

1. Si 基板上 AlGa_N/Ga_N HEMT における
電界発光と光応答に関する研究

第 1 章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 GaN 系トランジスタ

近年、地球温暖化の問題から低炭素社会に向けて、省エネルギーの視点に基づく技術開発が求められている。電力変換に用いる半導体素子であるパワーデバイスは、産業用途から民生機器用まで広く用いられて、多くの電力を消費していることから、素子の高効率化が強く求められている。パワーデバイスの主役はシリコン(Si)半導体が担っている。しかしながら、Si 半導体デバイスはその材料物性から決定されるデバイス性能の限界に到達し、スーパージャンクション構造等により Si 限界を超えた特性改善がなされているが、今後の大幅な特性改善が困難になりつつある[1-6]。このことから、Si に代わるパワーデバイスに適した半導体材料であるワイドバンドギャップ半導の研究が進められている。ワイドバンドギャップ半導体には、窒化ガリウム(GaN)、シリコンカーバイド(SiC)などが挙げられる。表 1.1 に、Si、SiC と GaN の物性値をまとめる。パワーデバイスの性能指数の 1 つに、Baliga 指数(BFOM)がある。BFOM は以下の式で表される。

$$\text{BFOM} = \epsilon \mu E_c^3, \quad (1.1)$$

このとき、 ϵ は誘電率、 μ は移動度、 E_c は絶縁破壊電界である。表 1.1 の値を用い、(1.1)式から GaN の BFOM を計算すると、Si の値に対して 900 倍(バルク)の高い値を示す。これは、同じ耐圧を規定した場合に、単位面積あたりのオン抵抗を 900 分の 1 にすることができることを指す。このことは、GaN を用いることで低損失なデバイスを実現可能なことを示している。さらに、GaN は Si と比較するとバンドギャップが 3 倍程度大きく、高温動作が期待できる。また、高電界下での電子速度が大きいことから、高周波デバイスとしても有望である。

表 1.1 各種半導体の物性値 [1-3]

	Si	4H-SiC	GaN
バンドギャップエネルギー E_g (eV)	1.1	3.2	3.4
比誘電率 ϵ_s	11.8	10	9.0
電子移動度 μ (cm ² /Vs)	1350	700	1200 (バルク) 2000 (2DEG)
絶縁破壊電界 E_c (MV/cm)	0.3	3.0	3.3
飽和電子速度 v (10 ⁷ cm/s)	1.0	2.0	2.5
遷移型	間接	間接	直接

GaN が、SiC と異なる点は、混晶半導体である AlGaN などとヘテロ接合が形成できることや直接遷移型のバンド構造を持つことである。ヘテロ接合界面を利用した構造では、界面に $\sim 10^{13}$ cm⁻² 程度の 2 次元電子ガス(2DEG)が形成され、2000 cm²/Vs 程度の高い電子移動度が得られる。この特徴を活かしたトランジスタは、ヘテロ接合電界効果トランジスタ(Heterostructure Field-Effect Transistor : HFET)または、高電子移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor : HEMT)と呼ばれ、GaN 電子デバイスの主要な構造となっている。AlGaN/GaN のヘテロ接合を用いた HEMT は 1993 年に Khan 等によって報告されて以来[7]、盛んに研究が行われている。AlGaN/GaN HEMT の研究は、主に SiC 基板や Si 基板等と異種基板に成長されたエピ結晶を用いて行われている。高周波デバイスとしては、熱伝導率の高い SiC 基板が検討されている。一方パワーデバイスとして低コスト化が求められることを背景とし、大口径化が可能な Si 基板上 GaN HEMT の研究が盛んに行われている。このような研究開発の結果、GaN HEMT は携帯基地局向け高周波パワーデバイスとして実用化されるに至っている。また、パワーデバイスとしても数社から Si 基板上 GaN HEMT が提供されるまでに至っている。

1.1.2 GaN 系トランジスタの課題

AlGaIn/GaN HEMT は、研究開発レベルで従来の Si パワーデバイスの特性より優れた特性を示しているにもかかわらず、爆発的な普及には至っていない。これは、GaN デバイスでは素子の信頼性に関する解決すべき課題が理解されていないことに起因していると考えられる。

AlGaIn/GaN HEMT の信頼性に関わる課題には、高ドレイン電圧動作時のホットエレクトロンに起因する素子劣化、大きなゲートリーク電流などが挙げられる。GaN 素子は、絶縁破壊電界が大きいことに基づいて高ドレイン電圧での動作が期待される。このようなバイアス印加状態では、チャネルの電子は、ホットエレクトロンとなり、それに起因する素子劣化を考慮しなければならなくなる。しかしながら、実測の結果とシミュレーションによる理論解析から得られている GaN の高電界下におけるキャリア輸送機構との対応などは報告されておらず、実測と理論との議論がまだ十分にされていない。

また、ゲートリーク電流の原因は、熱電子放出理論では説明できないことが知られており、エピタキシャルの欠陥等に起因するとの報告があるが、その発生機構は完全には解明されていない[8-10]。そのためトランジスタ動作時におけるリーク発生箇所とその機構を明らかにする必要がある。

1.2 本論文の目的

本論文の目的は、Si 基板上 AlGaIn/GaN HEMT の普及を促すため必要と考えられる素子の信頼性に関わる高ドレイン電圧印加時の評価および局所領域で生じるリーク発生個所の評価に加えて、電子デバイス(高周波・スイッチング)用途以外の可能性の探求について議論し、デバイス動作の理解を進めることおよび新規応用の性能を実証することである。

第 1 の観点では、GaN の高電界における輸送シミュレーションによって予想される電界に対する電子エネルギーの関係を起点とした。実素子における高電

界現象は、ゲート幅方向に均一に生じるホットエレクトロンに由来するエレクトロルミネッセンスを基に解析した。さらに、デバイスシミュレーションによる電界解析により、得られた実測の結果と従来予想されてきたシミュレーション結果と比較した。

第 2 の観点では、ゲート領域で不均一に生じる局所リーク発生個所を同定するために、ゲート周辺が観察可能な透明ゲート構造を有する AlGaIn/GaN HEMT を開発した。さらに、局所発光によるリーク発生個所の可視化手法を用いて、局所リーク発生個所を引き起こしているエピタキシャル構造を明らかにする。

第 3 の観点では、GaN 電子デバイスの新規応用として、受光素子応用の検討を行った。AlGaIn/GaN のヘテロ接合を用いた高感度な検出素子構造を起点とし、基板材料の自由度の高い透明ゲート構造を用いたトランジスタ構造を紫外線受光素子として用いる検討を行った。

1.3 本論文の構成

本論文では、次世代のパワーデバイスとして期待される Si 基板上 AlGaIn/GaN HEMT の普及に欠かすことのできない信頼性に関わるデバイス評価および新規の応用検討について述べる。本論文は、5 つの章で構成される。以下に、各章の構成を述べる。

第 2 章では、高ドレイン電圧動作時における AlGaIn/GaN HEMT の評価について述べる。

第 3 章では、AlGaIn/GaN HEMT のゲートリーク電流機構解明に向けた発光解析とトランジスタ動作時にゲート全体を観察可能な透明ゲート構造による局所リーク発生個所の同定手法について述べる。また、その解析手法を基に検討した局所リーク発生個所の結晶構造評価について述べる。

第4章では、前3章で開発した透明ゲートを有する AlGaN/GaN HEMT の紫外線受光素子としての可能性について述べる。

第5章では、本論文の総括を述べる。

参考文献

- [1] H. Okumura, “Present Status and Future Prospect of Widegap Semiconductor High-Power Devices,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 10A, pp. 7565–7586, Oct. 2006.
- [2] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y. F. Wu, “GaN-based RF power devices and amplifiers,” *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 2, pp. 287–305, 2008.
- [3] S. Fujita, “Wide-bandgap semiconductor materials: For their full bloom,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, no. 3, pp. 030101–1–030101–12, 2015.
- [4] 大橋 弘道、葛原 正明編著「半導体デバイスシリーズ④ パワーデバイス」丸善出版株式会社, (2011)
- [5] 山本 秀和 「ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス」 株式会社コロナ社, (2015)
- [6] 特許庁：平成 26 年度 特許出願技術動向調査報告書 パワー半導体デバイス
- [7] M. A. Khan, A. Bhattarai, J. N. Kuznia, and D. T. Olson, “High electron mobility transistor based on a GaN- Al_xGa_{1-x}N heterojunction,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 9, pp. 1214–1215, 1993.
- [8] S. Mizuno, Y. Ohno, S. Kishimoto, K. Maezawa, and T. Mizutani, “Large Gate Leakage Current in AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. Part 1, No. 8, pp. 5125–5126, Aug. 2002.
- [9] W. Saito, M. Kuraguchi, Y. Takada, K. Tsuda, I. Omura, and T. Ogura, “Influence of Surface Defect Charge at AlGaN–GaN–HEMT Upon Schottky Gate Leakage Current and Breakdown Voltage,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 52, no. 2, pp. 159–164, Feb. 2005.
- [10] H. Zhang, E. J. Miller, and E. T. Yu, “Analysis of leakage current mechanisms in Schottky contacts to GaN and Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN grown by molecular-beam epitaxy,” *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 2, pp. 023703–1–023703–6, 2006.

第 2 章 AlGaIn/GaN HEMT の高電界現象

2.1 はじめに

GaN 系 HEMT では、信頼性が問題となっている[1]–[8]。特に、数百秒より短いストレス印加による素子劣化が多く報告されている[1], [4]–[6]。主な劣化現象の一つに急激なゲートリーク電流の増加が挙げられ、素子に印加可能な電圧を制限されてしまう。この急激なリーク電流の増加は、ゲートのドレイン端の一部に現れる溝と関連していることが考えられている[4], [5]。このような溝を生じさせる原因としては、エピタキシャル層の貫通転位又は表面の酸素汚染などが提案されている[3], [8]。従って、短いストレス印加による素子劣化は主に結晶性などの不完全性に由来する局所の要因に起因することが考えられる。

この様な局所要因によって生じる素子劣化が解決された場合、GaN 系 HEMT はより高い電圧を印加される。この様にトランジスタに高電界が印加された場合、チャネルの電子は高いエネルギーを得てホットエレクトロンになり、ホットエレクトロンによる素子劣化を考慮しなければならないと考えている。言い換えると、短いストレス印加時に局所の素子劣化を生じるトランジスタはホットエレクトロンに起因する現象を観察するのに適していないと考えられる。

一般に、ホットエレクトロンは電子温度として評価される。AlGaIn/GaN HEMT では、エレクトロルミネッセンス(EL)スペクトルから電子温度を評価される[2], [9]–[15]。表 2.1 に AlGaIn/GaN HEMT のオン状態 EL 測定から得られた電子温度の報告をまとめる。飽和領域の高バイアス印加時において、おおむねどの研究グループにおいても数千 K の高い電子温度が報告されている。特に、T̂apajna 等は、ゲート幅(L_g) $0.7\mu\text{m}$ の素子で、 $V_{gd} = 30\text{ V}$ 印加時に 5000 K の高い電子温度を得ている。一方、フルバンド構造を取り入れたシミュレーションや流体シミュレーションによる理論計算によると、 300 kV/cm の高電界印加時に GaN チャネ

ルの電子温度は 10000 K(1 eV の電子エネルギー)に達することが予想されている [16]–[19]。実験的に得られている電子温度はシミュレーションにより想定されている半分の電子温度しか得られていない。このことから、上記で述べたように既報告の素子評価ではチャネルの電子が高電子温度に達するのに十分な電界が印加されていないと予想している結果と一致する [2], [9]–[15]。

表 2.1 AlGaIn/GaN HEMT のオン状態 EL による電子温度の報告

L_g / L_{gd} (μm)	Electron temperature (T_e) (K)	V_{gd} (V)	Reference
2 / 3	2000 2400	30	[9]
1 / -	1700	40	[15]
0.6 / 3.4	1900	10	[10]
2 / 7.5	2400 ~ 2600	27	[14]
0.7 / 2.5	5000	30	[2]
1.5 / -	1800	25	[11]
- / 3	2600	30	[12]
0.7 / -	1700	40.5	[13]

本章では、モンテカルロシミュレーションで予想されているように実 AlGaIn/GaN HEMT 素子で電界に依存する電子温度が得られるのかを検討した。また、EL スペクトルから発光のメカニズムについて知見を得ることを目的とした。

2.2 AlGaN/GaN HEMT

2.2.1 デバイス構造と作製プロセス

図 2.1 に作製した AlGaN/GaN HEMT の断面構造図及び顕微観察像を示す。エピタキシャル層は有機金属気相成長(Metal Organic Chemical Vapor Deposition : MOCVD) 法により、Si 基板上に成長したものである。エピタキシャル構造は、AlN 核形成層及び AlN/GaN の歪超格子を含むバッファ層、厚さ $1\text{ }\mu\text{m}$ の GaN チャネル層及び Al 組成 20%、厚さ 25 nm の AlGaN 障壁層からなる。GaN チャネル層及び AlGaN 障壁層は不純物を添加していない (unintentionally doped : UID) 層となっている。van der Pauw 法による、移動度及びキャリア密度の測定結果より、室温(300K)でそれぞれ、 $1090\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、 $8.7\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$ である。

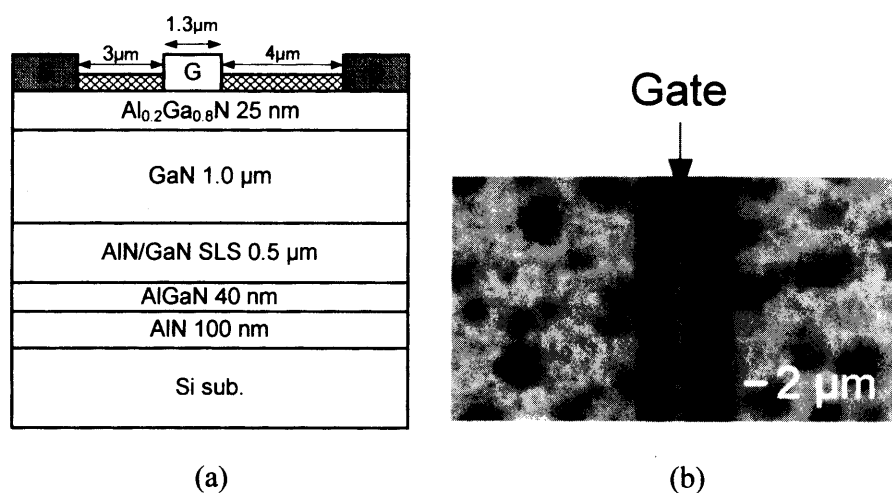


Fig. 2.1(a) AlGaN/GaN HEMT の断面構造 (b) デバイスの顕微観察像

図 2.2 に HEMT の作製フローを示す。反応性イオンエッチング(Reactive Ion Etching : RIE) 装置により、素子間分離を行った(図 2.2 (a))。エッチング深さは 180 nm である。エッチングガスには BCl_3 を用いた。エピタキシャル表面に SiO_2 を電子ビーム蒸着法により堆積した(図 2.2 (b))。オーミック電極形成部をバッファードフッ酸(Buffered Hydrogen Fluoride : BHF)により開口した(図 2.2 (c))。

Ti/Al/Ni/Au の蒸着、リフトオフによりオーミック電極を形成した。その後、N₂ 雰囲気中で 850 °C、30 秒の高速熱処理 (Rapid Thermal Annealing : RTA)を行った (図 2.2 (d))。最後に、オーミック電極形成プロセスと同様に BHF によるゲート部の開口を行った後(図 2.2(e))、Pd/Ti/Au の蒸着、リフトオフによりゲート電極を形成した(図 2.2 (f))。

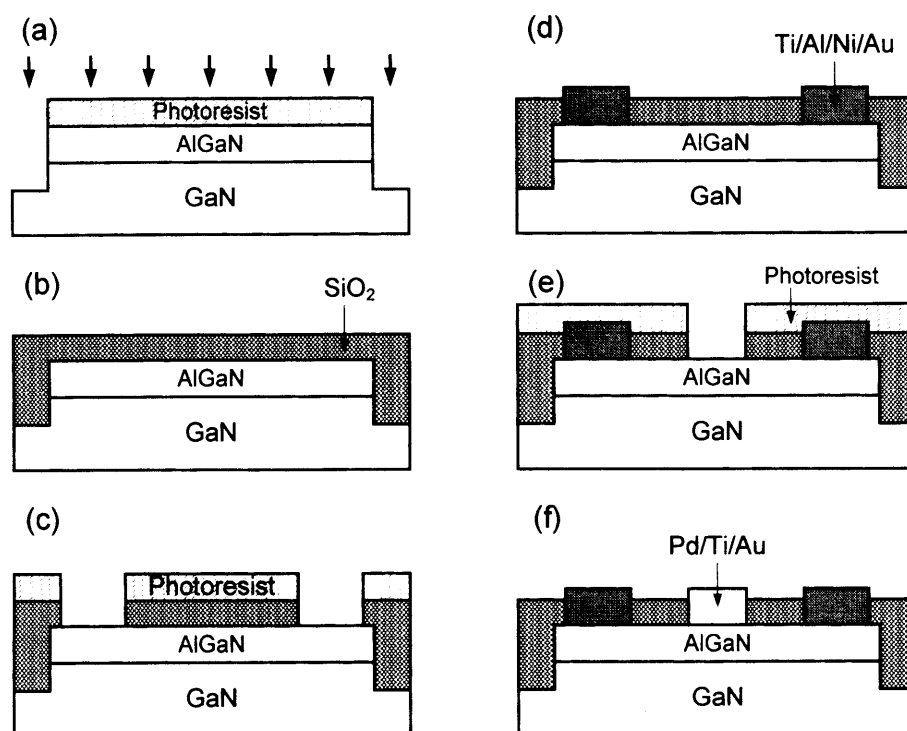


図 2.2 HEMT の作製プロセスフロー

2.2.2 デバイス特性

図 2.3(a)にデバイスの I_d - V_d 特性を示す。代表的な DC 特性は、ドレイン飽和電流が 73 mA/mm である。図 2.3(b)に $V_{ds} = 6$ V におけるデバイスの伝達特性を示す。しきい値電圧は図 2.3(b)に示すように伝達特性のリニア・プロットから直線を外掃することで定義し、-0.8 V である。

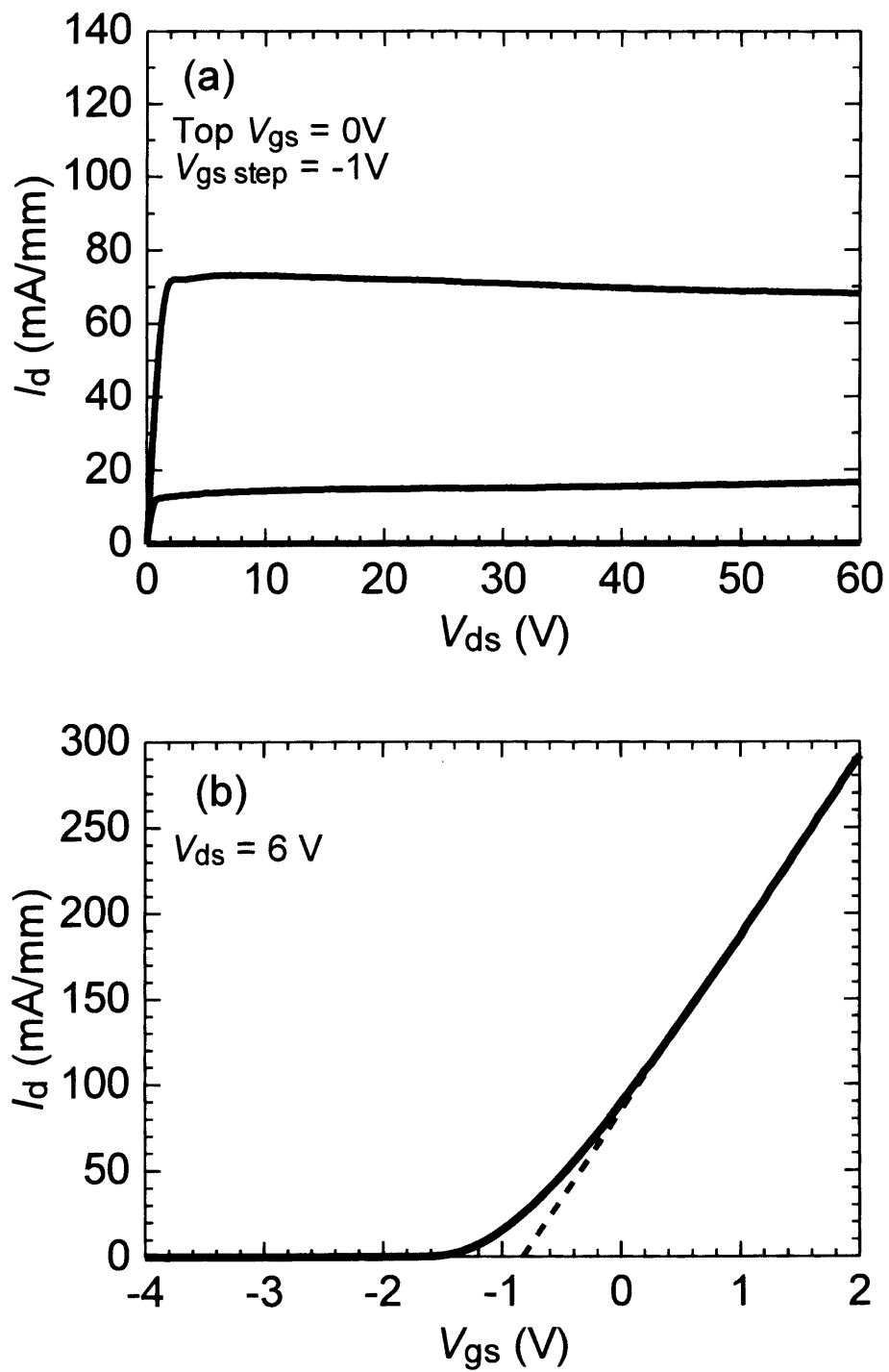


図 2.3 AlGaIn/GaN HEMT の(a) I_d - V_d 特性及び(b) 伝達特性

2.3 EL による高電界現象の観察

2.3.1 発光観察

半導体デバイスから生じる微弱な発光を観察するために、エミッション顕微

鏡を用いた。図 2.4 に本測定系の概略図を示す。測定はマニュアルプローバを使い、オンウェハで行った。DC 特性は半導体パラメータアナライザを用いて測定した。デバイスから発生する微弱光は、デバイスの直上に配置された対物レンズで集光し、CCD により検出される。CCD により得られた発光像をパターン像に重ね合わせることでデバイス内での発光箇所を高精度に特定する。エミッション顕微鏡には、SI-CCD カメラ(Si Intensified CCD Camera)が組み込まれた PHEMOS-1000(浜松ホトニクス製)を用いた[20]。図 2.5 に示すように、組み込まれている SI-CCD カメラは 300~1100 nm の波長域に高い感度をもつので、既報告にある AlGaIn/GaN HEMT から生じる発光波長(500-950 nm)を捉えることが可能である[21], [22]。また、SI-CCD の空間分解能は 1 μm 未満である。

