 3.3 の単位は atomic% であり、Al, Ga, N, O の合計が 100 atomic% になるように計算している。

この結果から O/(Al+Ga) 比を比較すると、酸化層なしの基板は 0.3、酸化層ありの基板は 1.2 であり、酸化層ありの基板の方が、酸素が多いことがわかる。酸化層なしの基板では酸素は検出されないはずであるが、測定試料を作製してから測定するまでの間に表面が酸化されてしまったためと考えられる。

表 3.1 各成分の積分強度 [Counts・eV/sec]

試料名	Al 2p	Ga 2p <sub>3/2</sub>	N 1s	O 1s
酸化層なし	6045	18237	19548	7732
酸化層あり	6850	17083	17319	28078

表 3.2 各ピークの相対感度係数

元素(ピーク)	Al 2p	Ga 2p <sub>3/2</sub>	N 1s	O 1s
相対感度係数	0.288	3.038	0.486	0.717

表 3.3 各成分の組成比 [atomic%]

試料名	Al	Ga	N	O
酸化層なし	11.7	35.4	37.9	15.0
酸化層あり	9.9	24.6	25.0	40.5

次に、図 3.7 の Al 2*p*, Ga 2*p*<sub>3/2</sub> のスペクトルを酸化物起因によるスペクトルと窒化物由来によるスペクトルにてピーク分離を行った結果を図 3.9 に示す。図 3.9 の青線は酸化物起因のスペクトルである。Al 2*p* においては Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等の起因によるピーク (74.4 eV)、Ga 2*p*<sub>3/2</sub> においては Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等の起因によるピーク (1118.4 eV) である。図 3.8 の紫線は窒化物起因のスペクトルである。Al 2*p* においては AlN 起因によるピーク (73.5 eV)、Ga 2*p*<sub>3/2</sub> においては GaN 起因によるピーク (1117.6 eV) である。ピーク分離後の状態別組成比の Al 2*p*, Ga 2*p*<sub>3/2</sub> の結果を、表 3.4、表 3.5 に示す。単位は atomic% であり、合計が 100 atomic% になるように計算している。どちらの結果からも、酸化層ありの方が、酸化物起因によるスペクトルが大きいことがわかる。

この結果から、2.3.10 節の膜厚計算の式

$$d = \lambda \cdot \sin \theta \cdot \ln \left( \frac{I_f}{I_s} \cdot \frac{n_s}{n_f} + 1 \right) \quad (2.7)$$

から酸化層厚を求めた。

使用したパラメータは、

- ・ 光電子の平均自由行程

$$\lambda (\text{Al } 2p) = 2.8 \text{ nm (Al}_2\text{O}_3 \text{ 中)}$$

$$\lambda (\text{Ga } 2p_{3/2}) = 1.8 \text{ nm (GaAs 中でのデータを代用)}$$

- ・ 密度

$$\text{下地の密度 : GaN } 6.1 \text{ g/cm}^3 \text{ (ほぼ GaN と仮定)}$$

$$\text{酸化層の密度 : Al}_2\text{O}_3 \text{ } 4.0 \text{ g/cm}^3, \text{ Ga}_2\text{O}_3 \text{ } 6.0 \text{ g/cm}^3$$

を使用した。

酸化物なし基板の酸化層厚は 0.15~0.31 nm、酸化層あり基板の酸化層厚は 0.50~0.73 nm と求めた。2.6.3 でも述べたように、各種仮定の基づく値であり、誤差は多いがオーダーは妥当である。

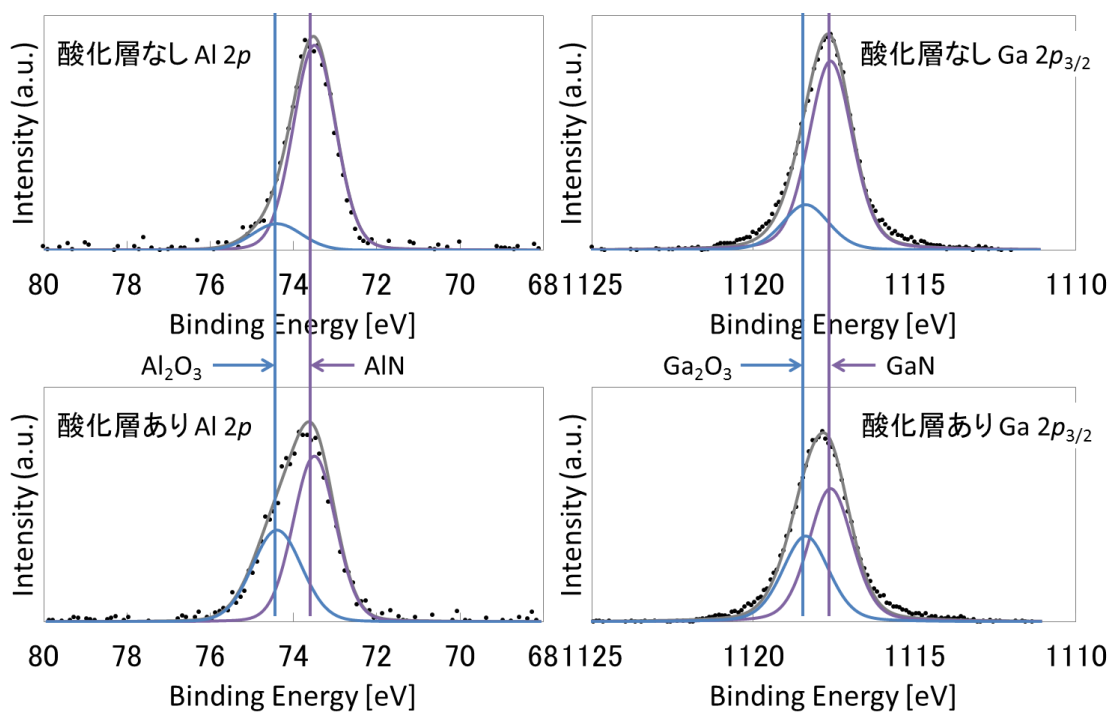


図 3.9 Al 2p, Ga 2p<sub>3/2</sub> のスペクトルのピーク分離の結果

表 3.4 Al 2p の状態別組成比[atomic%]

試料名	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AlN
酸化膜なし	13.2	86.8
酸化膜あり	39.2	60.8

表 3.5 Ga 2p<sub>3/2</sub> の状態別組成比[atomic%]

試料名	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	GaN
酸化膜なし	20.4	79.6
酸化膜あり	40.4	59.6

### 3.2.5 オゾン酸化エッチング法による 2DEG 濃度の AlGaN 層厚依存性の評価

3.2.3 節より、オゾン酸化エッチング法でエッチングを行うと、欠陥の穴が徐々に広がっていく現象がみられた。この他にも、このエッチング法を用いることで 2DEG に何らかの悪影響が生じていないかを検討するため、実際にこの方法で AlGaN 層厚を変化させた場合の 2DEG 濃度を測定し、文献に報告されているエピ成長で AlGaN 層厚を変化させた同様の実験結果と比較してみた。測定は、van der Pauw 法によるシート抵抗測定とホール効果測定で行った。

測定用デバイス作製手順を図 3.10 に示す。まずアセトン、エタノールで有機洗浄をした後に図 3.10(a)のマスクを用いて、 $\text{Cl}_2$  ガスによる RIE にてメサ形成を行った。その後、図 3.10(b)のマスクを用いレジストパターンニングを行った後、スパッタにて Mo/Al/Ti 電極を堆積し、真空蒸着にて Au を堆積し、リフトオフで電極パターンを形成した。その後、 $\text{N}_2$  雰囲気中  $750^\circ\text{C}$  1 分アニールにてオーミックコンタクトを得た。

このようにして作製した試料に対し、繰り返しエッチングと測定を繰り返し行った。それによって得られた 2DEG 濃度の AlGaN 層厚依存性の結果を図 3.11 に示す。図中の点線は、Ambacher らによって示された AlGaN 層のエピ成長膜厚を変えて同様の評価を行ったデータ[3.4]から、30nm の 2DEG 濃度が重なるように合わせこんだ結果である。点線と重なっており、この評価の範囲では本エッチングによる 2DEG へのダメージは認められなかった。合わせて、エッチングの深さが正確に制御できていることも示唆された。また AlGaN 層厚 5 nm ほどで 2DEG 濃度はほぼ枯渇することもわかる。

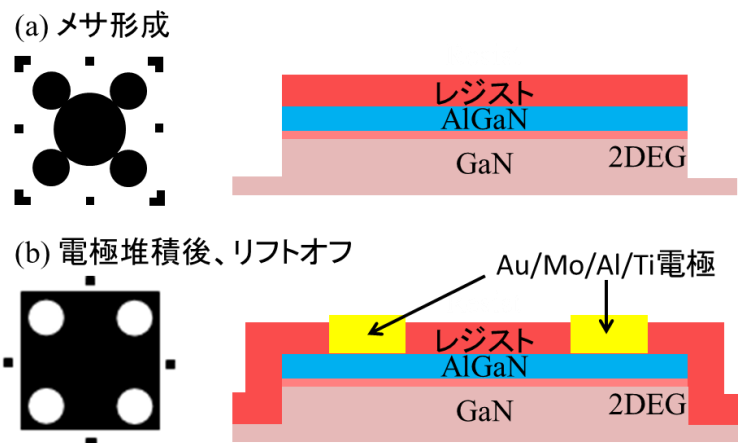


図 3.10 シート抵抗測定・ホール効果測定用サンプル作製方法

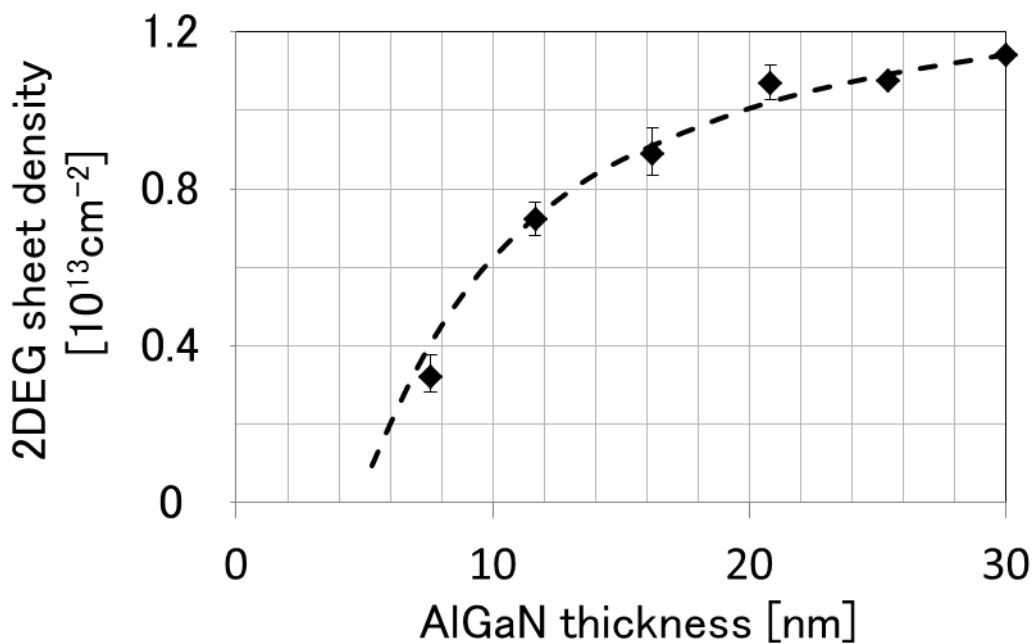


図 3.11 繰り返しエッチングによる 2DEG 濃度の AlGaN 層厚依存性

(点線は AlGaN 層のエピ成長膜厚を変えたデータ[3.4]と 30nm の 2DEG 濃度が重なるように合わせこんだ結果)

### 3.3 コンタクト抵抗の AlGaN 層依存性

#### 3.3.1 デバイス作製方法

AlGaN 層のエッチングにはオゾン酸化エッチング法を使用し、コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性を調べた。デバイス作製手順を図 3.12 に示す。まずアセトン、エタノールで有機洗浄をした後にメサ形成用マスクパターンを使用し、Cl<sub>2</sub> ガスによる素子分離を行った。そして、PECVD にて SiO<sub>2</sub> を 100nm 堆積し (図 3.12 (a))、コンタクトホール穴開け用のマスクを用いてパターニングをした後に Buffered HF にてコンタクト部の穴開けを行った (図 3.12(b))。その後、オゾン酸化エッチング法によって図 3.12(c) のようにコンタクトホール部の AlGaN 層のエッチングを行った。エッチング回数を変化させ、AlGaN 層厚を 7.1nm、11.6nm、16.2nm、20.8nm、25.4nm、30.0nm とした。コンタクトホール部のみエッチングによって AlGaN 層を薄くした理由としては、チャネル部もエッチングによって薄くしていくと、2DEG の減少に伴い電極間領域のシート抵抗が増大してしまい、TLM 測定によって得られる全抵抗が高くなってしまふ。これにより、シート抵抗とコンタクト抵抗の分離がコンタクト抵抗の分離が困難になるため、コンタクト抵抗を精度よく測定するためにコンタクトホール部のみエッチングを行った。実験結果は 3.3.3 節にて示すが、シート抵抗は、エッチング深さを変えてもほぼ一定であった。そして最後にスパッタリングにて積層電極の堆積を行った。電極材料としては、Mo/Al/Ti を用い、35/60/20nm、35/40/40nm、35/60/20nm と総膜厚は一定のまま Al/Ti の比率を 3:1、1:1、1:3 と変化させた 3 種類の積層電極を使用した。その後、図 3.12(d) のように測定電極として残す部分のみをレジストで保護し、その後 RIE にて電極のエッチングを行った後、レジストを剥離して完成 (図 3.12(e)) となる。完成後の TLM パターンを図 3.13 に示す。1 つの電極の大きさは 35 $\mu$ m $\times$ 240 $\mu$ m であり、電極間隔は最も短いものは 20 $\mu$ m であり、そこから 5 $\mu$ m ずつ幅を長くし、最長の電極間隔は 45 $\mu$ m となっている。

以上のように作製したサンプルを 700 $^{\circ}$ C から 50 $^{\circ}$ C 刻みでの 97% N<sub>2</sub>、3% H<sub>2</sub> 雰囲気中での 1 分アニールと TLM 測定を繰り返し行った。

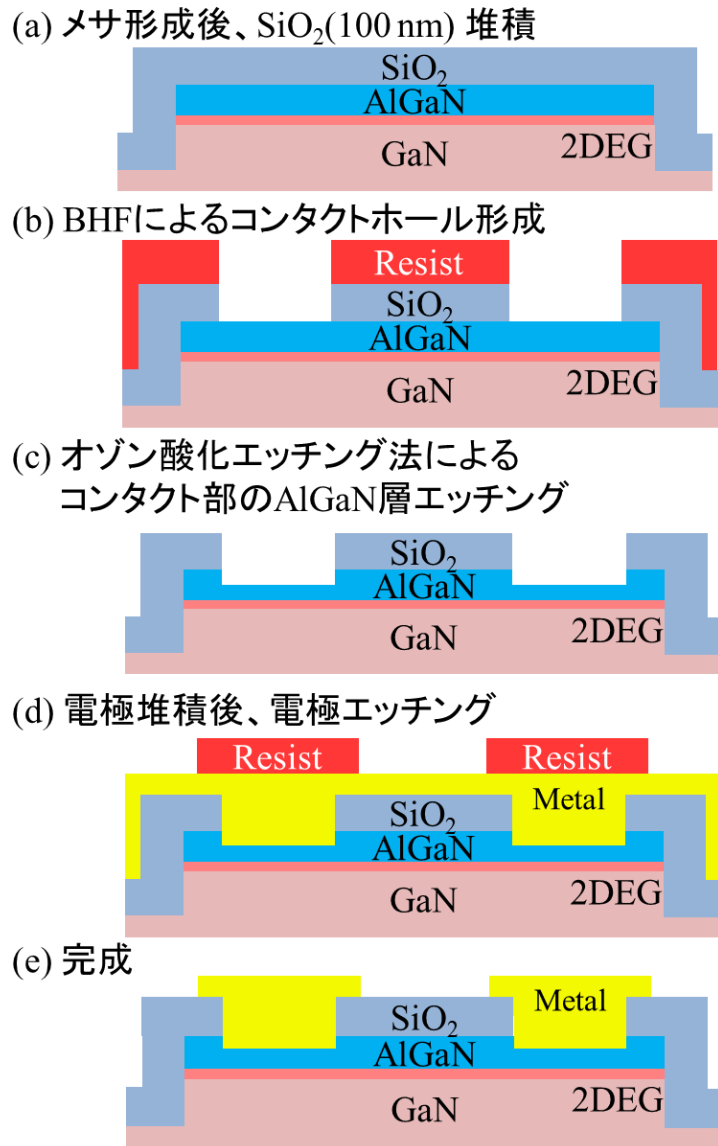


図 3.12 AlGaN 層厚依存性を評価するためのデバイス作製手順

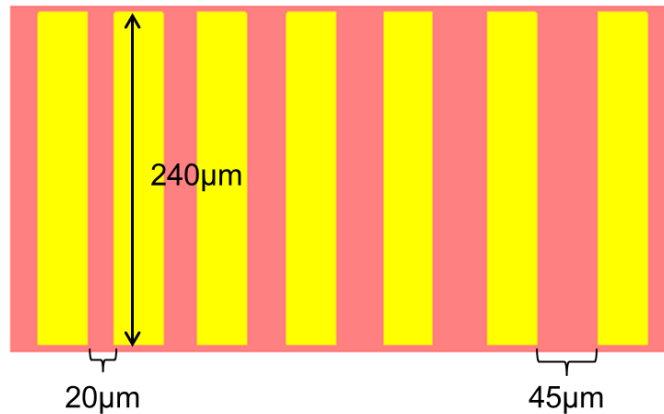


図 3.13 本章で使用した TLM パターン

### 3.3.2 Mo/Al/Ti 電極の TEM 観察による評価

本節では、本論文で使用した Mo/Al/Ti 電極の高温熱処理後の断面を TEM や EDX 分析を行い、第 1 章で述べた他の論文[1.28、1.29]と同様の界面層ができているかを評価した。

AlGa<sub>N</sub> 層厚 30nm の基板に対し、Mo/Al/Ti 電極を堆積後、950°C アニールを行った後の断面 TEM 像を図 3.14 に示す。他の論文と同様、AlGa<sub>N</sub> 層と電極の界面に薄い反応層ができており、これは Al-Ti-N の反応層と考えられる。また、反応層と AlGa<sub>N</sub> 界面はフラットであり、また AlGa<sub>N</sub> 層厚は 28.6nm でありほとんど変化は見られなかった。また貫通転移を介した局所的な合金化も起こっていないことがわかる。



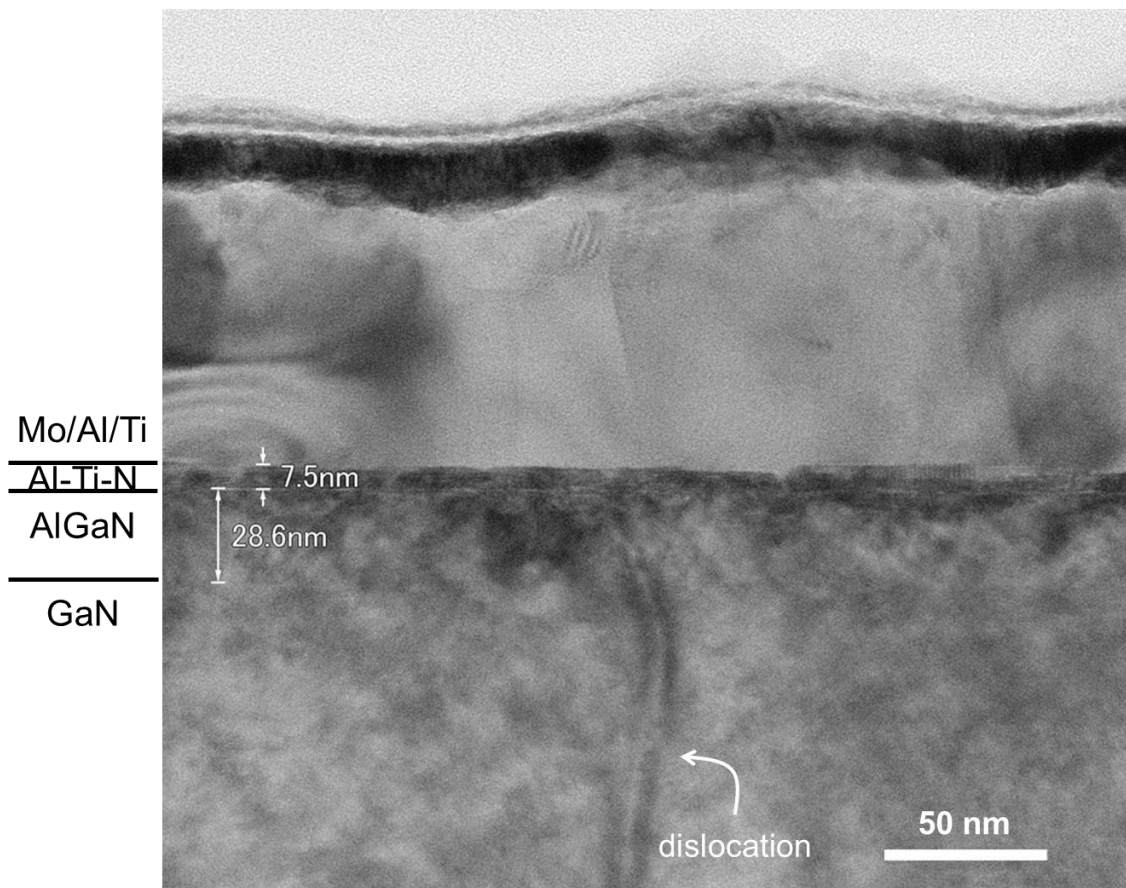


図 3.14 Mo/Al/Ti/AlGaN/GaN 構造における 950°C アニール後の断面 TEM 像

### 3.3.3 I-V 特性のアニール温度、AlGaN 層厚依存性

図 3.15(a),(b)にアニール温度を変化させていったときの、電極間距離 20 $\mu\text{m}$  での I-V 特性を示す。AlGaN 層厚は 30nm、Mo/Al/Ti は 35/40/40nm の試料の結果である。図 3.15(a)は 700°C から 950°C (最も電流値が高くなった) までの I-V 特性を示し、この領域では、アニール温度を上げていくにつれ電流値が増加していき、800°C アニール以降において I-V 特性にオーミック特性が得られた。一方、図 3.15(b)は電流値が低下していった 1000°C、1050°C での結果である。比較として、図 3.15(a)の 950°C アニール後の結果も載せている。詳細は 3.3.4 節で述べるが、この領域においては、コンタクト抵抗値が高くなったことで、電流値が低下している。

