

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2024年7月4日(04.07.2024)



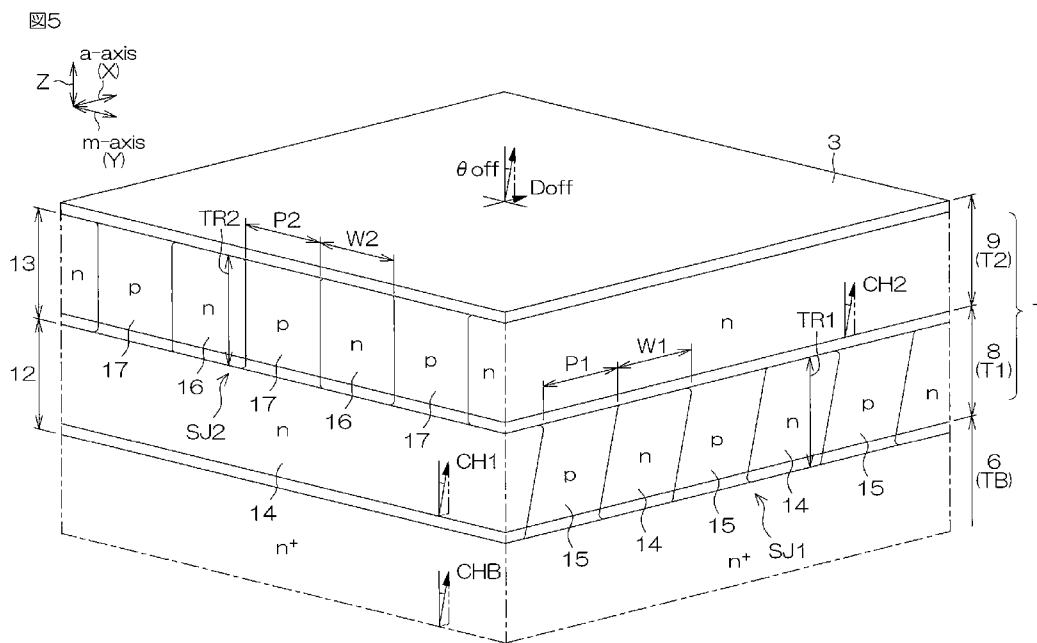
(10) 国際公開番号

WO 2024/143382 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 29/78 (2006.01) H01L 29/41 (2006.01)
H01L 21/265 (2006.01) H01L 29/47 (2006.01)
H01L 21/266 (2006.01) H01L 29/861 (2006.01)
H01L 21/336 (2006.01) H01L 29/868 (2006.01)
H01L 29/06 (2006.01) H01L 29/872 (2006.01)
H01L 29/12 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/046703
- (22) 国際出願日: 2023年12月26日(26.12.2023)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2022-212616 2022年12月28日(28.12.2022) JP
- (71) 出願人: ローム株式会社 (ROHM CO., LTD.)
[JP/JP]; 〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町2番地 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: 森 誠悟(MORI, Seigo); 〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町2番地 ローム株式会社内 Kyoto (JP). 中野 佑紀(NAKANO, Yuki); 〒6158585 京都府京都市右京区西院溝崎町2番地 ローム株式会社内 Kyoto (JP).
- (74) 代理人: 弁理士法人あい特許事務所 (AI ASSOCIATION OF PATENT AND TRADEMARK ATTORNEYS); 〒5410059 大阪府大阪市中央区博労町三丁目2番8号 岩田東急ビル8階 Osaka (JP).

(54) Title: SIC SEMICONDUCTOR DEVICE

(54) 発明の名称: SiC半導体装置



(57) Abstract: This SiC semiconductor device comprises: a first SiC layer; a second SiC layer stacked on the first SiC layer; a p-type first impurity region formed in the first SiC layer; a p-type second impurity region formed in the second SiC layer; a plurality of n-type first inversion columns formed at intervals in the first SiC layer so as to invert the conductivity type of the first impurity region; and a plurality of n-type second inversion columns formed at intervals in the second SiC layer so as to invert the conductivity type of the second impurity region.



WO 2024/143382 A1

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約: SiC半導体装置は、第1SiC層と、前記第1SiC層の上に積層された第2SiC層と、前記第1SiC層内に形成されたp型の第1不純物領域と、前記第2SiC層内に形成されたp型の第2不純物領域と、前記第1不純物領域の導電型を反転させるように前記第1SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第1反転コラムと、前記第2不純物領域の導電型を反転させるように前記第2SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第2反転コラムと、を含む。

明 細 書

発明の名称：SiC半導体装置

技術分野

[0001] この出願は、2022年12月28日に日本国特許庁に提出された特許出願2022-212616号に基づく優先権を主張しており、この出願の全内容はここに引用により組み込まれる。本開示は、SiC半導体装置に関する。

背景技術

[0002] 特許文献1（US2015/0028351A1）は、チャネリング注入法によって炭化ケイ素層に導入された不純物領域を有する電子デバイスを開示している。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：米国特許出願公開第2015-0028351号明細書

[0004] [概要]

本開示は、新規なSiC半導体装置を提供する。

[0005] 本開示は、第1SiC層と、前記第1SiC層の上に積層された第2SiC層と、前記第1SiC層内に形成されたp型の第1不純物領域と、前記第2SiC層内に形成されたp型の第2不純物領域と、前記第1不純物領域の導電性を反転させるように前記第1SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第1反転コラムと、前記第2不純物領域の導電性を反転させるように前記第2SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第2反転コラムと、を含む、SiC半導体装置を提供する。

[0006] 本開示は、第1SiC層と、前記第1SiC層の上に積層されたn型の第2SiC層と、前記第1SiC層内に形成されたp型の不純物領域と、前記不純物領域の導電性を反転させるように前記第1SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第1反転コラムと、前記第2SiC層の導電性を反転させるように前記第2SiC層内に間隔を空けて形成されたp型の複数の

第2反転コラムと、を含む、SiC半導体装置を提供する。

[0007] 本開示は、n型の第1SiC層と、前記第1SiC層の上に積層された第2SiC層と、前記第2SiC層内に形成されたp型の不純物領域と、前記第1SiC層の導電型を反転させるように前記第1SiC層内に間隔を空けて形成されたp型の複数の第1反転コラムと、前記不純物領域の導電型を反転させるように前記第2SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第2反転コラムと、を含む、SiC半導体装置を提供する。

[0008] 上述のまたはさらに他の目的、特徴および効果は、添付図面を参照する詳細な説明により明らかにされる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]図1は、第1形態に係るSiC半導体装置を示す平面図である。

[図2A]図2Aは、図1に示すIIA-IIA線に沿う断面図である。

[図2B]図2Bは、図1に示すIIB-IIB線に沿う断面図である。

[図3A]図3Aは、チップ（第1層）のレイアウト例を示す平面図である。

[図3B]図3Bは、チップ（第2層）のレイアウト例を示す平面図である。

[図4]図4は、チップのレイアウト例を示す斜視図である。

[図5]図5は、反転コラムの第1基本形態を示す断面斜視図である。

[図6A]図6Aは、第2不純物領域の濃度勾配の一例を示すグラフである。

[図6B]図6Bは、第2不純物領域の濃度勾配の一例を示すグラフである。

[図6C]図6Cは、第2不純物領域の濃度勾配の一例を示すグラフである。

[図6D]図6Dは、第2不純物領域の濃度勾配の一例を示すグラフである。

[図6E]図6Eは、第2不純物領域の濃度勾配の一例を示すグラフである。

[図7]図7は、第2不純物領域の濃度勾配の比較例を示すグラフである。

[図8A]図8Aは、第1基本形態の第1レイアウト例を示す平面図である。

[図8B]図8Bは、第1基本形態の第2レイアウト例を示す平面図である。

[図9]図9は、反転コラムの第2基本形態を示す断面斜視図である。

[図10A]図10Aは、第2基本形態の第1レイアウト例を示す平面図である。

[図10B]図10Bは、第2基本形態の第2レイアウト例を示す平面図である。

- [図11]図11は、反転コラムの第3基本形態を示す断面斜視図である。
- [図12A]図12Aは、第3基本形態の第1レイアウト例を示す平面図である。
- [図12B]図12Bは、第3基本形態の第2レイアウト例を示す平面図である。
- [図12C]図12Cは、第3基本形態の第3レイアウト例を示す平面図である。
- [図13A]図13Aは、第1形態例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。
- [図13B]図13Bは、第2形態例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。
- [図13C]図13Cは、第3形態例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。
- [図13D]図13Dは、第4形態例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。
- [図13E]図13Eは、第5形態例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。
- [図13F]図13Fは、第6形態例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。
- [図14]図14は、活性領域の一要素を示す平面図である。
- [図15]図15は、第1形態例に係るゲート構造を示す断面斜視図である。
- [図16]図16は、外周領域の構成を示す斜視図である。
- [図17A]図17Aは、外周領域の一要素を示す断面図である。
- [図17B]図17Bは、外周領域の一要素を示す断面図である。
- [図18]図18は、第2形態例に係るゲート構造を示す断面斜視図である。
- [図19]図19は、SiC半導体装置の製造に使用されるウエハを示す概略図である。
- [図20]図20は、SiC半導体装置の製造方法例を示すフローチャートである。
- [図21A]図21Aは、SiC半導体装置の製造方法例を示す断面斜視図である。
- [図21B]図21Bは、図21Aの後の工程を示す断面斜視図である。
- [図21C]図21Cは、図21Bの後の工程を示す断面斜視図である。
- [図21D]図21Dは、図21Cの後の工程を示す断面斜視図である。
- [図21E]図21Eは、図21Dの後の工程を示す断面斜視図である。
- [図21F]図21Fは、図21Eの後の工程を示す断面斜視図である。
- [図21G]図21Gは、図21Fの後の工程を示す断面斜視図である。

- [図21H]図21Hは、図21Gの後の工程を示す断面斜視図である。
- [図21I]図21Iは、図21Hの後の工程を示す断面斜視図である。
- [図21J]図21Jは、図21Iの後の工程を示す断面斜視図である。
- [図22A]図22Aは、結晶方位の測定工程を説明するための概略図である。
- [図22B]図22Bは、結晶方位の測定工程を説明するための概略図である。
- [図23A]図23Aは、イオン注入工程を説明するための概略図である。
- [図23B]図23Bは、イオン注入工程を説明するための概略図である。
- [図24]図24は、第2形態に係るSiC半導体装置を示す平面図である。
- [図25A]図25Aは、図24に示すXXVA-XXVA線に沿う断面図である。
- [図25B]図25Bは、図24に示すXXVB-XXVB線に沿う断面図である。
- [図26A]図26Aは、チップ（第1層）のレイアウト例を示す平面図である。
- [図26B]図26Bは、チップ（第2層）のレイアウト例を示す平面図である。
- [図27]図27は、チップのレイアウト例を示す斜視図である。
- [図28]図28は、活性領域の一要部を示す平面図である。
- [図29]図29は、第1形態例に係るゲート構造を示す断面斜視図である。
- [図30]図30は、外周領域の構成を示す斜視図である。
- [図31A]図31Aは、外周領域の一要部を示す断面図である。
- [図31B]図31Bは、外周領域の一要部を示す断面図である。
- [図32]図32は、第2形態例に係るゲート構造を示す断面斜視図である。
- [図33]図33は、第3形態例に係るゲート構造を示す断面斜視図である。
- [図34]図34は、第4形態例に係るゲート構造を示す断面斜視図である。
- [図35]図35は、第5形態例に係るゲート構造を示す断面斜視図である。
- [図36]図36は、第3形態に係るSiC半導体装置を示す平面図である。
- [図37A]図37Aは、図36に示すXXXVIIA-XXXVIIA線に沿う断面図である。
- [図37B]図37Bは、図36に示すXXXVIIB-XXXVIIB線に沿う断面図である。
- [図38A]図38Aは、チップのレイアウト例を示す平面図である。
- [図38B]図38Bは、チップのレイアウト例を示す平面図である。
- [図39]図39は、チップのレイアウト例を示す斜視図である。

[図40]図40は、外周領域の構成を示す斜視図である。

[図41]図41は、第1形態例に係るダイオード構造を示す断面斜視図である

。

[図42]図42は、第2形態例に係るダイオード構造を示す断面斜視図である

。

[図43]図43は、第3形態例に係るダイオード構造を示す断面斜視図である

。

[図44]図44は、第4形態例に係るダイオード構造を示す断面斜視図である

。

[図45]図45は、第5形態例に係るダイオード構造を示す断面斜視図である

。

[図46]図46は、第1変形例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。

[図47]図47は、第2変形例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。

[図48]図48は、第3変形例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。

[図49]図49は、第4変形例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。

[0010] [詳細な説明]

以下、添付図面を参照して、具体的な形態が詳細に説明される。添付図面は、いずれも模式図であり、厳密に図示されたものではなく、相対的な位置関係、縮尺、比率、角度等は必ずしも一致しない。添付図面の間で対応する構造には同一の参照符号が付され、重複する説明は省略または簡略化される。説明が省略または簡略化された構造については、省略または簡略化される前になされた説明が適用される。

[0011] この明細書において「ほぼ (substantially) 」の文言が使用される場合、この文言は、比較対象の数値 (形態) と等しい数値 (形態) を含む他、比較対象の数値 (形態) を基準とする±10%の範囲の数値誤差 (形態誤差) も含む。以下の説明では「第1」、「第2」、「第3」等の文言が使用されるが、これらは説明順序を明確にするために各構造の名称に付された記号であり、各構造の名称を限定する趣旨で付されていない。

[0012] 以下の説明では、「p型」または「n型」を用いて半導体（不純物）の導電型が示されるが、「p型」が「第1導電型」と称され、「n型」が「第2導電型」と称されてもよい。むしろ、「n型」が「第1導電型」と称され、「p型」が「第2導電型」と称されてもよい。「p型」は3価元素に起因する導電型であり、「n型」は5価元素に起因する導電型である。3価元素は、特に言及されない限り、ホウ素、アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種である。5価元素は、特に言及されない限り、窒素、リン、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種である。

[0013] 図1は、第1形態に係るSiC半導体装置1Aを示す平面図である。図2Aは、図1に示すIIA-IIA線に沿う断面図である。図2Bは、図1に示すIIB-IIB線に沿う断面図である。図3Aは、チップ2（第1層8）のレイアウト例を示す平面図である。図3Bは、チップ2（第2層9）のレイアウト例を示す平面図である。図4は、チップ2のレイアウト例を示す斜視図である。図5は、第1反転コラム14および第2反転コラム16の第1基本形態を示す断面斜視図である。

[0014] 図1～図5を参照して、SiC半導体装置1Aは、SiC単結晶を含むチップ2を含む。チップ2は、「SiCチップ」または「半導体チップ」と称されてもよい。チップ2は、この形態（this embodiment）では、六方晶のSiC単結晶からなり、直方体形状に形成されている。六方晶のSiC単結晶は、2H（Hexagonal）-SiC単結晶、4H-SiC単結晶、6H-SiC単結晶等を含む複数種のポリタイプを有している。この形態では、チップ2が4H-SiC単結晶からなる例が示されるが、チップ2は他のポリタイプからなってもよい。

[0015] チップ2は、一方側の第1主面3、他方側の第2主面4、ならびに、第1主面3および第2主面4を接続する第1～第4側面5A～5Dを有している。第1主面3および第2主面4は、鉛直方向Zから見た平面視（以下、単に「平面視」という。）において四角形状に形成されている。鉛直方向Zは、

チップ2の厚さ方向や第1主面3（第2主面4）の法線方向でもある。第1主面3および第2主面4は、平面視において正方形または長方形に形成されていてもよい。

[0016] 第1主面3および第2主面4は、SiC単結晶のc面によって形成されていることが好ましい。この場合、第1主面3はSiC単結晶のシリコン面（ (0001) 面）によって形成され、第2主面4はSiC単結晶のカーボン面（ $(000-1)$ 面）によって形成されていることが好ましい。

[0017] 第1側面5Aを起点とするチップ2の周方向（図1では時計回り）に関して、第2側面5Bは第1側面5Aに接続され、第3側面5Cは第2側面5Bに接続され、第4側面5Dは第1側面5Aおよび第3側面5Cに接続されている。第1側面5Aおよび第3側面5Cは、第1主面3に沿う第1方向Xに延び、第1方向Xに交差（具体的には直交）する第2方向Yに対向している。第2側面5Bおよび第4側面5Dは、第2方向Yに延び、第1方向Xに対向している。

[0018] この形態では、第1方向XがSiC単結晶のa軸方向（ $[11-20]$ 方向）であり、第2方向YがSiC単結晶のm軸方向（ $[1-100]$ 方向）である。つまり、第1側面5Aおよび第3側面5Cは、SiC単結晶のm面（ $(1-100)$ 面）によってそれぞれ形成されている。また、第2側面5Bおよび第4側面5Dは、SiC単結晶のa面（ $(11-20)$ 面）によってそれぞれ形成されている。

[0019] a面はa軸方向に直交する結晶面であり、m面はm軸方向に直交する結晶面である。むしろ、第1方向XがSiC単結晶のm軸方向であり、第2方向YがSiC単結晶のa軸方向であってもよい。第1～第4側面5A～5Dは、研削面からそれぞれなってもよい。第1～第4側面5A～5Dは、劈開面からそれぞれなってもよい。

[0020] 第1方向Xおよび第2方向Yを含むXY平面は、鉛直方向Zに直交する水平面を形成する。以下では、鉛直方向Zに沿って延びる軸が「鉛直軸」と表現されることがある。また、以下では、第1方向Xおよび第2方向Yが「水

平方向」と表現されることがある。水平方向は、第1主面3に沿って延びる方向でもある。

[0021] 図4を参照して、チップ2（第1主面3および第2主面4）は、SiC単結晶のc面に対して所定のオフ方向Doffに所定の角度で傾斜したオフ角 θ_{off} を有している。つまり、SiC単結晶のc軸（(0001)軸）は、鉛直軸からオフ方向Doffに向けてオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜している。また、SiC単結晶のc面は、水平面に対してオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜している。

[0022] オフ方向Doffは、SiC単結晶のa軸方向（つまり第1方向X）であることが好ましい。オフ角 θ_{off} は、 0° を超えて 10° 以下であってもよい。オフ角 θ_{off} は、 0° を超えて 1° 以下、 1° 以上 2.5° 以下、 2.5° 以上 5° 以下、 5° 以上 7.5° 以下、および、 7.5° 以上 10° 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0023] オフ角 θ_{off} は、 5° 以下であることが好ましい。オフ角 θ_{off} は、 2° 以上 4.5° 以下であることが特に好ましい。オフ角 θ_{off} は、典型的には、 $4^\circ \pm 0.1^\circ$ の範囲に設定される。むろん、この明細書は、オフ角 θ_{off} が 0° である形態（つまり、第1主面3がc面に対してジャスト面である形態）を除外しない。

[0024] チップ2は、SiC単結晶からなるn型のベース層6を含む。ベース層6は、「ベースSiC層」、「ベース領域」等と称されてもよい。ベース層6は、水平方向に層状に延び、第2主面4および第1～第4側面5A～5Dの一部を形成している。ベース層6は、この形態では、SiC単結晶製の基板（つまりSiC基板）からなる。ベース層6は、前述のオフ方向Doffおよびオフ角 θ_{off} を有している。

[0025] ベース層6は、積層方向に沿うベース軸チャンネルCHBを有している。ベース軸チャンネルCHBは、ベース層6を構成するSiC単結晶に関して原子間距離（原子間隔）が比較的広い領域（チャンネル）であり、積層方向（結晶成長方向）に延びる結晶軸を構成する原子列によって取り囲まれている。

- [0026] つまり、ベース軸チャンネルCHBは、原子列が疎である領域が積層方向に延在し、平面視において水平方向の原子列（原子間距離／原子密度）が疎である領域である。ベース軸チャンネルCHBは、結晶軸のうち低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域であることが好ましい。低指数結晶軸は、ミラー指数（ a_1 、 a_2 、 a_3 、 c ）に関して、「 a_1 」、「 a_2 」、「 a_3 」および「 c 」の絶対値がいずれも2以下（好ましくは1以下）で表現される結晶軸である（以下、この明細書において同じ）。
- [0027] ベース軸チャンネルCHBは、この形態では、SiC単結晶の c 軸（ (0001) 軸）に沿う原子列によって取り囲まれた領域からなる。つまり、ベース軸チャンネルCHBは、 c 軸に沿って延び、前述のオフ方向 Doff およびオフ角 θ_{off} を有している。換言すると、ベース軸チャンネルCHBは、鉛直軸からオフ方向 Doff に向けてオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜している。
- [0028] ベース層6は、 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 以下の n 型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。ベース層6は、厚さ方向にほぼ一定の n 型不純物濃度を有していることが好ましい。ベース層6の n 型不純物濃度は、単一種の5価元素によって調整されていることが好ましい。ベース層6の n 型不純物濃度は、リン以外の5価元素によって調整されていることが特に好ましい。ベース層6の n 型不純物濃度は、この形態では、窒素によって調整されている。
- [0029] ベース層6は、ベース厚さTBを有している。ベース厚さTBは、 $5 \mu\text{m}$ 以上 $300 \mu\text{m}$ 以下であってもよい。ベース厚さTBは、 $5 \mu\text{m}$ 以上 $50 \mu\text{m}$ 以下、 $50 \mu\text{m}$ 以上 $100 \mu\text{m}$ 以下、 $100 \mu\text{m}$ 以上 $150 \mu\text{m}$ 以下、 $150 \mu\text{m}$ 以上 $200 \mu\text{m}$ 以下、 $200 \mu\text{m}$ 以上 $250 \mu\text{m}$ 以下、および、 $250 \mu\text{m}$ 以上 $300 \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。ベース厚さTBは、 $50 \mu\text{m}$ 以上 $250 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。
- [0030] チップ2は、ベース層6の上に積層された積層部7を含む。積層部7は、「半導体層」、「SiC層」、「SiC積層部」、「半導体積層部」等と称

されてもよい。積層部7は、SiC単結晶からなる複数（2層以上）の半導体層が積層された積層構造を有している。複数の半導体層は、この形態では、スーパージャンクション構造SJの形成層として設けられている。複数の半導体層（スーパージャンクション構造SJ）の積層数は任意であり、達成すべき電気的特性に応じて適宜調節される。耐圧値（ブレイクダウン電圧）や抵抗値等が電気的特性として例示される。

[0031] 複数の半導体層（スーパージャンクション構造SJ）の積層数は、典型的には、2層以上5層以下（2層、3層、4層または5層）である。積層部7は、この形態では、SiC単結晶製のn型の第1層8およびSiC単結晶製のn型の第2層9を含む2層構造を有している。第1層8は「第1SiC層」、「第1半導体層」等と称されてもよい。第2層9は「第2SiC層」、「第2半導体層」等と称されてもよい。

[0032] 第1層8は、ベース層6の上に積層されている。第1層8は、水平方向に層状に延び、チップ2の中間部および第1～第4側面5A～5Dの一部を形成している。第1層8は、ベース層6を起点に結晶成長されたエピタキシャル層（つまりSiCエピタキシャル層）からなる。

[0033] 第1層8は、下端および上端を有している。第1層8の下端は結晶成長起点であり、第1層8の上端は結晶成長終点である。第1層8はベース層6から連続的に結晶成長されているため、第1層8の下端はベース層6の上端に一致している。ベース層6および第1層8の間の境界部は必ずしも視認できるものではなく、他の構成や要素から間接的に評価および／または判定され得る。第1層8は、ベース層6のオフ方向 $Do\ f\ f$ およびオフ角 $\theta\ o\ f\ f$ にほぼ一致したオフ方向 $Do\ f\ f$ およびオフ角 $\theta\ o\ f\ f$ を有している。

[0034] 第1層8は、積層方向に沿う第1軸チャンネルCH1を有している。第1軸チャンネルCH1は、第1層8を構成するSiC単結晶に関して原子間距離（原子間隔）が比較的広い領域（チャンネル）であり、積層方向（結晶成長方向）に延びる結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれている。

[0035] つまり、第1軸チャンネルCH1は、原子列が疎である領域が積層方向に延

在し、平面視において水平方向の原子列（原子間距離／原子密度）が疎である領域である。第1軸チャンネルCH1は、結晶軸のうち低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域であることが好ましい。

[0036] 第1軸チャンネルCH1は、この形態では、SiC単結晶のc軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域からなる。つまり、第1軸チャンネルCH1は、c軸に沿って延び、オフ方向Doffおよびオフ角 θ_{off} を有している。換言すると、第1軸チャンネルCH1は、鉛直軸からオフ方向Doffに向けてオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜している。

[0037] 第1層8のn型不純物濃度は、ベース層6のn型不純物濃度未満であることが好ましい。第1層8は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。第1層8のn型不純物濃度は、厚さ方向にほぼ一定であってもよい。むしろ、第1層8のn型不純物濃度は、積層方向（結晶成長方向）に向けて漸増および／または漸減する濃度勾配を有していてもよい。

[0038] 第1層8のn型不純物濃度は、この形態では、窒素によって調節されている。第1層8は、少なくとも1種の5価元素によって調整されたn型不純物濃度を有していてもよい。たとえば、第1層8のn型不純物濃度は、窒素、リン、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種によって調節されていてもよい。

[0039] 第1層8は、リン以外の5価元素を含むことが好ましい。この場合、第1層8のn型不純物濃度は、少なくとも窒素によって調整されていることが好ましい。第1層8が2種以上の5価元素を含む場合、第1層8は、窒素および窒素以外の5価元素を含むことが好ましい。この場合、第1層8は、リンおよび窒素以外の5価元素として、ヒ素およびアンチモンのいずれか一方または双方を含むことが好ましい。

[0040] 第1層8は、第1厚さT1を有している。第1厚さT1は、ベース厚さTB未満であることが好ましい。第1厚さT1は、 $1 \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。第1厚さT1は、 $5 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。第1厚さT1

は、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下、 $2\ \mu\text{m}$ 以上 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3\ \mu\text{m}$ 以下、 $3\ \mu\text{m}$ 以上 $3.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $4\ \mu\text{m}$ 以下、 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0041] 第2層9は、第1層8の上に積層されている。第2層9は、水平方向に層状に延び、第1主面3を形成し、第1～第4側面5A～5Dの一部を形成している。第2層9は、第1層8を起点に結晶成長されたエピタキシャル層（つまりSiCエピタキシャル層）からなる。

[0042] 第2層9は、下端および上端を有している。第2層9の下端は結晶成長起点であり、第2層9の上端は結晶成長終点である。第2層9は第1層8から連続的に結晶成長されているため、第2層9の下端は第1層8の上端に一致している。第1層8および第2層9の間の境界部は必ずしも視認できるものではなく、他の構成や要素から間接的に評価および／または判定され得る。第2層9は、第1層8のオフ方向 $Doff$ およびオフ角 θoff にほぼ一致したオフ方向 $Doff$ およびオフ角 θoff を有している。

[0043] 第2層9は、積層方向に沿う第2軸チャンネルCH2を有している。第2軸チャンネルCH2は、第2層9を構成するSiC単結晶に関して原子間距離（原子間隔）が比較的広い領域（チャンネル）であり、積層方向（結晶成長方向）に延びる結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれている。

[0044] つまり、第2軸チャンネルCH2は、原子列が疎である領域が積層方向に延在し、平面視において水平方向の原子列（原子間距離／原子密度）が疎である領域である。第2軸チャンネルCH2は、結晶軸のうち低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域であることが好ましい。

[0045] 第2軸チャンネルCH2は、この形態では、SiC単結晶のc軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域からなる。つまり、第2軸チャンネルCH2は、c軸に沿って延び、オフ方向 $Doff$ およびオフ角 θoff を有している。換言すると、第2軸チャンネルCH2は、鉛直軸からオフ方向 $Doff$ に向けてオフ角 θoff 分だけ傾斜している。

- [0046] 第2層9のn型不純物濃度は、ベース層6のn型不純物濃度未満であることが好ましい。第2層9は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。第2層9のn型不純物濃度は、厚さ方向にほぼ一定であってもよい。むろん、第2層9のn型不純物濃度は、積層方向（結晶成長方向）に向けて漸増および／または漸減する濃度勾配を有していてもよい。
- [0047] 第2層9のn型不純物濃度は、第1層8のn型不純物濃度とほぼ等しいことが好ましい。むろん、第2層9のn型不純物濃度は、第1層8のn型不純物濃度と異なってもよい。この場合、第2層9のn型不純物濃度（ピーク値）は、第1層8のn型不純物濃度（ピーク値）よりも高くてもよいし、第1層8のn型不純物濃度（ピーク値）未満であってもよい。
- [0048] 第2層9のn型不純物濃度は、この形態では、窒素によって調節されている。第2層9は、少なくとも1種の5価元素によって調整されたn型不純物濃度を有していてもよい。たとえば、第2層9のn型不純物濃度は、窒素、リン、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種によって調節されていてもよい。
- [0049] 第2層9は、リン以外の5価元素を含むことが好ましい。この場合、第2層9のn型不純物濃度は、少なくとも窒素によって調整されていることが好ましい。第2層9が2種以上の5価元素を含む場合、第2層9は、窒素および窒素以外の5価元素を含むことが好ましい。この場合、第2層9は、リンおよび窒素以外の5価元素として、ヒ素およびアンチモンのいずれか一方または双方を含むことが好ましい。
- [0050] 第2層9は、第2厚さT2を有している。第2厚さT2は、ベース厚さTB未満であることが好ましい。第2厚さT2は、第1厚さT1とほぼ等しくてもよいし、第1厚さT1とは異なってもよい。第2厚さT2は、第1厚さT1よりも大きくてもよいし、第1厚さT1未満であってもよい。
- [0051] 第2厚さT2は、 $1 \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。第2厚さT2は、 $5 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。第2厚さT2は、 $1 \mu\text{m}$ 以上 $1.5 \mu\text{m}$ 以

下、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下、 $2\ \mu\text{m}$ 以上 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3\ \mu\text{m}$ 以下、 $3\ \mu\text{m}$ 以上 $3.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $4\ \mu\text{m}$ 以下、 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0052] SiC半導体装置1Aは、チップ2に設定された活性領域10を含む。活性領域10は、平面視においてチップ2の周縁（第1～第4側面5A～5D）から間隔を空けてチップ2の内方部に設定されている。活性領域10は、平面視においてチップ2の周縁に平行な4辺を有する多角形状（この形態では四角形状）に設定されている。活性領域10の面積は、第1主面3の面積の50%以上90%以下であることが好ましい。

[0053] SiC半導体装置1Aは、チップ2において活性領域10外に設定された外周領域11を含む。外周領域11は、平面視においてチップ2の周縁および活性領域10の間の領域に設けられている。外周領域11は、平面視において活性領域10に沿って帯状に延び、活性領域10を取り囲む多角環状（この形態では四角環状）に設定されている。

[0054] 図5を参照して、SiC半導体装置1Aは、第1層8内において少なくとも活性領域10に位置する部分に形成されたp型の第1不純物領域12を含む。第1不純物領域12は、この形態では、活性領域10から外周領域11に引き出されている。つまり、第1不純物領域12は、第1層8のうち活性領域10内に位置する部分から第1層8のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。

