

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2016-520992
(P2016-520992A)

(43) 公表日 平成28年7月14日(2016.7.14)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
H01L 29/872 (2006.01)	H01L 29/86 301D	4G077
C30B 29/38 (2006.01)	C30B 29/38 D	4K030
C30B 23/06 (2006.01)	C30B 29/38 C	4M104
C30B 25/18 (2006.01)	C30B 23/06	5F045
C23C 16/18 (2006.01)	C30B 25/18	5F152

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 17 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2016-501867 (P2016-501867)
 (86) (22) 出願日 平成26年3月13日 (2014.3.13)
 (85) 翻訳文提出日 平成27年10月28日 (2015.10.28)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2014/025516
 (87) 国際公開番号 W02014/159954
 (87) 国際公開日 平成26年10月2日 (2014.10.2)
 (31) 優先権主張番号 61/781,991
 (32) 優先日 平成25年3月14日 (2013.3.14)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 515254035
 ヘクサテック, インコーポレイテッド
 アメリカ合衆国, ノースカロライナ州 2
 7560, モリスヴィル, スイート 80
 0, 991 アヴィエーション パークウ
 ェイ
 (74) 代理人 100114775
 弁理士 高岡 亮一
 (74) 代理人 100121511
 弁理士 小田 直
 (74) 代理人 100202751
 弁理士 岩堀 明代
 (74) 代理人 100191086
 弁理士 高橋 香元

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】窒化アルミニウム単結晶基板を組み込んだパワー半導体デバイス

(57) 【要約】

本発明は、窒化アルミニウム単結晶基板を有するパワー半導体デバイスを提供する。前記基板の転位密度は約 10^5 cm^{-2} 未満であり、(002) 結晶面および(102) 結晶面の結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅 (FWHM) が、約200アークセカント未満であり、パワー半導体構造は、窒化アルミニウム単結晶基板の上に少なくとも1層のドーブした $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ 層を備える。

【選択図】 図3

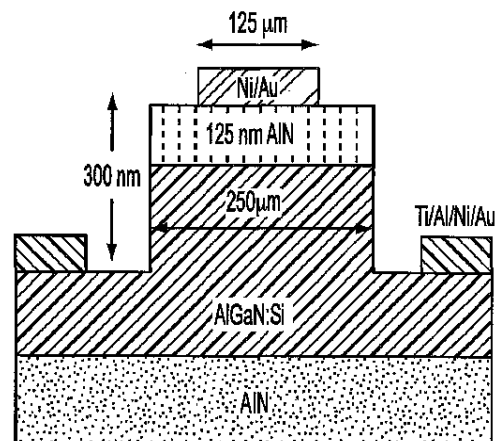


FIG. 3

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

パワー半導体デバイスであって、

窒化アルミニウム単結晶基板であって、前記基板の転位密度が約 10^5 cm^{-2} 未満であり、かつ (002) 結晶面および (102) 結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅 (FWHM) が約 200 アークセカント未満である、窒化アルミニウム単結晶基板と、

窒化アルミニウム単結晶基板の上に複数のドーブした窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) のエピタキシャル層を有するパワー半導体構造と、を含む、パワー半導体デバイス。

10

【請求項 2】

前記基板の転位密度が 10^4 cm^{-2} 未満である、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

【請求項 3】

前記基板の転位密度が 10^3 cm^{-2} 未満である、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

【請求項 4】

前記基板の転位密度が 10^2 cm^{-2} 未満である、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

【請求項 5】

前記 (002) 結晶面および (102) 結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅 (FWHM) が約 100 アークセカント未満である、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

20

【請求項 6】

前記 (002) 結晶面および (102) 結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅 (FWHM) が約 50 アークセカント未満である、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

【請求項 7】

前記 (002) 結晶面および (102) 結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅 (FWHM) が約 25 アークセカント未満である、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

30

【請求項 8】

前記パワー半導体構造は、ショットキーダイオード、接合型電界効果トランジスタ (JFET)、またはパワー金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) の形態である、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

【請求項 9】

前記パワー半導体構造が、1層以上の窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) のエピタキシャル層を含む比較的高濃度にドーブした N^+ 領域と隣接する、1層以上の窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) のエピタキシャル層を含む比較的低濃度にドーブした N 型ドリフト領域を含むショットキーダイオードの形態である、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

40

【請求項 10】

ドーブした窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) 層の少なくとも 1 層が、約 0.7 を超える x 値を有する、請求項 9 に記載のパワー半導体デバイス。

【請求項 11】

前記窒化アルミニウム単結晶基板が物理的気相輸送法により作製される、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

【請求項 12】

前記デバイスは、

少なくとも約 5 MV/cm の絶縁破壊電界と、

50

少なくとも約 20 kV の阻止電圧と、
 少なくとも約 20 kHz のスイッチング周波数と、
 の 1 つ以上を特徴とする、請求項 1 に記載のパワー半導体デバイス。

【請求項 13】

パワー半導体デバイスの形成方法であって、
 窒化アルミニウム単結晶基板を受ける工程であって、前記基板の転位密度が約 10^5 cm^{-2} 未満であり、前記 (002) 結晶面および (102) 結晶面の二軸のロッキングカーブの半値全幅が 200 アークセカント未満である工程と、
 前記窒化アルミニウム単結晶基板上に複数のドーブした窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) のエピタキシャル活性化層を堆積する工程と、
 前記ドーブした窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) の活性化層と接する金属電極層を形成する工程と、
 を含む、パワー半導体デバイスの形成方法。

10

【請求項 14】

前記堆積工程が、分子線エピタキシー (MBE)、有機金属化学気相成長法 (MOCVD)、またはハイドライド気相成長法 (HVPE) を含む、請求項 13 に記載のパワー半導体デバイスの形成方法。