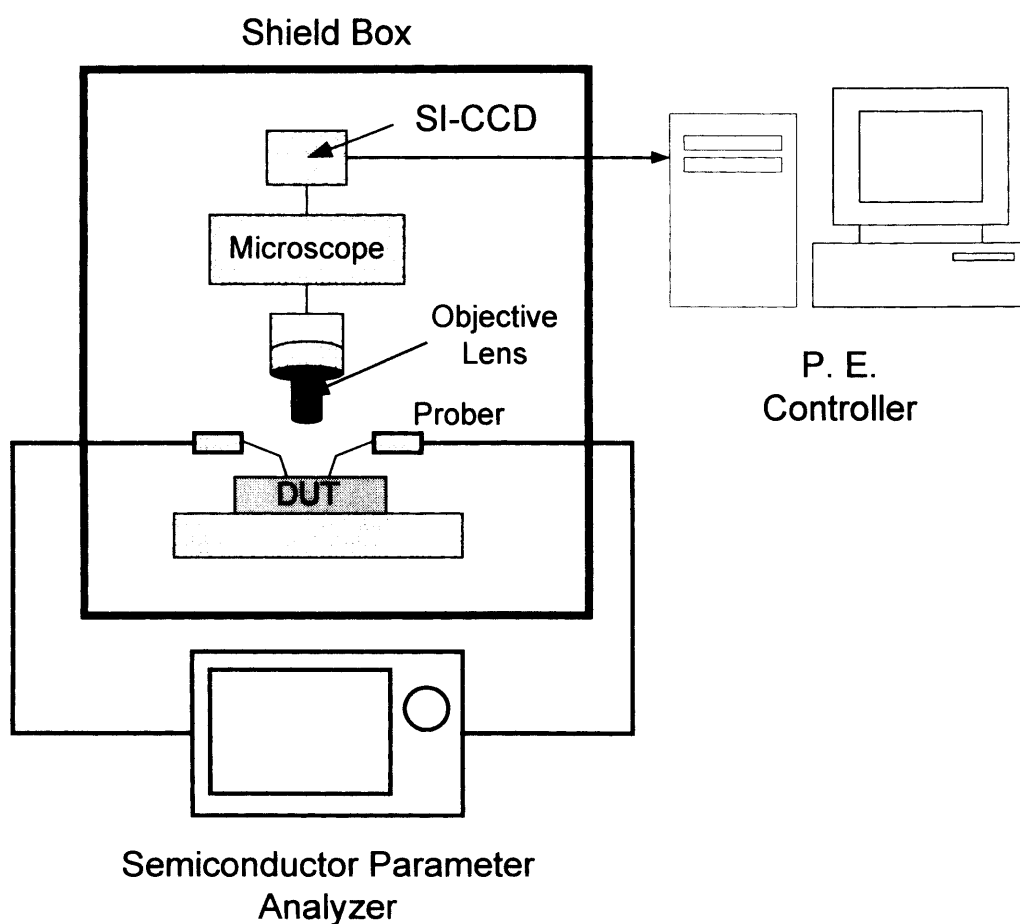


図 2.4 微弱発光観察の測定系

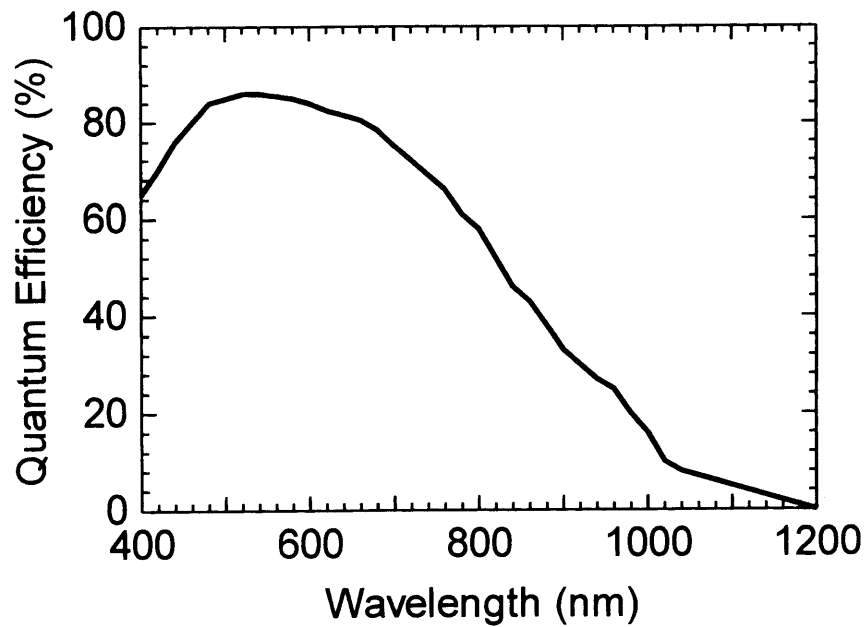


図 2.5 SI-CCD の感度波長 [20]

表 2.1 より、 $V_{gd} = 30 \text{ V}$ 程度印加することにより、 1000 K を超えるホットエレクトロンに起因する発光が観察されている。このことから、発光観察を行うバイアス条件は $V_{gd} = 30 \text{ V}$ を超えるドレイン電圧を印加した状態を基に行った。図 2.6 に (a) $V_{ds} = 30 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = 0 \text{ V}$ (b) $V_{ds} = 60 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = 0 \text{ V}$ を印加したオン状態での発光像を示す。発光強度はスケールバーに示すように、フォトンカウント数に応じて赤から青色に色分けされている。いずれも発光はドレイン端に均一に生じている。このことは、今回発光観察を行った素子において発光を引き起こしている要因は、エピタキシャル層の不完全性に起因して引き起こされる局所に流れている電流によって生じたものでないことを示唆していると考えている[15]。ドレイン端側に EL が観察された原因は、ゲート-ドレイン間における電子トラップ効果に起因し、2次元電子ガスの空乏化により電流コラプス状態になっていると考えられる[23]-[25]。電流コラプスとは、大きなドレイン電圧を印加した後に得られる I_d - V_d 特性が、ストレスを印加せずに測定を行った場合の I_d - V_d 特性と比べ、オン抵抗が大幅に増加する現象である。電流コラプスを引き起こす要因としては、エピタキシャル層の表面又は界面、バッファ層内に存在するトラッ

プなどが想定されている。

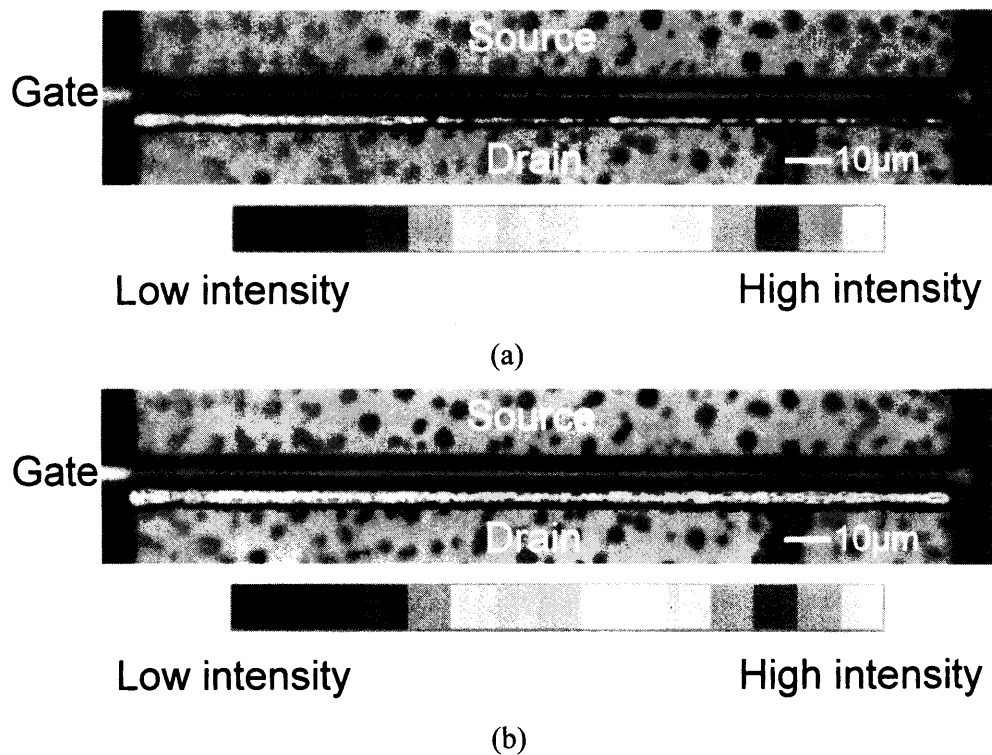


図 2.6 AlGaIn/GaN HEMT の EL 分布 (a) $V_{ds} = 30\text{ V}$ 、 $V_{gs} = 0\text{ V}$

(b) $V_{ds} = 60\text{ V}$ 、 $V_{gs} = 0\text{ V}$

発光強度は取得したカウント数に応じて青色から赤色に色分けされている。

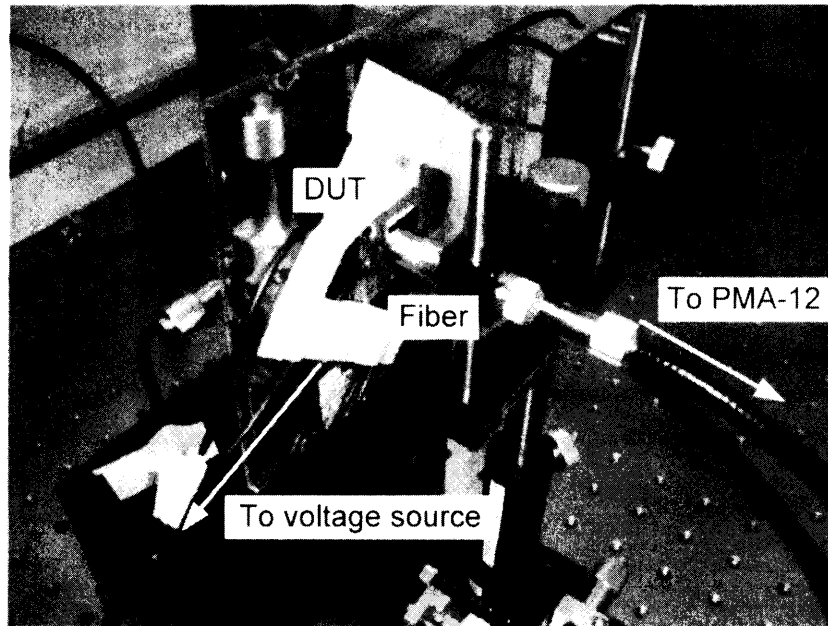
2.3.2 EL の波長分析

2.3.1 節より、トランジスタからのゲート幅方向に均一な発光を観察した。この様な AlGaIn/GaN HEMT から生じる発光スペクトルの高エネルギー側は、マクスウェル-ボルツマン分布によって解釈される。ここでは、発光観察を行ったバイアス下でのトランジスタから生じる発光の分光スペクトルの測定を行い、高電界によって引き起こされるホットエレクトロンからの EL が生じているかを検討する。

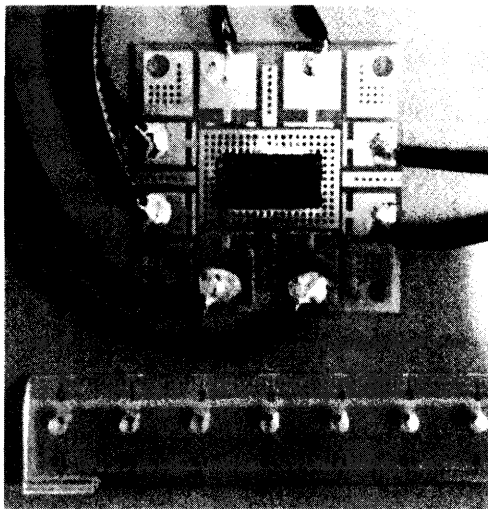
トランジスタから生じる発光は微弱で、その強度は距離の 2 乗に反比例することを考慮すると、分光スペクトルを取得するには光学系をトランジスタに接近させる必要がある。各オーミック及びショットキー電極へのバイアス印加を

マニュアルプローバで行う場合、電極に電氣的な接触を行うプローバのニードルにより、光学系を接近させることが困難になる。このことから、素子へのバイアス供給を可能とし、光学系を接近可能な測定系を組み立てる必要がある。上記の目的を達成するために、ワイヤ・ボンディングによる配線技術と外部電源と電氣的に接続させるプリント基板を組み合わせた評価系を用いた。

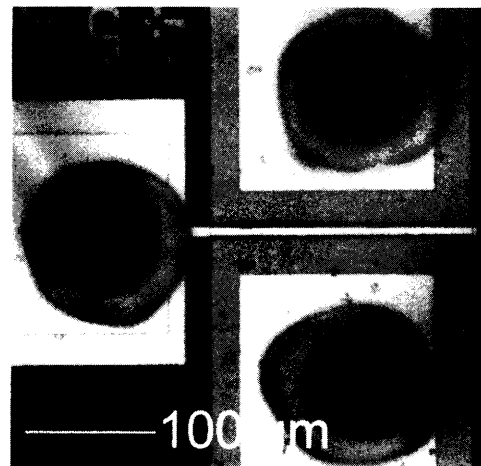
図 2.7 に分光スペクトル測定系、測定に用いた評価基板及びワイヤ・ボンディングの一例を示す。図 2.7 (a)に示すように、トランジスタからの発光を垂直方向に配置した光ファイバーで集光し、分光を行う。分光スペクトルの取得には、マルチチャンネル分光器(浜松ホトニクス PMA-12)を用いた[26]。裏面入射 CCD リニアイメージセンサを搭載し、高感度に 200 nm から 950 nm までの波長を測定が可能となっている(図 2.8)。測定可能な波長域(200-950 nm)は、2.3.1 節で述べた既報告の AlGaIn/GaN HEMT から生じる EL の波長である 500 nm から 950 nm 及び GaN のバンドギャップ相当の波長(3.4 eV, 365 nm)を含んでいる[21], [22]。このことから、本評価系を用いることで、GaN のバンドギャップ内での電子・ホール再結合による発光が生じているのかを把握することが可能と考えている。また、金線ワイヤを用いたワイヤ・ボンディングにより、トランジスタの各電極とプリント基板の金パッドを電氣的に接続している(図 2.7(b), 2.7(c))。



(a)



(b)



(c)

図 2.7 (a) 分光スペクトル測定系 (b) 分光スペクトル取得に用いた評価基板
(c) ワイヤ・ボンディングを行った素子の一例

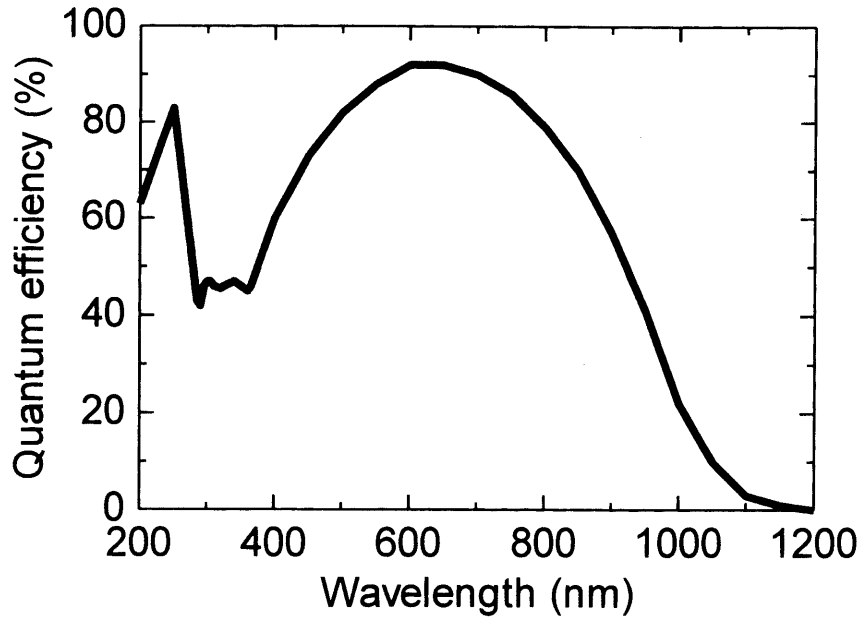


図 2.8 CCD の分光感度特性 [26]

図 2.9 に AlGaIn/GaN HEMT の EL スペクトルを示す。EL 測定は、 $V_{gs} = 0$ V に固定し、ドレイン電圧を 30~60 V、 $\Delta V_{ds} = 10$ V と変化させて行った。各 EL 測定点におけるドレイン電流は約 60 mA/mm であった。すべての測定バイアス下において、発光強度の対数プロットは、高エネルギー側に向かって振動しながら線形的に減少した。EL 強度の傾きは、ドレイン電圧の増加に伴いより緩やかになった。さらに、測定のノイズレベルより十分発光強度の強い強度が得られている $V_{ds} = 60$ V においても GaN のバンドギャップ相当(3.4 eV)の発光が観察されていない[13]。従って、観察した EL は GaN チャネル内のバンド間再結合によるものではなく、ホットエレクトロンのバンド内遷移によることを示唆している[21], [27]。

ホットエレクトロンのバンド内遷移が支配的である場合、EL 発光強度(I_{EL})はマクスウェル-ボルツマン分布に従い[9][12][27]、以下の式で表される。

$$I_{EL} \propto \exp(-E/k_B T_e), \quad (2.1)$$

E は光子のエネルギー、 k_B はボルツマン定数、 T_e は電子温度である。(2.1)式よ

り、EL 強度の傾きは電子温度を示す。(2.1)式を用いることで、定量的に電子温度を評価した。得られた電子温度は 3300 ($V_{ds} = 30$ V), 5600 ($V_{ds} = 40$ V), 7800 ($V_{ds} = 50$ V), 8600 K ($V_{ds} = 60$ V)であった。ドレイン電圧の増加に伴う電子温度の増加は、チャンネルに掛かっている電界強度が大きくなっていることに起因しているものと考えている。 $V_{ds} = 60$ V、 $V_{gs} = 0$ V における 8600 K の電子温度は、既報告の AlGaIn/GaN HEMT において得られた電子温度(5000 K)より約 1.6 倍程度大きい値であった。そのため、次節において今回得られた電子温度が妥当であるかの検討を行った。

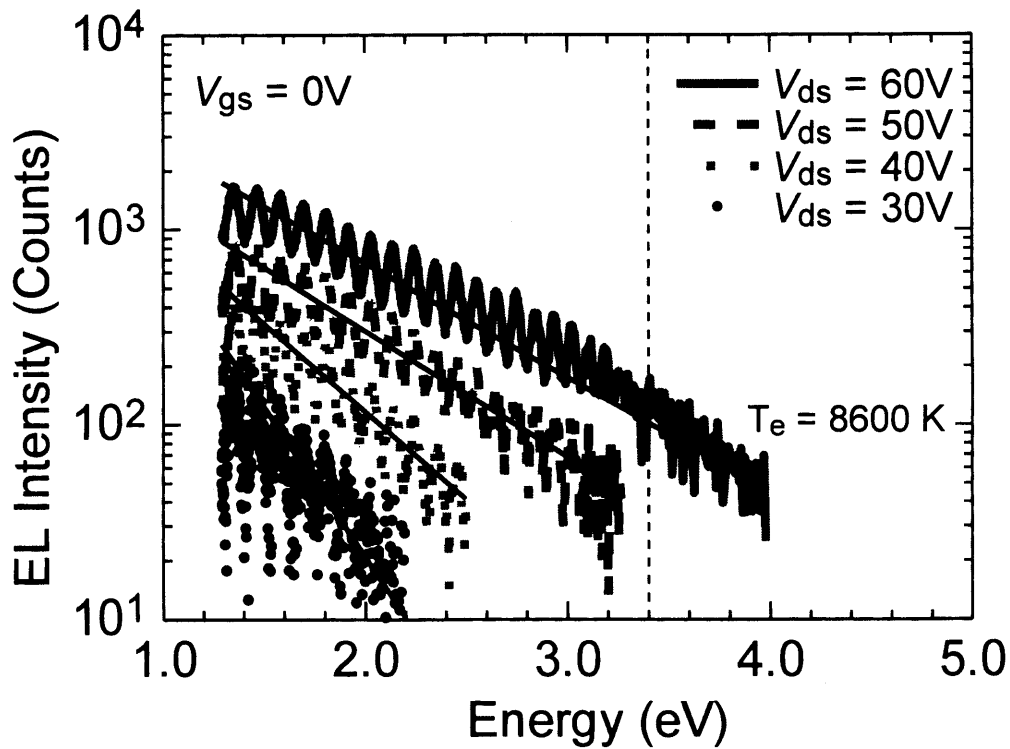


図 2.9 AlGaIn/GaN HEMT の EL スペクトル

2.4 高電子温度の妥当性

Kolník らによって報告されているモンテカルロシミュレーション結果から、300 kV/cm 以上の高電界がチャネル層に掛かっている場合には、今回実験的に得られた電子温度に達することが予想される[16]。ここでは AlGaIn/GaN HEMT の実素子にかかる電界を得るために 2 次元のシミュレーションを行い、既報告の電子エネルギー－電界特性と比較した。

2.3.1 で述べたように、発光観察時のバイアス印加において、ゲートドレイン間に存在するトラップにより電流コラプス状態となっていることが予想される。シミュレーションによって、デバイス特性を再現するためには、分光測定時のデバイス状態を把握することが必要である。このことから、分光測定バイアス印加時のデバイス状態を再現するために、今回はパルス I - V 測定を行った。分光測定時のストレス状態を再現するために、ストレスバイアス条件を $V_{dq} = 60$ V、 $V_{gq} = 0$ V とした。また、パルス幅を 10 ms、パルスピリオドを 100 ms とした。

本研究では、2 次元のシミュレータとして SILVACO 社 ATLAS を用いた。シミュレータでは、ポアソン方程式、ドリフト拡散モデルによる電子・ホール電流連続の式を連立して、数値解を得て、デバイスの性能を予測する。シミュレーションに用いたデバイス構造(図 2.10)は、基板を除いて分光測定に用いた試料構造と同等のものである。オーミック電極は、エピタキシャル層に埋め込む形に配置し 2 次元電子ガスに直接コンタクトしている。移動度は速度飽和を考慮している Caughey – Thomas モデルを用いた[28][29]。Caughey – Thomas モデルによる低電界移動度を(2.2)式に示す。

$$\mu = \mu_0 \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_0 E}{v_{sat}} \right)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}}, \quad (2.2)$$

また、低電界移動度(μ_0)を $1000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、飽和速度(v_{sat})は $1.8 \times 10^7 \text{ cm s}^{-1}$ 、低電界移動度から飽和への移行パラメータ(β)を 2 と仮定した。ゲートドレイン間の表面 AlGaN 層に負の固定電荷を導入することによって、上記のコラプス状態を再現した[25]。導入した固定電荷は $-6.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ である。