[0055] さらに、第1不純物領域12は、外周領域11から第1～第4側面5A～5Dに向けて延び、第1～第4側面5A～5Dから露出している。むしろ、第1不純物領域12は、第1～第4側面5A～5Dから内方に間隔を空けて第1層8内に形成されていてもよい。この場合、第1不純物領域12の周縁部は、活性領域10内に位置されていてもよいし、外周領域11内に位置されていてもよい。

[0056] 第1不純物領域12は、第1層8の導電性をn型からp型に反転させる領

域である。つまり、第1不純物領域12は、第1層8の導電型を構成する5価元素に加えて3価元素を含む。第1不純物領域12のp型不純物濃度は、第1層8のn型不純物濃度よりも高い。第1不純物領域12は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有しているもよい。

[0057] 第1不純物領域12のp型不純物濃度は、少なくとも1種の3価元素によって調整されていることが好ましい。第1不純物領域12のp型不純物濃度は、炭素よりも重たい重元素に属する3価元素によって調整されていることが特に好ましい。つまり、第1不純物領域12は、ホウ素以外の3価元素（アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種）を含むことが好ましい。第1不純物領域12のp型不純物濃度は、この形態では、アルミニウムによって調整されている。

[0058] 第1不純物領域12は、断面視において第1層8内で第1軸チャンネルCH1に沿って延びるp型のチャネリング領域からなる。つまり、第1不純物領域12は、第1層8内において低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域（第1軸チャンネルCH1）に対して平行にまたはほぼ平行に導入された不純物領域からなり、第1主面3に対して傾斜して延びている。

[0059] したがって、第1不純物領域12は、第1軸チャンネルCH1のオフ方向 $D \circ f \circ f$ およびオフ角 $\theta \circ f \circ f$ にほぼ一致したオフ方向 $D \circ f \circ f$ およびオフ角 $\theta \circ f \circ f$ を有している。換言すると、第1不純物領域12は、鉛直軸からオフ方向 $D \circ f \circ f$ に向けてオフ角 $\theta \circ f \circ f$ 分だけ傾斜している。

[0060] 第1不純物領域12は、第1層8の下端側に位置された下端部、および、第1層8の上端側に位置された上端部を有している。この形態では、第1不純物領域12の下端部は第1層8の厚さ範囲中間部に対して第1層8の下端側の領域に位置され、第1不純物領域12の上端部は第1層8の厚さ範囲中間部に対して第1層8の上端側の領域に位置されている。つまり、第1不純物領域12は、第1軸チャンネルCH1に沿って第1層8の中間部を横切る厚さ（深さ）を有する単一の不純物領域からなる。

- [0061] 第1不純物領域12の下端部は、第1層8の下端（つまりベース層6）から上端側に間隔を空けて形成され、第1層8の一部（下端部）を挟んでベース層6に対向していてもよい。第1不純物領域12の下端部は、第1層8の下端とほぼ一致し、ベース層6に接続されていてもよい。
- [0062] 第1層8の下端および第1不純物領域12の下端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1層8の下端および第1不純物領域12の下端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0063] 第1不純物領域12の下端部は、ベース層6および第1層8の境界部を横切り、ベース層6内に位置する延部を有していてもよい。第1軸チャンネルCH1はベース軸チャンネルCHBとほぼ一致しているため、第1不純物領域12の延部は第1層8内においてベース軸チャンネルCHBに沿って形成される。
- [0064] この場合、ベース層6の上端を基準とする第1不純物領域12の延部の厚さは、 $0\ \mu\text{m}$ を超えて $2\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1不純物領域12の延部の厚さは、 $0\ \mu\text{m}$ を超えて $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0065] 第1不純物領域12の上端部は、第1層8の上端（つまり第2層9）から下端側に間隔を空けて形成され、第1層8の一部（上端部）を挟んで第1層8の上端に対向していてもよい。第1不純物領域12の上端部は、第1層8の上端とほぼ一致し、第2層9に接続されていてもよい。
- [0066] 第1層8の上端および第1不純物領域12の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1層8の上端および上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

- [0067] むろん、第1不純物領域12は、第1層8のほぼ全域に形成されていてもよい。つまり、第1不純物領域12は、第1層8のほぼ全域の導電型をn型からp型に反転させていてもよい。この場合、第1層8は、p型の第1層8であると見做されてもよい。
- [0068] 第1不純物領域12の厚さは、第1層8の第1厚さT1未満であってもよい。第1不純物領域12の厚さは、第1厚さT1よりも大きくてもよい。第1不純物領域12の厚さは、第1厚さT1とほぼ等しくてもよい。第1不純物領域12の厚さは、第2層9の第2厚さT2未満であってもよい。第1不純物領域12の厚さは、第2厚さT2よりも大きくてもよい。第1不純物領域12の厚さは、第2厚さT2とほぼ等しくてもよい。
- [0069] 第1不純物領域12の厚さは、 $1\ \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。第1不純物領域12の厚さは、 $5\ \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。第1不純物領域12の厚さは、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下、 $2\ \mu\text{m}$ 以上 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3\ \mu\text{m}$ 以下、 $3\ \mu\text{m}$ 以上 $3.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $4\ \mu\text{m}$ 以下、 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0070] SiC半導体装置1Aは、第2層9内において少なくとも活性領域10に位置する部分に形成されたp型の第2不純物領域13を含む。第2不純物領域13は、この形態では、活性領域10から外周領域11に引き出されている。つまり、第2不純物領域13は、第2層9のうち活性領域10内に位置する部分から第2層9のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。
- [0071] さらに、第2不純物領域13は、外周領域11から第1～第4側面5A～5Dに向けて延び、第1～第4側面5A～5Dから露出している。むろん、第2不純物領域13は、第1～第4側面5A～5Dから内方に間隔を空けて第2層9内に形成されていてもよい。この場合、第2不純物領域13の周縁部は、活性領域10内に位置されていてもよいし、外周領域11内に位置さ

れていてもよい。

[0072] 第2不純物領域13は、第2層9の導電型をn型からp型に反転させる領域である。つまり、第2不純物領域13は、第2層9の導電型を構成する5価元素に加えて3価元素を含む。第2不純物領域13のp型不純物濃度は、第2層9のn型不純物濃度よりも高い。第2不純物領域13は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有しているもよい。

[0073] 第2不純物領域13のp型不純物濃度（ピーク値）は、第1不純物領域12のp型不純物濃度（ピーク値）以上であってもよい。第2不純物領域13のn型不純物濃度（ピーク値）は、第1不純物領域12のn型不純物濃度（ピーク値）未満であってもよい。第2不純物領域13のn型不純物濃度（ピーク値）は、第1不純物領域12のn型不純物濃度（ピーク値）とほぼ等しくてもよい。

[0074] 第2不純物領域13のp型不純物濃度は、少なくとも1種の3価元素によって調整されていることが好ましい。第2不純物領域13のp型不純物濃度は、炭素よりも重たい重元素に属する3価元素によって調整されていることが特に好ましい。つまり、第2不純物領域13は、ホウ素以外の3価元素（アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種）を含むことが好ましい。第2不純物領域13のp型不純物濃度は、この形態では、アルミニウムによって調整されている。

[0075] 第2不純物領域13は、断面視において第2層9内で第2軸チャンネルCH2に沿って延びるp型のチャネリング領域からなる。つまり、第2不純物領域13は、第2層9内において低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域（第2軸チャンネルCH2）に対して平行にまたはほぼ平行に導入された不純物領域からなり、第1主面3に対して傾斜して延びている。

[0076] したがって、第2不純物領域13は、第2軸チャンネルCH2のオフ方向 $\Delta \theta$ およびオフ角 θ にほぼ一致したオフ方向 $\Delta \theta$ およびオフ角 θ を有している。換言すると、第2不純物領域13は、鉛直軸からオ

フ方向 $D \circ f f$ に向けてオフ角 $\theta \circ f f$ 分だけ傾斜している。

- [0077] 第2不純物領域13は、第2層9の下端側に位置された下端部、および、第2層9の上端側に位置された上端部を有している。この形態では、第2不純物領域13の下端部は第2層9の厚さ範囲中間部に対して第2層9の下端側の領域に位置され、第2不純物領域13の上端部は第2層9の厚さ範囲中間部に対して第2層9の上端側の領域に位置されている。つまり、第2不純物領域13は、第2軸チャンネルCH2に沿って第2層9の中間部を横切る厚さ（深さ）を有する単一の不純物領域からなる。
- [0078] 第2不純物領域13の下端部は、第1層8および第2層9の境界部を横切り、第1層8内に位置する延部を有していることが好ましい。この場合、第2不純物領域13の延部は、第1層8内において第1不純物領域12に接続されていることが特に好ましい。つまり、第2不純物領域13は、第1不純物領域12と共に1つのp型の不純物領域を形成していることが好ましい。第2軸チャンネルCH2は第1軸チャンネルCH1とほぼ一致しているため、第2不純物領域13の延部は第1層8内において第1軸チャンネルCH1に沿って形成される。
- [0079] 第1層8の上端を基準とする第2不純物領域13の延部の厚さは、 $0 \mu m$ を超えて $2 \mu m$ 以下であってもよい。第2不純物領域13の延部の厚さは、 $0 \mu m$ を超えて $0.5 \mu m$ 以下、 $0.5 \mu m$ 以上 $1 \mu m$ 以下、 $1 \mu m$ 以上 $1.5 \mu m$ 以下、および、 $1.5 \mu m$ 以上 $2 \mu m$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0080] むろん、第2不純物領域13の下端部は、第2層9の下端から上端側に間隔を空けて形成され、第2層9の一部（下端部）を挟んで第1層8（第1不純物領域12）に対向していてもよい。第2不純物領域13の下端部は、第2層9の下端とほぼ一致し、第1層8または第1不純物領域12に接続されていてもよい。
- [0081] この場合、第2層9の下端および第2不純物領域13の下端部の間の距離は、 $0 \mu m$ 以上 $2 \mu m$ 以下であってもよい。第2層9の下端および第2不純

物領域13の下端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0082] 第2不純物領域13の上端部は、第2層9の上端（つまり第1主面3）から下端側に間隔を空けて形成され、第2層9の一部（上端部）を挟んで第2層9の上端に対向していてもよい。この場合、第2層9における第1主面3および第2不純物領域13の上端部の間のスペースは、デバイス構造（他の不純物領域等）を形成するための領域として使用されてもよい。むしろ、第2不純物領域13の上端部は、第2層9の上端（つまり第1主面3）から露出していてもよい。

[0083] 第2層9の上端および第2不純物領域13の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第2層9の上端および第2不純物領域13の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0084] むろん、第2不純物領域13は、第2層9のほぼ全域に形成されていてもよい。つまり、第2不純物領域13は、第2層9のほぼ全域の導電型をn型からp型に反転させていてもよい。この場合、第2層9は、p型の第2層9であると見なされてもよい。

[0085] 第2不純物領域13の厚さは、第1層8の第1厚さT1未満であってもよい。第2不純物領域13の厚さは、第1厚さT1よりも大きいてもよい。第2不純物領域13の厚さは、第1厚さT1とほぼ等しくてもよい。第2不純物領域13の厚さは、第2層9の第2厚さT2未満であってもよい。第2不純物領域13の厚さは、第2厚さT2よりも大きいてもよい。第2不純物領域13の厚さは、第2厚さT2とほぼ等しくてもよい。

[0086] 第2不純物領域13の厚さは、 $1\ \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。第2不純物領域13の厚さは、 $5\ \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。第2不純物領域13の厚さは、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下、 2

μm 以上 $2.5\mu\text{m}$ 以下、 $2.5\mu\text{m}$ 以上 $3\mu\text{m}$ 以下、 $3\mu\text{m}$ 以上 $3.5\mu\text{m}$ 以下、 $3.5\mu\text{m}$ 以上 $4\mu\text{m}$ 以下、 $4\mu\text{m}$ 以上 $4.5\mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\mu\text{m}$ 以上 $5\mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0087] 以下、第1不純物領域12のp型不純物濃度の濃度勾配および第2不純物領域13のp型不純物濃度の濃度勾配が具体的に説明される。第1不純物領域12の濃度勾配についての説明および第2不純物領域13の濃度勾配についての説明はほぼ同様であるため、以下では、第2不純物領域13の濃度勾配が例示される。

[0088] 第1不純物領域12の濃度勾配の説明は、以下の説明において、必要に応じて、「第1層8」を「ベース層6」に置き換え、「第2層9」を「第1層8」に置き換え、「第2不純物領域13」を「第1不純物領域12」に置き換え、「第2軸チャンネルCH2」を「第1軸チャンネルCH1」に置き換えることによって得られる。つまり、第1層8および第2層9に対する第2不純物領域13の相対的または絶対的な位置関係は、ベース層6および第1層8に対する第1不純物領域12の相対的または絶対的な位置関係に準用される。

[0089] 図6A～図6Eは、第2不純物領域13（第1不純物領域12）の濃度勾配の一例を示すグラフである。図7は、第2不純物領域13（第1不純物領域12）の濃度勾配の比較例を示すグラフである。図6A～図6Eおよび図7において、縦軸は第2不純物領域13のp型不純物濃度を示し、横軸は第2層9の上端（第1主面3）を基準（ゼロ地点）とする第2軸チャンネルCH2に沿う深さを示している。

[0090] 図6A～図6Eおよび図7では、 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 以上のp型不純物濃度を有する領域が第2不純物領域13と定義され、グラフとして図示されている。以下に示される不純物濃度や厚さ等の数値は、第2不純物領域13の基本的な構成を濃度勾配に基づいて説明するための例示であり、第2不純物領域13の構成を一義的に限定する趣旨で示されていない。不純物濃度や厚さ

等は、3価元素の注入条件（ドーズ量、注入温度、注入エネルギー等）等に応じて種々の値に調節される。

[0091] 図6A～図6Eは、それぞれ、チャネリング注入法によって第2不純物領域13を形成した場合のグラフである。図6A～図6Eは、190KeV（図6A）、380KeV（図6B）、650KeV（図6C）、960KeV（図6D）、または、2000KeV（図6E）の注入エネルギーによって、第2軸チャンネルCH2に対して平行にまたはほぼ平行に所定の3価元素（ここではアルミニウム）を第2層9に導入したときの第2不純物領域13の濃度勾配を示している。第2層9の第2厚さT2は、2.5μm程度であり、3価元素のドーズ量は $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ である。

[0092] 一方、図7は、ランダム注入法によって第2不純物領域13を形成した場合のグラフである。図7は、190KeV、380KeV、650KeV、960KeV、または、2000KeVの注入エネルギーによって、ランダム方向に所定の3価元素（ここではアルミニウム）を第2層9に導入したときの第2不純物領域13の濃度勾配を示している。ランダム方向は、第2軸チャンネルCH2に平行（ほぼ平行）ではない方向（たとえば鉛直方向Z）である。第2層9の第2厚さT2は、2.5μm程度であり、3価元素のドーズ量は $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ である。

[0093] 図6Aを参照して、第2不純物領域13（190KeV）は、1.5μm以上1.8μm以下の厚さを有し、第2層9の下端から上端側に離間した下端部、および、第2層9の上端（第1主面3）から露出した上端部を有している。第2層9の下端および下端部の間の距離は、0.1μm以上1μm以下である。

[0094] 第2不純物領域13のp型不純物濃度は、第2層9の上端から下端に向けて、漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を含む濃度勾配を有している。漸増部20は、第2不純物領域13の上端部を形成する部分であり、上端部から第2層9の下端側に向けて比較的急峻な増加率でピーク部21までp型不純物濃度が漸増する部分である。

- [0095] ピーク部 2 1 は、p 型不純物濃度のピーク値 P（最大値）を有する部分である。ピーク部 2 1 は、p 型不純物濃度が増加（増加傾向）から低下（低下傾向）に転じる一連の濃度変化（変曲点）を含む凸状の主たる濃度遷移部でもある。ピーク部 2 1 の深さ位置は、 $0.1 \mu\text{m}$ 以上 $0.5 \mu\text{m}$ 以下である。
- [0096] 緩慢部 2 2 は、ピーク部 2 1 よりも下端部側の領域に形成され、比較的緩慢な低下率で不純物濃度が漸減する部分である。つまり、緩慢部 2 2 は、一定の深さ範囲において一定の p 型不純物濃度を維持する部分であり、第 2 不純物領域 1 3 の本体部を形成している。緩慢部 2 2 の p 型不純物濃度は、ピーク部 2 1 の p 型不純物濃度未満の濃度範囲において漸減している。
- [0097] 緩慢部 2 2 は、少なくとも $0.5 \mu\text{m}$ の厚さ範囲において 50% 以下の濃度低下率を有する部分によって定義される。緩慢部 2 2 は、この例では、 $0.7 \mu\text{m}$ 以上 $0.8 \mu\text{m}$ 以下の厚さを有し、当該厚さ範囲において 50% 以下の濃度低下率を有している。緩慢部 2 2 の p 型不純物濃度は、この例では、 $4.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以上 $9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲に収まっている。
- [0098] 漸減部 2 3 は、第 2 不純物領域 1 3 の下端部を形成する部分である。漸減部 2 3 は、緩慢部 2 2 における濃度低下率よりも大きい濃度低下率を有し、緩慢部 2 2 から第 2 層 9 の下端に向けて p 型不純物濃度が漸減する部分である。漸減部 2 3 の単位厚さ当たりの濃度低下率は、緩慢部 2 2 の単位厚さ当たりの濃度低下率よりも大きい。漸減部 2 3 の p 型不純物濃度は、緩慢部 2 2 から $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ まで漸減している。
- [0099] 図 6 B を参照して、第 2 不純物領域 1 3（380 KeV）は、 $2.2 \mu\text{m}$ 以上 $2.4 \mu\text{m}$ 以下の厚さを有し、第 2 層 9 の下端から上端側に離間した下端部、および、第 2 層 9 の上端（第 1 主面 3）から下端側（第 1 層 8 側）に離間した上端部を有している。第 2 層 9 の下端および第 2 不純物領域 1 3 の下端部との間の距離は、 $0.1 \mu\text{m}$ 以上 $0.3 \mu\text{m}$ 以下である。第 2 層 9 の上端および第 2 不純物領域 1 3 の上端部との間の距離は、 $0.01 \mu\text{m}$ 以上 $0.$

2 μm 以下である。

- [0100] 第2不純物領域13のp型不純物濃度は、図6Aの例と同様、第2層9の上端から下端に向けて、漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を含む濃度勾配を有している。漸増部20は、この例においても、第2不純物領域13の上端部から第2層9の下端側に向けて比較的急峻な増加率でピーク部21まで漸増している。ピーク部21の深さ位置は、0.3 μm 以上0.7 μm 以下である。
- [0101] 緩慢部22は、0.8 μm 以上1.1 μm 以下の厚さを有し、当該厚さ範囲において50%以下の濃度低下率を有している。緩慢部22のp型不純物濃度は、この例では、 $3.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以上 $7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲に収まっている。漸減部23のp型不純物濃度は、緩慢部22から $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ まで漸減している。
- [0102] 図6Cを参照して、第2不純物領域13(650KeV)は、2.5 μm 以上2.8 μm 以下の厚さを有し、第1層8内に位置する下端部、および、第2層9の上端(第1主面3)から下端側(第1層8側)に離間した上端部を有している。つまり、第2不純物領域13は、第2層9の第2厚さT2(=2.5 μm)以上の厚さを有している。
- [0103] また、第2不純物領域13の下端部は、第1層8および第2層9の境界を横切り、第1層8内に延在した延部を有している。延部は、第1層8の上端を基準に0.4 μm 以上0.7 μm 以下の厚さを有している。第2層9の上端および第2不純物領域13の上端部の間の距離は、0.3 μm 以上0.6 μm 以下である。第2層9の上端および第2不純物領域13の上端部の間の距離は、0.1 μm 以上0.4 μm 以下である。
- [0104] 第2不純物領域13のp型不純物濃度は、図6Aの例と同様、上端部から下端部に向けて、漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を含む濃度勾配を有している。漸増部20は、この例においても、第2不純物領域13の上端部から比較的急峻な増加率でピーク部21まで漸増している。ピーク部21の深さ位置は、0.6 μm 以上1 μm 以下である。

- [0105] 緩慢部22は、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.3\ \mu\text{m}$ 以下の厚さを有し、当該厚さ範囲において50%以下の濃度低下率を有している。緩慢部22のp型不純物濃度は、この例では、 $3 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 以上 $6 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲に収まっている。漸減部23のp型不純物濃度は、緩慢部22から $1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ まで漸減している。
- [0106] 図6Dを参照して、第2不純物領域13(960KeV)は、 $3.1\ \mu\text{m}$ 以上 $3.3\ \mu\text{m}$ 以下の厚さを有し、第2層9の上端(第1主面3)から下端側(第1層8側)に離間した上端部、および、第1層8内に位置する下端部を有している。つまり、第2不純物領域13は、第2層9の第2厚さT2(= $2.5\ \mu\text{m}$)よりも大きい厚さを有している。
- [0107] また、第2不純物領域13の下端部は、第1層8および第2層9の境界を横切り、第1層8内に延在した延部を有している。延部は、第1層8の上端を基準に $0.9\ \mu\text{m}$ 以上 $1.2\ \mu\text{m}$ 以下の厚さを有している。第2層9の上端および第2不純物領域13の上端部の間の距離は、 $0.3\ \mu\text{m}$ 以上 $0.6\ \mu\text{m}$ 以下である。
- [0108] 第2不純物領域13のp型不純物濃度は、図6Aの例と同様、上端部から下端部に向けて、漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を含む濃度勾配を有している。漸増部20は、この例においても、第2不純物領域13の上端部から比較的急峻な増加率でピーク部21まで漸増している。ピーク部21の深さ位置は、 $0.7\ \mu\text{m}$ 以上 $1.3\ \mu\text{m}$ 以下である。
- [0109] 緩慢部22は、 $1.3\ \mu\text{m}$ 以上 $1.7\ \mu\text{m}$ 以下の厚さを有し、当該厚さ範囲において50%以下の濃度低下率を有している。緩慢部22のp型不純物濃度は、この例では、 $2.2 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 以上 $4.5 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲に収まっている。漸減部23のp型不純物濃度は、緩慢部22から $1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ まで漸減している。
- [0110] 図6Eを参照して、第2不純物領域13(2000KeV)は、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3.8\ \mu\text{m}$ 以下の厚さを有し、第2層9の上端(第1主面3)から下端側(第1層8側)に離間した上端部、および、第1層8内に位置する下端

部を有している。つまり、第2不純物領域13は、第2層9の第2厚さT2 (=2.5 μm) よりも大きい厚さを有している。

[0111] また、第2不純物領域13の下端部は、第1層8および第2層9の境界を横切り、第1層8内に延在した延部を有している。延部は、第1層8の上端を基準に1.9 μm 以上2.2 μm 以下の厚さを有している。第2層9の上端および第2不純物領域13の上端部の間の距離は、0.7 μm 以上1 μm 以下である。

[0112] 第2不純物領域13のp型不純物濃度は、図6Aの例と同様、上端部から下端部に向けて、漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を含む濃度勾配を有している。漸増部20は、この例においても、第2不純物領域13の上端部から比較的急峻な増加率でピーク部21まで漸増している。ピーク部21の深さ位置は、1.3 μm 以上1.9 μm 以下である。

[0113] 緩慢部22は、1.5 μm 以上1.8 μm 以下の厚さを有し、当該厚さ範囲において50%以下の濃度低下率を有している。緩慢部22は、この例では、第1層8および第2層9の境界を横切り、第1層8内に位置されている。つまり、第2不純物領域13の延部は、緩慢部22の一部を含む。緩慢部22のp型不純物濃度は、この例では、 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以上 $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 以下の濃度範囲に収まっている。漸減部23のp型不純物濃度は、緩慢部22から $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ まで漸減している。

[0114] 図6A~図6Eを参照して、第2不純物領域13のp型不純物濃度は、いずれの注入エネルギーにおいても漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を有している。また、第2不純物領域13の厚さ(深さ)は、注入エネルギーの増加に伴って大きくなっている。また、第2層9の上端に対する第2不純物領域13の上端部の深さ位置は、注入エネルギーの増加に伴って大きくなっている。

[0115] 漸増部20の厚さ、ピーク部21の厚さ、緩慢部22の厚さおよび漸減部23の厚さは、いずれも注入エネルギーの増加に伴って大きくなっている。一方、第2不純物領域13のピーク値Pは、注入エネルギーの増加に伴って低下

している。これは、注入エネルギーの増加に伴って深い領域まで3価元素が導入され、当該深い領域のp型不純物濃度が増加したことに起因している。

[0116] 緩慢部22は、第2不純物領域13（厚さ）のうちの1/4以上の厚さ範囲を占め、第2層9内に位置されている。具体的には、第2不純物領域13に占める緩慢部22の割合は、1/3以上である。第2不純物領域13に占める緩慢部22の割合は、典型的には、1/2以下（1/2未満）である。第2不純物領域13に占める緩慢部22の割合は、1/2以上であってもよい。

[0117] 一方、図7を参照して、ランダム注入法の場合、第2不純物領域13は0.5 μm の範囲に漸増部20、ピーク部21（ピーク値P）および漸減部23を有する一方、0.5 μm 以上の厚さを有する緩慢部22を有することはなかった。また、ランダム注入法の場合、注入エネルギーの増加に伴って第2層9の上端に対するピーク部21（ピーク値P）の深さ位置は大きくなったが、第2不純物領域13の厚さはいずれの注入エネルギーにおいても2 μm 未満であった。つまり、注入エネルギーを増加させたとしても、厚さは大きく変動しなかった。

[0118] このことから、ランダム注入法の場合、比較的大きい第2厚さT2（たとえば1 μm 以上の第2厚さT2）を有する第2層9に対して、単一の不純物領域からなる比較的大きい厚さ（たとえば1 μm 以上5 μm 以下の厚さ）の第2不純物領域13を形成することが困難であると理解される。SiC単結晶は、Si単結晶とは異なり、不純物が拡散し難い物性を有している。したがって、前記問題は、一般的に、マルチエピタキシャル成長法や多段階ランダム注入法によって解消される。

[0119] マルチエピタキシャル成長法では、比較的小さい厚さ（たとえば1 μm 未満の厚さ）を有するエピタキシャル層に3価元素をランダム注入法によって導入する工程が複数回繰り返される。この工程の場合、エピタキシャル成長の工程数およびランダム注入法の工程数が増加するため、製造工程が煩雑化する。

- [0120] 多段階ランダム注入法では、複数の注入エネルギーで3価元素を異なる深さ位置に多段階的に導入する工程が実施される。たとえば、図7の例を取り上げると、 $1\ \mu\text{m}$ の第2層9が形成された場合、5段階（ $190\ \text{KeV}$ 、 $380\ \text{KeV}$ 、 $650\ \text{KeV}$ および $960\ \text{KeV}$ ）の注入エネルギーで3価元素が第2層9に導入される。この工程の場合、目的の深さ位置に3価元素を導入できるが、3価元素を導入できる深さ位置は浅い。そのため、エピタキシャル成長の工程数およびランダム注入法の工程数を増加せざるを得ず、マルチエピタキシャル成長法と同様の問題が生じる。
- [0121] これに対して、チャネリング注入法の場合、比較的大きい厚さ（たとえば $1\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下の厚さ）を有する第2層9に対して $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ の厚さの緩慢部22を有する第2不純物領域13が形成される。したがって、ランダム注入法を採用した場合の工数よりも少ない工数によって第2不純物領域13が形成される。
- [0122] これに対して、チャネリング注入法によれば、第2層9に導入される3価元素の不純物濃度（濃度勾配）や深さ位置が精確に制御される。したがって、目的のp型不純物濃度（濃度勾配）を有する第2不純物領域13が第2層9内に形成されることができる。
- [0123] むろん、この明細書は、複数の注入エネルギーを利用したチャネリング注入法によって異なる深さ位置に多段階的に複数の第2不純物領域13を導入し、1つの第2不純物領域13を形成する技術的思想を除外しない。この場合、各第2不純物領域13は、第2層9の中間部を横切るように第2軸チャンネルCH2に沿って第2層9にそれぞれ形成された複数の不純物領域（第2不純物領域13）の一体化領域からなる。
- [0124] この場合、各第2不純物領域13のp型不純物濃度（濃度勾配）は、複数の不純物領域（第2不純物領域13）のp型不純物濃度（濃度勾配）の加算値になる。たとえば、各第2不純物領域13のp型不純物濃度は、図6A～図6Eに示された5つのグラフのうちの少なくとも2つを重ね合わせた濃度勾配（加算した濃度勾配）を有する。

- [0125] 図6A～図6Eの例では、チャネリング注入法の注入エネルギーの上限が2000KeVであったが、第2不純物領域13は2000KeVよりも大きい注入エネルギーによって形成されることもできる。この場合、図6Eに示された濃度勾配よりも深い位置に、比較的厚い第2不純物領域13が形成される。
- [0126] ただし、2000KeVよりも大きい注入エネルギーを実現する場合、第2層9の上端部を通過する3価元素量が増加し、当該上端部側の空き領域の範囲（つまり第1主面3および第2不純物領域13の間の距離）が拡大するため、第2不純物領域13の設計難度が高まる。
- [0127] また、2000KeVよりも大きい注入エネルギーを実現する場合、イオン加速器のサイズが数十メートルに及ぶ事態にもなり得るため、費用対効果（設置個所や設備投資）の観点から現実的ではないことが想定される。したがって、チャネリング注入法によって比較的厚い第2不純物領域13を形成する場合、注入エネルギーを2000KeV以下に制限し、積層部7の積層数を増加させることが好ましい。
- [0128] 図1～図5を再度参照して、SiC半導体装置1Aは、第1層8において少なくとも活性領域10に位置する部分に形成されたn型の複数の第1反転コラム14を含む。第1反転コラム14は、「第1反転領域」等と称されてもよい。複数の第1反転コラム14は、第1層8において水平方向に間隔を空けて形成され、第1不純物領域12の導電性をp型からn型に反転させている。つまり、第1反転コラム14は、第1層8の5価元素および第1不純物領域12の3価元素を含む。
- [0129] 複数の第1反転コラム14は、第1層8内において第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ形成されている。第1延在方向De1は、第1配列方向Da1に交差または直交する方向である。つまり、複数の第1反転コラム14は第1延在方向De1に延びるストライプ状に形成されている。
- [0130] この形態では、第1配列方向Da1はa軸方向（第1方向X）であり、第

1 延在方向 D_{e1} は m 軸方向（第 2 方向 Y ）である。むしろ、第 1 配列方向 D_{a1} は m 軸方向であり、第 1 延在方向 D_{e1} は a 軸方向であってもよい。また、第 1 配列方向 D_{a1} は a 軸方向および m 軸方向以外の方向であり、第 1 延在方向 D_{e1} は a 軸方向および m 軸方向以外の方向であってもよい。

[0131] 複数の第 1 反転コラム 14 は、この形態では、活性領域 10 から外周領域 11 に引き出されている（図 3A 参照）。つまり、複数の第 1 反転コラム 14 は、第 1 層 8 のうち活性領域 10 内に位置する部分から第 1 層 8 のうち外周領域 11 内に位置する部分に引き出されている。複数の第 1 反転コラム 14 は、外周領域 11 においても第 1 配列方向 D_{a1} に間隔を空けて配列され、第 1 延在方向 D_{e1} に延びる帯状にそれぞれ形成されている。