【請求項 15】

前記パワー半導体構造が、ショットキーダイオードの形態を有し、前記堆積工程が、前記窒化アルミニウム単結晶基板上に、比較的高濃度にドーブした 1 層以上の N+ 型窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) 層を堆積する工程と、前記比較的高濃度にドーブした 1 層以上の N+ 型窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) 層上に比較的低濃度にドーブした 1 層以上の N 型窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) を堆積する工程と、を含む、請求項 13 に記載のパワー半導体デバイスの形成方法。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、窒化アルミニウム単結晶基板を組み込んだパワー半導体デバイスに関する。

【背景技術】

【0002】

パワーエレクトロニクス半導体の技術は、負荷に関わらず、信頼できる電圧、電流および周波数において高品質の電力を日常的に提供することで、現代社会に多大な貢献をしてきた。そのようなデバイスは、スイッチまたは整流器として使用され、2 端子デバイス (例えばダイオード) または 3 端子デバイス (例えばトリオード) に分類できる。パワー半導体デバイスは、電荷キャリア (電子または電子正孔) の一方のみを使用する多数キャリアデバイスと、両方の種類のキャリアを使用する少数キャリアデバイスと、に分類できる。多数キャリアデバイスの例としては、ショットキーダイオード、接合型電界効果トランジスタ (JFET)、およびパワー金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) を含む。少数キャリアデバイスには、サイリスタ、バイポーラ接合トランジスタ (BJT)、PIN ダイオードおよび絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) が挙げられる。

30

40

【0003】

米国における電気事業インフラは、より優れた制御、より優れた監視および情報を、電力の送配に追加するように変化を遂げている状況にある。この未来の「スマートグリッド」は、単なるオン オフの制御を提供するのではなく、変化する状況や要求に応じて、電力の実質的なフロー制御を提供する。スマートグリッドの実現には、改善された電力制御デバイスの開発が重要となっている。

【0004】

近年まで、これらデバイス種類は、シリコン (Si) 半導体デバイスを基板とし、電圧範囲 480 Vac 未満かつ温度 50 未満の操作下では、一般に非常に有効である。電気

50

事業への適用では、これらのデバイスが、阻止電圧（ 10 kV ）、低いスイッチ速度（ 2 kHz ）および限定的な接合部の動作温度（ 150 ）を含む数値限界に悩まされている。

【0005】

柔軟な電力制御およびエネルギー節約を有し、 $480\text{ Vac} \sim 500\text{ kVac}$ の広い電力系の用途の空間を貫くには、新規のパワー半導体技術の開発が不可欠である。基礎材料をシリコン（Si）に限定するのは不適切なため、より広いエネルギーバンドギャップを有する半導体を使用しなければならない。シリコンカーバイド（SiC）のパワー制御デバイスは、少なくとも20年間開発されてきており、また、シリコンカーバイド（SiC）のショットキーダイオードおよび接合型電界効果トランジスタ（JFET）を含む、 $10 \sim 20\text{ kV}$ の値での、研究規模でのデバイスは存在する。シリコンカーバイド（SiC）は、シリコンよりも、より低熱抵抗、およびより高温で動作する点で有利である。

10

【0006】

しかし、電圧値が一層高くなると、これらのデバイス中の損失も顕著に増加し、結果としてデバイスの電流の制御能力が限定される。極めて優れた材料特性を有する半導体が必要とされており、その1つは、最も高い操作温度を有し、前述の伝導損失を大きく減少させかつ 20 kV を越える電圧容量を阻止するパワーエレクトロニクスを可能とする半導体である。従って、改善されたパワー半導体デバイスに対する必要性が依然として存在する。

【発明の概要】

20

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明は、窒化アルミニウム（AlN）単結晶基板を含むパワー半導体デバイスを提供し、当該基板の転位密度が 10^5 cm^{-2} 未満であり、（002）結晶面および（102）結晶面に対する二軸のロッキングカーブの半値全幅（FWHM）は、約 200 アーケセカント未満であり、パワー半導体構造は、窒化アルミニウム単結晶基板上のドーブした複数の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ のエピタキシャル層を含む。ある実施形態では、本発明のパワー半導体デバイスは少なくとも約 5 MV/cm の絶縁破壊電界（例えば、少なくとも約 10 MV/cm 、少なくとも約 15 MV/cm 、または少なくとも約 20 MV/cm ）、少なくとも約 20 kV の阻止電圧および/または少なくとも約 20 kHz のスイッチング周波数を提供することができる。例示的なパワー半導体構造は、ショットキーダイオード、接合型電界効果トランジスタ（JFET）、またはパワー金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）の形態で存在する。

30

【0008】

ある実施形態では、当該基板は、 10^4 cm^{-2} 未満、 10^3 cm^{-2} 未満または 10^2 cm^{-2} 未満の転位密度によって特徴づけることができる。当該（002）結晶面および（102）結晶面に対する二軸のロッキングカーブの半値全幅（FWHM）は、約 100 アーケセカント未満、約 50 アーケセカント未満または約 25 アーケセカント未満とすることができる。当該窒化アルミニウム単結晶基板は、一般に物理的な気相輸送によって作製される。

40

【0009】

1つの例示的な実施形態では、当該パワー半導体構造は、1つ以上の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ エピタキシャル層を含む比較的高濃度にドーブしたN+領域と隣接する1つ以上の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ のエピタキシャル層を含む比較的低濃度にドーブしたN型ドリフト領域を含むショットキーダイオードの形態をとる。x値は変更でき、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層の位置に依存し、N+領域において $0 \sim 約0.8$ であり、かつドリフト領域において約 0.7 を超えるかまたは約 0.8 を超えるx値を一般に有する。

