

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6820224号
(P6820224)

(45) 発行日 令和3年1月27日 (2021.1.27)

(24) 登録日 令和3年1月6日 (2021.1.6)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 L 29/861 (2006.01)	HO 1 L 29/91 F
HO 1 L 29/868 (2006.01)	HO 1 L 33/32
HO 1 L 33/32 (2010.01)	HO 1 L 29/91 H
HO 1 L 29/201 (2006.01)	HO 1 L 29/201

請求項の数 5 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2017-73471 (P2017-73471)	(73) 特許権者	504407000
(22) 出願日	平成29年4月3日 (2017.4.3)		パロ アルト リサーチ センター イン
(65) 公開番号	特開2017-188682 (P2017-188682A)		コーポレイテッド
(43) 公開日	平成29年10月12日 (2017.10.12)		アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94
審査請求日	令和2年4月3日 (2020.4.3)		304 パロ アルト カイオーテ ヒル
(31) 優先権主張番号	15/094, 639		ロード 3333
(32) 優先日	平成28年4月8日 (2016.4.8)	(74) 代理人	100094569
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)		弁理士 田中 伸一郎
早期審査対象出願		(74) 代理人	100088694
			弁理士 弟子丸 健
		(74) 代理人	100067013
			弁理士 大塚 文昭
		(74) 代理人	100086771
			弁理士 西島 孝喜
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体分極制御デバイス

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

III族窒化物半導体基板またはテンプレートを含む第1の層と、
 前記III族窒化物半導体基板またはテンプレートにわたって配設される第2のIII族窒化物半導体層と、
 前記第2のIII族窒化物半導体層にわたって配設される第3のIII族窒化物半導体層と、
 前記第3のIII族窒化物半導体層にわたって配設される第4のIII族窒化物半導体層と、
 前記第3のIII族窒化物半導体層と前記第4のIII族窒化物半導体層との間の界面でのpn接合と、
 前記第2のIII族窒化物半導体層と前記第3のIII族窒化物半導体層との間の分極ヘテロ接合と
 を含むデバイスであって、前記分極接合は、前記分極接合の一方の側に極性の固定電荷と、前記分極接合の反対側に反対極性の固定電荷を有し、無バイアスの場合、前記pn接合は、前記pn接合にわたって、前記pn接合に垂直なキャリアのフローに対抗する第1の電場を含み、前記分極接合は、前記分極接合にわたって、前記分極接合に垂直な反対に荷電されたキャリアのフローに対抗する第2の電場

を含む、デバイス。

【請求項 2】

10

20

前記 p n 接合と前記分極接合との間の距離が 2 5 n m ~ 5 0 0 n m である、
請求項 1 に記載のデバイス。

【請求項 3】

前記第 2 の I I I 族窒化物半導体層が I n A l N 層であり、
前記第 3 の I I I 族窒化物半導体層が G a N 層であり、
前記第 4 の I I I 族窒化物半導体層が G a N 層である、
請求項 1 に記載のデバイス。

【請求項 4】

前記第 2 の I I I 族窒化物半導体層が A l G a N 層であり、
前記第 3 の I I I 族窒化物半導体層が G a N 層であり、
前記第 4 の I I I 族窒化物半導体層が G a N 層である、
請求項 1 に記載のデバイス。

10

【請求項 5】

I I I 族窒化物半導体基板またはテンプレートを含む第 1 の層と、
前記 I I I 族窒化物半導体基板またはテンプレートにわたって配設される第 2 の I I I
族窒化物半導体層と、

前記第 2 の I I I 族窒化物半導体層にわたって配設される第 3 の I I I 族窒化物半導体
層と、

前記第 3 の I I I 族窒化物半導体層にわたって配設される第 4 の I I I 族窒化物半導体
層と、

20

前記第 3 の I I I 族窒化物半導体層と前記第 4 の I I I 族窒化物半導体層との間の界面
での p n 接合と、

前記第 2 の I I I 族窒化物半導体層と前記第 3 の I I I 族窒化物半導体層との間の分極
ヘテロ接合であって、前記分極接合は、前記分極接合の一方の側に極性の固定電荷と、前
記分極接合の反対側に反対極性の固定電荷を有し、無バイアスの場合、前記 p n 接合は、
前記 p n 接合にわたって、前記 p n 接合に垂直なキャリアのフローに対抗する第 1 の電場
を含み、前記分極接合は、前記分極接合にわたって、前記分極接合に垂直な反対に荷電さ
れたキャリアのフローに対抗する第 2 の電場を含む分極ヘテロ接合と、

第 1 および第 2 のコンタクトであって、前記第 1、第 2、第 3 および第 4 の層が前記第
1 のコンタクトと第 2 のコンタクトとの間に配設される第 1 および第 2 のコンタクトと、

30

前記第 1 のコンタクトと前記第 2 のコンタクトとの間に電氣的に結合された電圧源と
を含む回路。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、一般に半導体デバイスおよびこうしたデバイスを使用する回路に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体デバイス、例えばダイオード、バイポーラトランジスタ、金属酸化物電界効果ト
ランジスタ (M O S F E T)、および絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (I G B T) は
、半導体スイッチとして使用できる。半導体スイッチングデバイスは、一般に、ゼロでな
いスイッチオン電圧に到達するまで、感知できる量の電流を伝導しない。スイッチオン電
圧を超えると、デバイスは、ゼロでないオン抵抗を通して相対的に大きな電流を伝導する
。

40

【発明の概要】

【課題を解決するための手段】

【0003】

本明細書に記載される一部の実施形態は、I I I 族窒化物半導体基板またはテンプレ
ートを含む第 1 の層；この I I I 族窒化物半導体基板またはテンプレートにわたって配設さ
れた第 2 の I I I 族窒化物半導体層；この第 2 の I I I 族窒化物半導体層にわたって配設

50

された第3のIII族窒化物半導体層；およびこの第3のIII族窒化物半導体層にわたって配設された第4のIII族窒化物半導体層を有する分極制御デバイスを対象とする。pn接合は、第3のIII族窒化物半導体層と第4のIII族窒化物半導体層との間の界面に形成される。分極ヘテロ接合は、第2のIII族窒化物半導体層と第3のIII族窒化物半導体層との間に形成される。分極接合は、分極接合の一方の側に極性の固定電荷を有し、分極接合の反対側に反対の極性の固定電荷を有する。無バイアスの場合、pn接合は、pn接合にわたるキャリアのフローに対抗する第1の電場を含み、分極接合は、分極接合にわたる反対に荷電したキャリアのフローに対抗する第2の電場を含む。