[0132] さらに、複数の第 1 反転コラム 14 は、外周領域 11 から第 1 側面 5A および第 3 側面 5C のいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第 1 側面 5A および第 3 側面 5C のいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0133] 複数の第 1 反転コラム 14 は、断面視において第 1 層 8 内で第 1 軸チャンネル $CH1$ に沿って延びる n 型のチャネリング領域からなる。つまり、第 1 反転コラム 14 は、第 1 層 8 内において低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域（第 1 軸チャンネル $CH1$ ）に対して平行にまたはほぼ平行に導入された不純物領域からなり、第 1 主面 3 に対して傾斜して延びている。

[0134] したがって、複数の第 1 反転コラム 14 は、第 1 軸チャンネル $CH1$ のオフ方向 D_{off} およびオフ角 θ_{off} にほぼ一致したオフ方向 D_{off} およびオフ角 θ_{off} を有している。換言すると、複数の第 1 反転コラム 14 は、鉛直軸からオフ方向 D_{off} に向けてオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜している。

[0135] 複数の第 1 反転コラム 14 は、第 1 層 8 の下端側に位置された下端部、および、第 1 層 8 の上端側に位置された上端部をそれぞれ有している。この形態では、複数の第 1 反転コラム 14 の下端部は第 1 層 8 の厚さ範囲中間部に対して第 1 層 8 の下端側の領域に位置され、複数の第 1 反転コラム 14 の上端部は第 1 層 8 の厚さ範囲中間部に対して第 1 層 8 の上端側の領域に位置さ

れている。つまり、複数の第1反転コラム14は、第1軸チャンネルCH1に沿って第1層8の中間部を横切る厚さ（深さ）を有する単一の不純物領域からなる。

[0136] 複数の第1反転コラム14の下端部は、第1不純物領域12の下端を横切る延部を有していることが好ましい。第1不純物領域12の下端がベース層6内に位置されている場合、複数の第1反転コラム14の延部はベース層6内で第1不純物領域12の下端を横切り、ベース層6に接続されていることが好ましい。

[0137] 第1不純物領域12の下端が第1層8内に位置されている場合、複数の第1反転コラム14の延部は、第1層8内で第1不純物領域12の下端を横切り、少なくとも第1層8に接続されていることが好ましい。この場合、複数の第1反転コラム14の延部は、ベース層6および第1層8の境界部を横切り、ベース層6の表層部に位置されていてもよい。

[0138] 第1軸チャンネルCH1はベース軸チャンネルCHBとほぼ一致しているため、第1反転コラム14の延部はベース層6内においてベース軸チャンネルCHBに沿って形成される。むろん、複数の第1反転コラム14の延部は、第1層8の下端から第1層8の上端側に間隔を空けて形成されていてもよい。

[0139] 第1不純物領域12の下端を基準とする第1反転コラム14の延部の厚さは、 $0\mu\text{m}$ を超えて $2\mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1反転コラム14の延部の厚さは、 $0\mu\text{m}$ を超えて $0.5\mu\text{m}$ 以下、 $0.5\mu\text{m}$ 以上 $1\mu\text{m}$ 以下、 $1\mu\text{m}$ 以上 $1.5\mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\mu\text{m}$ 以上 $2\mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0140] 第1反転コラム14の上端部は、第1層8の上端（つまり第2層9）から下端側に間隔を空けて形成され、第1層8の一部（上端部）を挟んで第1層8の上端に対向していてもよい。第1反転コラム14の上端部は、第1層8の上端とほぼ一致し、第2層9に接続されていてもよい。

[0141] 第1層8の上端および第1反転コラム14の上端部の間の距離は、 $0\mu\text{m}$ 以上 $1\mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1層8の上端および第1反転コラム14

の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0142] 複数の第1反転コラム14は、 $1\times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 以上 $1\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。第1反転コラム14のn型不純物濃度は、少なくとも1種の5価元素によって調整されていることが好ましい。たとえば、第1反転コラム14のn型不純物濃度は、窒素、リン、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種によって調節されていてもよい。

[0143] 第1反転コラム14は、窒素およびリン以外の5価元素を含むことが好ましい。第1反転コラム14のn型不純物濃度は、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種によって調整されていることが好ましい。入手容易性を鑑みると、第1反転コラム14のn型不純物濃度は、ヒ素またはアンチモンによって調節されていることが好ましい。

[0144] 複数の第1反転コラム14は、第1幅W1をそれぞれ有している。第1幅W1は、第1反転コラム14の第1配列方向Da1に沿う幅である。第1幅W1は、第1層8の第1厚さT1未満であることが好ましい。むしろ、第1幅W1は、第1厚さT1以上であってもよい。第1幅W1は、第2層9の第2厚さT2未満であることが好ましい。むしろ、第1幅W1は、第2厚さT2以上であってもよい。

[0145] 第1幅W1は、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1幅W1は、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下、 $2\ \mu\text{m}$ 以上 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3\ \mu\text{m}$ 以下、 $3\ \mu\text{m}$ 以上 $3.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $4\ \mu\text{m}$ 以下、 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。第1幅W1は、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

- [0146] 複数の第1反転コラム14は、第1領域厚さ $TR1$ （第1領域深さ）をそれぞれ有している。第1領域厚さ $TR1$ は、第1層8の第1厚さ $T1$ 未満であってもよい。第1領域厚さ $TR1$ は、第1厚さ $T1$ よりも大きいてもよい。第1領域厚さ $TR1$ は、第1厚さ $T1$ とほぼ等しくてもよい。第1領域厚さ $TR1$ は、第2層9の第2厚さ $T2$ 未満であってもよい。第1領域厚さ $TR1$ は、第2厚さ $T2$ よりも大きいてもよい。第1領域厚さ $TR1$ は、第2厚さ $T2$ とほぼ等しくてもよい。
- [0147] 第1領域厚さ $TR1$ は、 $1\mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。第1領域厚さ $TR1$ は、 $5\mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。第1領域厚さ $TR1$ は、 $1\mu\text{m}$ 以上 $1.5\mu\text{m}$ 以下、 $1.5\mu\text{m}$ 以上 $2\mu\text{m}$ 以下、 $2\mu\text{m}$ 以上 $2.5\mu\text{m}$ 以下、 $2.5\mu\text{m}$ 以上 $3\mu\text{m}$ 以下、 $3\mu\text{m}$ 以上 $3.5\mu\text{m}$ 以下、 $3.5\mu\text{m}$ 以上 $4\mu\text{m}$ 以下、 $4\mu\text{m}$ 以上 $4.5\mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\mu\text{m}$ 以上 $5\mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0148] 第1幅 $W1$ が第1層8の第1厚さ $T1$ 未満であり、第1領域厚さ $TR1$ が第1幅 $W1$ よりも大きいことが好ましい。つまり、複数の第1反転コラム14は、第1軸チャンネル $CH1$ に沿って縦長柱状に延びる第1アスペクト比 $TR1/W1$ をそれぞれ有していることが好ましい。第1アスペクト比 $TR1/W1$ は、第1幅 $W1$ に対する第1領域厚さ $TR1$ の比である。この場合、第1領域厚さ $TR1$ は、第1厚さ $T1$ よりも大きいことが特に好ましい。たとえば、第1アスペクト比 $TR1/W1$ は、1を超えて100以下であってもよい。
- [0149] 複数の第1反転コラム14は、第1配列方向 $Da1$ に第1ピッチ $P1$ の間隔を空けて形成されている。第1ピッチ $P1$ は、第1層8の第1厚さ $T1$ 未満であることが好ましい。むろん、第1ピッチ $P1$ は、第1厚さ $T1$ 以上であってもよい。第1ピッチ $P1$ は、第2層9の第2厚さ $T2$ 未満であることが好ましい。むろん、第1ピッチ $P1$ は、第2厚さ $T2$ 以上であってもよい。
- [0150] 第1ピッチ $P1$ は、 $0.1\mu\text{m}$ 以上 $5\mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1ピッチ

チP1は、0.1 μm 以上0.25 μm 以下、0.25 μm 以上0.5 μm 以下、0.5 μm 以上0.75 μm 以下、0.75 μm 以上1 μm 以下、1 μm 以上1.5 μm 以下、1.5 μm 以上2 μm 以下、2 μm 以上2.5 μm 以下、2.5 μm 以上3 μm 以下、3 μm 以上3.5 μm 以下、3.5 μm 以上4 μm 以下、4 μm 以上4.5 μm 以下、および、4.5 μm 以上5 μm 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。第1ピッチP1は、0.5 μm 以上1.5 μm 以下であることが好ましい。

[0151] 具体的な図示は省略されるが、複数の第1反転コラム14は、5価元素によって構成されている点において第2不純物領域13（第1不純物領域12）とは異なるが、複数の第1反転コラム14は、第2不純物領域13（第1不純物領域12）と同様、上端部から下端部に向けて漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を有している（図6A～図6Eも併せて参照）。

[0152] 第1反転コラム14の濃度勾配についての説明は、前述の第2不純物領域13（第1不純物領域12）の濃度勾配についての説明（図6A～図6Eも併せて参照）において「第2不純物領域13」を「第1反転コラム14」に置き換え、「p型（3価元素）」を「n型（5価元素）」に置き換えることによって得られる。

[0153] 第1反転コラム14の場合、3価元素に代えて5価元素が第1層8に導入されるため、第1不純物領域12のプロセス条件と同じプロセス条件が課されたとしても、第1反転コラム14の濃度プロファイルや厚さ（深さ）は第1不純物領域12の濃度プロファイルや厚さ（深さ）とは異なる点に留意される必要がある。したがって、適切なチャージバランスを達成すべく、第1不純物領域12のプロセス条件および第1反転コラム14のプロセス条件は、別々に設定されることが好ましい。

[0154] SiC半導体装置1Aは、第1層8内に形成されたp型の複数の第1非反転コラム15を含む。第1非反転コラム15は、「第1非反転領域」等と称されてもよい。複数の第1非反転コラム15は、第1不純物領域12のうち

の複数の第1反転コラム14によって区画された領域からそれぞれなる。

[0155] つまり、複数の第1非反転コラム15は、断面視において第1層8内で第1軸チャンネルCH1に沿って延びるp型のチャネリング領域からなり、第1層8において水平方向に間隔を空けて区画されている。具体的には、複数の第1非反転コラム15は、第1層8内において第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ区画されている。

[0156] 複数の第1非反転コラム15は、この形態では、活性領域10から外周領域11に引き出されている（図3A参照）。つまり、複数の第1非反転コラム15は、第1層8のうち活性領域10内に位置する部分から第1層8のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。複数の第1非反転コラム15は、外周領域11においても第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ区画されている。

[0157] さらに、複数の第1非反転コラム15は、外周領域11から第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0158] 複数の第1非反転コラム15は、複数の第1反転コラム14と共にチャージバランスを有する複数の第1pn接合部を形成している。つまり、複数の第1非反転コラム15は、複数の第1反転コラム14と第1スーパージャンクション構造SJ1を構成している。

[0159] チャージバランスを有する状態は、互いに隣り合う複数の第1反転コラム14に関して、一方の第1pn接合部から拡がる空乏層および他方の第1pn接合部から拡がる空乏層が、複数の第1非反転コラム15内で接続される状態を意味する。つまり、この形態では、濃度調節されたp型の複数の第1非反転コラム15（第1不純物領域12）が、濃度調節されたn型の複数の第1反転コラム14とチャージバランスを形成している。その他、第1不純物領域12の説明は、複数の第1非反転コラム15領域の説明に適用される

。

[0160] SiC半導体装置1Aは、第2層9において少なくとも活性領域10に位置する部分に形成されたn型の複数の第2反転コラム16を含む。第2反転コラム16は、「第2反転領域」等と称されてもよい。複数の第2反転コラム16は、第2層9において水平方向に間隔を空けて形成され、第2不純物領域13の導電性をp型からn型に反転させている。つまり、第2反転コラム16は、第2層9の5価元素および第2不純物領域13の3価元素を含む

。

[0161] 複数の第2反転コラム16は、この形態では、積層方向に複数の第1反転コラム14に重なるように第2層9内に形成されている。具体的には、複数の第2反転コラム16は、第2層9内において第1配列方向Da1とは異なる第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1とは異なる第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。

[0162] 第2延在方向De2は、第2配列方向Da2に交差または直交する方向である。つまり、複数の第2反転コラム16は第2延在方向De2に延びるストライプ状に形成されている。この形態では、第2配列方向Da2はm軸方向（第2方向Y）であり、第2延在方向De2はa軸方向（第1方向X）である。

[0163] むろん、第1配列方向Da1がm軸方向であり、第1延在方向De1がa軸方向である場合、第2配列方向Da2はa軸方向であり、第2延在方向De2はm軸方向であってもよい。第1配列方向Da1がa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第1延在方向De1がa軸方向およびm軸方向以外の方向である場合、第2配列方向Da2はa軸方向およびm軸方向の一方であり、第2延在方向De2はa軸方向およびm軸方向の他方であってもよい

。

[0164] 第1配列方向Da1がa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第1延在方向De1がa軸方向およびm軸方向以外の方向である場合、第2配列方向Da2はa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第2延在方向De2

は a 軸方向および m 軸方向以外の方向であってもよい。

- [0165] 複数の第 2 反転コラム 1 6 は、平面視において複数の第 1 反転コラム 1 4 および複数の第 1 非反転コラム 1 5 に交差している。これにより、複数の第 2 反転コラム 1 6 は、積層部 7 内において複数の第 1 反転コラム 1 4 と共に p 型の立体格子状の反転コラムを形成している。
- [0166] 複数の第 2 反転コラム 1 6 は、この形態では、活性領域 1 0 から外周領域 1 1 に引き出されている（図 3 B 参照）。つまり、複数の第 2 反転コラム 1 6 は、第 2 層 9 のうち活性領域 1 0 内に位置する部分から第 2 層 9 のうち外周領域 1 1 内に位置する部分に引き出されている。
- [0167] 複数の第 2 反転コラム 1 6 は、外周領域 1 1 においても第 2 配列方向 $D a_2$ に間隔を空けて配列され、第 2 延在方向 $D e_2$ に延びる帯状にそれぞれ形成されている。つまり、複数の第 2 反転コラム 1 6 は、外周領域 1 1 においても複数の第 1 反転コラム 1 4 および複数の第 1 非反転コラム 1 5 に交差している。
- [0168] さらに、複数の第 2 反転コラム 1 6 は、外周領域 1 1 から第 2 側面 5 B および第 4 側面 5 D のいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第 2 側面 5 B および第 4 側面 5 D のいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。
- [0169] 複数の第 2 反転コラム 1 6 は、断面視において第 2 層 9 内で第 2 軸チャンネル $C H_2$ に沿って延びる n 型のチャネリング領域からなる。つまり、第 2 反転コラム 1 6 は、第 2 層 9 内において低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域（第 2 軸チャンネル $C H_2$ ）に対して平行にまたはほぼ平行に導入された不純物領域からなり、第 1 主面 3 に対して傾斜して延びている。
- [0170] したがって、複数の第 2 反転コラム 1 6 は、第 2 軸チャンネル $C H_2$ のオフ方向 $D o f f$ およびオフ角 $\theta o f f$ にほぼ一致したオフ方向 $D o f f$ およびオフ角 $\theta o f f$ を有している。換言すると、複数の第 2 反転コラム 1 6 は、鉛直軸からオフ方向 $D o f f$ に向けてオフ角 $\theta o f f$ 分だけ傾斜している。
- [0171] 複数の第 2 反転コラム 1 6 は、第 2 層 9 の下端側に位置された下端部、お

よび、第2層9の上端側に位置された上端部をそれぞれ有している。この形態では、複数の第2反転コラム16の下端部は第2層9の厚さ範囲中間部に対して第2層9の下端側の領域に位置され、複数の第2反転コラム16の上端部は第2層9の厚さ範囲中間部に対して第2層9の上端側の領域に位置されている。つまり、複数の第2反転コラム16は、第2軸チャンネルCH2に沿って第2層9の中間部を横切る厚さ（深さ）を有する単一の不純物領域からなる。

[0172] 複数の第2反転コラム16の下端部は、第2不純物領域13の下端を横切る延部を有していることが好ましい。第2不純物領域13の下端が第1層8内に位置されている場合、複数の第2反転コラム16の延部は、第1層8内で第2不純物領域13の下端を横切り、第1層8に接続されていることが好ましい。

[0173] この場合、複数の第2反転コラム16の延部は、第1層8内において複数の第1反転コラム14に接続されていることが好ましい。つまり、複数の第2反転コラム16は、複数の第1反転コラム14と共に厚さ方向に連続的に延びる1つの立体格子状の反転コラムを形成していることが好ましい。第2軸チャンネルCH2は第1軸チャンネルCH1とほぼ一致しているため、第2反転コラム16の延部は第1層8内において第1軸チャンネルCH1に沿って形成される。

[0174] 第2不純物領域13の下端が第2層9内に位置されている場合、複数の第2反転コラム16の延部は、第2層9内で第2不純物領域13の下端を横切り、少なくとも第2層9を介して複数の第1反転コラム14に電氣的に接続されていることが好ましい。

[0175] この場合、複数の第2反転コラム16の延部は、第1層8および第2層9の境界部を横切り、第1層8内において複数の第1反転コラム14に接続されていることが好ましい。むろん、複数の第2反転コラム16の延部は、第2層9の下端から第2層9の上端側に間隔を空けて形成されていてもよい。

[0176] 第2不純物領域13の下端を基準とする第2反転コラム16の延部の厚さ

は、 $0\ \mu\text{m}$ を超えて $2\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第2反転コラム16の延部の厚さは、 $0\ \mu\text{m}$ を超えて $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0177] 第2反転コラム16の上端部は、第2層9の上端（つまり第1主面3）から下端側に間隔を空けて形成され、第2層9の一部（上端部）を挟んで第2層9の上端に対向していてもよい。この場合、第2層9における第1主面3および第2反転コラム16の上端部の間のスペースは、デバイス構造（他の不純物領域等）を形成するための領域として使用されてもよい。むしろ、第2反転コラム16の上端部は、第2層9の上端（つまり第1主面3）から露出していてもよい。

[0178] 第2層9の上端および第2反転コラム16の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第2層9の上端および第2反転コラム16の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0179] 複数の第2反転コラム16は、 $1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。第2反転コラム16のn型不純物濃度（ピーク値）は、第1反転コラム14のn型不純物濃度（ピーク値）以上であってもよい。第2反転コラム16のn型不純物濃度（ピーク値）は、第1反転コラム14のn型不純物濃度（ピーク値）未満であってもよい。第2反転コラム16のn型不純物濃度（ピーク値）は、第1反転コラム14のn型不純物濃度（ピーク値）とほぼ等しくてもよい。

[0180] 第2反転コラム16のn型不純物濃度は、少なくとも1種の5価元素によって調整されていることが好ましい。たとえば、第2反転コラム16のn型不純物濃度は、窒素、リン、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種によって調節されていてもよい。

[0181] 第2反転コラム16は、窒素およびリン以外の5価元素を含むことが好ま

しい。第2反転コラム16のn型不純物濃度は、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種によって調整されていることが好ましい。入手容易性を鑑みると、第2反転コラム16のn型不純物濃度は、ヒ素またはアンチモンによって調節されていることが好ましい。

[0182] 複数の第2反転コラム16は、第2幅W2をそれぞれ有している。第2幅W2は、第2反転コラム16の第2配列方向Da2に沿う幅である。第2幅W2は、第2層9の第2厚さT2未満であることが好ましい。むしろ、第2幅W2は、第2厚さT2以上であってもよい。

[0183] 第2幅W2は、第1層8の第1厚さT1未満であることが好ましい。むしろ、第2幅W2は、第1厚さT1以上であってもよい。第2幅W2は、第1反転コラム14の第1幅W1とほぼ等しいことが好ましい。むしろ、第2幅W2は、第1幅W1以上であってもよいし、第1幅W1未満であってもよい。

[0184] 第2幅W2は、0.1 μm以上5 μm以下であってもよい。第2幅W2は、0.1 μm以上0.25 μm以下、0.25 μm以上0.5 μm以下、0.5 μm以上0.75 μm以下、0.75 μm以上1 μm以下、1 μm以上1.5 μm以下、1.5 μm以上2 μm以下、2 μm以上2.5 μm以下、2.5 μm以上3 μm以下、3 μm以上3.5 μm以下、3.5 μm以上4 μm以下、4 μm以上4.5 μm以下、および、4.5 μm以上5 μm以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。第2幅W2は、0.5 μm以上1.5 μm以下であることが好ましい。

[0185] 複数の第2反転コラム16は、第2領域厚さTR2（領域深さ）をそれぞれ有している。第2領域厚さTR2は、第2層9の第2厚さT2未満であってもよい。第2領域厚さTR2は、第2厚さT2よりも大きいてもよい。第2領域厚さTR2は、第2厚さT2とほぼ等しくてもよい。

[0186] 第2領域厚さTR2は、第1層8の第1厚さT1未満であってもよい。第2領域厚さTR2は、第1厚さT1よりも大きいてもよい。第2領域厚さTR2は、第1厚さT1とほぼ等しくてもよい。第2領域厚さTR2は、第1

反転コラム14の第1領域厚さTR1未満であってもよい。第2領域厚さTR2は、第1領域厚さTR1よりも大きいてもよい。第2領域厚さTR2は、第1領域厚さTR1とほぼ等しくてもよい。

[0187] 第2領域厚さTR2は、1 μ m以上であることが好ましい。第2領域厚さTR2は、5 μ m以下であることが好ましい。第2領域厚さTR2は、1 μ m以上1.5 μ m以下、1.5 μ m以上2 μ m以下、2 μ m以上2.5 μ m以下、2.5 μ m以上3 μ m以下、3 μ m以上3.5 μ m以下、3.5 μ m以上4 μ m以下、4 μ m以上4.5 μ m以下、および、4.5 μ m以上5 μ m以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0188] 第2幅W2が第2層9の第2厚さT2未満であり、第2領域厚さTR2が第2幅W2よりも大きいことが好ましい。つまり、複数の第2反転コラム16は、第2軸チャンネルCH2に沿って縦長柱状に延びる第2アスペクト比TR2/W2をそれぞれ有していることが好ましい。第2アスペクト比TR2/W2は、第2幅W2に対する第2領域厚さTR2の比である。この場合、第2領域厚さTR2は、第2厚さT2よりも大きいことが特に好ましい。たとえば、第2アスペクト比TR2/W2は、1を超えて100以下であってもよい。

[0189] 複数の第2反転コラム16は、第2配列方向Da2に第2ピッチP2の間隔を空けて形成されている。第2ピッチP2は、第2層9の第2厚さT2未満であることが好ましい。むしろ、第2ピッチP2は、第2層9の第2厚さT2以上であってもよい。第2ピッチP2は、第1層8の第1厚さT1未満であることが好ましい。むしろ、第2ピッチP2は、第1厚さT1以上であってもよい。

[0190] 第2ピッチP2は、第1ピッチP1とほぼ等しくてもよいし、第1ピッチP1とは異なってもよい。第2ピッチP2は、第1ピッチP1よりも大きいてもよいし、第1ピッチP1よりも小さくてもよい。

[0191] 第2ピッチP2は、0.1 μ m以上5 μ m以下であってもよい。第2ピッチP2は、0.1 μ m以上0.25 μ m以下、0.25 μ m以上0.5 μ m

以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下、 $2\ \mu\text{m}$ 以上 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3\ \mu\text{m}$ 以下、 $3\ \mu\text{m}$ 以上 $3.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $4\ \mu\text{m}$ 以下、 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。第2ピッチP2は、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

[0192] 具体的な図示は省略されるが、複数の第2反転コラム16は5価元素によって構成されている点において第2不純物領域13（第1不純物領域12）とは異なるが、複数の第2反転コラム16は、第2不純物領域13（第1不純物領域12）と同様、上端部から下端部に向けて漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を有している（図6A～図6Eも併せて参照）。

[0193] 第2反転コラム16の濃度勾配についての説明は、前述の第2不純物領域13（第1不純物領域12）の濃度勾配についての説明において「第2不純物領域13」を「第1反転コラム14」に置き換え、「p型（3価元素）」を「n型（5価元素）」に置き換えることによって得られる。

[0194] 第2反転コラム16の場合、3価元素に代えて5価元素が第2層9に導入されるため、第2不純物領域13のプロセス条件と同じプロセス条件が課されたとしても、第2反転コラム16の濃度プロファイルや厚さ（深さ）は第2不純物領域13の濃度プロファイルや厚さ（深さ）とは異なる点に留意される必要がある。したがって、適切なチャージバランスを達成すべく、第2不純物領域13のプロセス条件および第2反転コラム16のプロセス条件は、別々に設定されることが好ましい。

[0195] SiC半導体装置1Aは、第2層9内に形成されたp型の複数の第2非反転コラム17を含む。第2非反転コラム17は、「第2非反転領域」等と称されてもよい。複数の第2非反転コラム17は、第2不純物領域13のうちの複数の第2反転コラム16によって区画された領域からそれぞれなる。

[0196] つまり、複数の第2非反転コラム17は、断面視において第2層9内で第

2軸チャンネルCH2に沿って延びるp型のチャネリング領域からなり、第2層9において水平方向に間隔を空けて区画されている。具体的には、複数の第2非反転コラム17は、第2層9内において第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ区画されている。

[0197] 複数の第2非反転コラム17は、積層方向に複数の第1非反転コラム15に重なっている。具体的には、複数の第2非反転コラム17は、平面視において複数の第1反転コラム14および複数の第1非反転コラム15に交差している。複数の第2非反転コラム17は、積層部7内において複数の第1非反転コラム15と共にp型の立体格子状の非反転コラムを形成している。

[0198] 複数の第2非反転コラム17は、この形態では、活性領域10から外周領域11に引き出されている（図3B参照）。つまり、複数の第2非反転コラム17は、第2層9のうち活性領域10内に位置する部分から第1層8のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。複数の第2非反転コラム17は、外周領域11においても第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。

[0199] さらに、複数の第2非反転コラム17は、外周領域11から第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0200] 複数の第2非反転コラム17は、複数の第2反転コラム16と共にチャージバランスを有する複数の第2pn接合部を形成している。つまり、複数の第2非反転コラム17は、複数の第2反転コラム16と第2スーパージャンクション構造SJ2を構成している。

[0201] チャージバランスを有する状態は、互いに隣り合う複数の第2反転コラム16に関して、一方の第2pn接合部から拡がる空乏層、および、他方の第2pn接合部から拡がる空乏層が、複数の第2非反転コラム17内で接続される状態を意味する。つまり、この形態では、濃度調節されたp型の複数の

第2非反転コラム17（第2不純物領域13）が、濃度調節されたn型の複数の第2反転コラム16とチャージバランスを形成している。

[0202] 複数の第2非反転コラム17（第2不純物領域13）の下端部が複数の第1非反転コラム15（第1不純物領域12）に接続されることにより、これらの接続部に形成されるp型の濃度勾配が緩和される。したがって、チャージバランスの精度が向上される。同様に、第2反転コラム16の下端部が第1反転コラム14に接続されることにより、これらの接続部に形成されるn型の濃度勾配が緩和される。したがって、チャージバランスの精度が向上される。その他、第2不純物領域13の説明は、複数の第2非反転コラム17領域の説明に適用される。

[0203] この形態では、2層構造を有する積層部7が示された。しかし、3層以上の積層構造を有する積層部7が採用されてもよい。この場合、奇数（ $2n+1$ ：nは1以上自然数）層の構成は第1層8と同様の構成を有し、偶数（ $2n+2$ ）層の構成は第2層9と同様の構成を有する。

[0204] 以下、図5、図8Aおよび図8Bを参照して、第1反転コラム14および第2反転コラム16のレイアウト例が説明される。図8Aは、第1反転コラム14および第2反転コラム16の第1レイアウト例を示す平面図である。図8Bは、第1反転コラム14および第2反転コラム16の第2レイアウト例を示す平面図である。図8Aおよび図8Bでは、第1反転コラム14が破線によって示され、第2反転コラム16がハッチングによって示されている。

[0205] 図5、図8Aおよび図8Bを参照して、第1反転コラム14の第1配列方向Da1はa軸方向（第1方向X）であり、第1反転コラム14の第1延在方向De1はm軸方向（第2方向Y）であってもよい。この場合、第1延在方向De1が第1層8のオフ方向Doffに交差（具体的には直交）するため、複数の第1反転コラム14はSiC単結晶のm面（ $(1-100)$ 面）から見た断面視において鉛直軸からオフ方向Doffに向けてほぼオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜する。SiC単結晶のm面は、m軸方向に直交する結晶面

である。

[0206] 一方、図5および図8Aを参照して、複数の第2反転コラム16は、平面視において複数の第1反転コラム14に直交していてもよい。つまり、第2反転コラム16の第2配列方向 $D a 2$ は m 軸方向（第2方向 Y ）であり、第2反転コラム16の第2延在方向 $D e 2$ は a 軸方向（第1方向 X ）であってもよい。この場合、第2配列方向 $D a 2$ は、第1延在方向 $D e 1$ に一致し、第1配列方向 $D a 1$ に直交する。また、第2延在方向 $D e 2$ は、第1配列方向 $D a 1$ に一致し、第1延在方向 $D e 1$ に直交する。

[0207] この場合、第2延在方向 $D e 2$ が第2層9のオフ方向 $D o f f$ に一致するため、複数の第2反転コラム16はSiC単結晶の a 面（ $(11-20)$ 面）から見た断面視においてほぼ鉛直方向 Z に延びている。SiC単結晶の a 面は、 a 軸方向に直交する方向である。複数の第2反転コラム16は、SiC単結晶の m 面から見た断面視において鉛直軸からオフ方向 $D o f f$ に向けてほぼオフ角 $\theta o f f$ 分だけ傾斜している。

[0208] むろん、図8Bを参照して、複数の第2反転コラム16は、平面視において複数の第1反転コラム14に非直交に交差していてもよい。つまり、第2反転コラム16の第2配列方向 $D a 2$ は m 軸方向および a 軸方向以外の方向であり、第2反転コラム16の第2延在方向 $D e 2$ は m 軸方向および a 軸方向以外の方向であってもよい。この場合、第2配列方向 $D a 2$ は第1配列方向 $D a 1$ および第1延在方向 $D e 1$ の双方に交差し、第2延在方向 $D e 2$ は第1配列方向 $D a 1$ および第1延在方向 $D e 1$ の双方に交差する。また、第2延在方向 $D e 2$ は、第2層9のオフ方向 $D o f f$ に交差する。

[0209] 第2延在方向 $D e 2$ は、平面視において a 軸から m 軸の一方側（紙面左側）または他方側（紙面右側）に向けて傾斜していてもよい。複数の第2反転コラム16は、 a 軸を基準（ 0° ）としたとき、 a 軸と延在角 θa を形成する第2延在方向 $D e 2$ を有している。

[0210] 延在角 θa の絶対値は、 0° を超えて 90° 未満であってもよい。延在角 θa は、 0° を超えて 18° 以下、 18° 以上 36° 以下、 36° 以上 54°

° 以下、 54° 以上 72° 以下、および、 72° 以上 90° 未満のうちいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。延在角 θ_a の絶対値は、典型的には、 $30^\circ \pm 5^\circ$ 、 $45^\circ \pm 5^\circ$ 、および、 $60^\circ \pm 5^\circ$ のうちいずれか1つの範囲に属する値に設定される。