【0010】

本発明は、パワー半導体デバイスを形成する方法も提供し、当該方法は、窒化アルミニウム単結晶基板を受ける工程であって、当該基板の転位密度が 10^5 cm^{-2} 未満かつ

50

当該(002)結晶面および(102)結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅が約200アークセカント未満である工程と、当該窒化アルミニウム単結晶基板の上にドーブした $Al_xGa_{1-x}N$ 活性化エピタキシャル層を堆積する工程と、当該窒化アルミニウム単結晶基板の少なくとも一部を除去する工程と、ドーブした $Al_xGa_{1-x}N$ 活性化層と接触する金属電極層を形成する工程と、を含む。例示的な堆積技術には、分子線エピタキシー(MBE)、有機金属化学気相成長法(MOCVD)およびハイドライド気相成長(HVPE)を含む。パワー半導体構造がショットキーダイオードの形態をとる一実施形態では、窒化アルミニウム単結晶基板上に比較的高濃度にドーブした1つ以上の $N+Al_xGa_{1-x}N$ 層を堆積する工程、および比較的高濃度にドーブした $N+Al_xGa_{1-x}N$ 層上に比較的低濃度にドーブした1層以上のN型 $Al_xGa_{1-x}N$ 層を堆積する工程、を含む。

10

【0011】

本発明は、非限定に、以下の実施形態を含む。

【0012】

実施形態1：パワー半導体デバイスであって、窒化アルミニウム単結晶基板であって、当該基板の転位密度が約 10^5 cm^{-2} 未満であり、当該(002)結晶面および(102)結晶面に対し二軸のロックンクカーブの半値全幅(FWHM)が、約200アークセカント未満である、窒化アルミニウム単結晶基板と、窒化アルミニウム単結晶基板上にあるドーブした複数の $Al_xGa_{1-x}N$ エピタキシャル層を含むパワー半導体構造と、を備えるパワー半導体デバイス。

20

【0013】

実施形態2：当該基板の転位密度が 10^4 cm^{-2} 未満である、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

【0014】

実施形態3：当該基板の転位密度が 10^3 cm^{-2} 未満である、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

【0015】

実施形態4：当該基板の転位密度が 10^2 cm^{-2} 未満である、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

【0016】

実施形態5：当該(002)結晶面および(102)結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅(FWHM)が約100アークセカント未満である、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

30

【0017】

実施形態6：当該(002)結晶面および(102)結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅(FWHM)が約50アークセカント未満である、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

【0018】

実施形態7：当該(002)結晶面および(102)結晶面に対する二軸のロックンクカーブの半値全幅(FWHM)が約25アークセカント未満である、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

40

【0019】

実施形態8：当該パワー半導体構造がショットキーダイオード、接合型電界効果トランジスタ(JFET)、またはパワー金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)の形態である、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

【0020】

実施形態9：当該パワー半導体構造は、 $Al_xGa_{1-x}N$ の1層以上のエピタキシャル層を備える比較的高濃度にドーブしたN+領域と隣接する、 $Al_xGa_{1-x}N$ の1層以上のエピタキシャル層を備える、比較的低濃度にドーブしたN型ドリフト領域を備える

50

ショットキーダイオードの形態である、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

【0021】

実施形態10：ドーブした $Al_xGa_{1-x}N$ 層の少なくとも1層が約0.7を超える x 値を有する、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

【0022】

実施形態11：当該窒化アルミニウム単結晶基板が物理的気相輸送法により作製される、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

【0023】

実施形態12：当該デバイスは、少なくとも約5MV/cmの絶縁破壊電界と、少なくとも約20kVの阻止電圧と、少なくとも約20kHzのスイッチング周波数と、の1つ以上を特徴とする、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載のパワー半導体デバイス。

10

【0024】

実施形態13：パワー半導体デバイスの形成方法であって、窒化アルミニウム単結晶基板を受ける工程であって、当該基板の転位密度が約 10^5 cm^{-2} 未満であり、当該(002)結晶面および(102)結晶面の二軸のロッキングカーブの半値全幅が200アーケセント未満である工程と、当該窒化アルミニウム単結晶基板上に複数のドーブした $Al_xGa_{1-x}N$ のエピタキシャル活性化層を堆積する工程と、当該ドーブした $Al_xGa_{1-x}N$ の活性化層と接触して金属電極層を形成する工程と、を備える、パワー半導体

20

【0025】

実施形態14：当該堆積工程が、分子線エピタキシー(MBE)、有機金属化学気相成長法(MOCVD)、またはハイドライド気相成長法(HVPE)を含む、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載の方法。

【0026】

実施形態15：当該パワー半導体構造が、ショットキーダイオードの形態を有し、当該堆積工程が当該窒化アルミニウム単結晶基板上に比較的高濃度にドーブした1層以上の $N+Al_xGa_{1-x}N$ 層を堆積する工程と、当該比較的高濃度にドーブした1層以上の $N+Al_xGa_{1-x}N$ 層上に比較的低濃度にドーブした1層以上の N -型 $Al_xGa_{1-x}N$ 層を堆積する工程と、を備える、前述あるいは後述の実施形態のいずれかに記載の方法。