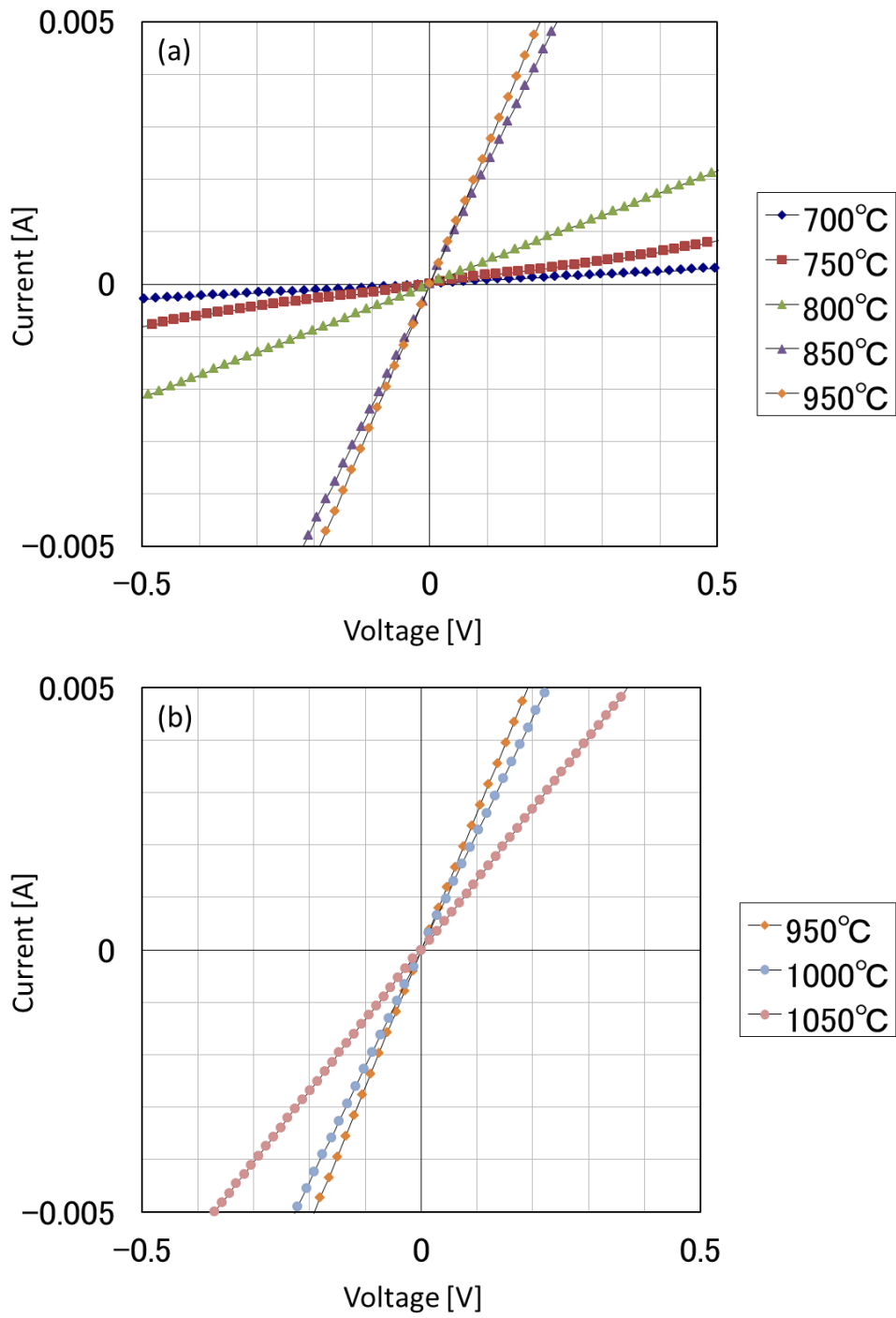


図 3.15 (a) 700°C~950°C、(b)950°C~1050°Cアニール後の電極間距離 20 $\mu\text{m}$  での I-V 特性 (AlGaIn 層厚 30nm、Mo/Al/Ti : 35/40/40nm)

I-V 特性の傾きから電極間距離  $20\mu\text{m}$  における総抵抗を算出し、電極間距離を変えプロットすることで、コンタクト抵抗を算出した。950°Cアニール後の AlGaN 層厚を変化させたときの電極間距離と総抵抗の関係を図 3.16 に示す。この結果より、いずれの AlGaN 層厚の試料においても傾きはほぼ一定であり、シート抵抗はエッチングによって変化しておらず、コンタクト部のみがエッチングできているといえる。このように、電極材料、AlGaN 層厚、アニール温度の異なる試料で総抵抗・電極間距離からコンタクト抵抗・シート抵抗の算出を行った。

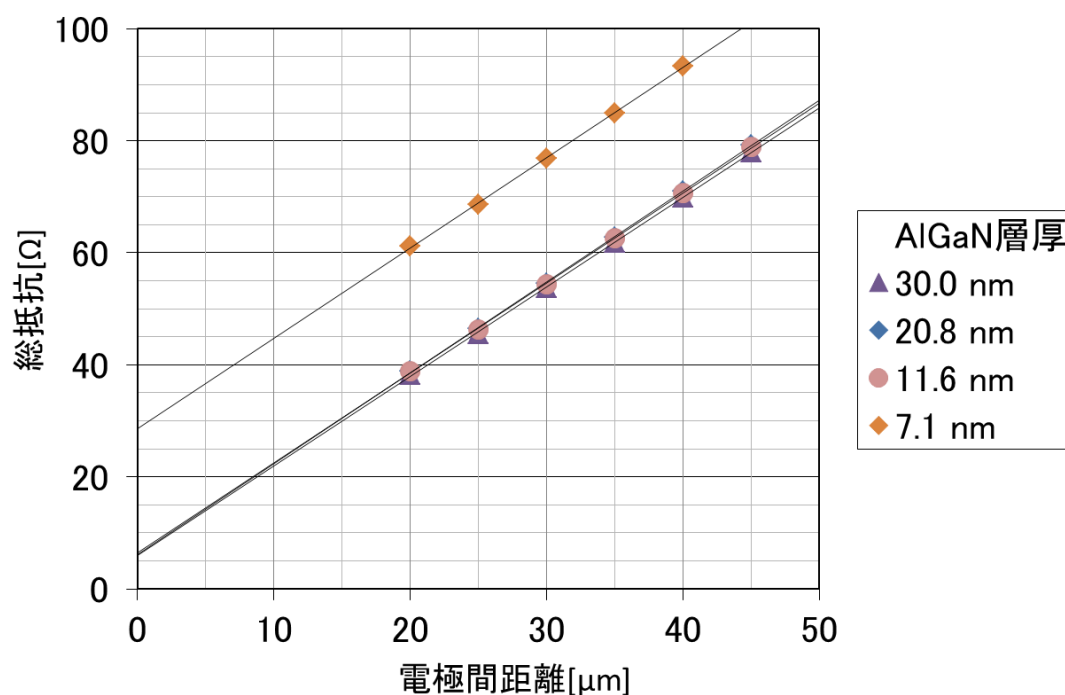


図 3.16 950°Cアニール後の AlGaN 層厚の違いによる電極間距離-総抵抗の関係  
(Mo/Al/Ti : 35/40/40nm)

### 3.3.4 コンタクト抵抗のアニール温度依存性

図 3.17～図 3.19 に、各 Al/Ti の比率における種々の AlGa<sub>N</sub> 層厚に対するアニール温度とコンタクト抵抗の関係を示す。2.3.12 節で述べたように、電極下部のみをエッチングで薄くしているため、TLM 測定で求められるシート抵抗は電極下部のシート抵抗と異なるため、幅で表されるコンタクト抵抗 ( $\Omega \cdot \text{mm}$ ) で評価を行っている。同じ Al/Ti 比率の電極において AlGa<sub>N</sub> 層厚が異なるとコンタクト抵抗に違いが見られるが、それについては 3.3.5 節で述べる。Al/Ti の比率については、3:1 (図 3.17) の場合 900°C、1:1 (図 3.18) の場合 900~950°C、1:3 (図 3.19) の場合 950°C が最もコンタクト抵抗が低くなっており、Ti の比率が増加すると最小抵抗値が得られる温度が高温側にシフトしていく。この傾向については、L. Kolaklieva らによって同様の特性が報告されている[3.5]。また、同じ AlGa<sub>N</sub> 層厚で比較すると、Al/Ti の比率が 1:3 の結果は抵抗値が高い。この原因としては、Ti の比率が高いと、高温熱処理によって Metal/AlGa<sub>N</sub> 界面に void ができてしまうといった報告もあり[3.5、3.6]、それによるものではないかと考えられる。

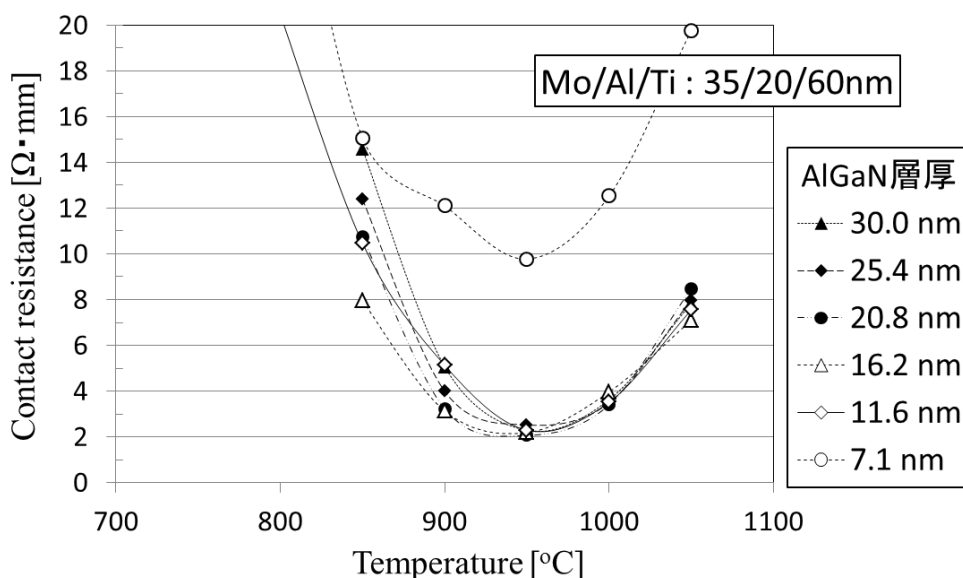


図 3.17 各 AlGa<sub>N</sub> 層厚における Al/Ti の比率が 1:3 の場合のコンタクト抵抗のアニール温度依存性

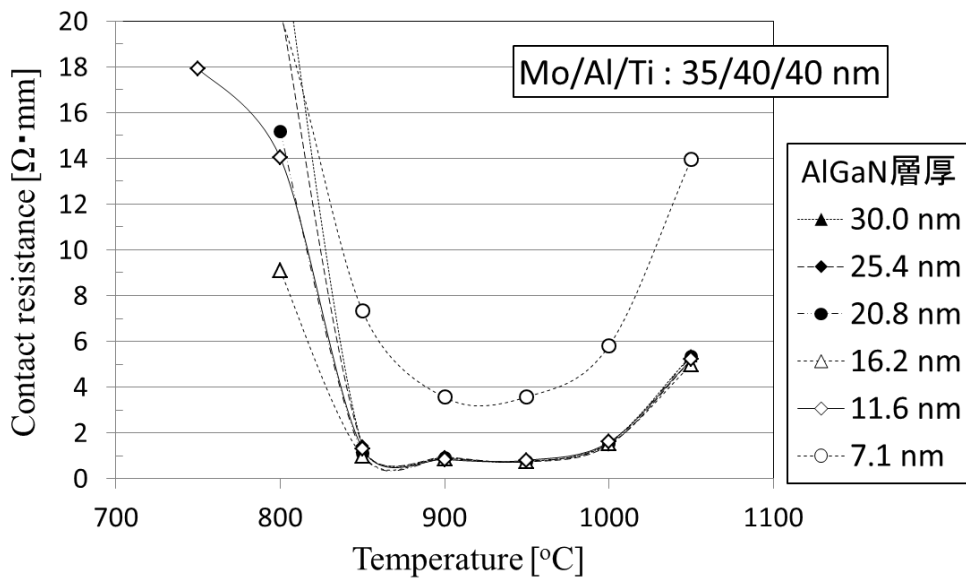


図 3.18 各 AlGaIn 層厚における Al/Ti の比率が 1:1 の場合の  
コンタクト抵抗のアニール温度依存性

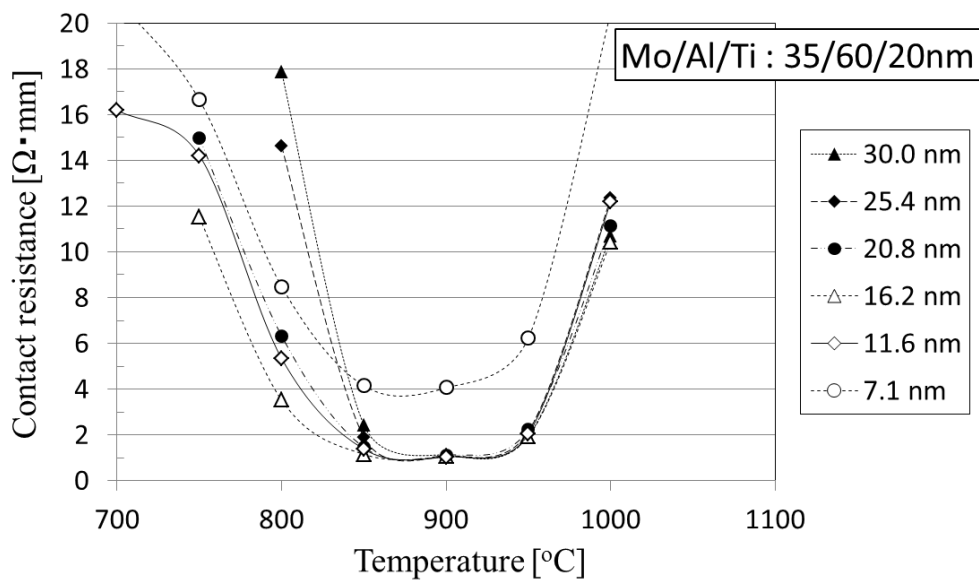


図 3.19 各 AlGaIn 層厚における Al/Ti の比率が 3:1 の場合の  
コンタクト抵抗のアニール温度依存性

### 3.3.5 コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性

3.3.4 節の結果をコンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性でプロットすると、アニール温度の違いで大きく 2 つの形に分類することができた。その結果を図 3.20、図 3.21 に示す。Al/Ti の比率によって違いがあるが、コンタクト抵抗値が下がり切っていない低温時 (Mo/Al/Ti 電極 : 35/20/60nm は 850°C、35/60/20nm および 35/40/40nm は 800°C) では AlGaN 層厚 16.2 nm の場合最も抵抗値が低くなる極値を持つような形になった。一方、抵抗値が最も低くなった高温熱処理後 (Mo/Al/Ti 電極 : 35/60/20nm は 900°C、35/20/60nm および 35/40/40nm は 950°C) では AlGaN 層厚が 11.6 nm より厚い領域において抵抗値がほぼ一定になった。一方、それより薄い 7.1 nm の試料は抵抗値が高い。

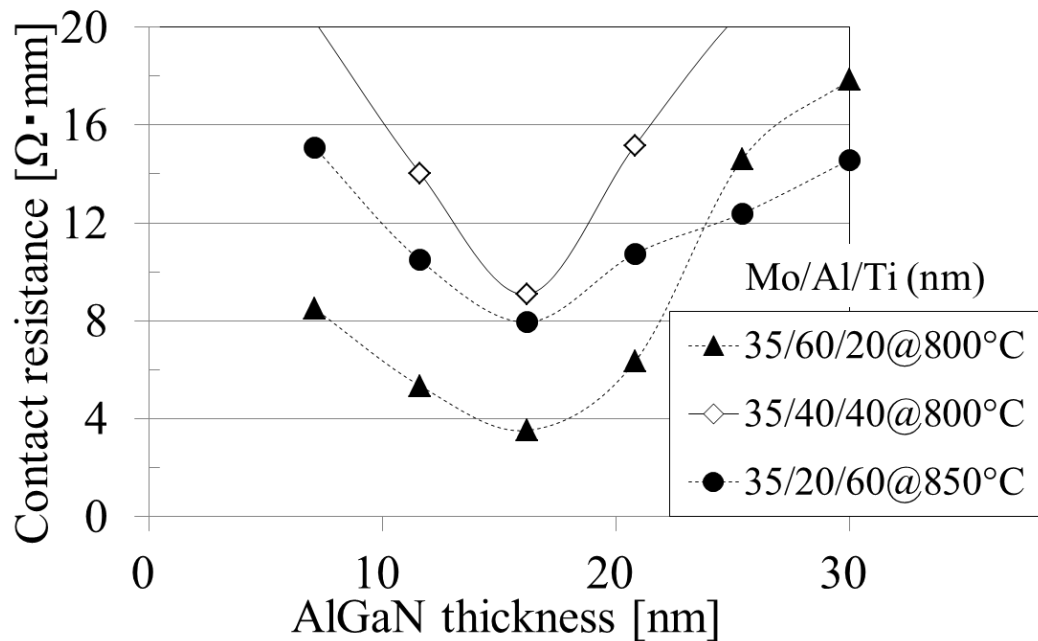


図 3.20 低温アニール時 (高コンタクト抵抗) のコンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性

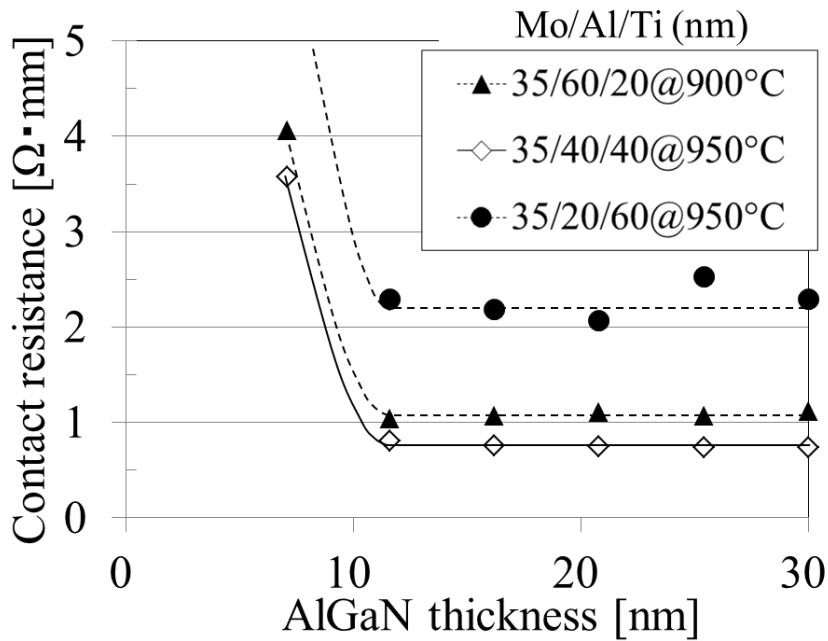


図 3.21 低抵抗が得られた高温アニール後のコンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性

### 3.4 AlGaN/GaN HEMT へのオーミックコンタクトの低抵抗化に向けて

3.3.5 節において、コンタクト抵抗が高い低温アニール時と低抵抗が得られた高温アニール後では、コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性があることが明らかになった。本節ではその原因について考察を行い、さらなる低抵抗化に向けどのようなアプローチが必要か示す。

まず、低温アニール時は、1.8 節で述べたような、極値を持つ形 (図 3.22(a)) であり、AlGaN 層厚が厚くなると高くなる  $R_{cAlGaN}$  と AlGaN 層厚が薄くなると高くなる  $R_{c2DEG}$  によるものといえ、1.8 節で予測していた通りの結果を得られた。

