

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6066337号
(P6066337)

(45) 発行日 平成29年1月25日(2017.1.25)

(24) 登録日 平成29年1月6日(2017.1.6)

(51) Int.Cl. F I
HO 1 L 21/66 (2006.01) HO 1 L 21/66 L
 HO 1 L 21/66 U

請求項の数 1 (全 9 頁)

(21) 出願番号	特願2014-61734 (P2014-61734)	(73) 特許権者	000003207 トヨタ自動車株式会社
(22) 出願日	平成26年3月25日(2014.3.25)		愛知県豊田市トヨタ町1番地
(65) 公開番号	特開2015-185733 (P2015-185733A)	(73) 特許権者	592032636
(43) 公開日	平成27年10月22日(2015.10.22)		学校法人トヨタ学園
審査請求日	平成28年5月11日(2016.5.11)		愛知県名古屋市天白区久方2丁目12番地1
		(74) 代理人	110000110 特許業務法人快友国際特許事務所
		(72) 発明者	富田 英幹 愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内
		(72) 発明者	榊 裕之 愛知県名古屋市天白区久方2丁目12番地1 豊田工業大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体の表面・界面準位を評価する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1半導体層と、第1半導体層に対してヘテロ接合されている第2半導体層を有し、前記ヘテロ接合界面に沿って形成された伝導チャネルを有する半導体装置の第1半導体層と第2半導体層の少なくとも一方の界面準位を評価する方法であって、

半導体装置に対して、前記ヘテロ接合界面に平行な方向に沿って歪みを付与し、歪みの付与前後における伝導チャネル層の電荷変化量を測定する工程を有する方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本明細書が開示する技術は、ヘテロ接合界面に沿って形成された伝導チャネルを有する半導体装置の界面準位を評価する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献1には、高周波で静電容量Cのバイアス電圧V依存性を計測する手法(C-V法)によって半導体と絶縁体の界面準位を評価する方法が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2013-038340号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

特許文献1の方法は、半導体と金属電極を設けた絶縁体(MIS構造)の界面にしか適用することができない。すなわち、他の構造を有する界面の界面準位や、半導体が露出している表面の表面準位(以下、表面準位と界面準位を併せて、界面準位と呼ぶ)を評価することができない。また、半導体の界面準位を評価する方法として、XPS法(X線光電子分光法)が知られている。しかしながら、XPS法では、X線が届かない半導体の内部における準位を評価することができない。すなわち、XPS法では、露出している表面の界面準位しか評価することができない。このように、従来は、MIS構造以外の構造を有する界面の界面準位を評価することができなかつた。また、従来は、界面の界面準位と露出している表面の界面準位を同一の方法で評価することができず、これらを定量的に比較することができなかつた。

10

【課題を解決するための手段】

【0005】

本明細書は、第1半導体層と、第2半導体層がヘテロ接合され、前記ヘテロ接合界面に沿って伝導チャネルを有する半導体装置の第1半導体層と第2半導体層の少なくともどちらか一方の界面準位を評価する方法を開示する。この方法は、半導体装置に対して、前記ヘテロ接合界面に平行な方向に沿って歪みを付与し、歪みの付与前後における伝導チャネルの電荷変化量を測定する工程を有する。

20

【0006】

この方法では、ヘテロ接合界面に平行な方向に沿って歪みを付与することで、各半導体層内でピエゾ分極電荷を発生させる。すると、ピエゾ分極電荷により半導体層内の内部電界(ヘテロ接合を垂直に横断する方向の電界)が変化するため、第1半導体層のヘテロ接合界面とは反対側の端面(露出している表面または2つの層の境界面)と、第2半導体層のヘテロ接合界面とは反対側の端面(露出している表面または2つの層の境界面)の電位が変化する。これによって、これらの端面の界面準位で電荷が充電または放電される。すると、この電荷状態の変化を補うために、移動度が高い伝導チャネルで電荷量に変化する。したがって、この伝導チャネルの電荷変化量を測定することで、第1半導体層または第2半導体層の界面準位を評価することができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図1】半導体装置10(試料)の縦断面図。