30

【0027】

これらの特徴、態様および利点、ならびに本開示の他の特徴、態様および利点は、以下の簡単に説明した図面の添付と一緒に以下の詳細な説明を読むことから明らかとなる。そのような特徴または要素が明細書における特定の実施形態の記載中で明示的に組合せられるか否かは問わず、本開示中に明示された2つ、3つ、4つまたはそれ以上の特徴または要素の組合せと同様、上述の実施形態のうち2つ、3つ、4つまたはそれ以上のいずれかの組合せを本発明は包含する。文脈中で別段の指示を明記しない限り、開示の本発明の個々の特徴または要素のいずれも組合せ可能となるように意図して解されるべく、本開示は

40

【0028】

上述の一般的用語中で開示を記載したが、さらに本明細書は添付の図面を参照する。添付図面は必ずしも縮尺通りではない。

【図面の簡単な説明】

【0029】

【図1】本発明による例示的ショットキーダイオードを示す。

【図2】図1のショットキーダイオードの陽極(アノード)へ適用した逆バイアスの効果を示す。

【図3】実施例に記載するように、窒化アルミニウム単結晶基板上で成長するショットキ

50

ーダイオード構造を示す。

【図4】実施例に記載する例示的デバイスに対する、電流 - 電圧曲線を示す。

【発明を実施するための形態】

【0030】

本開示を、さらにその例示的な実施形態を参照して、以下により完全に説明する。本開示が完全に網羅され、当業者に対する開示の範囲を完全にカバーするように、これら例示的な実施形態を記載する。実際に、本開示は、多くの異なる形態で具現化可能であり、明細書で示された実施形態に限定して解釈されるべきではなく、むしろ、これらの実施形態は法的要件を満たすように提供されている。明細書や添付の特許請求の範囲にて使用される、単数形「a」、「an」、「the」は、文脈中で別段明確に示唆しない限り、複数形を含む。

10

【0031】

本発明の実施形態は、パワー半導体デバイスに関する。本明細書で使用する、用語「パワー半導体デバイス」は、半導体材料を構成しかつ電流を制御または変換するのに適用され、スイッチおよび整流器を含むことを意図する。これらのデバイスは、2端子デバイスまたは3端子デバイスおよび多数キャリアデバイスまたは少数キャリアデバイスであってよく、特に、ショットキーダイオード、接合型電界効果トランジスタ（JFET）、パワー金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）、サイリスタ、バイポーラ接合トランジスタ（BJT）、PINダイオードおよび絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT）を含む。（ショットキーダイオードを含む）パワーダイオードは、特に重要なデバイスの分類であり、電力の整流を提供し、電気メッキ、陽極酸化、バッテリー充電、溶接、電源（DCおよびAC）および可変周波数駆動整流を含む様々な応用に使用される。

20

【0032】

本発明によると、パワー半導体デバイスは、物理気相輸送（PVT）により作製される低い転位密度を有する窒化アルミニウム単結晶基板上で製造される。窒化アルミニウムは、非常に高い臨界電界を有する。臨界電界は、オフ状態で高い阻止電圧を達成するのに関係する。臨界電界と阻止電圧は両方とも、高い電位密度を有する材料により顕著に低下する。よって、本発明で使用する窒化アルミニウム基板が非常に低い転位密度を示すため、当該基板は、例外的に高い臨界電界を実現するパワー半導体デバイス構造の製造に使用できる。

30

【0033】

窒化アルミニウムは、通常は誘電体とみなされているが、窒化アルミニウムと窒化ガリウム合金、窒化アルミニウムガリウム（ $Al_xGa_{1-x}N$ ）合金と共に、有意な熱伝導率を示し、また、優れた電子移動度、高いアルミニウム含有量の見込みを保持する。広い電子バンドギャップを有するこれら好適な熱特性を組合せることにより、例外的に高い絶縁破壊電界を有する高速電力制御デバイスの製造が可能となる。ある実施形態では、本発明により、少なくとも約5MV/cm、少なくとも約10MV/cm、少なくとも約15MV/cmまたは少なくとも約20MV/cmオーダーの絶縁破壊電界を有する多数キャリアパワーデバイスを提供できる。従って、本発明による窒化アルミニウムガリウム（ $Al_xGa_{1-x}N$ （ $x > 0.8$ ））から製造されたパワーデバイスは、抵抗において同一特性を有するシリコン（Si）デバイスよりも絶縁破壊電圧で200:1の改善を示す可能性を有する。

40

窒化アルミニウム基板

【0034】

低い欠損密度を有するIII族の窒化物半導体材料は、高性能のパワー半導体デバイスの製造に使用できる。当該基板の格子定数とデバイス層の間における相違を最小限にすることにより、デバイス全体にわたり、より低い転位密度が発生する。従って、窒化アルミニウムまたは窒化ガリウムの単結晶をIII族の窒化物ベースのデバイスに対し基板として使用することは理想的である。この理由は、これらの天然のIII族の窒化物基板を使

50

用することにより、基板とデバイス層との間の格子定数の差が最小化されるからである。当該基板に存在する転位は、デバイス層に伝播する傾向にあるので、低い転位密度を有する基板を使用するのが好適である。

【0035】

本発明では、窒化アルミニウム単結晶基板が、特に好ましく、そのような基板はc面、m面、a面またはr面であってよい。「単結晶」は、3次元上の一方向を有する所定の格子原子を有する結晶に関する。単結晶基板上に製造されたパワー半導体デバイスは、基板の結晶方向を受け継ぐ。対照的に、「多結晶」は、単結晶の存在しない、多数の結晶粒界を有する多方向性があるものに関する。本発明の基板を適用する際、「単結晶基板」は、パワー半導体デバイスの成長に利用可能な少なくとも1つの単結晶表面が、最小限存在することに関する。また、当該パワー半導体デバイスは、別の基板と結合した単結晶層を有する基板とともに、その厚さ全体にわたり均質な単結晶構造を有する基板を含むであろう。窒化アルミニウム単結晶は、約6 eVの直接遷移を特徴とするIII族の窒化半導体材料である。これは、窒化ガリウム(GaN)および窒化インジウム(InN)等の他の窒化物よりも大きなバンドギャップを示し、従って、バンドギャップエネルギー生成のため、ガリウム(Ga)またはインジウム(In)と窒化アルミニウムの合金化が可能である。