[0211] 第1反転コラム14および第2反転コラム16は、図9、図10Aおよび図10Bに示される形態を有していてもよい。図9は、第1反転コラム14および第2反転コラム16の第2基本形態を示す断面斜視図である。図10Aは、第2基本形態に係る第1反転コラム14および第2反転コラム16の第1レイアウト例を示す平面図である。図10Bは、第2基本形態に係る第1反転コラム14および第2反転コラム16の第2レイアウト例を示す平面図である。図10Aおよび図10Bでは、第1反転コラム14が破線によって示され、第2反転コラム16がハッチングによって示されている。

[0212] 図9、図10Aおよび図10Bを参照して、第1反転コラム14の第1配列方向 D_{a1} はa軸方向（第1方向X）であり、第1反転コラム14の第1延在方向 D_{e1} はm軸方向（第2方向Y）であってもよい。この場合、第1延在方向 D_{e1} が第1層8のオフ方向 D_{off} に一致するため、複数の第1反転コラム14はSiC単結晶のa面から見た断面視においてほぼ鉛直方向Zに延びている。複数の第1反転コラム14は、SiC単結晶のm面から見た断面視において鉛直軸からオフ方向 D_{off} に向けてほぼオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜した端部を有している。

[0213] 一方、図9および図10Aを参照して、複数の第2反転コラム16は、平面視において複数の第1反転コラム14に直交していてもよい。つまり、第2反転コラム16の第2配列方向 D_{a2} はa軸方向であり、第2反転コラム16の第2延在方向 D_{e2} はm軸方向であってもよい。この場合、第2配列方向 D_{a2} は、第1延在方向 D_{e1} に一致し、第1配列方向 D_{a1} に直交する。また、第2延在方向 D_{e2} は、第1配列方向 D_{a1} に一致し、第1延在方向 D_{e1} に直交する。

[0214] この場合、第2延在方向 D_{e2} が第2層9のオフ方向 D_{off} に交差（具

体的には直交) するため、複数の第2反転コラム16はSiC単結晶のm面から見た断面視において鉛直軸からオフ方向Doffに向けてほぼオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜する。

[0215] むろん、図10Bを参照して、複数の第2反転コラム16は、平面視において複数の第1反転コラム14に非直交に交差していてもよい。つまり、第2反転コラム16の第2配列方向Da2はa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第2反転コラム16の第2延在方向De2はa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。この場合、第2配列方向Da2は第1配列方向Da1および第1延在方向De1の双方に交差し、第2延在方向De2は第1配列方向Da1および第1延在方向De1の双方に交差する。また、第2延在方向De2は、第2層9のオフ方向Doffに交差する。

[0216] 第2延在方向De2は、平面視においてa軸からm軸の一方側(紙面左側)または他方側(紙面右側)に向けて傾斜していてもよい。複数の第2反転コラム16は、a軸を基準(0°)としたとき、a軸と延在角 θ_a を形成する第2延在方向De2を有している。

[0217] 延在角 θ_a の絶対値は、 0° を超えて 90° 未満であってもよい。延在角 θ_a は、 0° を超えて 18° 以下、 18° 以上 36° 以下、 36° 以上 54° 以下、 54° 以上 72° 以下、および、 72° 以上 90° 未満のうちいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。延在角 θ_a の絶対値は、典型的には、 $30^\circ \pm 5^\circ$ 、 $45^\circ \pm 5^\circ$ 、および、 $60^\circ \pm 5^\circ$ のうちいずれか1つの範囲に属する値に設定される。

[0218] 第1反転コラム14および第2反転コラム16は、図11、図12A、図12Bおよび図12Cに示される形態を有していてもよい。図11は、第1反転コラム14および第2反転コラム16の第3基本形態を示す断面斜視図である。図12A~図12Cは、第3基本形態に係る第1反転コラム14および第2反転コラム16の第1~第3レイアウト例を示す平面図である。図12A~図12Cでは、第1反転コラム14が破線によって示され、第2反転コラム16がハッチングによって示されている。

- [0219] 図11、図12A～図12Cを参照して、第1反転コラム14の第1配列方向Da1はa軸方向（第1方向X）およびm軸方向（第2方向Y）以外の方向であり、第1反転コラム14の第1延在方向De1はa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。つまり、複数の第1反転コラム14は、a軸方向およびm軸方向の双方に交差していてもよい。図12A～図12Cでは、第1反転コラム14がa軸を基準にm軸の一方側（紙面左側）に向けて傾斜した例が示されている。
- [0220] この場合、第1延在方向De1がオフ方向Doffに交差するため、複数の第1反転コラム14はSiC単結晶のa面から見た断面視およびSiC単結晶のm面から見た断面視において鉛直軸からオフ方向Doffに向けてほぼオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜する。
- [0221] 第1延在方向De1は、a軸を基準（ 0° ）としたとき、a軸と第1延在角 θ_1 を形成する。第1延在角 θ_1 の絶対値は、 0° を超えて 90° 未満であってもよい。第1延在角 θ_1 は、 0° を超えて 18° 以下、 18° 以上 36° 以下、 36° 以上 54° 以下、 54° 以上 72° 以下、および、 72° 以上 90° 未満のうちのいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0222] 第1延在角 θ_1 の絶対値は、典型的には、 $30^\circ \pm 5^\circ$ 、 $45^\circ \pm 5^\circ$ 、および、 $60^\circ \pm 5^\circ$ のうちのいずれか1つの範囲に属する値に設定される。図12Aでは第1延在角 θ_1 の絶対値がほぼ 45° であるレイアウト例が示され、図12Bでは第1延在角 θ_1 の絶対値がほぼ 30° であるレイアウト例が示され、図12Cでは第1延在角 θ_1 の絶対値がほぼ 60° であるレイアウト例が示されている。
- [0223] 一方、図11、図12A～図12Cを参照して、第2反転コラム16の第1配列方向Da1はa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第2反転コラム16の第1延在方向De1はa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。つまり、複数の第2反転コラム16は、a軸方向およびm軸方向の双方に交差していてもよい。第2反転コラム16は、この例では、a軸を

基準にm軸の他方側（紙面右側）に向けて傾斜している。

- [0224] この場合、第2延在方向D e 2がオフ方向D o f fに交差するため、複数の第2反転コラム16はSiC単結晶のa面から見た断面視およびm面から見た断面視において鉛直軸からオフ方向D o f fに向けてほぼオフ角 θ o f f分だけ傾斜する。
- [0225] 第2延在方向D e 2は、a軸を基準（0°）としたとき、a軸と第2延在角 θ 2を形成する。第1延在角 θ 1が「正值」であると定義された場合、第2延在角 θ 2は「負値」である。一方、第1延在角 θ 1が「負値」であると定義された場合、第2延在角 θ 2は「正值」である。
- [0226] 第2延在角 θ 2の絶対値は、0°を超えて90°未満であってもよい。第2延在角 θ 2は、0°を超えて18°以下、18°以上36°以下、36°以上54°以下、54°以上72°以下、および、72°以上90°未満のうちいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0227] 第2延在角 θ 2の絶対値は、典型的には、30°±5°、45°±5°、および、60°±5°のうちいずれか1つの範囲に属する値に設定される。第2延在角 θ 2の絶対値は、第1延在角 θ 1の絶対値とほぼ等しいことが好ましい。
- [0228] つまり、複数の第2反転コラム16は、単位面積当たりの平面視（つまり部分的な平面視）においてa軸を基準に複数の第1反転コラム14とほぼ線対称となるレイアウトを有していることが好ましい。換言すると、複数の第2反転コラム16は、単位面積当たりの平面視（つまり部分的な平面視）において鉛直軸を基準に複数の第1反転コラム14とほぼ点対象となるレイアウトを有していることが好ましい。
- [0229] 図12Aでは第2延在角 θ 2の絶対値がほぼ45°（ $\cong \theta$ 1）であるレイアウト例が示され、図12Bでは第2延在角 θ 2の絶対値がほぼ30°（ $\cong \theta$ 1）であるレイアウト例が示され、図12Cでは第2延在角 θ 2の絶対値がほぼ60°（ $\cong \theta$ 1）であるレイアウト例が示されている。
- [0230] つまり、図12Aのレイアウト例では、複数の第2反転コラム16は、a

軸方向およびm軸方向の双方に交差する方向に延び、かつ、複数の第1反転コラム14に直交している。第1延在角 θ_1 の絶対値および第2延在角 θ_2 の絶対値の和は、ほぼ直角（ほぼ 90° ）である。

[0231] 一方、図12Bのレイアウト例では、複数の第2反転コラム16は、a軸方向およびm軸方向の双方に交差する方向に延び、かつ、複数の第1反転コラム14に非直交に交差している。第1延在角 θ_1 の絶対値および第2延在角 θ_2 の絶対値の和は鋭角（ほぼ 60° ）である。

[0232] 他方、図12Cのレイアウト例では、複数の第2反転コラム16は、a軸方向およびm軸方向の双方に交差する方向に延び、かつ、複数の第1反転コラム14に非直交に交差している。第1延在角 θ_1 の絶対値および第2延在角 θ_2 の絶対値の和は鈍角（ほぼ 120° ）である。

[0233] むろん、第2延在角 θ_2 の絶対値は、第1延在角 θ_1 の絶対値よりも大きくてもよいし、第1延在角 θ_1 の絶対値未満であってもよい。つまり、複数の第2反転コラム16は、単位面積当たりの平面視（つまり部分的な平面視）においてa軸を基準に複数の第1反転コラム14と非線対称となるレイアウトを有していてもよい。換言すると、複数の第2反転コラム16は、単位面積当たりの平面視（つまり部分的な平面視）において鉛直軸を基準に複数の第1反転コラム14と非点対象となるレイアウトを有していてもよい。

[0234] 以下、図13A～図13Fを参照して、複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16の第1～第6形態例が示される。第1～第3基本形態に係る複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16は、第1～第6形態例に示される複数の特徴のうちの少なくとも1つの特徴を有していてもよい。また、第1～第3基本形態に係る複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16は、第1～第6形態例に示される複数（2つ以上）の特徴が組み合わされた特徴を有していてもよい。

[0235] 図13Aは、第1形態例に係る複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16を示す断面斜視図である。図13Aを参照して、SiC半導体装置1Aは、複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム1

6に加えて、第1反転コラム14および第2反転コラム16の間に介在されたn型の反転中間コラム18を含む。

[0236] 複数の反転中間コラム18は、少なくとも複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16の間の複数の交差部に位置されるように第1層8の上端側の表層部に形成され、積層方向に対応する第1反転コラム14および第2反転コラム16にそれぞれ重なっている。複数の反転中間コラム18は、この形態では、積層方向に複数の第1反転コラム14に1対1の対応関係で重なるように第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ形成されている。

[0237] この例では、第1配列方向Da1がa軸方向（第1方向X）であり、第1延在方向De1がm軸方向（第2方向Y）である。むしろ、複数の反転中間コラム18の配列方向および延在方向は、複数の第1反転コラム14の第1配列方向Da1および第1延在方向De1に応じて変更される。したがって、第1配列方向Da1がm軸方向であり、第1延在方向De1がa軸方向であってもよい。また、第1配列方向Da1がa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第1延在方向De1がa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。

[0238] 複数の反転中間コラム18は、複数の第1反転コラム14と共に活性領域10から外周領域11に引き出されている。つまり、複数の反転中間コラム18は、第1層8のうち活性領域10内に位置する部分から第1層8のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。複数の反転中間コラム18は、外周領域11においても第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ形成されている。

[0239] さらに、複数の反転中間コラム18は、外周領域11から第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0240] 複数の反転中間コラム18は、第1層8内において第1層8の上端および

第1反転コラム14の上端部の間の領域に形成されている。複数の反転中間コラム18は、第1層8の厚さ範囲中間部に対して第1層8の上端側に位置されていることが好ましい。複数の反転中間コラム18は、第1層8の上端から露出していてもよいし、第1層8の上端から下端側に間隔を空けて形成されていてもよい。各反転中間コラム18は、断面視において水平方向に延びる横長柱状に形成されていてもよい。むしろ、各反転中間コラム18は、鉛直方向Zに延びる縦長柱状に形成されていてもよい。

[0241] 複数の反転中間コラム18は、複数の第1非反転コラム15と共にチャージバランスを有する複数の中間pn接合部を形成している。つまり、複数の反転中間コラム18は、複数の第1非反転コラム15と第1スーパージャンクション構造SJ1の一部を構成している。チャージバランスを有する状態は、互いに隣り合う複数の反転中間コラム18に関して、一方の中間pn接合部から拡がる空乏層、および、他方の中間pn接合部から拡がる空乏層が、複数の第1非反転コラム15内で接続される状態を意味する。

[0242] 各反転中間コラム18は、濃度勾配のピーク値（ピーク部）を形成するn型の単一または複数の領域要素を含んでいてもよい。各反転中間コラム18が単一の領域要素によって構成される場合、単一の領域要素は第1層8の上端および第1反転コラム14の上端部の間の領域に形成され、第1反転コラム14の上端部に接続される。

[0243] 各反転中間コラム18が複数の領域要素によって構成される場合、複数の領域要素は第1層8の上端および第1反転コラム14の上端部の間の領域において異なる深さ位置にそれぞれ形成される。この場合、複数の領域要素は、積層方向に互いに接続されるようにそれぞれ形成される。また、少なくとも最下の領域要素は、第1反転コラム14の上端部に接続される。

[0244] 領域要素は、第1層8に対するランダム注入法によって第1層8の表層部に導入されたランダム不純物領域からなる（図7も併せて参照）。つまり、領域要素は、第2層9に形成されていない。また、領域要素は、第1軸チャネルCH1に沿う方向に関して第1反転コラム14の第1領域厚さTR1未

満の厚さを有している。また、領域要素の厚さは、第2反転コラム16の第2領域厚さTR2未満である。

[0245] 領域要素は、第1反転コラム14等とは異なり、 $0.5\mu\text{m}$ 以上の厚さを有する緩慢部22を有さず、 $0.5\mu\text{m}$ の範囲に漸増部20、ピーク部21および漸減部23を含む濃度勾配を有している。各反転中間コラム18が複数の領域要素を含む場合、各反転中間コラム18は第1層8の厚さ方向に複数の領域要素の個数に応じた複数のピーク部21（ピーク値P）を有する。領域要素は、 $1\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 以上 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値Pとして有していてもよい。

[0246] 反転中間コラム18のn型不純物濃度は、少なくとも1種の5価元素によって調整されていることが好ましい。反転中間コラム18の5価元素は、第1反転コラム14等の5価元素と同一種であってもよいし、第1反転コラム14等の5価元素と異なる種であってもよい。反転中間コラム18の5価元素は、窒素、リン、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種であってもよい。反転中間コラム18の5価元素は、窒素またはリンであることが好ましい。

[0247] 複数の反転中間コラム18は、中間幅WMをそれぞれ有している。中間幅WMは、第1配列方向Da1に沿う幅である。中間幅WMは、第1層8の第1厚さT1未満であることが好ましい。むしろ、中間幅WMは、第1厚さT1以上であってもよい。中間幅WMは、第2層9の第2厚さT2未満であることが好ましい。むしろ、中間幅WMは、第2厚さT2以上であってもよい。

[0248] 中間幅WMは、第1反転コラム14の第1幅W1とほぼ等しいことが好ましい。むしろ、中間幅WMは、第1幅W1以上であってもよいし、第1幅W1未満であってもよい。中間幅WMは、 $1\mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。中間幅WMは、 $5\mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

[0249] 中間幅WMは、 $1\mu\text{m}$ 以上 $1.5\mu\text{m}$ 以下、 $1.5\mu\text{m}$ 以上 $2\mu\text{m}$ 以下、 $2\mu\text{m}$ 以上 $2.5\mu\text{m}$ 以下、 $2.5\mu\text{m}$ 以上 $3\mu\text{m}$ 以下、 $3\mu\text{m}$ 以上 3.5

μm 以下、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $4\ \mu\text{m}$ 以下、 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0250] 複数の反転中間コラム18は、中間厚さTMをそれぞれ有している。中間厚さTMは、第1層8の上端および第1反転コラム14の上端部の間の距離以上であることが好ましい。中間厚さTMは、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。中間厚さTMは、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0251] 複数の反転中間コラム18は、第1配列方向Da1に中間ピッチPMの間隔を空けて形成されている。中間ピッチPMは、第1反転コラム14の第1ピッチP1とほぼ等しいことが好ましい。むしろ、中間ピッチPMは、第1ピッチP1以上であってもよいし、第1ピッチP1未満であってもよい。図13Aでは、明瞭化のため、第1ピッチP1よりも大きい中間ピッチPMが示されている。

[0252] 中間ピッチPMは、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。中間ピッチPMは、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以上 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下、 $2\ \mu\text{m}$ 以上 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3\ \mu\text{m}$ 以下、 $3\ \mu\text{m}$ 以上 $3.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $4\ \mu\text{m}$ 以下、 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。中間ピッチPMは、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

[0253] このような構成において、第2反転コラム16は、第1層8内に位置する延部を有し、第1層8内において反転中間コラム18に接続されていることが好ましい。つまり、第2反転コラム16は、第1層8内において反転中間コラム18を介して第1反転コラム14に電氣的に接続されていることが好ましい。この場合、第2反転コラム16は、第1反転コラム14および反転

中間コラム 18 と共に積層方向に連続的に延びる 1 つの立体格子状の反転コラムを形成する。

[0254] むろん、第 2 反転コラム 16 の延部は、第 1 層 8 内において反転中間コラム 18 および第 1 反転コラム 14 の双方に接続されていてもよい。反転中間コラム 18 を有する構成では、第 1 反転コラム 14 および第 2 反転コラム 16 の間の領域の濃度勾配が反転中間コラム 18 によって緩和され、チャージバランスの精度が向上される。

[0255] この例では、複数の反転中間コラム 18 が第 1 配列方向 $D a 1$ に配列され、第 1 延在方向 $D e 1$ に延びる帯状に形成された例が示された。しかし、複数の反転中間コラム 18 は第 2 配列方向 $D a 2$ に配列され、第 2 延在方向 $D e 2$ に延びる帯状に形成されていてもよい。この場合、複数の第 2 反転コラム 16 は、複数の反転中間コラム 18 に 1 対 1 対応の関係で接続されていてもよい。

[0256] 図 13B は、第 2 形態例に係る複数の第 1 反転コラム 14 および複数の第 2 反転コラム 16 を示す断面斜視図である。図 13B を参照して、SiC 半導体装置 1A は、複数の第 1 反転コラム 14 および複数の第 2 反転コラム 16 に加えて、第 1 非反転コラム 15 および第 2 非反転コラム 17 の間に介在された p 型の非反転中間コラム 19 を含む。

[0257] 複数の非反転中間コラム 19 は、少なくとも複数の第 1 非反転コラム 15 および複数の第 2 非反転コラム 17 の間の複数の交差部に位置されるように第 1 層 8 の上端側の表層部に形成され、積層方向に対応する第 1 非反転コラム 15 および第 2 非反転コラム 17 にそれぞれ重なっている。複数の非反転中間コラム 19 は、この形態では、積層方向に複数の第 1 非反転コラム 15 に 1 対 1 の対応関係で重なるように第 1 配列方向 $D a 1$ に間隔を空けて配列され、第 1 延在方向 $D e 1$ に延びる帯状にそれぞれ形成されている。

[0258] この例では、第 1 配列方向 $D a 1$ が a 軸方向（第 1 方向 X）であり、第 1 延在方向 $D e 1$ が m 軸方向（第 2 方向 Y）である。むろん、複数の非反転中間コラム 19 の配列方向および延在方向は、複数の第 1 非反転コラム 15 の

第1配列方向D a 1および第1延在方向D e 1に応じて変更される。したがって、第1配列方向D a 1がm軸方向であり、第1延在方向D e 1がa軸方向であってもよい。また、第1配列方向D a 1がa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第1延在方向D e 1がa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。

[0259] 複数の非反転中間コラム19は、複数の第1非反転コラム15と共に活性領域10から外周領域11に引き出されている。つまり、複数の非反転中間コラム19は、第1層8のうち活性領域10内に位置する部分から第1層8のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。複数の非反転中間コラム19は、外周領域11においても第1配列方向D a 1に間隔を空けて配列され、第1延在方向D e 1に延びる帯状にそれぞれ形成されている。

[0260] さらに、複数の非反転中間コラム19は、外周領域11から第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0261] 複数の非反転中間コラム19は、第1層8内において第1層8の上端および第1非反転コラム15の上端部の間の領域に形成されている。複数の非反転中間コラム19は、第1層8の厚さ範囲中間部に対して第1層8の上端側に位置されていることが好ましい。複数の非反転中間コラム19は、第1層8の上端から露出しているてもよいし、第1層8の上端から下端側に間隔を空けて形成されているてもよい。各非反転中間コラム19は、断面視において水平方向に延びる横長柱状に形成されているてもよい。むろん、各非反転中間コラム19は、鉛直方向Zに延びる縦長柱状に形成されているてもよい。

[0262] 複数の非反転中間コラム19は、複数の第1反転コラム14と共にチャージバランスを有する複数の中間p n接合部を形成している。つまり、複数の非反転中間コラム19は、複数の第1反転コラム14と第1スーパージャンクション構造S J 1の一部を構成している。チャージバランスを有する状態は、互いに隣り合う複数の非反転中間コラム19に関して、一方の中間p n

接合部から拡がる空乏層、および、他方の中間 p n 接合部から拡がる空乏層が、複数の第 1 反転コラム 1 4 内で接続される状態を意味する。

[0263] 各非反転中間コラム 1 9 は、濃度勾配のピーク値（ピーク部）を形成する p 型の単一または複数の領域要素を含んでいてもよい。各非反転中間コラム 1 9 が単一の領域要素によって構成される場合、単一の領域要素は第 1 層 8 の上端および第 1 非反転コラム 1 5 の上端部の間の領域に形成され、第 1 非反転コラム 1 5 の上端部に接続される。

[0264] 各非反転中間コラム 1 9 が複数の領域要素によって構成される場合、複数の領域要素は第 1 層 8 の上端および第 1 非反転コラム 1 5 の上端部の間の領域において異なる深さ位置にそれぞれ形成される。この場合、複数の領域要素は、積層方向に互いに接続されるようにそれぞれ形成される。また、少なくとも最下の領域要素は、第 1 非反転コラム 1 5 の上端部に接続される。

[0265] 領域要素は、第 1 層 8 に対するランダム注入法によって第 1 層 8 の表層部に導入されたランダム不純物領域からなる（図 7 も併せて参照）。つまり、領域要素は、第 2 層 9 に形成されていない。また、領域要素は、第 1 軸チャネル C H 1 に沿う方向に関して第 1 非反転コラム 1 5 の第 1 領域厚さ T R 1 未満の厚さを有している。また、領域要素の厚さは、第 2 非反転コラム 1 7 の第 2 領域厚さ T R 2 未満である。

[0266] 領域要素は、第 1 非反転コラム 1 5 等とは異なり、 $0.5 \mu\text{m}$ 以上の厚さを有する緩慢部 2 2 を有さず、 $0.5 \mu\text{m}$ の範囲に漸増部 2 0、ピーク部 2 1 および漸減部 2 3 を含む濃度勾配を有している。各非反転中間コラム 1 9 が複数の領域要素を含む場合、各非反転中間コラム 1 9 は第 1 層 8 の厚さ方向に複数の領域要素の個数に応じた複数のピーク部 2 1（ピーク値 P）を有する。

[0267] 領域要素は、 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以下の p 型不純物濃度をピーク値 P として有していてもよい。非反転中間コラム 1 9 の p 型不純物濃度は、少なくとも 1 種の 5 価元素によって調整されていることが好ましい。

- [0268] 非反転中間コラム19の3価元素は、第1非反転コラム15等の3価元素と同一種であってもよいし、第1非反転コラム15等の3価元素と異なる種であってもよい。非反転中間コラム19の3価元素は、ホウ素、アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種であってもよい。複数の非反転中間コラム19は、前述の中間幅WM、中間厚さTMおよび中間ピッチPMを有していてもよい。
- [0269] このような構成において、第2非反転コラム17は、第1層8内に位置する延部を有し、第1層8内において非反転中間コラム19に接続されていることが好ましい。つまり、第2非反転コラム17は、第1層8内において非反転中間コラム19を介して第1非反転コラム15に電氣的に接続されていることが好ましい。この場合、第2非反転コラム17は、第1非反転コラム15および非反転中間コラム19と共に積層方向に連続的に延びる1つの立体格子状の反転コラムを形成する。
- [0270] むろん、第2非反転コラム17の延部は、第1層8内において非反転中間コラム19および第1非反転コラム15の双方に接続されていてもよい。非反転中間コラム19を有する構成では、第1非反転コラム15および第2非反転コラム17の間の領域の濃度勾配が非反転中間コラム19によって緩和され、チャージバランスの精度が向上される。
- [0271] この例では、複数の非反転中間コラム19が第1配列方向Da1に配列され、第1延在方向De1に延びる帯状に形成された例が示された。しかし、複数の非反転中間コラム19は第2配列方向Da2に配列され、第2延在方向De2に延びる帯状に形成されていてもよい。この場合、複数の非反転中間コラム19は、複数の第2非反転コラム17に1対1対応の関係で接続されていてもよい。
- [0272] 図13Cは、第3形態例に係る第1反転コラム14および第2反転コラム16を示す断面斜視図である。図13Cを参照して、SiC半導体装置1Aは、第1層8の上端から露出した第1反転コラム14、および、第1層8の上端から露出した第1非反転コラム15を有している。

- [0273] 第1反転コラム14は、第1層8の上端から漸増部20の一部が露出した濃度勾配を有していてもよい。むしろ、第1反転コラム14は、第1層8の上端からピーク部21の一部が露出した濃度勾配を有していてもよい。第1反転コラム14は、第1層8の上端から露出した緩慢部22を有していてもよい。この場合、第1反転コラム14は、第1層8の上端にピーク値Pを有し、第1層8の下端側に向けて漸減する濃度勾配を有している。
- [0274] 同様に、第1非反転コラム15（第1不純物領域12）は、第1層8の上端から漸増部20の一部が露出した濃度勾配を有していてもよい。むしろ、第1非反転コラム15は、第1層8の上端からピーク部21の一部が露出した濃度勾配を有していてもよい。第1非反転コラム15は、第1層8の上端から露出した緩慢部22を有していてもよい。この場合、第1非反転コラム15は、第1層8の上端にピーク値Pを有し、第1層8の下端側に向けて漸減する濃度勾配を有している。
- [0275] 第2反転コラム16は、第1層8内に位置する延部を有し、第1層8内において第1反転コラム14に接続されていることが好ましい。第1層8の上端から第1反転コラム14が露出する構成では、第1反転コラム14および第2反転コラム16の間の領域に形成される濃度勾配が第1反転コラム14の露出部によって緩和され、チャージバランスの精度が向上される。
- [0276] 第2非反転コラム17（第2不純物領域13）は、第1層8内に位置する延部を有し、第1層8内において第1非反転コラム15に接続されていることが好ましい。第1層8の上端から第1非反転コラム15が露出する構成では、第1非反転コラム15および第2非反転コラム17の間の領域に形成される濃度勾配が第1非反転コラム15の露出部によって緩和され、チャージバランスの精度が向上される。
- [0277] このような構成は、第1反転コラム14（第1非反転コラム15）の形成後、第1反転コラム14（第1非反転コラム15）の漸増部20の一部または全部が消失するまで第1層8の上端を部分的に除去することによって得られる。たとえば、第1層8の上端は、研削法によって部分的に除去されても

よい。研削法は、機械研磨法および／または化学機械研磨法であってもよい。この場合、第1層8の上端は研削面からなり、第1反転コラム14は当該研削面から露出する。第2層9は、第1層8の研削面の上に積層される。

[0278] たとえば、第1層8の上端は、エッチング法によって部分的に除去されてもよい。エッチング法は、ウエットエッチング法および／またはドライエッチング法であってもよい。この場合、第1層8の上端はエッチング面からなり、第1反転コラム14は当該エッチング面から露出する。第2層9は、第1層8のエッチング面の上に積層される。

[0279] 図13Dは、第4形態例に係る第1反転コラム14および第2反転コラム16を示す断面斜視図である。図13Dを参照して、SiC半導体装置1Aは、第2層9の上端（第1主面3）から露出した第2反転コラム16、および、第2層9の上端（第1主面3）から露出した第2非反転コラム17を有している。

[0280] 第2反転コラム16は、第2層9の上端から漸増部20の一部が露出した濃度勾配を有していてもよい。むしろ、第2反転コラム16は、第2層9の上端からピーク部21の一部が露出した濃度勾配を有していてもよい。第2反転コラム16は、第2層9の上端から露出した緩慢部22を有していてもよい。この場合、第2反転コラム16は、第2層9の上端にピーク値Pを有し、第2層9の下端側に向けて漸減する濃度勾配を有している。

[0281] 同様に、第2非反転コラム17（第2不純物領域13）は、第2層9の上端から漸増部20の一部が露出した濃度勾配を有していてもよい。むしろ、第2非反転コラム17は、第2層9の上端からピーク部21の一部が露出した濃度勾配を有していてもよい。第2非反転コラム17は、第2層9の上端から露出した緩慢部22を有していてもよい。この場合、第2非反転コラム17は、第2層9の上端にピーク値Pを有し、第2層9の下端側に向けて漸減する濃度勾配を有している。

[0282] このような構成は、第2層9（第1主面3）を利用してデバイス構造物が形成される場合において、第2反転コラム16および第2非反転コラム17

を用いてデバイス構造物の電気的特性を調整する場合に有効である。

[0283] このような構成は、第2反転コラム16（第2非反転コラム17）の形成後、第2反転コラム16（第2非反転コラム17）の漸増部20の一部または全部が消失するまで第2層9の上端を部分的に除去することによって得られる。たとえば、第2層9の上端は、研削法によって部分的に除去されてもよい。研削法は、機械研磨法および／または化学機械研磨法であってもよい。この場合、第2層9の上端は研削面からなり、第2反転コラム16は当該研削面から露出する。

[0284] たとえば、第2層9の上端は、エッチング法によって部分的に除去されてもよい。エッチング法は、ウエットエッチング法および／またはドライエッチング法であってもよい。この場合、第2層9の上端はエッチング面からなり、第2反転コラム16は当該エッチング面から露出する。

[0285] 図13Eは、第5形態例に係る第1反転コラム14および第2反転コラム16を示す断面斜視図である。図13Eを参照して、積層部7は、ベース層6側からこの順に積層されたバッファ層26、第2層9および第2層9を含む積層構造を有していてもよい。バッファ層26は、「バッファSiC層」、「バッファ領域」等と称されてもよい。

[0286] バッファ層26は、SiC単結晶を含み、n型の導電性を有している。バッファ層26は、ベース層6の上に積層されている。バッファ層26は、水平方向に層状に延び、チップ2の中間部を形成し、第1～第4側面5A～5Dの一部を形成している。バッファ層26は、ベース層6を起点に結晶成長されたエピタキシャル層（つまりSiCエピタキシャル層）からなる。

[0287] バッファ層26は、下端および上端を有している。バッファ層26の下端は結晶成長起点であり、バッファ層26の上端は結晶成長終点である。バッファ層26はベース層6から連続的に結晶成長されているため、バッファ層26の下端はベース層6の上端に一致している。ベース層6およびバッファ層26の間の境界部は必ずしも視認できるものではなく、他の構成や要素から間接的に評価および／または判定され得る。バッファ層26は、ベース層