【図2】評価装置にセットされた半導体装置10を示す図。

【図3】試料1、2の伝導チャネルの電荷変化量の測定結果を示すグラフ。

【図4】界面準位密度の見積値を示すグラフ。

【発明を実施するための形態】

【0008】

図1に示す半導体装置10は、実施例の方法によって界面準位を評価する対象の試料である。半導体装置10は、基板12と、パuffers層14と、エピタキシャル層16と、エピタキシャル層20を有している。基板12は、シリコンまたはサファイア等により構成されている。パuffers層14は、基板12上に形成されている。パuffers層14とエピタキシャル層16の間には、エピタキシャル層16とは異なる半導体材料によって構成された層やドーピング層を加えることもできるが、多くは、エピタキシャル層16は、パuffers層14上に形成されている。エピタキシャル層16は、例えば、Ga₂N等により構成されている。エピタキシャル層20は、エピタキシャル層16上に形成されている。エピタキシャル層20は、例えば、AlGa₂N等により構成されている。したがって、エピタキシャル層16とエピタキシャル層20の界面18は、ヘテロ接合界面となっている。エピタキシャル層16内であって、ヘテロ接合界面18の近傍には、伝導チャネル層17が形成されている。伝導チャネル層17は、二次元電子ガスにより構成されている。伝導チャ

40

50

ネル層 17 では、電子の移動度が極めて高い。また、図 1 では、エピタキシャル層 20 の表面側界面 21 が露出しているが、後述するように、エピタキシャル層 20 の表面側界面 21 が金属膜や絶縁膜によって覆われていてもよい。半導体装置 10 は、電極 30、32 を有している。電極 30、32 は、伝導チャンネル層 17 に接続されている。また、図 1 には示されていないが、半導体装置 10 は、図 2 の電極 34、36 を有しており、この間での伝導チャンネル層 17 の電荷量を 2 端子測定できる。電極 34、36 は、伝導チャンネル層 17 に接続されている。

【0009】

次に、実施例の界面準位密度の評価方法について説明する。この方法では、エピタキシャル層 20 の表面側界面 21 の界面準位とエピタキシャル層 16 のバッファ層 14 との基板側界面 15 の界面準位を評価する。界面準位を評価する際には、図 2 に示すように半導体装置 10 を評価装置に取り付ける。評価装置は、図 2 に示す 4 本のピラー 41 ~ 44 と、定電流源 46 と、電圧計 48 と、歪みゲージ 50 を有する。ピラー 41、42 は半導体装置 10 の表面側に配置され、ピラー 43、44 は半導体装置 10 の裏面側に配置される。半導体装置 10 の表面に沿う方向において、ピラー 41、42 は、ピラー 43、44 の間に配置される。4 端子測定の場合、定電流源 46 は、電極 34 と電極 36 の間に接続される。定電流源 46 によって、電極 34、36 を介して、伝導チャンネル層 17 に一定の電流を流すことができる。電圧計 48 は、電極 30 と電極 32 の間に接続される。電圧計 48 は、電極 30 と電極 32 の間の電圧（すなわち、伝導チャンネル層 17 内の電位差）を測定する。電極 34、36 がない 2 端子計測の場合は、定電流源 46 と電圧計 48 はいずれも、電極 30 と電極 32 の間に接続され、その間の電圧を測定する。歪みゲージ 50 は、半導体装置 10 の裏面に取り付けられる。

【0010】

界面準位を評価する際には、まず、定電流源 46 により伝導チャンネル層 17 に一定電流を流す。そして、一定電流を流しながら、ピラー 41 ~ 44 によって半導体装置 10 に歪みを加える。具体的には、ピラー 41、42 を半導体装置 10 に向かって加圧する。これによって、半導体装置 10 が反るように外力を加える。このように外力を加えることで、図 1 の矢印 90 に示すように、半導体装置 10 内の各層 12、14、16、20 に対して引張応力を加え、この方向に歪みを生じさせる。歪みゲージ 50 は、この引張方向における半導体装置 10 の歪み量を測定する。なお、矢印 90 に示す方向は、ヘテロ接合界面 18 の平行方向に相当する。