10

【0036】

窒化アルミニウム単結晶基板の作製方法は、可変であるが、所望の材料を形成するのに前駆体分子の化学反応を含む化学蒸着技術(CVD)に対し、物理的気相輸送を一般的に含む。つまり、好ましいプロセスでは、窒化アルミニウムの供給源から、るつぼまたは他の結晶成長チャンバ内における堆積位置への、所望の材料(例えば窒化アルミニウム(AlN))の物理的気相輸送を含むことを意味する。堆積領域は、窒化アルミニウム単結晶基板のシード材料を一般的に含み、また、成長プロセスは誘導加熱反応器内で一般に行われる。本発明で使用するのに好適な窒化アルミニウム単結晶基板の成長のための、シード物理蒸着(PVT)成長プロセスは、例えば、米国特許第7678195号、Schlessler, Ehrentraut, D. および Sitar 等(2009年), Advances in bulk crystal growth of AlN and GaN, MRS Bulletin, 34巻(4号), 259頁-265頁、Lu等(2009年) Seeded growth of AlN bulk crystals in m- and c-orientation, Journal of Crystal Growth, 312巻(1号), 58頁-63頁、Herro等(2010年) Growth of AlN single crystalline boules, Journal of Crystal Growth, 312巻(18号) 2519頁-2521頁に記載があり、それぞれ開示の文献は参照により本明細書に援用される。本発明にて使用する窒化アルミニウム単結晶基板は、米国特許第7632454号、Schlessler等に記載した物理的気相輸送(PVT)法の結晶成長プロセスに使用可能な、HexaTech, Inc., Morrisville(ノースカロライナ州)のるつぼが商業的に入手でき、開示の文献は参照により本明細書に援用される。Schlesslerらの米国特許第7815970号、Collazoらの米国特許第7915178号の開示も参照のこと。これらの両文献は参照により本明細書に援用される。

20

30

40

【0037】

転位密度計測器を含む、複数の計器に基づき単結晶基板の質を評価できる。単結晶基板での欠損を計測する例示的技術としては、例えば、Dalmau等,(2011年) Characterization of dislocation arrays in AlN single crystals grown by PVT, Phys. status solidi A 208巻(7号), 1545頁-1547頁、および Raghathamacharら,(2012年), Low defect density bulk AlN substrates for high performance electronics and optoelectronics, Materi

50

als Science Forum, 717頁 - 720頁, 1287頁 - 1290頁に、それらの技術が記載され、両方の文献は参照により本明細書に援用される。

【0038】

単結晶ウェハ基板での格子歪みを特徴付けるのに使用する1つの方法として、シンクロトン放射源を用いることにより、X線トポグラフィーで結晶中の歪みを直接撮像する方法がある。例えば、X線トポグラフィーのアメリカ合衆国立標準技術研究所(NIST)推奨の実践ガイドを参照のこと。同文献の開示は参照により本明細書に援用される。転位密度は、転位総数を視野面積で除算することにより算出する。

【0039】

明細書に記載する窒化アルミニウム単結晶基板の転位密度は、好ましくは、約 10^5 cm^{-2} 未満であり、より好ましくは約 10^4 cm^{-2} 未満であり、さらに最も好ましくは約 10^3 cm^{-2} 未満であることが望ましい。ある実施形態では、窒化アルミニウム基板の転位密度は、約 10^2 cm^{-2} 未以下である。

10

【0040】

相対的に低い転位密度を有するサンプルでは、例えば、水酸化カリウムと水酸化ナトリウムとを1:1の重量比で混合した溶液を用いて、300で5~10分間、機械的に研磨した結晶面をエッチングする必要がある。エッチング後に、エッチングされた表面を計測し、エッチピットの数電子顕微鏡または光学顕微鏡で観察する。当該転位密度はその後、観測したエッチピットの数視野領域の面積で除算して算出する。

【0041】

基板の表面の処理が不十分である場合にも、得られるデバイスの転位密度が増大することがある。よって、表面処理の技術は、界面から新しい転位を生じさせることなくエピタキシャル成長させる好適な表面を得るのに利用することがある。本発明の実施形態では、窒化アルミニウム基板表面は、研削により処理し、化学機械的研磨後、残りの表面の粗さを減らす。窒化アルミニウム基板の処理プロセスは、アルカリ溶液を用いた、反応性イオンエッチング法または湿式エッチング法も含まれ得る。研磨プロセスの詳細は、本発明まで特に限定するものでない。乾式エッチング法による平坦化処理も使用できる。使用する表面処理の方法に関わらず、原子的ステップからなる、非常に滑らかかつ平坦な基板表面が理想的である。

