

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02165

研究課題名（和文）窒素極性GaN系MIS-HEMTのパワーデバイス応用に向けた研究

研究課題名（英文）Study on N-polar GaN MIS-HEMTs for power devices

研究代表者

末光 哲也（Suemitsu, Tetsuya）

東北大学・未来科学技術共同研究センター・特任教授

研究者番号：90447186

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：窒素極性窒化ガリウム（GaN）結晶を用いた高電子移動度トランジスタ（HEMT）に注目し、次世代パワーデバイスへの応用に視点を向け、既存のGa極性結晶を用いたデバイスに対する優位性を明らかにすることを目的としている。

こうしたデバイス構造の設計のためには、分極電荷がバンドプロファイルに与える影響を正しくモデル化する必要がある。特に、窒素極性とGa極性でGaNの障壁高さに違いが現れることを説明するモデルが無かったため、表面分極電荷が表面から数オングストロームの深さに広がって存在するとした新たなモデルを提案し、実験で得られた両極性間の障壁高さの違いを説明することを可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

窒素極性窒化物半導体は作製が難しく、報告例が少ないため、基本的な材料パラメータに関する情報も少ない。ショットキー障壁高さもその一つである。今回提案したモデルにより、GaN以外の材料でも一般的なGa極性結晶での障壁高さが分かれば、窒素極性でどれくらいになるのか、その材料の分極電荷密度と誘電率から推測することが可能となり、窒素極性材料を用いたパワーデバイス等のバンドエンジニアリングの際の一助となる。

研究成果の概要（英文）：The goal of the research is to demonstrate the advantage of N-polar GaN crystals over Ga-polar GaN counterparts in the field of power devices.

In order to design the device structures, modeling the effect of polarization charges on the band profile of devices is indispensable. To explain the difference of the Schottky barrier height between N-polar and Ga-polar GaN, a new model to assume the polarization surface charges to be distributed in a several-angstrom-width region on surface. The experimentally observed difference in the barrier height is able to be explained if this width of the polarization-charged area is 5 angstroms.

研究分野：半導体デバイス工学

キーワード：窒化物半導体 HEMT 窒素極性

1. 研究開始当初の背景

六方晶の窒化ガリウム (GaN) には極性があり、c 軸方向への結晶成長をする時の成長の向きによって Ga 極性と窒素極性の 2 種類が存在する。ところが、これまで研究され実用化された GaN 系デバイスはほとんどが Ga 極性結晶を使っている。窒素極性は結晶成長の難易度が高く、世界でもごく限られた機関でしか結晶を扱えないが、近年、ミリ波帯向け高電子移動度トランジスタ (HEMT: High Electron Mobility Transistor) で Ga 極性の素子を上回る電力密度が報告されるなど[1]、注目が高まっている。また、パワーデバイスへの応用に目を向けると、ノーマリーオフ型 HEMT や低オン抵抗のショットキーダイオード等で窒素極性の特性を生かしたデバイス設計が期待できる。

2. 研究の目的

Ga 極性と窒素極性では、発生する分極電荷の極性が逆になる。これはバンドエンジニアリングにも影響するものである。例えば、パワートランジスタの設計にあたり、ノーマリーオフ動作を実現するためにしきい値電圧が正になるように設計するためには、この分極電荷がショットキー障壁高さなど関連するパラメータにどのような影響を与えるかを理解する必要がある。本研究では、窒素極性の GaN についてショットキー電極構造を作製し、Ga 極性 GaN との障壁高さの違いを調べる。

3. 研究の方法

窒素極性の GaN についてショットキー電極構造および MIS ゲート構造を作製し、Ga 極性 GaN との障壁高さの違いを調べる。窒素極性 GaN 試料については、有機金属気相成長法 (MOVPE) によって窒素極性方向に成長した試料や、自立 GaN 基板の裏面 (つまり窒素極性面) を研磨して用意した試料等を用いた。MOVPE 法によって用意した試料は、高濃度ドープ n 型基板の上にアンドープの GaN を窒素極性方向に成長した。自立 GaN 基板は、表面 (Ga 極性面) 側の約半分の厚さは高濃度ドープ (約 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) の n 型で、残りの窒素極性面側の半分はアンドープである。両者とも、まず裏面にオーミック電極となる金属を堆積し、窒素雰囲気にて高温アニールした。次に、試料を希塩酸にて洗浄の後、表面側にショットキー電極として Ni/Au を電子線蒸着によって形成した。出来上がった試料について、半導体特性解析装置 (Keysight, B1505) にて容量測定を行い、ショットキー障壁高さと同空乏層内の残留不純物密度の評価を行った。