【0011】

半導体装置 10 に歪みが生じると、エピタキシャル層 16、20 内で圧電効果（ピエゾ効果）により分極が生じる。これによって、図 1 に示すように、エピタキシャル層 20 内に分極層 24、25 が生じ、エピタキシャル層 16 内に分極層 26、27 が生じる。分極層 24 は、エピタキシャル層 20 の表面側界面 21 近傍の領域に生じる分極電荷により構成される分極層であり、本実施例では電荷 $-N_A [cm^{-2}]$ により構成される。分極層 25 は、エピタキシャル層 20 のヘテロ接合界面 18 近傍の領域に生じる分極電荷により構成される分極層であり、本実施例では電荷 $N_A [cm^{-2}]$ により構成される。分極層 24 に生じる電荷 $-N_A$ と分極層 25 に生じる電荷 N_A の絶対値は等しく、常に電荷の状態は、どちらかがプラスであればもう一方はマイナスである。分極層 26 は、エピタキシャル層 16 のヘテロ接合界面 18 近傍の領域に生じる分極電荷により構成される分極層であり、本実施例では電荷 $-N_B [cm^{-2}]$ により構成される。分極層 27 は、エピタキシャル層 16 の基板側界面 15 近傍の領域に生じる分極電荷により構成される分極層であり、本実施例では電荷 $N_B [cm^{-2}]$ により構成される。分極層 26 に生じる電荷 $-N_B$ と分極層 27 に生じる電荷 N_B の絶対値は等しく、常に電荷の状態は、どちらかがプラスであればもう一方はマイナスである。このようにエピタキシャル層 16、20 において分極が生じることで、エピタキシャル層 16、20 の厚み方向（結晶成長方向）における電界が変化するため、表面側界面 21 の電位及び基板側界面 15 の電位が変化する。以下では、このときの表面側界面 21 の電位の変化を $V_c [V]$ で表し、

10

20

30

40

50

このときの基板側界面 15 の電位の変化を V_D [V] で表す。その結果、表面側界面 21 及び基板側界面 15 において電荷の充放電が生じる。ここでは、表面側界面 21 における電荷の変化量を N_C [cm^{-2}] で表し、基板側界面 15 における電荷の変化量を N_D [cm^{-2}] で表す。これによって、半導体装置 10 全体で電荷の均衡が崩れるため、これを補うために、最も電子の移動度が高い伝導チャネル層 17 の電子の数が変化する。このため、伝導チャネルに電流を流した状態では、電極 30 と電極 32 の間の電圧が変化する。この電圧変化を電圧計 48 で検出することで、伝導チャネル層 17 における電子（電荷）の数の変化 N_S [cm^{-2}] を算出する。

【0012】

伝導チャネル層 17 の電荷変化量 N_S は、上下のエピタキシャル層内に伝導チャネル層内の電子以外の自由荷電粒子がない場合は、以下の関係式を満たす。

(数式 1)

$$N_S = N_C + (-N_A) + N_A + (-N_B) + N_B + N_D = N_C + N_D$$

【0013】

また、上述した表面側界面 21 の電位の変化 V_C は、以下の数式により表すことができる。

(数式 2)

$$V_C = \{ -(-N_A + N_C) \} \cdot d_1 \cdot e / \epsilon_1$$

【0014】

なお、数式 2 において、記号 d_1 [m] は、エピタキシャル層 20 の厚みであり、記号 ϵ_1 [F/m] はエピタキシャル層 20 の誘電率であり、記号 e は電気素量である。また、表面側界面 21 の界面準位密度 D_{ITC} は、以下の数式により表すことができる。

(数式 3)

$$D_{ITC} = N_C / V_C$$

【0015】

数式 2 及び数式 3 から、値 N_C と、値 N_A が分かれば、界面準位 D_{ITC} を求めることが可能となることが分かる。

【0016】

また、上述した基板側界面 15 の電位の変化 V_D は、以下の数式により表すことができる。

(数式 4)

$$V_D = \{ -(N_B + N_D) \} \cdot d_2 \cdot e / \epsilon_2$$

【0017】

なお、数式 4 において、記号 d_2 [m] は、エピタキシャル層 16 の厚みであり、記号 ϵ_2 [F/m] はエピタキシャル層 16 の誘電率であり、記号 e は電気素量である。また、基板側界面 15 の界面準位密度 D_{ITD} は、以下の数式により表すことができる。