20

【0042】

単結晶基板中の格子歪みを特徴付ける別の方法として、高分解能X線回析(HRXRD)がある。例えば、アメリカ合衆国立標準技術研究所(NIST)の高分解能X線回析基準の資料SRM 2000 link: http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub__id=902585を参照のこと。同文献の開示は参照により本明細書に援用される。さらに、D.K. Bowen, B.K. Tanner, CRC Press 1998年による, High Resolution X-Ray Diffractometry And Topographyを参照のこと。同文献の開示は参照により本明細書に援用される。転位密度は、高分解能X線回析(HRXRD)の計測でロッキングカーブ(RC)の半値全幅(FWHM)により特徴付けることができる。狭いピークは、結晶中の格子欠損の少なさを示し、このことはすなわち、転位密度の低さを意味する。特に、本発明で使用する窒化アルミニウム基板の結晶平面に対するX線ロッキングカーブ(RC)の半値全幅(FWHM)は、好ましくは、約200アークセカント未満、約100アークセカント未満、約50アークセカント未満または約25アークセカント未満であることが望ましい。例示的な範囲としては、約1~約200アークセカント、約5~約50アークセカントおよび約10~約25アークセカントを含む。XRD計測器は、Cu K_1 が $\lambda = 1.54056$ である放射線を用いる、Phillips X'Pert MRD回析計を用いて実施可能である。X線管は、40kV、45mAの設定で焦点合わせ可能である。二軸構成は、Ge(220)4結晶モノクロメータおよびオープン検出器を利用可能である。X線ビームのスポットサイズは、約10mmであってもよい。

30

40

50

パワー半導体デバイスの構造

【0043】

本発明のパワー半導体デバイスの作製における精密構成および方法は、変更可能であるが、しかし、当該分野で公知のエピタキシャル成長、実装、およびパッケージングプロセスを一般的に含む。本発明による各パワー半導体デバイスは、明細書に記載する窒化アルミニウム基板上で成長し、かつN型および/またはP型の半導体層の形態で複数の活性層を含む（例えば、シリコン（Si）ドープ窒化アルミニウムガリウム（ $Al_xGa_{1-x}N$ ）層）。

【0044】

正確なデバイス構造は、デバイスの型に依存する。例えば、本発明によるMOSFETは、ゲート、ソース、ドレイン、および本体を含む、従来の4端子構造を有してもよい。本発明によるショットキーダイオード構造は、例えば、高濃度にドープしたN+型層上に形成した、低濃度にドープしたN型ドリフト層を有する、図1に示す構造を有し得る。ドープしたN型ドリフト層面の少なくとも一部は、陽極（アノード）として金属層と接触する。金属層（ラベルしたショットキー金属）およびドープしたN型ドリフト層の間の接触領域は、ショットキーバリアを形成する。ドープしたN+型層面の少なくとも一部は、陰極（カソード）としてのオーミック金属層と接触する。例示的な電極金属は、チタン、アルミニウムおよび金ならびにそれらの組合せを含む。例示されたデバイスを縦方向に配置するのに対し、横方向に配置したダイオード構造も本発明では使用可能である。

【0045】

ショットキーダイオードのN+型接触領域は一般的に1層以上のシリコン（Si）ドープした窒化アルミニウムガリウム（ $Al_xGa_{1-x}N$ ）層からなり、xは約0～約0.8（例えば約0.2～約0.8）の範囲にある。ショットキーダイオードのN型ドリフト領域は、一般に1層以上のシリコン（Si）ドープした窒化アルミニウムガリウム（ $Al_yGa_{1-y}N$ ）層からなり、ここでyは約0～約1の範囲にある。好都合にも、yはドリフト領域において約0.7を超えるか、あるいは約0.8（純粋な窒化アルミニウムを含む）を超える。

【0046】

逆バイアスを陽極（アノード）に適用する場合、図2に示すように、デバイスはオフ状態にあり、適用電圧がショットキー金属とNドリフト領域の間にある界面に形成し、カソード（陰極）へ向かって延在するドリフト領域にある空乏域により支持される。最大電界（EM）はショットキー金属とNドリフト領域の間にある界面に存在し、最大電界が半導体の臨界電場（EC）に達するまで、適用バイアスは上昇可能である。

【0047】

上述のように、破壊電圧は半導体の臨界電場により決定する。窒化アルミニウム（AlN）、窒化ガリウム（GaN）およびシリコンカーボン（SiC）等のワイドバンドギャップ材料は、シリコン（Si）よりも高い臨界電場を有する。このため、本発明の窒化アルミニウム（AlN）または窒化アルミニウムガリウム（AlGaN）のショットキーダイオードは、シリコン（Si）のショットキーダイオードと比較してより高い破壊電圧に達することが可能である。破壊電圧（BW）およびドリフト領域の比抵抗（RD）は以下の式によって示される。

【0048】

【数1】

$$R_D = \frac{4BV^2}{\mu_s E_C^3}$$

10

20

30

40

50

【0049】

上記式において、 μ はキャリア移動度であり、 α は誘電率であり、 E_c は半導体の臨界電場である。従って、窒化アルミニウム (AlN) または窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) を基礎とするショットキーダイオードは、シリコン (Si) ベースのデバイスと比較して低い抵抗比を有する高い破壊電圧に達することができる。

本発明のパワー半導体の製造法

【0050】

上述したパワー半導体デバイスの構造は、分子線エピタキシー (MBE)、有機金属化学気相成長法 (MOCVD)、ハイドライド気相成長法 (HVPE)、液相エピタキシー (LPE) 等の先行技術のエピタキシャル成長プロセスにより形成される。好ましくは、ドーパントの協働とともに、デバイス層の厚さを制御するため、有機金属化学気相成長法 (MOCVD) プロセスが望ましい。窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) 金属のドーブした層を形成する方法は、例えば、米国特許第 6888170 号、同第 6953740 号、同第 7482191 号および同第 7485901 号等 (全て Schaff 等) に記載され、これらは参照により本明細書に援用される。

10

【0051】

多くの単結晶基板は C 面基板である。使用するエピタキシー法に関わらず、堆積層は基板の結晶構造を繰り返す。従って、全層のデバイスにわたり低い転位密度を達するためには、上述した低い転位密度を有する基板が必要となる。

20

【0052】

デバイス層の成長の間、炭素および酸素の結合を制御することは重要であり、かつ分子線エピタキシー (MBE) およびハイドライド気相成長法 (HVPE) 等の「炭素フリー」のプロセスを利用することにより、また有機金属化学気相成長法 (MOCVD) による炭素制御用の過飽和のスキームを利用することにより、炭素および酸素の結合制御が達成可能である。任意の実施形態では、活性化層における炭素濃度は約 10^{16} cm^{-3} 未満に維持される。有機金属化学気相成長法により成長する窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) 膜においては、好ましくは、アルミニウム高含有膜に対して $5 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で制御可能な n 型担体濃度を得ることが望ましい。シリコン (Si) ドープ窒化アルミニウムガリウム ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x > 0.7$ または $x > 0.8$)) の量子ウェルが、本発明のパワー半導体デバイスにおけるドリフト領域として利用可能である。活性化層の堆積に続き、単結晶基板は少なくとも部分的に除去または薄くなっていることが望ましい。さらに、金属電極層は活性化層と接触して形成する。

30

【0053】

透過電子顕微鏡法 (「TEM」) は、基板およびデバイス層における格子歪みを特徴付けるのに使用する基準的方法である。結晶中の転位は、超薄型基板の試験片を透過する電子ビームを用いることにより直接撮像することが可能である。映像は、試験片を透過する電子の相互作用から形成される。

【0054】

本発明の様々な実施形態では、デバイス層の透過電子顕微鏡 (TEM) 横断分析を用いて、更なる転位が基板デバイス層の界面に形成されているか否かを確認するのに使用でき、さらに、それ故に、デバイス層における転位密度が基板上のものと本質的に同一であると結論付けることができる。

40

本発明におけるパワー半導体の使用方法

【0055】

本発明のパワー半導体は、電力分配のアプリケーションを含み、そのようなデバイスに知られる如何なる用途においても使用可能であろう。電力分配で次世代の主要な革新には、電力分配のパワーグリッド (中電圧系) において高周波数電力切換の使用を含むことが期待され、また、従来 60 Hz の電磁変換を置換することである。しかし、これには、高電圧、高周波数パワー半導体デバイスが必要となる。本明細書に記載したタイプの窒化アルミニウムベースのデバイスは、理想的には、 20 kV を越えて動作可能で、 20 kHz

50

z を越えて切換可能なデバイスを構築するのが望ましい。例えば、20 kV 級のデバイスを必要とする場合であっても、本発明のパワー半導体デバイスは高電圧スイッチおよび/または高電圧整流器として使用することができるであろうし、またそのようなデバイスは超低逆回復損失を有することが期待されるであろう。

実験例

【0056】

以下の実験例により例示される本発明の態様は、より完全に本発明の特定の実施形態を例示するために記載しており、その限定として解釈されるべきではない。

【0057】

図3のショットキーダイオード構造は、HexaTech社のPVTプロセスを用いて成長させた窒化アルミニウムのブールから製造した窒化アルミニウム単結晶基板上でエピタキシャルに成長し、 10^4 cm^{-2} 未満の平均転位密度を有する材料をルーチンに製造可能である。ダイオード構造の断面図のTEM映像は、目に見えない転位を有するレイヤーの間におけるシャープで急な界面を明らかにした。

10

【0058】

基板上に成長させたシリコン-ドープした接触領域は、 $\text{Al}_{0.79}\text{Ga}_{0.21}\text{N}$ の組成を有するものとして特徴づけられ、接触領域上に成長させたドリフト領域は、窒化アルミニウムが低濃度にドープされていた。HRXRD計測器は、ドリフト領域が125 nmの厚さ、かつ接触領域が522 nmの厚さを示す。

【0059】

図4は、実験例のデバイスに対するI-Vカーブを示す。図4に示すように、このデバイスは逆バイアス下で顕著な低リーク電流を示す。さらに、実験例のデバイスの絶縁破壊電界を、(1)空气中、(2)真空中、(3)FOMBLIN(登録商標)潤滑剤を用いて「不導体」となった表面の複数の条件で計測した。計測された絶縁破壊電界は、各条件で約5 MV/cmであり(1メートルのツールで試験したダイオードは、5.7 MV/cmの最高のパフォーマンスを示した)、シリコンカーバイド(SiC)の最高絶縁破壊電界の理論値をはるかに超える。測定された降伏値は、表面破壊が原因と考えられ、最適化されたデバイスに対して理論的な絶縁破壊電界の示唆はなく、約15 MV/cmを越えると考えられる。

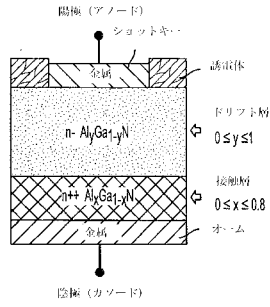
20

【0060】

本明細書に記載された開示の多くの修正および他の態様は、前述の記載および関連する図面中で示された教示の利益を有することを、本開示が関連することに当業者は想起するであろう。従って、本開示は開示された特定の態様に限定されるべきものではなく、また、修正および他の態様が特許請求の範囲に含まれることを意図することが理解されるべきである。本明細書中では特定の用語が用いられているが、それらは一般的かつ説明的な意味のみで使用するものであり、限定目的で使用されるものではない。

