

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560028

研究課題名(和文) デバイス動作条件時 AlGaIn/GaN 2DEG の電子線ホログラフィーその場観察

研究課題名(英文) Electron Holography Observation of 2DEG at AlGaIn/GaN on the working condition.

研究代表者

竹口 雅樹 (TAKEGUCHI MASAKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・ナノ計測センター・主幹研究員

研究者番号：30354327

研究成果の概要(和文)：3端子電圧導入機構を備えた試料ホルダーを用いてサファイアC面基板の上に成長させた AlGaIn/GaN に Pt 探針を接触させ、バイアス電圧を印加した時の AlGaIn/GaN におけるポテンシャル変化を電子線ホログラフィーによって観察した。バイアス印加などの実際にデバイスを動作させる様々な条件を TEM 内に再現し、その時のポテンシャルの変化を電子線ホログラフィーによって研究することができることが実証された。

研究成果の概要(英文)：By making a Pt probe contact with AlGaIn/GaN grown on sapphire C plane in a 3 feedthroughs built-in sample holder, potential change of AlGaIn/GaN due to applied bias voltage were observed by electron holography. We could produce the practical working condition of AlGaIn/GaN devices in TEM, demonstrating that potential differences caused at the working conditions could be investigated by electron holography.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究代表者の専門分野：透過型電子顕微鏡技術・手法の開発

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード：電子線ホログラフィー、窒化物半導体、その場観察

1. 研究開始当初の背景

GaN 系窒化物半導体は強い自発分極係数と圧電分極係数を持つので GaN 上にエピタキシャル成長した AlGaIn 膜はその自発分極によって強い内部電界を生じる。このために AlGaIn/GaN ヘテロ界面において高濃度な二次元電子ガス(2DEG)を形成することから高移動度トランジスタとして注目を集めていた。内部電界制御に関する研究においては、成長膜評価とデバイス特性評価だけでなく、内部電界や界面における 2DEG 密度の解析技術が求められていた。界面構造における

歪や欠陥と内部電界、界面の 2DEG 濃度の相関を同時にナノレベルで評価する方法として、透過型電子顕微鏡(TEM)と電子線ホログラフィーを組み合わせる技術が注目を集めていた。

2. 研究の目的

3端子電圧導入機構を備えた試料ホルダーを設計・製作し、実際にデバイス構造を保った TEM 試料において、界面構造を TEM 観察すると同時に、ゲート電圧などへの電極への電圧オンオフによる 2DEG の変化を電子

線ホログラフィーで観察する。そして AlGaIn/GaN デバイス材料の高性能化のため絶縁膜/ゲート電極を通じた外部からの電界操作による最適な特性を実現するデバイス構造や問題解決の要因を探求することができるような評価技術を確立する。

3. 研究の方法

- (1) 3 端子電圧印加試料ホルダーを開発する。
- (2) デバイス動作その場観察用の試料作製技術の確立とその評価を行う。
- (3) AlInGaIn/GaN 試料や非極性面成長した AlGaIn/GaN 試料における界面の HRTEM 構造解析と電子線ホログラフィーによるゲート電圧オンオフ時の電圧印加内部電界・2DEG の観察を行う。
- (4) ヘテロ界面にナノメートルレベルで微量に存在する 2DEG の高精度な定量解析技術の研究を行う。

4. 研究成果

(1) GaN 系試料の電子線ホログラフィーおよび円環暗視野走査型透過電子顕微鏡法 (HAADF-STEM) 像観察の定量観察のため、試料表面が均一でダメージの少ない試料作製として Chemical Mechanical Polishing (CMP) 楔形試料作製法を適用し、評価を行った。図 1 は本手法によって得られた GaN 試料の高分解能 TEM 像である。薄くてかつ均一な試料が作製されていることが分かる。通常の機械研磨と Ar イオンミリングの組み合わせではダメージ層が多く、本研究に適切な試料は得られなかった。