一方、高温になると 11.6 nm より厚い領域においては抵抗値がほぼ一定の値となった。この原因としては、図 3.23 のバンド図で説明可能である。1.7 節にて、Al/Ti 電極はアニール処理を行うことで、AlGaN 層から窒素を引き抜き AlGaN が n 型化すると述べたが、低温アニールではこの n 型化はほとんど起こっていないと考えられる。その場合、電極から 2DEG へのアクセスは、図 3.23(a)のように、AlGaN 中の欠陥による局在

準位を介したトラップアシストトンネリングをされると考えられる。これにより、AlGaN層が厚いとホッピングする距離も長くなるため、AlGaN層が厚くなるほど  $R_{cAlGaN}$  が大きくなったと考えられる。一方、高温アニールによって AlGaN 層表面が高濃度に n 型化すると図 3.23(b) のように AlGaN 界面の障壁は非常に薄くなる。その場合、電極から 2DEG へのアクセスはトンネル電流で抜けてしまうと、あとはコンダクションバンドの中を伝導していくので、AlGaN 層が抵抗として効かなくなり、 $R_{cAlGaN}$  は AlGaN 層厚依存性が見られなくなる。しかし、Metal/AlGaN 界面の障壁は約 1eV あり [3.10]、低温時と同様、トラップアシストトンネリングによる伝導機構も残る。以上のような点から  $R_{cAlGaN}$  は AlGaN 層厚依存性が非常に小さくなると考えられる。また、AlGaN 層表面が n 型化することでバンドが下がり 2DEG 濃度は上昇する。そのため、 $R_{c2DEG}$  も低温アニール時に比べると低減していると考えられる。以上のことから図 3.22 (b) のように、AlGaN 層厚が厚くなると大きくなる  $R_{cAlGaN}$  と AlGaN 層厚が厚くなると小さくなる  $R_{c2DEG}$  が釣り合ったことで、AlGaN 層厚が厚い領域においてほぼ一定の値になったと考えられる。一方、AlGaN 層が薄い領域においては、 $R_{c2DEG}$  が高いためコンタクト抵抗値が高い。また、高温熱処理後において、電極の Al/Ti の層厚比によって抵抗値が異なるが、これは  $R_{cMetal/AlGaN}$  の違いによるものと考えられる。

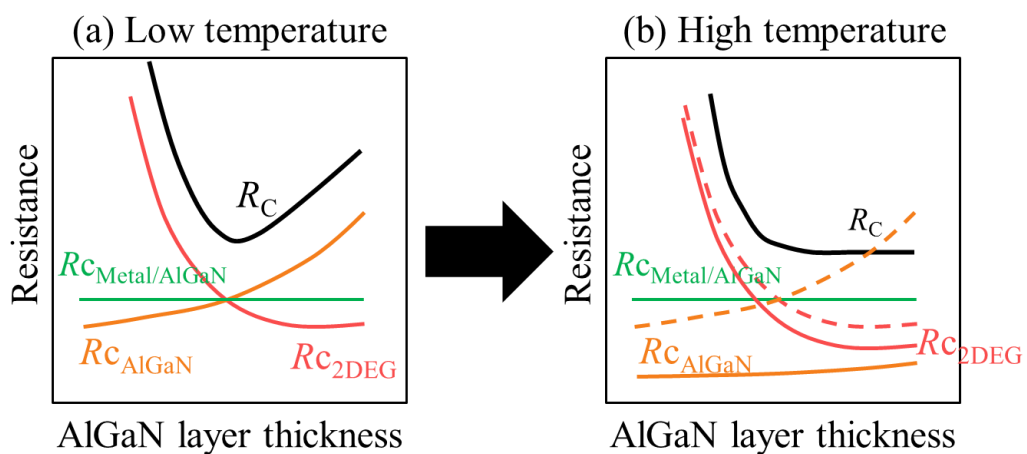


図 3.22 (a)低温アニール、(b)高温アニール後の各抵抗成分の大小関係の概念図



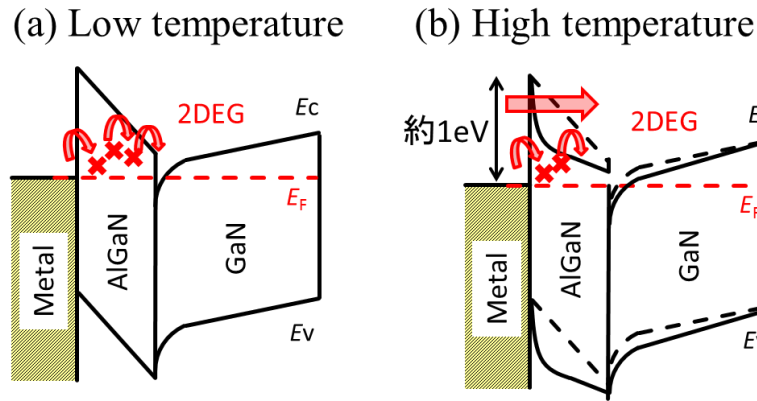


図 3.23 (a)低温アニール、(b)高温アニール後での電極から 2DEG へのアクセス概念図

以上のことから、コンタクト抵抗値低減に向け、残った成分である  $R_{C_{Metal/AlGaN}}$  や  $R_{C_{2DEG}}$  を低減することが有効といえる。 $R_{C_{Metal/AlGaN}}$  の低減には、図 3.21 のように電極の積層堆積厚の比率によって一定値が異なっていたことから、更なる積層比率の最適化で更に低減できる可能性が考えられる。

一方、 $R_{C_{2DEG}}$  を低減させることでもコンタクト抵抗は低減すると考えられる。それには 2DEG 濃度をさらに増加させることが有効と考えられるが、2DEG 濃度は Al の組成比を増やすことで増加するが、図 3.24 に示すように、AlGaN のバンドギャップも増加してしまうことで  $R_{C_{Metal/AlGaN}}$  が増加してしまったり、組成比を増やすとより歪みが大きくなることで欠陥の増加や基板の反りや割れなどが多くなるといった問題が懸念される。

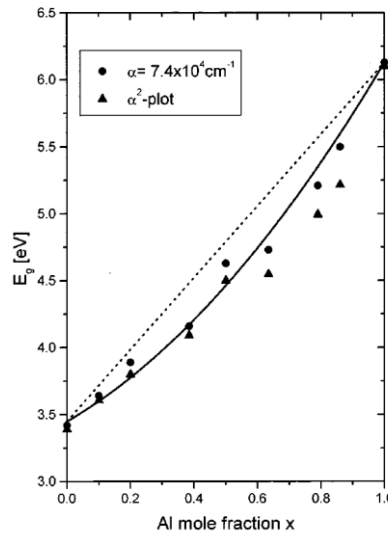


図 3.24 Al の組成比を変化させたときのバンドギャップの変化[3.11]

### 3.5 本章のまとめ

コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性を評価するにあたり、プラズマを用いずに、かつ制御性が高く安定して AlGaN 層のエッチングを行うことが可能なオゾン酸化エッチング法の条件探索を行った。エッチング面は穴が大きくなる一方、平坦性は極めて高いことが明らかになり、また本エッチングによって AlGaN 層厚を薄くしていったときの 2DEG 濃度を評価したが、エピ成長によって AlGaN 層厚を変化させた場合と同様であり、本エッチングによってダメージが入っていないことが明らかになった。

オゾン酸化エッチング法を使用して、AlGaN の厚さを変化させコンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性の評価を行った。その結果、抵抗値が高い低温領域と抵抗値が低くなった高温熱処理後で、コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性が異なる形を示した。低温時は極値を持つような形になり、これは、AlGaN 層厚が厚くなると高くなる  $R_{CAlGaN}$  と AlGaN 層厚が薄くなると高くなる  $R_{C2DEG}$  によるものといえ、1.8 節で予測していた通りの結果を得られた。一方、高温時は 11.6 nm より厚い領域においては抵抗値がほぼ一定の値となり、これは AlGaN 層の n 型化により AlGaN 層厚が厚くなると大きくなる  $R_{CAlGaN}$  の AlGaN 層厚依存性が小さくなり、また AlGaN 層厚が厚くなると小さくなる  $R_{C2DEG}$  が釣り合ったことによると考えられる。

以上のことより、以上のことから、コンタクト抵抗値低減に向け、残った成分である  $R_{CMetal/AlGaN}$  や  $R_{C2DEG}$  を低減することが有効であるという結論を得られた。

### 3.6 本章の参考文献

- [3.1] Y. J. Han, S. Xue, W. P. Guo, C. Z. Sun, Z. B. Hao and Y. Luo, "Characteristics of n-GaN After  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  and  $\text{Cl}_2/\text{N}_2$  Inductively Coupled Plasma Etching", *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, 6409 (2003)
- [3.2] D. Buttari, S. Heikman, S. Keller and U. K. Mishra, "Digital etching for highly reproducible low damage gate recessing on AlGaIn/GaN HEMTs", *Proc. IEEE Lester Eastman Conference on, High Performance Devices*, 6-8 Aug, p. 461. (2002)
- [3.3] Y. Wang, M. Wang, B. Xie, C. P. Wen, J. Wang, Y. Hao, W. Wu, K. J. Chen and B. Shen, "High-Performance Normally-Off  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$  MOSFET Using a Wet Etching-Based Gate Recess Technique", *IEEE Electron Device Letters*, **34**, 1370 (2013)
- [3.4] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, and M. Stutzmann, "Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN heterostructures", *J. Appl. Phys.* **85**, 3222 (1996)
- [3.5] L. Kolaklieva, R. Kakanakov, V. Cimalla, St. Maroldt, F. Niebelschütz, K. Tonisch and O. Ambacher, "The Role of Ti/Al Ratio in Nanolayered Ohmic Contacts for GaN/AlGaIn HEMTs", *Proc. 26th Int. Conf. on Microelectronics (MIEL2008)*, Nis, Serbia, 11-14 May (2008)
- [3.6] B. Van Daele, G. Van Tendeloo, W. Ruythooren, J. Derluyn, M. R. Leys and M. Germain, "The role of Al on Ohmic contact formation on n-type GaN and AlGaIn/GaN", *Appl. Phys. Lett.* **87**, 061905 (2005)
- [3.7] Z. H. Liu, S. Arulkumaran and G. I. Ng, "Temperature dependence of Ohmic contact characteristics in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors from  $-50$  to  $200^\circ\text{C}$ ", *Appl. Phys. Lett.* **94** 142105 (2009).
- [3.8] S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa, M. Umeno and T. Jimbo, "Effects of annealing on Ti, Pd, and Ni/n- $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$  Schottky diodes", *IEEE Trans. Electron*

Devices **48**, 573 (2001).

[3.9] Z. Fan, S. N. Mohammad, W. Kim, Ö. Aktas, A. E. Botchkarev and H.

Morkoç, "Very low resistance multilayer Ohmic contact to n-GaN", Appl. Phys. Lett. **68**, 1672 (1996)

[3.10] F. Iucolano, F. Roccaforte, A. Alberti, C. Bongiorno, S. Di Franco and V.

Raineri, "Temperature dependence of the specific resistance in Ti/AlNi/Au contacts on n-type GaN", J. Appl. Phys. **100**, 123706 (2006)

[3.11] H. Angerer, D. Brunner, F. Freudenberg, O. Ambacher, M. Stutzmann, R.

Höpler, T. Metzger, E. Born, G. Dollinger, A. Bergmaier, S. Karsch and H.-J. Körner, "Determination of the Al mole fraction and the band gap bowing of epitaxial  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  films", Appl. Phys. Lett. **71**, 1504 (1997)

## 第 4 章

# Metal/AlGaN 界面への凹凸構造 導入による低抵抗化の実現

## 4.1 Metal/AlGaN 界面への凹凸構造導入の意義

第3章にて、コンタクト抵抗値低減に向け、 $R_{C_{Metal/AlGaN}}$ や $R_{C_{2DEG}}$ を低減することが有効であるという結論が得られた。 $R_{C_{2DEG}}$ を低減する方法としては2DEG濃度を増加させることが有効と考えられるが、AlGaNの平坦構造ではAlGaN層厚を厚くすると、低温ではAlGaN層が抵抗として見えてしまい高抵抗になってしまったり、低抵抗になった高温では抵抗値が一定の値になるといった限界がある。他に2DEG濃度を増加させるためにAlの組成比を上げると、バンドギャップも増加してしまうというトレードオフ関係がある。そこで、第4章では、コンタクト形成領域に新しい構造を提案した。その構造と概念を図4.1に示す。AlGaN層の表面に凹凸構造を導入することで更なる低抵抗化を図る手法である。最終的なデバイスではMetal/AlGaN界面に凹凸構造を導入したことと同じ意味になるので、本章以降ではこの構造を「Metal/AlGaN界面への凹凸構造」と呼ぶ。図4.1において、厚い領域、薄い領域の下の2DEG濃度はAlGaN層厚によって決まる。しかし、図中の赤丸を付けたエッジ部においては、AlGaN層の薄い領域と高濃度な2DEGが接近することでその濃度が増加し、その結果として抵抗値低減効果が期待できる。そこで、本章では、まず図4.1のようにAlGaN層へ凹凸構造を導入することによって2DEG濃度がどう変化するかシミュレーションを行い、その後、実験的に凹凸構造を導入することによって低抵抗化が実現できることを明らかにした。

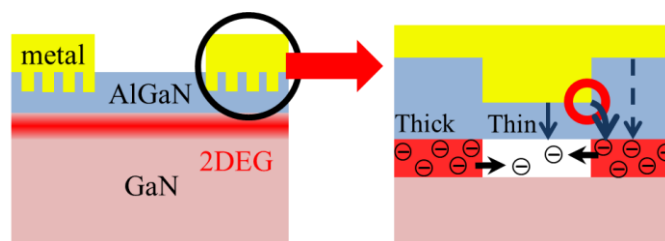


図 4.1 Metal/AlGaN 界面への凹凸構造導入概念図

## 4.2 Metal/AlGaN 界面への凹凸構造導入による

### 2DEG 濃度シミュレーション

図4.2は本節でシミュレーションしたMetal/AlGaN界面へ凹凸構造を導入したデバイス構造を表している。このシミュレーションでは、AlGaN層厚によって変化する分極電荷を、横方向に凹凸構造を導入してAlGaN層厚を変化させた関数として計算を行っている。実際には凹凸構造導入により歪みの緩和があるが、それについては考慮していな

い。本節では、AlGaN の厚い層厚は 25nm に固定し、薄い層厚を変化させ、ピッチの幅や比率を変えて議論を行う。

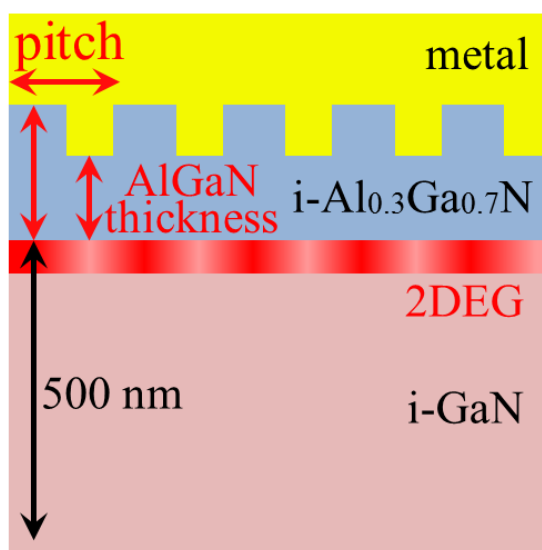


図 4.2 シミュレーションに用いた Metal/AlGaN 界面への凹凸構造

#### 4.2.1 凹凸構造導入による凹凸部の高さを変化させたときの 2DEG 濃度分布

本節では、図 4.3 のように、凹凸 AlGaN 層のピッチ幅を 40nm で厚い領域と薄い領域の比率は 1:1 のまま、厚い AlGaN 層は 25nm のまま、薄い AlGaN 層厚を 5 nm もしくは 10nm と変化させたときの 2DEG 濃度分布を示す。

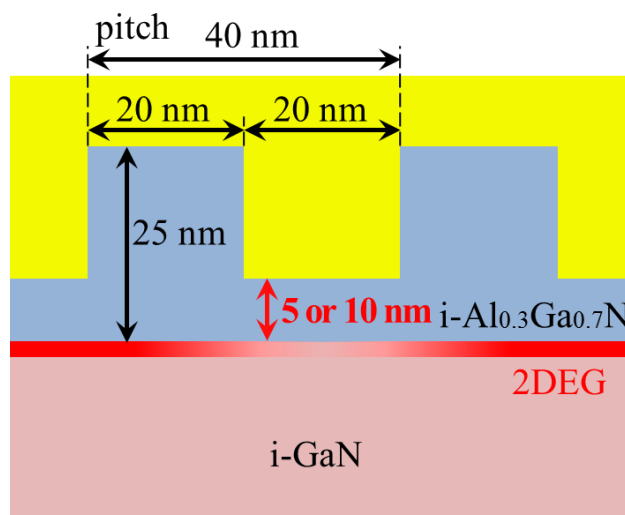


図 4.3 凹凸構造導入による薄い AlGaN 層厚を変化させたときの 2DEG 濃度分布をシミュレーションするために使用した AlGaN/GaN 構造の概念図

図 4.4 は、図 4.3 の構造においてシミュレーションした 2DEG 濃度の横方向分布を示

す。図中の緑、赤、青の直線はそれぞれ 25、10、5 nm の平坦 AlGa<sub>N</sub> の場合の 2DEG 濃度を示している。青、赤の曲線は、薄い領域を 10 nm もしくは 5 nm にしたときの 2DEG 濃度をあらわしている。凹凸構造を導入した AlGa<sub>N</sub> 構造の最大 2DEG 濃度は、25 nm の平坦 AlGa<sub>N</sub> 構造と比べ低くなっている。一方、AlGa<sub>N</sub> 層が薄い領域においては、10 nm の場合 2DEG 濃度の最小値は平坦 10 nm の 2DEG 濃度と比較し 1.78% 高くなっており、電極エッジ部においては 11.8% の 2DEG 濃度の増加が確認された。同様の効果は薄い AlGa<sub>N</sub> 層が 5 nm の場合は更に大きくなり、2DEG 濃度の最小値は平坦 5 nm の 2DEG 濃度と比較し 41.2% 高くなっており、電極エッジ部においては 271% の 2DEG 濃度の増加が確認された。このように、高濃度の 2DEG が AlGa<sub>N</sub> 層の薄い方へ広がっていることがわかる。これはエッジ部において、電極がより高濃度な 2DEG へ接近するということであり、低抵抗化の実現を示唆している。

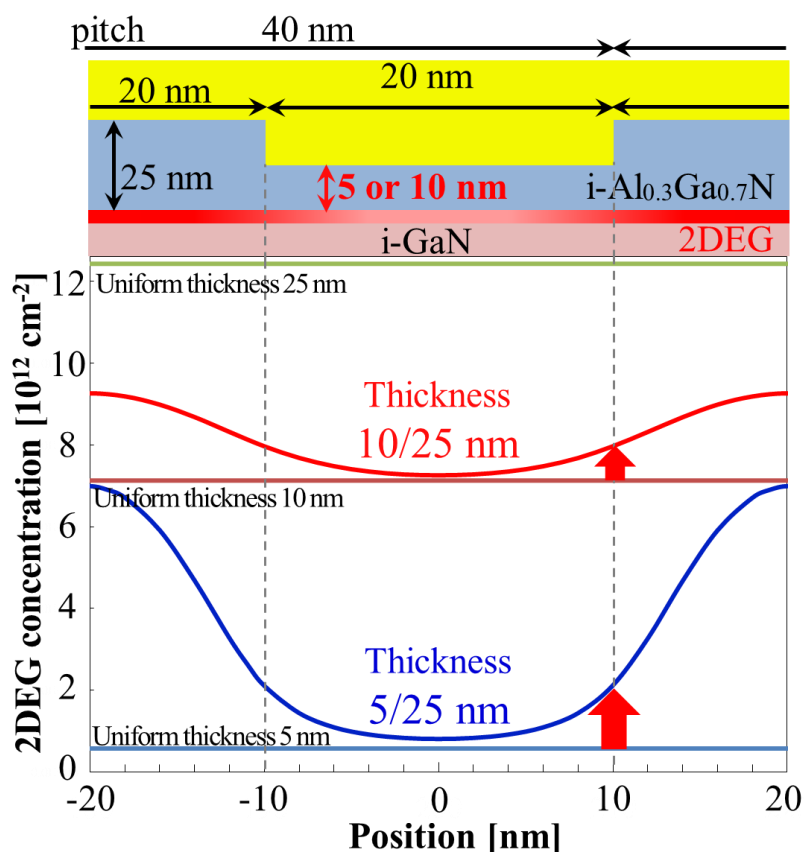


図 4.4 凹凸 AlGa<sub>N</sub> 構造において薄い AlGa<sub>N</sub> 層厚を変化させたときの 2DEG 濃度分布

(緑、赤、青の直線はそれぞれ 25、10、5 nm の平坦 AlGa<sub>N</sub> における 2DEG 濃度、青、赤の曲線は、凹凸構造を 10/25 nm もしくは 5/25 nm にしたときの 2DEG 濃度である)



#### 4.2.2 凹凸構造導入による凹凸部の幅を変化させたときの 2DEG 濃度分布

次に、凹凸部の幅を変えた時の 2DEG 濃度分布のシミュレーションを行った。本節では、図 4.5 のように、凹凸 AlGaN 層のピッチ幅は先ほどまでと同様 40nm のまま、厚い AlGaN 層と薄い AlGaN 層のピッチ幅を変化させて 2DEG 濃度を計算した。また、厚い AlGaN 層厚は 25nm、薄い AlGaN 層厚は 5 nm で計算を行っている。