30

【 図 1 】



【 図 3 】

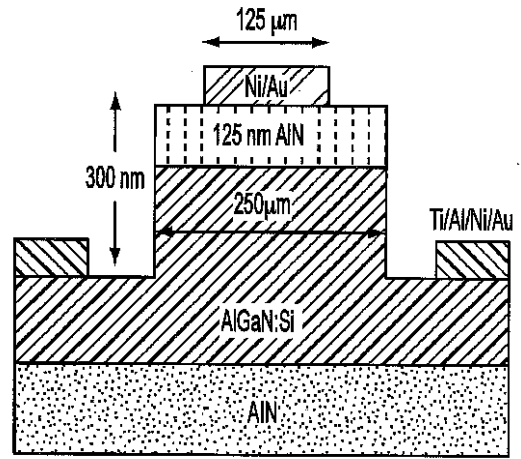
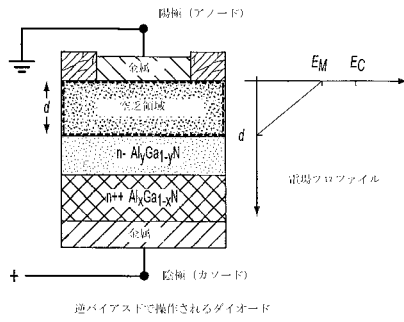
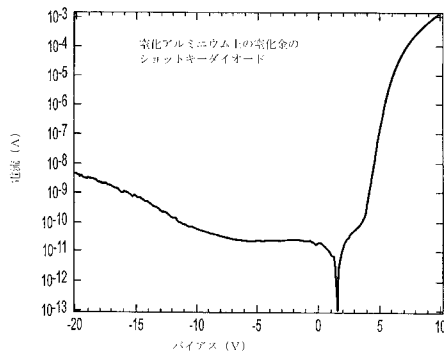


FIG. 3

【 図 2 】



【 図 4 】



【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/US2014/025516

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. H01L29/66 H01L29/872 H01L29/20 ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01L		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, INSPEC		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2007/096239 A1 (CAO XIAN-AN [US] ET AL) 3 May 2007 (2007-05-03)	1-9, 11-15
Y	the whole document	10
Y	----- JINQIAO XIE ET AL: "Ni/Au Schottky diodes on AlxGa1-xN (0.7<x<1) grown on AlN single crystal substrates", PHYSICA STATUS SOLIDI (C), vol. 8, no. 7-8, 9 July 2011 (2011-07-09), pages 2407-2409, XP55125644, ISSN: 1862-6351, DOI: 10.1002/pssc.201001009 the whole document -----	10
	-/--	
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C.		<input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.
* Special categories of cited documents : "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report
7 July 2014		14/07/2014
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel: (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Baillet, Bernard

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/US2014/025516

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	R. DALMAU ET AL: "Growth and Characterization of AlN and AlGaN Epitaxial Films on AlN Single Crystal Substrates", JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, vol. 158, no. 5, 1 January 2011 (2011-01-01), page H530, XP55125840, ISSN: 0013-4651, DOI: 10.1149/1.3560527 the whole document -----	1-15
A	L.J. SCHOWALTER ET AL.: "Preparation and characterization of single-crystal aluminium nitride substrates", MATERIAL RESEARCH SYMPOSIUM PROCEEDINGS, vol. 595, 2000, pages W6.7.1-W6.7.6, XP8170105, Warrendale, PA, USA ISBN: 1-55899-503-X the whole document -----	1-15
A	JAMES TWEEDIE ET AL: "Schottky barrier and interface chemistry for Ni contacted to Al _{0.8} Ga _{0.2} N grown on c-oriented AlN single crystal substrates", PHYSICA STATUS SOLIDI (C), vol. 9, no. 3-4, 26 March 2012 (2012-03-26), pages 584-587, XP55125899, ISSN: 1862-6351, DOI: 10.1002/pssc.201100435 the whole document -----	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/US2014/025516

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2007096239	A1	03-05-2007	NONE

フロントページの続き

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
C 2 3 C 16/34 (2006.01)	C 2 3 C 16/18	
H 0 1 L 21/205 (2006.01)	C 2 3 C 16/34	
H 0 1 L 29/205 (2006.01)	H 0 1 L 21/205	
H 0 1 L 21/28 (2006.01)	H 0 1 L 29/205	
H 0 1 L 29/47 (2006.01)	H 0 1 L 29/86	3 0 1 F
H 0 1 L 21/20 (2006.01)	H 0 1 L 21/28	3 0 1 B
	H 0 1 L 21/28	3 0 1 R
	H 0 1 L 29/48	D
	H 0 1 L 29/48	F
	H 0 1 L 21/20	

(81) 指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

(72) 発明者 ムーディー, バクスター
アメリカ合衆国, ノースカロライナ州 27607, ローリー, 2316 ベッドフォード アベニュー

(72) 発明者 ミタ, セイジ
アメリカ合衆国, ノースカロライナ州 27511, ケーリー, 1740 ローレル パーク ブレイス

(72) 発明者 シエ, ジンチアオ
アメリカ合衆国, テキサス州 75013, アレン, 1333 ライトハウス レーン

Fターム(参考) 4G077 AA02 AA03 AB01 AB02 AB06 AB08 BE11 BE13 DA02 DA18
DB08 EB01 ED04 ED05 EF01 HA06 HA12 SA01 SA04 TA04
TB05 TC12 TC19 TH10 TK06 TK13
4K030 AA11 BA02 BA08 BA38 BB02 BB12 CA04 CA12 LA14 LA15
4M104 AA04 BB02 BB09 BB14 CC01 CC03 EE09 FF02 GG03 GG09
GG11 GG18
5F045 AA04 AB17 AF04 CA01 CA05 CA06 DA52
5F152 LL03 LL05 LL09 LN03 MM02 MM04 MM06 NN09 NQ09