

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-98262

(P2010-98262A)

(43) 公開日 平成22年4月30日 (2010.4.30)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)
H O 1 L 21/28 (2006.01) H O 1 L 21/28 3 O 1 B 4 M 1 O 4

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 29 頁)

(21) 出願番号 特願2008-270240 (P2008-270240)	(71) 出願人 000002130
(22) 出願日 平成20年10月20日 (2008.10.20)	住友電気工業株式会社
特許法第30条第1項適用申請有り 発行者名 社団法人応用物理学会 刊行物名 第69回応用物理学会学術講演会 講演予稿集 No. 2 発行日 平成20年9月2日 [刊行物等] 研究集会名 第69回応用物理学会学術講演会 主催者名 社団法人応用物理学会 開催日 平成20年9月2日から9月5日「4日間」	大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
	(71) 出願人 301021533
	独立行政法人産業技術総合研究所
	東京都千代田区霞が関1-3-1
	(74) 代理人 100088155
	弁理士 長谷川 芳樹
	(74) 代理人 100092657
	弁理士 寺崎 史朗
	(74) 代理人 100113435
	弁理士 黒木 義樹
	(74) 代理人 100108257
	弁理士 近藤 伊知良

最終頁に続く

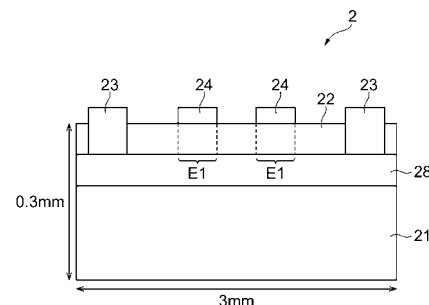
(54) 【発明の名称】 ダイヤモンド電子素子、及び、ダイヤモンド電子素子の製造方法

(57) 【要約】

【課題】高耐電圧のダイヤモンド電子素子及び高耐電圧のダイヤモンド電子素子の製造方法を提供する。

【解決手段】上記課題を解決するために、本発明のダイヤモンド電子素子2は、第2ダイヤモンドエピタキシャル層22を有する本体部と、本体部に設けられた電極24とを備えたダイヤモンド電子素子であって、第2ダイヤモンドエピタキシャル層22は、 $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ 以下の面密度の複合転移を有する所定の電圧印加領域E1を含み、電極24は、電圧印加領域E1上に設けられている。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ダイヤモンドエピタキシャル層を有する本体部と、前記本体部に設けられた電極とを備えたダイヤモンド電子素子であって、

前記ダイヤモンドエピタキシャル層は、 $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 以下の面密度の複合転位を有する所定のダイヤモンド領域を含み、

前記電極は、前記ダイヤモンド領域上に設けられている、
ことを特徴とするダイヤモンド電子素子。

【請求項 2】

前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層を所定の方法でドライエッチングした場合に所定のエッチピットの発生原因となる欠陥である、
ことを特徴とする請求項 1 に記載のダイヤモンド電子素子。

【請求項 3】

前記エッチピットの深さは、前記エッチピットの口径の 2 倍以上である、
ことを特徴とする請求項 2 に記載のダイヤモンド電子素子。

【請求項 4】

前記ダイヤモンド領域は、前記エッチピットの発生原因とならない欠陥をさらに含む、
ことを特徴とする請求項 2 又は請求項 3 に記載のダイヤモンド電子素子。

【請求項 5】

前記ドライエッチングに使用するガスは、水素と酸素を含む、
ことを特徴とする請求項 2 ～請求項 4 の何れか一項に記載のダイヤモンド電子素子。

【請求項 6】

前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層の所定の面に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合に、X 線回折面 (113) の X 線トポグラフィー像が検出される欠陥を含む、ことを特徴とする請求項 1 ～請求項 5 の何れか一項に記載のダイヤモンド電子素子。

【請求項 7】

前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層の所定の面に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合に、X 線回折面 (044) の X 線トポグラフィー像が検出される欠陥を含む、ことを特徴とする請求項 1 ～請求項 6 の何れか一項に記載のダイヤモンド電子素子。

【請求項 8】

前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層の所定の面に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合に、X 線回折面 (220) の X 線トポグラフィー像が検出される欠陥を含む、ことを特徴とする請求項 1 ～請求項 7 の何れか一項に記載のダイヤモンド電子素子。

【請求項 9】

前記本体部は、ダイヤモンド基板をさらに有し、

前記ダイヤモンドエピタキシャル層は、前記ダイヤモンド基板上にエピタキシャル成長されて設けられており、

前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層の所定の面に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合に、X 線回折面 (113) 、 (044) 及び (220) の X 線トポグラフィー像が検出される欠陥を含み、

前記基板に含まれる複合転位は、前記 X 線回折面 (113) 及び前記 X 線回折面 (044) の X 線トポグラフィー像が検出され、且つ、前記 X 線回折面 (220) の X 線トポグラフィー像が検出されない欠陥を含む、

ことを特徴とする請求項 1 ～請求項 5 の何れか一項に記載のダイヤモンド電子素子。

【請求項 10】

ダイヤモンド基板上にエピタキシャル成長によってダイヤモンドエピタキシャル層を設ける成長工程と、

10

20

30

40

50

X線トポグラフィーを用いて前記ダイヤモンドエピタキシャル層に含まれる複合転位の密度を測定する測定工程と、

前記測定工程によって得られる結果に基づいて、複合転位の面密度が $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ 以下である前記ダイヤモンドエピタキシャル層の領域上に電極を設ける工程と、
を備えることを特徴とするダイヤモンド電子素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ダイヤモンド電子素子とダイヤモンド電子素子の製造方法とに関する。

【背景技術】

10

【0002】

ダイヤモンドは、従来の半導体材料に比べてバンドギャップが大きく、高絶縁破壊電圧、高移動度、高熱伝導率などの優れた物性を持つため、電子デバイスへの応用が望まれている。特に、ダイヤモンドを用いた電子素子の絶縁破壊電圧は、理論的には 10 MV/cm に達すると考えられている。このため、ダイヤモンドを用いた高耐電圧の電子素子の開発が進められている。ダイヤモンドを用いた電子素子の一例が非特許文献1及び非特許文献2に記載されている。

【非特許文献1】A.Vescan, I.Daumiller, P.Gluche, W.Ebert, E.Kohn, "Hightemperature, high voltage operation of diamond Shottky diode", Diamond and Related Materials, 7 (1998), p.581-584

20

【非特許文献2】D.J.Twitchen, A.J.Whitehead, S.E.Coe, J.Isberg, J.Hammersberg, T.Wikstrom, E.Johansson, "High-Voltage Single-Crystal Diamond Diodes", IEEE Transaction on Electron Devices, MAY2004, Vol.51, No.5, p.826

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

しかしながら、非特許文献1のダイヤモンドショットキーダイオードにおいては、絶縁破壊電圧は 3 MV/cm に過ぎない。また、非特許文献2のダイヤモンドショットキーダイオードは、平均電圧 1.4 MV/cm に対する逆方向リーク電流が約 1 mA/cm^2 であり、高耐電圧のダイヤモンド電子素子とは言い難い。そこで、本発明は、高耐電圧のダイヤモンド電子素子を提供することを課題とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0004】

本発明のダイヤモンド電子素子は、ダイヤモンドエピタキシャル層を有する本体部と、前記本体部に設けられた電極とを備えたダイヤモンド電子素子であって、前記ダイヤモンドエピタキシャル層は、 $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ 以下の面密度の複合転位を有する所定のダイヤモンド領域を含み、前記電極は、前記ダイヤモンド領域上に設けられている、ことを特徴とする。更に、前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層を所定の方法でドライエッチングした場合に所定のエッチピットの発生原因となる欠陥である。更に、前記ドライエッチングに使用するガスは、水素と酸素を含む。更に、前記エッチピットの深さは、前記エッチピットの口径の2倍以上である。更に、前記ダイヤモンド領域は、前記エッチピットの発生原因とならない欠陥をさらに含む。

40

【0005】

また、本発明のダイヤモンド電子素子において、前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層の所定の面に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合に、X線回折面 (113) のX線トポグラフィー像が検出される欠陥を含んでもよいし、前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層の所定の面に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合に、X線回折面 (044) のX線トポグラフィー像が検出される欠陥を含んでもよいし、前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層の所定の面に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合に、X線回折面 (220) のX線トポグラフィー像が検出される欠陥を含

50

んでもよい。

【 0 0 0 6 】

また、本発明のダイヤモンド電子素子において、前記本体部は、ダイヤモンド基板をさらに有し、前記ダイヤモンドエピタキシャル層は、前記ダイヤモンド基板上にエピタキシャル成長されて設けられており、前記複合転位は、前記ダイヤモンドエピタキシャル層の所定の面に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合に、X線回折面 (113) 、 (044) 及び (220) のX線トポグラフィー像が検出される欠陥を含み、前記基板に含まれる複合転位は、前記X線回折面 (113) 及び前記X線回折面 (044) のX線トポグラフィー像が検出され、且つ、前記X線回折面 (220) のX線トポグラフィー像が検出されない欠陥を含んでもよい。

10

【 0 0 0 7 】

本発明のダイヤモンド電子素子の製造方法は、ダイヤモンド基板上にエピタキシャル成長によってダイヤモンドエピタキシャル層を設ける成長工程と、X線トポグラフィーを用いて前記ダイヤモンドエピタキシャル層に含まれる複合転位の密度を測定する測定工程と、前記測定工程によって得られる結果に基づいて、複合転位の面密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 以下である前記ダイヤモンドエピタキシャル層の領域上に電極を設ける工程と、を備えることを特徴とする。

【 0 0 0 8 】

本発明者は、高耐電圧を実現するダイヤモンド電子素子を開発すべく研究を重ねた。この研究の結果、本発明者は、上記の本発明に係るダイヤモンド電子素子と、ダイヤモンド電子素子の製造方法とに示すように、ダイヤモンド電子素子の電圧印加領域が含む複合転位の密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 以下である本発明のダイヤモンド電子素子が、高耐電圧を実現することを見出した。

20

【 発明の効果 】

【 0 0 0 9 】

本発明によれば、高耐電圧のダイヤモンド電子素子及び高耐電圧のダイヤモンド電子素子の製造方法を提供することができる。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 1 0 】