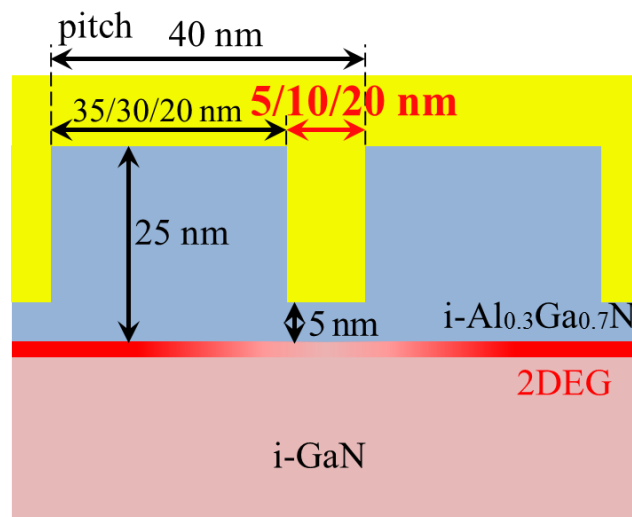


図 4.5 凹凸構造においてピット幅を変化させたときの 2DEG 濃度分布をシミュレーションするために使用した AlGaN/GaN 構造の概念図

図 4.6 は、図 4.5 の構造においてシミュレーションした 2DEG 濃度の横方向分布を示す。図中の赤、青、緑の曲線は薄い領域の AlGaN 層のピットの幅を 5、10、20 nm にしたときの 2DEG 濃度を示している。ピット幅を狭くするほど、AlGaN 層が薄い領域での 2DEG 濃度は上昇しており、これは AlGaN 層の薄い方へ浸み込んだ 2DEG が重なり合ったことで増加したと考えられ。このように、ピット幅を狭くすることは、電極が接近する 2DEG 濃度がさらに上昇するため更なる低抵抗化が期待できる。

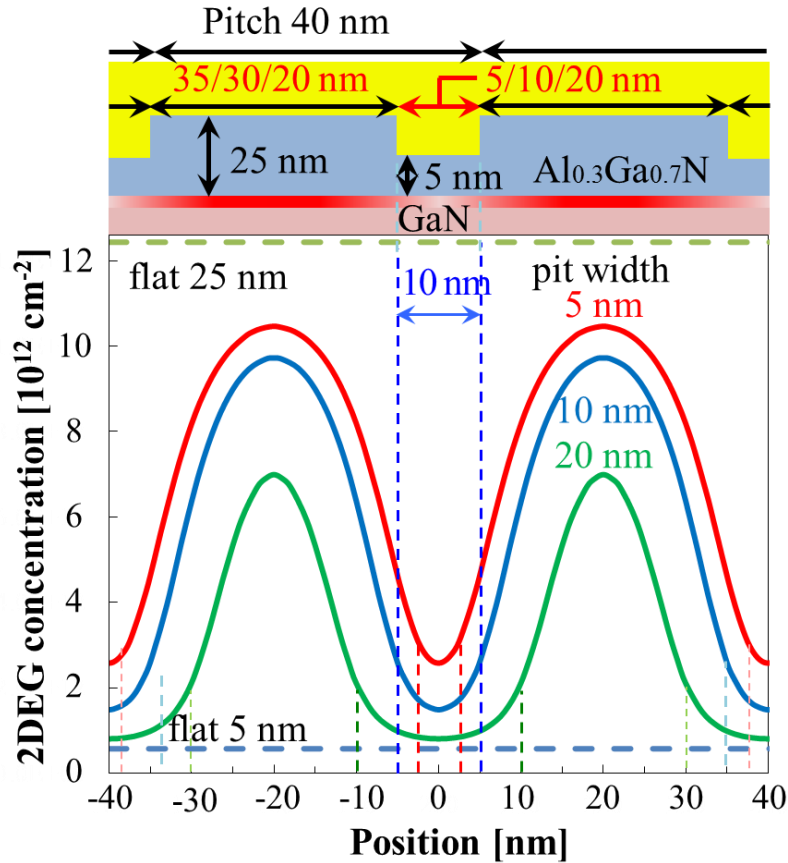


図 4.6 凹凸 AlGaIn 構造において AlGaIn 層の凹凸部の幅を変化させたときの 2DEG 濃度分布

(緑、赤、青の直線はそれぞれ 25、10、5 nm の平坦 AlGaIn における 2DEG 濃度、青、赤の曲線は、凹凸構造を 10/25 nm もしくは 5/25 nm にしたときの 2DEG 濃度である。)

#### 4.2.3 凹凸 AlGaIn 構造の形状を変化させたときの 2DEG 濃度分布

4.2.2 節から、薄い AlGaIn のピット幅を狭くすると、AlGaIn 層の薄い方へ広がった 2DEG が重なり合うことで 2DEG 濃度が上昇することが示された。そこで、本節では凹凸 AlGaIn 構造の形状を変化させ、2DEG の重なりを連続で発生させられるように図 4.7(a) のようなピラミッド構造や図 4.7(b) のドーム構造における 2DEG 濃度を計算した。それぞれの構造の 1 つのピッチの長さは 40 nm で固定し、厚い領域の AlGaIn 層厚を 25 nm、薄い領域の AlGaIn 層厚は 5 nm で計算を行った。

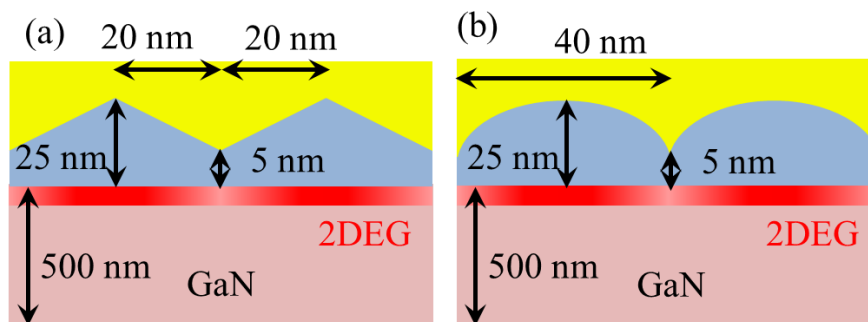


図 4.7 凹凸 AlGaN 構造の形状を変化させたときの 2DEG 濃度分布をシミュレーションするために使用した AlGaN/GaN 構造の概念図

図 4.8 は、図 4.7 の構造においてシミュレーションした 2DEG 濃度の横方向分布を示す。比較として、前節までで得られた矩形型の凹凸 AlGaN 構造（ピッチ幅 40nm、厚い領域と薄い領域の比率 1:1）の結果も示しているが、ピラミッド構造やドーム構造を取ることで、2DEG 濃度は劇的に増加している。これらの結果から、ピラミッドやドーム構造の AlGaN 層を導入することで、電極と接近する 2DEG 濃度は矩形型の凹凸 AlGaN 構造よりも上昇するため、更なる低抵抗オーミックコンタクトを得られることが期待できる。

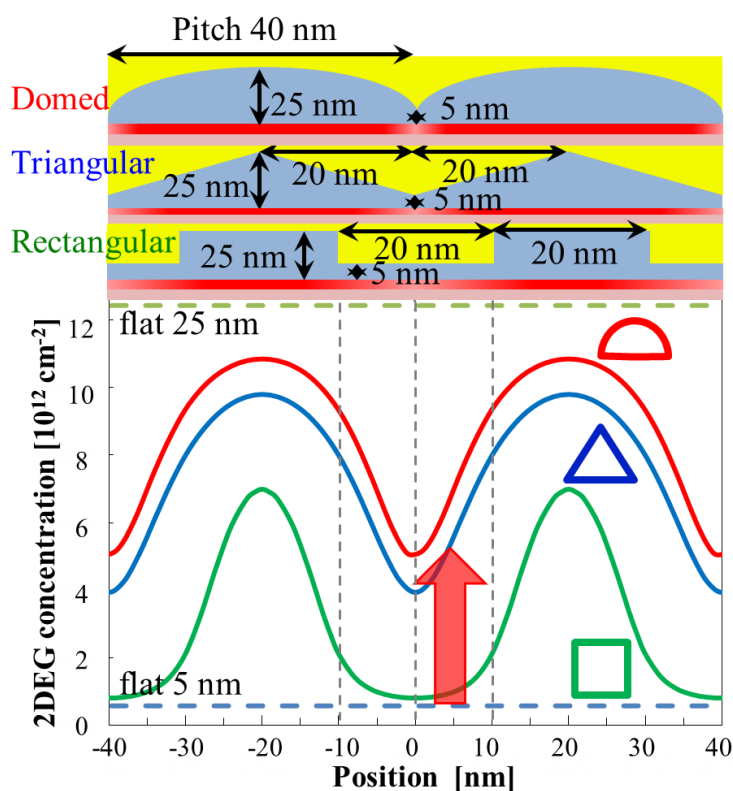


図 4.8 凹凸 AlGaN 構造の形状をピラミッドやドーム構造に変化させたときの 2DEG 濃度分布

### 4.3 Metal/AlGaN 界面への凹凸構造導入

#### 4.3.1 凹凸構造導入のプロセスにおける問題点

4.2 節において、凹凸構造を導入することで、電極エッジ部での 2DEG が上昇することでコンタクト抵抗を低減できる可能性が示唆された。しかし、コンタクト抵抗が低減するかを実験で検証するにあたり、いくつか問題点が考えられる。

AlGaN 層へ図 4.1 のような凹凸構造を作製するにあたり、第 3 章で使用したオゾン酸化エッチング法では、AlGaN 層の酸化層除去の際に HCl を使用するウェットエッチングであるため、凹凸エッジ部がブロードになってしまい不適である。そこで凹凸構造の作製には RIE を用いることにしたが、リファレンスとなるコンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性が、エッチング方法の違いにより第 3 章の結果と変化する可能性が考えられた。そこで、図 4.9 のように、第 3 章と同様に電極下のみを RIE で平坦に薄くし、コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性を評価した。

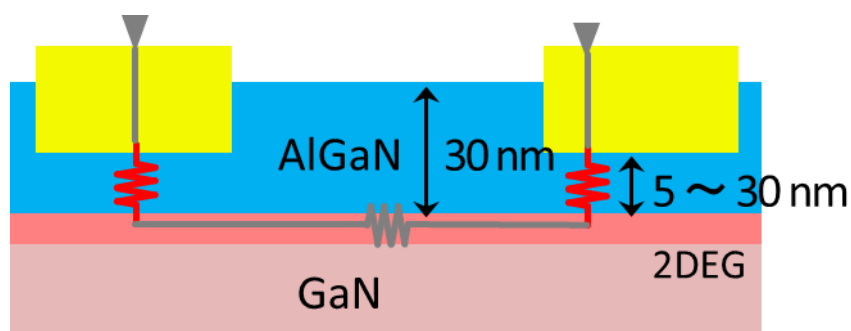


図 4.9 コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性を評価するために作製した試料  
(電極下部を RIE により平坦にエッチングを行った)

#### 4.3.2 AlGaN 層への凹凸構造導入のための RIE 条件探索

RIE で AlGaN 層を 5~25nm エッチングするにあたり、秒単位でのコントロールになるため、エッチングレートが早いとエッチング量の制御が難しい。また、表面状態を平坦に保ったままエッチングすることが望ましい。そこで、以上のような要件を満たす RIE の条件探索を行った。

RIE 条件は、RF power 3W、圧力 0.5Pa、Ar 5sccm で固定し、Cl<sub>2</sub> 20sccm もしくは、Cl<sub>2</sub> 10sccm と BCl<sub>3</sub> 10sccm の混合ガスで行った[4.1]。エッチング時間とエッチング深さの関

係を図 4.10 に示す。

結果は大きく異なり、 $\text{Cl}_2$  のみでは  $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$  混合ガスよりもエッチングレートは 1 桁ほど遅くなる。一方、エッチング開始時間には遅れが見られる。 $\text{Cl}_2$  のみの場合 32sec、 $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$  混合ガスの場合 3sec であり、これらの遅延は  $\text{AlGaIn}$  表面の酸化膜などが原因と考えられる[4.2]。

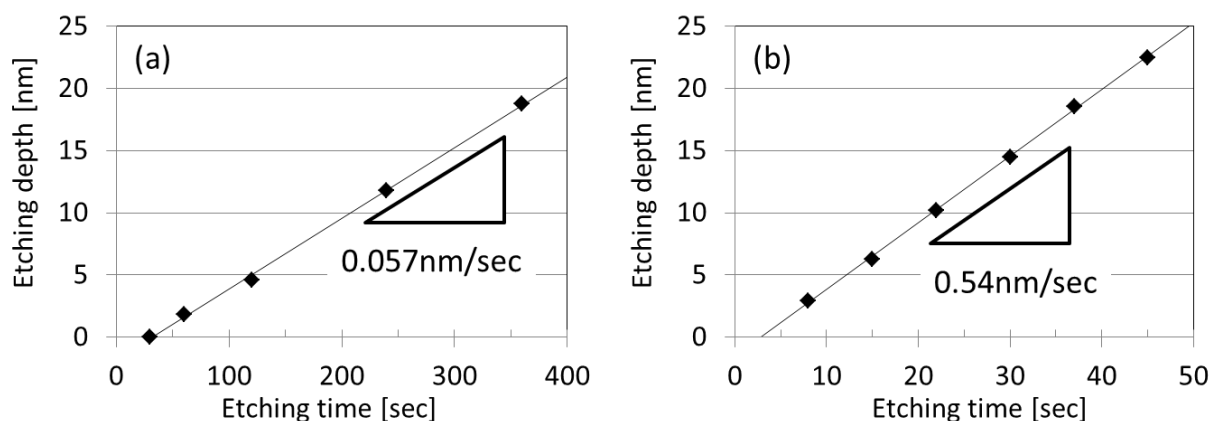


図 4.10 RIE によるエッチング時間とエッチングレート

(a)  $\text{Cl}_2$  20sccm (b)  $\text{Cl}_2$  10sccm +  $\text{BCl}_3$  10sccm

いずれの RIE ガス種においても  $\text{AlGaIn}$  層を薄くエッチングするためには、秒単位で制御可能な十分遅いエッチングレートを得ることができた。次に、RIE 後の  $\text{AlGaIn}$  の平坦性からどちらの条件がより適しているか確認をおこなった。異なるエッチング方法で 15nm エッチングした後の  $\text{AlGaIn}$  表面モフォロジーを図 4.11 に示す。

図 4.11(a)は第 3 章で述べたオゾン酸化エッチング法によって 15nm エッチングした後の表面モフォロジー(図 3.5(c))、RMS 値は 0.88nm であり、平坦部のみの RMS は 0.22nm である。図 4.11(b)は  $\text{Cl}_2$  のみで 15nm エッチングした後の AFM 像で、RMS 値は 1.21nm であった。図 4.11(c)は  $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$  混合ガスによって 15nm エッチングした後の AFM 像で、RMS 値は 0.41nm であり、平坦部の RMS は 0.24nm と、オゾン酸化エッチング法と同等である。このように、 $\text{Cl}_2$  のみでは表面が大きく荒れる一方、 $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$  混合ガスでは表面状態を保ったままエッチングされることがわかる。このことから、RIE に使用するガス条件は  $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$  混合ガスが適しているといえる。そこで本章以降では、この RIE 条件で  $\text{AlGaIn}$  層のエッチングを行っていく。

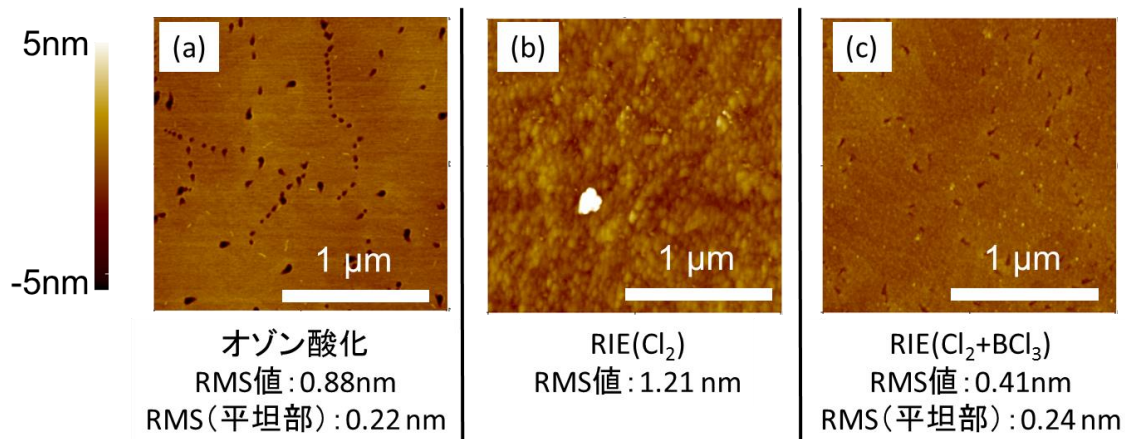


図 4.11 異なるエッチング方法で 15nm エッチングした後の AlGaN 表面モフォロジー  
 (a)オゾン酸化エッチング法 (b) RIE(Cl<sub>2</sub>) (c) RIE(Cl<sub>2</sub>+BCl<sub>3</sub>)

### 4.3.3 RIE によりエッチングされた AlGaN 層厚とコンタクト抵抗の関係

RIE によって AlGaN 層厚を 5~30 nm と変化させたときに、最も低抵抗が得られた 900°C アニール後のコンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性を図 4.12 に示す。3.3.4 節のオゾン酸化エッチングで AlGaN 層厚を変化させた時とほぼ同様の結果を得られた。AlGaN 層厚 30 nm のコンタクト抵抗値が高いが、これは AlGaN 層の n 型化が十分に起こりきらなかったためと考えられる。また、AlGaN 層厚 10~20nm の試料のコンタクト抵抗値はほぼ同じであったため、本章以降では、凹凸構造を導入しない場合の最小値のリファレンスとして AlGaN 層厚 10nm の結果を使用する。

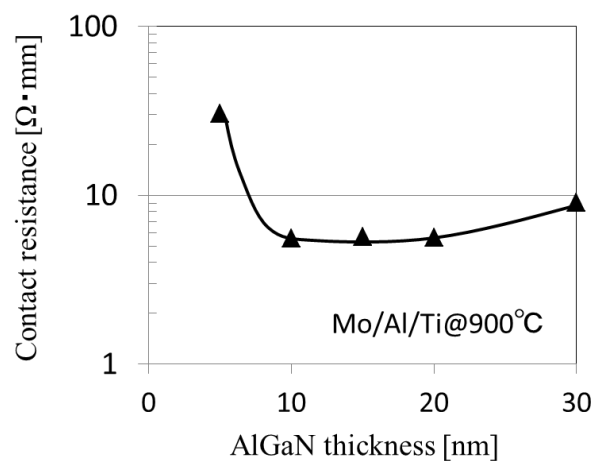


図 4.12 RIE によって AlGaN 層厚を平坦に変化させたときの  
 コンタクト抵抗の AlGaN 層厚依存性

#### 4.3.4 AlGaN 層への凹凸構造導入プロセス

図 4.13 に AlGaN 層への凹凸構造導入のプロセスフローを示す。まずアセトン、エタノールで有機洗浄をした後にメサ形成用マスクパターンを使用し、 $\text{Cl}_2$  ガスによる素子分離を行った。そして、PECVD にて  $\text{SiO}_2$  を 100nm 堆積し (図 4.13 (a))、コンタクトホール穴開け用のマスクを用いてパターニングをした後に Buffered HF にてコンタクト部の穴開けを行った (図 4.13 (b))。その後、図 4.13 (c) のように、凹凸パターンをフォトリソグラフィによりパターニングし、図 4.13 (d) において凹凸構造を  $\text{Cl}_2 + \text{BCl}_3$  混合ガスでの RIE によって作製した。本章では、AlGaN 部の厚い領域を 20nm、薄い領域を 5nm で固定した。その後、電極材料として Mo/Al/Ti を 35/60/60nm 堆積した。

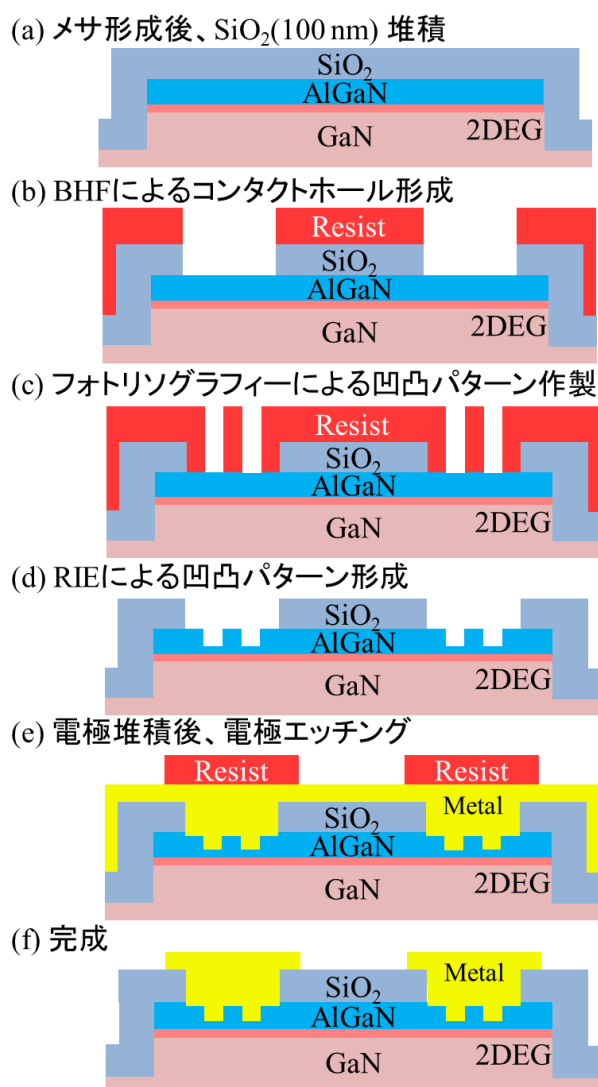


図 4.13 AlGaN 層への凹凸構造導入のプロセスフロー

その後、図 4.13 (e)のように測定電極として残す部分をレジストで保護し、その後  $\text{Cl}_2$  ガスによる RIE にて電極のエッチングを行った後、レジストを剥離して完成(図 4.13 (f))となる。以上のように作製したサンプルに対し、 $\text{N}_2$  雰囲気中での 1 分アニールと TLM 測定を行った。