【図面の簡単な説明】

【0004】

10

【図1A】図1Aは、一部の実施形態に従う分極制御デバイス(PCD)である。

【図1B】図1Bは、一部の実施形態に従うInAlN/GaN分極接合を有するPCDである。

【図2】図2は、InAlN/GaN分極接合を有するPCDの計算された電流-電圧(I-V)特性である。

【図3A】図3Aは、図1BのPCDにおいて距離の関数としてのエネルギー(eV)のシミュレーションバンド構造ダイアグラムである。

【図3B】図3Bは、図1BのPCDにおいて距離の関数としてのエネルギー(eV)のシミュレーションバンド構造ダイアグラムである。

【図4】図4は、一部の実施形態に従ってn-GaNおよびn-InAlN層において $S_i = 9 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ のドーピングレベルでのn型InAlN/n型GaN分極接合を有するデバイスの計算されたI-V曲線を示す。

20

【図5】図5は、一部の実施形態に従うAlGaN/GaN分極接合を有するPCDである。

【図6】図6は、一部の実施形態に従うAlGaN/GaN分極接合を有するPCDの計算されたI-V特性を示す。

【図7A】図7Aは、一部の実施形態に従うAlGaN/GaN分極接合を有するPCDの計算されたI-V特性を示す。

【図7B】図7Bは、一部の実施形態に従うAlGaN/GaN分極接合を有するPCDの計算されたI-V特性を示す。

30

【図8A】図8Aは、一部の実施形態に従って、GaN基板と、この基板上に配設された $n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ 、n-GaN、およびp-GaN層とを含むデバイスのフリーキャリア濃度を示す。

【図8B】図8Bは、一部の実施形態に従って、GaN基板と、この基板上に配設された $n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ 、n-GaN、およびp-GaN層とを含むデバイスのフリーキャリア濃度を示す。

【図9】図9は、一部の実施形態に従う紫外線センサとして構成されたPCDを示す。

【図10】図10は、一部の実施形態に従う光センサとしてのデバイスの動作を示す概略図である。

【図11】図11は、PCDが一部の実施形態に従う発振回路に使用される回路の概略図を示す。

40

【図12】一部の実施形態に従うPCD発光デバイスを示す。

【発明を実施するための形態】

【0005】

図は必ずしも正確な縮尺ではない。図で使用される同様の数字は、同様の構成要素を指す。しかし、所与の図においてある構成要素を指すためにある数字を使用することは、同じ数字で標識された別の図の構成要素を制限することを意図するものではないことが理解される。

【0006】

本明細書に記載される実施形態は、種々の用途、例えばスイッチ、センサまたは発振器

50

に使用できる半導体デバイスを含む。デバイスは、デバイス基板として作用する第1の窒化物半導体層を含み、この基板層上に、第2、第3、および第4の窒化物半導体層がこの順序で配設される。pn接合は、第3の層と第4の層との間の接合界面によって形成される。分極接合は、第2の層と第3の層との間のヘテロ接合界面によって形成され、ここで「ヘテロ接合」という用語は、第2の層および第3の層が異なる材料で製造されていることを示す。分極接合は、ヘテロ接合の一方の側に極性の固定電荷を有し、ヘテロ接合の反対側に反対の極性の固定電荷を有する。デバイスが無バイアスの場合、pn接合は、pn接合にわたるキャリアのフローに対抗する第1の電場を含み、分極接合は、分極接合にわたる反対に荷電したキャリアのフローに対抗する第2の電場を含む。分極接合は、pn接合を通したキャリアのフローを制御し、故に本明細書に開示されるデバイスは分極制御ダイオード(PCD)と称される。

10

【0007】

図1Aは、一部の実施形態に従うPCD100の概略断面図である。PCD100は、垂直デバイスとして示され、両側にp-コンタクトおよびn-コンタクトを有する。しかし、エッチング、例えば乾式エッチングを通して曝露されるn-GaN基板/テンプレートと同じ側に両方のコンタクトを有することができる。図1Aに示されるように、デバイス100は、p-およびn-コンタクト電極121、122の間に配設されたIII族窒化物半導体のいくつかの層101~104からなってもよい。pn接合は、第3の窒化物半導体層103と第4の窒化物半導体層104との間の接合界面Ipnに形成される。一部の実施形態において、接合Ipnは、第3および第4の層が同じタイプの材料から製造されることを意味するpnホモ接合であってもよい。第3の層103は、第1のタイプのドーパントであるアクセプタ(p型)またはドナー(n型)のいずれかでドーピングされ、第4の窒化物半導体層104は、界面Ipnがpn接合を形成するように、反対のタイプのドーパントでドーピングされる。分極接合は、第2の窒化物半導体層102と第3の窒化物半導体層103との間のヘテロ接合Ipolに形成される。デバイス100はまた、第1の窒化物半導体層101と第2の窒化物半導体層102との間に第3の界面Isを含む。

20

【0008】

一部の実施形態において、第2の窒化物半導体層はnドーピングされ、第3の窒化物半導体層はnドーピングされ、第4の窒化物半導体層はpドーピングされる。nドーピングされた層のドーピング濃度は、 $10^{18} \sim 10^{19}$ のオーダーであってもよく、pドーピングされた層のドーピング濃度は $10^{19} \sim 10^{20}$ のオーダーであってもよい。

30

【0009】

あるいは一部の実施形態において、第2の窒化物半導体層はpドーピングされ、第3の窒化物半導体層はpドーピングされ、第4の窒化物半導体層はnドーピングされる。一部の実施形態において、第2の窒化物半導体層は、上記のパラグラフに示される場合と同じドーピング濃度を有する第3の窒化物半導体層と同じ大きさのオーダーのドーパント濃度を有していてもよい。