6のオフ方向 $D \circ f f$ およびオフ角 $\theta \circ f f$ にほぼ一致したオフ方向 $D \circ f f$ およびオフ角 $\theta \circ f f$ を有している。

[0288] バッファ層26は、積層方向に沿うバッファ軸チャンネルCHBuを有している。バッファ軸チャンネルCHBuは、バッファ層26を構成するSiC単結晶に関して原子間距離（原子間隔）が比較的広い領域（チャンネル）であり、積層方向（結晶成長方向）に延びる結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれている。

[0289] つまり、バッファ軸チャンネルCHBuは、原子列が疎である領域が積層方向に延在し、平面視において水平方向の原子列（原子間距離／原子密度）が疎である領域である。バッファ軸チャンネルCHBuは、結晶軸のうち低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域であることが好ましい。

[0290] バッファ軸チャンネルCHBuは、この形態では、SiC単結晶のc軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域からなる。つまり、バッファ軸チャンネルCHBuは、c軸に沿って延び、オフ方向 $D \circ f f$ およびオフ角 $\theta \circ f f$ を有している。換言すると、バッファ軸チャンネルCHBuは、鉛直軸からオフ方向 $D \circ f f$ に向けてオフ角 $\theta \circ f f$ 分だけ傾斜している。

[0291] バッファ層26のn型不純物濃度は、ベース層6のn型不純物濃度未満であることが好ましい。バッファ層26は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。バッファ層26のn型不純物濃度は、厚さ方向にほぼ一定であってもよい。むしろ、バッファ層26のn型不純物濃度は、積層方向（結晶成長方向）に向けて漸増および／または漸減する濃度勾配を有していてもよい。

[0292] バッファ層26のn型不純物濃度は、この形態では、窒素によって調節されている。バッファ層26は、少なくとも1種の5価元素によって調整されたn型不純物濃度を有していてもよい。たとえば、バッファ層26のn型不純物濃度は、窒素、リン、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種によって調節されていてもよい。バッファ層26は、リン以外の5価元素を含むことが好ましい。

- [0293] バッファ層26のn型不純物濃度は、少なくとも窒素によって調整されていることが好ましい。バッファ層26が2種以上の5価元素を含む場合、バッファ層26は、窒素および窒素以外の5価元素を含むことが好ましい。この場合、バッファ層26は、リンおよび窒素以外の5価元素として、ヒ素およびアンチモンのいずれか一方または双方を含むことが好ましい。
- [0294] バッファ層26は、バッファ厚さ T_{Bu} を有している。バッファ厚さ T_{Bu} は、ベース厚さ T_B 未満であることが好ましい。バッファ厚さ T_{Bu} は、 $1\ \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。バッファ厚さ T_{Bu} は、 $5\ \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。バッファ厚さ T_{Bu} は、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下、 $2\ \mu\text{m}$ 以上 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3\ \mu\text{m}$ 以下、 $3\ \mu\text{m}$ 以上 $3.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $3.5\ \mu\text{m}$ 以上 $4\ \mu\text{m}$ 以下、 $4\ \mu\text{m}$ 以上 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上 $5\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0295] 第1層8は、この形態では、バッファ層26の上に積層され、第2層9は第1層8の上に積層されている。第1層8は、バッファ層26を起点に結晶成長されたエピタキシャル層（つまりSiCエピタキシャル層）からなり、n型の導電性を有している。したがって、第1層8は、バッファ層26のオフ方向 $\Delta\theta$ およびオフ角 θ_{off} にほぼ一致したオフ方向 $\Delta\theta$ およびオフ角 θ_{off} を有している。また、第1軸チャンネル CH_1 は、バッファ軸チャンネル CH_{Bu} にほぼ一致している。
- [0296] 第1層8の第1厚さ T_1 は、バッファ厚さ T_{Bu} よりも大きいことが好ましい。むしろ、第1厚さ T_1 は、バッファ厚さ T_{Bu} 未満であってもよい。また、第1厚さ T_1 は、バッファ厚さ T_{Bu} とほぼ等しくてもよい。第2層9の第2厚さ T_2 は、バッファ厚さ T_{Bu} よりも大きいことが好ましい。むしろ、第2厚さ T_2 は、バッファ厚さ T_{Bu} 未満であってもよい。また、第2厚さ T_2 は、バッファ厚さ T_{Bu} とほぼ等しくてもよい。
- [0297] 第1反転コラム14の下端部は、第1層8の下端から上端側に間隔を空けて形成され、第1層8の一部（下端部）を挟んでバッファ層26に対向して

いてもよい。つまり、第1反転コラム14の全域（漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23）は、第1層8内に位置されていてもよい。

[0298] 第1反転コラム14の下端部は、バッファ層26および第1層8の境界部を横切り、バッファ層26内に位置する延部を有していてもよい。第1軸チャンネルCH1はバッファ軸チャンネルCHBuとほぼ一致しているため、第1反転コラム14の延部はバッファ層26内においてバッファ軸チャンネルCHBuに沿って形成されている。

[0299] 第1反転コラム14の延部は、バッファ層26の厚さ範囲中間部に対してバッファ層26の上端側に位置されていることが好ましい。第1反転コラム14の延部は、漸減部23を含む。むろん、第1反転コラム14の延部は、緩慢部22の一部および漸減部23を含んでいてもよい。

[0300] 図13Fは、第6形態例に係る第1反転コラム14および第2反転コラム16を示す断面斜視図である。図13Fを参照して、積層部7は、第2層9の上に積層されたSiC単結晶性のn型のトップ層30を含んでいてもよい。トップ層30は、複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17から第1主面3を離間させるために形成されている。

[0301] つまり、トップ層30は、第1主面3および複数の第2反転コラム16の上端部の間の領域の少なくとも一部を形成する部分でもある。トップ層30は、第2層9の上端部を形成する部分であると見做されてもよい。この例では、トップ層30がn型の導電性を有しているが、トップ層30の導電性は第1主面3に形成されるデバイス構造物の性質に応じて適宜調整されることもできる。したがって、トップ層30の導電性は、必ずしもn型に制限される必要はなく、p型であってもよい。

[0302] トップ層30は、第2層9の上に積層されている。トップ層30は、水平方向に層状に延び、第1主面3を形成し、第1～第4側面5A～5Dの一部を形成している。トップ層30は、第2層9を起点に結晶成長されたエピタキシャル層（つまりSiCエピタキシャル層）からなる。

- [0303] トップ層30は第2層9から連続的に結晶成長されているため、トップ層30の下端は第2層9の上端に一致している。トップ層30および第2層9の間の境界部は必ずしも視認できるものではなく、他の構成や要素から間接的に評価および／または判定され得る。トップ層30は、第2層9のオフ方向 $D\ o\ f\ f$ およびオフ角 $\theta\ o\ f\ f$ にほぼ一致したオフ方向 $D\ o\ f\ f$ およびオフ角 $\theta\ o\ f\ f$ を有している。
- [0304] トップ層30は、積層方向に沿うトップ軸チャンネルC H Tを有している。トップ軸チャンネルC H Tは、トップ層30を構成するS i C単結晶に関して原子間距離（原子間隔）が比較的広い領域（チャンネル）であり、積層方向（結晶成長方向）に延びる結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれている。
- [0305] つまり、トップ軸チャンネルC H Tは、原子列が疎である領域が積層方向に延在し、平面視において水平方向の原子列（原子間距離／原子密度）が疎である領域である。トップ軸チャンネルC H Tは、結晶軸のうち低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域であることが好ましい。
- [0306] トップ軸チャンネルC H Tは、この形態では、S i C単結晶のc軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域からなる。つまり、トップ軸チャンネルC H Tは、c軸に沿って延び、オフ方向 $D\ o\ f\ f$ およびオフ角 $\theta\ o\ f\ f$ を有している。換言すると、トップ軸チャンネルC H Tは、鉛直軸からオフ方向 $D\ o\ f\ f$ に向けてオフ角 $\theta\ o\ f\ f$ 分だけ傾斜している。
- [0307] トップ層30のn型不純物濃度は、ベース層6のn型不純物濃度未満であることが好ましい。トップ層30は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。トップ層30のn型不純物濃度は、第1層8（第2層9）のn型不純物濃度とほぼ等しくてもよい。トップ層30のn型不純物濃度は、厚さ方向にほぼ一定であってもよい。むろん、トップ層30のn型不純物濃度は、積層方向（結晶成長方向）に向けて漸増および／または漸減する濃度勾配を有していてもよい。
- [0308] トップ層30のn型不純物濃度は、この形態では、窒素によって調節されている。トップ層30は、少なくとも1種の5価元素によって調整されたn

型不純物濃度を有していてもよい。たとえば、トップ層30のn型不純物濃度は、窒素、リン、ヒ素、アンチモンおよびビスマスのうちの少なくとも1種によって調節されていてもよい。トップ層30は、リン以外の5価元素を含むことが好ましい。

[0309] トップ層30のn型不純物濃度は、少なくとも窒素によって調整されていることが好ましい。トップ層30が2種以上の5価元素を含む場合、トップ層30は、窒素および窒素以外の5価元素を含むことが好ましい。この場合、トップ層30は、リンおよび窒素以外の5価元素として、ヒ素およびアンチモンのいずれか一方または双方を含むことが好ましい。

[0310] トップ層30は、トップ厚さTTを有している。トップ厚さTTは、ベース厚さTB未満であることが好ましい。トップ厚さTTは、第1厚さT1（第2厚さT2）未満であることが好ましい。むしろ、トップ厚さTTは、第1厚さT1（第2厚さT2）以上であってもよい。

[0311] トップ厚さTTは、0.1 μm 以上5 μm 以下であってもよい。トップ厚さTTは、0.1 μm 以上0.25 μm 以下、0.25 μm 以上0.5 μm 以下、0.5 μm 以上0.75 μm 以下、0.75 μm 以上1 μm 以下、1 μm 以上1.5 μm 以下、1.5 μm 以上2 μm 以下、2 μm 以上2.5 μm 以下、2.5 μm 以上3 μm 以下、3 μm 以上3.5 μm 以下、3.5 μm 以上4 μm 以下、4 μm 以上4.5 μm 以下、および、4.5 μm 以上5 μm 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0312] 以下、活性領域10内に形成されるデバイス構造物の形態例が示される。図14は、活性領域10の一要部を示す平面図である。図15は、第1形態例に係るゲート構造35を示す断面斜視図である。図15では、第1基本形態（図5参照）が適用された構成が例示されている。むしろ、第1～第3基本形態のいずれか1つに第1～第6形態例（図13A～図13F参照）のいずれか1つまたは複数が適用された構成が適用されてもよい。

[0313] 図14および図15を参照して、SiC半導体装置1Aは、この形態では、活性領域10に形成されたデバイス構造物の一例としてのMIS構造31

(Metal Insulator Semiconductor structure) を含む。MIS構造31は、「電界効果トランジスタ構造」と称されてもよい。

[0314] ここでは、MIS構造31が第2層9（第1主面3）に形成された例が示される。前述のトップ層30が形成される場合、MIS構造31はトップ層30（第1主面3）に形成される。この場合の形態は、以下の説明において必要に応じて「第2層9」を「トップ層30」に置き換えることによって得られる。以下の構成は、SiC半導体装置1Aの構成要素として説明されるが、MIS構造31の構成要素でもある。

[0315] SiC半導体装置1Aは、活性領域10に形成されたp型の複数のボディ領域32を含む。複数のボディ領域32は、積層方向に複数の第2非反転コラム17に重なるように第1主面3の表層部に形成されている。複数のボディ領域32は、この形態では、積層方向に複数の第2非反転コラム17に1対1の対応関係で重なるように第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。

[0316] この例では、第2配列方向Da2がm軸方向（第2方向Y）であり、第2延在方向De2がa軸方向（第1方向X）である。むしろ、複数のボディ領域32の配列方向および延在方向は、複数の第2非反転コラム17（第2反転コラム16）の第2配列方向Da2および第2延在方向De2に応じて変更される。したがって、第2配列方向Da2がa軸方向であり、第2延在方向De2がm軸方向であってもよい。また、第2配列方向Da2がa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第2延在方向De2がa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。

[0317] 複数の第2非反転コラム17が第1主面3から間隔を空けて形成されている場合、複数のボディ領域32は第1主面3および複数の第2非反転コラム17の上端部の間の領域にそれぞれ形成される。複数のボディ領域32は、第2層9の厚さ範囲中間部に対して第1主面3側に形成され、第1主面3から露出していることが好ましい。複数のボディ領域32は、対応する第2非反転コラム17（上端部）に接続されていることが好ましい。

- [0318] 複数のボディ領域32は、直下の第2非反転コラム17よりも幅広にそれぞれ形成され、隣り合う複数の第2非反転コラム17から直下の第2非反転コラム17側に間隔を空けて形成されている。複数のボディ領域32は、第1主面3のうち隣り合う複数の第2非反転コラム17の間の領域から第1層8の一部および／または第2反転コラム16の一部を露出させている。
- [0319] 複数のボディ領域32は、第2層9に対するランダム注入法によって第2層9の表層部に導入されたランダム不純物領域からなる（図7も併せて参照）。したがって、複数のボディ領域32は、第2軸チャンネルCH2に沿う方向に関して第2非反転コラム17の第2領域厚さTR2未満の厚さを有している。複数のボディ領域32の厚さは、第1反転コラム14の第1領域厚さTR1未満である。
- [0320] 複数のボディ領域32は、第2非反転コラム17等とは異なり、 $0.5\mu\text{m}$ 以上の厚さを有する緩慢部22を有さず、 $0.5\mu\text{m}$ の範囲に漸増部20、ピーク部21および漸減部23を含む濃度勾配を有している。複数のボディ領域32は、 $1\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 以上 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。
- [0321] 複数のボディ領域32のp型不純物濃度は、少なくとも1種の3価元素によって調整されていることが好ましい。ボディ領域32の3価元素は、第2非反転コラム17等の3価元素と同一種であってもよいし、第2非反転コラム17等の3価元素と異なる種であってもよい。ボディ領域32の3価元素は、ホウ素、アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種であってもよい。
- [0322] SiC半導体装置1Aは、活性領域10において複数のボディ領域32の表層部にそれぞれ形成されたn型の1つまたは複数のソース領域33を含む。この形態では、各ボディ領域32の表層部に複数（この形態では2つ）のソース領域33が間隔を空けて形成されている。複数のソース領域33は、第2層9（複数の第2非反転コラム17）のn型不純物濃度よりも高いn型不純物濃度を有している。複数のソース領域33は、 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 以上

$1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。

[0323] 複数のソース領域33は、対応するボディ領域32の延在方向に沿って帯状にそれぞれ延びていてもよい。むしろ、複数のソース領域33は、対応するボディ領域32の延在方向に沿って間隔を空けて形成されていてもよい。複数のソース領域33は、対応するボディ領域32の底部から第1主面3側に間隔を空けて形成され、対応するボディ領域32の周縁から内方に間隔を空けて形成されている。複数のソース領域33は、ボディ領域32の周縁部において複数の第2反転コラム16と共に第1主面3に沿うチャンネル（電流経路）を区画している。

[0324] SiC半導体装置1Aは、活性領域10において複数のボディ領域32の表層部にそれぞれ形成されたp型の1つまたは複数のコンタクト領域34を含む。コンタクト領域34は、「バックゲート領域」と称されてもよい。この形態では、各ボディ領域32の表層部において互いに隣り合う複数のソース領域33の間の領域に1つのコンタクト領域34が形成されている。

[0325] 複数のコンタクト領域34は、複数のボディ領域32のp型不純物濃度（ピーク値）よりも高いp型不純物濃度（ピーク値）を有している。複数のコンタクト領域34のp型不純物濃度（ピーク値）は、複数の第2反転コラム16のp型不純物濃度（ピーク値）よりも高い。複数のコンタクト領域34は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。

[0326] 複数のコンタクト領域34は、対応するボディ領域32の延在方向に沿って帯状にそれぞれ延びていてもよい。むしろ、複数のコンタクト領域34は、対応するボディ領域32の延在方向に沿って間隔を空けて形成されていてもよい。複数のコンタクト領域34は、対応するボディ領域32の底部から第1主面3側に間隔を空けて形成され、対応するボディ領域32の周縁部から内方に間隔を空けて形成されている。

[0327] SiC半導体装置1Aは、活性領域10において第1主面3の上に配置さ

れたプレーナ電極型の複数のゲート構造35を含む。ゲート構造35は、「プレーナゲート構造」と称されてもよい。複数のゲート構造35は、積層方向に少なくとも1つのボディ領域32（チャンネル）に重なるように第1主面3の上に間隔を空けて配列されている。複数のゲート構造35には、制御電位としてのゲート電位が付与される。複数のゲート構造35は、ゲート電位に応答してボディ領域32内におけるチャンネル（電流経路）の反転および非反転を制御する。

[0328] 複数のゲート構造35は、この形態では、第2配列方向D a 2に間隔を空けて配列され、第2延在方向D e 2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。この例では、第2配列方向D a 2がm軸方向（第2方向Y）であり、第2延在方向D e 2がa軸方向（第1方向X）である。

[0329] むろん、複数のゲート構造35の配列方向および延在方向は、複数の第2反転コラム16（ボディ領域32）の第2配列方向D a 2および第2延在方向D e 2に応じて変更される。したがって、第2配列方向D a 2がa軸方向であり、第2延在方向D e 2がm軸方向であってもよい。また、第2配列方向D a 2がa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第2延在方向D e 2がa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。

[0330] 複数のゲート構造35は、複数の第2非反転コラム17から複数の第2反転コラム16側にずれて配置され、積層方向に複数の第2反転コラム16に1対1の対応関係で重なっている。複数のゲート構造35は、この形態では、隣り合う2つのボディ領域32に跨るようにそれぞれ配置され、一方および他方のボディ領域32内に位置された複数のソース領域33をそれぞれ被覆している。

[0331] 複数のゲート構造35は、第1主面3の上に配置されたゲート絶縁膜36、および、ゲート絶縁膜36の上に配置されたゲート電極37を含む積層構造をそれぞれ有している。ゲート絶縁膜36は、酸化シリコン膜を含んでもよい。ゲート電極37は、導電性ポリシリコンを含んでもよい。

[0332] ゲート絶縁膜36およびゲート電極37のいずれか一方または双方は、積

層方向に第2非反転コラム17に部分的に重なるように配置されていてもよい。むろん、ゲート絶縁膜36およびゲート電極37のいずれか一方または双方は、積層方向に第2非反転コラム17に部分的に重ならないように配置されていてもよい。

[0333] 以下、外周領域11側の構成が示される。図16は、外周領域11の構成を示す斜視図である。図17Aは、外周領域11の一要素を示す第1方向Xの断面図である。図17Bは、外周領域11の一要素を示す第2方向Yの断面図である。図16では、複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16の図示が省略されている。

[0334] SiC半導体装置1Aは、外周領域11において第1主面3の表層部に形成された少なくとも1つ（好ましくは2個以上20個以下）のp型のフィールド領域38を含む。複数のフィールド領域38の個数は、典型的には、4個以上8個以下である。複数のフィールド領域38は、電氣的に浮遊状態に形成され、第1主面3の周縁部においてチップ2内の電界を緩和する。フィールド領域38の個数、幅、深さ、p型不純物濃度等は任意であり、緩和すべき電界に応じて種々の値を取り得る。

[0335] 複数のフィールド領域38は、チップ2の周縁および活性領域10の間の領域に間隔を空けて形成されている。複数のフィールド領域38は、平面視において活性領域10に沿って延びる帯状に形成されている。複数のフィールド領域38は、第1方向Xに帯状に延びる部分、および、第2方向Yに帯状に延びる部分をそれぞれ有している。複数のフィールド領域38は、この形態では、平面視において活性領域10を取り囲む環状（具体的には四角環状）に形成されている。

[0336] 複数のフィールド領域38は、外周領域11において積層方向に立体格子状の反転コラム（立体格子状の非反転コラム）に重なっている。つまり、複数のフィールド領域38は、複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16の複数の交差部の上方の領域に形成されている。

[0337] 複数のフィールド領域38は、第1延在方向De1に延びる部分において

複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17に交差し、第2延在方向De2に延びる部分において複数の第1反転コラム14および複数の第1非反転コラム15に交差している。

[0338] 複数のフィールド領域38は、第2層9の下端から第1主面3側に間隔を空けて第2層9内に形成され、第2層9とpn接合部をそれぞれ形成している。複数のフィールド領域38は、第2層9の厚さ範囲中間部に対して第1主面3側に位置する底部を有していることが好ましい。複数のフィールド領域38の底部は、第2反転コラム16の厚さ範囲中間部に対して第1主面3側に位置されていることが特に好ましい。

[0339] 複数のフィールド領域38の底部は、第2反転コラム16の上端部の深さ位置よりも第2反転コラム16の下端部側に位置されていてもよい。この場合、各フィールド領域38は、第2延在方向De2に沿って延びる部分において第2反転コラム16および第2非反転コラム17のいずれか一方または双方に接続されていてもよい。

[0340] たとえば、第1主面3および上端部間の距離が十分に広い場合、各フィールド領域38の底部は第2反転コラム16の上端部の深さ位置よりも第1主面3側に位置されていてもよい。むしろ、トップ層30が形成されている場合、複数のフィールド領域38の底部は第2反転コラム16の上端部の深さ位置よりも第1主面3側に位置されていてもよい。

[0341] 複数のフィールド領域38は、複数のボディ領域32の厚さとほぼ等しい厚さを有していてもよい。この場合、複数のフィールド領域38は、複数のボディ領域32と同時に形成されることができる。むしろ、複数のフィールド領域38の厚さは、複数のボディ領域32の厚さよりも大きいてもよい。また、複数のフィールド領域38の厚さは、複数のボディ領域32の厚さよりも小さくてもよい。

[0342] 複数のフィールド領域38は、第2層9に対するランダム注入法によって第2層9の表層部に導入されたランダム不純物領域からなる（図7も併せて参照）。したがって、複数のフィールド領域38は、第2軸チャンネルCH2

に沿う方向に関して第2反転コラム16の第2領域厚さTR2未満の厚さを有している。複数のフィールド領域38の厚さは、第1反転コラム14の第1領域厚さTR1未満である。

[0343] 複数のフィールド領域38は、第2反転コラム16等とは異なり、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上の厚さを有する緩慢部22を有さず、 $0.5\ \mu\text{m}$ の範囲に漸増部20、ピーク部21および漸減部23を含む濃度勾配を有している。複数のフィールド領域38は、 $1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。

[0344] フィールド領域38のp型不純物濃度は、ボディ領域32のp型不純物濃度とほぼ等しくてもよい。むしろ、複数のフィールド領域38のp型不純物濃度は、複数のボディ領域32のp型不純物濃度も高くてもよい。また、複数のフィールド領域38のp型不純物濃度は、複数のボディ領域32のp型不純物濃度よりも低くてもよい。

[0345] 複数のフィールド領域38のp型不純物濃度は、少なくとも1種の3価元素によって調整されていることが好ましい。フィールド領域38の3価元素は、第2非反転コラム17等の3価元素と同一種であってもよいし、第2非反転コラム17等の3価元素と異なる種であってもよい。フィールド領域38の3価元素は、ホウ素、アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種であってもよい。

[0346] 複数のフィールド領域38は、第2非反転コラム17の幅とは異なる幅を有していることが好ましい。つまり、複数のフィールド領域38による電界緩和効果は、第2非反転コラム17から切り離して調節されることが好ましい。複数のフィールド領域38の幅は、第2非反転コラム17の幅よりも大きいことが特に好ましい。むしろ、複数のフィールド領域38の幅は、第2非反転コラム17の幅よりも小さくてもよい。また、複数のフィールド領域38の幅は、第2非反転コラム17の幅とほぼ等しくてもよい。

[0347] 複数のフィールド領域38は、第2反転コラム16の第2ピッチP2（第1反転コラム14の第1ピッチP1）とは異なるピッチで形成されているこ

とが好ましい。複数のフィールド領域38のピッチは、第2ピッチP2（第1ピッチP1）よりも大きいことが特に好ましい。むろん、複数のフィールド領域38のピッチは、第2ピッチP2（第1ピッチP1）よりも小さくてもよい。また、複数のフィールド領域38のピッチは、第2ピッチP2（第1ピッチP1）とほぼ等しくてもよい。

[0348] SiC半導体装置1Aは、第1主面3を被覆する層間絶縁膜40を含む。層間絶縁膜40は、「絶縁膜」、「層間膜」、「中間絶縁膜」等と称されてもよい。層間絶縁膜40は、この形態では、第1絶縁膜41および第2絶縁膜42を含む積層構造を有している。第1絶縁膜41は、酸化シリコン膜、窒化シリコン膜および酸窒化シリコン膜のうちの少なくとも1つを含んでいてもよい。第1絶縁膜41は、チップ2（第2層9）の酸化物からなる酸化シリコン膜を含むことが特に好ましい。

[0349] 第1絶縁膜41は、活性領域10および外周領域11において第1主面3を選択的に被覆している。第1絶縁膜41は、活性領域10においてゲート絶縁膜36外の領域を被覆し、ゲート絶縁膜36に接続されている。第1絶縁膜41は、外周領域11において複数のフィールド領域38を被覆している。

[0350] 第1絶縁膜41は、この形態では、第1主面3の周縁（第1～第4側面5A～5D）に連なっている。むろん、第1絶縁膜41は、第1主面3の周縁から内方に間隔を空けて形成され、第1主面3の周縁部から第2層9を露出させていてもよい。

[0351] 第2絶縁膜42は、第1絶縁膜41の上に積層されている。第2絶縁膜42は、酸化シリコン膜、窒化シリコン膜および酸窒化シリコン膜のうちの少なくとも1つを含んでいてもよい。層間絶縁膜40は、酸化シリコン膜を含むことが好ましい。第2絶縁膜42は、活性領域10および外周領域11において第1絶縁膜41を挟んで第1主面3を被覆している。

[0352] 第2絶縁膜42は、活性領域10において複数のゲート構造35を被覆している。第2絶縁膜42は、外周領域11において第1絶縁膜41を挟んで

複数のフィールド領域38を被覆している。第2絶縁膜42は、この形態では、第1主面3の周縁（第1～第4側面5A～5D）に連なっている。むしろ、第2絶縁膜42は、第1主面3の周縁から内方に間隔を空けて形成され、第1絶縁膜41と共に第1主面3の周縁部を露出させていてもよい。

[0353] SiC半導体装置1Aは、層間絶縁膜40に形成された複数のコンタクト開口43を含む。複数のコンタクト開口43は、複数のゲート構造35（ゲート電極37）を露出させる複数のコンタクト開口43（図示略）、および、複数のソース領域33を露出させる複数のコンタクト開口43を含む。ソース領域33用の複数のコンタクト開口43は、隣り合う複数のゲート構造35の間の領域に形成され、複数のソース領域33および複数のコンタクト領域34を露出させている。

[0354] 図1を参照して、SiC半導体装置1Aは、層間絶縁膜40の上に配置されたゲートパッド45を含む。ゲートパッド45は、外部からゲート電位が付与される電極である。ゲートパッド45は、「ゲートパッド電極」、「第1パッド電極」等と称されてもよい。ゲートパッド45は、層間絶縁膜40側からこの順に積層されたTi系金属膜およびAl系金属膜を含む積層構造を有していてもよい。

[0355] ゲートパッド45は、この形態では、層間絶縁膜40のうち活性領域10を被覆する部分の上に配置されている。ゲートパッド45は、外周領域11から活性領域10側に間隔を空けて配置されていてもよい。ゲートパッド45は、この形態では、平面視において活性領域10の周縁部に配置されている。

[0356] 図1では、ゲートパッド45が活性領域10の周縁部において第1側面5Aの中央部に沿う領域に配置された例が示されている。むしろ、ゲートパッド45は、第1～第4側面5A～5Dの中央部のいずれかに沿う領域に配置されていてもよい。むしろ、ゲートパッド45は、平面視において活性領域10の任意の角部に配置されていてもよい。また、ゲートパッド45は、平面視において活性領域10の中央部に配置されていてもよい。ゲートパッド

45は、この形態では、平面視において四角形状に形成されている。

[0357] SiC半導体装置1Aは、ゲートパッド45から層間絶縁膜40の上に引き出された少なくとも1つ（この形態では複数）のゲート配線46を含む。ゲート配線46は、「配線」、「配線電極」等と称されてもよい。複数のゲート配線46は、層間絶縁膜40側からこの順に積層されたTi系金属膜およびAl系金属膜を含む積層構造を有していてもよい。複数のゲート配線46は、この形態では、第1ゲート配線46Aおよび第2ゲート配線46Bを含む。

[0358] 第1ゲート配線46Aは、ゲートパッド45から第2側面5B側に向けて引き出され、複数のゲート構造35の一部（具体的には一端部）に交差（具体的には直交）するように活性領域10の周縁に沿ってライン状に延びている。第1ゲート配線46Aは、複数のコンタクト開口43を介して層間絶縁膜40を貫通し、複数のゲート構造35の一端部に電氣的に接続されている。

[0359] 第2ゲート配線46Bは、ゲートパッド45から第4側面5D側に向けて引き出され、複数のゲート構造35の一部（具体的には他端部）に交差（具体的には直交）するように活性領域10の周縁に沿ってライン状に延びている。第2ゲート配線46Bは、複数のコンタクト開口43を介して層間絶縁膜40を貫通し、複数のゲート構造35の他端部に電氣的に接続されている。

[0360] SiC半導体装置1Aは、ゲートパッド45およびゲート配線46から間隔を空けて層間絶縁膜40の上に配置されたソースパッド47を含む。ソースパッド47は、外部からソース電位が付与される電極である。ソースパッド47は、「ソースパッド電極」、「第2パッド電極」等と称されてもよい。ソースパッド47は、層間絶縁膜40側からこの順に積層されたTi系金属膜およびAl系金属膜を含む積層構造を有していてもよい。

[0361] ソースパッド47は、層間絶縁膜40のうち活性領域10を被覆する部分の上に配置されている。ソースパッド47は、外周領域11から活性領域1

0側に間隔を空けて配置されていてもよい。ソースパッド47は、この形態では、平面視においてゲートパッド45に沿って窪んだ凹部を有する多角形状に形成されている。むしろ、ソースパッド47は、平面視において四角形状に形成されていてもよい。

[0362] ソースパッド47は、複数のコンタクト開口43を介して層間絶縁膜40を貫通し、複数のボディ領域32、複数のソース領域33および複数のコンタクト領域34に電氣的に接続されている。つまり、ソースパッド47は、複数のボディ領域32を介して複数の第2非反転コラム17（第2不純物領域13）に電氣的に接続されている。

[0363] SiC半導体装置1Aは、第2主面4を被覆するドレインパッド48を含む。ドレインパッド48は、外部からドレイン電位が付与される電極である。ドレインパッド48は、「ドレインパッド電極」、「第3パッド電極」等と称されてもよい。ドレインパッド48は、第2主面4から露出したベース層6とオーミック接触を形成している。つまり、ドレインパッド48は、ベース層6を介して第1層8（複数の第1反転コラム14）および第2層9（複数の第2反転コラム16）に電氣的に接続されている。