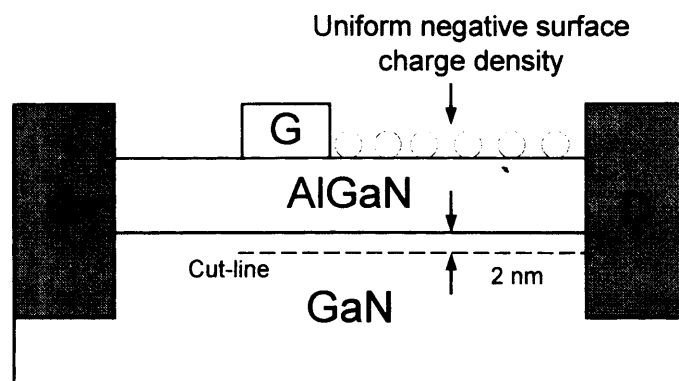


図 2.10 シミュレーションを行ったデバイス構造の断面模式図

点線：図 2.11(b)での電界分布を取得した位置

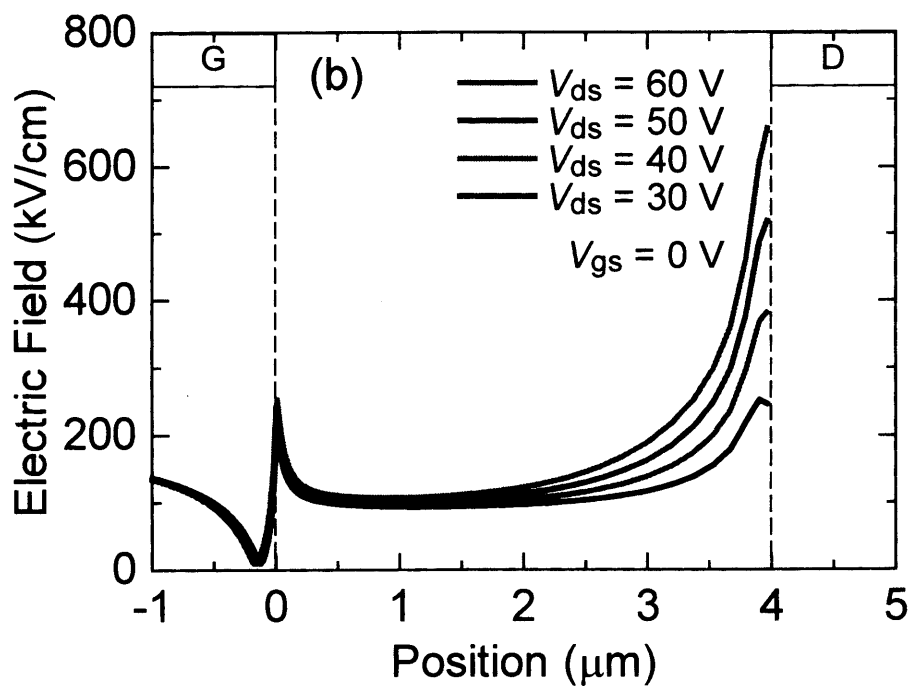
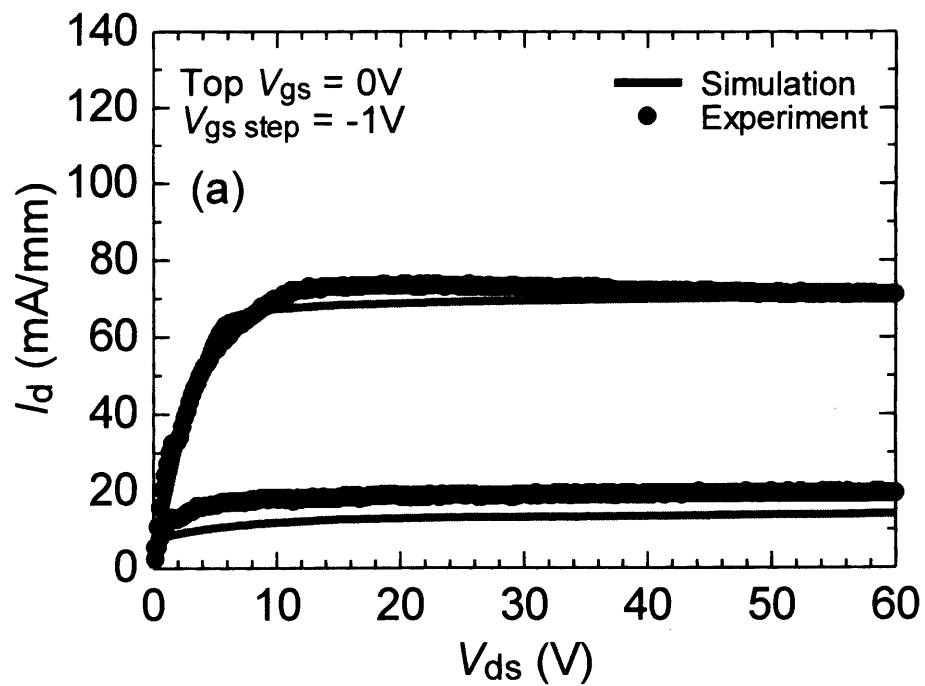


図 2.11(a) シミュレーション(赤線)および実測(黒丸)の I_d - V_d 特性

(b) 2次元シミュレーション結果から抽出した $V_g = 0$ V, $V_d = 30, 40, 50, 60$ V
におけるゲートドレイン間の電界分布

シミュレーションにおける電界分布を取得した位置は、図 2.10 の点線に示すように AlGaIn/GaN 界面から GaN チャネル側に深さ 2 nm である。

図 2.11(a)にパルス I - V より得た I_d - V_d 特性とシミュレーションから得た I_d - V_d 特性の比較を示す。シミュレーションから得た特性は、実験結果をよく再現した。従って、今回用いたシミュレーションモデルは、実際の測定素子における電界を得るのに十分なものだと考えている。

図 2.11(b)に、図 2.11(a)に示したシミュレーション結果から抽出した $V_g = 0$ V を一定とした各ドレイン電圧におけるチャンネルに沿った電界の分布を示す。電界分布を得たドレイン電圧は、30、40、50、60 V の 4 点である。チャンネルに沿った電界分布を取得した位置は、図 2.10 の点線に示すように AlGaIn/GaN 界面から GaN チャンネル側に深さ 2 nm である。図 2.11(b)では、ゲートのドレイン端を 0 μ m とし、その位置からの相対距離を x 軸とした。図から見てわかるように、ドレイン電圧の増加に伴いゲートのドレイン端からドレイン端の間で電界が増加していることがわかる。特にドレイン端で電界が強く、60 V において 660 kV/cm を示した。また、高電界領域が形成されたドレイン端の位置は、図 2.6 に示す EL 箇所とよく一致した。これらの結果より、(2.1)式から導出された数千 K の電子温度を示すホットエレクトロンがドレイン端で生じたことが確認された。

図 2.12 にシミュレーションの最大電界に対する電子温度の依存性を示す。平均電子エネルギーは $(3/2) k_B T_e$ として導出した。図中には、J. Kolník 等によって報告されたモンテカルロシミュレーションによる GaN の電界に対する平均電子エネルギーの計算結果を合わせて示す[16]。図 2.12 に示すように、EL スペクトルから見積もられた電子温度は電界に対して増加する傾向を示している。この傾向は、上記のモンテカルロシミュレーションによる結果と一致している。よって、実験的に得られた 8600 K の電子温度は大きな矛盾がないものであると考えている。

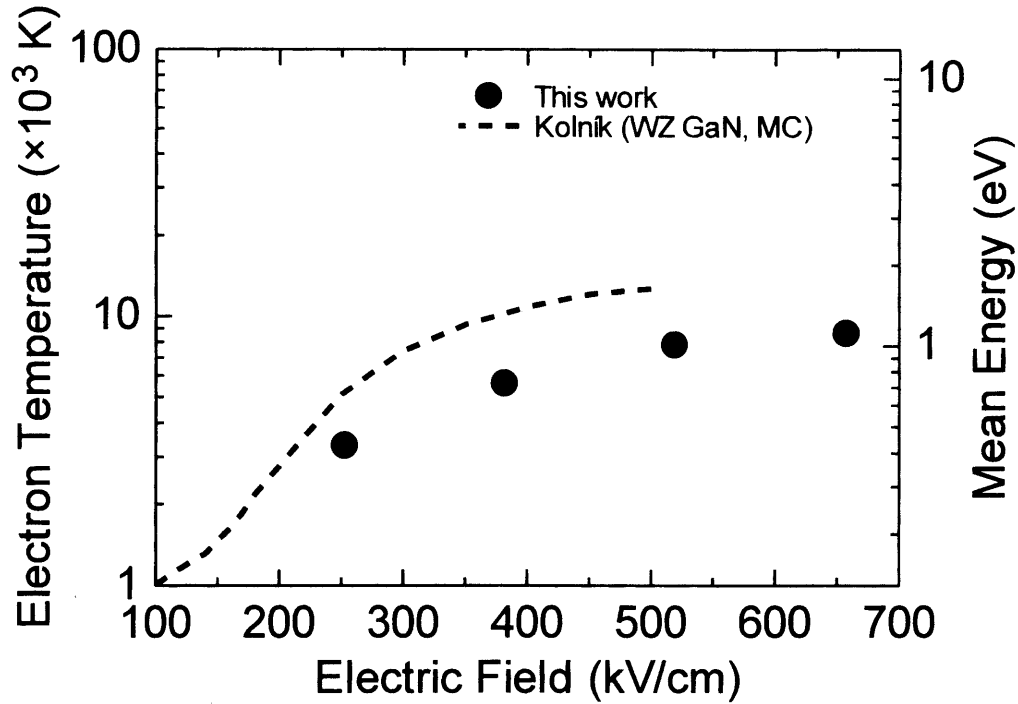


図 2.12 AlGaIn/GaN HEMT の電界に対する電子エネルギープロット

2.5 まとめ

本章では、Si 基板上 AlGaIn/GaN HEMT を用い、オン状態での EL を評価することで高電界現象について検討した。その結果以下の知見を得た。

高ドレイン印加時の GaN HEMT からの EL スペクトルは、マクスウェルボルツマン分布に従い、かつ GaN のバンドギャップ(3.4 eV)に相当するエネルギーに信号を持たないことが分かった。これらの結果から、EL がバンド間再結合でなく、ホットエレクトロンのバンド内遷移が支配的である結果を得た。

ドレイン電圧 60V において、電子温度 8600 K という既報告の AlGaIn/GaN HEMT の結果と比較して高い値を確認した。シミュレーションによるチャネルの電界解析を行い、電子温度の電界依存性を評価した。この結果は、既報告のモンテカルロシミュレーションによる平均電子エネルギーの電界依存性の傾向と一致した。

参考文献

- [1] M. Meneghini, A. Stocco, M. Bertin, D. Marcon, A. Chini, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Time-dependent degradation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors under reverse bias," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 3, pp. 033505–1–033505–3, 2012.
- [2] M. Ćapajna, R. J. T. Simms, Y. Pei, U. K. Mishra, and M. Kuball, "Integrated optical and electrical analysis: Identifying location and properties of traps in AlGaIn/GaN HEMTs during electrical stress," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 31, no. 7, pp. 662–664, Jul. 2010.
- [3] M. Ćapajna, S. W. Kaun, M. H. Wong, F. Gao, T. Palacios, U. K. Mishra, J. S. Speck, and M. Kuball, "Influence of threading dislocation density on early degradation in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. May, pp. 223501–1–223501–3, 2011.
- [4] M. Montes Bajo, C. Hodges, M. J. Uren, and M. Kuball, "On the link between electroluminescence, gate current leakage, and surface defects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors upon off-state stress," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 3, pp. 033508–1–033508–4, 2012.
- [5] N. Killat, M. Montes Bajo, T. Paskova, K. R. Evans, J. Leach, X. Li, Ü. Özgür, H. Morkoç, K. D. Chabak, A. Crespo, J. K. Gillespie, R. Fitch, M. Kossler, D. E. Walker, M. Trejo, G. D. Via, J. D. Blevins, and M. Kuball, "Reliability of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on low dislocation density bulk GaN substrate: Implications of surface step edges," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, pp. 193507–1–193507–4, 2013.
- [6] A. F. Wilson, A. Wakejima, and T. Egawa, "Step-Stress Reliability Studies on AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors on Silicon with Buffer Thickness Dependence," *Appl. Phys. Express*, vol. 6, no. 5, pp. 056501–1–056501–3, Apr. 2013.
- [7] J. Joh and J. A. del Alamo, "Critical voltage for electrical degradation of GaN high-electron mobility transistors," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 29, pp. 287–289, 2008.
- [8] F. Gao, B. Lu, L. Li, S. Kaun, J. S. Speck, C. V. Thompson, and T. Palacios, "Role of oxygen in the OFF-state degradation of AlGaIn/GaN high electron

- mobility transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 2011, pp. 223506–1–223506–3, 2011.
- [9] N. Shigekawa, K. Shiojima, and T. Suemitsu, “Optical study of high-biased AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors,” *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 1, pp. 531–535, 2002.
 - [10] M. Meneghini, A. Stocco, N. Ronchi, F. Rossi, G. Salviati, G. Meneghesso, and E. Zanoni, “Extensive analysis of the luminescence properties of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 6, pp. 063508–1–063508–3, 2010.
 - [11] C. Hodges, N. Killat, S. W. Kaun, M. H. Wong, F. Gao, T. Palacios, U. K. Mishra, J. S. Speck, D. Wolverson, and M. Kuball, “Optical investigation of degradation mechanisms in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors: Generation of non-radiative recombination centers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 11, pp. 112106–1–112106–4, 2012.
 - [12] M. Ćapajna, N. Killat, V. Palankovski, D. Gregusova, K. Cico, J. Carlin, N. Grandjean, M. Kuball, and J. Kuzmík, “Hot-Electron-Related Degradation in InAlN/GaN High-Electron-Mobility Transistors,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 61, no. 8, pp. 2793–2801, Aug. 2014.
 - [13] N. Killat, M. J. Uren, S. Keller, S. Kolluri, U. K. Mishra, and M. Kuball, “Impact ionization in N-polar AlGaIn/GaN high electron mobility transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, pp. 063506–1–063506–4, 2014.
 - [14] M. Meneghini, M. Scamperle, M. Pavesi, M. Manfredi, T. Ueda, H. Ishida, T. Tanaka, D. Ueda, G. Meneghesso, and E. Zanoni, “Electron and hole-related luminescence processes in gate injection transistors,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 3, pp. 033506–1–033506–3, 2010.
 - [15] J. W. Pomeroy, M. Kuball, M. J. Uren, K. P. Hilton, R. S. Balmer, and T. Martin, “Insights into electroluminescent emission from AlGaIn/GaN field effect transistors using micro-Raman thermal analysis,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 2, pp. 023507–1–023507–3, 2006.
 - [16] J. Kolník, I. H. Oğuzman, K. F. Brennan, R. Wang, P. P. Ruden, and Y. Wang, “Electronic transport studies of bulk zincblende and wurtzite phases of GaN based on an ensemble Monte Carlo calculation including a full zone band structure,” *J. Appl. Phys.*, vol. 78, no. 2, pp. 1033–1038, 1995.

- [17] Y. Ando, W. Contrata, N. Samoto, H. Miyamoto, K. Matsunaga, M. Kuzuhara, K. Kunihiro, K. Kasahara, T. Nakayama, Y. Takahashi, N. Hayama, and Y. Ohno, "Gate length scaling for $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ HJFETs: two-dimensional full band Monte Carlo simulation including polarization effect," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 47, no. 10, pp. 1965–1972, 2000.
- [18] J. Kuzmik, S. Vitanov, C. Dua, J.-F. Carlin, C. Ostermaier, A. Alexewicz, G. Strasser, D. Pogany, E. Gornik, N. Grandjean, S. Delage, and V. Palankovski, "Buffer-Related Degradation Aspects of Single and Double-Heterostructure Quantum Well InAlN/GaN High-Electron-Mobility Transistors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, pp. 054102–1–054102–5, May 2012.
- [19] M. Rousseau, A. Soltani, and J. C. De Jaeger, "Efficient physical-thermal model for thermal effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 12, pp. 122101–1–122101–3, 2012.
- [20] 浜松ホトニクス, エミッション顕微鏡 PHEMOS シリーズ カタログ
- [21] N. Shigekawa, K. Shiojima, and T. Suemitsu, "Electroluminescence characterization of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 8, pp. 1196–1198, 2001.
- [22] R. Lossy, A. Glowacki, C. Boit, and J. Würfl, "Electroluminescence characterization of AlGaIn/GaN HEMTs," *Phys. status solidi*, vol. 6, no. 6, pp. 1382–1385, Jun. 2009.
- [23] Y. Ohno, T. Nakao, S. Kishimoto, K. Maezawa, and T. Mizutani, "Effects of surface passivation on breakdown of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 12, pp. 2184–2186, 2004.
- [24] M. Meneghini, C. De Santi, T. Ueda, T. Tanaka, D. Ueda, E. Zanoni, and G. Meneghesso, "Time-and field-dependent trapping in GaN -based enhancement-mode transistors with p-gate," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 33, no. 3, pp. 375–377, 2012.
- [25] A. Wakejima, A. F. Wilson, S. Mase, T. Joka, and T. Egawa, "Evaluation of Electron Trapping Speed of AlGaIn/GaN HEMT With Real-Time Electroluminescence and Pulsed I - V Measurements," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 60, no. 10, pp. 3183–3189, Oct. 2013.
- [26] 浜松ホトニクス, PMA-12 マルチチャンネル分光器シリーズ カタログ

- [27] F. Gütle, V. M. Polyakov, M. Baeumler, F. Benkhelifa, S. Müller, M. Dammann, M. Căsar, R. Quay, M. Mikulla, J. Wagner, and O. Ambacher, “Radiative inter-valley transitions as a dominant emission mechanism in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 12, pp. 125003–1–125003–7, Dec. 2012.
- [28] D. M. Caughey and R. E. Thomas, “Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field,” *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 12, pp. 2192–2193, 1967.
- [29] Y. Ikawa, K. Lee, J.-P. Ao, and Y. Ohno, “Two-dimensional device simulation of AlGa_N/Ga_N heterojunction FET side-gating effect,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 11, pp. 114302–1–114302–7, 2014.

第 3 章 AlGaIn/GaN HEMT の局所リーク解析

3.1 はじめに

GaN系HEMTでは、ゲートリーク電流が大きいことが問題となっている[1]–[8]。この様なリーク電流は、信頼性に大きく影響を与えるために、リーク電流機構の解明とその解決が普及の鍵になると考えている。SiやSiC上に成長されるGaNエピ結晶は 10^8 cm^{-2} 程度の多くの転位を含んでいることから[3], [9]–[11]、転位等に由来する局所要因とリークの相関について、デバイス動作時におけるゲート電極直下を含めた領域の検討が重要である。エピタキシャル層に分布する転位の箇所または、その周辺でリークパスを生じていることが報告している[3], [9], [10]。このことから、リーク電流機構の解明にむけて結晶学的な解析を進めることが求められる。エピタキシャル層における局所のリーク箇所を解析するためには、コンダクティブ AFM(C-AFM)が用いられる。この手法はサンプルの形状と電流分布を同時に取得することができるため、結晶構造とリークを検討するのに有益である。しかしながら、C-AFMは、トランジスタのゲート電極部を流れる局所のリーク解析には、ゲート電極部に金属があるために直接エピタキシャル層に分布する転位とその箇所の電気特性を測定することができず、用いることができない。

AlGaIn/GaN HEMT のゲートリークが支配的に流れている箇所を同定するための1つの手法として、ゲート周辺のEL観察が用いられている[8], [12]–[15]。トランジスタをオフ状態で動作させた場合、ゲートリーク電流の増加に伴いELスポットがゲートのドレイン端に生じることが報告されている。このような発光観察による局所リークの解析は、通常、金属をゲート電極に用いるために、ゲート電極の周辺部しか観察できないことが問題である。つまり、発光の基点がゲート端にあるのか、それともゲートの下に発光の基点があり、そこから広が

った光の内ゲート電極の横から漏れた光のみを観察しているかを判別できないため、局所リーク電流発生箇所の同定が困難なことである。このような状況においても、ゲート端で生じた EL スポットに関して断面透過型電子顕微鏡法 (Transmission Electron Microscopy : TEM) や走査透過電子顕微鏡法 (Scanning TEM : STEM) による観察が行われてきた[12], [15]。局所発光を生じさせるような転位のような異常箇所が見出されていないのが現状である。従来の金属ゲート構造では、局所リークの発生箇所を同定するには不適であると考えられる。

本章では、まずリーク電流機構の結晶学的解析を進めるのに必要となる、リーク電流発生箇所の同定を行う手法を検討する。ここでは、ゲート電極下を含めた領域を観察可能な透明ゲート電極 AlGaIn/GaN HEMT を発光観察に適応することを試みた。また、発光解析により同定したリーク発生箇所について構造評価を行った。

3.2 透明ゲートを有する HEMT

3.2.1 デバイス構造と作製プロセス

発光観察において、観察領域にゲート電極下を含めるためには透明ゲート構造が必要となる。今回、ゲート部の可視化に向けて透明電極である ITO をゲート電極として用いることを試みた[16]–[18]。デバイス特性比較の為、Pd/Ti/Au ゲート HEMT を合わせて作製した。図 3.1 に作製した透明ゲートの断面構造とデバイスの表面写真を示す。エピタキシャル構造は、MOCVD 法により Si 基板上に成長したものである。エピタキシャル構造は、歪超格子を含むバッファ層、厚さ 1 μm の GaN チャンネル層、厚さ 1 nm の AlN スペーサ層及び Al 組成 20%、厚さ 20 nm の AlGaIn 障壁層からなる。GaN チャンネル層、AlN スペーサ層及び AlGaIn 障壁層は UID 層となっている。

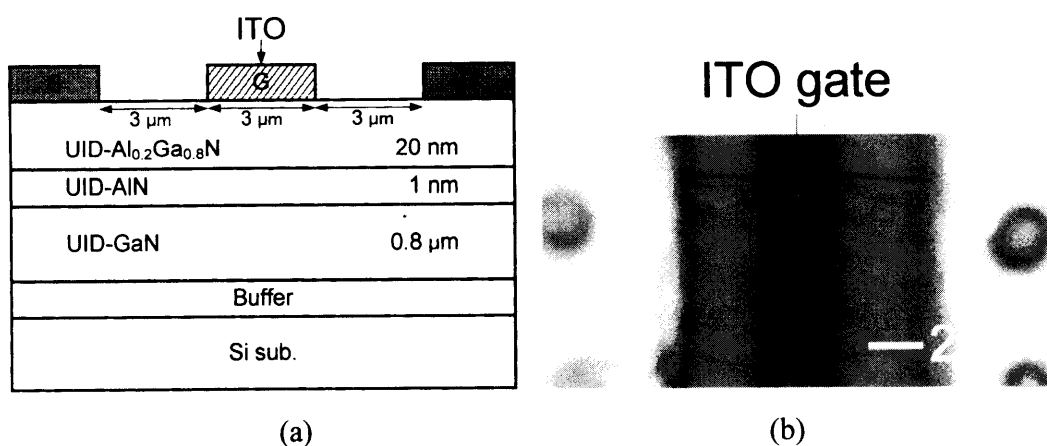


図 3.1(a) 透明ゲート AlGaN/GaN HEMT の断面構造 (b) デバイスの表面写真

透明ゲート HEMT の作製手順は、ゲート形成部を除いて 2.2.1 節で述べたものと同様である。図 3.2 にそのプロセスフローを示す。RIE 装置により、素子間分離を行った(図 3.2 (a))。表面の AlGaN 層から GaN のチャネル層にかけて 180 nm エッチングを行った。エッチングガスには BCl_3 を用いた。Ti/Al/Ni/Au の蒸着、リフトオフによりオーミック電極を形成した後、 N_2 雰囲気中で 850°C 、30 秒の RTA を行った(図 3.2 (b))。最後に、高周波スパッタリング装置(キヤノンアネルバ E-200S)により、ITO を形成した(図 3.2 (c))。表 3.1 に、ITO 成膜に用いた条件を示す。成膜した ITO の膜厚は 60 nm である。