【0010】

一部の実施形態において、分極接合とpn接合との間の距離は、例えば25nm~500nmであることができる。

40

【0011】

図1BのPCD130によって示されるように、第4の窒化物半導体層134はp型ドーパントでドーピングされたp-GaNであってもよく、第3の窒化物半導体層133はn型ドーパントでドーピングされたGaNであってもよく；第1の層131はn型ドーピングされたGaN基板であってもよい。第2の窒化物半導体層132は、第1の層および第3の層の半導体材料とは異なる窒化物半導体材料、例えばn-InAlNであってもよい。n-コンタクト141は第1の層131に近接して配設され、p-コンタクト142は第4の層134に近接して配設される。

【0012】

一部の実施形態において、第2の層の材料は、Alを含む窒化物半導体、例えば図1B

50

に示されるように InAlN であってもよい。あるいは、第2の層の材料は、p型またはn型ドーパントでドーパされた AlGaN であってもよい。一部の実施形態において、第2の層の材料は、四元窒化物半導体、例えば AlGaInN である。第2の窒化物半導体層132は、 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ 層であることができ、ここで x は $0.10 \sim 0.25$ である。第2の窒化物半導体層132は、基板層131に格子整合であることができる。例えば第1の層131がn型 GaN であり、第2の層132がn型 InAlN である場合、格子整合は、 InAlN 層の In 組成が約18%であるように選択することを含んでいてもよい。デバイス130は、他の基板配向も可能であるが、 GaN 基板131の c 面 (0001) に沿って成長させる。より高い結晶品質は、層が低欠陥密度基板上に疑似整合的に成長する場合に達成され得る、例えば基板の格子定数に実質的に等しいエピタキシャル
10
フィルムの格子定数。エピタキシャル層の格子定数が基板の格子定数に近い場合に、層は、欠陥形成（貫通転位）を通して最終的に放出され得る歪を蓄積しない。さらに、圧電分極はエピフィルム内の歪に依存する。図1Bは、NNNP構造を有するPCDを示し、層1、2、3はn型でドーパされ、層4はp型でドーパされることを意味する。一部の実施形態において、PCDは、PPPN、NPPPまたはNNPP構造を有していてもよい。

【0013】

Si は、n型ドーパントとして使用されてもよく、n型層、例えばPCD130の第1、第2および第3の層101、102、103の Si 濃度は、 $N_D = 1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{19} \text{ Si/cm}^3$ の範囲であってもよい。 Mg はp型ドーパントとして使用されてもよく、こうしてp層、例えばPCD130の第4の層104の Mg 濃度は $N_A = 1 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} \text{ Mg/cm}^3$ の範囲となってもよい。いずれかの好適なn型ドーパント、例えば Ge ならびにいずれかの好適なp型ドーパントは、n型およびp型層をドーピングするために使用できる。
20

【0014】

本明細書に記載されるPCDの分極接合は、異なる窒化物半導体材料の第2の層と第3の層との間のヘテロ接合に形成される。それらのウルツ鉱結晶構造およびイオン性により、 (0001) 面に沿ってエピタキシャル成長する窒化物半導体は、圧電および／または自発分極を示す。ヘテロ構造界面、例えば IpOl および Is 界面において、界面の片側における窒化物半導体の分極は、分極場を導き、これは分極接合を形成する窒化物半導体材料の圧電および自発分極場コンポーネントの合計の関数である。
30

【0015】

図1Bに示されるように、第1の層の分極は P_1 であり、第2の層の分極は P_2 であり、第3の層の分極は P_3 である。 Is での分極の差は、 $P_2 - P_1$ であり、これは示される実施形態のように第1の層が GaN であり、第2の層が InAlN である場合に、0より小さい。 IpOl での分極の差は $P_3 - P_2$ であり、これは図1Bに示される材料について0より大きい。p-電極142とn-電極141との間のデバイス130にわたる電圧適用により、電流フローをもたらす。電流フローは、バイアス電圧がスイッチオン電圧 V_s よりも小さい場合に非常に低い。 V_s の値は、ドーピングレベル、材料の組成および種々の層の厚さのような因子によって決定される。バイアス電圧が V_s より大きい場合、電流は、迅速に非常に大きくなる。例えば、 0.005 V のバイアス電圧の変化は、 10^3 を超えるまたは 10^5 を超えるまたはさらには 10^7 を超える倍数で電流密度の増大を導き得る。デバイスがスイッチオフであるバイアス電圧とスイッチオン電圧 V_s との間の差は、約 0.01 ボルト未満または例えば $0.002 \sim 0.01$ ボルトの範囲であってもよい。
40

【0016】

図1Bのデバイスが $+c$ 方向に成長する場合、 $P_2 - P_1 < 0$ 、および $P_3 - P_2 > 0$ である。 AlInN から GaN への相対界面（位置 IpOl ）にて、分極は急激に変化し、分極電荷密度が形成される。示された例において、分極電荷密度は負 ($-\sigma$) であり、電子の反発力を生じる。 V_s より小さい適用バイアス電圧 V に関して、電子は、第2の層132と第3の層133層との間の界面に形成するエネルギー障壁を乗り越えるのは不
50

可能である。

【0017】

界面 I p o l と界面 I p n との間の n - G a N 領域にわたる - c 方向の正孔輸送にもエネルギー障壁が存在する。このエネルギー障壁は p n 接合と関連し、I p o l での分極電荷をスクリーンするのに十分な数に正孔が蓄積するのを防止する。デバイス 130 を通って流れる電流は、これらの条件下で非常に低い。バイアス電圧がスイッチオン電圧 V_s を超えたら、I p o l 界面にわたる電子輸送のための障壁および n - G a N 層 133 にわたる正孔輸送のための障壁は、急激に低減される。バンド構造においてこの急激の変化は協働効果である。I p o l 界面における正孔蓄積はエネルギー障壁を低減し、一部の電子は p n 接合に向かって n - G a N 層 133 に流れることができる。この電子フローが正孔輸送のための障壁を低減し、I p o l 界面にて正孔密度をさらに増大できる。この正のフィードバックは結果として、両方の障壁 I p n および I p o l のシャープな低減をもたらし、デバイス 130 にわたって大きな電流を流すことができる。I p o l でのポテンシャル障壁は、バイアス電圧がシミュレーションに基づいて 0.005 eV 増大するときに 1 eV を超えて低減され得る。同時に、正孔のためのエネルギー障壁は、バイアス電圧の同じ増大によって 0.9 eV 低減される。これが、電流のシャープなターンオンの起源である。図 2 は、n - I n _{0.18} A l _{0.82} N の第 3 の層を有する図 1 に示される構成を有するデバイスに関してバイアス電圧の関数としての計算された電流密度を示す。この例のシミュレーションにおいて、0.05 V 未満のバイアス電圧の変化は、 10^3 より大きい倍数で電流密度を増大させることになる。