(数式 5)

$$D_{ITD} = N_D / V_D$$

【0018】

数式 4 及び数式 5 から、値 N_D と値 N_B が分かれば、界面準位 D_{ITD} を求めることが可能なことが分かる。

【0019】

上述した数式 1 から、値 N_C と値 N_D の何れか一方が既知であれば、図 2 の評価装置によって求めた値 N_S を用いて、値 N_C と値 N_D の残りの一方を求めることが可能となることが分かる。

【0020】

例えば、バッファ層 14 が十分にドーピングされた低抵抗のシリコンにより構成されている場合には、 $N_D = N_B$ が成立する。また、バッファ層 14 に代えて絶縁層が形成されている場合（すなわち、エピタキシャル層 16 と絶縁層によって基板側界面 15 が形

10

20

30

40

50

成されるなど、界面準位の充放電の生じない場合)には、 $N_D = 0$ が成立する。これらの場合には、上述した数式1、2、3において未知の値が値 N_A のみとなるので、値 N_A を求めることで表面側界面21の界面準位密度 D_{ITC} を算出することができる。

【0021】

表面側界面21上に金属膜が形成されている場合(すなわち、表面側界面21が露出した面ではなく、金属膜とエピタキシャル層20の界面である場合)には、 $N_C = N_A$ が成立する。また、表面側界面21上に理想的な絶縁膜が形成されている場合(すなわち、表面側界面21が露出した面ではなく、絶縁膜とエピタキシャル層20の界面である場合)には、 $N_C = 0$ が成立する。これらの場合には、上述した数式1、4、5において未知の値が値 N_B のみとなるので、値 N_B を求めることで基板側界面15の界面準位密度 D_{ITD} を算出することができる。

10

【0022】

次に、ピエゾ分極により生じる電荷 N_A 、 N_B の算出方法について説明する。電荷 N_A 、 N_B は、歪みゲージ50により計測した歪み(すなわち、図1の矢印90に示す方向の歪み)と、材料の物性に基づいて、以下のように算出する。

【0023】

エピタキシャル層20がAlGaNであり、エピタキシャル層16がGaNである場合は、これらはいずれも六方晶である。六方晶における応力 $[N]$ は、歪みと弾性定数 $C[N/m^2]$ により以下のように表される。

20

【数1】

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11}C_{12}C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}C_{11}C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{13}C_{13}C_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

【0024】

30

ここで、数1中の各記号 σ 、 C 、 ε に付されている添字は、一般化フックの法則で表される線形応力-歪み関係式 $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ に基づいている。 ε_{ij} に付されている添字は、線形応力-歪み関係式をそのまま当てはめたテンソル表記である。六方晶では、テンソル表記11はx軸方向(図1の矢印90の方向)、テンソル表記22はy軸方向(図1の奥行方向)、テンソル表記33はz軸方向(各層の厚み方向)の垂直応力またはその応力に対応する歪みを表している。また、六方晶では、テンソル表記12はxy平面内、テンソル表記31はxz平面内、テンソル表記23はyz平面内のせん断応力またはその応力に対応する歪みを表している。また、 C に付されている添字は、テンソル表記を行列表記に置き換えて示している。行列表記1はテンソル表記11を表し、行列表記2はテンソル表記22を表し、行列表記3はテンソル表記33を表し、行列表記4はテンソル表記23を表し、行列表記5はテンソル表記31を表し、行列表記6はテンソル表記12を表す。六方晶では、行列表記11及び33は垂直応力、行列表記13は垂直応力とせん断応力、行列表記44はせん断応力に対応した弾性定数を表す。図2に示す評価装置により加えられる応力(図1の矢印90の方向に加えられる応力)はx軸方向の一軸性の応力であるので、 $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{31} = \varepsilon_{12} = 0$ である。したがって、数1から、 $\sigma_{23} = \sigma_{31} = \sigma_{12} = 0$ 、 $C_{44} = 0$ が成立する(但し、 $C_{11} \neq C_{12}$ とする)。したがって、以下の数式が成立する。