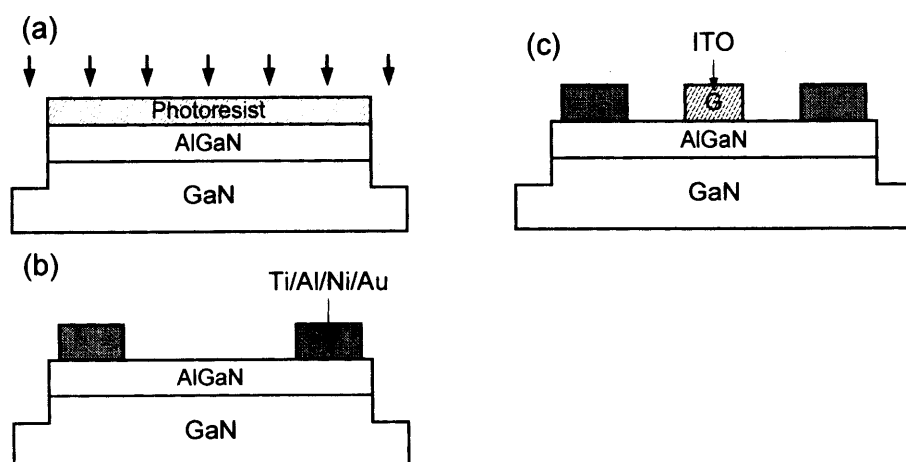


図 3.2 透明ゲート AlGaN/GaN HEMT のプロセスフロー

表 3.1 ITO 膜の成膜条件

ターゲット	ITO ($\text{In}_2\text{O}_3 : \text{SnO}_2 = 90 : 10 \text{ wt.}\%$)
基板温度	R.T.
導入ガス	Ar+O ₂
スパッタガス圧 [Pa]	0.5
O ₂ 流量比 [%]	2.5
T/S [mm]	100

3.2.2 ITO ゲート

透過強度測定をおこなうために、ガラス基板上に ITO を成膜した。測定に用いたガラス基板は、板厚 0.5 mm 両面研磨の合成石英基板上で、80%以上の透過波長範囲が 180~2000 nm を示すものである。ITO 膜の透過率は、ガラス基板上に成膜した試料のデータから、ガラス基板の測定結果を除くことで算出した。図 3.3 にトランジスタのゲート部に用いた厚さ 60 nm の ITO の透過率を示す。1000 nm から 380 nm にかけて波長が短くなるにつれて、ITO の透過率が徐々に減少している。さらに、380 nm より短波長になると透過率の減少量がより大きくなった。しかし、今回用いた ITO 膜は紫外領域である 200 nm から 380 nm にかけても、ある程度の透過率を保っている。例えば、360 nm における ITO の透過率は 61%である。このような高い透過率によって、図 3.1(b)に示したデバイス表面写真のように、明瞭にゲート下の領域が観察できるデバイスを実現できていると考えている。また、今回着目する AlGaN/GaN HEMT の発光波長は、500 nm から 950 nm の可視光領域の広い範囲にわたって分布していることが知られている[19], [20]。図 3.3 に示すように、500 nm から 950 nm の波長範囲において、今回用いた ITO 膜は、77%以上の透過率を有していることがわかる。従って、一般的な金属ゲート構造の場合にはそのゲート電極によって隠されているかもしれないゲート電極下の発光を今回の透明ゲート構造を用いることで観察できると考えている。

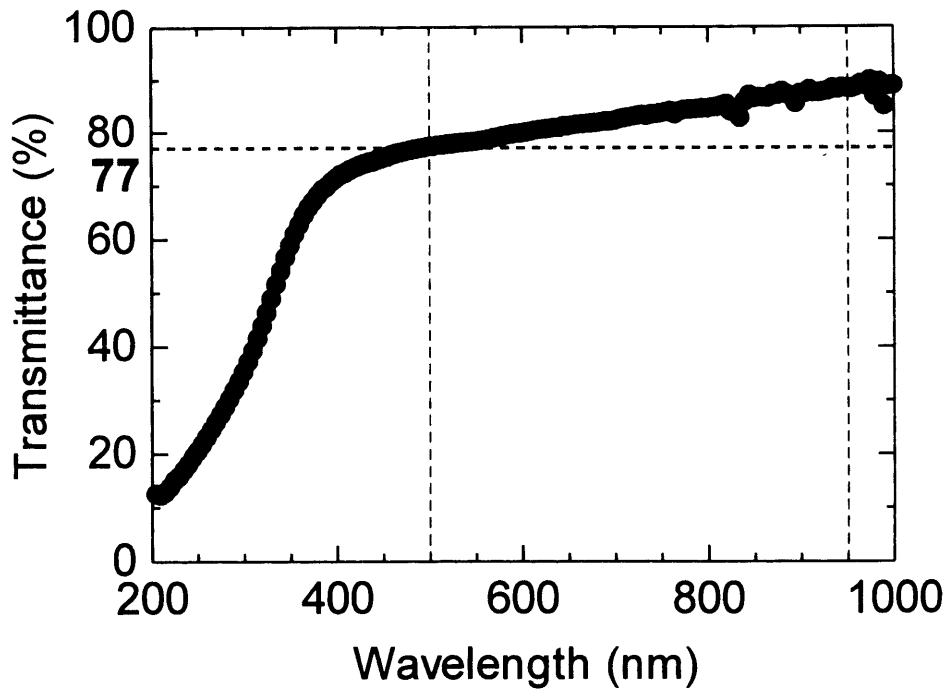


図 3.3 ITO 膜の透過率特性

4 端子測定により、ITO 電極の抵抗率を測定した。抵抗率を ρ 、電極長 L 、電極幅 w 、金属の厚さ t とすると、抵抗 R は次式で与えられる。

$$R = \rho \frac{L}{wt} \quad (3.1)$$

測定に用いたパターンは電極長 $L = 1000 \mu\text{m}$ 、電極幅 $w = 5 \mu\text{m}$ である。また、ITO の膜厚は $t = 60 \text{ nm}$ である。(3.1)式より得られた ITO の抵抗率は、 $5 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}$ であった。

3.2.3 デバイス特性

図 3.4 に ITO ゲート HEMT の I_d - V_d 特性を示す。代表的な DC 特性は、飽和ドレイン電流が 215 mA/mm である。図 3.5 に $V_{ds} = 6 \text{ V}$ におけるデバイスの伝達特性を示す。しきい値電圧は図 3.5 に示すように伝達特性のリニア・プロットから直線を外掃することで定義し、 -1.8 V である。最大相互コンダクタンスは 110 mS/mm である。

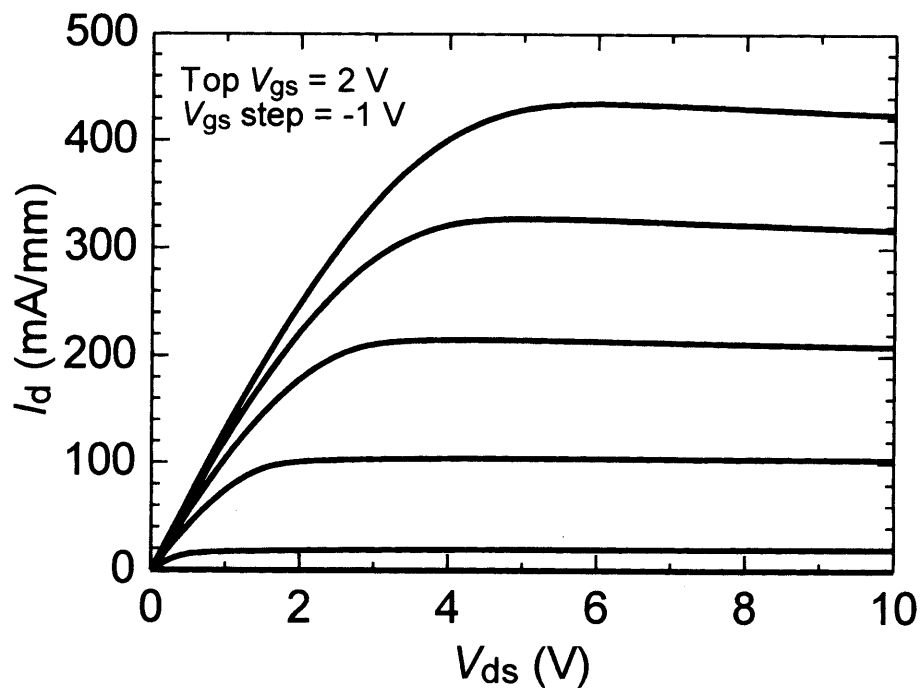


図 3.4 ITO ゲート AlGaIn/GaN HEMT の I - V 特性

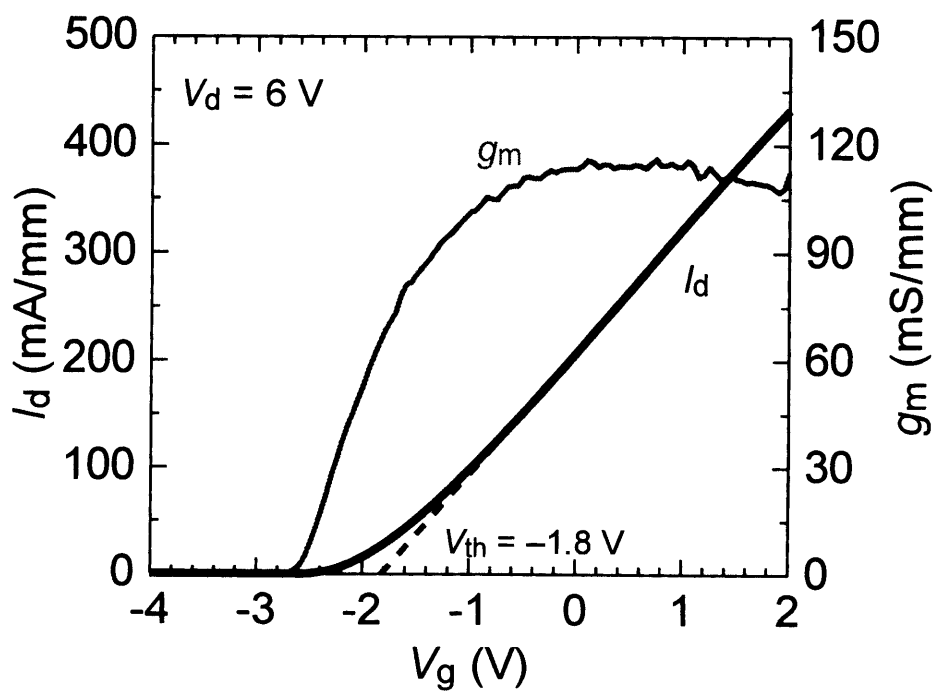
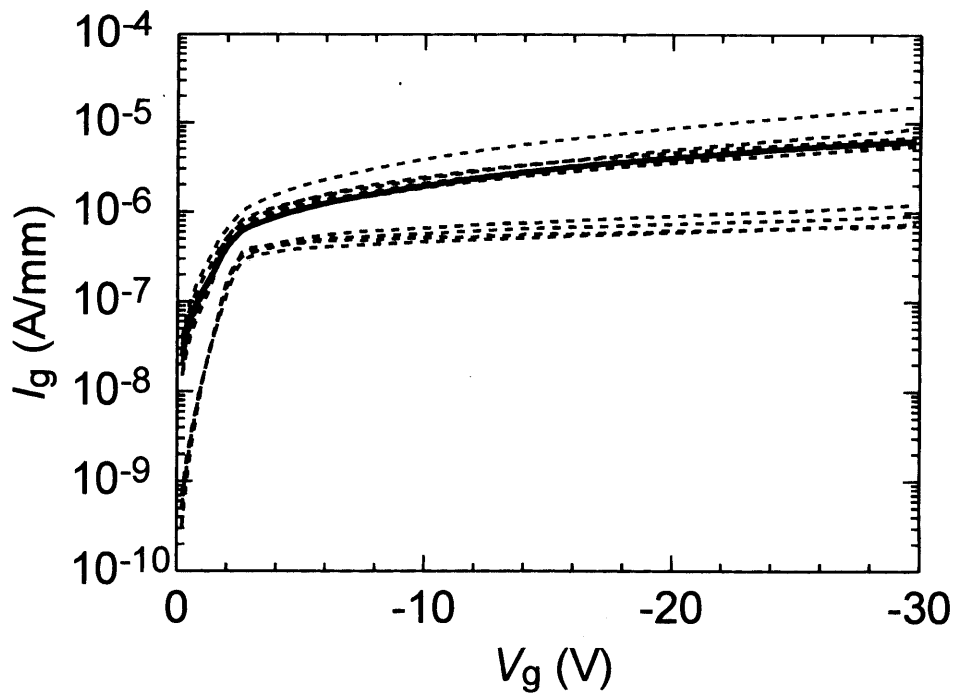


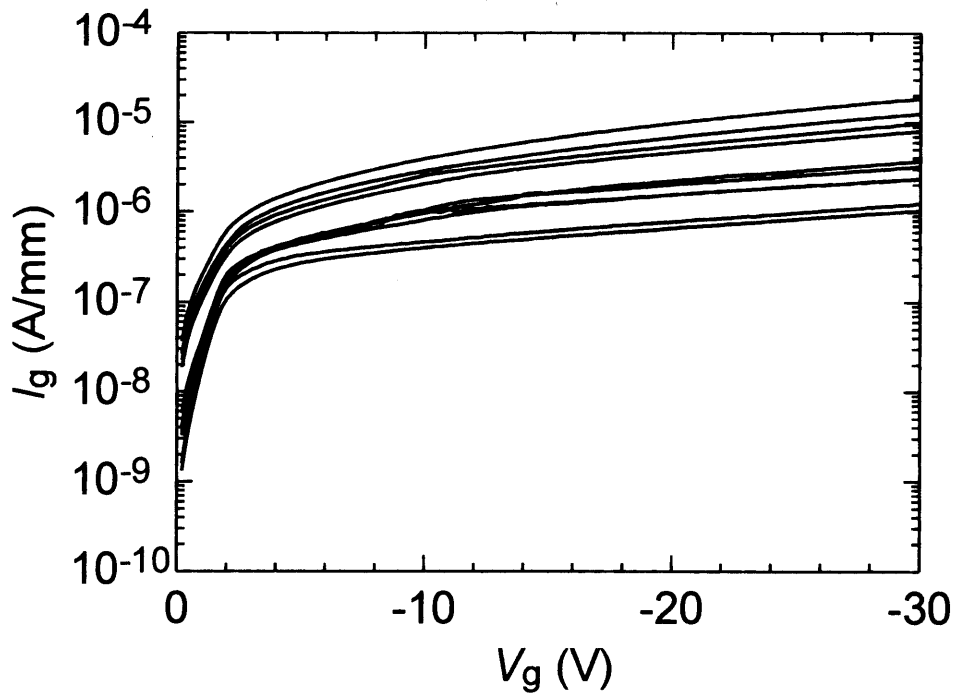
図 3.5 ITO ゲート AlGaIn/GaN HEMT の伝達特性

図 3.6 に ITO ゲート HEMT 及びに Pd/Ti/Au ゲート HEMT の逆方向ゲートリーク電流を示す。両デバイスともに 1 桁以上の逆方向ゲートリーク電流のばらつきが見られた。 $V_g = -30$ V におけるゲートリーク電流は 10^{-6} A/mm から 10^{-5} A/mm であった。今回作製した ITO ゲート HEMT におけるリーク電流は、金属ゲート HEMT と遜色のないものであることが分かった。

図 3.7 に 3 端子オフ特性の一例を示す。今回、ドレイン電流が 1 mA/mm に達した場合のソースドレイン間電圧を耐圧と定義する。ゲート電圧を -10 V に固定して測定を行った。今回用いた素子の耐圧は 200 V である。ドレイン電圧が 60 V より小さい低電圧領域では、ゲートリーク電流が支配的である。また、ドレイン電圧が 60 V より大きい高電圧領域では、ドレインリーク電流が支配的である。高電圧側では、バッファ層を介してのリーク電流及び基板側に流れるリーク電流の増加によってドレインリーク電流が支配的になったと考えられる。



(a)



(b)

図 3.6(a) ITO ゲートトランジスタの 2 端子ゲートリーク電流 ($n = 10$)

太線は図 3.7 に示す発光観察素子を示す。

(b) Pd/Ti/Au ゲートトランジスタの 2 端子ゲートリーク電流 ($n = 10$)

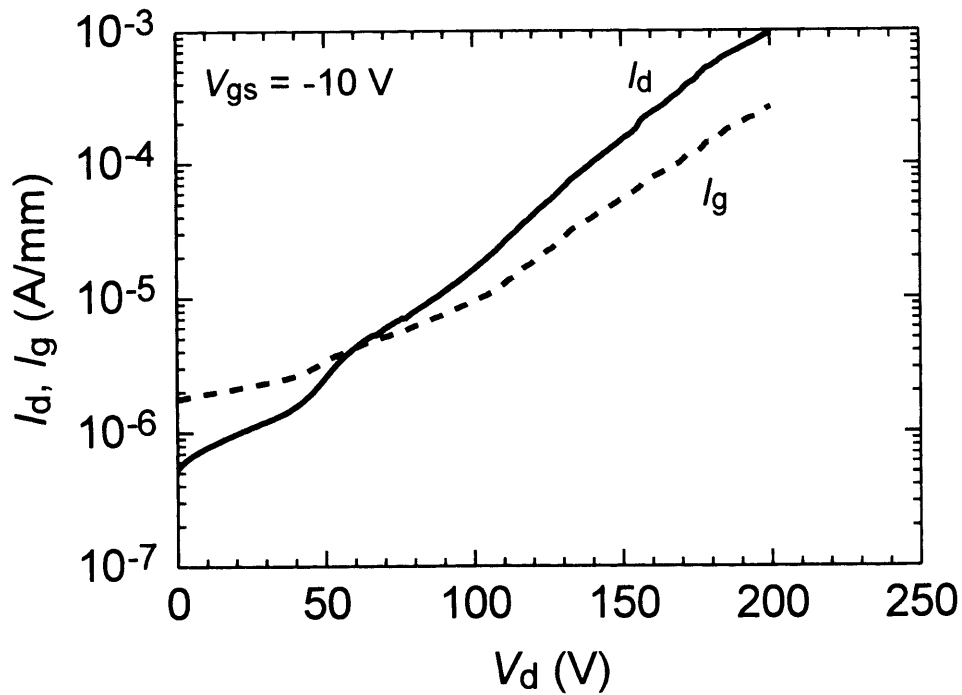


図 3.7.3 端子オフ耐圧特性

3.3 局所ゲートリーク箇所の特定制法

3.3.1 ゲート電極下からの局所発光

発光観察には、2.3.1 節に示したエミッション顕微鏡(PHEMOS-1000)を用いた。発光解析による局所ゲートリークの可視化を行うためには、発光の正確な位置を特定することが求められる。今回、CCD の空間分解能を考慮し、発光の位置を特定するためにゲート幅が数 μm の素子を測定に用いた。数 μm のゲート幅を有する素子では、発光が生じた場合に、それがゲート電極の中で生じているのかゲート端で生じているのかを特定可能であると考えている。

一般的に、EL 強度はリーク電流の増加に伴い強くなることが知られている [5]–[7]。したがって、 $V_g = -30 \text{ V}$ において、 $6 \times 10^{-6} \text{ A/mm}$ の比較的高いゲートリーク電流を示した素子(図 3.6(a)の太線)を EL 観察に用いた。

図 3.8 に透明ゲート AlGaIn/GaN HEMT の表面からの EL 像を示す。EL 観察は、 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -10 \text{ V}$ を印加したピンチオフ状態で行った。ITO ゲート電極を

通して、スポット状の EL を捉えた。発光を観察したゲート電極部は、通常、金属で覆われており、発光が観察されていなかった箇所である。このことから、ITO ゲート構造は、基板構造に依らず AlGaIn/GaN HEMT の発光解析に有効であるといえる。

金属ゲート HEMT のピンチオフ状態における EL 観察において、ゲート端でスポット状の EL が生じることが知られている[8], [12]–[15]。図 3.8 の EL 像を考えると、スポット発光の起点がゲートの端にあるのではなく、ゲート電極の下に発光の基点があり、そこから広がった発光のうちゲートの電極の横から漏れた光のみを観察している可能性が有ることを示唆している。

また、ゲート電極下における発光を観察した素子について、高電界に起因する電極端発光が観察されるのかを検討するために、 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -2 \text{ V}$ のオン状態での発光観察を行い、図 3.9 に EL 分布を示す。発光は、ゲートのドレイン端に生じた。ゲートのドレイン端では、電界が最大となることから高電界に由来するホットエレクトロンによる発光を観察したものだと考えている。オン状態でのゲートのドレイン端発光は、金属ゲートを有する構造における報告と一致する[21]–[24]。

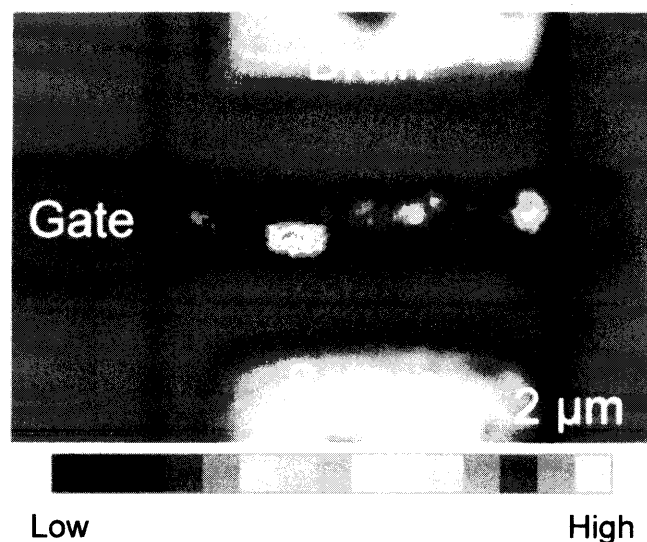


図 3.8 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -10 \text{ V}$ 印加時における
透明ゲート AlGaIn/GaN HEMT の EL 分布の疑似カラー像