4. 研究成果

まず MOVPE 法にて成長した窒素極性 GaN について容量評価を行った。比較のため、典型的な Ga 極性 GaN 試料について同時に評価を行い、両者の結果を比較した。図 1 に順方向電流密度 (J) と順方向電圧 (V) の関係を示す。原点近傍での J の傾きから、ショットキー障壁高さ (ϕ_B) は、窒素極性では 0.58V、Ga 極性では 0.79V と見積もられ、Ga 極性の方が約 0.2V 高い。次に、測定された容量の値 (C) から $1/C^2$ を計算し、順方向電圧 V の関数として表したものを図 2 に示す。この図において、プロットを x 軸まで外挿した時の切片はビルトインポテンシャルに相当する。それらの値から ϕ_B を計算すると、窒素極性では 0.83V、Ga 極性では 1.04V と見積もられ、やはり Ga 極性の方が約 0.2V 高い結果となった。同様に Ga 極性の方が高い ϕ_B を示す結果は他機関からも報告されている [3-5]。また、プロットの傾きから、GaN に含まれるドナー不純物密度は、窒素極性で $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、Ga 極性で $6.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ と見積もられた。窒素極性でかなり高い不純物密度となっているのは、結晶成長中に酸素が取り込まれやすく、それがドナーとして働いているためと考えられる。

ショットキー障壁高さは、原理的には金属の仕事関数と半導体の電子親和力の差で決まり、GaN の極性による違いは無いはずである。もちろん、金属・半導体界面における界面準位の試料間での違いが異なる ϕ_B を生んでいるということも考えられるが、もう少し系統的な説明ができないかを考えてみる。窒素極性と Ga 極性で、最も大きな違いは表面に現れる分極電荷である。窒素極性では正の、Ga 極性では負の分極電荷が半導体表面に現れる。ここでこの分極電荷が半導体表面から内部にわずかな距離だけ広がりを持って分布していると仮定する。分極電荷密度 P は面電荷密度として与えられるが、それを $\rho = P/\delta$ の体積電荷密度と考えるわけである。更にここで、両極性で等しい真性ショットキー障壁高さ (ϕ_{Bi}) が存在するものと仮定し、与えられた電荷分布の元でポワソン方程式を解いて GaN の空乏層におけるバンドプロファイルを計算する。その概念図として、GaN 表面から深さ方向への電荷密度の分布とバンドプロファイルを図 3 に示す。

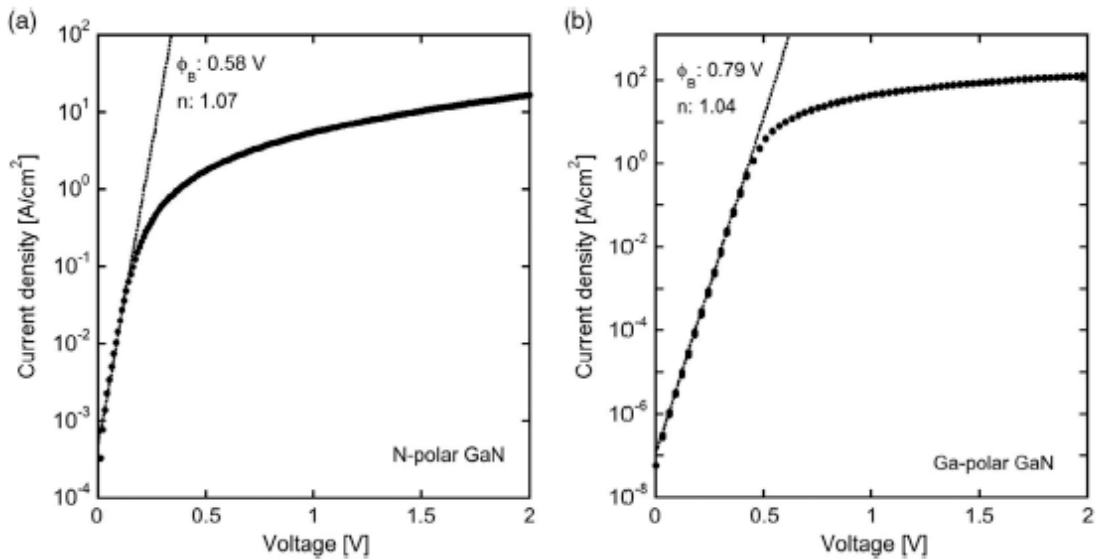


図 1. (a)窒素極性 GaN、(b)Ga 極性 GaN の電流密度と順方向電圧の関係[1]