【0018】

オフ状態 ($V_{\text{バイアス}} = 5.03 \text{ V}$) およびオン状態 ($V_{\text{バイアス}} = 5.035 \text{ V}$) に対応する + c 軸に沿って図 1 B の P C D における距離の関数としてのエネルギー (eV) のシミュレーションされたバンド構造のダイアグラムを、それぞれ図 3 A および 3 B に示す。バイアス電圧は図 3 A で 5.03 V である (オフ電圧状態)。図 3 B のバイアス電圧 (オン状態) は 5.035 V である。この場合電流フローは大きい。図 3 A における垂直破線は、n - I n A l N と n - G a N との間の I p o l 界面 (破線 399) および n - G a N と p - G a N との間の I p n 界面 (破線 398) を示す。これらの 2 つの界面間の距離は 50 nm である。

【0019】

図 3 A の矢印によって終了する垂直線は、電子 (線 397) および正孔 (線 396) にとってのポテンシャル障壁を示す。図 3 A および 3 B の線 301 は、電子についての擬フェルミ準位である。図 3 A および 3 B の線 302 は、正孔についての擬フェルミ準位である。図 3 A および 3 B において線 303 は、伝導バンド端である。図 3 A および 3 B において線 304 は、価電子バンド端である。

【0020】

試験として、中間層を P C D の n - I n A l N 層と n - G a N 層との間に配置し、シャープな界面を、I n G a A l N 組成を有する追加の中間層が存在する界面で置き換える効果を評価する。第 1 のシナリオにおいて、シャープな界面は、I n _{0.18} A l _{0.82} N 層と n - G a N 層との間の界面にて中間層を用いずに試験した。第 2 のシナリオにおいて、相対的に段階的な界面 (段階 1) を試験したが、ここで I n _{0.02} A l _{0.05} G a _{0.93} N の中間層を、I n _{0.18} A l _{0.82} N 層と n - G a N 層との間に配設した。第 3 のシナリオにおいて、相対的に段階的な界面 (段階 2) を試験したが、ここで I n _{0.02} A l _{0.08} G a _{0.90} N の中間層を、I n _{0.18} A l _{0.82} N 層と n - G a N 層との間に配設した。結果はいずれの場合も非常に似ていた: バイアス電圧に応じた電流の変化は急激なままである。層中のドーピングレベルは、これらの実施例において $6 \times 10^{18} \text{ Si/cm}^3$ であった。結果を以下の表 1 に列挙する。

【0021】

【表 1】

表 1

界面	V-スイッチ (V)	J-低 (A/cm ²)	J-高 (A/cm ²)
シャープ $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$	6.755	2.7×10^{-10}	8.19×10^5
段階1 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{In}_{0.02}\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.93}\text{N}/\text{GaN}$	6.745	6.7×10^{-10}	8.18×10^5
段階2 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{In}_{0.02}\text{Al}_{0.08}\text{Ga}_{0.90}\text{N}/\text{GaN}$	6.685	1.04×10^{-9}	7.98×10^5

10

【0022】

$n\text{-In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ 層厚さが400、200または75 nmであるデバイスについてのシミュレーションはすべて、図2に示されるターンオン特徴と同様のシャープなターンオン特徴を示し、 $n\text{-In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ 層の厚さが重要でないことを示唆している。 $n\text{-GaN}$ の厚さに対する閾値電圧の依存性を以下の表2に示す。閾値電圧は、 I_{pol} と I_{pn} との間の $n\text{-GaN}$ 領域の厚さに依存する。オフ状態において、この領域は正孔輸送に対する障壁として作用する。この領域を厚くすることによって、閾値電圧はわずかに増大する。 $n\text{-GaN}$ および $n\text{-InAlN}$ 層のSiドーピングレベルは、この実施例において約 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であった。

20

【0023】

【表 2】

表 2

N-GaN (nm) の厚さ	V-スイッチ (V)
40	4.65
50	4.77
60	4.82

30

【0024】

スイッチオン電圧 V_s は、第2および第3の層、例えば図1Bに示される $n\text{-InAlN}$ および $n\text{-GaN}$ 層のドーピングレベルに依存する。図4は、 $n\text{-GaN}$ および $n\text{-InAlN}$ 層において $S_i = 9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のドーピングレベルを有するデバイスについての計算されたIV曲線を示す。スイッチオン電圧は、この場合に約4.33 Vである。対照的に、図2は、 $n\text{-GaN}$ および $n\text{-InAlN}$ 層における約 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のドーピングレベルを有するデバイスについてのIV曲線を示す。このドーピングレベルに関するスイッチオン電圧は、約5.035ボルトである。

40

【0025】

図5は、 n 型AlGaNを含む基板層501、 n 型InAlNを含む第2の層502、 n 型GaNを含む第3の層503、および p 型GaNを含む第4の層504を有するPCDを示す。この実施例はAlGaN基板を示すが、GaNまたはAlNを含む他の基板が使用されてもよい。一部の実施形態において、基板、例えばGaN、AlN、サファイア、SiC、Siおよび/または他の材料上に配設されたテンプレート、例えば緩和AlGaNフィルムが、層501の代わりに使用されてもよい。 pn 接合は、第3の層と第4の

50

層との間のホモ接合界面 I_{pn} によって形成される。分極接合は、第2の層と第3の層との間のヘテロ接合界面 I_{pol} によって形成される。 $8.18 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の Si ドーピングレベルを有する $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ の 200 nm の第2の層を有する図5の構造を有するデバイスについての $I-V$ 特性を図6に示す。このデバイスにおいて、電流は、図2と関連して記載されるデバイスと比較した場合に、より段階的にバイアス電圧に対して増大する。シャープなターンオンは、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 分極界面を有するPCDには見られない。 20% の AlGaIn の数百 nm まで、例えば約 400 nm までは、緩和またはクラック形成なく、 GaN 基板において擬格子整合性成長できる。より高い Al 組成またはより厚いフィルムに関して、層は、 GaN 上に成長する場合にクラックを生じ得る。