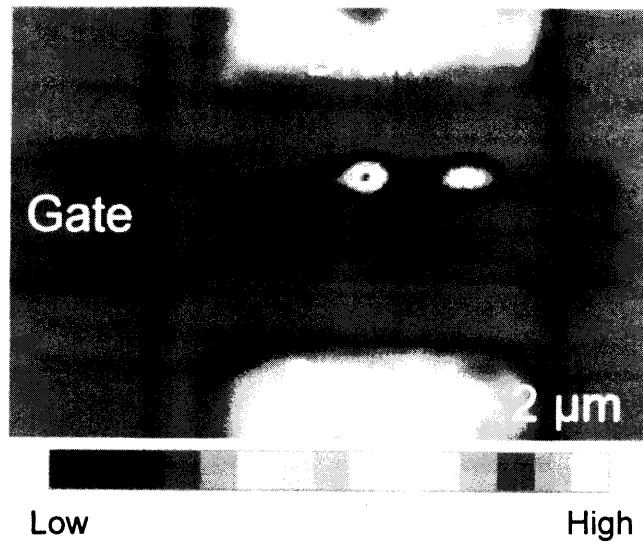


図 3.9 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -2 \text{ V}$ 印加時における
透明ゲート AlGaIn/GaN HEMT の EL 分布の疑似カラー像

3.3.2 ゲート下局所発光とゲートリークの関係

ゲート電極を通して観察されたスポット状の EL がゲートリーク電流と相関があるのかを検討するために、図 3.8、3.9 において発光観察を行った素子と比較しゲートリーク電流の小さい素子の発光観察を行い、その強度を比較した。比較には、 $V_g = -30 \text{ V}$ において、 $9 \times 10^{-7} \text{ A/mm}$ のゲートリーク電流を示した素子を用いた。

図 3.10 に EL 分布を示す。図 3.8 と同様、ゲート電極を通してスポット状の発光を観察した。また、図 3.8 と図 3.10 に示した発光像のソース電極からドレイン電極における単位時間当たりの発光強度分布を図 3.11 に示す。発光強度はゲート幅方向のカウント数を積算して求めた。図 3.11 から、ゲートリーク電流値の大きな素子は小さな素子と比較するとおおむね発光強度が大きいことがわかる。ピークの発光強度を見るとゲートリークの大きな素子で $7.9 \times 10^3 \text{ counts/s}$ 、小さな素子では $6.5 \times 10^3 \text{ counts/s}$ であった。また、ソースからドレイン電極端にかけて積算した発光強度は、ゲートリークの大きい素子が 33% 大きな値を示した。

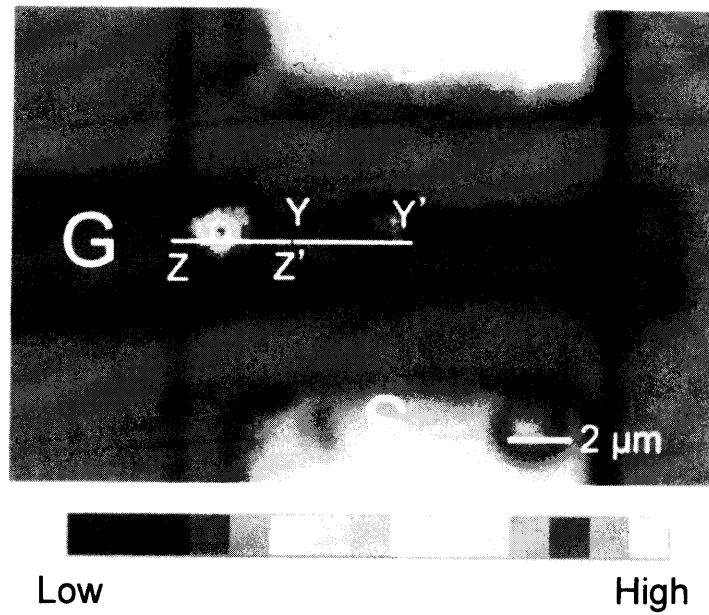


図 3.10 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -10 \text{ V}$ 印加時における
透明ゲート AlGaIn/GaN HEMT の EL 分布の疑似カラー像

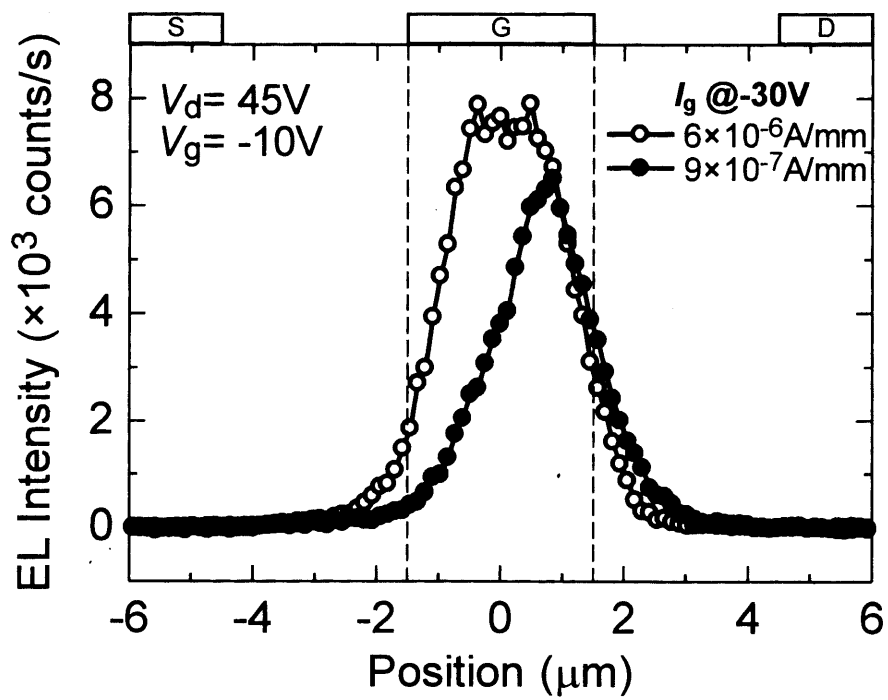


図 3.11 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -10 \text{ V}$ 印加時におけるゲートリーク値の異なる 2 素子
間のソースドレイン電極間発光強度分布

発光強度は、ゲート電極の中央付近でピークを持ちソース電極及びドレイン電極端に向かって徐々に減少していく傾向を示した。この結果は、観察された発光がゲート幅に対して優位な大きさを有していることと発光の主要因と考えられる欠陥や転位がゲート電極下で不均一に分布していることを考えると妥当な結果であるといえる。また、両デバイスともにゲート電極部から外れた発光が観察された。ゲートリーク電極の大きな素子に着目すると、ゲート電極端から漏れた発光強度は、総発光強度の 11%であった。この結果より、ゲート電極端からのスポット発光を観察した場合には、ゲート電極下に発光の大部分が隠れている可能性がある。このことは、発光の定量解析にむけてゲート電極下を含めた領域を観察することの重要性を示唆するものである。

3.4 局所発光箇所 の構造評価

初めに、ゲート電極下で見られた発光が結晶の欠陥によるものかを検討するために、カソードルミネッセンス(Cathode luminescence : CL)測定を行った。EL 発光像、発光近傍の表面 SEM および CL 像を図 3.12 に示す。発光測定素子のデバイス寸法は、 $L_{gs} = 4.7 \mu\text{m}$ 、 $L_g = 5.7 \mu\text{m}$ 、 $L_{gd} = 5.7 \mu\text{m}$ である。発光観察は、 $V_{ds} = 30 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -5 \text{ V}$ のピンチオフ状態で行った。3 端子動作時のゲートリーク電流は $-9 \times 10^{-6} \text{ A/mm}$ 、ドレインリーク電流は $6 \times 10^{-6} \text{ A/mm}$ であり、ショットキーリーク電流が支配的である。これは、図 3.7 に示したように素子耐圧である 200 V に対して、十分に低い(1/4 未満)ドレイン電圧を印加した状態での評価であることから説明できる。CL 像から、金属で覆われているオーミック電極部と異なり、ITO ゲート電極を通して電極下の結晶情報を得られていることがわかる。表面 CL より見られる暗点は転位を反映している。アクセス領域の AlGaIn 層および ITO ゲート電極下において高密度の暗点がみられた。各々の暗転を区別することができず転位密度は算出できなかった。発光が生じた箇所とその近傍では暗点の分布の仕方に顕著な違いが見られなかった。このことから、表面 CL 像

から、スポット状の EL と電極下のエピタキシャル層の転位との明確な相関を得ることができなかった。

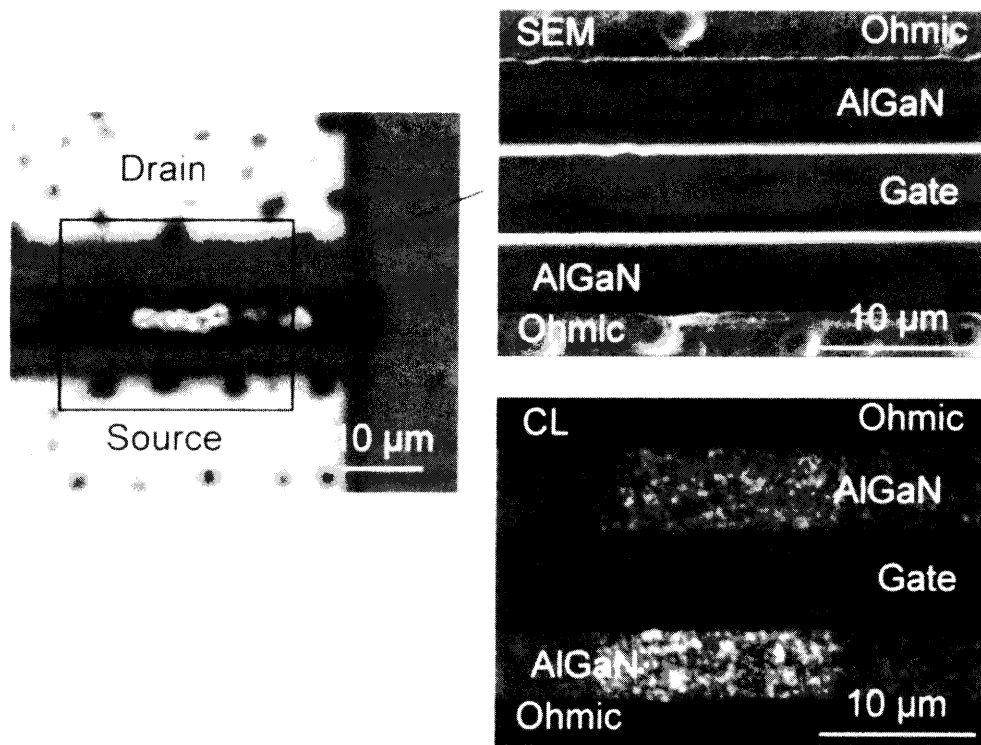


図 3.12 発光近傍の表面 SEM 像および CL 像

ゲート電極下で見られた発光下の結晶構造を詳細に調べるために、断面 STEM 観察を用いた結晶構造と発光の関連付けを行った。局所リーク箇所を同定するために発光観察をおこなった。観察には、 $V_g = -10 \text{ V}$ において $2.0 \times 10^{-6} \text{ A/mm}$ を示した素子を評価に用いた。観察に用いた素子は、平均のゲートリーク電流である $1.4 \times 10^{-6} \text{ A/mm}$ より、若干高いゲートリークを示すものである。これは、ゲートリーク電流値の大きな素子はより発光が明瞭に観察でき、観察を行う箇所同定に向くものであるからである。

図 3.13 に $V_{ds} = 45 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -6 \text{ V}$ 印加における EL 分布及びソース電極からドレイン電極における発光分布を示す。また、 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ における $V_{gs} - I_d, I_g$ 特性を図 3.14 に示す。 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ 、 $V_{gs} = -6 \text{ V}$ 印加において、ゲートリーク電流は $-4 \times 10^{-6} \text{ A/mm}$ 、ドレインリーク電流は $3 \times 10^{-6} \text{ A/mm}$ であり、図 3.12 と同様にシ

ショットキーリーク電流が支配的である。図 3.8、3.10 と同様、ゲート電極を通してスポット状の発光を観察した。図 3.13(b)より、ゲート電極を通して観察した発光は、ゲート電極の中央付近でピークを持ちソース電極及びドレイン電極端に向かって徐々に減少していく傾向を示した。この結果は、図 3.11 に示した高リーク電流を示した素子の発光分布と一致する。3.3.2 で述べたように、このような不均一に分布する発光箇所の下のエピタキシャル層には転位や点欠陥などの結晶学的な欠陥があるのではないかと予想している。

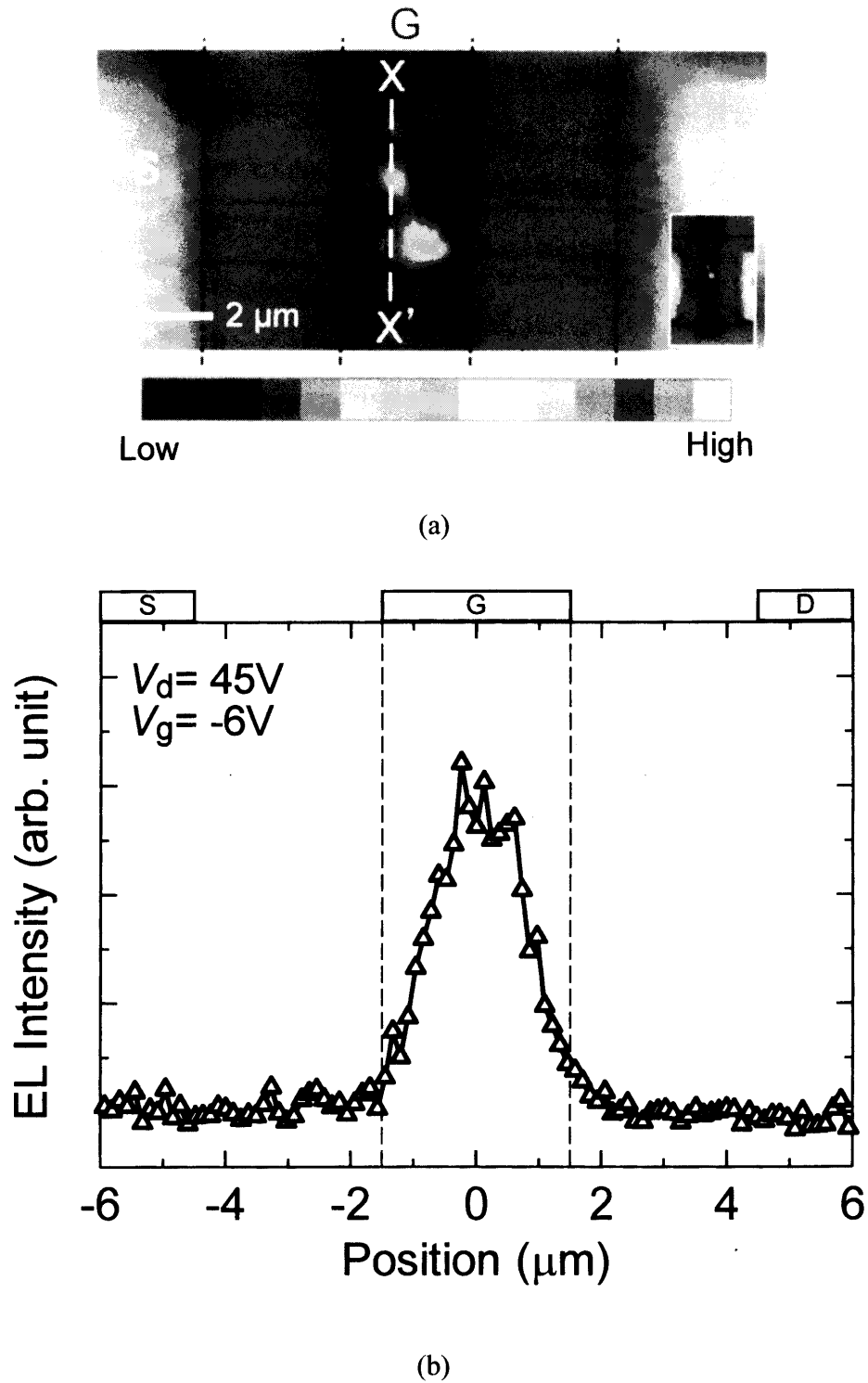


図 3.13(a) $V_{ds} = 45\text{ V}$ 、 $V_{gs} = -6\text{ V}$ 印加時における透明ゲート AlGaIn/GaN HEMT の
(a) EL 分布の疑似カラー像および(b) ソースドレイン電極間発光強度分布

図 3.13(a)の挿入図は、15 μm 素子の EL 分布全体図を示す。

図 3.13(a)の点線(X-X')は、図 3.15 における STEM 断面観察箇所を示す。

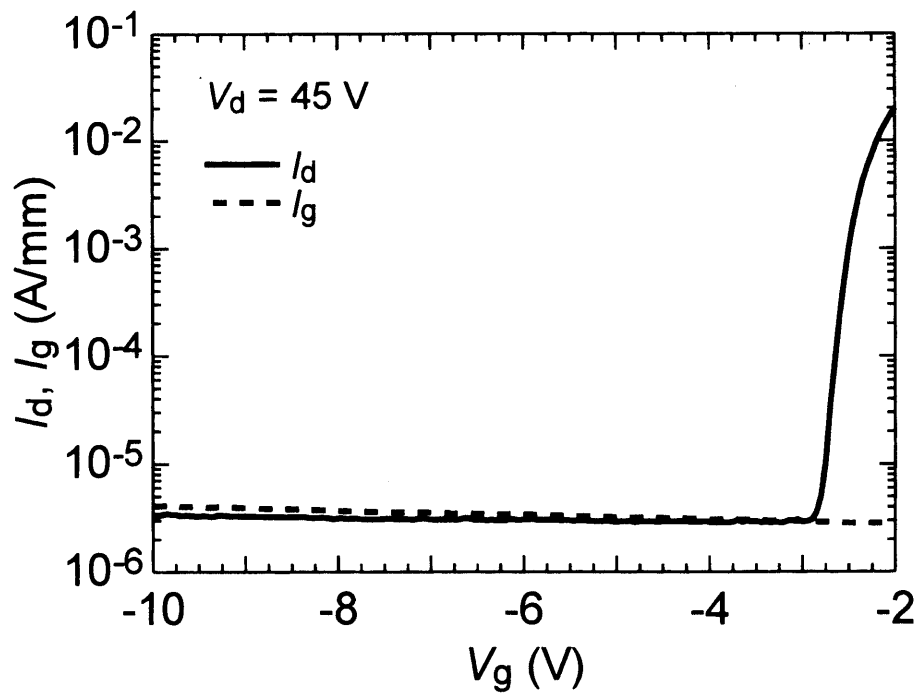


図 3.14 $V_{ds} = 45 \text{ V}$ における $V_{gs} - I_d, I_g$ 特性

観察試料作製において、局所リークを引き起こしている発光箇所を精度よく加工する技術が求められる。今回、集束イオンビーム(FIB)マイクロサンプリング法を用いることで、これを実現した[25]。さらに、STEM 観察試料作成時に観察すべき箇所を絞り込むためには、2.3.1 で述べたサブミクロンの分解能を持つ発光観察装置による場所の同定が重要である。STEM 観察には、球面収差補正機能を搭載した走査透過電子顕微鏡である HD-2700 (日立ハイテクノロジーズ製)を用いた。加速電圧は 200 kV である。観察試料は、集束イオンビーム装置である FB-2100(日立ハイテクノロジーズ製)を用いて、断面方向に 200 nm の厚さに加工した。FIB による加工でのサンプル表面へのダメージ低減のため、半導体表面にカーボン及びタングステンの保護膜を堆積した。

図 3.15 に、図 3.13 の点線(X-X')に示した箇所の断面明視野 STEM 像および EL 強度分布を示す。図 3.15(a)に示すように、EL 強度が最も強く現れた箇所の SLS バッファ層において、v 字のコントラストが明瞭に観察された。さらに、図 3.13 で観察された発光分布と v 字のコントラストはよく一致することがわかる。図

3.15(a)のv字のコントラスト領域の底部において、比較的厚い暗コントラストの層を観察した。これは、島状成長の一種と考えられる不均一なエピタキシャル成長がその箇所で生じていることだと考えられる。観察した不均一なエピタキシャル成長は窒化物半導体の成長のどの箇所においても引き起こされると思われるが、短周期構造を有する SLS 層においてその成長が生じたため、明確に観察されたものだと考えている。v字のコントラストが観察された箇所のギャップは約 40 nm であった。v字のコントラストにおける不均一なエピタキシャル成長が観察された箇所の SLS 層のペア数と不均一なエピタキシャル成長が観察されなかった箇所の SLS 層のペア数は同じである。

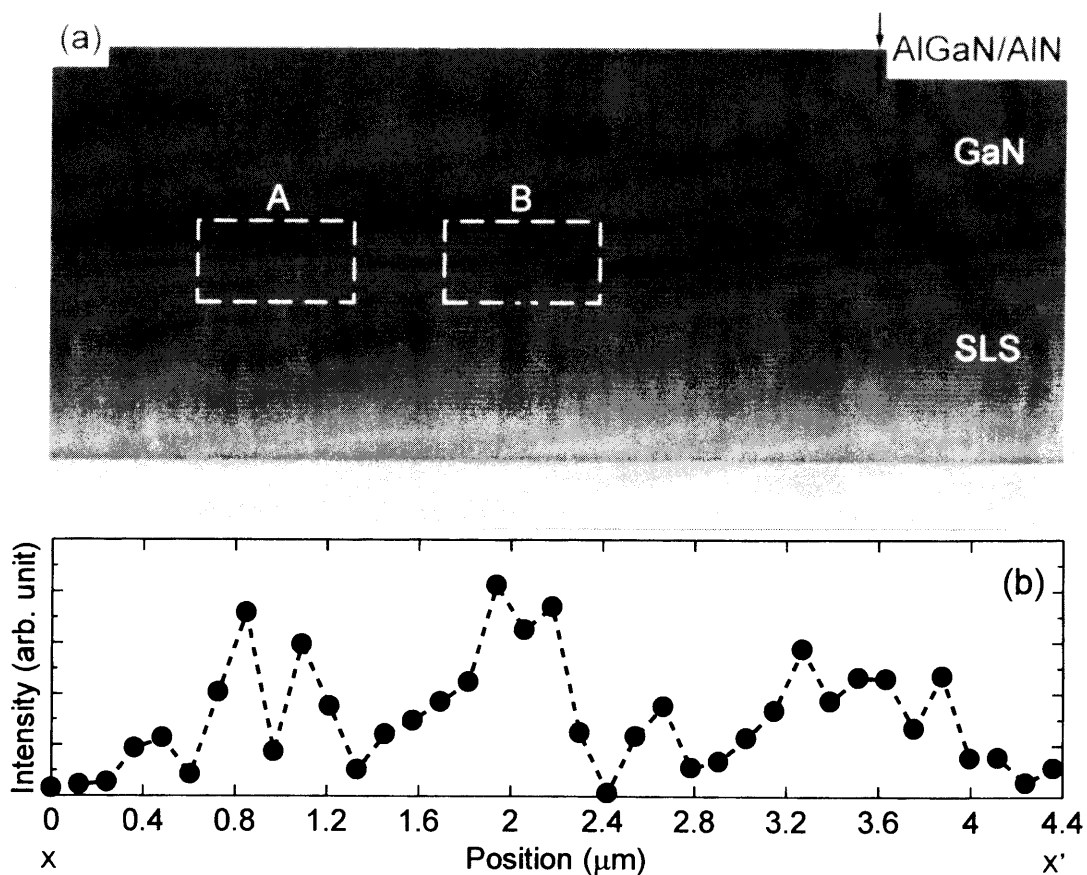


図 3.15 図 3.13 の点線(X-X')に示した箇所の(a) 断面明視野 STEM 像
(b) EL 強度分布

今回観察した発光と結晶構造の関係は、高バイアス印加時にゲート端に沿って現れる EL スポット箇所で AlGaIn 表面に形成される v 字ピットとは異なる結果である[8], [12]–[14]。これは、観察した v 字の領域がエピタキシャル成長時に生じたものであることから支持されるものである。また、v 字のコントラストが観察された位置を考慮すると、Si 基板上の GaN 成長の初期段階において生じる Si のメルトバックエッチングとは異なる現象である[26]。

v 字の領域は、図 3.15 の赤矢印で示した転位が集中していると思われる暗コントラストから生じているように思われる。このことから、転位と発光には関係があるように思われる。しかしながら、AlGaIn 層において広範囲にわたり転位が生じているにもかかわらず、AlGaIn 表面にまで達している転位と EL スポットに明確な相関を得ることができていない。図 3.15(a)、(b)において、最も強い発光を観察した (領域 b)箇所の AlGaIn 層をみると、はっきりと判別できる転位を見出すことができないことから支持されたと考えている。この結果は、図 3.12 に示した CL の結果と概ね一致する傾向であった。