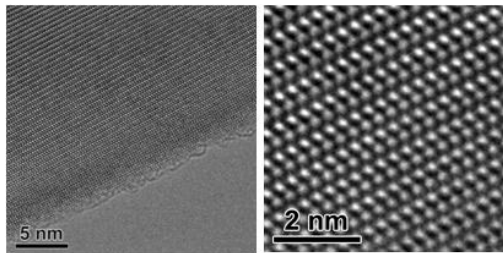


図 1 (左) GaN 試料の TEM 像および(右)その一部の高分解能 TEM 像。

(2) 電子線ホログラフィーで得られるヘテロ界面の位相像において、組成差による位相測定値のずれが生じてしまう。本研究ではその補正法についての検討を行った。図 2(a)に実験的に得られた位相プロファイル及び厚さプロファイルを示す。実際の厚さ分布はこの実験値を元にモデル化し、GaN の平均内部電位 V_0 を用いて AlGaIn の平均内部電位を計算値として与え、位相分布の計算プロファイルを図 2(b)のように得た。この(a)(b)間の位相の差は内部電界と 2DEG によるものであるとして図 3 のように電荷密度分布を求めることができた。

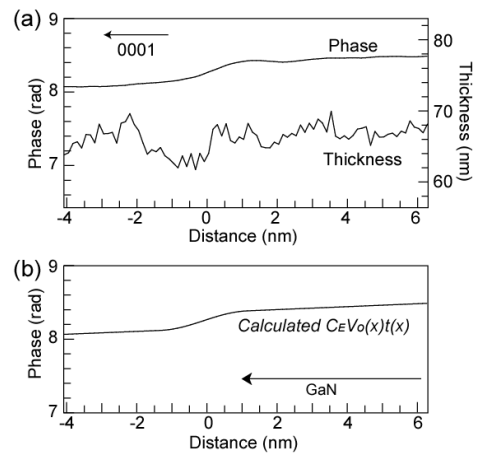


図 2(a)得られた位相分布と(b)平均内部電位のみを考慮した位相計算値プロファイル。

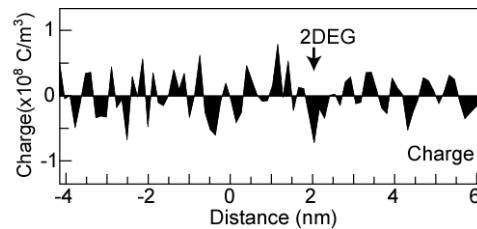


図 3 図 2 をもとに得られた電荷密度プロファイル結果。

(3) 3 端子電圧印加試料ホルダーを開発し、実際に材料表面の一端にバイアス電圧を印加しながら TEM や電子線ホログラフィー観察をすることを可能とした。試料としてサファイア C 面基板の上に成長させた AlGaIn/GaN に対し、CMP 楔形試料作製法で試験片を準備し、AlGaIn における印可ポテンシャルおよび界面における 2DEG の計測を行った。しかしながら AlGaIn 上面への電圧印可は広い幅の AlGaIn 層に対して不均一に電界がかかり、適切な実験ができないことが分かった。そこで CMP 研磨試験片に対して AlGaIn 上面にダイヤモンド粒子を分散させその上から Ar イオンミリングを行って図 4 のようにロッド状の試験片を作製した。図のようにそのロッド先端の非晶質化炭素電極に、3 端子電圧導入機構を備えた試料ホルダーを用いて Pt 探針

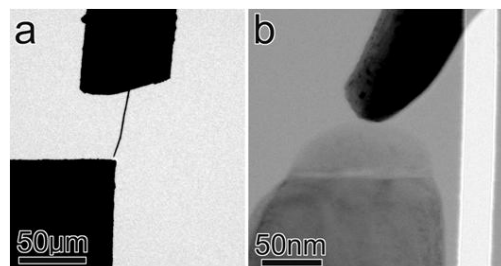


図 4 AlGaIn/ GaN 試料への電圧印加の様子の TEM 像。(左)低倍率、(右)高倍率。

を接触させ、0V、+50V および-50V のバイアス電圧を印加し、AlGaIn/GaN におけるポテンシャル変化を電子線ホログラフィーによって観察することができた。厚さの不均一さの効果を除去するため、バイアス印加時の位相像をバイアス 0V の位相像で割り算し、オリジナルのポテンシャルで規格化したバイアス印加時のポテンシャル変化を捉えることができた。これにより AlGaIn 上面向の電圧印加は AlGaIn 層全体に均一な電界による一様なバンド傾斜を生じるのではなく、バンドの曲がりやを伴うものであることが分かった。また AlGaIn の下部には 2DEG による電荷集中を生じ(図の Distance33nm 当たりのところ)、電圧印加によってその 2DEG 密度が変化することも計測できた。適切なバイアスでは 2DEG がゼロになることも確認されたが、その定量的な評価のためにはより位相計測の高精度化や様々な位相変調の要因を除去する手法が必要であることも示唆された。