10

【0026】

$\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ 分極ヘテロ接合（図6参照）を有するPCDと、 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ 分極ヘテロ接合（図2参照）を有するPCDとの動作における差は、 I_{pol} 界面における分極の変化による。 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ デバイスにおいて、 I_{pol} での分極変化は $\Delta P = 4.2 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$ である一方で、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ デバイスについて I_{pol} での分極変化は $\Delta P = 1.5 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$ である。 InAlN/GaN ヘテロ接合の場合の顕著に大きい ΔP は、この界面にわたって流れる電子に対する障壁を増大する。 ΔP のこの差は、PCDの2つのタイプにおける $I-V$ 特性の差の源であり、ここで大きい ΔP はよりシャープなスイッチオン特徴を導く。一部の実施形態において、 2.0 C/m^2 を超え、または 3.0 C/m^2 を超える第2と第3との窒化物半導体層間の分極差は、好適にシャープなスイッチオン $I-V$ 特性を導く。

20

【0027】

AlGaIn 層において約 40% を超える、約 42.5% を超えるまたは 45% を超えるように Al 組成を増大させることによって、 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ の I_{pol} ヘテロ接合界面を有するPCDに関して観察される場合と同様の値に、 AlGaIn/GaN 構造についての I_{pol} 界面において分極変化 ΔP を増大できる。 Al 組成が少なくとも 42.5% または少なくとも約 45% である場合、 $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ デバイス構造について観察されるシャープなスイッチオン特徴が回復される。図7Aに示される $I-V$ 曲線は、 40 nm 厚さの $n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ の第2の層502を有する図5に示される構造を有するPCDについて得られた。図7Bは、 $n\text{-Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{N}$ の第1の層501基板、 75 nm 厚さの $n\text{-Al}_{0.425}\text{Ga}_{0.575}\text{N}$ の第2の層502、 50 nm 厚さの $n\text{-GaN}$ の第3の層503、および 80 nm 厚さの $p\text{-GaN}$ の第4の層504を有する図5に示される構造を有するPCDの $I-V$ 曲線を示す。図7Bのデバイスは、図7Aおよび図2のデバイスよりも段階的なスイッチオン $I-V$ 特性を有する。

30

【0028】

図8Aおよび8Bは、この順序で基板上に配設された $n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ 、 $n\text{-GaN}$ 、および $p\text{-GaN}$ 層を有する GaN 基板を含むデバイスのフリーキャリア濃度を示す。

40

【0029】

図8Aは、デバイスがオン状態である場合に、 GaN 基板/ $n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}/n\text{-GaN}/p\text{-GaN}$ デバイスの電子801および正孔802濃度を示す。図8Bは、デバイスがオフ状態である場合に、 GaN 基板/ $n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}/n\text{-GaN}/p\text{-GaN}$ デバイスの電子801および正孔802濃度を示す。

【0030】

図8Aに示されるデバイスがオフ状態である場合、寄生 p 層803が、 $n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ と $n\text{-GaN}$ 層との間に形成する。図8Aおよび8Bに示されるように、 I_{pol} 界面（ $n\text{-Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ と $n\text{-GaN}$ 層との間）での寄生 p 層803の正孔濃度、ならびに I_{pn} 接合界面（ $n\text{-GaN}$ と $p\text{-GaN}$ 層との間）での

50

電子濃度の両方は、デバイスがターンオンとなったときに急激に増大し、電流が I_{pn} および I_{pol} 界面の両方を通して流れる。

【0031】

一部の場合において、 I_{pol} 界面にて十分大きい正の ΔP 、例えば $\Delta P > 2.0 \text{ C/m}^2$ または $\Delta P > 3.0 \text{ C/m}^2$ である限り、 $InAlN$ または $AlGaIn$ ではなく四元層を使用できる。例えば、四元材料 $In_{0.15}Al_{0.80}Ga_{0.05}N$ は層 2 として使用でき、 $n-GaN$ は I_{pol} 界面にて層 3 として使用できる。 $In_{0.15}Al_{0.80}Ga_{0.05}N/n-GaN$ の I_{pol} 界面を有するデバイスは、約 6.0 V のシャープなターンオンを示す。

【0032】

上記で記載される PCD は、多数の用途に好適である。例えばデバイスは、環境条件にて検出されるように構成されるセンサとして機能し得る。デバイスは、環境条件への曝露によりデバイスがスイッチオンまたはスイッチオフとなるように構成される。種々の実施形態において、デバイスは、例えば化学センサ、光センサ、歪センサ、または温度センサとして操作し得る。

【0033】

一部の用途において、PCD は、図 9 に示されるように紫外線センサ 900 として構成できる。光センサ 900 は、電極 911、912 の間に配設された第 1 の窒化物半導体層 901、第 2 の窒化物半導体層 902、第 3 の窒化物半導体層 903、および第 4 の窒化物半導体層 904 を含む。第 1 の窒化物半導体層 901 は基板であり、この基板上に第 2 の層 902、第 3 の層 903、および第 4 の層 904 をエピタキシャル成長させる。第 3 の層 903 と第 4 の層 904 との間の界面 I_{pn} は、先に議論されるように pn 接合を形成する。第 2 の層 902 および第 3 の層 903 は、異なるタイプの窒化物半導体材料である。分極接合は、先に議論されたように、第 2 の層 902 と第 3 の層 903 層との間の界面 I_{pol} に形成される。1 つの例において、第 1 の層 901 は、n 型ドーパされた GaN であり、第 2 の層 902 は n 型ドーパされた $InAlN$ であり、第 3 の層 903 は n 型ドーパされた GaN であり、第 4 の層 904 は p 型ドーパされた GaN である。第 4 の層 904 は、光に対して部分的に透明である。光は、矢印 999 によって示されるように、第 4 の層 904 を通して透過できる。デバイス 900 に入る光は、 I_{pol} 界面付近で電子-正孔対を創出する。