今回観察した発光と結晶構造の相関が妥当であるかを検討するために、図 3.10 に示した発光箇所が判別できる素子で同様に断面 STEM 観察を行った。図 3.16 に、図 3.10 の点線(Y-Y')に示した箇所の断面明視野 STEM 像および EL 強度分布を示す。また、図 3.17 に、図 3.10 の点線(Z-Z')に示した箇所の断面明視野 STEM 像および EL 強度分布を示す。図 3.16(a)の点線部において、図 3.15 と同様に発光分布と一致するような v 字のコントラストが明確に観察された。一方で、図 3.17 では、図 3.15、3.16 とは異なり v 字のコントラストは確殺されていない。図 3.17 では、発光強度の強い箇所は、赤矢印で示した SLS 層から表面の AlGaIn 層に至るまで伸びた転位の箇所と一致している。また、AlGaIn 層まで達している転位は赤矢印で示した箇所以外にも確認できる。図 3.17(c)から、転位の起点となる箇所では図 3.15、3.16 と同様に、SLS 層において不均一なエピタキシャル成長が生じていることがわかる。これらの結果から、ゲート電極を通して観

察したスポット発光箇所は、AlGa_N 層に生じる転位ではなく、表面より深く離れた箇所で生じる不均一なエピタキシャル成長またはその後に成長されるエピタキシャル層に起因していると考えられる。今回観察した欠陥が生じた箇所は、AlGa_N/Ga_N 界面に生じる 2 次元電子ガスチャネル層から大きな隔たりがある。不均一なエピタキシャル成長層が AlGa_N 層に至るまで、ゲートリーク電流を生じるようなパスが存在し、AlGa_N 層とショットキー電極界面からリーク電流が生じているのではないかと考えている。図 3.18 にその模式図を示す。

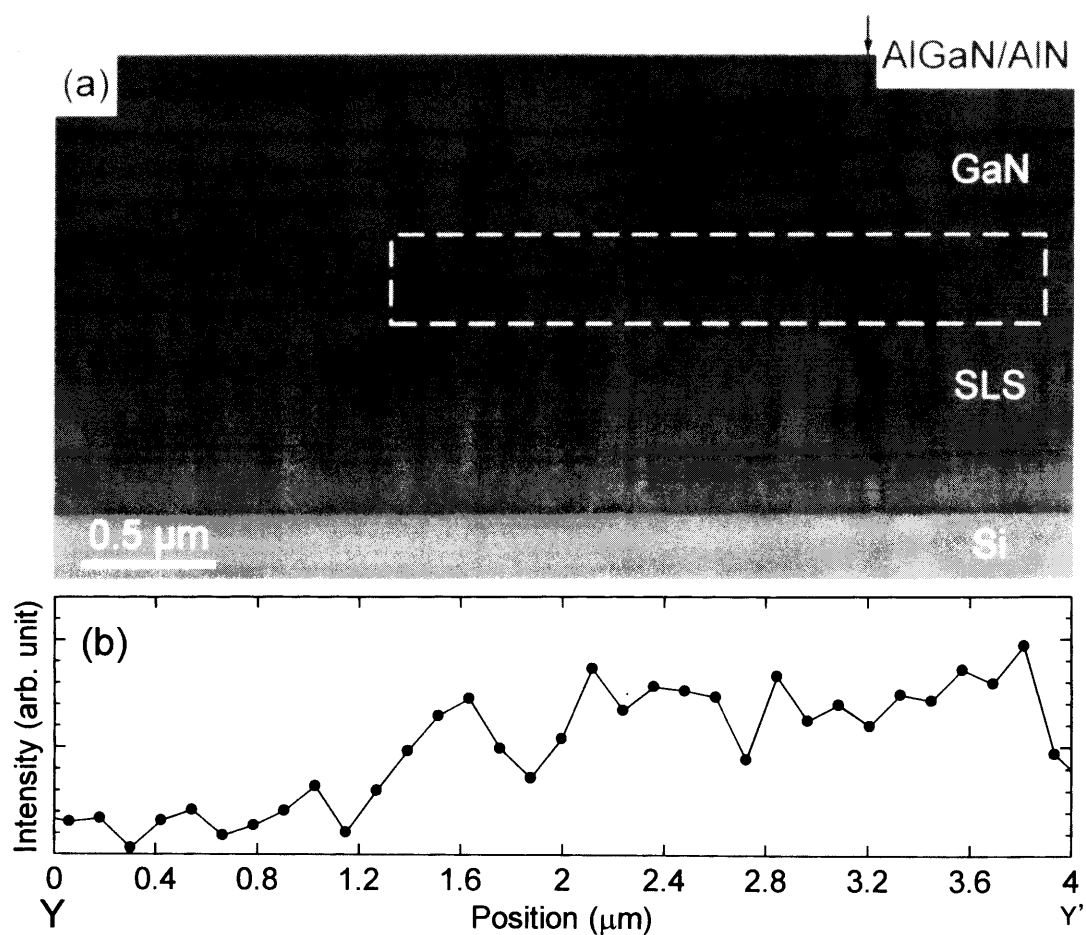


図 3.16 図 3.10 の点線(Y-Y')に示した箇所の(a) 断面明視野 STEM 像

(b) EL 強度分布

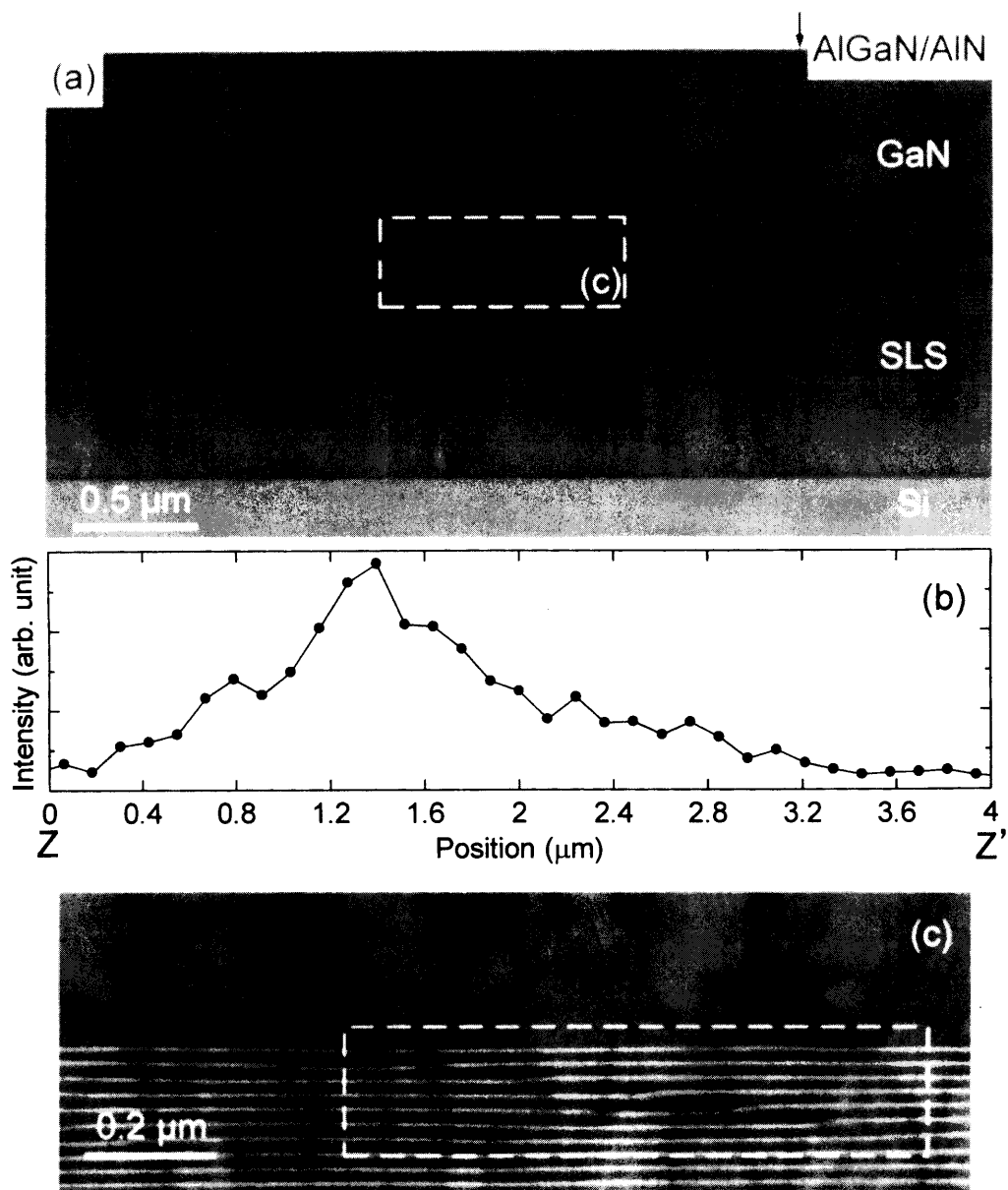


図 3.17 図 3.10 の点線(Z-Z')に示した箇所の(a) 断面明視野 STEM 像
(b) EL 強度分布 (c) GaN チャネル層/SLS の拡大

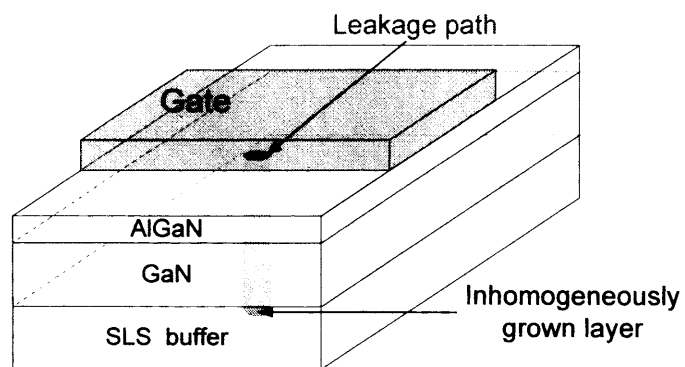


図 3.18 局所ゲートリーク発生箇所の模式図

観察した v 字の領域について、エネルギー分散型 X 線分光法(Energy-Dispersive X-ray spectroscopy : EDX)による元素分析を行った。観察領域は、 v 字領域のうち SLS と GaN チャネル層の界面(図 3.15 A)と不均一なエピタキシャル成長の基点と思われる底部(図 3.15 B)の 2 箇所で行った。図 3.19 に、図 3.15 の A、B における暗視野 STEM 像及び Al、Ga の EDX マッピングを示す。SLS 層の短周期構造に由来する明暗のコントラストが観察された。明コントラストでは、Ga 成分を多く含まれていることがわかる。また、暗コントラストでは、Al 成分が多く含まれていることがわかる。 v 字の領域をみると、図 3.19 (a)、(d)の明コントラストがその位置にあたり、Ga の信号が強くなっていることがわかる。その領域で、Al の信号が弱くなっていることがわかる。したがって、不均一なエピタキシャル成長は Ga リッチであることがわかった。

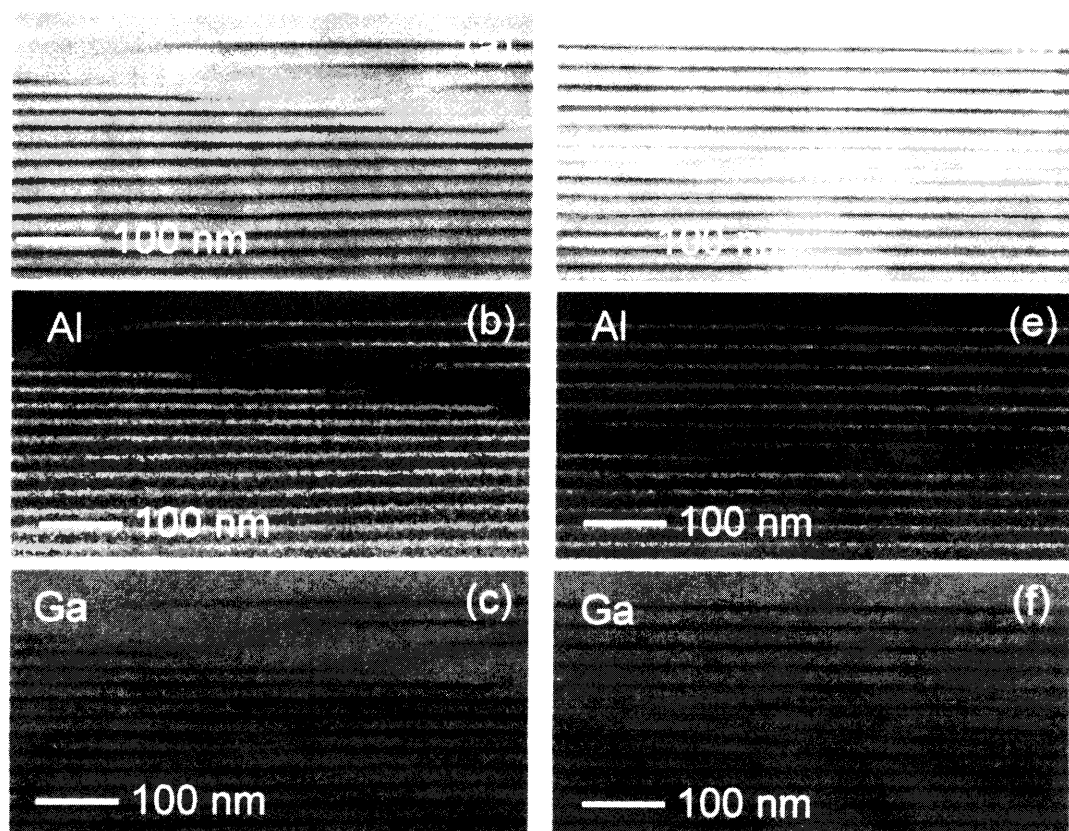


図 3.19(a) 図 3.15 の A における暗視野 STEM 像およびその箇所での(b) Al、(c) Ga の EDX 分析 (d) 図 3.15 の B における暗視野 STEM 像およびその箇所での(e) Al、(f) Ga の EDX 分析

3.5 まとめ

本章では、まずリーク電流機構の結晶学的解析を進めるのに必要となる、リーク電流発生箇所同定の手法として、ゲート電極下を含めた領域を観察可能な透明ゲート電極 AlGaIn/GaN HEMT を発光観察に適応することを試みた。また、発光解析により同定したリーク発生箇所について結晶構造評価を行った。

透明ゲート電極として、ITO を用いることを検討した。スパッタリングにより成膜した ITO は、GaN 系 HEMT からの EL で報告のある 500 nm から 950 nm の波長範囲において 77%以上の透過率を持ち、抵抗率 $5 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}$ を示した。

作製した透明ゲート(ITO)を有する AlGaIn/GaN HEMT は、飽和ドレイン電流 215 mA/mm、しきい値電圧 -1.8 V、相互コンダクタンス 110 mS/mm のノーマリオン動作を示した。また、通常の金属ゲート HEMT と遜色のない 1 桁程度 ($10^{-6} \text{ A/mm} \sim 10^{-5} \text{ A/mm}$ @ $V_g = -30 \text{ V}$)のばらつきを持つ 2 端子ゲートリーク電流を有することがわかった。

透明ゲート HEMT のオフ状態での EL 測定より、ゲート電極を通して不均一に分布するスポット上の EL を観察することに成功した。また、リーク電流値の大小が異なる素子間の発光強度の比較から、スポット上の EL 箇所が局所リーク発生箇所であることがわかった。この結果より、EL と透明ゲート技術を組み合わせるがトランジスタの局所リーク箇所の同定に有効であることが示された。

次に、局所リーク電流機構の解明につなげるために、発光箇所の結晶構造の物理解析を行った。具体的には、上記の透明ゲート及び発光解析によるゲート電極下における 1 μm 未満の箇所絞り込みをもとに FIB で試料を加工し、断面 STEM および EDX による元素分析を行った。ゲート電極部で生じた発光分布と

SLS バッファ層に観察された v 字のコントラストはよく一致した。また、v 字のコントラストにおいて、Ga リッチの不均一なエピタキシャル層の成長が含まれていることがわかった。不均一に成長された層やその箇所の上に成長されたエピタキシャル層が局所ゲートリーク発生箇所と関連していることが明らかになった。

参考文献

- [1] S. Mizuno, Y. Ohno, S. Kishimoto, K. Maezawa, and T. Mizutani, "Large Gate Leakage Current in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. Part 1, No. 8, pp. 5125–5126, Aug. 2002.
- [2] W. Saito, M. Kuraguchi, Y. Takada, K. Tsuda, I. Omura, and T. Ogura, "Influence of Surface Defect Charge at AlGaIn–GaN–HEMT Upon Schottky Gate Leakage Current and Breakdown Voltage," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 52, no. 2, pp. 159–164, Feb. 2005.
- [3] H. Zhang, E. J. Miller, and E. T. Yu, "Analysis of leakage current mechanisms in Schottky contacts to GaN and $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ /GaN grown by molecular-beam epitaxy," *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 2, pp. 023703–1–023703–6, 2006.
- [4] T. Ohki, T. Kikkawa, Y. Inoue, M. Kanamura, N. Okamoto, K. Makiyama, K. Imanishi, H. Shigematsu, K. Joshin, and N. Hara, "Reliability of GaN HEMTs: current status and future technology," in *2009 IEEE International Reliability Physics Symposium*, 2009, pp. 61–70.
- [5] E. Zanoni, F. Danesin, M. Meneghini, A. Cetronio, C. Lanzieri, M. Peroni, and G. Meneghesso, "Localized Damage in AlGaIn/GaN HEMTs Induced by Reverse-Bias Testing," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 30, no. 5, pp. 427–429, May 2009.
- [6] M. Baeumler, F. Gütle, V. Polyakov, M. Căsar, M. Dammann, H. Konstanzer, W. Pletschen, W. Bronner, R. Quay, P. Waltereit, M. Mikulla, O. Ambacher, F. Bourgeois, R. Behtash, K. J. Riepe, P. J. Wel, J. Klappe, and T. Rödle, "Investigation of Leakage Current of AlGaIn/GaN HEMTs Under Pinch-Off Condition by Electroluminescence Microscopy," *J. Electron. Mater.*, vol. 39, no. 6, pp. 756–760, Mar. 2010.
- [7] C. Hodges, N. Killat, S. W. Kaun, M. H. Wong, F. Gao, T. Palacios, U. K. Mishra, J. S. Speck, D. Wolverson, and M. Kuball, "Optical investigation of degradation mechanisms in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors: Generation of non-radiative recombination centers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 11, pp. 112106–1–112106–4, 2012.
- [8] M. Montes Bajo, C. Hodges, M. J. Uren, and M. Kuball, "On the link between electroluminescence, gate current leakage, and surface defects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors upon off-state stress," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 3, pp. 033508–1–033508–4, 2012.

- [9] J. W. P. Hsu, M. J. Manfra, R. J. Molnar, B. Heying, and J. S. Speck, "Direct imaging of reverse-bias leakage through pure screw dislocations in GaN films grown by molecular beam epitaxy on GaN templates," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 1, pp. 79–81, 2002.
- [10] A. Fontserè, A. Pérez-Tomás, M. Placidi, J. Llobet, N. Baron, S. Chenot, Y. Cordier, J. C. Moreno, V. Iglesias, M. Porti, A. Bayerl, M. Lanza, and M. Nafria, "Gate current analysis of AlGaIn/GaN on silicon heterojunction transistors at the nanoscale," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 9, pp. 093505–1–093505–4, 2012.
- [11] S. W. Kaun, M. H. Wong, S. Dasgupta, S. Choi, R. Chung, U. K. Mishra, and J. S. Speck, "Effects of threading dislocation density on the gate leakage of AlGaIn/GaN heterostructures for high electron mobility transistors," *Appl. Phys. Express*, vol. 4, no. 2, pp. 2–5, 2011.
- [12] D. A. Cullen, D. J. Smith, A. Passaseo, V. Tasco, A. Stocco, M. Meneghini, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Electroluminescence and Transmission Electron Microscopy Characterization of Reverse-Biased AlGaIn/GaN Devices," *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 13, no. 1, pp. 126–135, Mar. 2013.
- [13] N. Killat, M. Montes Bajo, T. Paskova, K. R. Evans, J. Leach, X. Li, Ü. Özgür, H. Morkoç, K. D. Chabak, A. Crespo, J. K. Gillespie, R. Fitch, M. Kossler, D. E. Walker, M. Trejo, G. D. Via, J. D. Blevins, and M. Kuball, "Reliability of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on low dislocation density bulk GaN substrate: Implications of surface step edges," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, pp. 193507–1–193507–4, 2013.
- [14] M. M. Bajo, H. Sun, M. J. Uren, and M. Kuball, "Time evolution of off-state degradation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 22, pp. 223506–1–223506–5, 2014.
- [15] M. D. Hodge, E. R. Heller, R. Vetury, and J. B. Shealy, "Analysis of Time Dependent Electric Field Degradation in AlGaIn / GaN HEMTs," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 61, no. 9, pp. 3145–3151, 2014.
- [16] Y. Pei, K. J. Vampola, Z. Chen, R. Chu, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra, "AlGaIn/GaN HEMT With a Transparent Gate Electrode," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 30, no. 5, pp. 439–441, May 2009.
- [17] T. Narita, Y. Fujimoto, A. Wakejima, and T. Egawa, "Identification of local gate leakage with electroluminescence using AlGaIn/GaN HEMTs," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 16, pp. 1162–1164, Jul. 2014.