以下、図面を参照して、本発明に係る好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明において、可能な場合には、同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。図1は、ダイヤモンド電子素子2の内部構造を示す図である。ダイヤモンド電子素子2は、ダイヤモンド基板21、第2ダイヤモンドエピタキシャル層22、電極23、電極24及び第1ダイヤモンドエピタキシャル層28を備える。ダイヤモンド電子素子2の本体部は、ダイヤモンド基板21、第1ダイヤモンドエピタキシャル層28及び第2ダイヤモンドエピタキシャル層22を有する。ダイヤモンド基板21上に、第1ダイヤモンドエピタキシャル層28が設けられ、第1ダイヤモンドエピタキシャル層28上に第2ダイヤモンドエピタキシャル層22が設けられている。第2ダイヤモンドエピタキシャル層22は、第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の表面から裏面に至る（第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の表面から第1ダイヤモンドエピタキシャル層28に至る）コンタクトホールを有しており、このコンタクトホールに電極23が充填されている。電極23は、第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の表面上に突出していると共に、第1ダイヤモンドエピタキシャル層28に接続している。第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の表面には、電極24が設けられている。電極24は、第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の表面上に突出しており、第2ダイヤモンドエピタキシャル層22に接続している。

30

40

【 0 0 1 1 】

ダイヤモンド基板21は、例えばIbダイヤモンド、IIaダイヤモンド又は気相合成ダイヤモンド等であり、低欠陥・低転位のダイヤモンドから成る。第1ダイヤモンドエピタキシャル層28及び第2ダイヤモンドエピタキシャル層22は、何れも、低欠陥・低転

50

位のエピタキシャル層である。ダイヤモンド基板 2 1、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の低欠陥・低転位の箇所は、例えば、X 線トポグラフィーを用いた分析方法によって特定される。

【0012】

第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 は、ダイヤモンド基板 2 1 の表面にエピタキシャル成長によって形成されたダイヤモンドエピタキシャル層であり、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 は、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 の表面にエピタキシャル成長によって形成されたダイヤモンドエピタキシャル層である。第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 のそれぞれは、 p^+ 型及び p 型（又はノンドープ）（この場合、ダイヤモンド電子素子 2 はユニポーラデバイス）であるか、又は、 n^+ 型及び n 型（又はノンドープ）（この場合、ダイヤモンド電子素子 2 はユニポーラデバイス）であるか、又は、 n 型及び p 型（この場合、ダイヤモンド電子素子 2 はバイポーラデバイス）であるか、又は、 p 型及び n 型（この場合、ダイヤモンド電子素子 2 はバイポーラデバイス）等である。 p 型（及び p^+ 型）のドーパントは例えばホウ素等であり、 n 型（及び n^+ 型）のドーパントは例えばリン等である。また、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 から成るダイヤモンドエピタキシャル層の膜厚は導電性を上げることとデバイスの剛性を保つことから決定され、 $1 \sim 20 \mu m$ 程度が好ましい。

【0013】

電極 2 3 は、オーミック電極である。電極 2 3 は、例えば、チタン / 白金 / 金から成るか、又は、チタン / モリブデン / 金から成る。電極 2 3 のチタン層は第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 に接続している。電極 2 4 は、オーミック電極、又は、Pt から成るショットキー電極である。ダイヤモンド電子素子 2 がバイポーラデバイスの場合、電極 2 4 はオーミック電極であり、ダイヤモンド電子素子 2 がユニポーラデバイスの場合、電極 2 4 はショットキー電極である。

【0014】

第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 は、後述の複合転位の面密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 個以下の電圧印加領域 E 1（ダイヤモンド領域）を含む。複合転位は、後述の X 線トポグラフィーによって検出される。この複合転位の面密度は、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の表面（電極 2 4 の設けられている面であるが、ダイヤモンド基板 2 1 と第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 との接合面等も同様）に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合の X 線回折面 (113) 、 (220) 又は (044) における面密度である。なお、ダイヤモンド基板 2 1、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 のそれぞれの形成後には、 (113) 面、 (220) 面及び (044) 面の少なくとも一面を X 線回折面とした X 線トポグラフィーによる欠陥解析が、ダイヤモンド基板 2 1、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 及び第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 のそれぞれに対して行われる。この欠陥解析によって電圧印加領域 E 1 内の複合転位が検出される。

【0015】

なお、図 1 に示すダイヤモンド電子素子 2 以外にも、図 2 に示すダイヤモンド電子素子 2 a、図 3 に示すダイヤモンド電子素子 2 b、図 4 に示すダイヤモンド電子素子 2 c、図 5 に示すダイヤモンド電子素子 2 d がある。図 2 に示すダイヤモンド電子素子 2 a は、ダイヤモンド電子素子 2 の第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 に替えて、ダイヤモンド基板 2 1 上にドリフト層 2 2 a が設けられている。ダイヤモンド電子素子 2 a の本体部は、ダイヤモンド基板 2 1 及びドリフト層 2 2 a を有する。ドリフト層 2 2 a は、ダイヤモンド基板 2 1 の表面にエピタキシャル成長によって形成されたダイヤモンドエピタキシャル層である。ドリフト層 2 2 a の表面に電極 2 3 a 及び電極 2 4 a が設けられている。電極 2 3 a 及び電極 2 4 a はドリフト層 2 2 a に接続している。電極 2 3 a は、電極 2 3 と同様のオーミック電極の構成を有しており、電極 2 4 a は、Pt から成るショットキー電極である。ドリフト層 2 2 a の膜厚は、ダイ

10

20

30

40

50

ヤモンド電子素子 2 a の導電性に影響を及ぼす。ドリフト層 2 2 a の膜厚は 1 ~ 5 0 μm 程度が好ましい。

【0016】

ドリフト層 2 2 a は、後述の複合転位の面密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 個以下の電圧印加領域 E 2 (ダイヤモンド領域) を含む。複合転位は、後述の X 線トポグラフィーによって検出される。この複合転位の面密度は、ドリフト層 2 2 a の表面 (電極 2 4 a の設けられている面であるが、ダイヤモンド基板 2 1 とドリフト層 2 2 a との接合面等も同様) に垂直な結晶方位を [001] とした場合の X 線回折面 (113)、(220) 又は (044) における面密度である。なお、ダイヤモンド基板 2 1、ドリフト層 2 2 a のそれぞれの形成後には、(113) 面、(220) 面及び (044) 面の少なくとも一面を X 線回折面とした X 線トポグラフィーによる欠陥解析が、ダイヤモンド基板 2 1、ドリフト層 2 2 a のそれぞれに対して行われる。この欠陥解析によって電圧印加領域 E 2 内の複合転位が検出される。

10

【0017】

図 3 に示すダイヤモンド電子素子 2 b は、ダイヤモンド電子素子 2 のダイヤモンド基板 2 1 が除去されたものとなっている。ダイヤモンド電子素子 2 b の場合、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の表面に電極 2 4 b が設けられ、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 の表面に電極 2 3 b が設けられている。換言すると、電極 2 3 b 上に第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 が設けられ、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 上に第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 が設けられ、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 上に電極 2 4 b が設けられている。ダイヤモンド電子素子 2 b の本体部は、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 を有する。電極 2 4 b は第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 に接続しており、電極 2 3 b は第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 に接続している。電極 2 3 b は電極 2 3 と同様のオーミック電極の構成を有し、電極 2 4 b は電極 2 4 と同様の構成を有する。また、ダイヤモンド電子素子 2 b における第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 から成るダイヤモンドエピタキシャル層の膜厚は導電性を上げることとデバイスの剛性を保つことから決定され、20 ~ 200 μm 程度が好ましい。電極のコンタクトや素子の発熱で発生する応力による割れを避けることができる。

20

【0018】

第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 は、後述の複合転位の面密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 個以下の電圧印加領域 E 3 (ダイヤモンド領域) を含み、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 は、後述の複合転位の面密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 個以下の電圧印加領域 E 4 (ダイヤモンド領域) を含む。複合転位は、後述の X 線トポグラフィーによって検出される。この複合転位の面密度は、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の表面 (電極 2 4 b の設けられている面であるが、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 と第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 との接合面も同様) に垂直な結晶方位を [001] とした場合の X 線回折面 (113)、(220) 又は (044) における面密度である。なお、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 のそれぞれの形成後には、(113) 面、(220) 面及び (044) 面の少なくとも一面を X 線回折面とした X 線トポグラフィーによる欠陥解析が、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 及び第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 のそれぞれに対して行われる。この欠陥解析によって電圧印加領域 E 3 又は電圧印加領域 E 4 内の複合転位が検出される。

30

40

【0019】

図 4 に示すダイヤモンド電子素子 2 c は、ダイヤモンド基板 2 1、第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3、電極 3 4 及び電極 3 5 を備える。ダイヤモンド電子素子 2 c の本体部は、ダイヤモンド基板 2 1、第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 及び第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 を有する。ダイヤモンド基板 2 1 の表面には第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 が設けられており、第 3 ダイ

50

ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 の表面の一部（この表面の中央）には、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 が設けられており、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 の表面には第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 が設けられており、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 の表面には電極 3 4 が設けられている。第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 は、ダイヤモンド基板 2 1 の表面にエピタキシャル成長によって形成されたダイヤモンドエピタキシャル層であり、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 は、第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 の表面にエピタキシャル成長によって形成されたダイヤモンドエピタキシャル層であり、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 は、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 の表面にエピタキシャル成長によって形成されたダイヤモンドエピタキシャル層である。第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 はダイヤモンド基板 2 1 に接続し、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 は第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 に接続し、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 は第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 に接続し、電極 3 4 は第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 に接続している。第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 の表面のうち第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 の設けられている領域を除く所定箇所に、電極 3 5 が設けられている。電極 3 5 は第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 に接続している。第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 は、p 型のダイヤモンドエピタキシャル層であり、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 は、ノンドープのドリフト層であり、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 は n 型のダイヤモンドエピタキシャル層である。電極 3 4 及び電極 3 5 は、電極 2 3 と同様のオーミック電極の構成を有する。

10

20

【0020】

第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2 及び第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 は、後述の複合転位の面密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 個以下の電圧印加領域 E 5（ダイヤモンド領域）を含む。複合転位は、後述の X 線トポグラフィーによって検出される。この複合転位の面密度は、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 の表面（電極 3 4 の設けられている面であるが、ダイヤモンド基板 2 1 と第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 との接合面等も同様）に垂直な結晶方位を $[001]$ とした場合の X 線回折面 (113) 、 (220) 又は (044) における面密度である。なお、ダイヤモンド基板 2 1、第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 のそれぞれの形成後には、 (113) 面、 (220) 面及び (044) 面の少なくとも一面を X 線回折面とした X 線トポグラフィーによる欠陥解析が、ダイヤモンド基板 2 1、第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1、第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 のそれぞれに対して行われる。この欠陥解析によって電圧印加領域 E 5 内の複合転位の面密度が検出される。

30

40

50

【0021】

図 5 に示すダイヤモンド電子素子 2 d は、ダイヤモンド基板 2 1、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6、第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 7、絶縁層 3 8、ゲート電極 3 9、ドレイン電極 4 0、ソース電極 4 1 を備えた p 型 MIS トランジスタである。ダイヤモンド電子素子 2 d の本体部は、ダイヤモンド基板 2 1、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6、第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 7 及び絶縁層 3 8 を有する。ダイヤモンド基板 2 1 の表面に第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 が設けられており、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 はダイヤモンド基板 2 1 と接続している。第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 は、ダイヤモンド基板 2 1 の表面にエピタキシャル成長によって形成されたダイヤモンドエピタキシャル層であり、第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 7 は、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 の表面にエピタキシャル成長によって形成されたダイヤモンドエピタキシャル層である。第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 の表面の一部には第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 7 が設けられており、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 は第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 7 と接続している。第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 の表面の他の部分には絶縁層 3 8 が設けられており、絶縁層 3 8 は第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 と接続している。絶縁層 3 8 の

表面の一部にはゲート電極 39 が設けられており、ゲート電極 39 は絶縁層 38 と接続している。第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 37 の表面の一部にはドレイン電極 40 及びソース電極 41 が設けられており、ドレイン電極 40 及びソース電極 41 は第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 37 と接続している。ゲート電極 39 (及び絶縁層 38) は、ドレイン電極 40 とソース電極 41 との間に設けられている。第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 36 はドリフト層であり、第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 37 は p^+ 型層である。

【 0 0 2 2 】

第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 36 は、後述の複合転位の面密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 個以下の電圧印加領域 E 6 (ダイヤモンド領域) を含む。複合転位は、後述の X 線トポグラフィーによって検出される。この複合転位の面密度は、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 36 の表面 (電極 24 の設けられている側の面であり、第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 37 や絶縁層 38 の設けられている面であるが、ダイヤモンド基板 21 と第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 36 との接合面等も同様) に垂直な結晶方位を [0 0 1] とした場合の X 線回折面 (1 1 3)、(2 2 0) 又は (0 4 4) における面密度である。なお、ダイヤモンド基板 21、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 36 (更には、第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 37) のそれぞれの形成後には、(1 1 3) 面、(2 2 0) 面及び (0 4 4) 面の少なくとも一面を X 線回折面とした X 線トポグラフィーによる欠陥解析が、ダイヤモンド基板 21、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 36 (更には、第 7 ダイヤモンドエピタキシャル層 37) のそれぞれに対して行われる。この欠陥解析によって電圧印加領域 E 6 内の複合転位が検出される。

【 0 0 2 3 】

ここで、面密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 個以下であると規定されている電圧印加領域 E 1 ~ E 6 内の複合転位は、X 線回折面を (1 1 3) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位、X 線回折面を (2 2 0) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位、及び、X 線回折面を (0 4 4) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位の少なくとも一の転位を含む。なお、電圧印加領域 E 1 ~ E 6 内の複合転位が、X 線回折面を (1 1 3) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位、X 線回折面を (2 2 0) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位、及び、X 線回折面を (0 4 4) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位を全て含む場合、ダイヤモンド基板 21 内の複合転位は、X 線回折面を (1 1 3) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位、及び、X 線回折面を (0 4 4) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位のみを含み、X 線回折面を (2 2 0) 面とした場合に検出される X 線トポグラフィー像の示す転位を含まない。

【 0 0 2 4 】

ここで、図 22 を参照して電圧印加領域について説明する。電圧印加領域とは、電子デバイスの動作時に逆バイアスを印加して空乏層を広げる領域であり、例えば図 1 に示すダイヤモンド電子素子 2 や図 3 に示すダイヤモンド電子素子 2b がショットキーダイオード (ユニポーラデバイス) の場合、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 内において電極 24 (ショットキー電極) や電極 24b (ショットキー電極) の設置位置に対応する (電極 24 や電極 24b の下部にある) 電圧印加領域 E 1 や電圧印加領域 E 3 である。電圧印加領域 E 1 や電圧印加領域 E 3 は、電極 24 や電極 24b (ショットキー電極) と第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 (バルク層) との間に電界が強くかかっているので結晶性の良いダイヤモンドにおいては空乏層となって絶縁性を示す。一方、複合転位が電圧印加領域 E 1 や電圧印加領域 E 3 に存在する場合、空乏層は広がらず、複合転位は電流リークの経路として機能し、電子デバイスの耐電圧特性を著しく悪化させる。

【 0 0 2 5 】

電極 24 や電極 24b に電圧を印加した場合の第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 22 内の電界分布を図 22 (A) に示す。図 22 (A) 中の曲線 M 1 は等電位線を表しており

、この図のようにシンプルな電極 2 4 や電極 2 4 b の場合、電極 2 4 や電極 2 4 b の端の部分で電界が集中するため、電圧印加領域 E 1 や電圧印加領域 E 3 は正確には電極 2 4 や電極 2 4 b の下部よりも横に広がる。図 2 2 (A) のようなシンプルな電極 2 4 や電極 2 4 b の場合の電圧印加領域 E 1 や電圧印加領域 E 3 は、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の厚さの 1 / 2 程度の距離まで横方向に広がる。一方、図 2 2 (B) のようにフィールドプレート M 2 など電界緩和構造を設けた場合は、電極 2 4 や電極 2 4 b の下部の電界分布が平行に近くなって過度の電界集中が無くなるため、電圧印加領域 E 1 や電圧印加領域 E 3 はほぼ電極 2 4 や電極 2 4 b の接触面の下部のみとなる。また、図 2 に示すダイヤモンド電子素子 2 a のような横型ショットキーダイオードの場合の電圧印加領域は、電界は深さ方向に強くかからないため、電極 2 4 a (ショットキー電極) と電極 2 3 a (オーミック電極) との間の表面近傍の電圧印加領域 E 2 となる。

10

【 0 0 2 6 】

また、図 1 及び図 3 に示すダイヤモンド電子素子 2 b がバイポーラデバイスの場合 (例えば、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 が n 型層であり、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 が p 型層であり、電極 2 4 b がオーミック電極の場合) 、ダイヤモンド電子素子 2 b の電圧印加領域は、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 と第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 とに延びる電圧印加領域 E 4 である。この場合、空乏層は p 型層 (第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2) と n 型層 (第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8) の接合部分に形成される。このため p 型層 (第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2) と n 型層 (第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8) の接合部だけが電圧印加領域と考えられるが、実際には、電極 2 3 b と電極 2 4 b とで挟まれた領域 (電圧印加領域 E 4) を電圧印加領域として複合転位の有無を判断すれば良い。

20

【 0 0 2 7 】

また、図 4 に示すダイヤモンド電子素子 2 c の場合の電圧印加領域は、電圧印加領域 E 5 となる。第 3 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 1 (p 型層) は導電性を得るため高ドーピングであり、電極 3 5 (p 型オーミック電極) と電極 3 4 (n 型オーミック電極) との間に逆バイアスをかけると電圧印加領域 E 5 に空乏層ができる。

【 0 0 2 8 】

また、図 5 に示すダイヤモンド電子素子 2 d の場合の電圧印加領域は、第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 の表面のうち絶縁層 3 8 を介してゲート電極 3 9 の設けられている領域から第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 内に延在する (ゲート電極 3 9 の下部にある) 電圧印加領域 E 6 となる。ドレイン電極 4 0 とソース電極 4 1 との間に電圧を印加して電流を流す場合、例えばゲート電極 3 9 に負バイアスをかけると、ゲート電極 3 9 下の第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 においては、キャリアが誘起され、電流が流れる。ゲート電極 3 9 に正バイアスをかけると、ゲート電極 3 9 下の第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 においては、空乏層が広がり、電流は流れなくなる。

30

【 0 0 2 9 】

次に、ダイヤモンド電子素子 2 の製造方法を説明する。まず、ダイヤモンド基板 2 1 を用意する。ダイヤモンド基板 2 1 は、高温高圧合成・天然・気相合成など合成方法に規定はないが、可能な限り低欠陥・低転位のダイヤモンドが望ましい。例えば、種結晶から広がる束状転位や成長セクターなどは避けた方が望ましい。種結晶から広がる束状転位や成長セクターなどを避ける方法としては、光学顕微鏡や偏光による異常屈折測定、ラマン分光やフォトルミネッセンスやカソードルミネッセンスのマッピングなどがあるが、X 線トポグラフィーを用いた欠陥分析を行うのが好適である。X 線トポグラフィーは、図 6 に示すような X 線回折の強度分布を結晶全体で撮影する手法であり、複数の原子 G 1 から成る結晶の完全性を評価するのに適した方法である。なお、X 線回折面 (結晶面 S) の法線ベクトルを g ベクトルと称する。

40

【 0 0 3 0 】

刃状転位やらせん転位等の結晶欠陥がある場合、図 7 の図中符号 G 2 に示すように X 線回折強度 I に強弱 (濃淡) が現れる。図中符号 G 3 に示す領域における X 線回折強度 I は

50

、結晶面 S に歪みが生じている箇所の X 線回折強度 I であって比較的弱く（淡く）、図中符号 G 4 に示す領域における X 線回折強度 I は、結晶面 S に歪みが生じている箇所に隣接する箇所の X 線回折強度 I であって比較的強い（濃い）。

【0031】

ここで、図 8 を参照して、刃状転位やらせん転位等の結晶欠陥を説明する。刃状転位やらせん転位の場合は、結晶 G 5 のずれ方向のベクトルと X 線回折面との角度によって X 線回折強度 I の濃淡が変わる。図 8 (A) 及び図 8 (B) の図中符号 G 6 はバーガースベクトル (Burgers Vector) であり（以下、バーガースベクトル G 6 という）、結晶 G 5 の本来の位置からの原子のずれを表している。図 8 (A) 及び図 8 (B) の図中符号 G 7 は転位の進む方向（転位線の延びる方向）を表している（以下、転位線方向ベクトル G 7 という）。バーガースベクトル G 6 と転位線方向ベクトル G 7 とが垂直となる場合を刃状転位と称し、バーガースベクトル G 6 と転位線方向ベクトル G 7 とが平行となる場合をらせん転位と称するが、これら両転位の混合した複合転位も存在する。

【0032】

X 線トポグラフィー強度 I は、g ベクトルとバーガースベクトル G 6 との内積となるので、転位と X 線トポグラフィー強度 I との関係は g ベクトルで決まる。すなわち、X 線トポグラフィー強度 I は、g ベクトルとバーガースベクトル G 6 とが平行の場合に最も強く、g ベクトルとバーガースベクトル G 6 とが垂直の場合に最も弱い。

【0033】

以上説明した X 線トポグラフィーを用いた方法によってダイヤモンド単結晶中にどのように欠陥・転位が分布しているかを見ることができる。転位の見え方は、例えば図 10 や図 11 に示すようになる。なお、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 に生じる転位は、ドライエッチング後の第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 の表面にエッチピットとして顕在化する。図 9 (A) にドライエッチング前の第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 の表面の顕微鏡像を示し、図 9 (B) にドライエッチング後の第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 の表面の顕微鏡像を示す。図 9 (A) に示す顕微鏡像と、図 9 (B) に示す顕微鏡像とは、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 の同一の表面領域の像である。また、図 10 (A) は、X 線回折面 (113) の g ベクトルに沿って見たダイヤモンド基板 21 の X 線トポグラフィーによる像であり、図 10 (B) は、X 線回折面 (220) の g ベクトルに沿って見たダイヤモンド基板 21 の X 線トポグラフィーによる像である。図 11 (A) は、X 線回折面 (113) の g ベクトルに沿って見た第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 の X 線トポグラフィーによる像であり、図 11 (B) は、X 線回折面 (220) の g ベクトルに沿って見た第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 の X 線トポグラフィーによる像である。ここで、ダイヤモンド基板 21 及び第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 の表面に垂直な方向を $\langle 001 \rangle$ としている。図 10 及び図 11 に示す像において、濃淡のある領域に転位が存在している。

【0034】

なお、図 9 (B) の図中符号 H 11, H 12, H 13, H 14 に示す領域と、図 10 (A) の図中符号 H 21, H 22, H 23, H 24 に示す領域と、図 10 (B) の図中符号 H 31, H 32, H 33, H 34 に示す領域と、図 11 (A) の図中符号 H 41, H 42, H 43, H 44 に示す領域と、図 11 (B) の図中符号 H 51, H 52, H 53, H 54 に示す領域とは、それぞれ対応している。すなわち、図 9 (B) の図中符号 H 11、図 10 (A) の図中符号 H 21、図 10 (B) の図中符号 H 31、図 11 (A) の図中符号 H 41 及び図 11 (B) の図中符号 H 51 にそれぞれ示す領域は図 12 に示す転位線 G 11 に対応しており、図 9 (B) の図中符号 H 12、図 10 (A) の図中符号 H 22、図 10 (B) の図中符号 H 32、図 11 (A) の図中符号 H 42 及び図 11 (B) の図中符号 H 52 にそれぞれ示す領域は図 12 に示す転位線 G 12 に対応しており、図 9 (B) の図中符号 H 13、図 10 (A) の図中符号 H 23、図 10 (B) の図中符号 H 33、図 11 (A) の図中符号 H 43 及び図 11 (B) の図中符号 H 53 にそれぞれ示す領域は図 12 に示す転位線 G 13 に対応しており、図 9 (B) の図中符号 H 14、図 10 (A) の図中

10

20

30

40

50

符号 H 2 4、図 1 0 (B) の図中符号 H 3 4、図 1 1 (A) の図中符号 H 4 4 及び図 1 1 (B) の図中符号 H 5 4 にそれぞれ示す領域は図 1 2 に示す転位線 G 1 4 に対応している。

【 0 0 3 5 】

このような X 線トポグラフィーを用いた欠陥分析によって、ダイヤモンド基板のうち欠陥・転位の少ない領域（ダイヤモンド基板 2 1）を用いる。ダイヤモンド基板 2 1 に含まれる不純物については特に規定しない。ダイヤモンド基板 2 1 は、例えば I b ダイヤモンドなど比較的安価で大量に入手できるものでも良いが、高温・高耐電圧動作を行う場合は不純物の少ない例えば I I a ダイヤモンドや気相合成ダイヤモンドである。また、最終的にダイヤモンド基板 2 1 を除去しても良く、この場合、例えば第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 を形成した後に研磨やドライエッチングで除去する。この場合、例えば図 3 に示すダイヤモンド電子素子 2 b が製造される。

10

【 0 0 3 6 】

次に、ダイヤモンド基板 2 1 に第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 を形成するが、この前処理として、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 の形成されるダイヤモンド基板 2 1 の表面を平坦に研磨する。この場合、例えばスカイフ研磨などが用いられる。ダイヤモンド基板 2 1 は O F F 角を付けても良く、例えば $\langle 110 \rangle$ 方向や $\langle 100 \rangle$ 方向に $1.5 \sim 5$ 度程度に傾けるのが望ましい。研磨後、酸と有機とで充分洗浄して異物を除去する。酸洗浄には、例えばフッ酸、王水、硫酸過水、硫酸硝酸混合液などを用いる。有機溶剤は、例えば、アセトン、イソプロピルアルコール、エタノール、メタノール等である。洗浄後、ドライエッチングで研磨ダメージ層を除去する。ドライエッチング方法は酸素や CF_4 などを主体とした I C P エッチングや平行平板型プラズマエッチングでも良い。またダイヤモンドの合成と同じくマイクロ波プラズマ法により、水素や、微量の酸素、二酸化炭素、一酸化炭素、窒素の何れかを水素に添加したガスで表面処理しても良い。ドライエッチングの後、再び酸・有機洗浄しても良い。

20

【 0 0 3 7 】

上記の前処理の後、ダイヤモンド基板 2 1 の表面上に第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 を形成する。第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 は、p 型又は n 型の不純物をドーピングした層であり、マイクロ波プラズマ法で水素とメタンを主体とし、不純物を気相中に添加して合成する。p 型の場合、不純物として例えばホウ素を用いる。この場合、不純物ガスとしてジボラン、トリメチルボロンなどのガスを用いたり、 B_2O_3 など固体ホウ素源を合成装置中に設置し、この個体ホウ素源から蒸発したホウ素ガスを用いても良い。n 型の場合、不純物として例えばリン、硫黄、窒素、リチウム又はこれらの混合物などを用いる。この場合、例えばホスフィン、トリメチルリン、硫化水素、窒素の何れかを不純物ガスとして添加したり、固形のリン化合物や Li_2O などのリチウム源を用いても良い。

30

【 0 0 3 8 】

なお、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の形成前に、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 の表面に対して、ダイヤモンド基板 2 1 に対して行ったのと同様のドライエッチングを行うのが望ましい。このドライエッチングは、上述したダイヤモンド基板 2 1 に対して行ったのと同様の方法の他に、水素だけを用いたマイクロ波プラズマ C V D も含まれる。また、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の合成はマイクロ波プラズマ法を用い、不純物を添加するために第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 と同様の不純物をガス中に添加しても良いが、不純物を排除するため酸素、二酸化炭素、一酸化炭素などのガスを添加しても良い。第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 を合成する場合、マイクロ波プラズマ密度の高い方が欠陥・転位が少なくなるため望ましい。第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の厚さと不純物濃度は、耐電圧と抵抗とのバランスによって決定される。そして、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャ

40

50

ル層 22 を形成する度に X 線トポグラフィーによる欠陥解析等の方法を用いて第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 22 における欠陥・転位の分布を測定しておく。X 線トポグラフィーによる欠陥解析等の方法を用いて第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 22 の低欠陥・低転位の領域を特定し、この領域を用いる。

【0039】

そして、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 22 を形成した後、ダイヤモンド基板 21、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 及び第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 22 を酸素終端もしくは水素終端にするために表面処理を行っても良い。酸素終端する場合は、硫酸硝酸混合液などの酸洗浄や、酸素プラズマやオゾン等で表面処理しても良い。また水素終端する場合は、マイクロ波プラズマ CVD 装置などによって水素プラズマ処理を行っても良い。

【0040】

上記表面処理の後に電極 23 (オーミック電極) を形成する。電極 23 は第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 と直接接することが望ましい。このため、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 22 の一部をエッチングによって除去してコンタクトホールを形成し、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 を露出させる。そして、このコンタクトホールに電極材料を充填することによって電極 23 を形成する。これによって、電極 23 は、第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 と接続する。電極 23 は、チタン / 白金 / 金やチタン / モリブデン / 金などの積層構造を有する。電極 23 は主としてダイヤモンドと反応性の高い金属が用いられるので、例えばチタンを第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 に接触させ、アニール処理をしてオーミック特性を改善する。そして、オーミック特性を良好にするため、電極 23 の成膜中もしくは成膜後に加熱処理しても良い。また、電極 23 の形成後に上記の表面処理や酸・有機洗浄を行っても良い。

【0041】

次に電極 24 を形成する。電極 24 がショットキー電極の場合 (ダイヤモンド電子素子 2 がユニポーラの場合) について説明する。電極 24 の材料は、Pt, Ti, Mo, Au, Cr, Al, Si, TiSi₂, WC, Ru 等である。電極 24 を形成する場合、フィールドプレート構造やガードリング構造などの電界緩和構造を形成しても良い。なお、X 線トポグラフィーを用いた欠陥解析によって欠陥・転位密度の低い領域、特に複合転位密度の低い領域を特定し、この領域に電極 24 を形成するのが望ましい。

【0042】

次に、ダイヤモンド電子素子 2 の製造方法についての実施例を説明する。以下に説明するダイヤモンド電子素子 2 は、バイポーラデバイスの場合に相当する。ダイヤモンド基板 21 に高温高压合成で作製した Ib (001) 単結晶を用意し、スカイフ研磨によって <110> 方向に 2.5 度の OFF 方位をつけてダイヤモンド基板 21 の表面を平坦に研磨した。この後、研磨したダイヤモンド基板 21 の表面を X 線トポグラフィーで観察し、種結晶付近の束状転位及び成長セクターの無い領域を選定し、この領域に対し以下のプロセスを進めた。

【0043】

まず、ダイヤモンド基板 21 をフッ酸、王水で酸洗浄した後、アセトン、イソプロピルアルコールでの有機洗浄を行った。更に、研磨したダイヤモンド基板 21 の表面を ICP プラズマエッチングを用いて 5 µm 分だけエッチングし、ダイヤモンド基板 21 の表面の研磨傷などのダメージ層を除去した。このエッチングの後、このエッチングしたダイヤモンド基板 21 の表面に p⁺ 型の第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 をマイクロ波プラズマ CVD 法によって合成した。この場合、水素ガスのみを 50 Torr、合計流量 400 sccm で導入し、マイクロ波パワー 1200 W、基板温度を摂氏 900 度として 15 分間処理を行い、次に水素ガス中のメタン濃度を 0.6 % とし、また、炭素に対するホウ素の元素組成率が 1.6 % となるように B₂H₆ を添加し、膜厚 10 µm の p⁺ 型の第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 28 を合成した。この合成の後、X 線トポグラフィーを用

10

20

30

40

50

いて第1ダイヤモンドエピタキシャル層28に対する転位分布を撮影した。

【0044】

次に、p⁻型の第2ダイヤモンドエピタキシャル層22をマイクロ波プラズマCVD法によって合成した。水素ガスのみを120 Torr、合計流量400 sccmで導入し、マイクロ波パワー3000 W、基板温度を摂氏900度として10分間処理を行い、次に水素ガス中のメタン濃度を4%とし、酸素/炭素元素比率が0.4となるように二酸化炭素添加して基板温度を摂氏1000度としてp⁻型の第2ダイヤモンドエピタキシャル層22を10 μmだけ合成した。この合成の後、X線トポグラフィーを用いて第2ダイヤモンドエピタキシャル層22に対する転位分布を撮影し、複合転位密度が $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 個以下となる電極形成位置(電圧印加領域E1)を選定した。次に、ダイヤモンド基板21、第1ダイヤモンドエピタキシャル層28及び第2ダイヤモンドエピタキシャル層22を加熱した硫酸硝酸混合液で洗浄した後にアセトン、イソプロで有機洗浄を行い、ダイヤモンド基板21、第1ダイヤモンドエピタキシャル層28及び第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の外面(表面)を酸素終端にした。

10

【0045】

次に、オーミック電極である電極23を形成するため、マスクとしてA1を第1ダイヤモンドエピタキシャル層28の表面に蒸着した後、酸素にCF₄ガスを添加してICPプラズマエッチングしてコンタクトホールを形成し、このコンタクトホールを介して第1ダイヤモンドエピタキシャル層28の表面を露出させた。このコンタクトホールにTi/Pt/Auを1000オングストロームずつ成膜し、真空中において摂氏400度のもとで30分アニールして電極23を形成した。そして、上述した第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の電極形成位置(電圧印加領域E1)にある第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の表面に直径200 μmの電極24(Ptショットキー電極)を形成した。このようにして製造したダイヤモンド電子素子2のショットキー特性は図21に示すようになっており、1 kV以上まで 10^{-10} A (アンペア)以下の非常に低いリーク電流のデバイスが実現できた。

20

【0046】

次に、X線トポグラフィーを用いて検出されるダイヤモンド結晶内の欠陥・転位を詳細に説明する。ここでは、説明簡略化のため、図2に示すダイヤモンド電子素子2aを用いて説明する。転位欠陥には刃状転位やらせん転位などの転位があるが、それぞれの転位は、図8に示すように、一方向のバーガスベクトルG6を保ったまま成長する。X線トポグラフィーを用いて欠陥・転位を検出する場合、バーガスベクトルG6と平行な成分を持つgベクトルの方向のみにおいて(このgベクトルの結晶面がX線回折面となっている場合に)X線トポグラフィーの像として検出され、gベクトルに直行する方向においてはX線トポグラフィーの像として検出されないのが一般的である。図10(A)に示すダイヤモンド基板21のX線トポグラフィー像は、X線回折面(結晶面)が(113)面でありX線波長が0.95オングストロームの場合に検出された像であり、図10(B)に示すダイヤモンド基板21のX線トポグラフィー像は、X線回折面(結晶面)が(220)面でありX線波長が0.71オングストロームの場合に検出された像である。(113)面のgベクトルと(220)面のgベクトルとの成す角度は63.8度であるので、X線トポグラフィーにおいて、X線回折面(結晶面)が(113)面の場合の像と、X線回折面(結晶面)が(220)面の場合の像とが同時に見られるような欠陥は比較的少ない。

30

40

【0047】

なお、X線回折面(結晶面)が(113)面の場合の像はダイヤモンド基板21の表面に垂直方向にバーガスベクトルG6を持つ転位に敏感であり、X線回折面(結晶面)が(220)面の場合の像はダイヤモンド基板21の表面に平行方向にバーガスベクトルG6を持つ転位に敏感となる。その他、例えば、X線回折面(結晶面)が(044)面でありX線波長が0.91オングストロームの場合のX線トポグラフィー像を検出しても良い。なお、X線回折面(結晶面)として(113)面以外にも(1-13)面を用いても良いし、(220)面以外にも(2-20)面を用いても良いし、(044)面以外にも

50

(404)面を用いても良い。

【0048】

また、ドリフト層22aをダイヤモンド基板21の表面に形成した後に、ダイヤモンド基板21に対して行ったのと同様のX線トポグラフィーによって検出されたドリフト層22aの像を、図11(A)及び図11(B)に示す。図11(A)に示すドリフト層22aのX線トポグラフィー像は、X線回折面(結晶面)が(113)面でありX線波長が0.95オングストロームの場合に検出された像であり、図11(B)に示すドリフト層22aのX線トポグラフィー像は、X線回折面(結晶面)が(220)面でありX線波長が0.71オングストロームの場合に検出された像である。ドリフト層22aの場合、転位像が全体的に増加し、X線回折面(結晶面)が(113)面の場合の像と、X線回折面(結晶面)が(220)面の場合の像とが同時に見られるような欠陥は比較的多い。このことから、ドリフト層22a内には、刃状転位やらせん転位だけでなく、これらの転位が複合された2つのバーガースベクトルG6を持つ複合転位が増加したことがわかる。

10

【0049】

ダイヤモンド基板21及びドリフト層22aに生じた転位の伝播の様子を図12に示す。図中符号G11~G14は転位の伝播方向を示し、図中符号G15及びG16は転位のバーガースベクトルを示す。ダイヤモンド基板21に転位がある場合、ドリフト層22aにも転位が伝播して成長するが、図中符号G13に示す転位のように転位がダイヤモンド基板21からドリフト層22aにそのまま伝播する場合と、図中符号G11に示す転位のように、ダイヤモンド基板21からドリフト層22aへの伝播において複合転位に転換する場合とがある。またダイヤモンド基板21中に転位の無い場所であってもドリフト層22aに転位が発生する場合があり、図中符号G14に示す転位のようにバーガースベクトルが一方向の単純転位が発生する場合と、図中符号G12に示す転位のように複合転位が発生する場合とがある。ドリフト層22aに複合転位が発生した場合(図中符号G11及びG12に示す転位の場合)に、エッチピットG17が発生する。ダイヤモンド電子素子2aにおける転位の他の伝播、発生の態様は、図14(A)に示す7種類の態様がある。

20

【0050】

なお、上記のような転位の伝播、発生の態様は、図1に示すダイヤモンド電子素子2のような3層構造(ダイヤモンド基板21、第1ダイヤモンドエピタキシャル層28及び第2ダイヤモンドエピタキシャル層22)以上のダイヤモンド電子素子の場合においても同様であり、例えば図13に示す像は、X線回折面(結晶面)が(113)面の場合のダイヤモンド電子素子2のX線トポグラフィー像である。図13(A)には第2ダイヤモンドエピタキシャル層22に対するX線トポグラフィー像が示され、図13(B)には第1ダイヤモンドエピタキシャル層28に対するX線トポグラフィー像が示され、図13(C)にはダイヤモンド基板21に対するX線トポグラフィー像が示されている。図13(C)に示す像はダイヤモンド基板21の所定領域E1のX線トポグラフィー像であり、図13(B)に示す像はダイヤモンド基板21の所定領域E1上にある第1ダイヤモンドエピタキシャル層28の所定領域E2のX線トポグラフィー像であり、図13(A)に示す像は第1ダイヤモンドエピタキシャル層28の所定領域E2上にある第2ダイヤモンドエピタキシャル層22の所定領域E3のX線トポグラフィー像である。図13に示す像によれば、転ダイヤモンド基板21、第1ダイヤモンドエピタキシャル層28、第2ダイヤモンドエピタキシャル層22において転位が伝播、発生、消滅していることがわかる。この他に、ダイヤモンド電子素子2における転位の他の伝播、発生、消滅の態様は、図14(B)に示す6種類の態様と、図14(C)に示す8種類の態様とがある。

30

40

【0051】

発明者らが鋭意研究した結果、ダイヤモンド電子素子2や、ダイヤモンド電子素子2a~ダイヤモンド電子素子2d等のダイヤモンド電子デバイスにおいては、複合転位がデバイス特性を大きく劣化させることがわかった。次に、一例として、ダイヤモンド電子素子2のデバイス特性について説明する。以下に説明するデバイス特性は、ショットキーダイオードとしてのダイヤモンド電子素子2(ユニポーラデバイス)のデバイス特性である。

50

このデバイス特性を図 15 に示す。発明者らによる鋭意研究の結果、ダイヤモンド電子素子 2 のショットキーダイオード特性のうち、特に逆方向特性は前述の複合転位が多いほど特性が悪化することがわかった。この結果は、複合転位の発生によって s p³ 結合とならないダイヤモンドの炭素原子の結合が連続して形成されたので、その部分が導電性のリークパスとなり、よって、デバイスの耐電圧が悪化したことによるものと思われる。

【0052】

複合転位の検出は、X 線トポグラフィーを用いる以外に、エッチピットを用いても可能である。エッチピットは、特にマイクロ波プラズマ CVD 法を用いて水素に酸素、二酸化炭素又は一酸化炭素を加えたガスを用いてダイヤモンド結晶の表面をプラズマ処理することによって形成することができる。この処理を行うと、ダイヤモンド結晶の表面に微小なピットが多数発生するが、発明者らの鋭意研究の結果、複合転位が生じている箇所は特に深いエッチピットが生じていることがわかった。このようなエッチピットの断面の模式図 (Case - 1, Case - 2, Case - 3) を図 16 に示す。また、エッチピットの形状を図 17 及び図 18 に示す。図 18 に示すように、エッチピットの深さ L はエッチピットの口径 l の二倍以上である。このようなエッチピットの形状は、複合転位が s p³ 結合から外れているために他のダイヤモンドと比べてエッチング速度が 2 倍以上早いこと、更に、例えばダイヤモンド電子素子 2 a の場合を考えるとダイヤモンド基板 2 1 からドリフト層 2 2 a まで貫通する複合転位がエッチングによって選択的に除去されること、等が原因で生じる。また、エッチピットは、図 17 や図 18 に示すようにダイヤモンド結晶の < 1 1 0 > 方向に辺を持つ構造となっている。特に、図 18 に示すエッチピットのように正方形から外れて歪な形状のエッチピットは、発明者らの鋭意研究の結果、デバイス特性を悪化させることがわかった。歪な形状とは、例えば L 字型、コ字型、口字型、T 字型、十字型、あるいはこれらの複合した形状で、それぞれの辺の向きはダイヤモンド結晶の [1 1 0]、[1 - 1 0] 方向とほぼ平行となっている。

【0053】

ここで、ダイヤモンド電子素子 2 におけるデバイス特性と複合転位との関係の一例を図 19 に示す。図 19 の図中符号 L 1 に示す結果 (低リーク電流) は、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 内の複合転位が比較的少ない場合であり、図 20 (A) に示すように、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の表面に図中符号 H 6 1 の示すエッチピットのみが生じている場合である。図 19 の図中符号 L 2 に示す結果 (高リーク電流) は、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 内の複合転位が比較的多い場合であり、図 20 (B) に示すように、第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 の表面に図中符号 H 6 2 等の示す複数のエッチピットが生じている場合である。図 19 及び図 20 に示す結果から、ダイヤモンド電子素子 2 の第 2 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 2 (更には、ダイヤモンド電子素子 2 の第 1 ダイヤモンドエピタキシャル層 2 8 や、ダイヤモンド電子素子 2 a のドリフト層 2 2 a や、ダイヤモンド電子素子 2 c の第 4 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 2、第 5 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 3 や、ダイヤモンド電子素子 2 d の第 6 ダイヤモンドエピタキシャル層 3 6 等) において複合転位の比較的少ない領域を選び、この領域 (電圧印加領域) にダイヤモンド電子素子 2 の電極 2 4 (更には、ダイヤモンド電子素子 2 a の電極 2 4 a や、ダイヤモンド電子素子 2 b の電極 2 4 b ダイヤモンド電子素子 2 c の電極 3 4 や、ダイヤモンド電子素子 2 d のゲート電極 3 9) を形成することによって、高性能の高耐圧デバイス (ダイヤモンド電子素子 2 及びダイヤモンド電子素子 2 a ~ 2 d) を作製できる。特に、複合転位密度が $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ 個以下の領域上 (電圧印加領域 E 1 ~ 電圧印加領域 E 6) に電極 2 4 等の電極を形成すると特性の良いダイヤモンド電子素子 2 及びダイヤモンド電子素子 2 a ~ 2 d を作製できることがわかった。

【0054】

以上、好適な実施の形態において本発明の原理を図示し説明してきたが、本発明は、そのような原理から逸脱することなく配置および詳細において変更され得ることは、当業者によって認識される。本発明は、本実施の形態に開示された特定の構成に限定されるものではない。したがって、特許請求の範囲およびその精神の範囲から来る全ての修正および

10

20

30

40

50

変更権利を請求する。

【図面の簡単な説明】

【0055】

【図1】実施形態に係るダイヤモンド電子素子の構成を示す図である。

【図2】実施形態に係る他のダイヤモンド電子素子の構成を示す図である。

【図3】実施形態に係る他のダイヤモンド電子素子の構成を示す図である。

【図4】実施形態に係る他のダイヤモンド電子素子の構成を示す図である。

【図5】実施形態に係る他のダイヤモンド電子素子の構成を示す図である。

【図6】X線トポグラフィーを説明するための図である。

【図7】X線トポグラフィーを説明するための図である。

10

【図8】X線トポグラフィーを説明するための図である。

【図9】X線トポグラフィーを説明するための図である。

【図10】X線トポグラフィーを説明するための図である。

【図11】X線トポグラフィーを説明するための図である。

【図12】X線トポグラフィーを説明するための図である。

【図13】X線トポグラフィーを説明するための図である。

【図14】X線トポグラフィーを説明するための図である。

【図15】実施形態に係るデバイス特性を説明するための図である。

【図16】エッチピットを説明するための図である。

【図17】エッチピットを説明するための図である。

20

【図18】エッチピットを説明するための図である。

【図19】実施形態に係るデバイス特性を説明するための図である。

【図20】実施形態に係るデバイス特性を説明するための図である。

【図21】実施形態に係るデバイス特性を説明するための図である。

【図22】実施形態に係る電圧印加領域を説明するための図である。

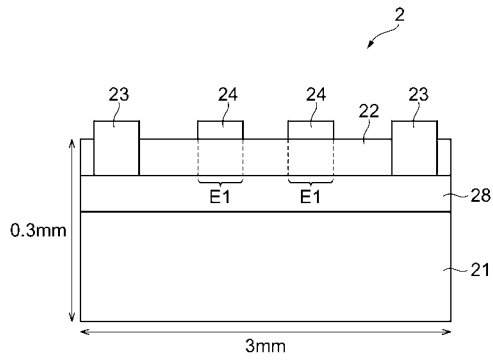
【符号の説明】

【0056】

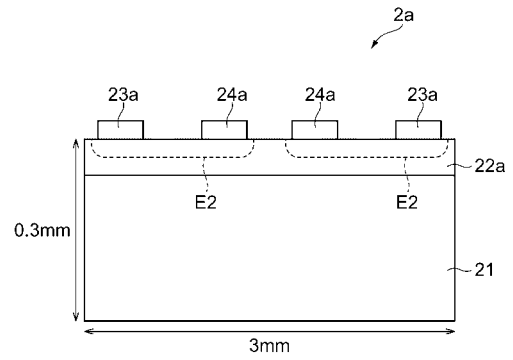
ダイヤモンド電子素子... 2, 2a, 2b, 2c, 2d、ダイヤモンド基板... 21、第2
ダイヤモンドエピタキシャル層... 22、ドリフト層... 22a、電極... 23, 23a, 23
b, 24, 24a, 24b、第1ダイヤモンドエピタキシャル層... 28、第3ダイアモン
ドエピタキシャル層... 31、第4ダイヤモンドエピタキシャル層... 32、第5ダイアモン
ドエピタキシャル層... 33、電極... 34, 35、第6ダイヤモンドエピタキシャル層... 3
6、第7ダイヤモンドエピタキシャル層... 37、絶縁層... 38、ゲート電極... 39、ドレ
イン電極... 40、ソース電極... 41、電圧印加領域... E1, E2, E3, E4, E5, E
6、原子... G1、結晶... G5、パーガースベクトル... G6、転位線方向ベクトル... G7、
結晶... G8、結晶面... S