【0034】

図 10 は、一部の実施形態に従う（概略図においてデバイス D として示される）光センサとしてのデバイス 900 の動作を示す概略図である。場合により、デバイス 900 は、バイアス源 V_B によって、抵抗器 R_s を通してスイッチオン電圧 V_s 付近およびそれ未満にバイアスがかけられてもよい。デバイスが光に曝露されない場合、デバイスは遮断され、相対的に小さい電流がデバイスを通して流れる。デバイスが遮断される場合、 V_{out} は高い状態である。デバイスが光 1001 に曝される場合、光 1001 は、透明な第 4 の層 904 を通ってデバイス 900 に入り、分極接合界面にておよび/または分極接合界面付近で電子-正孔対を創出する。正孔は、ポテンシャル障壁を低減し、デバイスをスイッチオン可能にする。デバイスがスイッチオンである場合、デバイスは電流を伝導し、 V_{out} を低い状態に低減する。

【0035】

別の用途において、デバイスは温度センサとして機能してもよい。例えば、デバイスが熱くなるときに、スイッチオン電圧 V_s は低下する。表 3 は、分極接合にて $n-Al_{0.45}Ga_{0.55}N/n-GaN$ 界面を有する PCD デバイスについての温度に対する V_s の低下を示す。

【0036】

10

20

30

40

【表 3】

表 3

温度	V _s
290 K	4.41 V
300 K	4.32 V
310 K	4.22 V
320 K	4.13 V

10

【0037】

本明細書に記載されるデバイスは、 $\Delta v / \Delta i < 0$ である負性微分抵抗用途に好適であることができる。図3Aに示されるバンド図は、窒化物極性ヘテロ界面における自然分極電荷の利点を活用することによってデバイスにおいて得られる。本明細書に記載されるPCDにおいて、スイッチオン電圧が適用される前には、電流は無視できる程度に低い。スイッチオンの後、電流は、III族N材料の直列抵抗およびコンタクト抵抗によって制限される。図3Aによって示されるように、接合にわたる電圧差は、ターンオンの後、5Vから約4Vに低減され、負性微分抵抗を示す。例えば、負性微分抵抗を示す本明細書に記載されるデバイスは、増幅器および／または発振器として使用でき、ならびに／あるいはスイッチングデバイスおよび／またはメモリデバイスのような双安定用途に使用できる。

20

【0038】

本明細書に開示されるPCDは、図11の回路図に示されるように、発振回路に使用できる。バッテリーBは、デバイスDのターンオン電圧がデバイスDがシャープにターンオンする点に到達するまで、キャパシタCを抵抗器Rを通して充電する。これは、閾値電圧未満の値への、Cにわたる電圧の低減を導く。これは、アウトプット端子にて鋸歯状波形の発生V_{out}をもたらす。一部の実施形態において、Rは、良好な効率のためにインダクタと置き換えることができる。発振周波数は、バッテリーBの電圧およびRおよびCの値に依存する。適切な回路と関連して使用される場合、デバイスは、電圧制御発振器(VCO)または移相同期回路(PLL)を構築するために使用できる。

【0039】

30

本明細書に提供されるデバイスのスイッチオン電圧は、約5Vのスイッチオン電圧を有し、これは標準電子デバイスに好適である。提案されたGaNデバイスは、少数キャリア寿命がデバイスがどの程度迅速にターンオフできるかの決定的要因であるので、他の負性微分抵抗デバイス、例えば半導体DIACよりも相当迅速な応答時間を有することができる。GaNは直接遷移材料であり、図3Aに示されるn-InAlN層とn-GaN層との間のe⁻障壁(「寄生P層」とも称される)が非常に薄い。寄生P層はpドープされた層自体ではなく、分極界面がpドープされた層として有効に作用する。寄生P層が非常に薄いので、少数キャリアは迅速に排除できる。一部の実施形態において、ヘテロ構造の直列抵抗は図11のRとして機能できる。一部の実施形態において、図3Aに示されるようなN(寄生P層+N)NP構造の接合キャパシタンスは、図11のキャパシタCとして使用できる。これは、高い周波数、自己発振、高周波源を提供する。提案されたGaNデバイスは、トリガー閾値を提供するような他の用途に使用できる。

40

【0040】

図12は、発光ダイオード(LED)として構成されるPCD1200を示す。デバイス1200は、AlGaN、例えばAl_{0.33}Ga_{0.67}Nの第1の基板層1201、AlGaN、例えばn型Al_{0.425}Ga_{0.575}Nの第2の層1202、2つのGaNサブ層1203a、1203bを含む第3の層1203(活性領域1205は、サブ層1203a、1203bの間に挟持されたInGaN量子井戸を含んで発光するように構成される)、ならびにp-GaNを含む第4の層1204を含む。pn接合I_{pn}は、第3の層1203と第4の層1204との間のホモ接合界面によって形成される。分極

50

接合 I p o l は、第 2 の層 1 2 0 2 と第 3 の層 1 2 0 3 との間のヘテロ接合界面によって形成される。図 1 2 に示されるデバイスは、明滅光源を構築するために図 1 1 に示される回路に使用できる。

【0041】

特に断らない限り、明細書および特許請求の範囲において使用されるフィーチャサイズ、量および物理的特性を表現するすべての数は、用語「約」によってすべての場合に修飾されることが理解されるべきある。従って、反対のことが示されない限り、前述の明細書および添付の特許請求の範囲に記載される数値パラメータは、本明細書に開示される教示を利用する当業者が得ようとする所望の特性に依存して変動し得る近似値である。終点によって数値範囲が使用されることは、この範囲内のすべての数字（例えば 1 ～ 5 は 1、1.5、2、2.75、3、3.80、4 および 5 を含む）およびこの範囲内のいずれかの範囲を含む。