[0364] ドレインパッド48は、チップ2の周縁（第1～第4側面5A～5D）に連なるように第2主面4の全域を被覆していてもよい。ドレインパッド48は、チップ2の周縁部を露出させるように、チップ2の周縁から内方に間隔を空けて第2主面4を被覆していてもよい。

[0365] ソースパッド47およびドレインパッド48の間（第1主面3および第2主面4の間）に印加可能なブレイクダウン電圧は、500V以上3000V以下であってもよい。ブレイクダウン電圧は、500V以上1000V以下、1000V以上1500V以下、1500V以上2000V以下、2000V以上2500V以下、および、2500V以上3000V以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0366] 2層構造を有する積層部7が採用される場合、ブレイクダウン電圧は500V以上1000V以下、1000V以上1500V以下、および、150

0 V以上2000 V以下のいずれか1つの範囲に属する値に設定されることが好ましい。3層構造を有する積層部7が採用される場合、ブレークダウン電圧は1000 V以上1500 V以下、1500 V以上2000 V以下、2000 V以上2500 V以下、および、2500 V以上3000 V以下のいずれか1つの範囲に属する値に設定されることが好ましい。

[0367] 図18は、第2形態例に係るゲート構造35を示す断面斜視図である。第1形態例に係る複数のゲート構造35は、複数の第2反転コラム16の第2延在方向De2に沿って延びていた。これに対して、第2形態例に係る複数のゲート構造35は、複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17に交差するように第2延在方向De2以外の方向に延びている。

[0368] 前述の複数のボディ領域32は、この形態では、複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17に交差するように第2延在方向De2以外の方向に延びている。複数のボディ領域32は、この形態では、第1反転コラム14の第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1反転コラム14の第1延在方向De1に延びている。つまり、複数のボディ領域32は、積層方向に直交している。この例では、第1配列方向Da1がa軸方向（第1方向X）であり、第1延在方向De1がm軸方向（第2方向Y）である。

[0369] 複数のボディ領域32は、積層方向に複数の第1反転コラム14に1対1対応の関係で対向していてもよい。むしろ、各ボディ領域32は、積層方向に複数の第1反転コラム14に対向していてもよい。複数のボディ領域32は、積層方向に複数の第1非反転コラム15に1対1対応の関係で対向していてもよい。

[0370] むろん、各ボディ領域32は、積層方向に複数の第1非反転コラム15に対向していてもよい。複数のボディ領域32は、複数の第1反転コラム14から第1配列方向Da1にずれて配列され、積層方向に第1反転コラム14および第1非反転コラム15のいずれか一方または双方に対向していてもよい。

- [0371] むろん、複数のボディ領域 3 2 の配列方向および延在方向は、複数の第 1 反転コラム 1 4 の第 1 配列方向 $D a 1$ および第 1 延在方向 $D e 1$ に応じて変更される。したがって、第 1 配列方向 $D a 1$ が m 軸方向であり、第 1 延在方向 $D e 1$ が a 軸方向であってもよい。また、第 1 配列方向 $D a 1$ が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であり、第 1 延在方向 $D e 1$ が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であってもよい。
- [0372] むろん、複数のボディ領域 3 2 の配列方向は、第 1 配列方向 $D a 1$ および第 2 配列方向 $D 2$ 以外の方向であってもよい。また、複数のボディ領域 3 2 の延在方向は、第 1 延在方向 $D e 1$ および第 2 延在方向 $D e 2$ 以外の方向であってもよい。つまり、複数のボディ領域 3 2 は、平面視において複数の第 1 反転コラム 1 4 および複数の第 2 反転コラム 1 6 の双方に交差していてもよい。この場合、複数のボディ領域 3 2 の配列方向が a 軸方向および m 軸方向の一方であり、複数のボディ領域 3 2 の延在方向が a 軸方向および m 軸方向の他方である形態は妨げられない。
- [0373] たとえば、ボディ領域 3 2 の延在方向および第 2 延在方向 $D e 2$ の間の角度（絶対値）は、 0° を超えて 90° 以下であってもよい。ボディ領域 3 2 の角度（絶対値）は、 0° を超えて 18° 以下、 18° 以上 36° 以下、 36° 以上 54° 以下、 54° 以上 72° 以下、および、 72° 以上 90° 以下のうちのいずれか 1 つの範囲に属する値を有していてもよい。ボディ領域 3 2 の角度（絶対値）は、 $30^\circ \pm 5^\circ$ 、 $45^\circ \pm 5^\circ$ 、および、 $60^\circ \pm 5^\circ$ のうちのいずれか 1 つの範囲に属する値に設定されてもよい。
- [0374] 前述の複数のソース領域 3 3 および複数のコンタクト領域 3 4 は、対応するボディ領域 3 2 の延在方向に沿って形成され、積層方向に対応するボディ領域 3 2 の一部を挟んで複数の第 2 反転コラム 1 6 および複数の第 2 非反転コラム 1 7 にそれぞれ対向している。
- [0375] 複数のゲート構造 3 5 は、この形態では、第 1 反転コラム 1 4 の第 1 配列方向 $D a 1$ に間隔を空けて配列され、第 1 反転コラム 1 4 の第 1 延在方向 $D e 1$ に延びている。つまり、複数のゲート構造 3 5 は、複数の第 2 反転コラ

ム 1 6 および複数の第 2 非反転コラム 1 7 に直交している。この例では、第 1 配列方向 $D a 1$ が a 軸方向（第 1 方向 X ）であり、第 1 延在方向 $D e 1$ が m 軸方向（第 2 方向 Y ）である。

[0376] 複数のゲート構造 3 5 は、積層方向に複数の第 1 反転コラム 1 4 に 1 対 1 対応の関係で対向していてもよい。むしろ、各ゲート構造 3 5 は、積層方向に複数の第 1 反転コラム 1 4 に対向していてもよい。複数のゲート構造 3 5 は、積層方向に複数の第 1 非反転コラム 1 5 に 1 対 1 対応の関係で対向していてもよい。

[0377] むろん、各ゲート構造 3 5 は、積層方向に複数の第 1 非反転コラム 1 5 に対向していてもよい。複数のゲート構造 3 5 は、複数の第 1 反転コラム 1 4 から第 1 配列方向 $D a 1$ にずれて配列され、積層方向に第 1 反転コラム 1 4 および第 1 非反転コラム 1 5 のいずれか一方または双方に対向していてもよい。

[0378] むろん、複数のゲート構造 3 5 の配列方向および延在方向は、複数の第 1 反転コラム 1 4（ボディ領域 3 2）の第 1 配列方向 $D a 1$ および第 1 延在方向 $D e 1$ に応じて変更される。したがって、第 1 配列方向 $D a 1$ が m 軸方向であり、第 1 延在方向 $D e 1$ が a 軸方向であってもよい。また、第 1 配列方向 $D a 1$ が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であり、第 1 延在方向 $D e 1$ が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であってもよい。

[0379] むろん、複数のゲート構造 3 5 の配列方向は、第 1 配列方向 $D a 1$ および第 2 配列方向 $D 2$ 以外の方向であってもよい。また、複数のゲート構造 3 5 の延在方向は、第 1 延在方向 $D e 1$ および第 2 延在方向 $D e 2$ 以外の方向であってもよい。つまり、複数のゲート構造 3 5 は、平面視において複数の第 1 反転コラム 1 4 および複数の第 2 反転コラム 1 6 の双方に交差していてもよい。この場合、複数のゲート構造 3 5 の配列方向が a 軸方向および m 軸方向の一方であり、複数のゲート構造 3 5 の延在方向が a 軸方向および m 軸方向の他方である形態は妨げられない。

[0380] たとえば、ゲート構造 3 5 の延在方向および第 2 延在方向 $D e 2$ の間の角

度（絶対値）は、 0° を超えて 90° 以下であってもよい。ゲート構造 35 の角度（絶対値）は、 0° を超えて 18° 以下、 18° 以上 36° 以下、 36° 以上 54° 以下、 54° 以上 72° 以下、および、 72° 以上 90° 以下のうちのいずれか 1 つの範囲に属する値を有していてもよい。ゲート構造 35 の角度（絶対値）は、 $30^\circ \pm 5^\circ$ 、 $45^\circ \pm 5^\circ$ 、および、 $60^\circ \pm 5^\circ$ のうちのいずれか 1 つの範囲に属する値に設定されてもよい。

[0381] 複数のゲート構造 35 は、この形態では、隣り合う 2 つのボディ領域 32 に跨るようにそれぞれ配置され、一方および他方のボディ領域 32 内に位置された複数のソース領域 33 をそれぞれ被覆している。また、複数のゲート構造 35 は、積層方向に複数の第 2 反転コラム 16 および複数の第 2 非反転コラム 17 にそれぞれ対向している。

[0382] 図 19 は、SiC 半導体装置 1A の製造に使用されるウエハ 50 を示す概略図である。ウエハ 50 は、ベース層 6 の基材であり、SiC 単結晶を含む。ウエハ 50 は、扁平な円盤状に形成されている。むろん、ウエハ 50 は、扁平な直方体形状に形成されていてもよい。ウエハ 50 は、一方側の第 1 ウエハ主面 51、他方側の第 2 ウエハ主面 52、ならびに、第 1 ウエハ主面 51 および第 2 ウエハ主面 52 を接続するウエハ側面 53 を有している。

[0383] 第 1 ウエハ主面 51 はベース層 6 の上端に対応し、第 2 ウエハ主面 52 はベース層 6 の下端に対応している。第 1 ウエハ主面 51 および第 2 ウエハ主面 52 は、SiC 単結晶の c 面によって形成されている。第 1 ウエハ主面 51 は SiC 単結晶のシリコン面によって形成され、第 2 ウエハ主面 52 は SiC 単結晶のカーボン面によって形成されている。ウエハ 50（第 1 ウエハ主面 51 および第 2 ウエハ主面 52）は、前述のオフ方向 Doff およびオフ角 θ_{off} を有している。

[0384] ウエハ 50 は、ウエハ側面 53 において SiC 単結晶の結晶方位を示す目印 54 を有している。目印 54 は、オリエンテーションフラットおよびオリエンテーションノッチのいずれか一方または双方を含んでいてもよい。オリエンテーションフラットは、平面視において直線状に切り欠かれた切り欠き

部からなる。オリエンテーションノッチは、平面視において第1ウエハ主面51の中央部に向けて凹形状（たとえば先細り形状）に切り欠かれた切り欠き部からなる。

[0385] 目印54は、m軸方向に延びる第1のオリエンテーションフラット、および、a軸方向に延びる第2のオリエンテーションフラットのいずれか一方または双方を含んでもよい。目印54は、m軸方向に窪んだオリエンテーションノッチ、および、a軸方向に窪んだオリエンテーションノッチのいずれか一方または双方を含んでもよい。図19では、平面視においてa軸方向に延びるオリエンテーションフラットが示されている。

[0386] たとえば、ウエハ50には、アライメントマーク等によって複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56が設定される。各デバイス領域55は、SiC半導体装置1Aに対応する領域である。複数のデバイス領域55は、平面視において四角形状にそれぞれ設定されている。

[0387] 複数のデバイス領域55は、この形態では、平面視において第1方向Xおよび第2方向Yに沿って行列状に設定される。複数のデバイス領域55は、平面視において第1ウエハ主面51の周縁から内方に間隔を空けてそれぞれ設定されている。複数の切断予定ライン56は、複数のデバイス領域55を区画するように第1方向Xおよび第2方向Yに沿って延びる格子状に設定されている。

[0388] 図20は、SiC半導体装置1Aの製造方法例を示すフローチャートである。図21A～図21Hは、SiC半導体装置1Aの製造方法例を示す断面斜視図である。図22A～図22Bは、結晶方位の測定工程を説明するための概略図である。図23A～図23Bは、イオン注入工程を説明するための概略図である。図21A～図21Hは、1つのデバイス領域55の活性領域10の一部の断面斜視図を示している。

[0389] まず、図21Aを参照して、前述のウエハ50の用意工程が実施される（図20のステップS1）。次に、n型のバッファ層26（図13E参照）の形成工程が実施されるか否かの判定工程が実施される（図20のステップS

2)。バッファ層26が形成される場合(図20のステップS2: YES)、バッファ層26が、エピタキシャル成長法によって第1ウエハ主面51(ウエハ50)を起点に形成される(図20のステップS3)。バッファ層26の形成工程が実施されない場合(図20のステップS2: NO)、この工程は省略される。

[0390] 次に、図21Bを参照して、n型の第1層8の形成工程が実施される(図20のステップS4)。バッファ層26の形成工程が省略された場合、第1層8は、エピタキシャル成長法によって第1ウエハ主面51(ウエハ50)を起点に形成される。バッファ層26が形成された場合、第1層8は、エピタキシャル成長法によってバッファ層26を起点に形成される。この場合、第1層8は、バッファ層26の形成工程後、バッファ層26の形成工程を利用してバッファ層26から連続的に結晶成長されることによって形成されてもよい。

[0391] 次に、第1層8の結晶方位の測定工程が実施される(図20のステップS5)。第1層8の結晶方位は、第1層8のオフ角 θ_{off} を測定する工程を含む。つまり、この工程は、第1層8の第1軸チャンネルCH1の結晶方位を測定する工程を含む。

[0392] ウエハ50は結晶塊であるインゴット(SiCインゴット)から切り出されるが、プロセス誤差に起因してオフ角 θ_{off} に誤差が生じるリスクがある。ウエハ50のオフ角 θ_{off} に誤差が生じた場合、第1層8のオフ角 θ_{off} にもプロセス誤差が生じ、チャネリング注入工程時の障害になる。したがって、チャネリング注入工程に先立ってオフ角 θ_{off} のデータ(情報)が取得され、当該オフ角 θ_{off} のデータ(情報)に基づいてチャネリング注入工程が実施されることが好ましい。

[0393] 図22Aを参照して、この工程では、X線回折装置57を用いたX線回折法(所謂 $\omega-2\theta$ 測定法)によって第1層8の結晶方位が測定される。X線回折装置57は、「XRD(X-ray Diffraction)装置」と称されてもよい。

[0394] X線回折装置57は、照射部58および検出部59を含み、ロッキングカ

ープ測定法を実行する。照射部58は、第1層8の上端（ウエハ50の第1ウエハ主面51）に対して所定の入射角 ω を有する入射X線L1を照射する。入射角 ω は、入射X線L1および第1層8の上端（ウエハ50の第1ウエハ主面51）の間の角度によって定義される。

[0395] 検出部59は、ウエハ50に対する入射X線L1の照射位置に対して回折角 2θ （ θ はブラッグ角）の角度位置に配置され、回折X線L2を検出する。回折角 2θ は、入射X線L1の入射方向および回折X線L2の回折方向の間の角度である。

[0396] ロッキングカーブ測定法では、回折角 2θ が固定された状態で、入射角 ω が微小な角度範囲で変移させられ、回折X線L2の強度（回折X線L2の強度プロファイル）を表すロッキングカーブが測定される。ロッキングカーブは、回折X線L2の強度を縦軸に有し、入射角 ω を横軸に有している。入射角 ω は、回折X線L2の強度がピーク値を取る角度位置で求められる。

[0397] この工程では、第1層8の上端（ウエハ50の第1ウエハ主面51）の一箇所（たとえば中央部）についてのみ、ロッキングカーブ測定法が実施される。オフ角 θ_{off} の面内ばらつきが想定される場合、ロッキングカーブ測定法は第1層8の上端（ウエハ50の第1ウエハ主面51）の複数箇所（たとえば中央部および周縁部）について実施されてもよい。

[0398] 図22Bでは、第1層8の上端の複数箇所（ここでは5か所）についてロッキングカーブ測定法を実施した場合の測定箇所が示されている。第1層8のオフ角 θ_{off} は、ここでは、約 4° に設定されている。図22Bでは、第1～第5測定点P01～P05が示されている。

[0399] 第1測定点P01は、第1層8の中央部に設定されている。第2測定点P02は、第1測定点P01から第2方向Yの一方側（目印54とは反対側）に間隔を空けて第1層8の周縁部に設定されている。第3測定点P03は、第1測定点P01から第1方向Xの一方側（目印54に対して右側）に間隔を空けて第1層8の周縁部に設定されている。

[0400] 第4測定点P04は、第1測定点P01から第2方向Yの他方側（目印5

4側)に間隔を空けて第1層8の周縁部に設定されている。第5測定点P○5は、第1測定点P○1から第1方向Xの他方側(目印54に対して左側)に間隔を空けて第1層8の周縁部に設定されている。

[0401] 第1~第5測定点P○1~P○5における入射角 ω 、回折角 2θ およびオフ角 θ_{off} の測定結果は、以下の表1(Table 1)の通りである。オフ角 θ_{off} は、入射角 ω および回折角 2θ を用いて「 $\omega - (2\theta \times 1/2)$ 」の計算式によって求められる。

[表1]

Table 1

Measuring point	$\omega (^{\circ})$	$2\theta (^{\circ})$	$\theta_{off} (^{\circ})$
Po1	21.836	35.606	4.033
Po2	21.830	35.609	4.025
Po3	21.841	35.611	4.035
Po4	21.837	35.609	4.033
Po5	21.856	35.606	4.053
Average			4.036
Standard deviation			0.009

[0402] 表1に示される通り、第1~第5測定点P○1~P○5のオフ角 θ_{off} の平均値は 4.036° であり、これらのオフ角 θ_{off} の標準偏差は 0.009° ($\pm 0.01^{\circ}$)であった。このことから、第1層8の上端(ウエハ50の第1ウエハ主面51)に生じるオフ角 θ_{off} の面内ばらつきは極めて小さく、チャネリング注入工程に支障を来たさない程度であることが理解される。

[0403] したがって、第1層8の上端(ウエハ50の第1ウエハ主面51)に対する測定箇所は少なくとも一箇所没有问题ないことが理解される。たとえば、測

定箇所は、第1～第5測定点P○1～P○5のいずれか1つまたは複数（全部）であってもよい。たとえば、測定箇所は、第1測定点P○1のみであってもよい。測定箇所（測定回数）を減らすことにより、製造工数（製造コスト）が削減される。

[0404] むろん、第1層8の上端（ウエハ50の第1ウエハ主面51）の複数箇所についてオフ角 θ offを測定し、チャネリング注入工程においてオフ角 θ offの面内ばらつきに応じた注入角度が設定されてもよい。この場合、製造工数（製造コスト）が増大するが、第1層8に形成される第1反転コラム14の面内誤差が適切に抑制される。

[0405] 第1層8のオフ角 θ offは、ウエハ50のオフ角 θ offおよびバッファ層26のオフ角 θ offにはほぼ一致している。したがって、結晶方位の測定工程は、第1層8の形成工程に先立ってウエハ50またはバッファ層26に対して実施されてもよい。ただし、正確を期す観点から、結晶方位の測定工程は第1層8に対して実施されることが好ましい。

[0406] 次に、図21Cを参照して、第1不純物領域12の形成工程が実施される（図20のステップS6）。第1不純物領域12の形成工程は、第1層8に対する3価元素（p型不純物）のチャネリング注入工程を含む。この工程では、3価元素が第1層8の全域に導入される。第1層8（ウエハ50）は、第1ウエハ主面51に対して所定のオフ方向Doffに所定の角度で傾斜したオフ角 θ offを有している。チャネリング注入工程は、オフ角 θ offのデータ（情報）に基づいて実施される。

[0407] 図23Aを参照して、ランダム注入法では、第1軸チャンネルCH1（オフ角 θ off）に交差する方向に3価元素が所定の注入エネルギーで第1層8に導入される（図7も併せて参照）。たとえば、ランダム注入法では、第1層8の上端（第1ウエハ主面51）に垂直な鉛直方向Zに沿って3価元素が注入される。

[0408] ランダム注入法の場合、平面視において原子列が比較的密である方向に沿って3価元素が導入されるため、3価元素は比較的浅い深さ位置において原

子列に衝突する。そのため、第1層8の比較的深い深さ位置に対する3価元素の導入が原子列によって阻害される。その結果、緩慢部22を有さない第1反転コラム14が形成される（図7も併せて参照）。

[0409] 一方、図23Bを参照して、チャネリング注入法では、第1層8に対する3価元素の注入角度が制御され、第1軸チャンネルCH1（この形態ではSiC単結晶のc軸）に沿って3価元素が所定の注入エネルギーで第1層8に導入される（図6A～図6Eも併せて参照）。この場合、第1層8に対する3価元素の注入角度、および、3価元素の注入角度に対する第1層8の傾斜角度のいずれか一方または双方が調節される。

[0410] たとえば、ウエハ50が水平に支持され、3価元素が第1軸チャンネルCH1に沿って第1層8に導入されてもよい。むしろ、ウエハ50が水平に対してオフ角 θ だけ傾斜した状態で支持され、3価元素が第1軸チャンネルCH1に沿って第1層8に導入されてもよい。3価元素の注入エネルギーおよび3価元素の注入温度（ウエハ50の温度）の任意の組み合わせによって、所定の厚さを有する複数の第1反転コラム14が所定の深さ位置に形成される（図6A～図6Eも併せて参照）。

[0411] 3価元素の注入エネルギーは、100KeV以上2000KeV以下であってもよい。注入エネルギーは、100KeV以上250KeV以下、250KeV以上500KeV以下、500KeV以上750KeV以下、750KeV以上1000KeV以下、1000KeV以上1250KeV以下、1250KeV以上1500KeV以下、1500KeV以上1750KeV以下、および、1750KeV以上2000KeV以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0412] 3価元素の注入温度は、0℃以上1500℃以下の範囲で調整されてもよい。注入温度は、0℃以上25℃以下、25℃以上50℃以下、50℃以上100℃以下、100℃以上250℃以下、250℃以上500℃以下、500℃以上750℃以下、750℃以上1000℃以下、1000℃以上1250℃以下、および、1250℃以上1500℃以下のいずれか1つの範

囲に属する値を有していてもよい。

- [0413] 3価元素の注入角度は、第1軸チャンネルCH1に沿う軸（この形態ではSiC単結晶のc軸）を基準（0°）として±2°の範囲内に設定されることが好ましい。3価元素の注入角度は、第1軸チャンネルCH1に沿う軸（この形態ではSiC単結晶のc軸）を基準（0°）として±1°の範囲内に設定されることが特に好ましい。
- [0414] チャネリング注入法の場合、3価元素が平面視において原子列が比較的疎である第1軸チャンネルCH1に沿って導入される。3価元素は、チャネリング効果によって小角散乱を繰り返しながら第1軸チャンネルCH1内を進行し、第1層8の比較的深い深さ位置まで到達する。つまり、チャネリング注入法の場合、SiC単結晶の原子列に対する3価元素の衝突確率が低減される。
- [0415] この場合、炭素よりも重たい重元素に属する3価元素が第1層8に導入されることが好ましい。つまり、3価元素は、ホウ素以外の3価元素（アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種）であることが好ましい。3価元素は、この形態では、アルミニウムである。
- [0416] 3価元素の注入工程後、アニール法によって、3価元素が電氣的に活性化されると同時に、第1層8に生じた格子欠陥等が修復されてもよい。第1層8に対するアニール温度は、500℃以上2000℃以下であってもよい。
- [0417] 次に、図21Dを参照して、所定パターンを有する第1マスク60の形成工程が実施される（図20のステップS7）。第1マスク60は、有機マスク（レジストマスク）であることが好ましい。第1マスク60は、第1層8の上端の上に配置され、第1層8において複数の第1反転コラム14を形成すべき領域を露出させる複数の第1開口61を有している。
- [0418] 具体的には、複数の第1開口61は、第1層8の上端の全面において、第1配列方向Da1に間隔を空けて形成され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ区画される。つまり、複数の第1開口61は、複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56を第1延在方向De1に横切り、

複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56をストライプ状に露出させている。複数の第1開口61は、各デバイス領域55において、第1層8の上端うち活性領域10内に位置する部分および外周領域11内に位置する部分の双方を露出させている。

[0419] 次に、図21Eを参照して、複数の第1反転コラム14の形成工程が実施される(図20のステップS8)。複数の第1反転コラム14の形成工程は、第1層8に対する5価元素(n型不純物)のチャネリング注入工程を含む。チャネリング注入工程は、前述のオフ角 θ_{off} のデータ(情報)に基づいて実施される。

[0420] チャネリング注入法では、第1層8に対する5価元素の注入角度が制御され、第1軸チャンネルCH1(この形態ではSiC単結晶のc軸)に沿って5価元素が所定の注入エネルギーで第1層8に導入される(図6A~図6Eも併せて参照)。この場合、第1層8に対する5価元素の注入角度、および、5価元素の注入角度に対する第1層8の傾斜角度のいずれか一方または双方が調節される。

[0421] たとえば、ウエハ50が水平に支持され、5価元素が第1軸チャンネルCH1に沿って第1層8に導入されてもよい。むしろ、ウエハ50が水平に対してオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜した状態で支持され、5価元素が第1軸チャンネルCH1に沿って第1層8に導入されてもよい。5価元素の注入エネルギーおよび5価元素の注入温度の任意の組み合わせによって、所定の厚さを有する複数の第1反転コラム14が所定の深さ位置に形成される(図6A~図6Eも併せて参照)。

[0422] 5価元素の注入エネルギーは、100KeV以上2000KeV以下であってもよい。注入エネルギーは、100KeV以上250KeV以下、250KeV以上500KeV以下、500KeV以上750KeV以下、750KeV以上1000KeV以下、1000KeV以上1250KeV以下、1250KeV以上1500KeV以下、1500KeV以上1750KeV以下、および、1750KeV以上2000KeV以下のいずれか1つの範

囲に属する値を有していてもよい。

[0423] 第1反転コラム14に係る注入エネルギーは、第1不純物領域12に係る注入エネルギーとほぼ等しくてもよいし、第1不純物領域12に係る注入エネルギーと異なってもよい。第1反転コラム14に係る注入エネルギーは、第1不純物領域12に係る注入エネルギー以上であってもよい。また、第1反転コラム14に係る注入エネルギーは、第1不純物領域12に係る注入エネルギー未満であってもよい。

[0424] 5価元素の注入温度は、0℃以上1500℃以下の範囲で調整されてもよい。注入温度は、0℃以上25℃以下、25℃以上50℃以下、50℃以上100℃以下、100℃以上250℃以下、250℃以上500℃以下、500℃以上750℃以下、750℃以上1000℃以下、1000℃以上1250℃以下、および、1250℃以上1500℃以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0425] 第1反転コラム14に係る注入温度は、第1不純物領域12に係る注入温度とほぼ等しくてもよいし、第1不純物領域12に係る注入温度と異なってもよい。第1反転コラム14に係る注入温度は、第1不純物領域12に係る注入温度以上であってもよい。また、第1反転コラム14に係る注入温度は、第1不純物領域12に係る注入温度未満であってもよい。

[0426] 5価元素の注入角度は、第1軸チャンネルCH1に沿う軸（この形態ではSiC単結晶のc軸）を基準（0°）として±2°の範囲内に設定されることが好ましい。5価元素の注入角度は、第1軸チャンネルCH1に沿う軸（この形態ではSiC単結晶のc軸）を基準（0°）として±1°の範囲内に設定されることが特に好ましい。

[0427] チャネリング注入法の場合、5価元素が平面視において原子列が比較的疎である第1軸チャンネルCH1に沿って導入される。5価元素は、チャネリング効果によって小角散乱を繰り返しながら第1軸チャンネルCH1内を進行し、第1層8の比較的深い深さ位置まで到達する。つまり、チャネリング注入法の場合、SiC単結晶の原子列に対する5価元素の衝突確率が低減される

。5価元素は、ヒ素またはアンチモンであることが好ましい。

[0428] 第1延在方向D e 1は、a軸方向またはm軸方向であってもよい。第1延在方向D e 1は、a軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。第1延在方向D e 1がm軸方向に一致している場合（図8 A等も併せて参照）、5価元素は第1配列方向D a 1に沿う断面視において複数の第1開口6 1を介して第1層8の上端に対してほぼオフ角 θ o f f分だけ傾斜して第1層8内に導入される。

[0429] 第1延在方向D e 1がa軸方向（オフ方向D o f f）に一致している場合（図10 A等も併せて参照）、5価元素は第1配列方向D a 1に沿う断面視において複数の第1開口6 1を介して第1層8の上端に対してほぼ垂直に第1層8内に導入される。したがって、複数の第1反転コラム1 4が傾斜した姿勢で第1層8内に形成されることが抑制される。また、複数の第1開口6 1の壁面が5価元素の入射経路に対する遮蔽物となることが抑制される。

[0430] 第1延在方向D e 1がa軸方向およびm軸方向以外の方向である場合（図12 A～図12 C等も併せて参照）、SiC単結晶の結晶方位に対する複数の第1反転コラム1 4のアライメントずれを厳密に制御する必要がなくなる。

[0431] 5価元素の注入工程後、アニール法によって、5価元素が電気的に活性化されると同時に、第1層8に生じた格子欠陥等が修復されてもよい。第1層8に対するアニール温度は、500℃以上2000℃以下であってもよい。これにより、複数の第1反転コラム1 4および複数の第1非反転コラム1 5が形成されると同時に、第1スーパージャクション構造S J 1が形成される。

[0432] 複数の第1反転コラム1 4および複数の第1非反転コラム1 5は、第1層8の全域に渡って第1配列方向D a 1に間隔を空けて配列され、かつ、第1延在方向D e 1に帯状に延びるようにそれぞれ形成される。つまり、複数の第1反転コラム1 4および複数の第1非反転コラム1 5は、複数のデバイス領域5 5および複数の切断予定ライン5 6を第1延在方向D e 1に横切るよ

うにストライプ状に形成される。複数の第1反転コラム14の形成工程後、第1マスク60は除去される。

[0433] 複数の第1反転コラム14に係るアニール法は、前述の第1不純物領域12に係るアニール法を兼ねていてもよい。この場合、第1反転コラム14の形成工程前における第1不純物領域12に係るアニール法は省略されてもよい。

[0434] 次に、第1層8の厚さ調節工程が実施されるか否かの判定工程が実施される(図20のステップS9)。第1層8の厚さが調節される場合(図20のステップS9: YES)、第1層8が上端側から薄化される(図20のステップS10)。

[0435] 厚さ調節工程(薄化工程)は、研削法によって第1層8の上端部を部分的に除去する工程を含んでいてもよい。研削法は、機械研磨法および/または化学機械研磨法であってもよい。厚さ調節工程は、エッチング法によって第1層8の上端部を部分的に除去する工程を含んでいてもよい。エッチング法は、ウエットエッチング法および/またはドライエッチング法であってもよい。

[0436] 厚さ調節工程は、第1層8の上端から複数の第1反転コラム14および複数の第1非反転コラム15を露出させる工程を含んでいてもよい(図13Cも併せて参照)。つまり、厚さ調節工程は、複数の第1反転コラム14(複数の第1非反転コラム15)の漸増部20の一部または全部を取り除く工程を含んでいてもよい。厚さ調節工程が実施されない場合(図20のステップS9: NO)、この工程は省略される。

[0437] 次に、複数の反転中間コラム18(図13A参照)の形成工程および複数の非反転中間コラム19(図13B参照)の形成工程のいずれか一方または双方が実施されるか否かの判定工程が実施される(図20のステップS11)。複数の反転中間コラム18が形成される場合(図20のステップS11: YES)、第1層8の表層部に複数の反転中間コラム18が形成される(図20のステップS12)。