#### 4.3.5 AlGaN 層へ導入した凹凸構造

図 4.14 にコンタクト部へ導入した 4 種類の凹凸構造の平面パターンを示す。本論文では、左から「ドット四角配置」、「ドット最密充填配置」、そして電流の経路に対して平行にストライプを並べたものを「横ストライプ」、一方、電流経路に対し垂直にストライプを並べたものを「縦ストライプ」と呼ぶ。本章では、平面パターンのピッチは  $5\mu\text{m}$  で固定した。また、デバイス作製時のずれを考慮して、凹凸構造は上下左右  $5\mu\text{m}$  ずつ電極の外側に広げて作製を行っている。また図 4.15 にはこれらの凹凸パターンの電極堆積後の光学顕微鏡写真を示している。

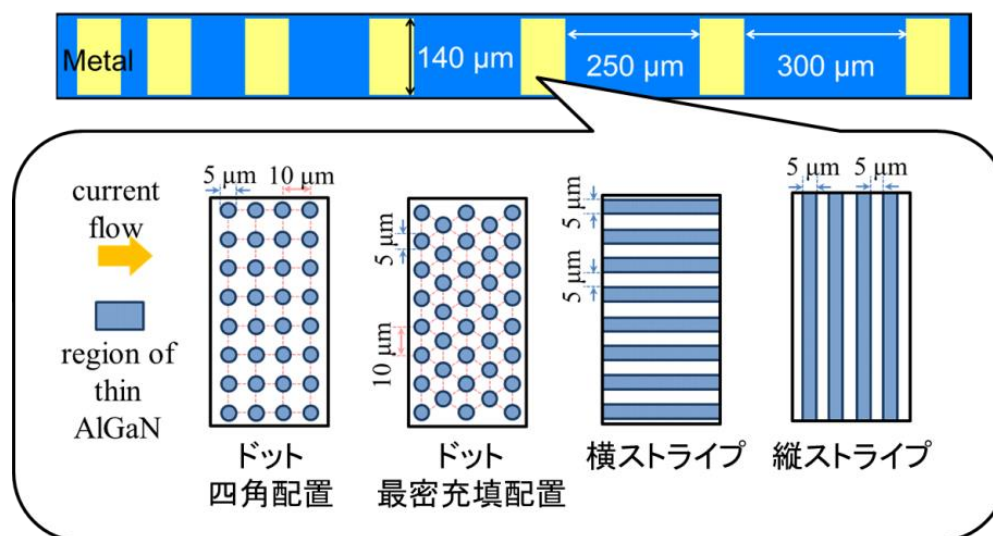


図 4.14 コンタクト部へ導入した様々な凹凸構造の平面パターン



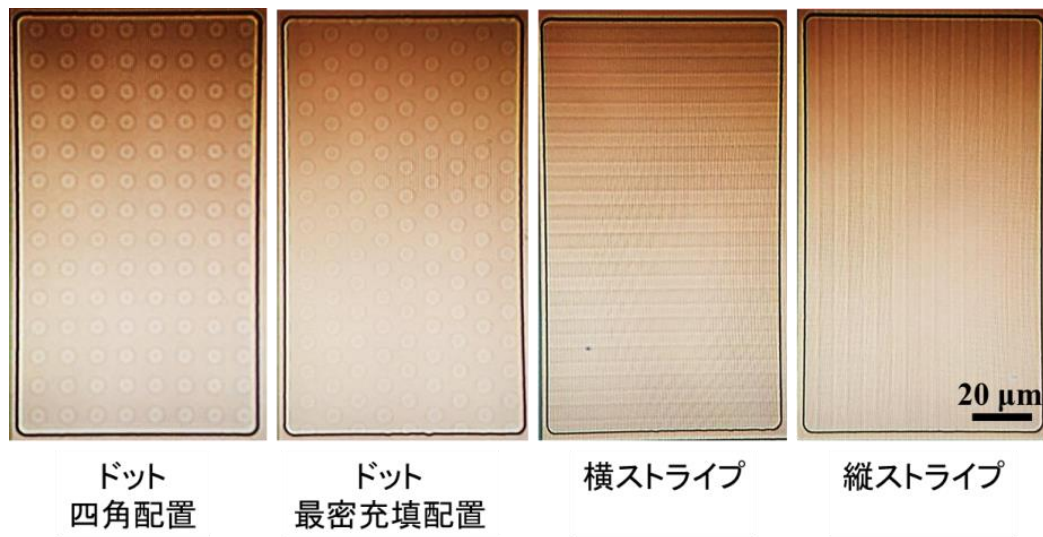


図 4.15 凹凸パターンの光学顕微鏡写真

#### 4.4 Metal/AlGa<sub>N</sub> 界面への凹凸構造導入による抵抗低減効果

図 4.16 に最も抵抗値が低くなった 900°C アニール後の凹凸構造導入によるコンタクト抵抗値の変化を示す。図中の”10nm flat”は 4.3.2 節で述べた AlGa<sub>N</sub> 層厚が平坦 10 nm の結果であり、平坦 AlGa<sub>N</sub> 構造の最小値のリファレンスである。まず、横ストライプ構造においては抵抗値が低減しており、凹凸構造導入による抵抗低減効果を得ることができた。一方、縦ストライプ構造においては抵抗値が上昇している。ドット構造においては、ドット四角配置構造は抵抗値が下がっている一方、ドット最密充填配置構造においては抵抗値が上昇してしまっているといったように明確な低減効果が現れていない。TLM における電極下部への電流の侵入領域の電極端からの距離である伝搬長はここでは約 5 μm と見積もられるが、これがパターンサイズとほぼ同様となっていることが、パターン構造の違いによる抵抗低減効果に現れていると考えられる。

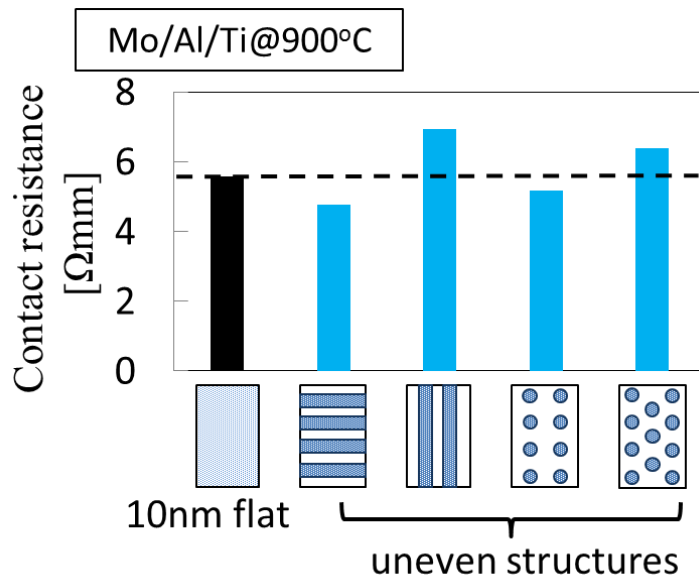


図 4.16 凹凸構造導入によるコンタクト抵抗値の変化

まず、縦ストライプ構造では抵抗値が増大してしまっている。図 4.17 に縦ストライプ構造における電極下の電流経路の概念図を示すが、電流の経路に垂直に配置された AlGaIn 層厚 5nm の領域では 2DEG 濃度が非常に薄いため、電流の経路が阻止されてしまったためと考えられる。

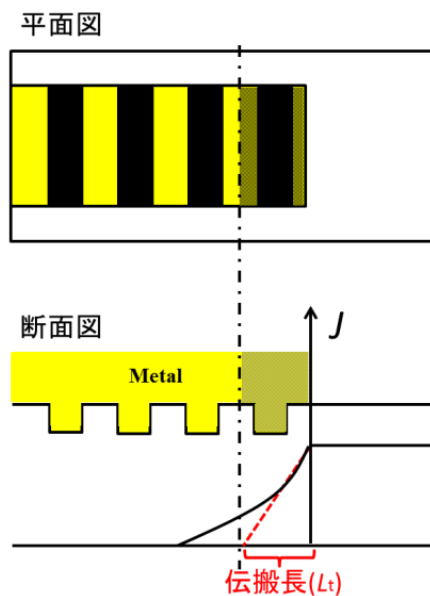


図 4.17 縦ストライプ構造における電極下の電流経路の概念図

次に、ドット構造においてばらついてしまう原因としては、図 4.18 の概念図のように、プロセス時のパターン配置の微妙なずれによって凹凸構造の伝搬長内への入り方が違いが出てしまうことが原因と考えられる。そのため、コンタクト抵抗が下がり伝搬長がより短くなると、ドット構造の配置の僅かなずれがより大きな影響を与えてしまうと考えられる。

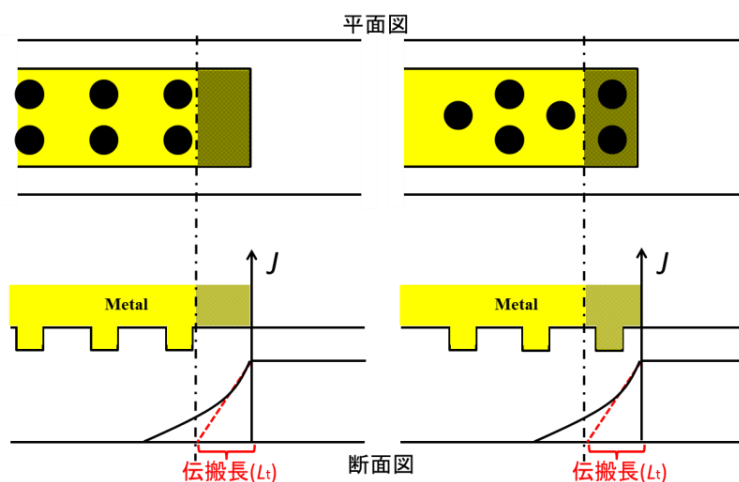


図 4.18 ドット構造における電極下の電流経路の概念図

最後に、抵抗低減効果が現れている横ストライプ構造では低抵抗化の理由としては、4.1 で述べたような電極エッジ部での効果が安定に効いていると考えられる。4.3.4 節で述べたように、作製した凹凸構造は上下左右  $5\mu\text{m}$  ずつ電極の外側に広げて作製を行っているため、横ストライプ構造においては、図 4.19 の概念図のように伝搬長内のばらつきの影響を受けないため、加工精度の面でもドット構造より有利といえる。

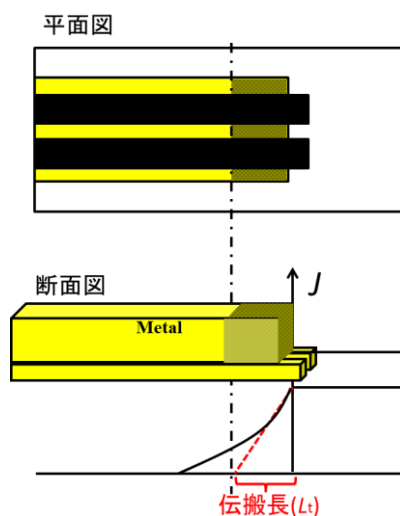


図 4.19 横ストライプ構造における電極下の電流経路の概念図

## 4.5 本章のまとめ

$R_{c2DEG}$  を低減する方法としては 2DEG 濃度を増加させることが有効と考えられるが、AlGaIn の平坦構造では AlGaIn 層厚を厚くすると、低温では AlGaIn 層が抵抗として見えてしまい高抵抗になってしまったり、低抵抗になった高温では抵抗値が一定の値になるといった限界がある。他には、2DEG 濃度を増加させるために Al の組成比を上げるとバンドギャップも増加してしまうというトレードオフ関係があり難しい。そこで、第 4 章では、コンタクト形成領域の Metal/AlGaIn 界面に凹凸構造を導入することで更なる低抵抗化を図る新しい構造を提案した。

まず、AlGaIn 層へ凹凸構造に伴う 2DEG 濃度の横方向分布の計算を行った。この結果、電極エッジ部において高濃度な 2DEG へ接近することで低抵抗化の実現を示唆する結果を得た。

実験的に抵抗低減効果を実証するにあたり、エッチング方法の変更を行った。まず、RIE の条件出しを行った。第 3 章で使用したオゾン酸化エッチング法から  $Cl_2 + BCl_3$  混合ガスによる RIE に変更しても、コンタクト抵抗の AlGaIn 層厚依存性はほぼ同様の結果を得ることができた。その後、Metal/AlGaIn 界面に凹凸構造を導入し、実験的に凹凸構造導入による抵抗低減効果を明らかにした。その結果、電流経路に沿うように凹凸構造を配置した横ストライプ構造において明らかな抵抗低減効果を得ることができ、また横ストライプ構造においてはプロセス時のパターンずれも起こらないことから、有用であるという結論を得た。

## 4.6 本章の参考文献

- [4.1] T. Wu, Z. B. HAO, G. TANG and Y. LUO, "Dry Etching Characteristics of AlGaIn/GaN Heterostructures Using Inductively Coupled  $H_2/Cl_2$ ,  $Ar/Cl_2$  and  $BCl_3/Cl_2$  Plasmas", Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 257 (2003)
- [4.2] D. Buttari, A. Chini, T. Palacios, R. Coffie, L. Shen, H. Xing, S. Heikman, L. McCarthy, A. Chakraborty, S. Keller and U. K. Mishra, "Origin of etch delay time in  $Cl_2$  dry etching of AlGaIn/GaN structures", Appl. Phys. Lett. **83**, 4779 (2003)

## 第 5 章

Metal/AlGa<sub>N</sub> 界面への凹凸構造  
導入による低抵抗化のメカニズム

## 5.1 はじめに

第4章において横ストライプ構造において明確な抵抗低減効果を得ることができた。本章では、この抵抗低減効果が凹凸構造導入によるエッジ部の効果なのか明らかにすべく、横ストライプ構造での凹凸構造の微細化を行った。図5.1の概念図のように、抵抗低減効果がエッジ部での効果であるならば、凹凸密度を増やすと抵抗値は低減することが考えられる。

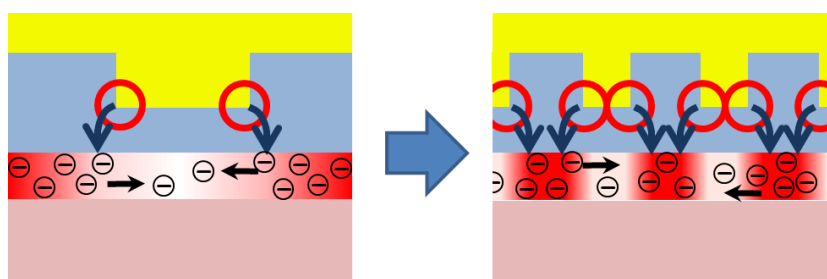


図 5.1 凹凸構造を微細にしたときの抵抗値低減の概念図

## 5.2 最適な凹凸高さの検討

凹凸構造の微細化による抵抗低減効果を見る際、平坦構造との低減率が少ないと、全体の傾向をつかむのが難しくなってしまう。そこで、本節では、4章で用いた横ストライプ構造を用いて、凹凸構造の高さの最適化を行った。作製プロセスは4.4節と同様であり、凹凸構造の高さをそれぞれ5nm/20nm、20nm/30nm、10nm/30nmと変化させた3種類の比較を行った。アニール温度は同様に900°Cである。

図5.2に凹凸部の高さを変えた時の抵抗値を示す。図中の”10nm flat”は4.3.2節と同様、凹凸構造を導入しない平坦構造のリファレンスである。凹凸高さ10nm/30nmが最も抵抗値が低減しているのがわかる。

このように凹凸高さ10nm/30nmが最も抵抗値が下がった原因として、5nm/20nmの構造と比較すると凹凸構造の高いところ低いところにおいても図3.10(3.2.5節)のように2DEG濃度は10nm/30nmの方が高い。そのため、全体の2DEG濃度が高い10nm/30nmの方が、抵抗値が下がったと考えられる。一方、厚いところは30nmである20nm/30nmと10nm/30nmで比較すると図4.12(4.3.2節)より、10nm flatも20nm flatも抵抗値はほぼ同等である。一方、図4.4(4.2.1節)より、凹凸エッジ部での2DEG濃度の上昇率は、凹凸高さの差が大きいほど上昇率は大きい。また、10nmの方が20nmに比べ電極が接

近する。これらのことから 10nm/30nm が最も抵抗値が低減したと考えられ、凹凸構造の高さを 10nm/30nm で凹凸部の平面方向の幅を微細にして検討を行う。

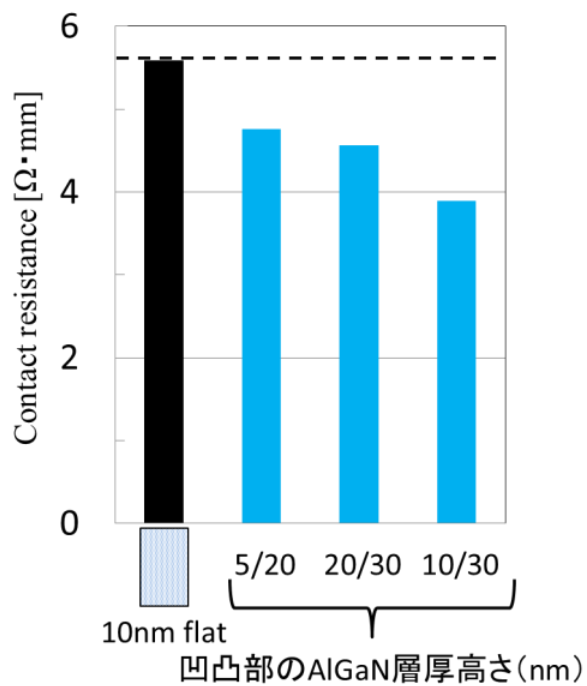


図 5.2 凹凸部の高さを変えた時の抵抗値

## 5.3 AlGaN 層への微細凹凸構造導入

### 5.3.1 AlGaN 層へ導入した凹凸パターン

AlGaN 層への微細凹凸構造導入にあたり、図 5.3 に示すような 2 種類のデバイス構造を作製した。ピンク色がメサ領域、黄色は電極、灰色が導入した Line/Space の領域を表す。

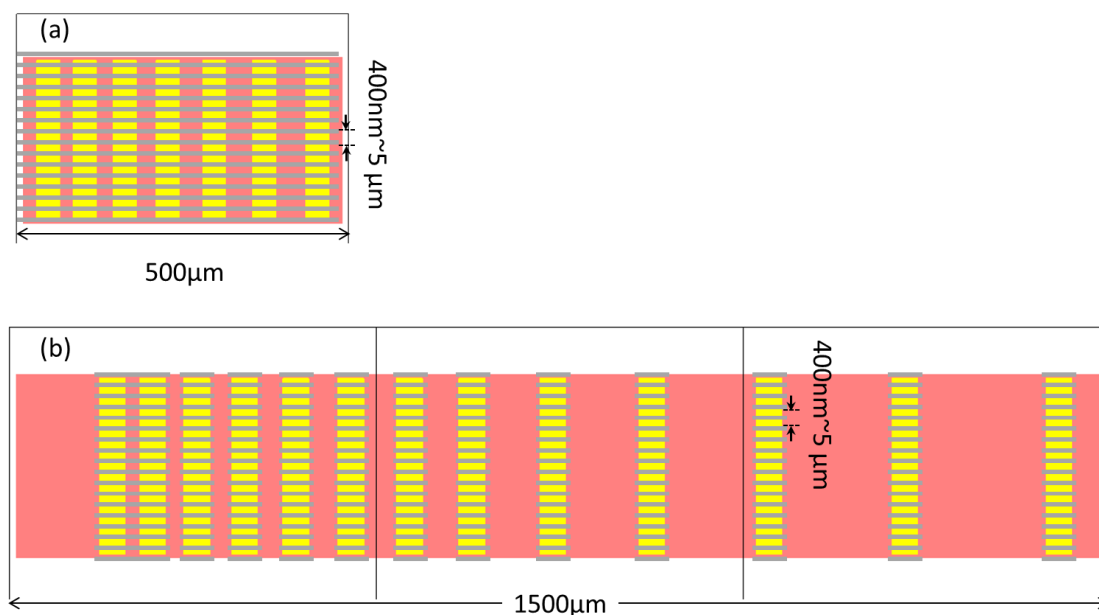


図 5.3 AlGaN 層への微細凹凸構造導入に作製した 2 種類のデバイス構造

また、1つの電極の大きさは  $35\mu\text{m} \times 240\mu\text{m}$  の長方形で、電極間隔は最も短いものは  $20\mu\text{m}$  となっている。これは、プロセス時に発生してしまう電極間隔のずれが、TLM 法によるコンタクト抵抗値の算出に大きな誤差要因になってしまうためである。SEM によって測長する際、第 4 章で使用したような  $50\mu\text{m}$  の電極幅では、電極間隔が広すぎてしまうため  $0.3\mu\text{m}$  オーダーでしか測長することができない。TLM 法にてコンタクト抵抗値  $0.5\Omega\text{mm}$  の試料を測る際、シート抵抗を  $400\Omega/\text{sq}$  で計算した電極間距離と総抵抗の関係を図 5.4 に示す。図 5.4(a)は電極間距離がマスクの設計値よりも  $0.1\mu\text{m}$  長い場合と短い場合でプロットしているが、重なってしまうため、原点付近で拡大したものを図 5.4(b)に示す。図 5.4(b)の黒線はマスクの設計値通りの場合で、赤線は  $0.1\mu\text{m}$  短い場合、緑線は  $0.1\mu\text{m}$  長い場合を示す。これらの切片の違いから、 $0.1\mu\text{m}$  のずれの場合生じる誤差は 5%であるが、これが  $0.3\mu\text{m}$  になると約 12%の誤差になってしまう。このことから、プロセス時のわずかな電極間隔のずれを測長可能とするために最小の電極間隔を  $50\mu\text{m}$