30

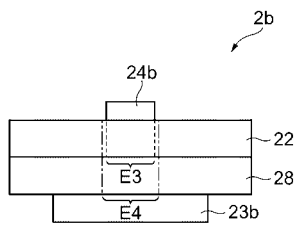
【 図 1 】



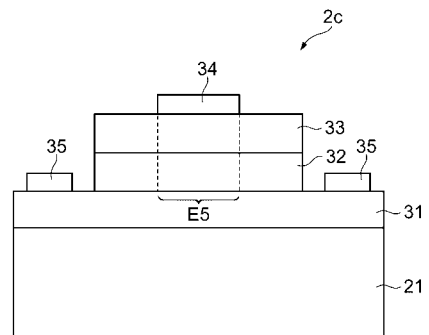
【 図 2 】



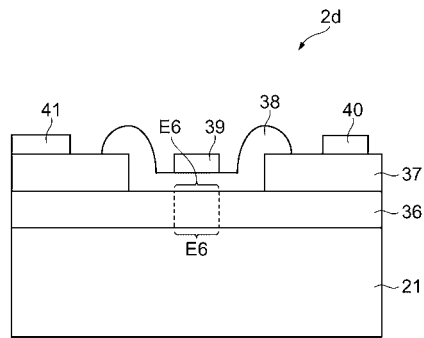
【 図 3 】



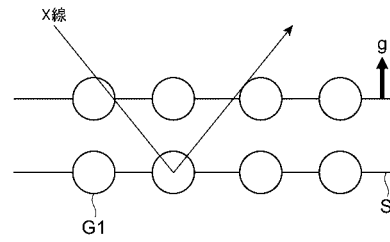
【 図 4 】



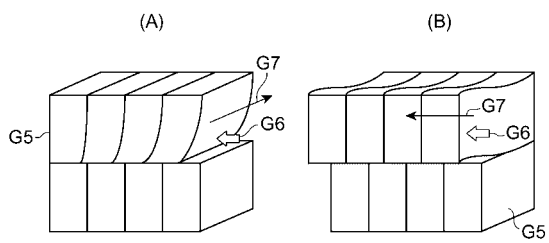
【図 5】



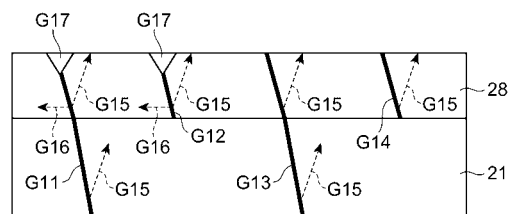
【図 6】



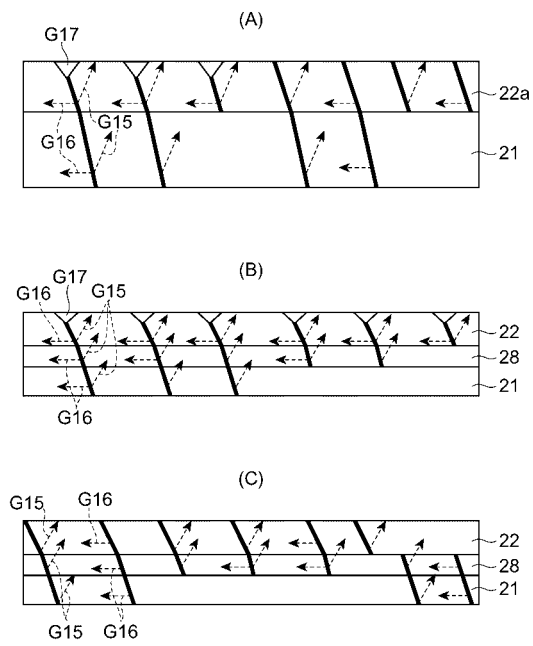
【図 8】



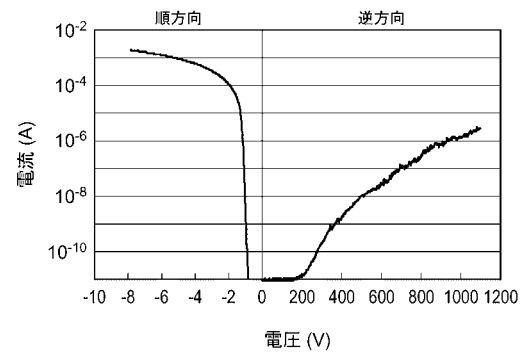
【図 12】



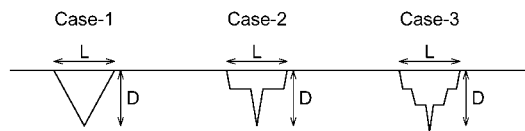
【図 1 4】



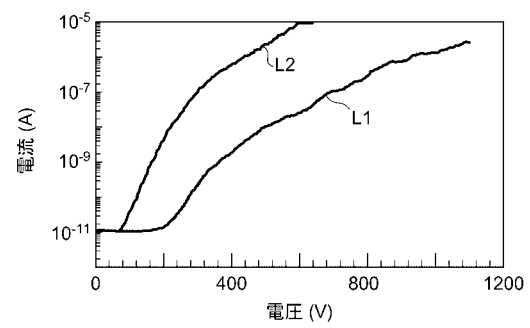
【図 1 5】



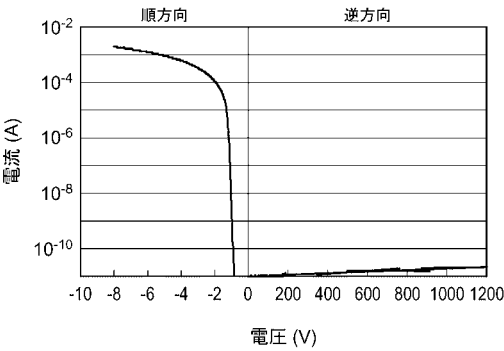
【図 1 6】



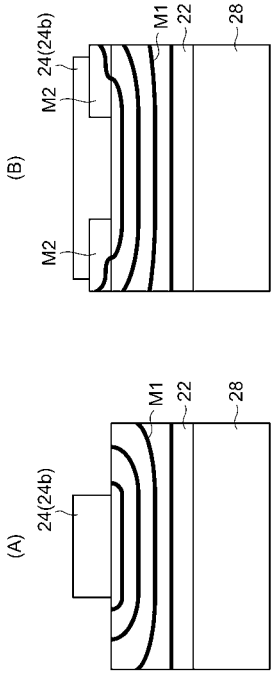
【図 1 9】



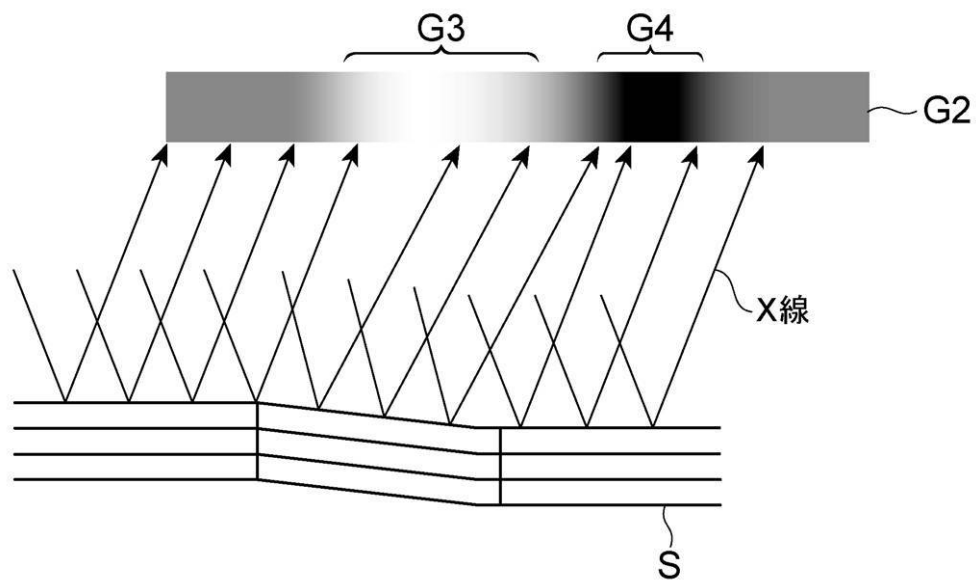
【図 2 1】



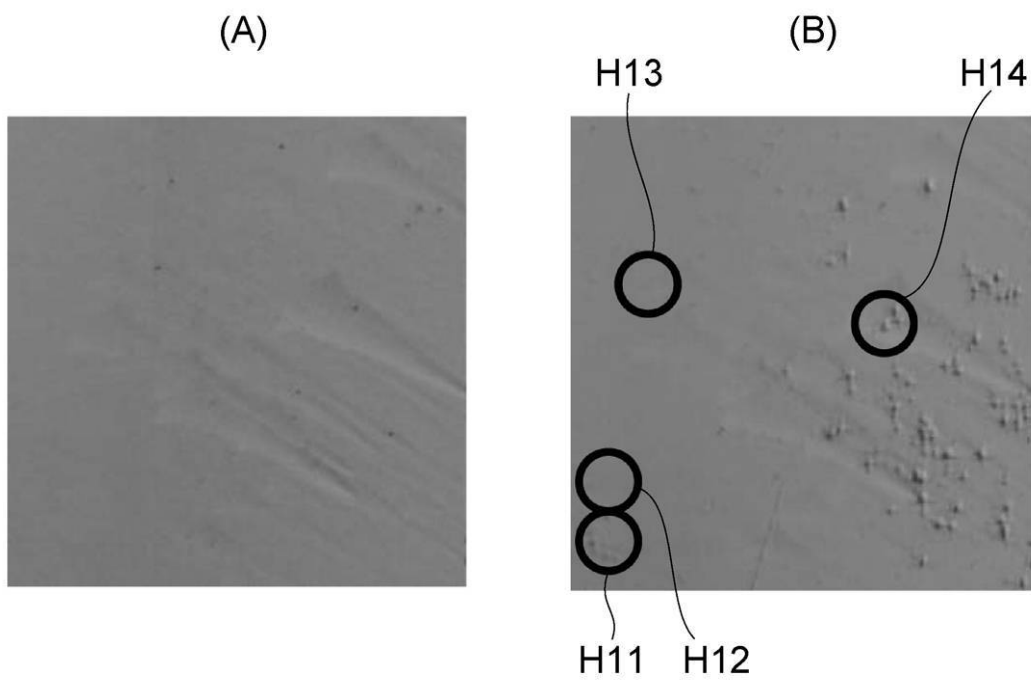
【図 2 2】



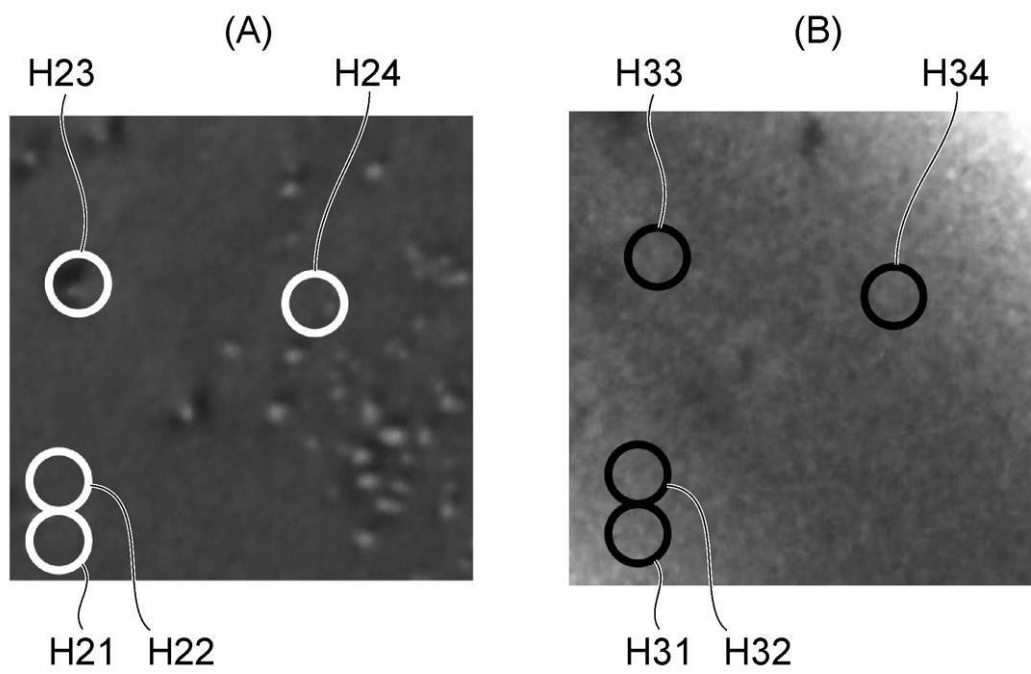
【 図 7 】



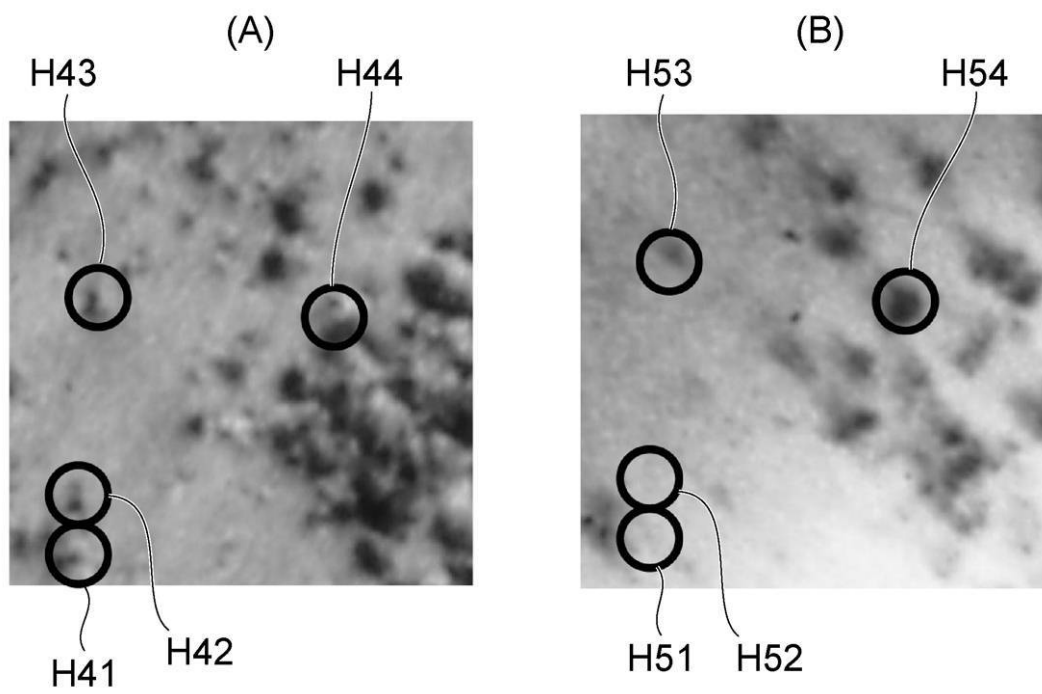
【 図 9 】



【図 10】

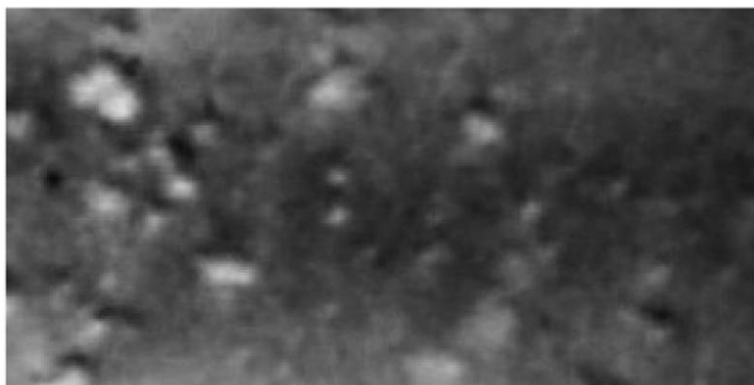


【図 11】



【図 13】

(A)