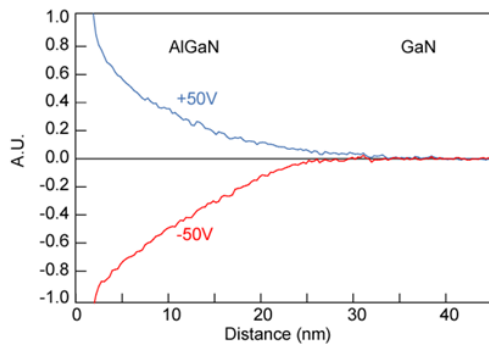


図5 +50V および-50V のバイアス電圧を印加した時の AlGaIn/GaN におけるポテンシャル変化。厚さの不均一さの効果を除去するため、バイアス印加時の位相像をバイアス 0V の位相像で割り算して規格化してある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① L. Sang, M. Takeguchi, W. Lee, T. Sekiguchi, L. Lozach and M. Sumiya, "Phase Separation Resulted from Mg-doping in p-InGaIn film grown on GaN/sapphire template", Applied Physics Express, 査読有, 3 巻, 2010, 111004(1)-111004(4).
- ② M. Sumiya, Y. Kamo, N. Ohashi, M. Takeguchi, Y.-U. Heo, H. Yoshikawa, S. Ueda, K. Kobayashi, T. Nishihashi, M. Hagino, T. Nakano, and S. Fuke, "Fabrication and hard X-ray photoemission analysis of

photocathodes with sharp solar-blind sensitivity using AlGaIn films grown on Si substrates", Applied Surface Science, 査読有, 256巻, 2010, 4442-4446.

③ Y. Yao, T. Sekiguchi, T. Ohgaki, Y. Adachi, N. Ohashi, H. Okuno and M. Takeguchi, "Periodic supply of indium as surfactant for N-polar InN growth by plasma-assisted molecular-beam epitaxy", Applied Physics Letter, 95巻, 査読有, 2009, 041913(1) -041913(3).

④ 竹口雅樹, 先端透過型電子顕微鏡法を用いた III 属窒化物半導体ヘテロ界面評価, 表面技術, 査読無, 59巻, 2008, 783-788.

⑤ H. Okuno, M. Takeguchi, K. Mitsuishi, X. Guo, Y. Irokawa, Y. Sakuma and K. Furuya, "Sample Preparation of GaIn-Based Materials on a Sapphire Substrate for STEM Analysis", Journal of Electron Microscopy 57 巻, 査読有, 2008, 1-5.

⑥ H. Okuno, M. Takeguchi, K. Mitsuishi, X. Guo, Y. Irokawa, Y. Sakuma and K. Furuya, "Local characterizations of quaternary AlInGaIn/GaN heterostructures using TEM and HAADF-STEM", Surface Interface Analysis, 査読有, 40 巻, 2008, 1660-1663.

⑦ M. Takeguchi, H. Okuno, K. Mitsuishi, Y. Irokawa, Y. Sakuma and K. Furuya, "HAADF -STEM and electron holography observations of AlInGaIn/GaN heterostructures", AMTC Letters, 査読有, 1 巻, 2008, 66-67.

[学会発表] (計 3 件)

① Y. Nakano, K. Nakamura, Y. Irokawa, and M. Takeguchi, "Band Gap States in AlGaIn/GaN Hetero-Interface Probed by Deep-Level Optical Spectroscopy", 8th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics, 08.25-08.28 (2009), Nagano, Japan.

② M. Takeguchi, H. Okuno, Y. Irokawa, Y. Sakuma, K. Furuya, "Characterization of AlInGaIn/GaN heterointerface by HAADF-STEM and electron holography", Microscopy & Microanalysis 2008 Meeting, 08.03-08.07 (2008), Albuquerque, NM, USA.

③ M. Takeguchi, H. Okuno, Y. Irokawa, Y. Sakuma, K. Furuya, "Electron Holography Observation of AlInGaIn/GaN Hetero interfaces", The 9th Asia-Pacific Microscopy

Conference (APMC9), 11.02-11.07 (2008)
Jeju, Korea.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹口雅樹 (TAKEGUCHI MASAKI)
独立行政法人物質・材料研究機構・ナノ計
測センター・主幹研究員
研究者番号：30354327

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし