

平成 30 年 7 月 3 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289095

研究課題名(和文) GaN系HEMTと関連素子の piezo電界効果の解明と表面準位の新評価法

研究課題名(英文) Piezoelectric effects in GaN-based HEMTs and related devices and a new method

研究代表者

榊 裕之 (Sakaki, Hiroyuki)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・学長

研究者番号：90013226

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：GaN上にAlGaIn膜を載せたHEMTを歪ませた時の伝導層の抵抗変化を調べ、ウルツ鉱に固有の piezo効果に起因する分極電荷の変化でほぼ説明できることを示した。また、試料表面に生じる分極電荷が、表面準位の充放電によって部分的に打ち消される現象に着目し、遮蔽作用を持つ金属電極の有る試料と無い試料の比較から、表面準位密度を推定できることを示した。また、GaAs上にAlGaAs膜を載せた構造を持つ素子でも、歪により結晶の対称性が損なわれるため、piezo抵抗効果が生じ、これが電子の密度に加え、移動度の変化に起因することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The change of the channel resistance in an AlGaIn/GaN HEMT, induced by the bending of the sample is investigated. It is shown that this piezo-resistance results mainly from the change in the polarization charges which are generated at the surface and the interface regions of the sample by the piezoelectric effect in the wurtzite materials. As the polarization charge on the surface is partly compensated by the charges induced in surface states or a metal electrode, the surface state density can be evaluated by studying the piezo-resistance of two samples with and without the metal.

For comparison, the piezo-resistance of AlGaAs/GaAs HEMTs is studied to show that the resistance change in this system is due to the deformation-induced breakdown of crystal symmetry of the sample. It is found that this change of resistance results not only from the change in the electron concentration but also from the change of electron mobilities.

研究分野：半導体電子工学

キーワード：GaN HEMT piezo効果 表面準位 界面準位 電界効果トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

AlGa_N 膜を GaN 結晶上に載せた HEMT は高速パワー素子として重要である。この素子の伝導特性を決めるチャンネル内の電子の面密度は、両物質の表面と界面に生じる分極電荷に加え、素子表面の局在準位の荷電状態にも左右される。このため、関連要因の定量評価と解明が待たれていた。そこで、種々の試料を一軸性の外力で歪ませ、ピエゾ電界の増減に伴うチャンネル抵抗の変化を調べ、新たな知見を得ることを試みた。

2. 研究の目的

AlGa_N 膜を GaN 結晶上に載せた HEMT では、素子特性を支配するチャンネル内の電子の面密度が、両物質に固有の分極作用によって両者の表面や界面に発生する分極電荷の面密度で大きく左右される。また、AlGa_N 層表面の局在準位 (表面準位) の荷電状態にも影響される。これらの物理要因を解明するために、素子を外力で歪ませた時のチャンネル抵抗の変化 (ピエゾ抵抗) を計測し、その解析を目指した。特に、素子表面上に金属電極を設け、表面準位の電荷を遮蔽するか否かによって生じるピエゾ抵抗の違いから、表面準位密度を推定する新たな手法の可能性を探った。また、AlGaAs 膜を GaAs 結晶に載せた HEMT のピエゾ抵抗効果も調べ、GaN 系素子との違いの解明を目指した。

3. 研究の方法

ウルツ鉱構造を持つ AlGa_N/GaN 系の HEMT ウェーフアでは、両物質に固有の自発分極とピエゾ分極が生じるため、両者の表面や界面には分極電荷が発生する。HEMT 素子の特性を支配するチャンネル内の電子の面密度は、この分極電荷に加え、AlGa_N 層の表面に存在する局在準位 (表面準位) の荷電状態に影響される。そこで、AlGa_N 層の表面に金属電極を設けた素子と設けない 2 種類の素子を形成し、それらを梁状構造に貼付け、一軸性の外力で歪ませた時のチャンネルの抵抗変化を計測した。理論モデルと対比し、歪の増減に伴うピエゾ分極電荷の変化が、チャンネル内の電子密度を変化させる主要因であるかを検討した。その際、AlGaAs 膜上の金属電極の有無に依り、表面準位の荷電状態の変化が遮蔽されるか否かが決まることに着目し、両者のピエゾ抵抗特性の対比から、表面準位の密度をある程度推定できることを示した。また、素子を歪ませる際、ホール効果も計測し、チャンネル抵抗の変化において、電子密度と電子移動度の変化がどう寄与しているかの計測も行った。さらに、自発分極の存在しない閃亜鉛鉱構造を持った AlGaAs/GaAs 系 HEMT についても同様の計測を行い、AlGa_N/GaN 系素子と対比することで、両者の違いを明らかにした。

4. 研究成果

1) AlGa_N/GaN 系 HEMT 素子および

AlGaAs/GaAs 系 HEMT 素子を梁状のステンレス基板に貼付け、4 点支持機構を用いて一軸性の外力を加えることにより、梁とその上の半導体試料に所定の曲げ歪みを加え、チャンネル抵抗が歪みの関数としてどう変化するかを計測を可能とした。また、この際、永久磁石を用いたホール効果計測も可能とし、電子の密度と移動度の変化を分離計測することも可能とした。

2) AlGa_N/GaN 系 HEMT のチャンネル内の電子の面密度 N_s の決定には、両物質が接するヘテロ接合の GaN 側に発生する負に帯電した分極電荷 ($-eN_G$) と AlGa_N 側に発生する ($+eN_A$) の差分 $e(N_A - N_G)$ が支配的な役割を果している。このため、外力に起因する歪みは、両物質内部のピエゾ電界を増減させ、その結果で生じた ($N_A - N_G$) の変化が、電子の面密度の変化の主たる要因であることを明らかにした。なお、厳密に言えば、GaN 側の空乏層電界 (eN_{dep}/e) の変化、AlGa_N 側の表面準位の電荷の変化、さらに、電子の移動度の変化なども、影響する。これらの点に関する成果は、以下の項目で述べる。

3) AlGa_N/GaN 系 HEMT では、AlGa_N の表面にある表面準位の荷電状態および表面電位の影響が、チャンネル中の電子の面密度に影響する。特に、試料を歪ませ、ピエゾ電界を E だけ変化させると、表面準位の充放電が生じるが、表面準位の状態密度 N_{DOS} の大きさに応じて、(E/eN_{DOS}) だけ、表面電位が変化する。他方、AlGa_N 表面に金属電極を設けると、金属の状態密度が高いため、表面電位の変化はほぼ無視できる。この二つの状況の差異は、チャンネル中の電子の密度の変化 N_s の差異として観測可能である。逆に、 N_s の差異の観測と解析から、表面準位密度を推定できることが明らかとなった。なお、GaN 層の基板側でも同様の効果が生じるはずであるが、基板側に存在する荷電不純物や局在準位による影響が、二種の試料において、共通である限り、上の議論は成立する。

4) AlGa_N/GaN 系 HEMT と AlGaAs/GaAs 系 HEMT では、チャンネル中の電子の面密度が変化すると、電子のフェルミエネルギーや波動関数 (ψ) が変化するため、電子の移動度も同時に変化する。従って、チャンネルの抵抗やコンダクタンスの変化率は、近似的に、電子数の変化率と移動度の変化率の和で決まる。本研究では、ピエゾ抵抗の計測を室温で行ったため、移動度の電子密度依存性が弱い場合、多くの場合、ほぼ無視できることも明らかにした。なお、試料温度が極めて低い場合、GaN 系 HEMT の移動度は、高い電子密度領域で電子密度の二乗に逆比例するため、無視できなくなる。また、GaAs 系 HEMT では、極低温での移動度が、電子密度の 1.5 乗に比例するため、注意を要する。なお、GaAs 系 HEMT では、室温において、AlGaAs 中の電子によるコンダクタンス成分があり、その影響も考慮する必要がある。この点については、次項で述べる。

5) n-AlGaAs/GaAs 構造を持つ GaAs 系の HEMT は、高速用の通信素子として重要であり、AlGaIn/GaN 構造を持つ GaN 系 HEMT とは補完的な役割を果たしている。GaAs 系結晶は、立方対称性を持つ閃亜鉛鉱構造をもつため、自発分極は存在せず、ピエゾ電界は、反転対称性が崩れる結晶の [111] 方向に限って生じることとされてきた。本研究では、これらの点を考慮し、GaAs 系 HEMT のピエゾ抵抗効果を調べ、以下の新知見を得た。まず、(111) 面上に形成した素子において、期待通りのピエゾ抵抗効果を観測したが、(100) 面上の素子でも、ピエゾ効果の生じることを見出した。これは、今回の歪み印加機構では、GaAs 結晶が (100) 面内の [011] 方向に沿って伸縮するため、立方対称性が損なわれ、その結果、ピエゾ分極が生じることによることが明らかになった。さらに、室温でのピエゾ抵抗計測の際に、ホール効果も計測して、電子の密度変化と移動度変化を分離計測したところ、移動度変化の寄与が少なくないことが明らかとなった。この大きな移動度変化は、計測対象とした GaAs 系素子では、低移動度の AlGaAs 中の電子の伝導と高移動度の GaAs 中の電子の伝導が寄与し、両者の割合が歪みの作用で、変化したことによるものと思われる。

6) 以上の研究に加え、AlGaAs/GaAs/AlGaAs 三層構造から成る素子などを設計試作し、上下のヘテロ界面に沿って、n チャネルと p チャネルとが併存するユニークな HEMT 素子を設計・試作し、その伝導特性や光応答なども調べ、種々の新知見を得た。特に、両チャネルの間の相互作用により、特異なトランジスタやダイオード機能を示すことを明らかにした。

5 . 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 12 件)

T.Kushida, M.Ohmori and H.Sakaki
Photocurrent and photoluminescence characteristics of AlGaAs/GaAs doubleheterostructures with a pair of two-dimensional electron and hole channels
J. Applied Physics Vol.122, 10, 104502 doi: 10.1063/1.5001507 (Sept. 2017)

T.Kawazu, T.Noda, Y.Sakuma and H.Sakaki
Effects of Ga deposition rate and Sb flux on morphology of GaSb quantum dots formed on GaAs
Phys. Status Solidi C 14, No. 1–2, 1600109/ DOI 10.1002/pssc.201600109 (2017)

K.Sugimura, M.Ohmori, T.Noda, T.Kojima, S.Kado, P.Vitushinskiy, N.Iwata and H.Sakaki
InGaAs triangular barrier photodiodes for

high-responsivity detection of near-infrared light
Appl. Phys. Express Vol.9, 6, pp. 062101-1-4 DOI: 10.7567/APEX.9.062101 (Jun. 2016)

P.Vitushinskiy, M.Ohmori, T.Kuroda, T.Noda, T.Kawazu and H.Sakaki
GaAs-based triangular barrier photodiodes with embedded type-II GaSb quantum dots
Appl. Phys. Express Vol. 9, 5, pp. 052002-1-4 DOI: 10.7567/APEX.9.052002 (May 2016)

T.Kawazu, T.Noda, Y.Sakuma and H.Sakaki
Excitation power dependence of photoluminescence spectra of GaSb type-II quantum dots in GaAs grown by droplet epitaxy
AIP Advances Vol. 6, 4, pp. 045312-1-7 DOI: 10.1063/1.4947464 (Apr. 2016)

P.Vitushinskiy, M.Ohmori, T.Kuroda, T.Noda, T.Kawazu, H.Sakaki,
GaAs-based triangular barrier photodiodes with embedded type-II GaSb quantum dots
Appl. Phys. Express. 9, (2016) in press 査読有

T.Noda, M.Elborg, T.Mano, T.Kawazu, L. Han, and H.Sakaki
Bias voltage dependence of two-step photocurrent in GaAs/AlGaAs quantum well solar cells
J. Appl. Phys. Vol. 119, 8, 085105 DOI: 10.1063/1.4942215 Feb.28, 2016

T.Kushida, M.Ohmori, S.Osanai, D. Kawamoto, T.Noda, and H.Sakaki
Electrical characteristics of AlGaAs/GaAs heterostructures with a pair of 2-D electron and hole channels
IEEE Transactions on electron devices Vol. 62 11 pp. 3619-3626 DOI: 10.1109/TED.2015.2474735 Nov. 2015

T.Kawazu, T.Noda, T.Mano, Y.Sakuma, H.Sakaki
Growth and optical properties of GaSb/GaAs type-II quantum dots with and without wetting layer
Jpn. J. Appl. Phys., 54, 04DH01, DOI:10.7567/JJAP.54.04DH01, Jan., 2015

T.Kawazu, T.Noda, Y.Sakuma, H.Sakaki
Lateral current generation in n-AlGaAs/GaAs heterojunction channels by Schottky-barrier gate illumination

Appl. Phys. Lett., 106, 022103,
DOI:10.1063/1.4905661, Jan., 2015

T.Kawazu, T.Noda, T.Mano, Y.Sakuma,
H.Sakaki
Growth of GaSb quantum dots on GaAs
(111)A
e-Journal of Surface Science and
Nanotechnology, 12, pp.304-306,
DOI:10.1380/ejssnt.2014.304, Jun., 2014

T.Kawazu, T.Noda, T.Mano, Y.Sakuma,
H.Sakaki
Growth of GaSb and AlSb quantum dots on
high-index GaAs substrates
Appl. Phys. Express, 7, 5, 055502,
DOI:10.7567/APEX.7.055502, Apr., 2014

〔学会発表〕(計 15 件)

柴田憲治、大森雅登、榎裕之、平川一彦
ナノギャップ電極と結合した単一自己組織
化 InSb 量子ドットにおける電気伝導特性
第 77 回応用物理学会秋季学術講演会・朱鷺
メッセ、新潟県新潟市
2016 年 9 月 13 日～9 月 16 日

T.Kawazu, T.Noda, Y.Sakuma, and
H.Sakaki
Effect of Ga deposition rate and antimony
flux on morphology of GaSb quantum dots
formed on GaAs
The 43rd International Symposium on
Compound Semiconductor (国際学会)・
International Conference Center, Toyama,
Japan
2016 年 6 月 26 日～6 月 30 日

川津琢也、野田武司、佐久間芳樹、榎裕之
微傾斜 GaAs(111)B 基板上に作製した GaSb タイプ
ナノロッドの光学異方性
第 63 回応用物理学会春季学術講演会・東京工
業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区)
2016 年 3 月 20 日

杉村和也、大森雅登、野田武司、
Vitushinskiy Pavel、岩田直高、榎裕之
赤外用三角障壁フォトリソスタの暗電
流低減と室温動作
第 76 回応用物理学会秋季学術講演会・名古屋
国際会議場(愛知県名古屋市)
2015 年 9 月 15 日

大森雅登、野田武司、小嶋友也、杉村和
哉、Vitushinskiy Pavel、岩田直高、榎裕之
InP(100)基板上における InAs/InAlGaAs 量子
ロッド構造の形成
第 76 回応用物理学会秋季学術講演会・名古屋

屋国際会議場(愛知県名古屋市)
2015 年 9 月 14 日

川津琢也、野田武司、佐久間芳樹、榎裕之
ショットキバリアゲート光照射による
n-AlGaAs(001)ヘテロ接合チャネルの面内電
流生成
第 76 回応用物理学会秋季学術講演会・名古屋
国際会議場(愛知県名古屋市)
2015 年 9 月 14 日

T.Noda, M.Elborg, T.Mano, L.Han and
H.Sakaki
Characterization of GaSb/GaAs quantum
dot solar cells with deep energy states
17th International Conference on Modulated
Semiconductor Structures・仙台国際センタ
ー(宮城県仙台市)
2015 年 7 月 30 日

大森雅登、杉村和哉、小嶋友也、加戸作
成、野田武司、Vitushinskiy Pavel、岩田直
高、榎裕之
三角障壁フォトリソスタによる高感度
赤外光検出
第 62 回応用物理学会春季学術講演会・東海
大学 湘南キャンパス(神奈川県平塚市)
2015 年 3 月 11 日～3 月 14 日

川津琢也、野田武司、佐久間芳樹、榎裕之
GaSb/GaAs 量子ドットの光学異方性における
後熱処理の効果
第 62 回応用物理学会春季学術講演会・東海
大学 湘南キャンパス(神奈川県平塚市)
2015 年 3 月 11 日～3 月 14 日

M.Elborg, T.Noda, A.Bowman,
T.Kawazu, T.Mano, L.Han, H.Sakaki
Characterization and solar cell
application of GaSb/AlGaAs quantum dots
WCPEC-6(The 6th World Conference on
Photovoltaic Energy Conversion)・Kyoto
International Conference Center(京都市左
京区)
2014 年 11 月 23 日～11 月 27 日

川津琢也、野田武司、間野高明、佐久間
芳樹、榎裕之
高指数面 GaAs 基板上の GaSb および AlSb 量
子ドットの成長
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会・北海
道大学 札幌キャンパス(札幌市北区)
2014 年 9 月 17 日～9 月 20 日

秋山芳広、丹羽亮介、榎裕之
AlGaIn/GaN HEMT における界面凹凸散乱と合金
散乱の大小関係
第 75 回応用物理学会秋季学術講演会・北海

道大学 札幌キャンパス(札幌市北区)
2014年9月17日~9月20日

T.Kawazu, T.Noda, T.Mano, Y.Sakuma,
H.Sakaki

Growth and optical properties of GaSb/GaAs
type- quantum dots with and without
wetting layer

SSDM2014(2014 International Conference on
Solid State Devices and Materials)・
Tsukuba International Congress Center(茨
城県つくば市)

2014年9月8日~9月11日

T.Noda, M.Elborg, T.Mano, T.Kawazu
L.Han, H.Sakaki

Photocurrent due to two-step absorption of
super- and sub-bandgap photons in
GaAs/AlGaAs quantum well solar cells

ISCS2014(The 41st International Symposium
on Compound Semiconductors)・Montpellier,
France

2014年5月11日~5月15日

T.Kojima, M.Ohmori, P.Vitushinskiy,
H.Sakaki

Transport of electrons in self-assembled
GaInAs quantum rod structures

ISCS2014(The 41st International Symposium
on Compound Semiconductors)・Montpellier,
France

2014年5月11日~5月15日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榊 裕之 (SAKAKI, Hiroyuki)

豊田工業大学・工学(系)・研究科(研究
院)・学長

研究者番号: 90013226

(2) 研究分担者

大森 雅登 (OMORI, Masato)

豊田工業大学・工学(系)・研究科(研究
院)・嘱託研究員

研究者番号: 70454444

VITUSHINSKIY, Pavel

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・
研究補助者

研究者番号: 30545330

秋山 芳広 (AKIYAMA, Yoshihiro)

豊田工業大学・工学(系)・研究科(研究
院)・研究補助者

研究者番号: 60469773