40

【数 2】

$$\begin{cases} \sigma_{11} = C_{11} \cdot \varepsilon_{11} + C_{12} \cdot \varepsilon_{22} + C_{13} \cdot \varepsilon_{33} \\ 0 = C_{12} \cdot \varepsilon_{11} + C_{11} \cdot \varepsilon_{22} + C_{13} \cdot \varepsilon_{33} \\ 0 = C_{13} \cdot \varepsilon_{11} + C_{13} \cdot \varepsilon_{22} + C_{33} \cdot \varepsilon_{33} \end{cases}$$

【0025】

図 2 に示す評価装置により半導体装置 10 に加える応力は、応力 σ_{11} に相当する。また、評価装置の歪みゲージ 50 により検出される歪みは、歪み ε_{11} に相当する。また、半導体装置 10 の材料の物性から、弾性定数 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 及び C_{33} は既知である。したがって、数 2 から、y 軸方向の歪み ε_{22} と、z 軸方向の歪み ε_{33} を求めることができる。

10

【0026】

また、六方晶の歪みとピエゾ分極の関係は、以下の数式により表される。

【数 3】

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

20

数 3 において、 p はピエゾ分極 [C/m^2] を表しており、添字は行列表記によるものである。また、 e はピエゾ分極定数を表しており、添字は行列表記によるものである。ピエゾ分極 p_3 は z 軸方向の分極を表しており、上述した電荷 N_A 、 N_B に対応する。したがって、エピタキシャル層 20 のピエゾ分極定数 e に基づいて数 3 を解くことでピエゾ分極 p_3 を算出し、算出したピエゾ分極 p_3 に基づいて電荷 N_A を算出することができる。また、エピタキシャル層 16 のピエゾ分極定数 e に基づいて数 3 を解くことでピエゾ分極 p_3 を算出し、算出したピエゾ分極 p_3 に基づいて電荷 N_B を算出することができる。

30

【0027】

したがって、以上のように算出した電荷 N_A または N_B と、上述した数式 1 ~ 5 に基づいて、界面準位密度 D_{IT_C} または D_{IT_D} を得ることができる。

【0028】

以上に説明したように、実施例の方法によれば、表面側界面 21 が絶縁膜との界面ではない場合であっても、表面側界面 21 の界面準位密度を求めることができる。また、実施例の方法によれば、表面側界面 21 の界面準位密度と基板側界面 15 の界面準位密度を求めることができるため、これらの界面準位密度を定量的に比較することができる。

40

【0029】

また、値 N_C と値 N_D の両方が既知でない場合であっても、上記の方法は有用である。この場合、表面側界面 21 と基板側界面 15 の何れか一方の界面条件が同一であり、他方の界面条件が異なる複数の試料を用いることで、界面準位を評価することができる。例えば、図 3 と図 4 は、基板 12 がシリコンであり、バッファ層 14 が GaN であり、エピタキシャル層 16 が GaN であり、エピタキシャル層 20 が AlGaN であり、エピタキシャル層 20 の表面側界面 21 が絶縁膜 SiO_x により覆われている試料 1 (SiO_x/AlGaN/GaN) と、同様の構成であって表面側界面 21 が露出している試料 2 (AlGaN/GaN) を評価した結果を示している。図 3 の測定では、半導体装置 10 に加える歪みの量 ε を変化させながら、伝導チャネル層 17 の電荷変化量 N_S を測定した

50

。また、図4は、図3の結果から見積もった表面側界面21の界面準位密度 D_{IT_C} と基板側界面15の界面準位密度 D_{IT_D} を示している。試料1、2の基板側界面15の界面条件は同一であるため、試料1、2で界面準位密度 D_{IT_D} は同一となる。したがって、試料1、2で界面準位密度 D_{IT_D} が同一となるように見積もることで、試料1、2の表面側界面21の界面準位密度 D_{IT_C} を算出することができる。このように算出される界面準位密度は、見積値ではあるものの、界面準位密度の桁数を評価するのに非常に有効である。