- [18] Y. Lu, B. Li, X. Tang, Q. Jiang, S. Yang, Z. Tang, and K. J. Chen, "Normally off Al_2O_3 -AlGaIn/GaN MIS-HEMT With Transparent Gate Electrode for Gate Degradation Investigation," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 3, pp. 821–827, 2015.
- [19] N. Shigekawa, K. Shiojima, and T. Suemitsu, "Electroluminescence characterization of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 8, pp. 1196–1198, 2001.
- [20] R. Lossy, A. Glowacki, C. Boit, and J. Würfl, "Electroluminescence characterization of AlGaIn/GaN HEMTs," *Phys. status solidi*, vol. 6, no. 6, pp. 1382–1385, Jun. 2009.
- [21] N. Shigekawa, K. Shiojima, and T. Suemitsu, "Optical study of high-biased AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors," *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 1, pp. 531–535, 2002.
- [22] M. Meneghini, A. Stocco, R. Silvestri, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Degradation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors related to hot electrons," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 23, p. 233508, 2012.
- [23] F. Gütle, V. M. Polyakov, M. Baeumler, F. Benkhelifa, S. Müller, M. Dammann, M. Cäsar, R. Quay, M. Mikulla, J. Wagner, and O. Ambacher, "Radiative inter-valley transitions as a dominant emission mechanism in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 12, pp. 125003–1–125003–7, Dec. 2012.
- [24] R. J. T. Simms, F. Gao, Y. Pei, T. Palacios, U. K. Mishra, and M. Kuball, "Electric field distribution in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors investigated by electroluminescence," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 3, p. 033502, 2010.
- [25] T. Kamino, T. Yaguchi, T. Hashimoto, T. Ohnishi, and K. Umemura, "A FIB Micro-Sampling Technique and a Site Specific TEM Specimen Preparation Method," in *Introduction to Focused Ion Beams*, L. A. Giannuzzi and F. A. Stevie, Eds. New York: Springer, 2005, pp. 229–245.
- [26] S. L. Selvaraj, T. Suzue, and T. Egawa, "Influence of Deep Pits on the Breakdown of Metalorganic Chemical Vapor Deposition Grown AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors on Silicon," *Appl. Phys. Express*, vol. 2, no. 11, pp. 111005–1–111005–3, Nov. 2009.

第4章

透明ゲート電極を有する AlGaN/GaN HEMT の光応答

4.1 はじめに

AlGaN/GaN HEMT の普及を促すために、電子デバイス(高周波・スイッチング)用途以外の可能性の探求も重要であり、この一つに受光素子応用が挙げられる。

GaN は直接遷移型であり、バンドギャップが 3.4 eV 程度と波長に換算すると 365 nm であり、その紫外線を吸収することが可能であることから紫外線受光素子の開発が進められている[1]。代表的な受光素子の構造は、p-i-n ダイオード型[2]–[5]、ショットキーダイオード型[6]–[11]、および半導体–金属–半導体 (metal-semiconductor-metal : MSM)型である[12]–[17]。これらの受光素子構造のうち、2次元電子ガス層を有する MSM 型受光素子は、高電子移動度を有することやヘテロ界面への大きな電子の閉じ込めにより、高感度の受光素子が報告されてきた[18]–[24]。2次元電子ガス層を有する構造は、電子デバイスの一般的な構造と同様であるため、電子デバイスと紫外光受光素子のモノリシック集積化を実現できる可能性があり、発展性の高い構造であると考えられる[21]。

しかしながら、このような優れた特性を持つ MSM 型受光素子では、待機時の消費電力を引き起こす暗電流(リーク電流)が大きいことが問題となる。このリーク電流は受光素子としての最小受光感度やダイナミックレンジも決定することから、リーク低減を行う必要がある。受光感度の向上を目指し、Khan 等は、単純な MSM 型にかわりトランジスタ構造を用いる事を提案した[18]。この3端子 FET 構造は電流の制御性に優れおり、受光感度と暗電流抑制の両立を可能とすることが期待できる。しかしながら、ゲートに金属を用いているために表面側からの光照射を行えず、透明基板であるサファイアを使い裏面から照射したものであり、基板材料の自由度が低く実用上の大きな制限が生じる。さらに、紫

外光が透明基板やエピタキシャル層によって吸収され、期待される高い増度を損なうといった課題が生じる。

第 3 章で述べた透明ゲート電極(ITO)を有する AlGaIn/GaN HEMT は 380~800 nm の波長域で透過率 70%以上を持つことから、金属ゲート構造で問題となる表面照射や透明基板に透過させる際に生じる受光感度の低下を抑制できると考えた。さらに、表面照射を可能とし基板材料の自由度が高い高感度受光素子を実現できると考えた。そこで、透明ゲートを有する AlGaIn/GaN HEMT の受光素子応用について検討した。まず、3 端子デバイスで光応答を確認できる測定系を構成した。次に、透明ゲート電極を有する AlGaIn/GaN HEMT の光応答について検討し、紫外光照射時に電流増加と励起キャリアが発生することが期待される GaN のバンドギャップ相当の 365 nm 付近で波長選択が見られるかを検討した。予想している 2DEG に励起キャリアが生じ、その領域を輸送しているかモデルを用いることで妥当性を検討した。

4.2 透明ゲート AlGaIn/GaN HEMT を用いた紫外線受光素子

4.2.1 デバイス構造

図 4.1 に作製したデバイスの断面構造を示す。本研究で用いた AlGaIn/GaN 構造は、MOCVD 法により高抵抗 Si(111)基板上に成長させたものである。エピタキシャル構造は、厚さ 1 μm の GaN チャンネル層、厚さ 1 nm の AlN spacer 及び Al 組成 26%の厚さ 25 nm の AlGaIn 層で構成されている。ホール移動度及びシートキャリア密度は van der Pauw 法によって測定した。ホール移動度及びシートキャリア濃度は室温(300 K)で、 $1026 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、 $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ であった。このエピタキシャルウェハー上に、3.2.1 節で説明したデバイス作製プロセスに従い、透明ゲート電極を有する AlGaIn/GaN HEMT を作製した。光応答測定に用いた素子は、 $L_{\text{gs}} = 2.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $L_{\text{g}} = 3.0 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $L_{\text{gs}} = 3.5 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $W_{\text{g}} = 200 \text{ }\mu\text{m}$ である。

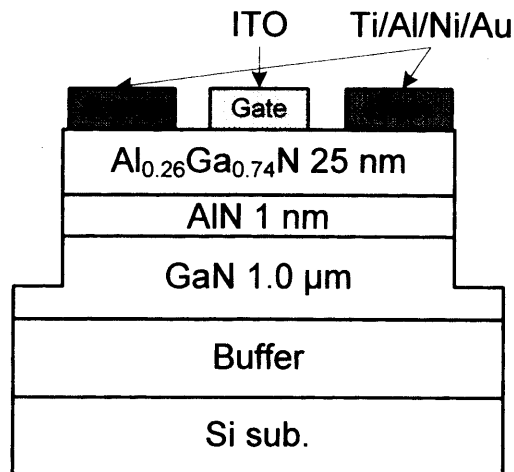


図 4.1 透明ゲート AlGaIn/GaN HEMT の断面構造図

4.2.2 光照射の測定系

光応答の測定系の外観を図 4.2 に示す。光源は、100 W キセノンランプ(朝日分光製 LAX-C100)を用いた。キセノン光源では、ランプからの連続光をミラーモジュール及びバンドパスフィルタ(半値幅 10 nm)によって波長選択を行う。バンドパスフィルタを通した出射光は、光ファイバーを通して、暗箱内のプローバ上にセットしたデバイス表面に照射される。ステージに照射される光は、300~410 nm の波長域に感度を持つ光パワーメータ(浜松ホトニクス製 C9536-01/H9958-01)を用いて測定した。暗状態において、絶対値光量は $0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ を示し、光パワーメータの最小受光強度($1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)以下であることがわかった。このことから、外乱光の影響つまりバンドパスフィルターを通した照射光以外の光の影響は無視できるほど小さいと考えた。測定では、バンドパスフィルタを通した照射光の強度がデバイス表面で $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ となるように各波長で光量の調整を行った。

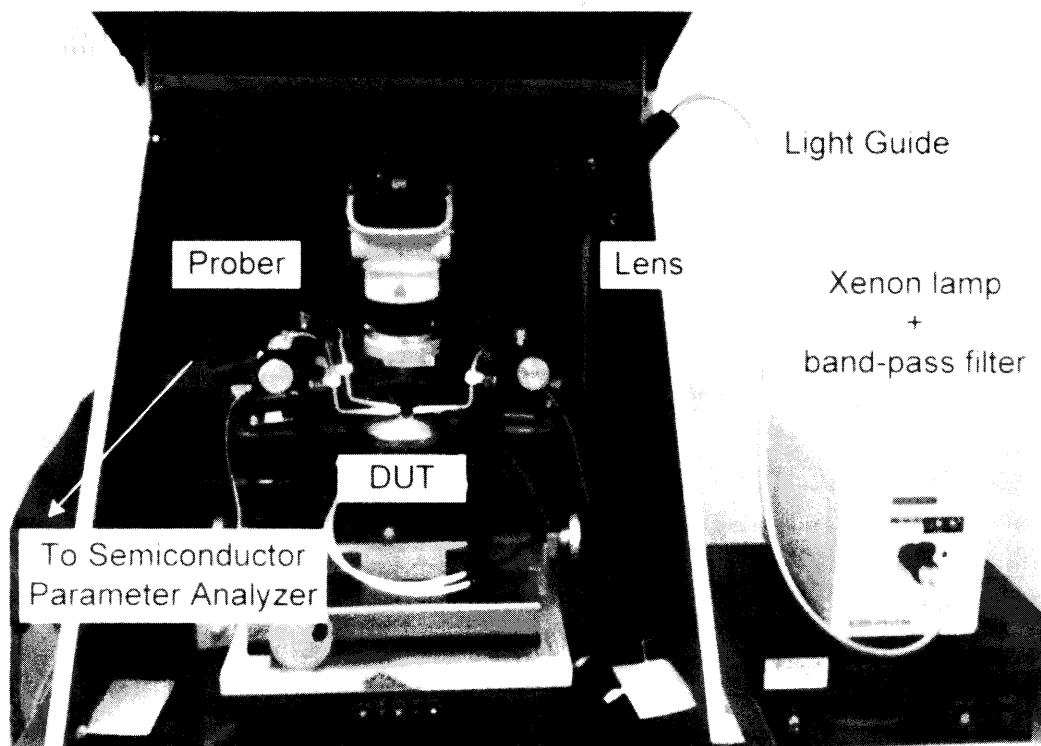


図 4.2 照射光波長依存性の測定系

4.2.3 電流電圧特性の光照射依存

ITO ゲート HEMT の暗状態及び紫外光照射時のドレイン電流電圧(I - V)特性を図 4.3 に示す。照射光は 100W キセノンランプをバンドパスフィルタにより分光した 360 nm の単色光である。紫外光照射時においてもピンチオフ特性を示した。また、紫外光照射時では暗状態と比較して大幅なドレイン電流の増加が見られた。 $V_{gs} = 2$ V において、暗状態のドレイン電流は 260 mA/mm、紫外光照射時が 290 mA/mm であり、約 10% のドレイン電流の増加が見られた。

図 4.4 に $V_{ds} = 6$ V の時の ITO ゲート HEMT の暗状態及び紫外光照射時の伝達特性を示す。紫外光照射時では閾値電圧が負方向に変動していた。紫外光照射時において、暗状態と比較して閾値電圧の変化は 0.25 V であった。暗状態及び紫外光照射時の ITO ゲート HEMT のゲート電圧に対するドレイン及びゲート電流について対数プロットした結果を図 4.5 に示す。特に、 $V_{gs} = -3.1$ V のピンチオフ状態において、2 桁以上の最も大きいドレイン電流の増加を確認した。ピン

チオフ電圧以下($V_{gs} < -3.1$ V)におけるドレインリーク電流値は暗状態で 3×10^{-6} A/mm、紫外光照射時が 5×10^{-6} A/mm でわずかに増加した。このようなわずかなリーク電流の増加は、紫外光照射時においてもアイソレーション部からの周り込みによるリーク電流といったゲート電極で制御できないキャリアの輸送は無視できるほど小さいと考えられることを示している。ピンチオフ状態において、ゲートリーク電流とドレインリーク電流を比較すると、ゲートリーク電流がわずかに大きな値を示している。このデバイスの総リーク電流の主要因であることを示しており、このリーク電流値によって受光素子としての最小受光感度やダイナミックレンジを決定される。

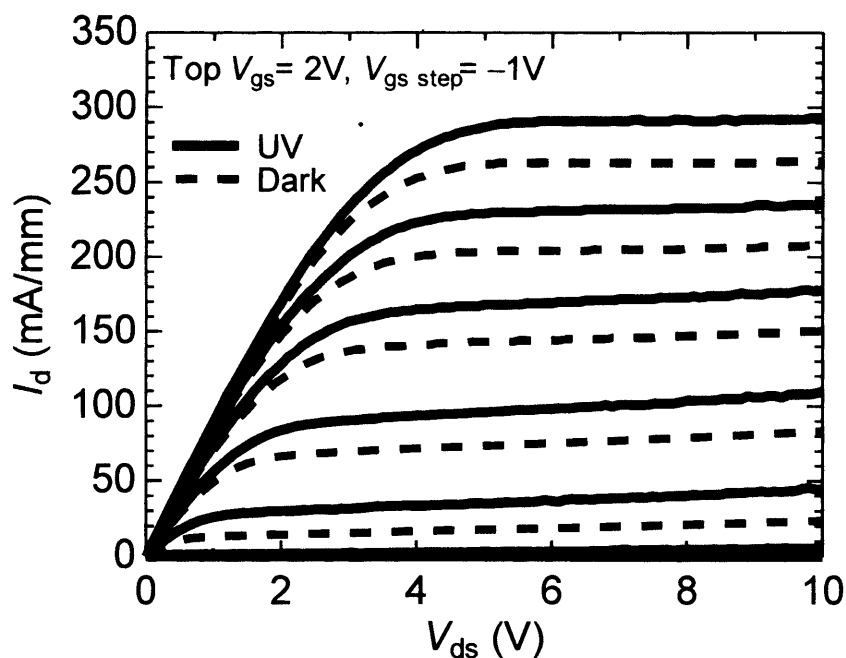


図 4.3 暗状態及び紫外光照射時(360 nm)の I_d - V_d 特性

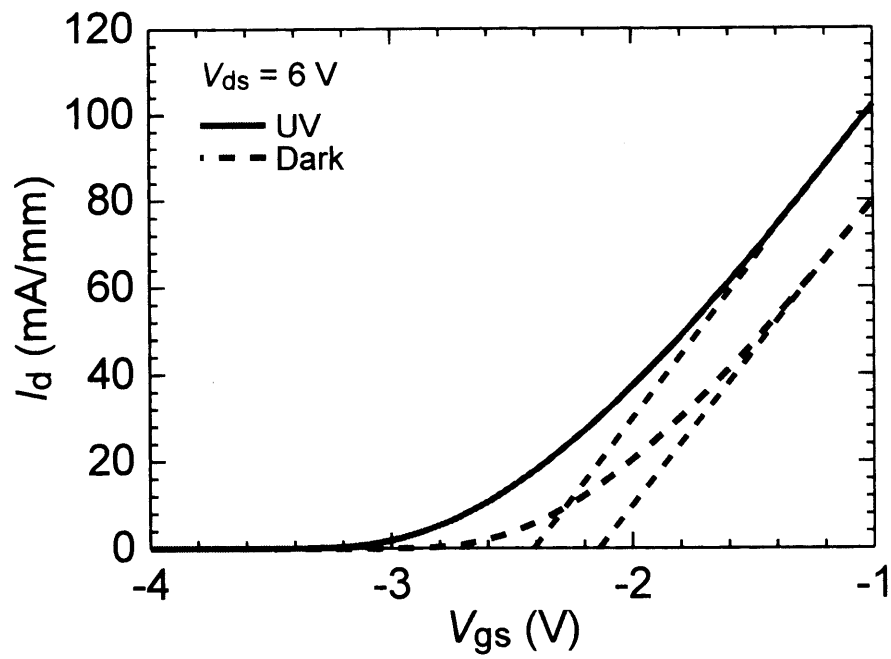


図 4.4 暗状態及び紫外光照射時(360 nm)の伝達特性

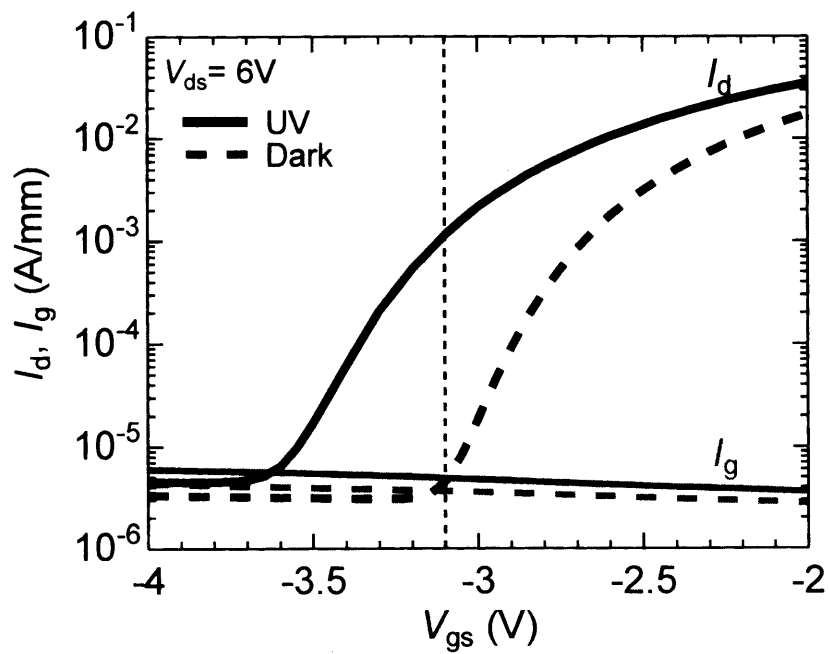


図 4.5 暗状態及び紫外光照射時(360 nm)の $V_{gs} - I_d, I_g$ 特性

4.2.4 しきい値電圧の波長依存性

図 4.4 に示したように、紫外光照射により ITO ゲート HEMT のしきい値電圧は負方向に変動している。このことは、紫外光がゲート電極を通して AlGaIn/GaN 界面に存在する 2 次元チャネル層で電子正孔対が生成され、キャリアが増加したためであると考えられる。照射光波長によるしきい値電圧の振る舞いを検討した。図 4.6 に $V_{ds} = 6 \text{ V}$ における閾値電圧の照射光波長依存性を示す。360 から 400 nm の波長域にかけて、急峻なしきい値電圧の変化が見られた。この急峻なしきい値変化が見られた波長域は、ちょうどチャネル層である GaN のバンドギャップ(365 nm)に相当している。このことから、GaN チャネル層におけるキャリア励起がしきい値電圧シフトの主要因であるといえる。360 nm より短波長の領域におけるしきい値電圧はほぼ一定であり、360 nm と比較して 300 nm におけるその変化は約 0.01 V であった。

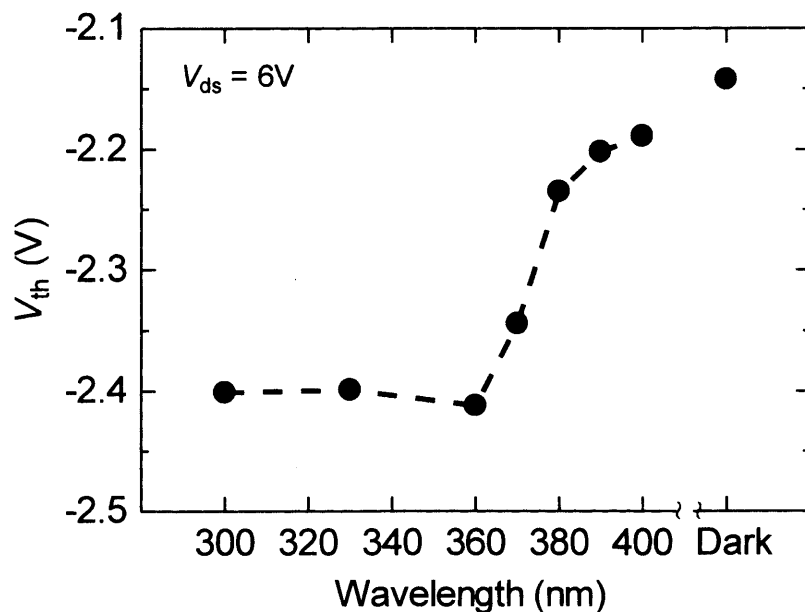


図 4.6 $V_{ds} = 6 \text{ V}$ における光照射によるしきい値電圧の変化

4.2.5 受光感度特性

図 4.5 に示したように、 $V_{gs} = -3.1$ V のピンチオフ状態でドレイン電流の 2 桁程度の増加が見られ、ITO ゲート AlGaIn/GaN HEMT は、ゲート電極をピンチオフ状態で動作することのできる受光素子として有望であることが期待できる。本研究では、この構造の受光感度特性について評価した。

図 4.7 に $V_{ds} = 6$ V、 $V_{gs} = -3.1$ V における受光感度特性を示す。受光面はゲート電極部分と仮定した。360 nm において受光感度が最大値を示し、その値は 2.0×10^5 A/W という極めて高い値であった。さらに、360 nm 付近において急峻な受光感度の減少が見られ選択性も優れていることが確認できる。この急峻な変化から、360 から 400 nm における感度比は 2 桁以上と算出した。360 から 300 nm の短波長領域において、受光感度は 2.0×10^5 から 1.5×10^5 A/W と徐々に減少している。