よりも短くする必要がある。

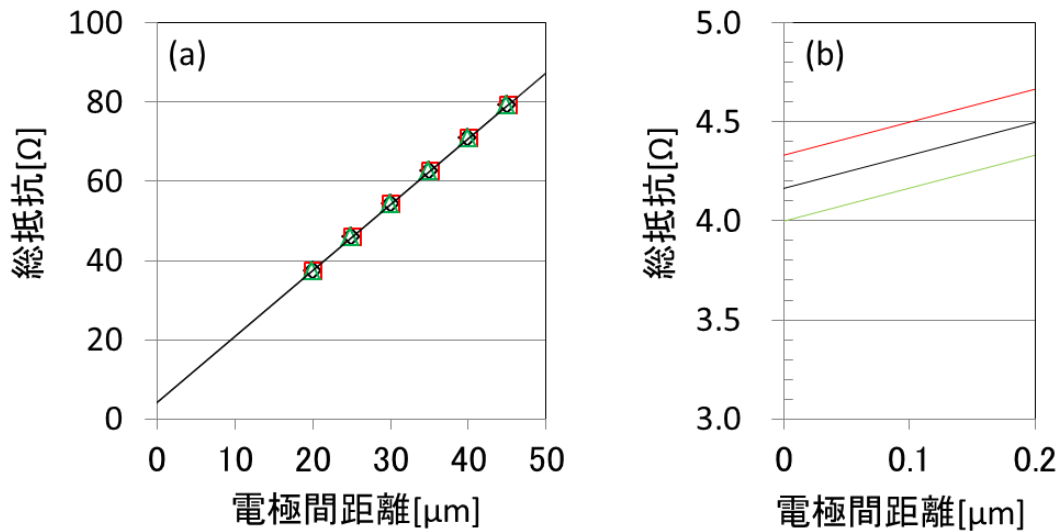


図 5.4 0.5 Ω mm の試料において電極間距離が 0.1 μm ずれた場合の直線の概念図

また、本デバイスは、Line/Space の比率は 1:1 のままパターンサイズを 400 nm~5 μm と異なる凹凸構造を EB 露光によって作製した。図 5.3 の黒枠は 500 μm であるが、これは EB 描画する際に一度に描画される領域に相当する。本研究で用いた装置では、EB 描画の際、この領域のつなぎ目でパターンがずれてしまったり、パターンが描画されないといった問題が発生してしまう。このことから、500 μm の枠内に TLM 電極を全て配置する必要がある。以上のように、SEM によって 0.1 μm オーダーで測長可能かつ、500 μm 以内にすべてのパターンを配置するという条件を満たす TLM パターンとして、図 5.3(a) のように、1 つの電極の大きさを 35 μm × 240 μm、電極間隔は最も短いものは 20 μm ~ 45 μm に 5 μm ずつ長くしていく構造を採用した。

これらのことから、図 5.3 のようなデバイス構造を作製した。図 5.3(a) と (b) の大きな違いは、電極間のチャンネル部における凹凸構造導入の有無であり、図 5.3(a) の構造においてはチャンネル部のシート抵抗を測定することが可能となる。一方、(b) においては、第 4 章と同様、プロセス時のずれを考慮して凹凸構造を上下左右 5 μm ずつ電極の外側に広げて作製している。また、図 5.3 (b) の電極間隔は 20 μm ~ 50 μm までは図 5.3 (a) と同様 5 μm 刻みで長くしていき、50 μm ~ 175 μm の領域は 25 μm ずつ長くしている。

### 5.3.2 AlGaN 層への微細凹凸構造導入の実験プロセス

本節では、作製プロセスを述べるが最終的なデバイスは図 5.5 のように電流経路に対して平行に凹凸構造を導入している。図 5.6 に作製プロセスを示すが、RIE によってここに凹凸構造を導入したのかわかりやすくするために図 5.5 のような断面図で説明を行う。

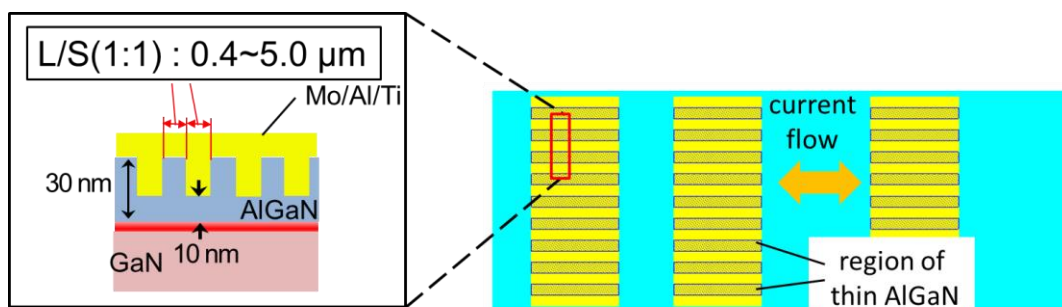


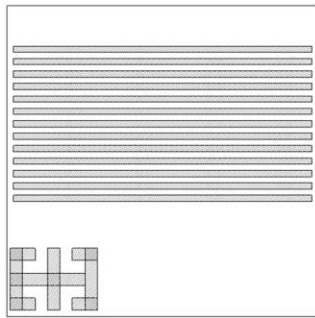
図 5.5 凹凸構造微細化による抵抗低減効果を調べるための TLM 測定用デバイス構造

まずアセトン、エタノールで有機洗浄をした後に図 5.6(a),(b)のように電子線リソグラフィを用いて凹凸構造形成のためのパターニングを行った。その後、4.3 節と同様  $\text{BCl}_3 + \text{Cl}_2$  ガスによる RIE にて凹凸構造の導入をした (図 5.6(c))。しかし、この RIE において AlGaN 層を 20nm しか削っていないため、EBレジストを除去してしまうと、次の光リソグラフィの工程において、アライメントマークの確認が出来ないため、図 5.5(d)のようなマスクを用いてパターニングを行った後、RIE にてアライメントマークをさらに 50nm エッチングする方法を採用した。この処理を行った後に EB レジスト用の剥離液である ST-120 を用い EB レジストを除去した。

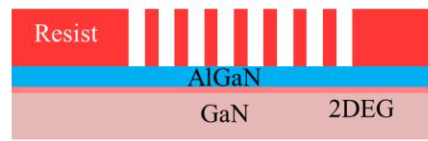
その後、図 5.6(e)のようなマスクを用いて図 5.6(f)のように  $\text{Cl}_2$  ガスによる素子分離を行った。そして、PECVD にて  $\text{SiO}_2$  を 100nm 堆積し図 5.6(g)のようなコンタクトホール穴開け用のマスクを用いてパターニングをした後に Buffered HF にてコンタクト部の穴開けを行った (図 5.6(h))。そして最後にスパッタリングにて積層電極の堆積 (Mo(35nm)/Al(60nm)/Ti(60nm)) をした後に図 5.6(i)のようなマスクを用い、図 5.6(j)のように RIE にて電極のエッチングを行った後、レジストを剥離して完成 (図 5.6(k)) となる。

以上のように作製したサンプルを 97%  $\text{N}_2$ 、3%  $\text{H}_2$  雰囲気中でのアニールを行い、TLM 測定を行った。

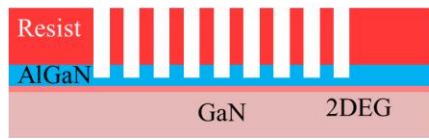
(a) EBリソグラフィーによる凹凸パターン作製(※ネガポジ反転)



(b) EBリソグラフィーによる凹凸パターン作製



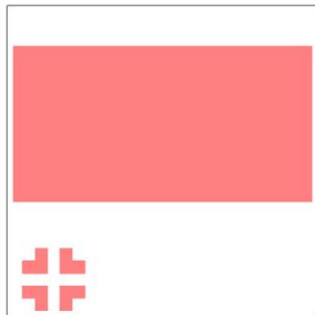
(c) RIEによる凹凸パターン形成



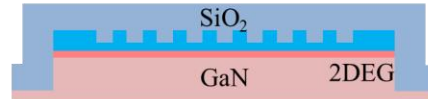
(d) アライメントマークのみをエッチングするマスク



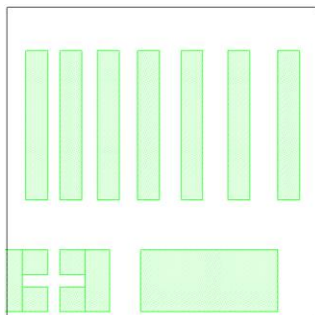
(e) メサ形成用マスク



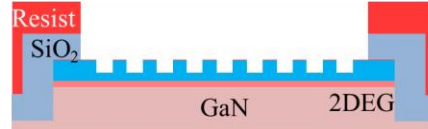
(f) メサ形成後、SiO<sub>2</sub>(100 nm) 堆積



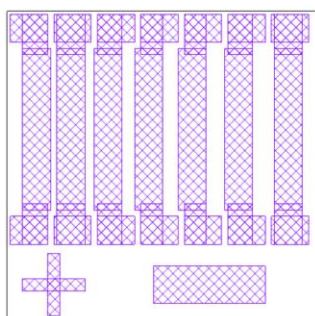
(g) コンタクトホール形成用マスク(※ネガポジ反転)



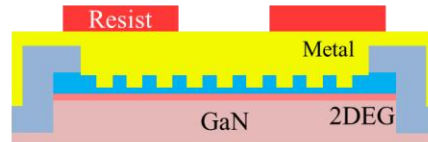
(h) BHFによるコンタクトホール形成



(i) 電極エッチング用マスク



(j) 電極堆積後、電極エッチング



(k) 完成

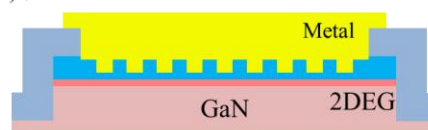


図 5.6 微細凹凸構造作製プロセス

### 5.3.3 微細化に向けた EB レジストプロセスの最適化

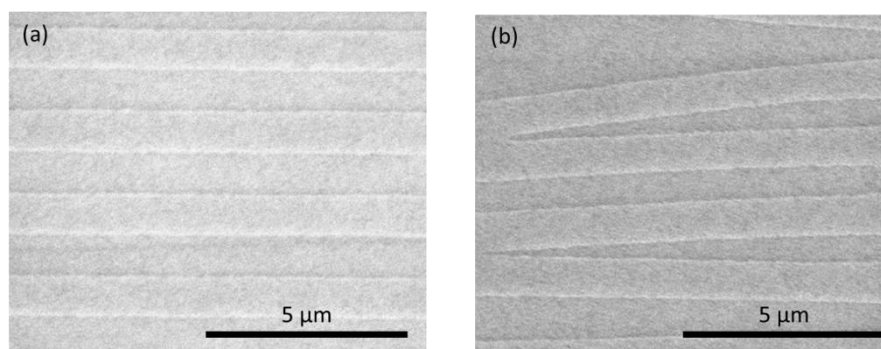


図 5.7 (a)正常な加工の SEM 像

(b)レジストの剥離などによって正常に加工できなかったときの SEM 像

EB 露光を用いた微細化を行うにあたり、EB レジストの膜厚の最適化を行った。図 5.6 に 700nm の Line/Space における RIE 後の AlGaN 表面の SEM 像を示す。図 5.7(a) のように、問題なく加工できている場所がある一方、図 5.7(b) のように正常に加工できない場所も見られた。

この原因として、EB レジストを希釈せずにスピコートした時のレジスト膜厚は約 450nm (段差系を用いて測定) であり、現像する際に EB レジストが基板に対して逆テーパー形状となってしまい、EB レジストが細くなる基板表面においてレジストが剥がれてしまう、もしくはレジストが倒れてしまうためと考えられた。この問題の解決策として、ビーム電流や露光時間を変更させて最適化をはかる手法や EB レジストを希釈しレジスト膜厚を最適化することが挙げられる。しかし、ビーム電流や露光時間の最適化のみでは問題解決は困難であることがわかり、本研究では EB レジストを希釈することで、レジスト膜厚を減らし微細加工を行うことを試みた。EB レジスト厚が 450nm の場合、1 $\mu$ m のパターンではレジストが倒れたりすることなく描画できたため、描画限界のパターンサイズはレジスト膜厚の 2 倍程度であり、シンナーによって EB レジストの希釈を行い、EB レジストの膜厚を 120nm まで減らすことで 400nm までの高密度化を実現した。一方、この際凹凸 AlGaN 層を作製するために AlGaN 層を 20nm エッチングする条件で RIE を行ったところ、EB レジストの膜厚は約 60nm となってしまい、これ以上レジストを薄くしてしまうと、RIE 工程にてレジストがなくなってしまう凹凸構造を作製することが困難になるため、レジスト膜厚は 120nm とした。

### 5.3.4 微細化した AlGa<sub>N</sub> 層凹凸構造の評価

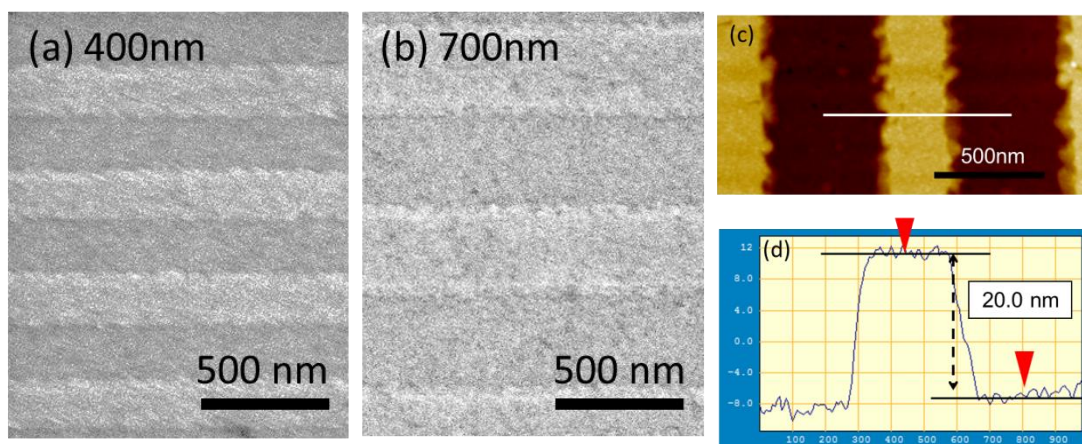


図 5.8 電極堆積前の凹凸構造の SEM,AFM 像

(a)400nm パターンの SEM 像、(b)700nm パターンの SEM 像

(c)400nm パターンの AFM 像、(d) (c)の白線部での高さプロファイル

電極堆積前の AlGa<sub>N</sub> 層表面に形成した凹凸構造の状態を図 5.8 に示す。図 5.8 (a) は 400nm、図 5.8(b)は 700nm の場合における SEM 像であるが、5.3.2 節での EB レジスト膜厚の最適化により、問題なく加工できていることがわかった。また、400nm のパターンにおける AFM 像とその高さプロファイルを図 5.8(c)、(d)に示すが、所望の 20nm のエッチングが行えていることも確認できた。

## 5.4 AlGa<sub>N</sub> 層への微細凹凸構造導入による抵抗低減効果

5.3 節で示したように作製した微細凹凸構造を導入した基板の上に電極形成し、アニール温度とコンタクト抵抗値の関係を評価したところ、図 5.9 のようになった。5.3.1 節で述べたようにチャネル部すべてに凹凸構造を導入したものとししないものを作製したが、それによるコンタクト抵抗値に違いは見られず、誤差 5%以内であったため、すべての平均をとっている。抵抗値が最も低くなった 900°C のコンタクト抵抗の凹凸サイズの違いの結果を図 5.9 に示す。図中の”10nm flat”は 5.2 節と同様、凹凸構造を導入しない平坦構造のリファレンスであり、同一試料に形成している。凹凸構造を導入することで第 4 章と同様にコンタクト抵抗値は低減している。また、凹凸サイズが小さくなるとそれに伴いコンタクト抵抗値が減少していることがわかる。

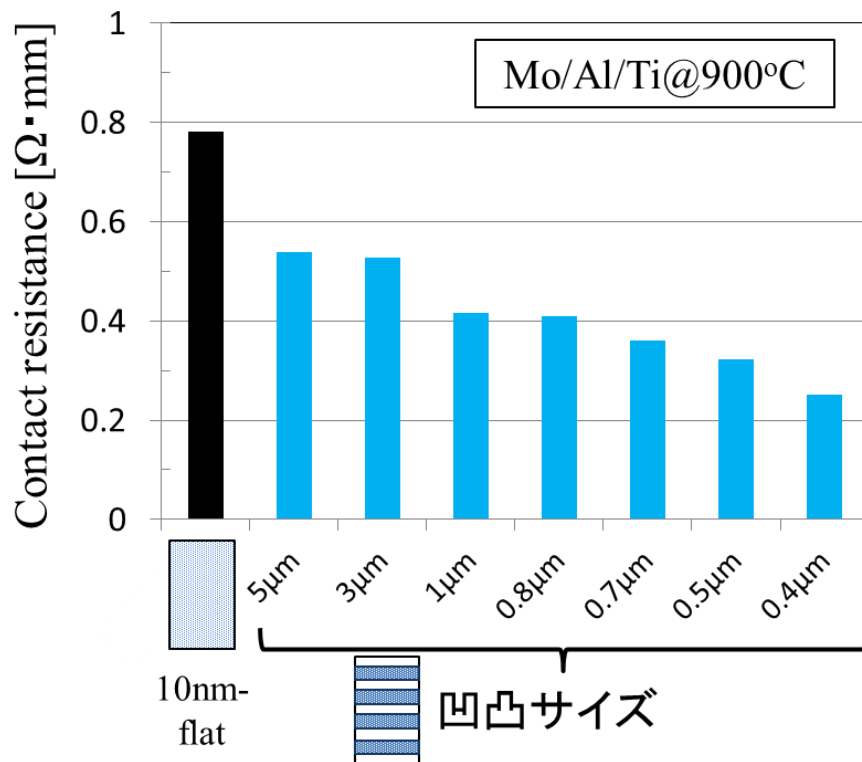


図 5.9 アニール温度 900°C におけるコンタクト抵抗と凹凸サイズの関係

また、最も抵抗値が低くなった 900°C アニール後の図 5.3(a) のサンプルにて得られたシート抵抗を図 5.10 に示す。図 5.10(a) は平坦構造における基板のシート抵抗を示しており、”10nm flat”と”30nm flat”はそれぞれの AlGa<sub>N</sub> 層厚である。この結果をもとに、”10nm flat”と”30nm flat”が 1:1 で並列に並んでいると仮定した時の抵抗値が図中

の”並列抵抗(1:1)”である。この 1:1 の並列抵抗であるという仮定のもと算出した抵抗値と、各凹凸サイズにおいて測定値であるシート抵抗を比較したものが図 5.10(b)である。各凹凸サイズにおけるシート抵抗のばらつきは 1%以内であった。一方、これらの値を 1:1 の並列抵抗であると仮定した場合のシート抵抗と比較しても誤差は 2%以内であり、これらのことから各凹凸サイズにおける試料において凹凸構造を問題なく作製できていると、また TLM 測定におけるコンタクト抵抗とシート抵抗が正しく分離できているといえる。