【0030】

また、単一の試料を評価する場合であって、値 N_C と値 N_D の両方が既知でない場合でも、表面側界面21と基板側界面15とで界面準位密度の桁数を比較することは可能である。

10

【0031】

以上、本発明の具体例を詳細に説明したが、これらは例示にすぎず、特許請求の範囲を限定するものではない。特許請求の範囲に記載の技術には、以上に例示した具体例をさまざまに変形、変更したものが含まれる。

本明細書または図面に説明した技術要素は、単独であるいは各種の組み合わせによって技術的有用性を発揮するものであり、出願時請求項記載の組み合わせに限定されるものではない。また、本明細書または図面に例示した技術は複数目的を同時に達成するものであり、そのうちの一つの目的を達成すること自体で技術的有用性を持つものである。

【符号の説明】

20

【0032】

10：半導体装置

12：基板

14：パッファ層

15：基板側界面

16：エピタキシャル層

17：伝導チャンネル層

18：ヘテロ接合界面

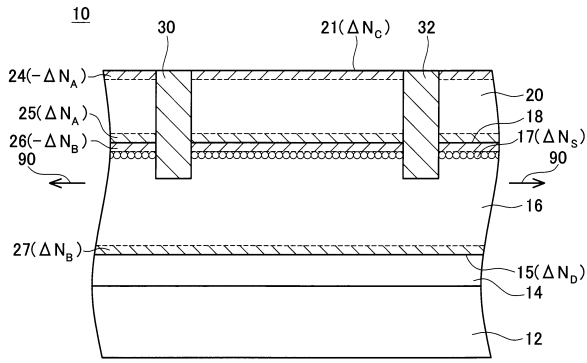
20：エピタキシャル層

21：表面側界面

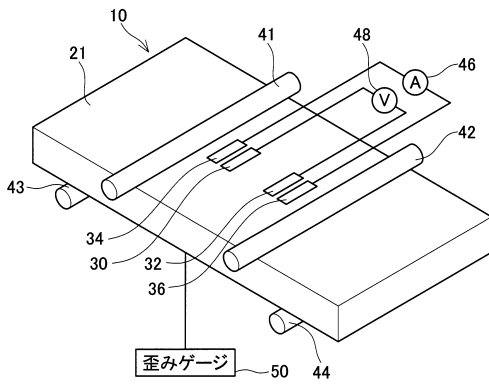
24～27：分極層

30

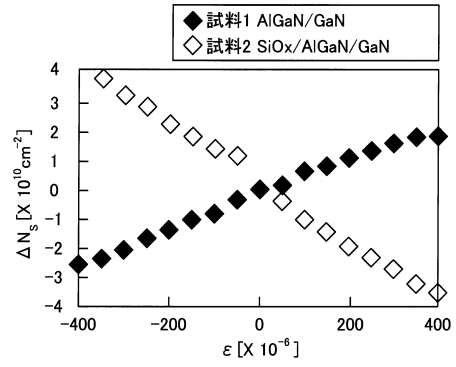
【図1】



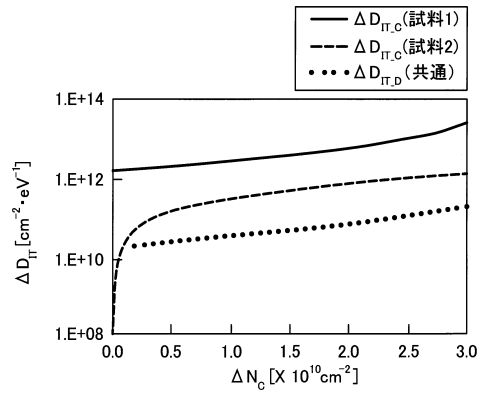
【図2】



【図3】



【図4】



フロントページの続き

(72)発明者 保木井 美和
愛知県名古屋市天白区久方2丁目12番地1 豊田工業大学内

審査官 堀江 義隆

(56)参考文献 特開2000-68291(JP,A)
特開2013-74281(JP,A)
特開2013-38340(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01L 21/66