10

【図 1 A】

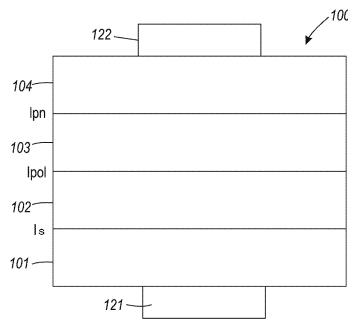


図 1 A

【図 2】

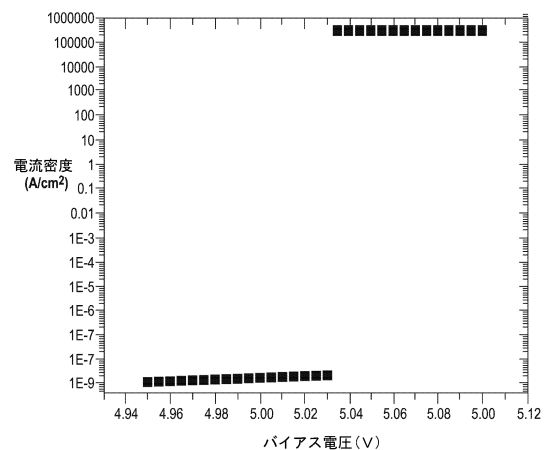


図 2

【図 1 B】

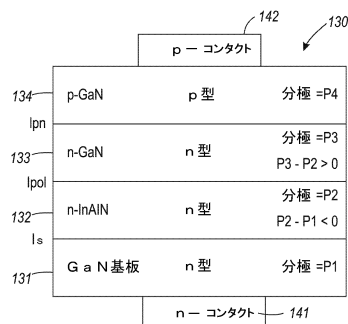
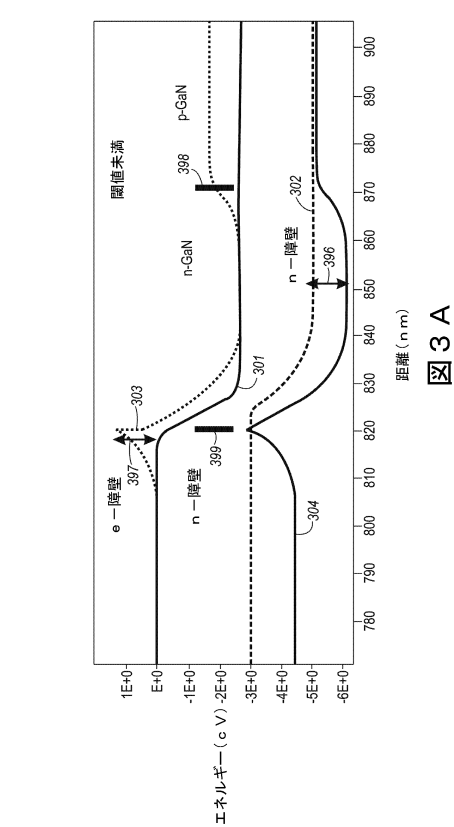
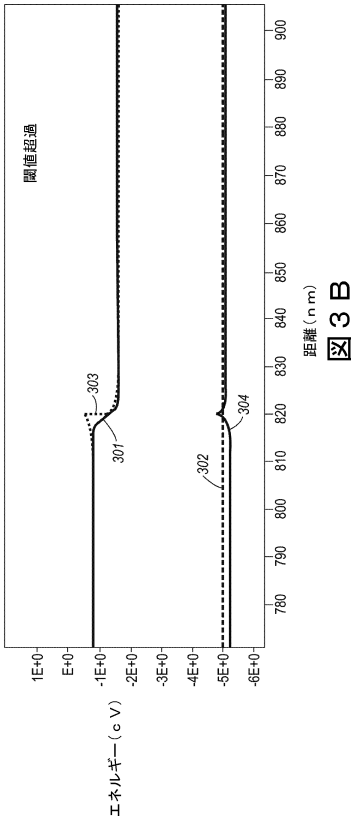