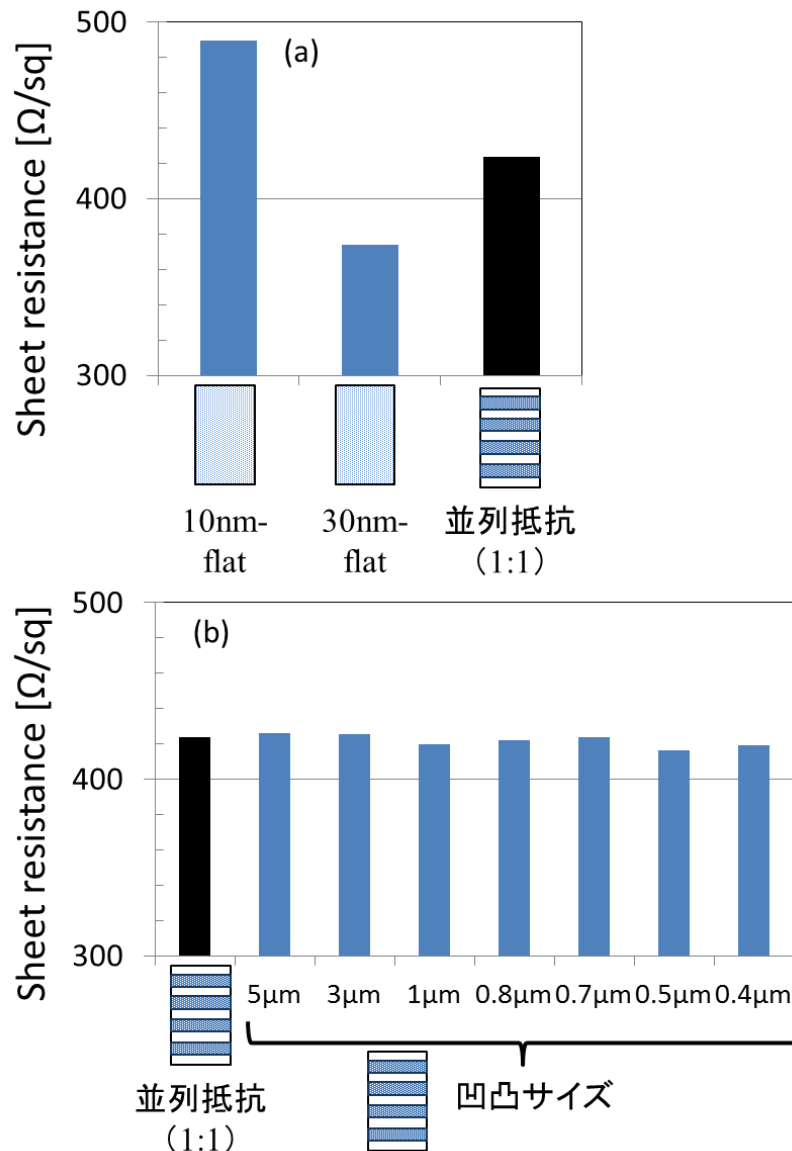


図 5.10 900°Cアニール後の各サンプルのシート抵抗値  
 (a)AlGaIn 層厚 10nm もしくは 30nm におけるシート抵抗値と 1:1 配置と仮定した場合のシート抵抗の計算値  
 (b)1:1 並列抵抗を仮定したシート抵抗と凹凸構造を導入した基板でのシート抵抗値の比較

## 5.5 凹凸構造導入による抵抗低減のメカニズムの考察

5.1 節において凹凸密度が増加すると、それに応じて低減値が減少すると予測した。そこで、図 5.9 の結果をもとに、横軸に凹凸密度 (凹凸サイズの逆数)、縦軸に 10nm-flat を 1 としたときのコンタクト抵抗の低減率でプロットした結果を図 5.11 に示す。1 $\mu\text{m}$  よりも微細にした時に低減効果が強く表れていることがわかる。これらの結果をもとに、抵抗低減のメカニズムについて解析を行った。

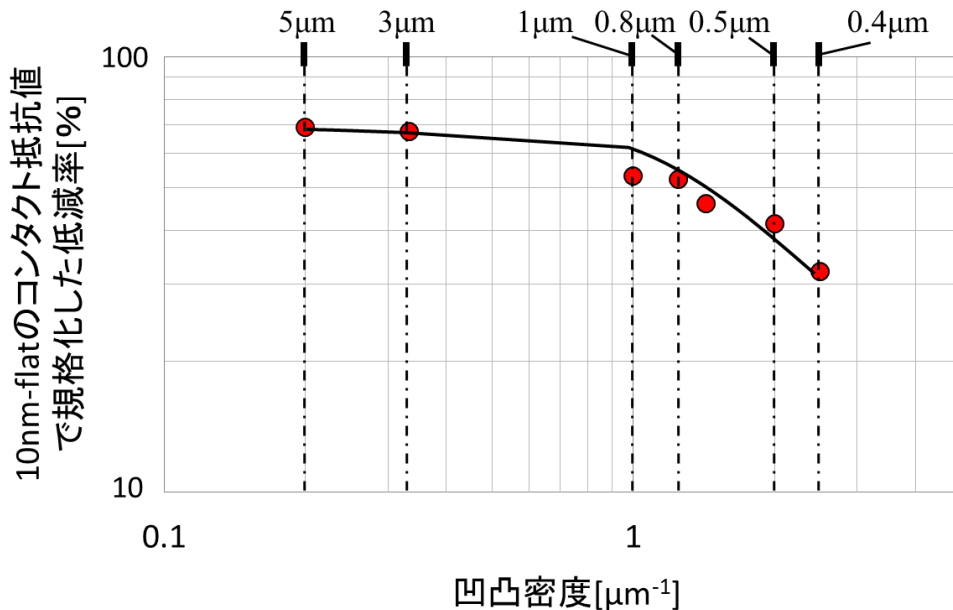


図 5.11 900 $^{\circ}\text{C}$ アニール後のコンタクト抵抗低減率と凹凸密度の関係

エッジ部で低減効果が現れているという仮定のもと、図 5.12 のようなコンタクト抵抗のモデル化を行った。平坦部のコンタクト抵抗をそれぞれ  $R_1$  (10nm-flat)、 $R_2$  (30nm-flat) と仮定した。また、エッジ部での抵抗値を  $R_3$  と仮定した。また、各 1:1 の Line/Space の幅を  $L$  [nm] (本研究で使用した長さは 0.4 $\mu\text{m}$ ~5 $\mu\text{m}$ ) と設定し、エッジ部で低抵抗化している実効的な幅を想定しこの実効幅を  $x$  [nm] と設定した。以上のような定義のもと、1unit (1つの凹凸) における各並列抵抗の総抵抗  $R_{total}$  との関係式は、

$$\frac{2L}{R_{total}} = \frac{(L-x)}{R_1} + \frac{(L-x)}{R_2} + \frac{2x}{R_3}$$

式で表すことができる。

計算にあたり、900 $^{\circ}\text{C}$ における 10nm-flat のコンタクト抵抗値  $R_1$  は 0.78 $\Omega\text{mm}$ 、30nm-flat のコンタクト抵抗値  $R_2$  は 0.83 $\Omega\text{mm}$  であり、この値を使用した。



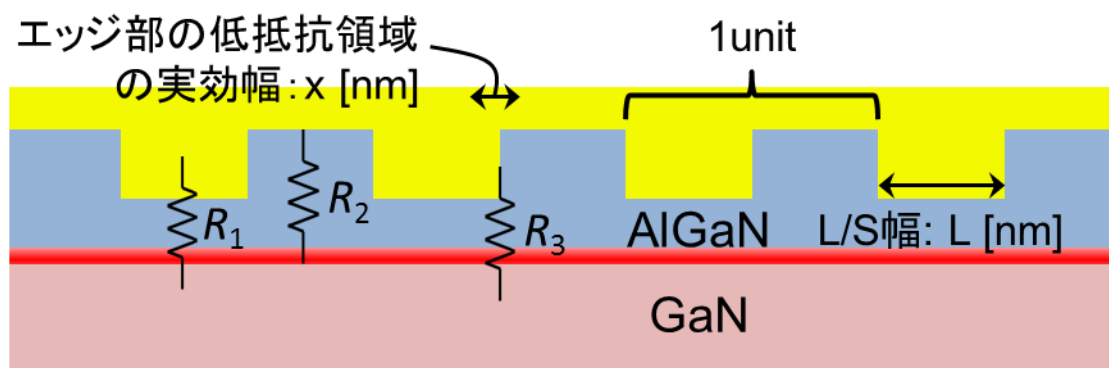


図 5.12 エッジ部での抵抗低減を仮定した並列抵抗モデル

まず、 $900^{\circ}\text{C}$ において、エッジの低抵抗領域の実効幅 ( $x$  nm) を  $70$  nm で固定した時に、エッジ部での抵抗値  $R_3$  をパラメータとして凹凸密度とコンタクト抵抗低減率の関係を計算した結果を図 5.13 に示す。エッジ部での抵抗値が低くなるほど、コンタクト抵抗値が低減するのがわかる。実験値と比較すると、エッジ部での抵抗値を  $0.065\ \Omega\text{mm}$  と仮定した線と比較的よく一致する。

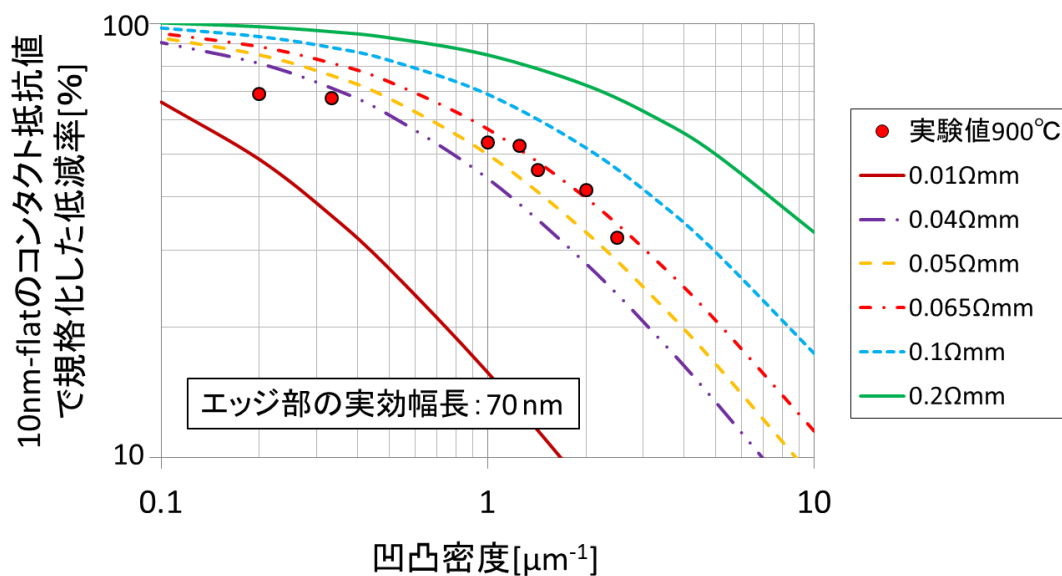


図 5.13 エッジ部の実効幅長を  $70$  nm に固定したときのエッジ部での抵抗値の違いによる低減率と凹凸密度の関係

次に、900°Cにおいて、図 5.13 と同様の計算をエッジ部での抵抗値  $R_3$  を  $0.065 \Omega \text{ mm}$  で固定し、 $x$  を変化させたときの凹凸密度と低減率でプロットした結果を図 5.14 に示す。 $x$  が広くなるほど、コンタクト抵抗値が低減するのがわかる。

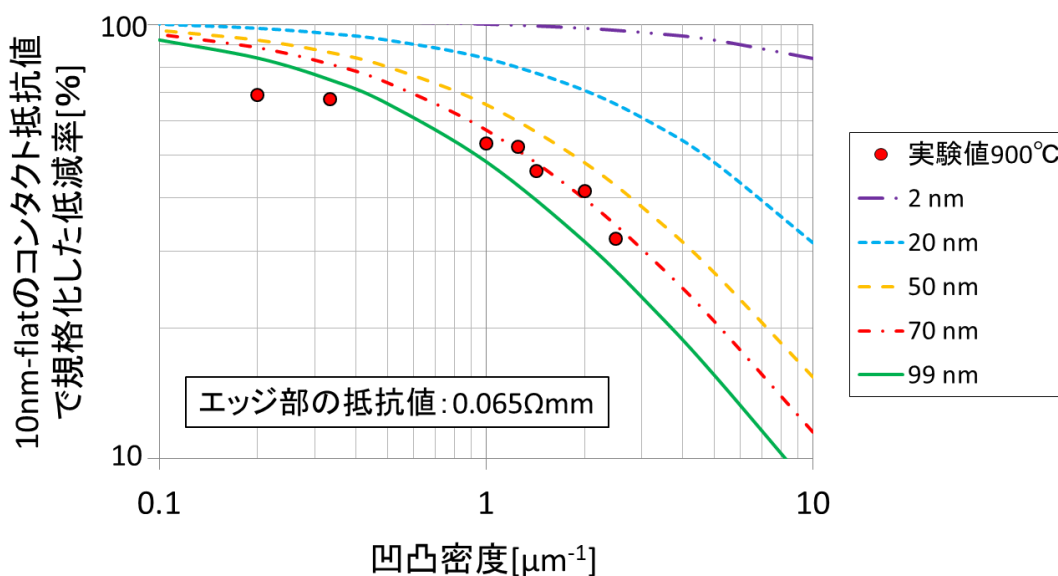


図 5.14 エッジ部での抵抗値を  $0.065 \Omega \text{ mm}$  に固定したときのエッジ部の長さの違いによる低減率と凹凸密度の関係

以上のように、低抵抗エッジ部の実効幅やエッジ部の抵抗値のパラメータを変化させることで実験結果へのフィッティングが可能だと明らかになった。そこで、これらの値を設定することで、図 5.15 のように実験値に合うように計算を行った。低抵抗エッジ部の長さやエッジ部での抵抗値は不明であるが、この関係式を保ったまま低減していくならば、凹凸の長さが  $100 \text{ nm}$  においては抵抗値が  $10\%$  まで低減することがわかる。

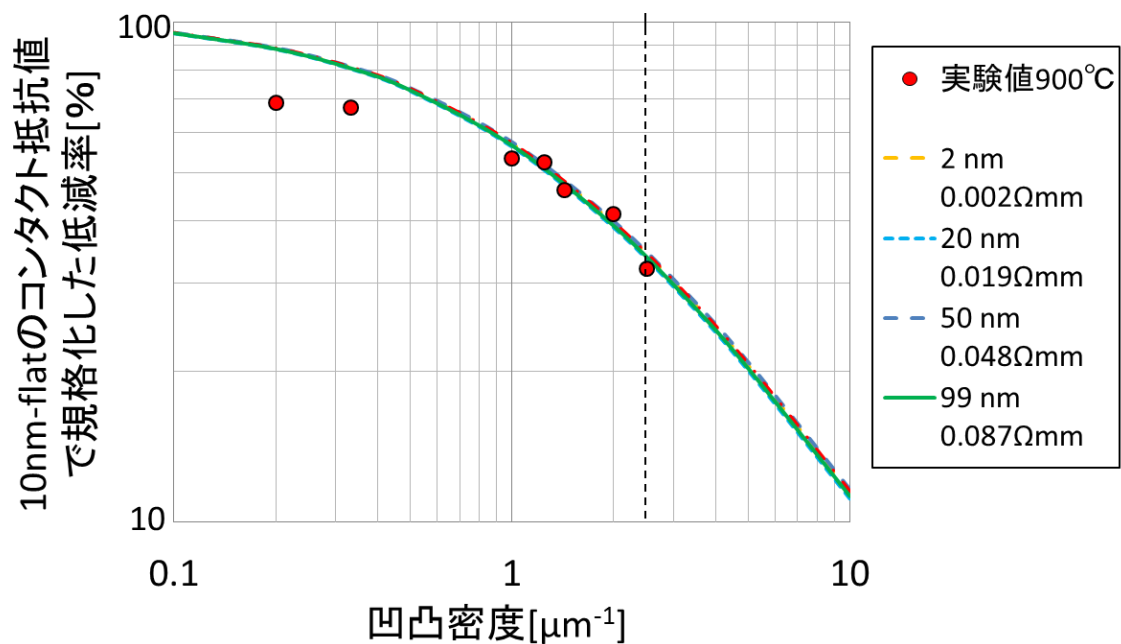


図 5.15 エッジ部での抵抗値・実効幅を変化させたときの  
実験結果へのフィッティングしたパラメータ

一方、図 5.15 で計算に使用した低抵抗エッジ部の実効幅とエッジ部での抵抗値をプロットすると、図 5.16 のようになった。図中の赤点線は 10nm-flat の抵抗値 (0.78 Ω mm) であるが、低抵抗エッジ部での長さが 200 nm と仮定してもエッジ部での抵抗値は 0.16 Ωmm と仮定でき、非常に低抵抗になっていることがわかる。

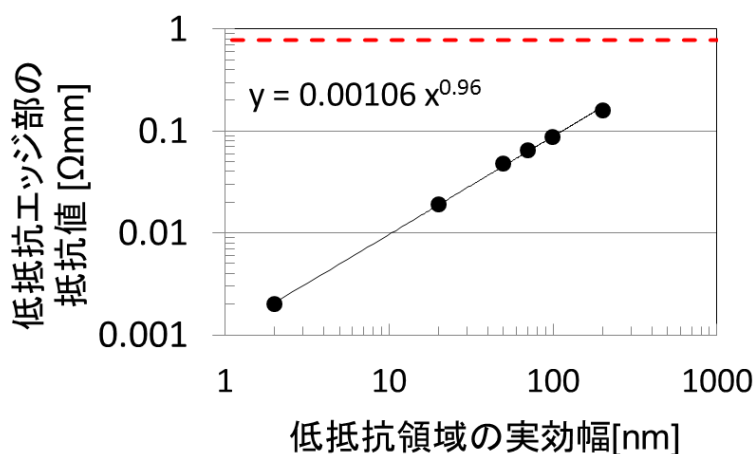


図 5.16 900°Cで得られた低減率と凹凸密度の関係に合わせこんだときの低抵抗エッジ部での抵抗値とエッジ部の長さの関係 (赤点線は 10nm-flat のコンタクト抵抗値)

また、図 5.17 に厚い領域・薄い領域の 2DEG 濃度がそれぞれの平坦構造と同じになるようにピッチ幅を 120nm とし、第 4 章のシミュレーション結果と比較して大きな凹凸構造における 2DEG 濃度を計算した結果を示す。この結果を見ると、2DEG が上昇している幅は最大でも約 50nm と見積もることができる。

この結果から、実効長は約 50nm と推測することができ、図 5.16 より、エッジ部での抵抗は  $0.048\Omega\text{mm}$  (実効長 50nm) と見積もることができる。

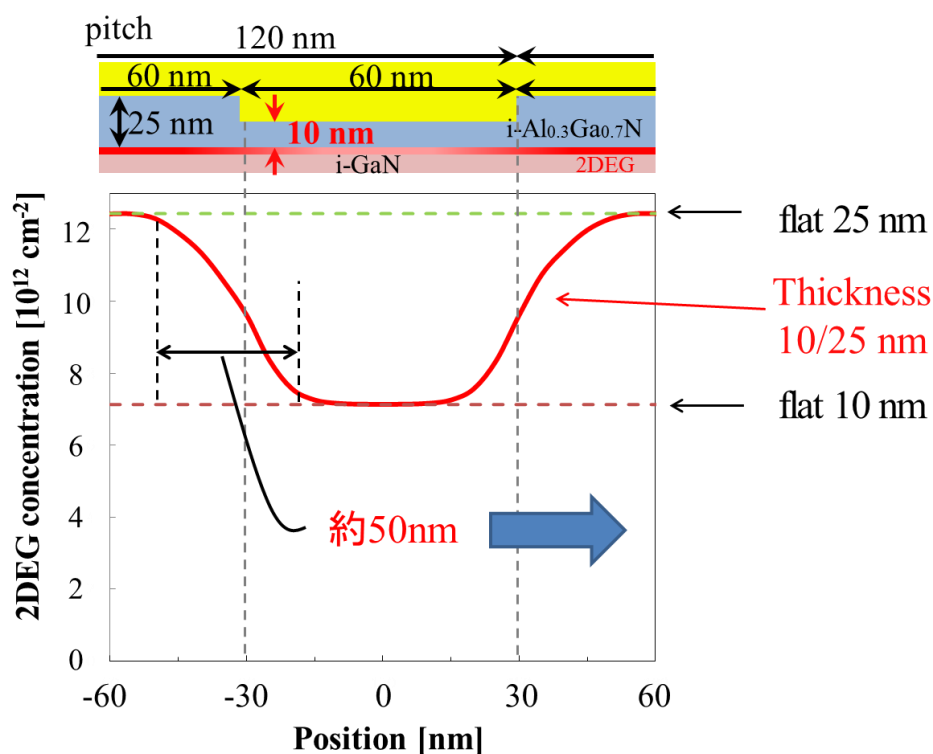


図 5.17 凹凸 AlGaN 構造において凹凸のピッチを 120nm にしたときの 2DEG 濃度分布

(緑、赤の直線はそれぞれ 25、10nm の平坦 AlGaN における 2DEG 濃度、赤の曲線は、凹凸構造を 10/25 nm にしたときの 2DEG 濃度である)

以上のように、低抵抗エッジ部で低抵抗になることで、凹凸構造導入による低抵抗化を実現することができた。エッジ部においてどういったことが起こっているのかは第 3 章での 3 抵抗成分モデルを用いて説明をすることが可能である。まず、凹凸構造導入によるエッジ部での電界集中により第 3 章の図 3.23 (b) の状態から Metal/AlGaN 界面での障壁が更に薄くなることが予想される。しかし、本研究において凹凸構造を導入し

たデバイスにおいて、低抵抗が得られた温度は平坦構造の場合と同じ温度であり、AlGaN 層表面は十分に n 型化しており、エッジ部での低抵抗化が電界集中により障壁がさらに薄くなったことに起因するののかの切り分けは難しい。

また、図 5.18 に電極堆積前の AlGaN 層表面に形成した 400nm の凹凸構造の凹凸エッジ部での AFM 像を示す。この結果を見ると、AFM の探針の先端の曲率半径が 10nm のため、厳密な評価は難しいが、凹凸深さ 20nm に対し、エッジ部のなまりが約 50nm あり非常にブロードになっていることがわかる。