- [0438] 複数の反転中間コラム18の形成工程は、所定パターンを有するマスク（図示せず）を第1層8の上端の上に配置する工程を含む。マスク（図示せず）は、有機マスク（レジストマスク）であることが好ましい。マスク（図示せず）は、第1層8において複数の第1反転コラム14が形成された領域をそれぞれ露出させる複数の開口を有している。
- [0439] 具体的には、複数の開口は、第1層8の上端の全面において、第1配列方向Da1に間隔を空けて形成され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ区画される。つまり、複数の開口は、複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56を第1延在方向De1に横切り、複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56をストライプ状に露出させている。複数の開口は、各デバイス領域55において、第1層8の上端うち活性領域10内に位置する部分および外周領域11内に位置する部分の双方を露出させている。
- [0440] 複数の反転中間コラム18の形成工程は、マスク（図示せず）を介するランダム注入法によって、第1軸チャンネルCH1（オフ角 θ off）に交差する方向に5価元素を所定の注入エネルギーで第1層8に導入する工程を含む（図7も併せて参照）。5価元素は、第1層8内に1回または複数回導入されてもよい。5価元素が複数回導入される場合、5価元素は複数の注入エネルギーで第1層8の異なる深さ位置に多段階的に導入されてもよい。
- [0441] 複数の反転中間コラム18は、第1層8の全域に渡って第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、かつ、第1延在方向De1に帯状に延びるようにそれぞれ形成される。つまり、複数の反転中間コラム18は、複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56を第1延在方向De1に横切るようにストライプ状に形成される。複数の反転中間コラム18の形成工程後、マスク（図示せず）は除去される。
- [0442] 前述の第1層8の厚さ調節工程が実施されない場合、複数の反転中間コラム18の形成工程は、複数の第1反転コラム14の形成工程から連続的に実施されてもよい。この場合、前述の第1マスク60を利用して複数の反転中

間コラム 18 が形成されてもよい。

[0443] 一方、複数の非反転中間コラム 19 が形成される場合（図 20 のステップ S11 : YES）、第 1 層 8 の表層部に複数の非反転中間コラム 19 が形成される（図 20 のステップ S12）。複数の非反転中間コラム 19 の形成工程は、所定パターンを有するマスク（図示せず）を第 1 層 8 の上端の上に配置する工程を含む。マスク（図示せず）は、有機マスク（レジストマスク）であることが好ましい。マスク（図示せず）は、第 1 層 8 において複数の第 1 非反転コラム 15 が形成された領域をそれぞれ露出させる複数の開口を有している。

[0444] 具体的には、複数の開口は、第 1 層 8 の上端の全面において、第 1 配列方向 D_{a1} に間隔を空けて形成され、第 1 延在方向 D_{e1} に延びる帯状にそれぞれ区画される。つまり、複数の開口は、複数のデバイス領域 55 および複数の切断予定ライン 56 を第 1 延在方向 D_{e1} に横切り、複数のデバイス領域 55 および複数の切断予定ライン 56 をストライプ状に露出させている。複数の開口は、各デバイス領域 55 において、第 1 層 8 の上端うち活性領域 10 内に位置する部分および外周領域 11 内に位置する部分の双方を露出させている。

[0445] 複数の非反転中間コラム 19 の形成工程は、マスク（図示せず）を介するランダム注入法によって、第 1 軸チャンネル CH1（オフ角 θ_{off} ）に交差する方向に 3 価元素を所定の注入エネルギーで第 1 層 8 に導入する工程を含む（図 7 も併せて参照）。3 価元素は、第 1 層 8 内に 1 回または複数回導入されてもよい。3 価元素が複数回導入される場合、3 価元素は複数の注入エネルギーで第 1 層 8 の異なる深さ位置に多段階的に導入されてもよい。

[0446] 複数の非反転中間コラム 19 は、第 1 層 8 の全域に渡って第 1 配列方向 D_{a1} に間隔を空けて配列され、かつ、第 1 延在方向 D_{e1} に帯状に延びるようにそれぞれ形成される。つまり、複数の非反転中間コラム 19 は、複数のデバイス領域 55 および複数の切断予定ライン 56 を第 1 延在方向 D_{e1} に横切るようにストライプ状に形成される。複数の非反転中間コラム 19 の形

成工程後、マスク（図示せず）は除去される。

[0447] 次に、図21Fを参照して、第2層9の形成工程が実施される（図20のステップS13）。第2層9は、エピタキシャル成長法によって第1層8を起点に形成される。この後、図20のステップS4と同様の方法によって、第2層9の結晶方位（オフ角 θ off）の測定工程が実施されてもよい（図22Aおよび図22Bも併せて参照）。

[0448] 次に、図21Gを参照して、第2不純物領域13の形成工程が実施される（図20のステップS14）。第2不純物領域13の形成工程は、第2層9に対する3価元素（p型不純物）のチャネリング注入工程を含む。この工程では、3価元素が第2層9の全域に導入される。チャネリング注入工程は、前述のオフ角 θ offのデータ（情報）に基づいて実施される。

[0449] チャネリング注入法では、第2層9に対する3価元素の注入角度が制御され、第2軸チャンネルCH2（この形態ではSiC単結晶のc軸）に沿って3価元素が所定の注入エネルギーで第2層9に導入される（図6A～図6Eも併せて参照）。この場合、第2層9に対する3価元素の注入角度、および、3価元素の注入角度に対する第2層9の傾斜角度のいずれか一方または双方が調節される。

[0450] たとえば、ウエハ50が水平に支持され、3価元素が第2軸チャンネルCH2に沿って第2層9に導入されてもよい。むしろ、ウエハ50が水平に対してオフ角 θ off分だけ傾斜した状態で支持され、3価元素が第2軸チャンネルCH2に沿って第2層9に導入されてもよい。3価元素の注入エネルギーおよび3価元素の注入温度の任意の組み合わせによって、所定の厚さを有する複数の第1反転コラム14が所定の深さ位置に形成される（図6A～図6Eも併せて参照）。

[0451] 3価元素の注入エネルギーは、100KeV以上2000KeV以下であってもよい。注入エネルギーは、100KeV以上250KeV以下、250KeV以上500KeV以下、500KeV以上750KeV以下、750KeV以上1000KeV以下、1000KeV以上1250KeV以下、1

250KeV以上1500KeV以下、1500KeV以上1750KeV以下、および、1750KeV以上2000KeV以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0452] 第2不純物領域13に係る注入エネルギーは、第1不純物領域12に係る注入エネルギーとほぼ等しくてもよいし、第1不純物領域12に係る注入エネルギーと異なってもよい。第2不純物領域13に係る注入エネルギーは、第1不純物領域12に係る注入エネルギー以上であってもよい。また、第2不純物領域13に係る注入エネルギーは、第1不純物領域12に係る注入エネルギー未満であってもよい。

[0453] 3価元素の注入温度は、0℃以上1500℃以下の範囲で調整されてもよい。注入温度は、0℃以上25℃以下、25℃以上50℃以下、50℃以上100℃以下、100℃以上250℃以下、250℃以上500℃以下、500℃以上750℃以下、750℃以上1000℃以下、1000℃以上1250℃以下、および、1250℃以上1500℃以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0454] 第2不純物領域13に係る注入温度は、第1不純物領域12に係る注入温度とほぼ等しくてもよいし、第1不純物領域12に係る注入温度と異なってもよい。第2不純物領域13に係る注入温度は、第1不純物領域12に係る注入温度以上であってもよい。また、第2不純物領域13に係る注入温度は、第1不純物領域12に係る注入温度未満であってもよい。

[0455] 3価元素の注入角度は、第2軸チャンネルCH2に沿う軸（この形態ではSiC単結晶のc軸）を基準（0°）として±2°の範囲内に設定されることが好ましい。3価元素の注入角度は、第2軸チャンネルCH2に沿う軸（この形態ではSiC単結晶のc軸）を基準（0°）として±1°の範囲内に設定されることが特に好ましい。

[0456] チャネリング注入法の場合、3価元素が平面視において原子列が比較的疎である第2軸チャンネルCH2に沿って導入される。3価元素は、チャネリング効果によって小角散乱を繰り返しながら第2軸チャンネルCH2内を進行し

、第2層9の比較的深い深さ位置まで到達する。つまり、チャネリング注入法の場合、SiC単結晶の原子列に対する3価元素の衝突確率が低減される。

[0457] この場合、炭素よりも重たい重元素に属する3価元素が第2層9に導入されることが好ましい。つまり、3価元素は、ホウ素以外の3価元素（アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種）であることが好ましい。3価元素は、この形態では、アルミニウムである。

[0458] 3価元素の注入工程後、アニール法によって、3価元素が電氣的に活性化されると同時に、第2層9に生じた格子欠陥等が修復されてもよい。第2層9に対するアニール温度は、500℃以上2000℃以下であってもよい。第2不純物領域13に係るアニール法は、前述の第1不純物領域12に係るアニール法および第1反転コラム14に係るアニール法を兼ねていてもよい。この場合、第2不純物領域13の形成工程前における第1不純物領域12に係るアニール法および第1反転コラム14に係るアニール法は省略されてもよい。

[0459] 次に、図21Hを参照して、所定パターンを有する第2マスク62の形成工程が実施される（図20のステップS15）。第2マスク62は、有機マスク（レジストマスク）であることが好ましい。第2マスク62は、第2層9の上端の上に配置され、第2層9において複数の第2反転コラム16を形成すべき領域を露出させる複数の第2開口63を有している。

[0460] 具体的には、複数の第2開口63は、第2層9の上端の全面において、第1配列方向Da1とは異なる第2配列方向Da2に間隔を空けて形成され、第1延在方向De1とは異なる第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ区画される。つまり、複数の第2開口63は、複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56を第2延在方向De2に横切り、複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56をストライプ状に露出させている。複数の第2開口63は、各デバイス領域55において、第2層9の上端うち活性領域10内に位置する部分および外周領域11内に位置する部分の

双方を露出させている。

[0461] 次に、図211を参照して、複数の第2反転コラム16の形成工程が実施される(図20のステップS16)。複数の第2反転コラム16の形成工程は、第2層9に対する5価元素(n型不純物)のチャネリング注入工程を含む。チャネリング注入工程は、前述のオフ角 θ_{off} のデータ(情報)に基づいて実施される。

[0462] チャネリング注入法では、第2層9に対する5価元素の注入角度が制御され、第2軸チャンネルCH2(この形態ではSiC単結晶のc軸)に沿って5価元素が所定の注入エネルギーで第2層9に導入される(図6A~図6Eも併せて参照)。この場合、第2層9に対する5価元素の注入角度、および、5価元素の注入角度に対する第2層9の傾斜角度のいずれか一方または双方が調節される。

[0463] たとえば、ウエハ50が水平に支持され、5価元素が第2軸チャンネルCH2に沿って第2層9に導入されてもよい。むしろ、ウエハ50が水平に対してオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜した状態で支持され、5価元素が第2軸チャンネルCH2に沿って第2層9に導入されてもよい。5価元素の注入エネルギーおよび5価元素の注入温度の任意の組み合わせによって、所定の厚さを有する複数の第2反転コラム16が所定の深さ位置に形成される(図6A~図6Eも併せて参照)。

[0464] 5価元素の注入エネルギーは、100KeV以上2000KeV以下であってもよい。注入エネルギーは、100KeV以上250KeV以下、250KeV以上500KeV以下、500KeV以上750KeV以下、750KeV以上1000KeV以下、1000KeV以上1250KeV以下、1250KeV以上1500KeV以下、1500KeV以上1750KeV以下、および、1750KeV以上2000KeV以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0465] 第2反転コラム16に係る注入エネルギーは、第1反転コラム14に係る注入エネルギーとほぼ等しくてもよいし、第1反転コラム14に係る注入エネルギー

ギと異なってもよい。第2反転コラム16に係る注入エネルギーは、第1反転コラム14に係る注入エネルギー以上であってもよい。また、第2反転コラム16に係る注入エネルギーは、第1反転コラム14に係る注入エネルギー未満であってもよい。

[0466] 第2反転コラム16に係る注入エネルギーは、第2不純物領域13に係る注入エネルギーとほぼ等しくてもよいし、第2不純物領域13に係る注入エネルギーと異なってもよい。第2反転コラム16に係る注入エネルギーは、第2不純物領域13に係る注入エネルギー以上であってもよい。また、第2反転コラム16に係る注入エネルギーは、第2不純物領域13に係る注入エネルギー未満であってもよい。

[0467] 5価元素の注入温度は、0℃以上1500℃以下の範囲で調整されてもよい。注入温度は、0℃以上25℃以下、25℃以上50℃以下、50℃以上100℃以下、100℃以上250℃以下、250℃以上500℃以下、500℃以上750℃以下、750℃以上1000℃以下、1000℃以上1250℃以下、および、1250℃以上1500℃以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0468] 第2反転コラム16に係る注入温度は、第1反転コラム14に係る注入温度とほぼ等しくてもよいし、第1反転コラム14に係る注入温度と異なってもよい。第2反転コラム16に係る注入温度は、第1反転コラム14に係る注入温度以上であってもよい。また、第2反転コラム16に係る注入温度は、第1反転コラム14に係る注入温度未満であってもよい。

[0469] 第2反転コラム16に係る注入温度は、第2不純物領域13に係る注入温度とほぼ等しくてもよいし、第2不純物領域13に係る注入温度と異なってもよい。第2反転コラム16に係る注入温度は、第2不純物領域13に係る注入温度以上であってもよい。また、第2反転コラム16に係る注入温度は、第2不純物領域13に係る注入温度未満であってもよい。

[0470] 5価元素の注入角度は、第2軸チャネルCH2に沿う軸（この形態ではSiC単結晶のc軸）を基準（0°）として±2°の範囲内に設定されること

が好ましい。5価元素の注入角度は、第2軸チャンネルCH2に沿う軸（この形態ではSiC単結晶のc軸）を基準（0°）として±1°の範囲内に設定されることが特に好ましい。

[0471] チャネリング注入法の場合、5価元素が平面視において原子列が比較的疎である第2軸チャンネルCH2に沿って導入される。5価元素は、チャネリング効果によって小角散乱を繰り返しながら第2軸チャンネルCH2内を進行し、第2層9の比較的深い深さ位置まで到達する。つまり、チャネリング注入法の場合、SiC単結晶の原子列に対する5価元素の衝突確率が低減される。5価元素は、ヒ素またはアンチモンであることが好ましい。

[0472] 第2延在方向De2は、a軸方向またはm軸方向であってもよい。第2延在方向De2は、a軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。第2延在方向De2がa軸方向（オフ方向Doff）に一致している場合（図8A等も併せて参照）、5価元素は第2配列方向Da2に沿う断面視において複数の第2開口63を介して第2層9の上端に対してほぼ垂直に第2層9内に導入される。したがって、複数の第2反転コラム16が傾斜した姿勢で第2層9内に形成されることが抑制される。また、複数の第2開口63の壁面が5価元素の入射経路に対する遮蔽物となることが抑制される。

[0473] 第2延在方向De2がm軸方向に一致している場合（図10A等も併せて参照）、5価元素は第2配列方向Da2に沿う断面視において複数の第2開口63を介して第2層9の上端に対してほぼオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜して第2層9内に導入される。

[0474] 第2延在方向De2がa軸方向およびm軸方向以外の方向である場合（図12A～図12C等も併せて参照）、SiC単結晶の結晶方位に対する複数の第2反転コラム16のアライメントずれを厳密に制御する必要がなくなる。

[0475] 第1反転コラム14の第1延在方向De1がa軸方向およびm軸方向以外の方向である場合、第2延在方向De2もa軸方向およびm軸方向以外の方向であることが好ましい。この場合、複数の第1反転コラム14はa軸に対

してm軸の一方側に傾斜した第1延在角 θ_1 を有し、複数の第2反転コラム16はa軸に対してm軸の他方側に第2延在角 θ_2 を有している。

[0476] 第2延在角 θ_2 の絶対値は第1延在角 θ_1 の絶対値と異なってもよい。ただし、この場合、第2反転コラム16の形成工程における5価元素の相対的な注入角度の条件が、第1反転コラム14の形成工程における5価元素の相対的な注入角度の条件と異なる。そのため、5価元素の入射経路に対する複数の第2開口63の遮蔽面積が、5価元素の入射経路に対する複数の第1開口61の遮蔽面積と異なる。

[0477] つまり、複数の第2開口63のシャドウイングに起因する複数の第2反転コラム16のプロセス誤差が、複数の第1開口61のシャドウイングに起因する複数の第1反転コラム14のプロセス誤差と異なる。したがって、第2延在角 θ_2 の絶対値は第1延在角 θ_1 の絶対値とほぼ等しいことが好ましい。この場合、複数の第2反転コラム16のプロセス誤差が、複数の第1反転コラム14のプロセス誤差とほぼ同じになる。したがって、チャージバランスの精度が向上される。

[0478] 一例として、第1延在角 θ_1 が $+45^\circ \pm 5^\circ$ であり、第2延在角 θ_2 が $-45^\circ \pm 5^\circ$ であってもよい(図12A参照)。一例として、第1延在角 θ_1 が $+30^\circ \pm 5^\circ$ であり、第2延在角 θ_2 が $-30^\circ \pm 5^\circ$ であってもよい(図12B参照)。一例として、第1延在角 θ_1 が $+60^\circ \pm 5^\circ$ であり、第2延在角 θ_2 が $-60^\circ \pm 5^\circ$ であってもよい(図12C参照)。

[0479] 5価元素の注入工程後、アニール法によって、5価元素が電氣的に活性化されると同時に、第2層9に生じた格子欠陥等が修復されてもよい。第2層9に対するアニール温度は、 500°C 以上 2000°C 以下であってもよい。これにより、複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17が形成されると同時に、第2スーパー Junction構造SJ2が形成される。

[0480] 複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17は、第2層9の全域に渡って第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、かつ、第2

延在方向D e 2に帯状に延びるようにそれぞれ形成される。つまり、複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17は、複数のデバイス領域55および複数の切断予定ライン56を第2延在方向D e 2に横切るようにストライプ状に形成される。

[0481] 複数の第2反転コラム16に係るアニール法は、前述の第1不純物領域12に係るアニール法、第1反転コラム14に係るアニール法および第2不純物領域13に係るアニール法を兼ねていてもよい。この場合、第2不純物領域13の形成工程前における第1不純物領域12に係るアニール法、第1反転コラム14に係るアニール法および第2不純物領域13に係るアニール法は省略されてもよい。

[0482] 次に、第2層9の厚さ調節工程が実施されるか否かの判定工程が実施される(図20のステップS17)。第2層9の厚さが調節される場合(図20のステップS17: YES)、第2層9が上端側から薄化される(図20のステップS18)。

[0483] 厚さ調節工程(薄化工程)は、研削法によって第2層9の上端部を部分的に除去する工程を含んでいてもよい。研削法は、機械研磨法および/または化学機械研磨法であってもよい。第2層9の薄化工程は、エッチング法によって第2層9の上端部を部分的に除去する工程を含んでいてもよい。エッチング法は、ウエットエッチング法および/またはドライエッチング法であってもよい。

[0484] 厚さ調節工程は、第2層9の上端から複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17を露出させる工程を含んでいてもよい(図13Dも併せて参照)。つまり、厚さ調節工程は、複数の第2反転コラム16の第2漸増部20Bの一部または全部を取り除く工程を含んでいてもよい。厚さ調節工程が実施されない場合(図20のステップS17: NO)、この工程は省略される。

[0485] 次に、第2層9の上に更なるスーパージャクション構造S Jの形成工程が実施されるか否かの判定工程が実施される(図20のステップS19)。

たとえば、第3スーパージャクション構造の形成工程が実施される場合（図20のステップS19：YES）、図20のステップS13～S16と同様の工程を経て、第2層9の上に第1層8と同様の第3層が形成され、第1不純物領域12および第1反転コラム14と同様の第3不純物領域および第3反転コラムが第3層内に形成される（図20のステップS20）。

[0486] むろん、更なるスーパージャクション構造SJの形成工程に先立って、図20のステップS11と同様の工程を経て、第2層9の表層部に複数の反転中間コラム18および複数の非反転中間コラム19が形成されてもよい。更なるスーパージャクション構造SJの形成工程が実施されない場合（図20のステップS19：NO）、この工程は省略される。

[0487] 次に、トップ層30（図13Fも併せて参照）の形成工程が実施されるか否かの判定工程が実施される（図20のステップS21）。トップ層30の形成工程が実施される場合（図20のステップS21：YES）、トップ層30が、エピタキシャル成長法によって第2層9を起点に形成される（図20のステップS22）。トップ層30の形成工程が実施されない場合（図20のステップS21：NO）、この工程は省略される。

[0488] その後、MIS構造31、複数のフィールド領域38、層間絶縁膜40、ゲートパッド45、ゲート配線46、ソースパッド47、ドレインパッド48等が形成される（図20のステップS23）。そして、ウエハ50が複数の切断予定ライン56に沿って切断される。以上を含む工程を経て、1枚のウエハ50から複数のSiC半導体装置1Aが製造される。

[0489] 前述の各種判定工程（図20のステップS2、S9、S11、S17、S19およびS21）は、ウエハ50の用意工程（図20のステップS1）の段階において予め決定されていてもよい。つまり、SiC半導体装置1Aは、予め定められた製造ラインに沿って製造されてもよい。

[0490] 図24は、第2形態に係るSiC半導体装置1Bを示す平面図である。図25Aは、図24に示すXXVA-XXVA線に沿う断面図である。図25Bは、図24に示すXXVB-XXVB線に沿う断面図である。図26Aは、チップ2（第1層8

) のレイアウト例を示す平面図である。図 26B は、チップ 2 (第 2 層 9) のレイアウト例を示す平面図である。図 27 は、チップ 2 のレイアウト例を示す斜視図である。

[0491] 図 24 ~ 図 27 を参照して、SiC 半導体装置 1B は、SiC 半導体装置 1A の場合と同様、チップ 2、ベース層 6、積層部 7 (第 1 層 8 および第 2 層 9)、活性領域 10 および外周領域 11 を含む。

[0492] SiC 半導体装置 1B は、この形態では、第 1 主面 3 に形成された活性面 71 (active surface)、外周面 72 (outer surface) および第 1 ~ 第 4 接続面 73A ~ 73D (connecting surface) を含む。活性面 71、外周面 72 および第 1 ~ 第 4 接続面 73A ~ 73D は、第 1 主面 3 において活性台地 74 を区画している。

[0493] 活性面 71 が「第 1 面部」と称され、外周面 72 が「第 2 面部」と称され、第 1 ~ 第 4 接続面 73A ~ 73D が「接続面部」と称され、活性台地 74 が「メサ部」と称されてもよい。活性面 71、外周面 72 および第 1 ~ 第 4 接続面 73A ~ 73D (つまり活性台地 74) は、チップ 2 (第 1 主面 3) の構成要素と見なされてもよい。

[0494] 活性面 71 は、活性領域 10 に形成されている。つまり、活性面 71 は、第 1 主面 3 の周縁 (第 1 ~ 第 4 側面 5A ~ 5D) から内方に間隔を空けて形成されている。活性面 71 は、第 1 方向 X および第 2 方向 Y に延びる平坦面を有している。活性面 71 は、この形態では、c 面 (Si 面) によって形成されている。活性面 71 は、この形態では、平面視において第 1 ~ 第 4 側面 5A ~ 5D に平行な 4 辺を有する四角形状に形成されている。

[0495] 外周面 72 は、外周領域 11 に形成されている。つまり、外周面 72 は、活性面 71 外に形成されている。外周面 72 は、活性面 71 に対してチップ 2 の厚さ方向 (第 2 主面 4 側) に窪んでいる。具体的には、外周面 72 は、この形態では、第 2 層 9 を露出させるように第 2 層 9 の厚さ未満の深さで窪んでいる。外周面 72 は、平面視において活性面 71 に沿って帯状に延び、活性面 71 を取り囲む環状 (具体的には四角環状) に形成されている。

- [0496] 外周面72は、第1方向Xおよび第2方向Yに延びる平坦面を有し、活性面71に対してほぼ平行に形成されている。外周面72は、この形態では、c面(Si面)によって形成されている。外周面72は、第1～第4側面5A～5Dに連なっている。外周面72は、外周深さD0を有している。
- [0497] 外周深さD0は、0.1 μ m以上2 μ m以下であってもよい。外周深さD0は、0.1 μ m以上0.25 μ m以下、0.25 μ m以上0.5 μ m以下、0.5 μ m以上0.75 μ m以下、0.75 μ m以上1 μ m以下、1 μ m以上1.5 μ m以下、および、1.5 μ m以上2 μ m以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。外周深さD0は、0.1 μ m以上1.5 μ m以下であることが好ましい。
- [0498] 第1～第4接続面73A～73Dは、鉛直方向Zに延び、活性面71および外周面72を接続している。第1接続面73Aは第1側面5A側に位置され、第2接続面73Bは第2側面5B側に位置され、第3接続面73Cは第3側面5C側に位置され、第4接続面73Dは第4側面5D側に位置されている。第1接続面73Aおよび第3接続面73Cは、第1方向Xに延び、第2方向Yに対向している。第2接続面73Bおよび第4接続面73Dは、第2方向Yに延び、第1方向Xに対向している。
- [0499] 第1～第4接続面73A～73Dは、四角柱状の活性台地74が区画されるように活性面71および外周面72の間をほぼ垂直に延びていてもよい。第1～第4接続面73A～73Dは、四角錐台状の活性台地74が区画されるように活性面71から外周面72に向かって斜め下り傾斜していてもよい。このように、活性台地74は、第1主面3において第2層9に突状に区画されている。活性台地74は、第2層9のみに形成され、第1層8には形成されていない。
- [0500] SiC半導体装置1Bは、活性領域10において積層部7に形成されたp型の複数の第1反転コラム14、複数の第1非反転コラム15、複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17を含む。複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16は、第1～第3基本形態に示さ

れる特徴のうちの少なくとも1つの特徴を有していてもよい。

[0501] 複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16は、第1～第6形態例に示される複数の特徴のうちの少なくとも1つの特徴を有していてもよい。複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16は、第1～第6形態例に示される複数（2つ以上）の特徴が組み合わされた特徴を有していてもよい。

[0502] 複数の第1反転コラム14は、この形態では、平面視において少なくとも活性面71の周縁（第1～第4接続面73A～73D）によって取り囲まれた領域内にそれぞれ形成されている。複数の第1反転コラム14は、この形態では、活性領域10から第1～第4接続面73A～73Dの直下の領域を横切って外周領域11に引き出されている（図26A参照）。

[0503] つまり、複数の第1反転コラム14は、第1層8のうち活性面71に対向する部分から第1層8のうち外周面72に対向する部分に引き出されている。複数の第1反転コラム14は、外周領域11においても第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ形成されている。複数の第1反転コラム14は、外周領域11において外周面72から第1層8の下端側に間隔を空けて形成され、第2層9を挟んで外周面72に対向している。

[0504] さらに、複数の第1反転コラム14は、外周領域11から第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0505] 複数の第1非反転コラム15は、この形態では、平面視において少なくとも活性面71の周縁（第1～第4接続面73A～73D）によって取り囲まれた領域内にそれぞれ形成されている。複数の第1非反転コラム15は、この形態では、活性領域10から第1～第4接続面73A～73Dの直下の領域を横切って外周領域11に引き出されている（図26A参照）。

[0506] つまり、複数の第1非反転コラム15は、第1層8のうち活性面71に対

向する部分から第1層8のうち外周面72に対向する部分に引き出されている。複数の第1非反転コラム15は、外周領域11においても第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ形成されている。複数の第1非反転コラム15は、外周領域11において外周面72から第1層8の下端側に間隔を空けて形成され、第2層9を挟んで外周面72に対向している。

[0507] さらに、複数の第1非反転コラム15は、外周領域11から第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0508] 複数の第2反転コラム16は、この形態では、平面視において少なくとも活性面71の周縁（第1～第4接続面73A～73D）によって取り囲まれた領域内にそれぞれ形成されている。複数の第2反転コラム16は、この形態では、第2層9のうち活性領域10内に位置する部分から、第2層9のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。

[0509] 複数の第2反転コラム16のうち外周領域11に位置する部分は、複数の第1反転コラム14の厚さ未満の厚さを有していてもよい。むしろ、複数の第2反転コラム16のうち外周領域11に位置する部分は、複数の第1反転コラム14の厚さ以上の厚さを有していてもよい。

[0510] 活性領域10において、複数の第2反転コラム16の下端部は、第2層9の厚さ方向に関して、外周面72の深さ位置よりも第2層9の下端側の領域に位置されている。また、活性領域10において、複数の第2反転コラム16の上端部は、第2層9の厚さ方向に関して、外周面72よりも活性面71側の領域に位置されている。

[0511] したがって、複数の第2反転コラム16は、第1～第4接続面73A～73Dのうち第2延在方向De2に直交する少なくとも1つの接続面から露出している。複数の第2反転コラム16は、この形態では、第2接続面73Bおよび第4接続面73Dの双方から露出している。

- [0512] むろん、第2反転コラム16の中間部から第2延在方向De2に沿って第1接続面73Aが形成された場合、第2反転コラム16は第1接続面73Aの全域から露出していてもよい。また、第2反転コラム16の中間部から第2延在方向De2に沿って第3接続面73Cが形成された場合、第2反転コラム16は第3接続面73Cの全域から露出していてもよい。
- [0513] また、第2延在方向De2が第1接続面73Aおよび第3接続面73Cに直交している場合、複数の第2反転コラム16は第1接続面73Aおよび第3接続面73Cのいずれか一方または双方から露出していてもよい。また、これらの場合、第2反転コラム16は第2接続面73Bおよび第4接続面73Dのいずれか一方または双方の全域から露出していてもよい。
- [0514] 複数の第2反転コラム16は、外周領域11においても第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。複数の第2反転コラム16は、外周領域11において外周面72から露出している。
- [0515] さらに、複数の第2反転コラム16は、外周領域11から第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。
- [0516] 複数の第2非反転コラム17は、この形態では、平面視において少なくとも活性面71の周縁（第1～第4接続面73A～73D）によって取り囲まれた領域内にそれぞれ形成されている。複数の第2非反転コラム17は、この形態では、第2層9のうち活性領域10内に位置する部分から、第2層9のうち外周領域11に位置する部分に引き出されている。
- [0517] 複数の第2非反転コラム17のうち外周領域11に位置する部分は、複数の第1反転コラム14の厚さ未満の厚さを有していてもよい。むろん、複数の第2非反転コラム17のうち外周領域11に位置する部分は、複数の第1反転コラム14の厚さ以上の厚さを有していてもよい。
- [0518] 活性領域10において、複数の第2非反転コラム17の下端部は、第2層

9の厚さ方向に関して、外周面72の深さ位置よりも第2層9の下端側の領域に位置されている。また、活性領域10において、複数の第2非反転コラム17の上端部は、第2層9の厚さ方向に関して、外周面72よりも活性面71側の領域に位置されている。

[0519] したがって、複数の第2非反転コラム17は、第1～第4接続面73A～73Dのうち第2延在方向De2に直交する少なくとも1つの接続面から露出している。複数の第2非反転コラム17は、この形態では、第2接続面73Bおよび第4接続面73Dの双方から露出している。