図 1 B

【図 3 A】



【図 3 B】



【図 4】

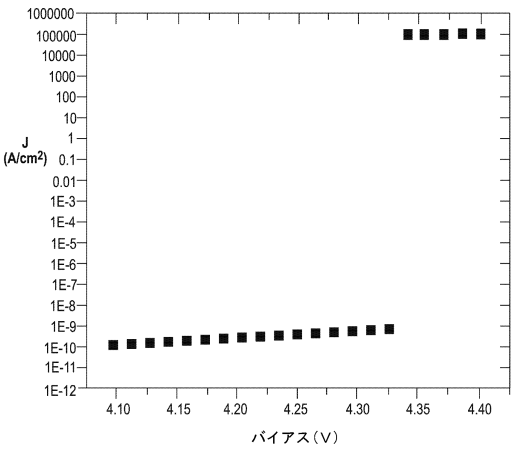


図 4

【図 5】

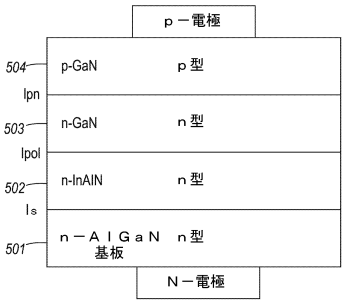


図 5

【図 6】

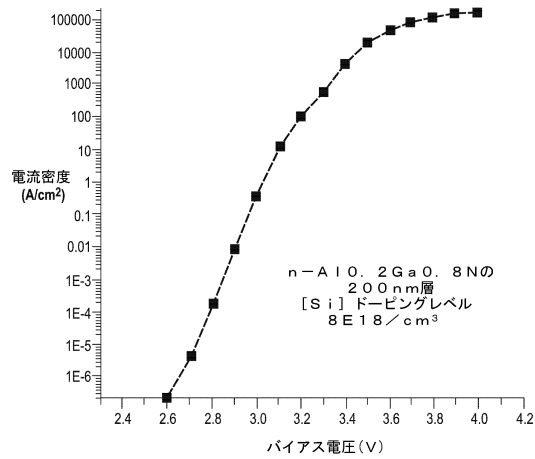


図 6

【図 7 A】

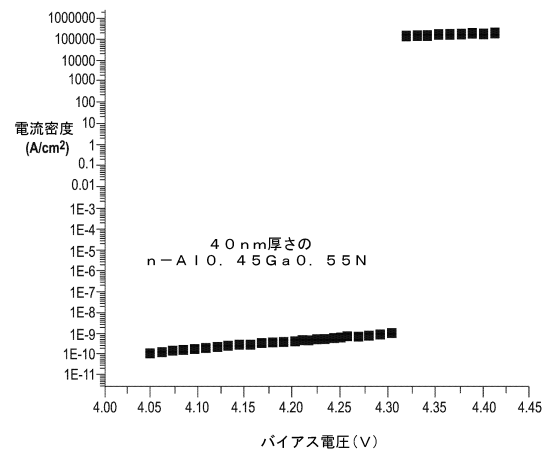


図 7 A

【図 7 B】

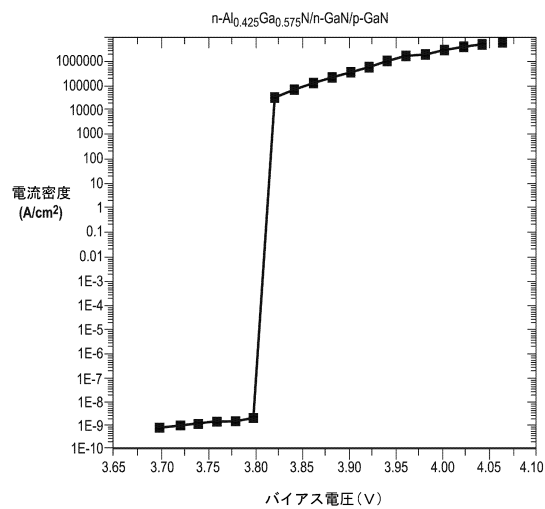


図 7 B

【図 8 A】

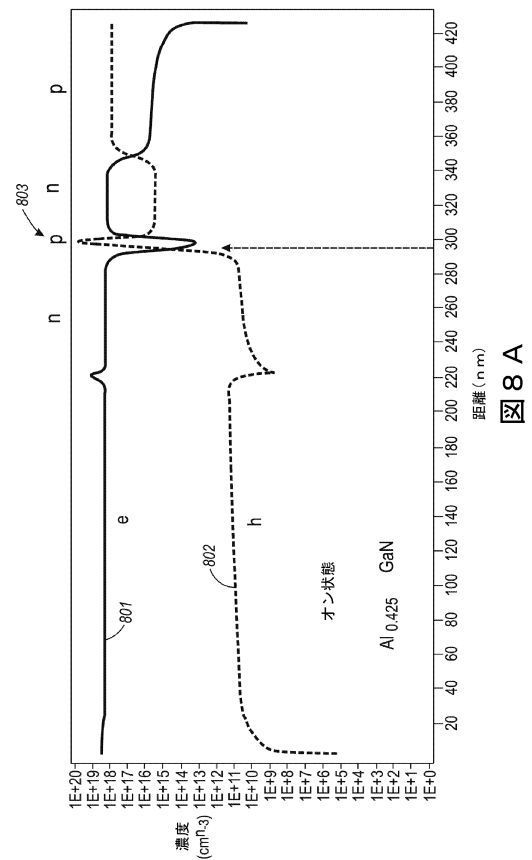
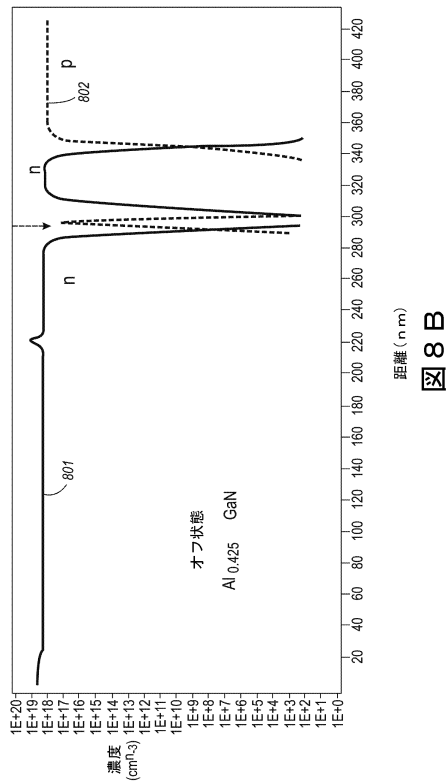
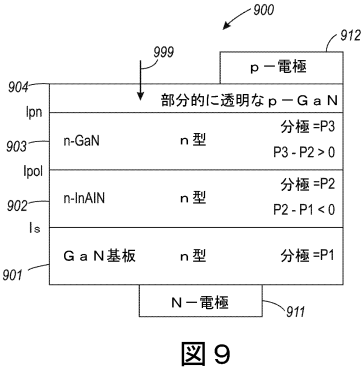


図 8 A

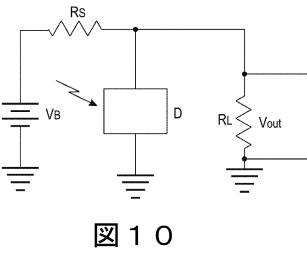
【図 8 B】



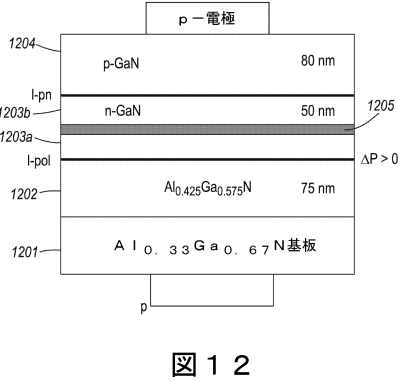
【図 9】



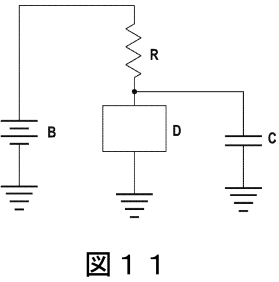
【図 1 0】



【図 1 2】



【図 1 1】



フロントページの続き

- (74)代理人 100109070
弁理士 須田 洋之
- (74)代理人 100109335
弁理士 上杉 浩
- (74)代理人 100120525
弁理士 近藤 直樹
- (72)発明者 ジョン・イー・ノースラップ
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94304 パロ・アルト オーク・クリーク・ドライブ
1380
- (72)発明者 トーマス・ヴンデラー
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94301 パロ・アルト エヴァレット・アベニュー 7
15 アpartment ナンバー5
- (72)発明者 ジェン・ピン・ルー
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94539 フリーモント オンディーナ・プレイス 40
747
- (72)発明者 ノーブル・エム・ジョンソン
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94025 メンロー・パーク オーク・グローヴ・アベニ
ュー 445 ナンバー1

審査官 高橋 優斗

- (56)参考文献 国際公開第2011/162243 (WO, A1)
国際公開第2006/132418 (WO, A1)
米国特許第09401455 (US, B1)
米国特許第08338860 (US, B2)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01L 29/861
H01L 29/201
H01L 29/868
H01L 33/32