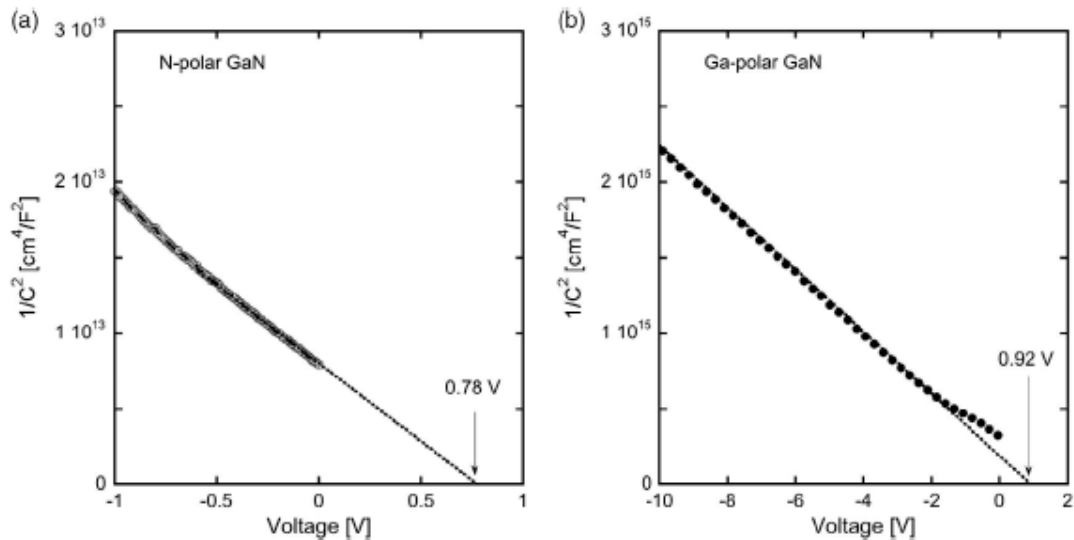


図 2 . (a)窒素極性 GaN、(b)Ga 極性 GaN の容量特性と順方向電圧の関係[1]

GaN の分極電荷密度は、 $3.4 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$ である[3]。これは不純物密度に換算すると $2.12 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ に相当する非常に高い密度である。従って、表面に存在する分極電荷の密度は、GaN 内部の不純物密度よりも十分に大きいと考えて良い。このときの電荷密度分布は、図 3 の上段の図にあるように、(a)窒素極性では表面近傍に大きな正電荷が、(b)Ga 極性では大きな負電荷が存在する。これによって、図 3 下段に示すバンドプロファイルでは、(a)窒素極性では、表面で $q\phi_{Bi}$ だった静電ポテンシャルが表面近傍で急激に減少し、ショットキー障壁高さが $\Delta\phi$ だけ減少したように見える。一方、(b)Ga 極性では、表面で $q\phi_{Bi}$ だった静電ポテンシャルは負の分極電荷の影響で表面近傍にて一度増加し、あるところで極大値を持つプロファイルとなるため、障壁高さが $\Delta\phi$ だけ増加したように見える。このときの $\Delta\phi$ を計算すると、

$$\Delta\phi = -\frac{\rho\delta^2}{2\epsilon_s} = -\frac{P\delta}{2\epsilon_s}$$

となる。ここで、 ϵ_s は GaN の誘電率である。実験で確認した両極性間の障壁高さの違いは $2|\Delta\phi|$ に相当するが、 δ として 5 を代入すると約 0.22V となり、実験値にほぼ一致する。この 5 というのは、GaN の c 軸方向の単位格子長に相当する長さであるのは興味深い。つまり、GaN 結晶の表面の一単位格子層分の厚さのみ分極電荷が分布していると考えられることができる。

窒素極性と Ga 極性でのショットキー障壁高さの違いを説明するモデルを構築したが、一方で、今回の実験で得た障壁高さの違いは、単に不純物密度の差を反映したものではないかという見方もできる。特に、窒素極性では不純物密度が 10^{18} cm^{-3} 台と非常に高く、Ga 極性試料との差が大きい。しかし、今のところ窒素極性 GaN の MOVPE 成長では、どうしても酸素の取り込み

によって残留不純物密度が大きくなりやすく、Ga 極性並みの 10^{16}cm^{-3} 台の試料を作成するのは困難である。そこで、自立 GaN 基板の裏面を使う方法で窒素極性 GaN ショットキーダイオードを作製し、電気特性を評価した。実験に用いた自立 GaN 基板は、表面 (Ga 極性面) 側の約半分の厚さは高濃度ドーパ (約 $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$) の n 型で、残りの窒素極性面側の半分はアンドープという仕様の両面研磨基板である。アンドープである窒素極性側の面に Ni/Au のショットキー電極を形成して評価したところ、J-V 特性から見積もった障壁高さは、0.5V、C-V 特性から評価した障壁高さと空乏層不純物密度は、それぞれ 0.45V、 $3.14 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ であった。この結果を見ると、前述の Ga 極性試料と同じ 10^{16}cm^{-3} 台の不純物密度にも関わらず、0.5V 以下という低い障壁高さを示しており、不純物密度が大きいと障壁高さを低下させるという傾向は、必ずしも成り立たないことを示している。実際、