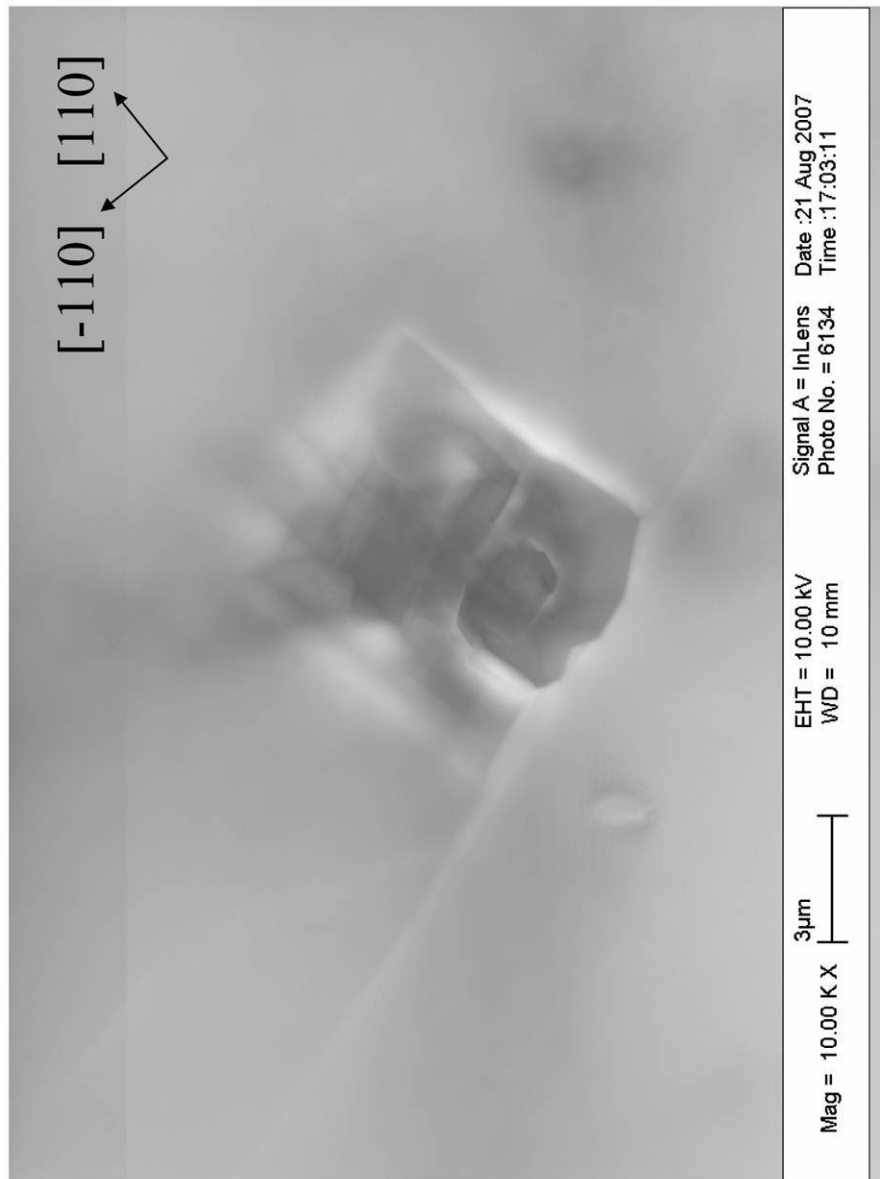
(B)



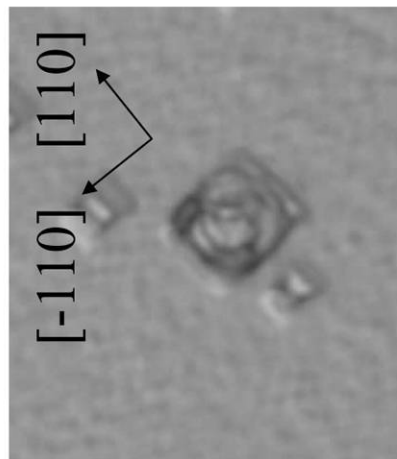
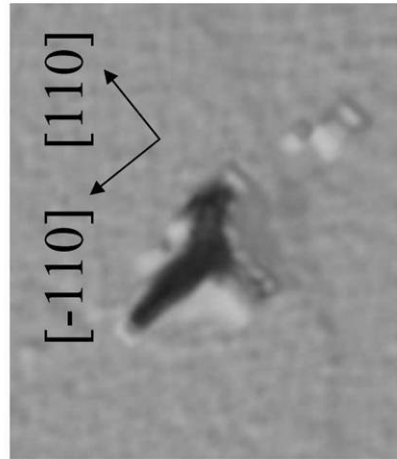
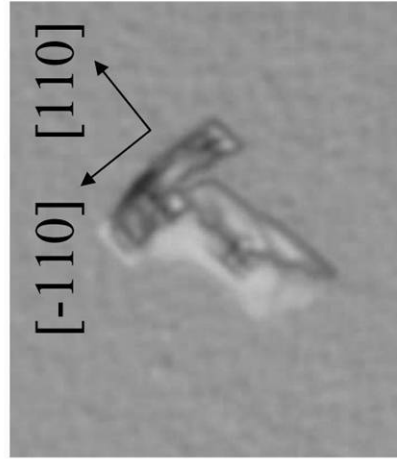
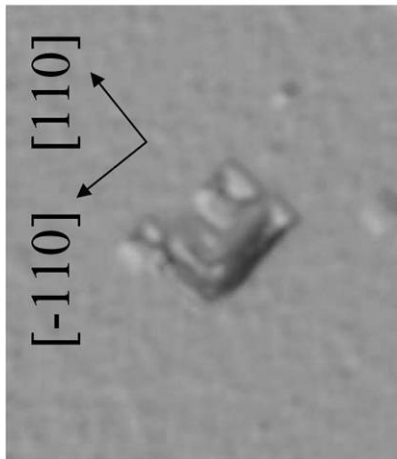
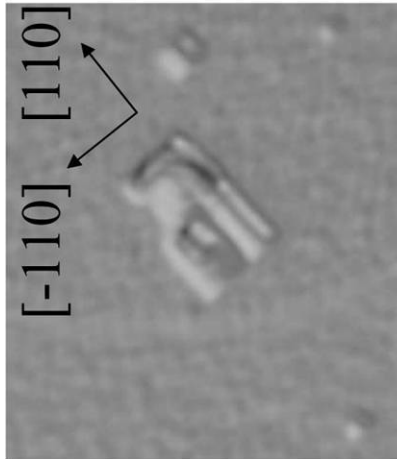
(C)



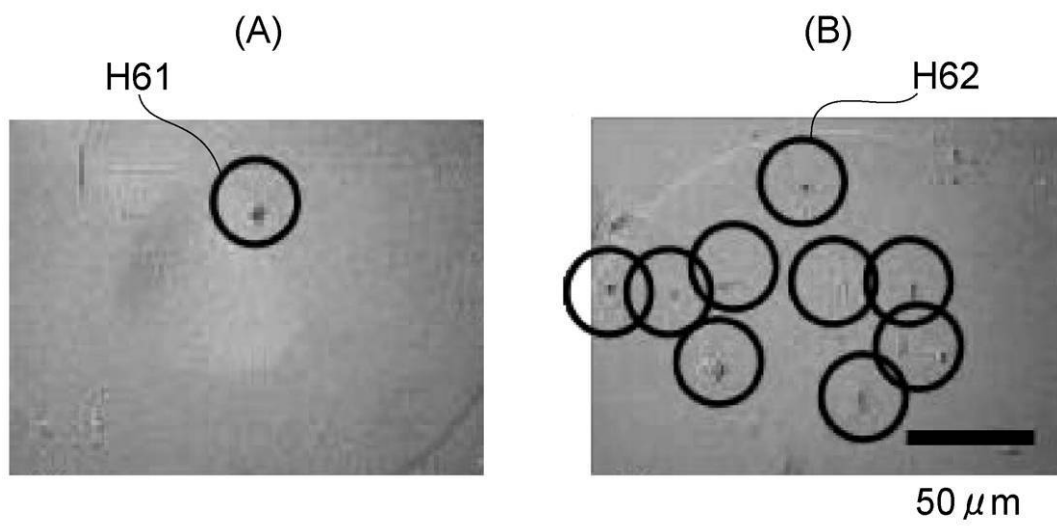
【図 17】



【 図 1 8 】



【図 20】



フロントページの続き

- (72)発明者 辰巳 夏生
兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内
- (72)発明者 池田 和寛
兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内
- (72)発明者 西林 良樹
兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内
- (72)発明者 今井 貴浩
兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内
- (72)発明者 梅澤 仁
茨城県つくば市東1-1-1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター内
- (72)発明者 鹿田 真一
茨城県つくば市東1-1-1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター内
- Fターム(参考) 4M104 AA10 BB06 BB15 CC01 CC03 FF02 FF27 FF31 GG02 GG03
GG09