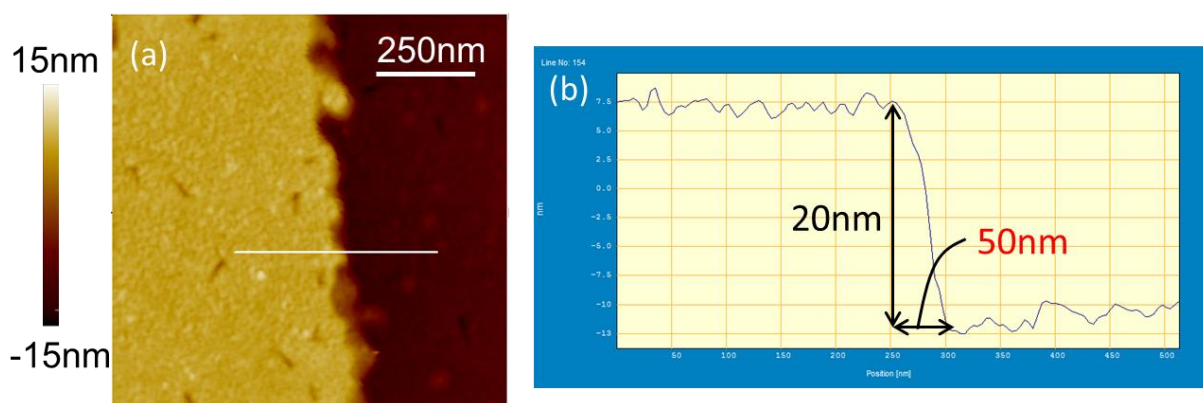


図 5.18 電極堆積前の凹凸構造の AFM 像

(a)400nm パターンの AFM 像

(b) (a)の白線部での高さプロファイル

また、図 5.19 に、5.4 節の図 5.9 のような結果が得られた凹凸サイズ 400nm の試料の断面 TEM 像を示す。図 5.18 の AFM 像と同様に、凹凸深さ 20nm に対し、エッジ部のなまりは約 50nm あることがわかる。また、3.3.2 節の図 3.14 の TEM 像と同様に、AlGaN 層と電極の界面に Al-Ti-N の薄い反応層ができており、この厚さはほぼ同様である。また、この反応層の厚さはエッジ部でもほぼ同様であり、局所的な合金化は起きていないこともわかる。

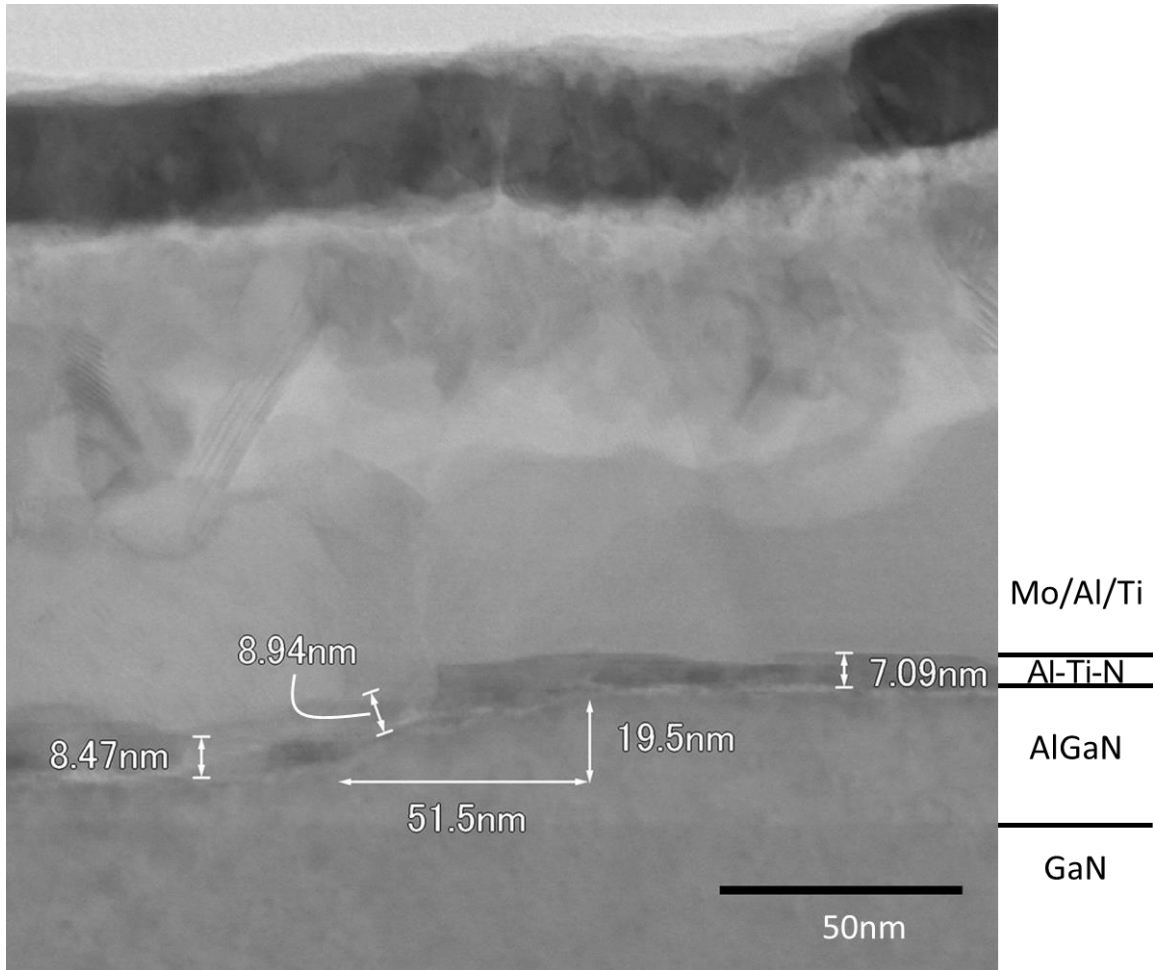


図 5.19 Mo/Al/Ti/AlGaIn/GaN 構造におけるアニール後の断面 TEM 像

このようにエッジ部は非常にブロードであり、本研究で作製したデバイスにおいてエッジ部での電界集中は起こりにくいと考えられる。このようにブロードになった原因としては、図 5.20 の概念図のように、EB 露光装置の性能上、レジストが逆テーパになってしまったことで、レジスト厚が薄い部分ができしまい、その部分がエッチング中に削れていったことで、今回のようなブロードな構造になってしまったと考えられる。



図 5.20 凹凸構造エッジ部がブロードになる原因の概念図

以上のように、エッジ部はブロードであり電界集中は起こりにくいと考えられることから、本研究において、電極エッジ部での低抵抗化が起こった要因としては、電極エッジ部における 2DEG 濃度上昇により  $R_{c2DEG}$  が低減したことと、電極と 2DEG の距離が接近したことによる  $R_{cAlGaN}$  の低減による効果が組み合わさったことによると考えられる。

本研究において使用した EB 露光装置の性能上、エッジ部をより急峻にすることは困難であるが、レジストをより急峻にすることで AlGaN 層への凹凸構造もより急峻にすることができると考えられる。急峻になることで電界集中が起こりやすくなると考えられ、この場合は AlGaN 層表面が十分に n 型化していなくても電界集中により障壁を薄くすることを利用することで、より低温での低抵抗化が期待できる。

## 5.6 本章で得られた結論

本章では、第 4 章において明確な抵抗低減効果が得られた電流経路に対して平行に配置した横ストライプ構造における凹凸の平面サイズを微細化する実験を通して、全体でのコンタクト抵抗低減が凹凸構造のエッジ部の低抵抗化によるものであることを明らかにした。

パターンサイズの微細化を行うにあたり、まず凹凸高さの最適化を行った。その後、横ストライプ構造での凹凸構造の微細化を行った結果、凹凸密度が増えるほど抵抗値はより低減する結果を得られ、凹凸サイズ 400 nm では平坦構造と比較して約 30% の抵抗値まで低減した。この結果は、エッジ部の低抵抗領域の実効幅やそこでの抵抗値を仮定した並列抵抗モデルとよく一致した。このモデルがより微細になっても有効であるならば 100 nm では約 10% まで抵抗低減することが可能であり、AlGaN 層へ凹凸構造を導入することは抵抗低減に有効という結論を得られた。

# 第 6 章

## 結論



## 6.1 本研究で得られた結論

AlGaIn/GaN 系 HEMT へのノンアロイ型電極材料におけるコンタクト抵抗低減に向け、以下のことを明らかにした。

コンタクト抵抗の AlGaIn 層厚依存性を測定することで、各抵抗成分のモデルの妥当性を明らかにした。この考え方を使うことで、ノンアロイ型電極材料では高温熱処理によって  $R_{cAlGaIn}$  が、n 型化の促進により他の抵抗成分に比べ低くなっていることを示唆する結果が得られ、残った抵抗成分である  $R_{cMetal/AlGaIn}$  や  $R_{c2DEG}$  を下げることで低抵抗化につながるという指針を得ることができた。

このトレードオフ関係を克服するために、Metal/AlGaIn 界面にコンタクト形成領域の Metal/AlGaIn 界面に凹凸構造を導入することで更なる低抵抗化を図る新しい構造を提案した。AlGaIn 層へ凹凸構造に伴う 2DEG 濃度の横方向分布の計算を行った結果、電極エッジ部において高濃度な 2DEG へ接近することで低抵抗化の実現を示唆する結果を得ることができた。次に、Metal/AlGaIn 界面に凹凸構造を導入し、実験的に凹凸構造導入による抵抗低減効果を明らかにした。その結果、電流経路に沿うように凹凸構造を配置した横ストライプ構造において平坦構造での限界を下回る、明らかな抵抗低減効果を得ることができ、また横ストライプ構造においてはプロセス時のパターンずれも起こらないことから、有用であるという結論を得た。本構造において、凹凸構造の微細化を行った結果、凹凸密度が増えるほど抵抗値はより低減する結果が得られ、凹凸サイズ 400 nm では平坦構造と比較して約 30%の抵抗値まで低減した。この結果は、エッジ部の低抵抗領域の実効幅やそこでの抵抗値を仮定した並列抵抗モデルとよく一致した。このモデルがより微細になっても有効であるならば 100 nm では約 10%まで抵抗低減することが可能であり、AlGaIn 層へ凹凸構造を導入することは抵抗低減に有効という結論を得られた。

以上のように、AlGaIn/GaN 系 HEMT へのノンアロイ型電極材料におけるコンタクト抵抗低減に向け、直接は測定ができない各抵抗成分に分離し、どの抵抗成分を下げるのが有効か明らかにできた。更に、トレードオフ関係に律速されてしまう抵抗値を下げるための新しい提案を行い、これにより抵抗値が低減することを実証できた。これをもって本研究の重要な成果とする。

## 6.2 今後の展望

本研究で得られた低抵抗オーミックコンタクトはいずれも 900°C 以上という高温熱処理時の結果である。そのため、より低温でオーミックコンタクトを形成することが望ましい。本研究で使用した電極材料では AlGaIn 層の n 型化に高温が必要であり、第 3 章のように低い温度では AlGaIn 層の抵抗が見えてしまった。そこで、より低温で n 型化を起こせる材料の探索が必要といえる。

また、表 6.1 に、同様のメカニズムで低抵抗を得ているノンアロイ型電極材料における報告例と今回得られた結果の比較を示す。平坦構造で比較すると、本研究で使用していた材料は他の報告例よりも高い。このことから、電極材料の最適化で電極と AlGaIn 界面の抵抗はまだ下げる余地が十分にあるといえる。また、この最適化を行うことで、凹凸構造を導入すると更に低抵抗が実現できると考えられる。

表 6.1 ノンアロイ型電極材料における報告例と今回得られた結果の比較

	Rc( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	ref
Pt/Ni/Al/Ti (50/40/60/20nm)	0.60	[1.28]
W/Al/Ti (20/100/20nm)	0.65	[1.29]
Ta/Al/Ta (200/280/10nm)	0.28	[1.30]
10nmflat (Mo/Al/Ti)	0.78	This work
400nm凹凸構造	0.25	

また、AlGaIn/GaN HEMT のコンタクト部へ電流経路に沿うように配置した横ストライプ構造において、明確なコンタクト抵抗低減効果が見られた。これを更に低減できる可能性を図 6.1 に示す。AlGaIn/GaN 上に AlN を堆積することでさらにポテンシャルが持ち上がり、2DEG 濃度は上昇する[6.1]。もちろんこの状態では、3.4 節でも述べたように AlN の高いバンドギャップによる障壁が高抵抗の要因となる。しかし、この状態で凹凸構造を導入すると、この AlN 層導入により上昇した 2DEG により電極エッジ部での 2DEG 濃度はより増加する。これにより、エッジ部がより低抵抗になることで、コンタクト抵抗は更に低減することが予想される。この AlN 層は in situ で堆積可能[6.1]なことから、AlN 層堆積のためのプロセス工程が増えるといった問題もない。

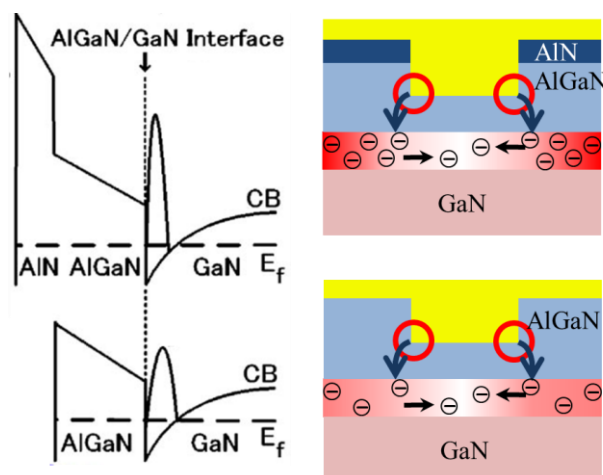


図 6.1 AlGaIn/GaN 上に AlGaIn 層を成膜した場合の 2DEG 濃度上昇[6.1]とその基板に凹凸構造を導入した場合のエッジ部での 2DEG 濃度上昇の概念図

一方、この凹凸構造の実用化にも、Si 上の AlGaIn/GaN HEMT 基板は現在の Si 半導体に使われている Si ウェハに比べ小口径なことから、過去に使用していたラインを使用できるのが利点であり、そこで使用していたステップを使用することで、巨額な投資をすることなく実用化可能である。しかし、実用化にあたり、エッチングするのが AlGaIn 層のみであるため選択比を持たせることができないため、エッチング深さのばらつきによるコンタクト低抵抗値のばらつきが懸念される。これを防ぐ方法として、例えば、初期状態を AlGaIn 層が薄い状態にしておき、SiO<sub>2</sub> マスクなどを用いた AlGaIn 再成長 [6.2][6.3]も有効であるといえる。

### 6.3 本章の参考文献

- [6.1] S. L. Selvaraj, T. Ito, Y. Terada and T. Egawa, “AlGaIn/AlGaIn/GaN metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistor on 4 in. silicon substrate for high breakdown characteristics”, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 173506 (2007)
- [6.2] Y. Kato, S. Kitamura, K. Hiramatsu and N. Sawaki, “Selective growth of wurtzite GaN and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N on GaN/sapphire substrates by metalorganic vapor phase epitaxy”, *J. Crystal Growth*, **144**, 133 (1994)
- [6.3] K. Hiramatsua, K. Nishiyamaa, M. Onishia, H. Mizutania, M. Narukawaa, A. Motogaitoa, H. Miyakea, Y. Iyechikab and T. Maedab, “Fabrication and characterization of low defect density GaN using facet-controlled epitaxial lateral overgrowth (FACELO)”, *J. Crystal Growth*, **221**, 316 (2000)

## 本研究に関する発表

### 1) 学術論文誌

1. Y. Takei, M. Okamoto, W. Saito, K. Tsutsui, K. Kakushima, H. Wakabayashi, Y. Kataoka and H. Iwai “Ohmic Contact Properties Depending on AlGa<sub>N</sub> Layer Thickness for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High Electron Mobility Transistor Structures”, ECS Transactions, vol.61(4), pp.265-270, (2014)
2. Y. Takei, M. Kamiya, K. Tsutsui, W. Saito, K. Kakushima, H. Wakabayashi, Y. Kataoka, and H. Iwai “Reduction of Contact Resistance on AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT Structures by Introducing Uneven AlGa<sub>N</sub> Layers”, physica status solidi (a), DOI:10.1002/pssa.201431645 (2015)
3. Y. Takei, K. Tsutsui, W. Saito, K. Kakushima, H. Wakabayashi, and H. Iwai “Dependence of ohmic contact properties on AlGa<sub>N</sub> layer thickness for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors”, Japanese Journal of Applied Physics (Rapid Communication) to be published.

### 2) 国際会議

1. Y. Takei, M. Okamoto, S. Man, R. Kayanuma, M. Kamiya, W. Saito, K. Tsutsui, K. Kakushima, H. Wakabayashi, Y. Kataoka and H. Iwai, “Contact resistances depending on AlGa<sub>N</sub> layer thickness for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT structures”, IEEE EDS WIMNACT 39, Yokohama, Japan, Feb. 2014. (Poster)
2. Y. Takei, M. Okamoto, W. Saito, K. Tsutsui, K. Kakushima, H. Wakabayashi, Y. Kataoka, and H. Iwai, “Ohmic Contact Properties Depending on AlGa<sub>N</sub> Layer Thickness for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High Electron Mobility Transistor Structures”, 225th ECS Meeting, Orland, USA, May 2014. (Oral)
3. K. Tsutsui, M. Kamiya, Y. Takei, W. Saito, K. Kakushima, H. Wakabayashi, Y. Kataoka and H. Iwai, “Low-resistive Contact Formation on AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT Structures by Introducing Uneven AlGa<sub>N</sub> Layers”, The International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2014), Wrocław, Poland, Aug. 2014. (Oral)
4. Y. Takei, T. Shimoda, K. Tsutsui, K. Kakushima, H. Wakabayashi, Y. Kataoka and H. Iwai “Contact resistance depending on AlGa<sub>N</sub> layer thickness for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT”, IEEE EDS WIMNACT 45, Yokohama, Japan, Feb. 2015. (Poster)
5. Y. Takei, T. Shimoda, W. Saito, K. Kakushima, H. Wakabayashi, K. Tsutsui and H. Iwai, “Lowering contact resistances on AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT structures by introducing uneven AlGa<sub>N</sub> layers: Effects of configuration and size of lateral patterns”, MRS Fall Meeting, Boston, USA, Nov 2015. (Oral)

3) 国内学会（登壇したもののみ記載）

武井優典，他，“極浅不純物深さ方向プロファイリングのためのオゾン酸化を用いたSiステップバイステップエッチングの不純物濃度依存性”，応用物理学会，18a-A6-3，2012年3月

武井優典，他，“オゾン酸化を用いたSiおよびGeのサブnmステップバイステップエッチング”，応用物理学会，11p-F5-15，2012年9月

武井優典，他，“オゾン酸化を用いたAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>のサブnmステップバイステップエッチング”，応用物理学会，29p-PA2-4，2013年3月

武井優典，他，“AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>系HEMTにおけるコンタクト特性のAlGa<sub>N</sub>層厚依存性”，応用物理学会，20p-D7-4，2013年9月

武井優典，他，“AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>系2次元電子ガスへのコンタクト特性における電極材料およびAlGa<sub>N</sub>層厚依存性”，応用物理学会，19p-D8-8，2014年3月

武井優典，他，“AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>系2次元電子ガスへのノンアロイコンタクトにおけるコンタクト抵抗のAlGa<sub>N</sub>層厚依存性による抵抗成分分析”，応用物理学会，18p-A22-6，2014年9月

武井優典，他，“AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT構造への凹凸AlGa<sub>N</sub>層導入によるコンタクト抵抗の低減”，応用物理学会，12a-A21-12，2015年3月

武井優典，他，“AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTへの凹凸AlGa<sub>N</sub>層導入によるコンタクト抵抗低減効果のメカニズム解明”，応用物理学会，22a-W541-2，2016年3月

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、数多くの方々のご協力を賜りました。ここにその御礼の意を表します。

本研究の遂行および本論文の編纂にあたり、終始親切丁寧にご指導下さいました指導教員の筒井 一生教授に心より感謝申し上げます。筒井先生からは研究内容のみならず、研究に対する姿勢、物の考え方のみならず、人生における様々な考え方に対しても最も大きな影響を与えられました。

本論文を審査していただきました若林 整教授、渡辺 正裕准教授、大見 俊一郎准教授、角嶋 邦之准教授、羽田野 渉様（東芝 セミコンダクター&ストレージ社）をはじめとする、物理電子システム創造専攻の諸先生方には、論文審査会等において大変有意義なご意見をいただきました。この場を借りて御礼を申し上げます。

岩井 洋名誉教授、若林 整教授、角嶋 邦之准教授、東芝 セミコンダクター&ストレージ社の津田 邦男様、羽田野 渉様、小林 仁様には、日頃の打ち合わせ等を通して、貴重なご意見を頂きましたことを感謝申し上げます。

本研究の遂行に欠かせない各種実験設備の利用に便宜を図って下さいました岩井 洋名誉教授、若林 整教授、大見 俊一郎准教授、角嶋 邦之准教授、庄司 大氏、南雲 祐治氏ならびに、若林研究室、大見研究室、角嶋研究室の皆様にご感謝申し上げます。

最後に、研究生活でもプライベートでも長い時間を共に過ごし、苦楽を共にしてきた筒井研究室の皆様にご深く感謝申し上げます。