分極電荷が表面から 5 μm の深さに分布しているとする、その体積電荷密度は不純物密度に換算すると約 $2 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ に相当するので、 10^{16}cm^{-3} 台や 10^{18}cm^{-3} 台と比べて遙かに大きく、分極電荷の方が障壁高さに影響を与えていると考えるのが自然といえる。

以上の結果から、窒素極性と Ga 極性の GaN の間に見られるショットキー障壁高さの違いは、表面に発生する分極電荷の影響によって起こると考えられる。これにより、他の窒化物半導体材料でも Ga 極性結晶における障壁高さが分かれば、窒素極性でどれくらいになるか、分極電荷密度と誘電率から推測することが可能である。高周波デバイスに限らず、パワーデバイスでも窒素極性材料への注目が高まっているが、こうした材料系でのデバイス設計の際に役立てば幸いである。

< 引用文献 >

1. S. Wienecke, B. Romanczyk, M. Cuidry, H. Li, E. Ahmadi, K. Hestroffer, X. Zheng, S. Keller, U. K. Mishra, IEEE Electron Device Lett., **38**, 359 (2017).
2. T. Suemitsu, I. Makabe, Physica Stat. Solidi B, **257**, 1900528 (2020).
3. U. Karrer, O. Ambacher, M. Stulzmann, Appl. Phys. Lett., **77**, 2012 (2000).
4. H. W. Jang, J. H. Lee, J. L. Lee, Appl. Phys. Lett., **80**, 3955 (2002).
5. Y. Liu, M. Z. Kausar, M. I. Nathan, P. P. Ruden, S. Dogan, H. Morkoc, S. S. Park, K. Y. Lee, Appl. Phys. Lett., **84**, 2112 (2004).
6. C. Wood, D. Jena, *Polarization Effects in Semiconductors*, Springer, New York, USA (2008).

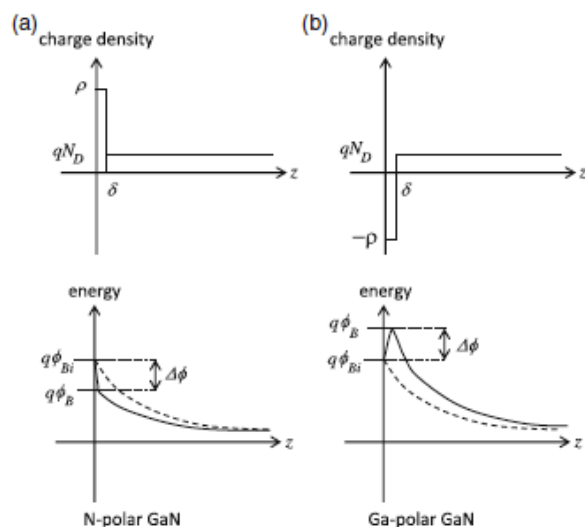


図 3 . (a)窒素極性、(b)Ga 極性 GaN における電荷分布とバンドプロファイル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Suemitsu Tetsuya, Makabe Isao	4. 巻 257
2. 論文標題 Effective Schottky Barrier Height Model for N Polar and Ga Polar GaN by Polarization Induced Surface Charges with Finite Thickness	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1900528 ~ 1900528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201900528	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Prasertsuk Kiattiwut, Suemitsu Tetsuya, Matsuoka Takashi	4. 巻 61
2. 論文標題 Reverse bias annealing effects in N-polar GaN/AlGaIn metal-insulator-semiconductor high electron mobility transistors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SA1006 ~ SA1006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac2214	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. Suemitsu and I. Makabe
2. 発表標題 Impact of polarization-induced charges on Schottky barrier height of polar GaN
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Prasertsuk, T. Suemitsu and T. Matsuoka
2. 発表標題 Evidence of carrier trapping at extrinsic gate region in N-polar GaN/AlGaIn MIS HEMTs
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Suemitsu Tetsuya, Makabe Isao
2. 発表標題 Effective Schottky barrier height model for Ga- and N-polar GaN by polarization-induced surface charges with finite depth
3. 学会等名 International Conference on Nitride Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末光哲也, 眞壁勇夫
2. 発表標題 分極電荷の広がりを考慮したGa極性・N極性の実効ショットキー障壁高さモデル
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	橋詰 保 (Hashizume Tamotsu) (80149898)	北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・特任教授 (10101)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	松岡 隆志 (Matsuoka Takashi)	東北大学・未来科学技術共同研究センター・特任教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------