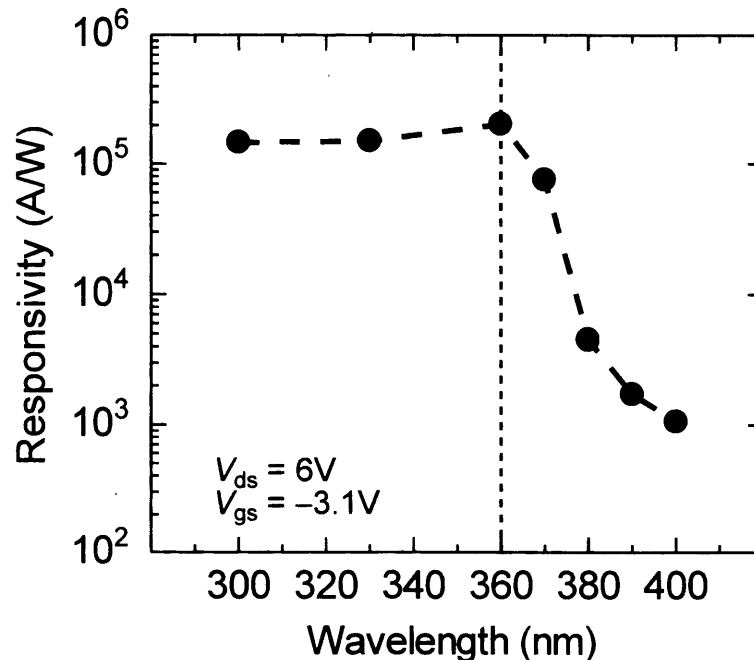


図 4.7 ITO ゲート AlGaIn/GaN HEMT の受光感度特性

4.3 光照射による励起モデルと輸送機構

4.2.4 節に記載したように、光照射により ITO ゲート AlGaIn/GaN HEMT では GaN チャンネル層でのキャリア励起によってしきい値電圧の負方向へのシフトが見られたと思われる。このヘテロ構造におけるキャリア励起について、Huang 等が提案しているモデルと Takanashi 等が提案している輸送機構を用いて解析を行い、光照射による生じたメカニズムを検討した[22], [25]–[27]。

4.3.1 光照射時の励起モデル

Huang 等により、AlGaIn/GaN ヘテロ構造における光照射時のキャリア励起については3箇所の異なる領域で生じていることが提案されている[22]。図 4.9 に提案されているキャリア励起モデルのエネルギーバンド模式図を示す。1 つ目は、AlGaIn キャリア供給層による吸収で、励起されたキャリアが自発分極とピエゾ分極によって生じる内部電界によって 2DEG チャンネルに輸送される(図 4.8 ①)。2 つ目は、2DEG 周辺やより深い GaN バルク層で生じ、AlGaIn 層での吸収と同様にヘテロ界面のバンドひずみに由来する内部電界によって 2DEG 層へキャリアが輸送される(図 4.8 ②)。3 つ目は、2DEG チャンネル領域への価電子帯から伝導体へのバンド間遷移である(図 4.8 ③)。

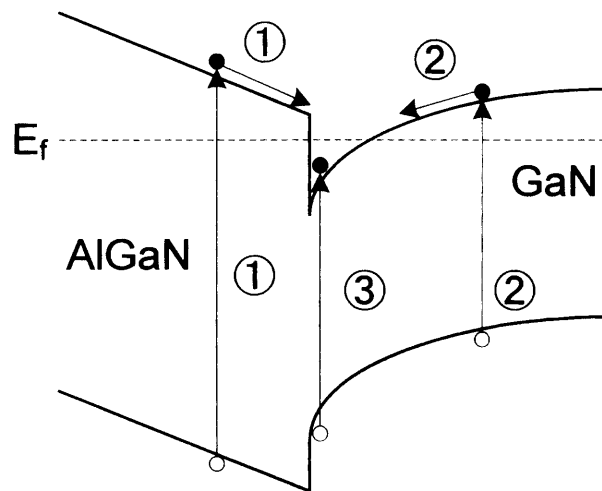


図 4.8 紫外光照射時の AlGaIn/GaN ヘテロ構造における励起キャリアのエネルギーバンド模式図[22]

4.3.2 光照射時の輸送機構の妥当性

4.3.1 節で述べたように、紫外光照射によって ITO ゲート AlGaIn/GaN HEMT の ITO ゲート領域下において、図 4.8 に示した 3 過程すべてまたはいくつかの輸送過程を得て、AlGaIn と GaN 界面における 2DEG 領域にキャリアが輸送されることが予想される。この 2DEG 領域へのキャリア励起及び輸送機構の妥当性について検討した。

Takanashi 等は、InAlAs/InGaAs HEMT において、光照射によって生じた 2DEG 層へのキャリア励起では光照射時の電流電圧特性、閾値電圧の変化(ΔV_{th})とドレイン電流の増加(ΔI_d)には以下に示す式の関係が生じることが示唆している [25]–[27]。

$$\Delta I_d = g_m (-\Delta V_{th}), \quad (4.1)$$

$$-\Delta V_{th} = \frac{AkT}{q} \ln \left(1 + \frac{\eta q P}{I_{pd} h \nu} \right), \quad (4.2)$$

それぞれ、 g_m は相互コンダクタンス、 A はフィッティングパラメータ、 η は吸収過程における量子効率、 I_{pd} はホールによる暗電流、 P は照射光強度及び $h\nu$ は照射光の光子エネルギーである。図 4.9 に ITO ゲート AlGaIn/GaN HEMT における $V_{ds} = 6$ V、360 nm 紫外光照射時の g_m に対する ΔI_d をプロットした結果を示す。実験結果より、 g_m に対し ΔI_d はほぼ線形的に増加しており、(4.1) 式によって推測された結果を示した。(4.1) 式によるフィッティングを行ったところ、 ΔV_{th} は -0.31 V である。図 4.4、図 4.6 に示したように、360 nm の紫外光照射時の実測から得られた ΔV_{th} は -0.25 V であり、フィッティングによって得られた値は妥当な値であるといえる。図 4.10 に 360 nm 紫外光照射時の光強度変化における $-\Delta V_{th}$ をプロットした結果を示す。図 4.10 に示すように、照射光強度の対数プロットに対し $-\Delta V_{th}$ が直線的に増加しており、(4.2) 式によって推測された結果を示した。(4.2) 式によるフィッティングから A 及び η/I_{pd} はそれぞれ 0.91 、 $1.0 \times 10^{14} \text{ A}^{-1}$ で

ある。これらのことから、実験結果は、2DEG 層への励起キャリアモデル及び輸送機構から推測される結果と非常に良好な一致を示した。したがって、ITO ゲート電極を通して照射される紫外光によって生じる励起キャリアの大部分は AlGaIn 層と GaN 層の界面に生じる 2DEG 層に蓄積されることが示された。2DEG によるキャリア輸送に加えて、(4.1) 式で与えられるトランジスタ型の受光素子における電流増幅を示す特徴的なパラメータである g_m が 4.2.5 節で得られた高い受光感度に結びつくのではないかと考えている。

ここで、図 4.6 及び図 4.7 で見られた GaN のバンドギャップ相当の波長より短い波長域($\lambda < 360 \text{ nm}$)において、 ΔV_{th} シフトと受光感度に大きな入射光波長依存性が見られなかった要因について今回のモデルから導かれた結果(図 4.10)を用いて検討した。第 3 章の図 3.3 より、360 から 300 nm にかけて ITO 膜の透過率は 61 から 35%に減少した。このことから、300 nm の紫外光照射時における ITO 膜を通して GaN へ到達する光強度は 360 nm の紫外光照射時と比較すると等価的には 0.57 に減少している。この照射光パワーの減少は図 4.10 及び(4.2) 式の関係式から 0.014 V の ΔV_{th} に対応している。これは、4.2.4 節で述べたように、300 nm から 360 nm において実験的に得られた ΔV_{th} (0.01 V)とよく一致している。受光感度については、360 nm から 300 nm において単に 360 nm における感度より相対的に 0.57 倍に減少することが考えられる。しかしながら、4.2.5 節で述べたように感度は 2.0×10^5 から $1.5 \times 10^5 \text{ A/W}$ に減少し、これは 0.75 倍の減少に値し、予想された結果よりも減少量が少なかった。この差異は、閾値電圧とは異なりゲート電極の影響に加え、ゲート・ソース間及びゲート・ドレイン間といったゲート電極以外の領域に生じた過剰キャリア励起によるゲート・ソース間およびゲート・ドレイン間の抵抗の減少によって、光電流の顕著な減少が見られなかったために感度がほぼ一定に見られたものではないかと定性的に考えている。

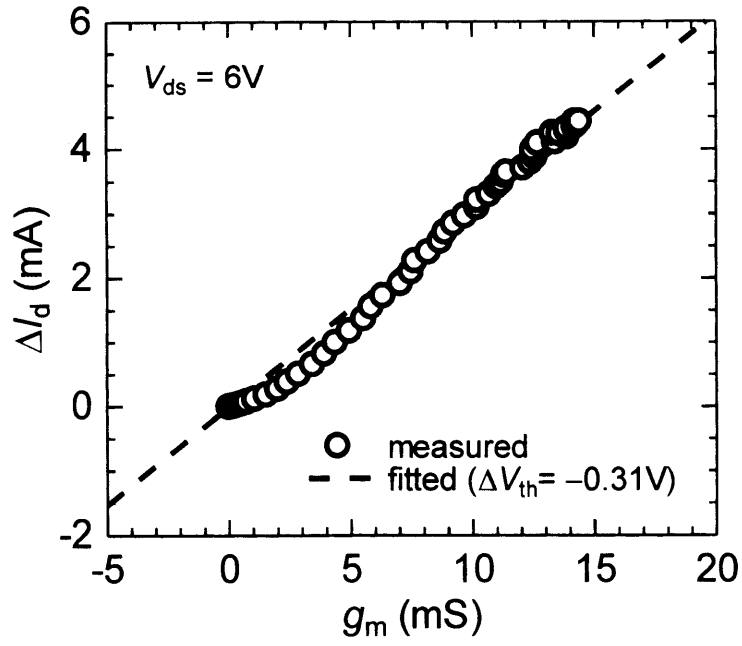


図 4.9 $V_{ds} = 6$ V における 360 nm 紫外光照射時の ΔI_d の g_m 依存性

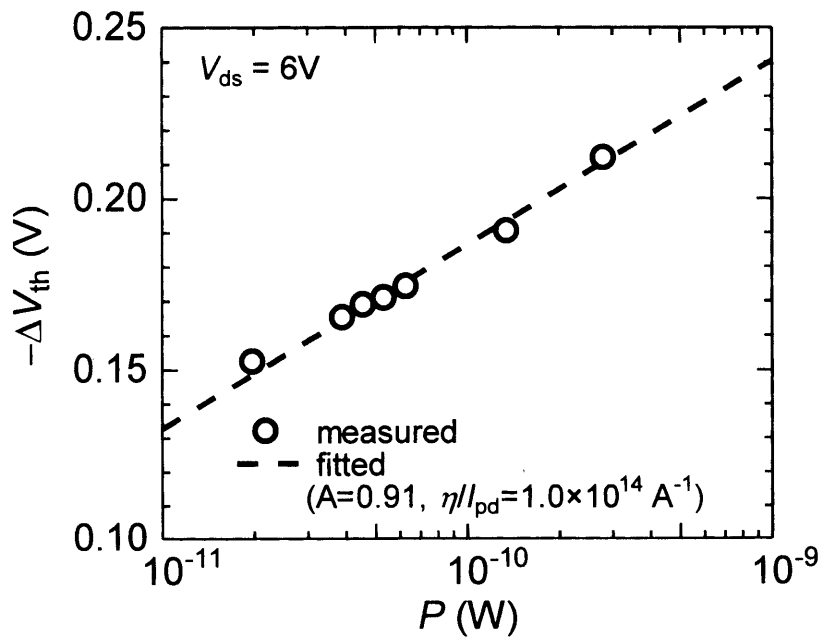


図 4.10 $V_{ds} = 6$ V における 360 nm 紫外光照射時の $-\Delta V_{th}$ の光強度依存性

4.4 まとめ

本章では、Si 基板上 AlGaIn/GaN HEMT の電子デバイス用途以外の可能性の探求(受光素子応用)を目的とし、金属ゲート構造で必要となる裏面基板からの光照射の代わりに表面照射が可能な受光素子構造として透明ゲート電極を有する AlGaIn/GaN HEMT を提案し、その光応答から受光素子としての特性と照射光による励起モデルと輸送機構について検討した。

360 nm の紫外光照射時において、暗状態と比較してドレイン電流の増加や負方向への閾値電圧のシフト($\Delta V_{th} = -0.25$ V)が見られた。特に $V_{gs} = -3.1$ V のピンチオフ状態においては2桁以上のドレイン電流の増加を確認した。

ピンチオフ状態で動作させることにより、 3×10^{-6} A/mm の低い暗電流と 2.0×10^5 A/W という高い受光感度の両立を示した。

透明ゲート電極を有する AlGaIn/GaN HEMT の光応答の結果はヘテロ界面によるキャリア励起モデルと輸送機構によって説明できた。

参考文献

- [1] E. Muñoz, “(Al,In,Ga)N-based photodetectors. Some materials issues,” *Phys. Status Solidi*, vol. 244, no. 8, pp. 2859–2877, 2007.
- [2] C. Pernot, A. Hirano, M. Iwaya, T. Detchprohm, H. Amano, and I. Akasaki, “Solar-blind UV photodetectors based on GaN/AlGaIn p-i-n photodiodes,” *Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett.*, vol. 39, no. 5 A, pp. 387–389, 2000.
- [3] J. C. Lin, Y. K. Su, S. J. Chang, W. H. Lan, W. R. Chen, K. C. Huang, Y. C. Cheng, and W. J. Lin, “Low Dark Current GaN p-i-n Photodetectors With a Low-Temperature AlN Interlayer,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 20, no. 14, pp. 1255–1257, 2008.
- [4] H. Jiang and T. Egawa, “Low-Dark-Current High-Performance AlGaIn Solar-Blind p-i-n Photodiodes,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 3, pp. 1541–1543, 2008.
- [5] K.-H. Chang, J.-K. Sheu, M.-L. Lee, S.-J. Tu, C.-C. Yang, H.-S. Kuo, J. H. Yang, and W.-C. Lai, “Inverted Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN ultraviolet p-i-n photodiodes formed on p-GaN template layer grown by metalorganic vapor phase epitaxy,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 1, pp. 013502–1–013502–3, 2010.
- [6] M. A. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson, M. Blasingame, and A. R. Bhattarai, “Schottky barrier photodetector based on Mg-doped p-type GaN films,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 18, pp. 2455–2456, 1993.
- [7] a. Osinsky, S. Gangopadhyay, J. W. Yang, R. Gaska, D. Kuksenkov, H. Temkin, I. K. Shmagin, Y. C. Chang, J. F. Muth, and R. M. Kolbas, “Visible-blind GaN Schottky barrier detectors grown on Si(111),” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 111, pp. 551–553, 1998.
- [8] N. Biyikli, T. Kartaloglu, O. Aytur, I. Kimukin, and E. Ozbay, “High-speed visible-blind GaN-based indium-tin-oxide Schottky photodiodes,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 17, pp. 2838–2840, 2001.
- [9] T. K. Ko, S. J. Chang, J. K. Sheu, S. C. Shei, Y. Z. Chiou, M. L. Lee, C. F. Shen, S. P. Chang, and K. W. Lin, “AlGaIn/GaN Schottky-barrier UV-B bandpass photodetectors with ITO contacts and LT-GaN cap layers,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 8, pp. 1064–1068, 2006.

- [10] G. Hellings, J. John, A. Lorenz, P. Malinowski, and R. Mertens, "AlGaN schottky diodes for detector applications in the UV wavelength range," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 56, no. 11, pp. 2833–2839, 2009.
- [11] Y. Sakai, T. Morimoto, T. Egawa, and T. Jimbo, "Metal Organic Chemical Vapor Deposition Growth and Characterization of AlInN-Based Schottky Ultraviolet Photodiodes on AlN Template," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, pp. 01AD01–1–01AD01–4, 2011.
- [12] M. Gökkavas, S. Butun, T. Tut, N. Biyikli, and E. Ozbay, "AlGaIn-based high-performance metal–semiconductor–metal photodetectors," *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.*, vol. 5, no. 2–3, pp. 53–62, 2007.
- [13] S.-J. Chang, H. Hung, Y.-C. Lin, M.-H. Wu, H. Kuan, and R.-M. Lin, "AlGaIn Ultraviolet Metal–Semiconductor–Metal Photodetectors with Low-Temperature-Grown Cap Layers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 4B, pp. 2471–2473, 2007.
- [14] W. Y. Weng, S. J. Chang, W. C. Lai, T. J. Hsueh, S. C. Shei, X. F. Zeng, S. L. Wu, and S. C. Hung, "GaInN MSM Photodetectors with a Semi-Insulating Mg-Doped AlInN Cap Layer," *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 21, no. 8, pp. 504–506, 2009.
- [15] C. H. Chen, S. J. Chang, M. H. Wu, S. Y. Tsai, and H. J. Chien, "AlGaIn metal-semiconductor-metal photodetectors with low-temperature AlN cap layer and recessed electrodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 4 PART 2, pp. 04DG05–1–04DG05–3, 2010.
- [16] L. Sang, M. Liao, Y. Koide, and M. Sumiya, "High-performance metal-semiconductor-metal InGaIn photodetectors using CaF₂ as the insulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 10, pp. 103502–1–103502–3, 2011.
- [17] F. Xie, H. Lu, D. Chen, X. Ji, F. Yan, R. Zhang, Y. Zheng, L. Li, and J. Zhou, "Ultra-Low Dark Current AlGaIn-Based Solar-Blind Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors for High-Temperature Applications," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 6, pp. 2086–2090, 2012.
- [18] M. A. Khan, M. S. Shur, Q. Chen, J. N. Kuznia, and C. J. Sun, "Gated photodetector based on GaN/AlGaIn heterostructure field effect transistor," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 5, pp. 398–400, 1995.

- [19] T.-M. Kuan, S.-J. Chang, Y.-K. Su, C.-H. Ko, J. B. Webb, J. A. Bardwell, Y. Liu, H. Tang, W.-J. Lin, Y.-T. Cherng, and W.-H. Lan, "High Optical-Gain AlGa_N/Ga_N 2 Dimensional Electron Gas Photodetectors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. Part 1, No. 9A, pp. 5563–5564, 2003.
- [20] S. J. Chang, T. M. Kuan, C. H. Ko, Y. K. Su, J. B. Webb, J. a. Bardwell, Y. Liu, H. Tang, W. J. Lin, Y. T. Cherng, and W. H. Lan, "Nitride-Based 2DEG Photodetectors with a Large AC Responsivity," *Solid. State. Electron.*, vol. 47, no. 11, pp. 2023–2026, 2003.
- [21] H. Jiang, T. Egawa, H. Ishikawa, C. Shao, and T. Jimbo, "Visible-Blind Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors Based on Undoped AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistor Structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. No. 5B, pp. L683–L685, 2004.
- [22] Y. Huang, D. J. Chen, H. Lu, H. B. Shi, P. Han, R. Zhang, and Y. D. Zheng, "Photocurrent characteristics of two-dimensional-electron-gas-based AlGa_N/Ga_N metal-semiconductor-metal photodetectors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 2010, pp. 2010–2013, 2010.
- [23] M. Martens, J. Schlegel, P. Vogt, F. Brunner, R. Lossy, J. Würfl, M. Weyers, and M. Kneissl, "High gain ultraviolet photodetectors based on AlGa_N/Ga_N heterostructures for optical switching," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 21, pp. 211114–1–211114–3, 2011.
- [24] M. Ishiguro, K. Ikeda, M. Mizuno, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, and I. Akasaki, "Control of the Detection Wavelength in AlGa_N / Ga_N-Based Hetero-Field-Effect-Transistor Photosensors LT-Buffer Layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 52, pp. 08JF02–1–08JF02–4, 2013.
- [25] Y. Takanashi, K. Takahata, and Y. Muramoto, "Characteristics of InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors under 1.3- μ m laser illumination," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 19, no. 12, pp. 472–474, 1998.
- [26] Y. Takanashi, K. Takahata, and Y. Muramoto, "Characteristics of InAlAs/InGaAs high-electron-mobility transistors under illumination with modulated light," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 46, no. 12, pp. 2271–2277, 1999.

- [27] H. S. Kang, C. S. Choi, W. Y. Choi, D. H. Kim, and K. S. Seo, "Characterization of phototransistor internal gain in metamorphic high-electron-mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 19, pp. 3780–3782, 2004.

第 5 章 結論

本研究では、次世代のパワーデバイスとして期待される Si 基板上 AlGaN/GaN HEMT の普及に欠かすことのできない信頼性に関わるデバイス評価および新規の応用検討をおこなった。

以下に、2 章から 4 章の主な結論を述べる。

第 2 章では、高電圧動作が期待される AlGaN/GaN HEMT 素子で理論計算より想定される電界に依存する電子温度が得られるのかを検討した。高ドレイン印加時の GaN HEMT からの EL スペクトルは、マクスウェルボルツマン分布に従い、かつ GaN のバンドギャップ(3.4 eV)に相当するエネルギーに信号を持たないことが分かった。これらの結果から、EL が GaN チャネル層におけるバンド間再結合でなく、ホットエレクトロンのバンド内遷移が支配的である結果を得た。ドレイン電圧 60V において、電子温度 8600 K という既報告の AlGaN/GaN HEMT の結果と比較して高い値を確認した。実測で得られた電子温度とシミュレーションによる実素子のチャネルに印加された電界のバイアス依存性から、測定結果は既報告のモンテカルロシミュレーションによる平均電子エネルギーの電界依存性の傾向と一致することがわかった。

第 3 章では、リーク電流機構の結晶学的解析を進めるのに必要となる、リーク電流発生箇所の同定を行う手法として、発光解析とゲート電極下を含めた領域を観察可能な透明ゲート電極構造の組み合わせた手法を提案した。透明ゲートとして ITO を用い、GaN 系 HEMT からの EL 波長域(500 nm ~ 950 nm)において 77%以上の透過率を持つことを確認した。作製した透明ゲート HEMT は、通常の金属ゲート HEMT と遜色のない 1 桁程度(10^{-6} A/mm ~ 10^{-5} A/mm @ $V_g = -30$ V)のばらつきを持つ 2 端子ゲートリーク電流を有することがわかった。また、

オフ状態での EL 測定より、ゲート電極を通して不均一に分布するスポット上の EL を観察することに成功した。さらに、スポット上の EL 箇所が局所リーク発生箇所であることがわかった。この結果より、EL と透明ゲート技術を組み合わせるがトランジスタの局所リーク箇所の同定に有効であることが示された。局所リーク電流機構の解明につなげるために、発光箇所の断面 STEM 観察及び EDX による元素分析を行った。断面 STEM 観察より、ゲート電極部で生じた発光分布と SLS バッファ層に観察された v 字のコントラストはよく一致することが分かった。さらに、そのような v 字のコントラストでは、Ga リッチの不均一なエピタキシャル層の成長が含まれていることがわかった。不均一に成長された層やその箇所の上に成長されたエピタキシャル層が局所ゲートリーク発生箇所と関連していることが明らかになった。

第 4 章では、Si 基板上 AlGaIn/GaN HEMT の電子デバイス用途以外の可能性の探求(受光素子応用)を目的とし、3 章で作製した透明ゲート電極を有する AlGaIn/GaN HEMT の受光素子としての可能性を検討した。紫外光照射時にドレイン電流の増加と閾値電圧の負方向のシフトを確認した。また、ピンチオフ状態で動作させることにより、 3×10^{-6} A/mm の低い暗電流と 2.0×10^5 A/W という高い受光感度の両立を示した。このような透明ゲート電極を有する AlGaIn/GaN HEMT の光応答の結果は、ヘテロ界面によるキャリア励起モデルと輸送機構によって説明できた。