[0520] むろん、第2非反転コラム17の中間部から第2延在方向De2に沿って第1接続面73Aが形成された場合、第2非反転コラム17は第1接続面73Aの全域から露出していてもよい。また、第2非反転コラム17の中間部から第2延在方向De2に沿って第3接続面73Cが形成された場合、第2非反転コラム17は第3接続面73Cの全域から露出していてもよい。

[0521] また、第2延在方向De2が第1接続面73Aおよび第3接続面73Cに直交している場合、複数の第2非反転コラム17は第1接続面73Aおよび第3接続面73Cのいずれか一方または双方から露出していてもよい。また、これらの場合、第2非反転コラム17は第2接続面73Bおよび第4接続面73Dのいずれか一方または双方の全域から露出していてもよい。

[0522] 複数の第2非反転コラム17は、外周領域11においても第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。複数の第2非反転コラム17は、外周領域11において外周面72から露出している。

[0523] さらに、複数の第2非反転コラム17は、外周領域11から第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0524] 図28は、活性領域10の一要素を示す平面図である。図29は、第1形態例に係るゲート構造35を示す断面斜視図である。図28および図29を

参照して、SiC半導体装置1Bは、活性領域10に形成されたMIS構造31を含む。以下の構成は、SiC半導体装置1Bの構成要素として説明されるが、MIS構造31の構成要素でもある。

[0525] SiC半導体装置1Bは、第1主面3（活性面71）の表層部に形成されたp型のボディ領域32を含む。ボディ領域32は、この形態では、活性面71に沿って延びる層状に形成されている。ボディ領域32は、活性面71の全域に形成され、第1～第4接続面73A～73Dから露出しているもよい。

[0526] ボディ領域32は、第2層9の下端から活性面71側に間隔を空けて形成され、積層方向に複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17に重なっている。ボディ領域32は、外周面72の深さ位置から活性面71側に間隔を空けて形成され、第1主面3から露出していることが好ましい。

[0527] 複数の第2非反転コラム17が第1主面3から間隔を空けて形成されている場合、ボディ領域32は活性面71および複数の第2非反転コラム17の上端部の間の領域に形成される。ボディ領域32は、複数の第2非反転コラム17（上端部）に接続されていることが好ましい。

[0528] ボディ領域32は、第2層9に対するランダム注入法によって第2層9の表層部に導入されたランダム不純物領域からなる（図7も併せて参照）。したがって、ボディ領域32は、第2軸チャネルCH2に沿う方向に関して第2反転コラム16の第2領域厚さTR2未満の厚さを有している。ボディ領域32の厚さは、第1反転コラム14の第1領域厚さTR1未満である。

[0529] ボディ領域32は、第2非反転コラム17等とは異なり、0.5 μ m以上の厚さを有する緩慢部22を有さず、0.5 μ mの範囲に漸増部20、ピーク部21および漸減部23を含む濃度勾配を有している。ボディ領域32は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有しているもよい。

[0530] ボディ領域32のp型不純物濃度は、少なくとも1種の3価元素によって

調整されていることが好ましい。ボディ領域 3 2 の 3 価元素は、第 2 非反転コラム 1 7 等の 3 価元素と同一種であってもよいし、第 2 非反転コラム 1 7 等の 3 価元素と異なる種であってもよい。ボディ領域 3 2 の 3 価元素は、ホウ素、アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも 1 種であってもよい。むしろ、ボディ領域 3 2 は、p 型のトップ層 3 0 の一部を利用して形成されていてもよい。

[0531] SiC 半導体装置 1 B は、活性領域 1 0 において第 1 主面 3 (活性面 7 1) に形成されたトレンチ電極型の複数のゲート構造 3 5 を含む。ゲート構造 3 5 は、「トレンチゲート構造」と称されてもよい。複数のゲート構造 3 5 には、制御電位としてのゲート電位が付与される。複数のゲート構造 3 5 は、ゲート電位に応答してボディ領域 3 2 内におけるチャネル (電流経路) の反転および非反転を制御する。

[0532] 複数のゲート構造 3 5 は、活性領域 1 0 において活性面 7 1 の周縁 (第 1 ~ 第 4 接続面 7 3 A ~ 7 3 D) から内方に間隔を空けて配置されている。複数のゲート構造 3 5 は、この形態では、第 2 配列方向 $D a 2$ に間隔を空けて配列され、第 2 延在方向 $D e 2$ に延びる帯状にそれぞれ形成されている。つまり、複数のゲート構造 3 5 は、この形態では、複数の第 2 反転コラム 1 6 に沿って延びるストライプ状に配列されている。

[0533] この例では、第 2 配列方向 $D a 2$ が m 軸方向 (第 2 方向 Y) であり、第 2 延在方向 $D e 2$ が a 軸方向 (第 1 方向 X) である。むしろ、複数のゲート構造 3 5 の配列方向および延在方向は、複数の第 2 反転コラム 1 6 の第 2 配列方向 $D a 2$ および第 2 延在方向 $D e 2$ に応じて変更される。したがって、第 2 配列方向 $D a 2$ が a 軸方向であり、第 2 延在方向 $D e 2$ が m 軸方向であってもよい。また、第 2 配列方向 $D a 2$ が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であり、第 2 延在方向 $D e 2$ が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であってもよい。

[0534] 複数のゲート構造 3 5 は、この形態では、複数の第 2 非反転コラム 1 7 から複数の第 2 反転コラム 1 6 側にずれて配置されている。具体的には、複数

のゲート構造35は、複数の第2非反転コラム17から間隔を空けてボディ領域32を貫通し、複数の第2反転コラム16内に1対1の対応関係で配置されている。つまり、複数のゲート構造35は、第2配列方向Da2に沿って複数の第2非反転コラム17と交互に配列され、水平方向に複数の第2非反転コラム17に対向している。

[0535] 複数のゲート構造35は、複数の第2反転コラム16の下端から活性面71側に間隔を空けて形成され、複数の第2反転コラム16の一部を挟んで複数の第1反転コラム14および複数の第2非反転コラム17に対向している。複数のゲート構造35は、複数の第2反転コラム16の厚さ範囲中間部から活性面71側に間隔を形成されていることが好ましい。むしろ、複数のゲート構造35は、複数の第2反転コラム16の厚さ範囲中間部を横切る深さ位置に形成されていてもよい。

[0536] 各ゲート構造35は、配列方向にトレンチ幅WTを有し、鉛直方向Zにトレンチ深さDTを有している。トレンチ幅WTは、第2ピッチP2（第1ピッチP1）未満である。トレンチ深さDTは、第2層9の第2厚さT2未満である。トレンチ深さDTは、前述の外周深さDOとほぼ等しいことが好ましい。むしろ、トレンチ深さDTは、外周深さDO以上であってもよいし、外周深さDO未満であってもよい。

[0537] トレンチ幅WTは、0.1 μ m以上5 μ m以下であってもよい。トレンチ幅WTは、0.1 μ m以上0.25 μ m以下、0.25 μ m以上0.5 μ m以下、0.5 μ m以上0.75 μ m以下、0.75 μ m以上1 μ m以下、1 μ m以上1.5 μ m以下、1.5 μ m以上2 μ m以下、2 μ m以上2.5 μ m以下、2.5 μ m以上3 μ m以下、3 μ m以上3.5 μ m以下、3.5 μ m以上4 μ m以下、4 μ m以上4.5 μ m以下、および、4.5 μ m以上5 μ m以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0538] トレンチ深さDTは、0.1 μ m以上5 μ m以下であってもよい。トレンチ深さDTは、0.1 μ m以上0.25 μ m以下、0.25 μ m以上0.5 μ m以下、0.5 μ m以上1 μ m以下、1 μ m以上1.5 μ m以下、1.5

μm 以上 $2\mu\text{m}$ 以下、 $2\mu\text{m}$ 以上 $3\mu\text{m}$ 以下、 $3\mu\text{m}$ 以上 $4\mu\text{m}$ 以下、および、 $4\mu\text{m}$ 以上 $5\mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。トレンチ深さDTは、 $0.1\mu\text{m}$ 以上 $1.5\mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

[0539] 各ゲート構造35は、トレンチ75、絶縁膜76および埋設電極77を含む。トレンチ75は、活性面71に形成され、ゲート構造35の壁面を区画している。絶縁膜76は、トレンチ75の壁面を被覆している。絶縁膜76は、酸化シリコン膜、窒化シリコン膜および酸窒化シリコン膜のうちの少なくとも1つを含んでいてもよい。

[0540] 絶縁膜76は、この形態では、酸化シリコン膜からなる単層構造を有している。絶縁膜76は、チップ2の酸化物からなる酸化シリコン膜を含むことが特に好ましい。埋設電極77は、絶縁膜76を挟んでトレンチ75に埋設され、絶縁膜76を挟んでチャンネルに対向している。埋設電極77は、p型またはn型の導電性ポリシリコンを含んでいてもよい。

[0541] SiC半導体装置1Bは、第1主面3（活性面71）の表層部において複数のゲート構造35の両サイドに形成された複数のソース領域33を含む。複数のソース領域33は、ボディ領域32の表層部に形成されている。複数のソース領域33は、第2層9（第2反転コラム16）よりも高いn型不純物濃度（ピーク値）を有している。複数のソース領域33は、 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 以下のn型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。

[0542] 複数のソース領域33は、平面視において対応するゲート構造35に沿って帯状に延びている。複数のソース領域33は、ボディ領域32の底部から活性面71側に間隔を空けて形成され、積層方向にボディ領域32の一部を挟んで第2反転コラム16に対向している。複数のソース領域33は、直下に位置された複数の第2反転コラム16と共に対応するゲート構造35の壁面に沿って延びるチャンネル（電流経路）を区画する。

[0543] 複数のソース領域33は、積層方向にボディ領域32の一部を挟んで第2

非反転コラム 17 に対向していてもよい。むろん、複数のソース領域 33 は、積層方向に第 2 非反転コラム 17 に対向しないように第 2 非反転コラム 17 から第 2 反転コラム 16 側（ゲート構造 35 側）に間隔を空けて形成されていてもよい。

[0544] SiC 半導体装置 1A は、第 1 主面 3（活性面 71）の表層部において複数のゲート構造 35 の間の領域に形成された複数のコンタクト領域 34 を含む。複数のコンタクト領域 34 は、ボディ領域 32 の表層部に形成されている。

[0545] 複数のコンタクト領域 34 は、複数のボディ領域 32 の p 型不純物濃度（ピーク値）よりも高い p 型不純物濃度（ピーク値）を有している。複数のコンタクト領域 34 の p 型不純物濃度（ピーク値）は、複数の第 2 非反転コラム 17 の p 型不純物濃度（ピーク値）よりも高い。複数のコンタクト領域 34 は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下の p 型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。

[0546] 複数のコンタクト領域 34 は、互いに隣り合う複数のソース領域 33 の間の領域に介在され、複数のゲート構造 35 に沿って帯状に延びている。複数のコンタクト領域 34 は、ボディ領域 32 の底部から活性面 71 側に間隔を空けて形成され、積層方向にボディ領域 32 の一部を挟んで複数の第 2 非反転コラム 17 に対向している。

[0547] 複数のコンタクト領域 34 は、積層方向にボディ領域 32 の一部を挟んで第 2 反転コラム 16 に対向していてもよい。むろん、複数のコンタクト領域 34 は、積層方向に第 2 反転コラム 16 に対向しないように第 2 反転コラム 16 から第 2 非反転コラム 17 側に間隔を空けて形成されていてもよい。

[0548] 以下、外周領域 11 側の構成が示される。図 30 は、外周領域 11 の構成を示す斜視図である。図 31A は、外周領域 11 の一要部を示す第 1 方向 X の断面図である。図 31B は、外周領域 11 の一要部を示す第 2 方向 Y の断面図である。図 30 では、複数の第 1 反転コラム 14 および複数の第 2 反転コラム 16 の図示が省略されている。

- [0549] SiC半導体装置1Bは、外周面72の表層部に形成されたp型のウェル領域78を含む。ウェル領域78は、平面視において外周面72の周縁（第1～第4側面5A～5D）から活性面71側に間隔を空けて形成され、活性面71に沿って帯状に延びている。ウェル領域78は、この形態では、平面視において活性面71を取り囲む環状（具体的には四角環状）に形成されている。ウェル領域78は、外周面72の表層部から第1～第4接続面73A～73D側に引き出され、第1～第4接続面73A～73Dの表層部に沿って延びている。
- [0550] ウェル領域78は、活性面71の表層部においてボディ領域32に電氣的に接続され、第1～第4接続面73A～73Dにおいて複数の第2非反転コラム17に電氣的に接続されている。ウェル領域78は、第2層9の下端から外周面72側に間隔を空けて形成され、第2層9の一部を挟んで第1層8に対向している。
- [0551] ウェル領域78の底部は、ゲート構造35の底壁よりも第2層9の下端側に位置されている。ウェル領域78の底部は、複数の第2非反転コラム17の下端部に対して外周面72側に位置されていることが好ましい。ウェル領域78の底部は、複数の第2非反転コラム17の厚さ範囲中間部に対して外周面72側に位置されていることが特に好ましい。
- [0552] ウェル領域78は、第2層9に対するランダム注入法によって第2層9の表層部に導入されたランダム不純物領域からなる（図7も併せて参照）。したがって、ウェル領域78は、第2軸チャンネルCH2に沿う方向に関して第2反転コラム16の第2領域厚さTR2未満の厚さを有している。ウェル領域78の厚さは、第1反転コラム14の第1領域厚さTR1未満である。
- [0553] ウェル領域78は、第2非反転コラム17等とは異なり、 $0.5\mu\text{m}$ 以上の厚さを有する緩慢部22を有さず、 $0.5\mu\text{m}$ の範囲に漸増部20、ピーク部21および漸減部23を含む濃度勾配を有している。ウェル領域78は、 $1\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 以上 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。

- [0554] ウェル領域 7 8 は、コンタクト領域 3 4 の p 型不純物濃度よりも低い p 型不純物濃度を有している。ウェル領域 7 8 の p 型不純物濃度は、ボディ領域 3 2 の p 型不純物濃度よりも高い。むろん、ウェル領域 7 8 の p 型不純物濃度は、ボディ領域 3 2 よりも低くてもよい。ウェル領域 7 8 は、第 2 層 9 と p n 接合部を形成している。
- [0555] ウェル領域 7 8 の p 型不純物濃度は、少なくとも 1 種の 3 価元素によって調整されていることが好ましい。ウェル領域 7 8 の 3 価元素は、第 2 非反転コラム 1 7 等の 3 価元素と同一種であってもよいし、第 2 非反転コラム 1 7 等の 3 価元素と異なる種であってもよい。ウェル領域 7 8 の 3 価元素は、ホウ素、アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも 1 種であってもよい。
- [0556] S i C 半導体装置 1 B は、外周領域 1 1 において外周面 7 2 の表層部に形成された少なくとも 1 つ（好ましくは 2 個以上 2 0 個以下）の p 型のフィールド領域 3 8 を含む。複数のフィールド領域 3 8 は、S i C 半導体装置 1 A の場合と同様の態様で、外周面 7 2 の表層部に形成されている。
- [0557] 複数のフィールド領域 3 8 は、この形態では、活性面 7 1 の周縁（第 1 ～第 4 接続面 7 3 A ～ 7 3 D）およびチップ 2 の周縁（第 1 ～第 4 側面 5 A ～ 5 D）から間隔を空けて配列されている。具体的には、複数のフィールド領域 3 8 は、ウェル領域 7 8 から外周面 7 2 の周縁側に間隔を空けて配列されている。複数のフィールド領域 3 8 は、平面視において活性面 7 1 に沿って帯状に延び、活性面 7 1 を取り囲む環状（具体的には四角環状）に形成されている。
- [0558] 複数のフィールド領域 3 8 は、この形態では、外周面 7 2 において積層方向に立体格子状の反転コラム（立体格子状の非反転コラム）に重なっている。つまり、複数のフィールド領域 3 8 は、複数の第 1 反転コラム 1 4 および複数の第 2 反転コラム 1 6 の複数の交差部の上方の領域に形成されている。
- [0559] 複数のフィールド領域 3 8 は、平面視において第 1 延在方向 D e 1 に延びる部分において複数の第 2 反転コラム 1 6 および複数の第 2 非反転コラム 1

7に交差し、第2延在方向De2に延びる部分において複数の第1反転コラム14および複数の第1非反転コラム15に交差している。

[0560] 各フィールド領域38は、第1延在方向De1に延びる部分において複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17に接続されている。各フィールド領域38は、第2延在方向De2に沿って延びる部分において第2反転コラム16および第2非反転コラム17のいずれか一方または双方に接続されていてもよい。

[0561] 複数のフィールド領域38は、第2層9の底部から外周面72側に間隔を空けて形成され、第2層9の一部を挟んで第1層8に対向している。複数のフィールド領域38は、ゲート構造35の底部よりも第2層9の下端側に位置されている。複数のフィールド領域38の底部は、第2反転コラム16の厚さ範囲中間部に対して外周面72側に位置されていることが好ましい。

[0562] SiC半導体装置1Bは、第1主面3を被覆する前述の層間絶縁膜40を含む。層間絶縁膜40は、第1絶縁膜41および第2絶縁膜42を含む積層構造を有している。第1絶縁膜41は、この形態では、活性面71、外周面72および第1～第4接続面73A～73Dを選択的に被覆している。第1絶縁膜41は、活性面71において絶縁膜76に接続され、埋設電極77を露出させている。

[0563] 第1絶縁膜41は、外周面72においてウェル領域78および複数のフィールド領域38を被覆している。第1絶縁膜41は、この形態では、第1～第4側面5A～5Dに連なっている。むしろ、第1絶縁膜41は、外周面72の周縁から内方に間隔を空けて形成され、外周面72の周縁部から第2層9を露出させていてもよい。第1絶縁膜41は、第1～第4接続面73A～73Dにおいてウェル領域78を被覆している。

[0564] 第2絶縁膜42は、この形態では、第1絶縁膜41を挟んで活性面71、外周面72および第1～第4接続面73A～73Dを選択的に被覆している。第2絶縁膜42は、活性領域10において複数のゲート構造35を被覆している。第2絶縁膜42は、外周領域11において第1絶縁膜41を挟んで

複数のフィールド領域38およびウェル領域78を被覆している。第2絶縁膜42は、この形態では、第1主面3の周縁（第1～第4側面5A～5D）に連なっている。むしろ、第2絶縁膜42は、外周面72の周縁から内方に間隔を空けて形成され、第1絶縁膜41と共に第1主面3の周縁部を露出させていてもよい。

[0565] SiC半導体装置1Aは、層間絶縁膜40に形成された複数のコンタクト開口43を含む。複数のコンタクト開口43は、複数のゲート構造35（埋設電極77）を露出させる複数のコンタクト開口43（図示略）、および、複数のソース領域33を露出させる複数のコンタクト開口43を含む。ソース領域33用の複数のコンタクト開口43は、隣り合う複数のゲート構造35の間の領域に形成され、複数のソース領域33および複数のコンタクト領域34を露出させている。

[0566] SiC半導体装置1Bは、第1～第4接続面73A～73Dのうちの少なくとも1つを被覆するように層間絶縁膜40内に配置されたサイドウォール構造79を含む。サイドウォール構造79は、第1絶縁膜41の上に配置され、第2絶縁膜42によって被覆されている。サイドウォール構造79は、活性面71および外周面72の間に形成された段差を緩和する。

[0567] サイドウォール構造79は、第1～第4接続面73A～73Dのうちの少なくとも1つに沿って延びる帯状に形成されている。サイドウォール構造79は、この形態では、平面視において活性面71を取り囲むように第1～第4接続面73A～73Dに沿って延びる環状（具体的には四角環状）に形成されている。

[0568] サイドウォール構造79は、外周面72に沿って膜状に延びる部分、および、第1～第4接続面73A～73Dに沿って膜状に延びる部分を有してもよい。サイドウォール構造79は、この形態では、最内のフィールド領域38から活性面71側に間隔を空けて形成され、水平方向および積層方向に第1絶縁膜41を挟んで複数の第2反転コラム16およびウェル領域78に対向している。サイドウォール構造79は、第1絶縁膜41を挟んでボデ

ィ領域32に対向していてもよい。

- [0569] SiC半導体装置1Bは、SiC半導体装置1Aの場合と同様、ゲートパッド45、複数のゲート配線46、ソースパッド47およびドレインパッド48を含む。ドレインパッド48は、第1形態例の場合と同様の形態で形成されている。
- [0570] ゲートパッド45は、この形態では、平面視において外周面72から間隔を空けて活性面71の上に配置されている。ゲートパッド45は、平面視において活性面71の一辺（この形態では第2接続面73B）の中央部に近接する領域に配置されている。むろん、ゲートパッド45は、平面視において活性面71の角部や活性面71の中央部に配置されていてもよい。
- [0571] 複数のゲート配線46は、この形態では、平面視において外周面72から間隔を空けて活性面71の上に配置されている。複数のゲート配線46は、第1ゲート配線46Aおよび第2ゲート配線46Bを含む。
- [0572] 第1ゲート配線46Aは、ゲートパッド45から第2接続面73B側に向けて引き出され、複数のゲート構造35の一部（具体的には一端部）に交差（具体的には直交）するように活性面71の周縁に沿ってライン状に延びている。第1ゲート配線46Aは、複数のコンタクト開口43を介して層間絶縁膜40を貫通し、複数のゲート構造35（埋設電極77）の一端部に電氣的に接続されている。
- [0573] 第2ゲート配線46Bは、ゲートパッド45から第4接続面73D側に向けて引き出され、複数のゲート構造35の一部（具体的には他端部）に交差（具体的には直交）するように活性面71の周縁に沿ってライン状に延びている。第2ゲート配線46Bは、複数のコンタクト開口43を介して層間絶縁膜40を貫通し、複数のゲート構造35（埋設電極77）の他端部に電氣的に接続されている。
- [0574] ソースパッド47は、この形態では、平面視において外周面72から間隔を空けて活性面71の上に配置されている。ソースパッド47は、複数のコンタクト開口43を介して層間絶縁膜40を貫通し、ボディ領域32、複数

のソース領域 3 3 および複数のコンタクト領域 3 4 に電氣的に接続されている。つまり、ソースパッド 4 7 は、ボディ領域 3 2 を介して複数の第 1 非反転コラム 1 5 および複数の第 2 非反転コラム 1 7 に電氣的に接続されている。

[0575] 図 3 2 は、第 2 形態例に係るゲート構造 3 5 を示す断面斜視図である。前述の第 1 形態例に係る複数のゲート構造 3 5 は、複数の第 2 非反転コラム 1 7 から複数の第 2 反転コラム 1 6 側にずれて配列されていた。これに対して、図 3 2 を参照して、第 2 形態例に係る複数のゲート構造 3 5 は、積層方向に複数の第 2 非反転コラム 1 7 に重なるように配列されている。複数のゲート構造 3 5 は、積層方向に複数の第 2 非反転コラム 1 7 に 1 対 1 の対応関係で重なっている。

[0576] 複数のゲート構造 3 5 は、対応する第 2 非反転コラム 1 7 に接続された底壁をそれぞれ有している。具体的には、複数のゲート構造 3 5 は、対応する第 2 非反転コラム 1 7 よりも幅広に形成され、対応する第 2 非反転コラム 1 7 に接続された底壁、および、対応する第 2 反転コラム 1 6 に接続された側壁をそれぞれ有している。

[0577] つまり、埋設電極 7 7 は、積層方向に絶縁膜 7 6 を挟んで対応する第 2 非反転コラム 1 7 に対向し、水平方向に絶縁膜 7 6 を挟んで対応する第 2 反転コラム 1 6 に対向している。前述の複数のソース領域 3 3 および複数のコンタクト領域 3 4 は、積層方向にボディ領域 3 2 の一部を挟んで対応する第 2 反転コラム 1 6 にそれぞれ対向している。

[0578] 図 3 3 は、第 3 形態例に係るゲート構造 3 5 を示す断面斜視図である。第 3 形態例に係る複数のゲート構造 3 5 は、複数の第 2 反転コラム 1 6 および複数の第 2 非反転コラム 1 7 に対する位置ずれを考慮しなくて済むレイアウトをそれぞれ有している。

[0579] 具体的には、図 3 3 を参照して、複数のゲート構造 3 5 は、複数の第 2 反転コラム 1 6 および複数の第 2 非反転コラム 1 7 に交差するように第 2 延在方向 D e 2 以外の方向に延びている。複数のゲート構造 3 5 は、この形態で

は、第1反転コラム14の第1配列方向D a 1に間隔を空けて配列され、第1反転コラム14の第1延在方向D e 1に延びている。この例では、第1配列方向D a 1がa軸方向（第1方向X）であり、第1延在方向D e 1がm軸方向（第2方向Y）である。

[0580] 複数のゲート構造35は、積層方向に複数の第1反転コラム14に1対1対応の関係で対向していてもよい。むしろ、各ゲート構造35は、積層方向に複数の第1反転コラム14に対向していてもよい。複数のゲート構造35は、積層方向に複数の第1非反転コラム15に1対1対応の関係で対向していてもよい。

[0581] むろん、各ゲート構造35は、積層方向に複数の第1非反転コラム15に対向していてもよい。複数のゲート構造35は、複数の第1反転コラム14から第1配列方向D a 1にずれて配列され、積層方向に第1反転コラム14および第1非反転コラム15のいずれか一方または双方に対向していてもよい。

[0582] むろん、複数のゲート構造35の配列方向および延在方向は、複数の第1反転コラム14の第1配列方向D a 1および第1延在方向D e 1に応じて変更される。したがって、第1配列方向D a 1がm軸方向であり、第1延在方向D e 1がa軸方向であってもよい。また、第1配列方向D a 1がa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第1延在方向D e 1がa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。

[0583] むろん、複数のゲート構造35の配列方向は、第1配列方向D a 1および第2配列方向D 2以外の方向であってもよい。また、複数のゲート構造35の延在方向は、第1延在方向D e 1および第2延在方向D e 2以外の方向であってもよい。つまり、複数のゲート構造35は、平面視において複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16の双方に交差していてもよい。

[0584] たとえば、ゲート構造35の延在方向および第2延在方向D e 2の間の角度（絶対値）は、 0° を超えて 90° 以下であってもよい。ゲート構造35

の角度（絶対値）は、 0° を超えて 18° 以下、 18° 以上 36° 以下、 36° 以上 54° 以下、 54° 以上 72° 以下、および、 72° 以上 90° 以下のうちのいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。ゲート構造35の角度（絶対値）は、 $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、 $45^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 、および、 $60^{\circ} \pm 5^{\circ}$ のうちのいずれか1つの範囲に属する値に設定されてもよい。

[0585] 埋設電極77は、この形態では、積層方向および水平方向に絶縁膜76を挟んで複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17に対向している。前述の複数のソース領域33および複数のコンタクト領域34は、この形態では、積層方向にボディ領域32の一部を挟んで複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17に対向している。

[0586] 図34は、第4形態例に係るゲート構造35を示す断面斜視図である。図34を参照して、第4形態例に係る複数のゲート構造35は、狭ピッチ化に寄与する構成をそれぞれ有している。第4形態例に係る複数のゲート構造35は、複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17の狭ピッチ化を実現する上で特に有効である。図34では、前述の第1形態例に係るゲート構造35が第4形態例に係るゲート構造35に置き換えられた例が示されているが、第4形態例に係るゲート構造35の構成は第2～第3形態例に係るゲート構造35の構成にも適用可能である。

[0587] 複数のゲート構造35は、トレンチ75、絶縁膜76、埋設電極77、および、埋設絶縁体80をそれぞれ含む。トレンチ75は、第1形態例の場合と同様の形態を有している。絶縁膜76は、この形態では、第1主面3（活性面71）からトレンチ75の底壁側に間隔を空けて形成され、トレンチ75の開口端において第1主面3（活性面71）の表層部を露出させている。絶縁膜76の上端部は、トレンチ75の深さ範囲中間部に対して第1主面3側に位置されていることが好ましい。

[0588] 埋設電極77は、この形態では、第1主面3（活性面71）からトレンチ75の底壁側に間隔を空けてトレンチ75に埋設され、トレンチ75の開口端においてトレンチ75の底壁に向けて窪んだ開口リセスを区画している。

埋設電極 77 は、トレンチ 75 の開口端において第 1 主面 3 (活性面 71) の表層部および絶縁膜 76 の上端部を露出させている。埋設電極 77 の上端部は、トレンチ 75 の深さ範囲中間部に対して第 1 主面 3 側に位置されていることが好ましい。

[0589] 埋設絶縁体 80 は、第 1 主面 3 (活性面 71) を露出させるようにトレンチ 75 (開口リセス) に埋設され、トレンチ 75 内において絶縁膜 76 および埋設電極 77 を被覆している。埋設絶縁体 80 は、第 1 主面 3 (活性面 71) から埋設電極 77 側に間隔を空けてトレンチ 75 に埋設され、トレンチ 75 の開口端において第 1 主面 3 (活性面 71) の表層部を露出させている。

[0590] 埋設絶縁体 80 の上端部は、トレンチ 75 の深さ範囲中間部に対して第 1 主面 3 側に位置されていることが好ましい。埋設絶縁体 80 は、酸化シリコン膜、窒化シリコン膜および酸窒化シリコン膜のうちの少なくとも 1 つを含んでいてもよい。埋設絶縁体 80 は、酸化シリコン膜を含むことが好ましい。

[0591] 前述の複数のソース領域 33 は、この形態では、第 1 主面 3 (活性面 71) の表層部において互いに隣り合う複数のゲート構造 35 の間の領域にそれぞれ形成されている。複数のソース領域 33 は、両サイドに位置された複数のゲート構造 35 に接続されるように複数のゲート構造 35 に沿って間隔を空けて配列されている。

[0592] 具体的には、ゲート構造 35 の一方側の側壁に沿って配列された一方側の複数のソース領域 33 は、ゲート構造 35 の他方側の側壁に沿って配列された他方側の複数のソース領域 33 に 1 対 1 の対応関係で対向している。つまり、複数のソース領域 33 は、平面視において行列状に配列されている。

[0593] むろん、一方側の複数のソース領域 33 は、他方側の複数のソース領域 33 の間の領域に 1 対 1 の対応関係で対向していてもよい。つまり、複数のソース領域 33 は、平面視において千鳥状に配列されていてもよい。複数のソース領域 33 は、トレンチ 75 の開口端においてトレンチ 75 の側壁から露

出した部分を有し、絶縁膜 76 を挟んで埋設電極 77 および埋設絶縁体 80 に対向している。

[0594] 前述の複数のコンタクト領域 34 は、この形態では、第 1 主面 3 (活性面 71) の表層部において互いに隣り合う複数のゲート構造 35 の間の領域にそれぞれ形成されている。複数のコンタクト領域 34 は、両サイドに位置された複数のゲート構造 35 に接続されるように複数のゲート構造 35 に沿って間隔を空けて配列されている。

[0595] 具体的には、複数のコンタクト領域 34 は、複数のゲート構造 35 に沿って複数のソース領域 33 と交互に配列されている。さらに具体的には、ゲート構造 35 の一方側の側壁に沿って配列された一方側の複数のコンタクト領域 34 は、ゲート構造 35 の他方側の側壁に沿って配列されて他方側の複数のコンタクト領域 34 に 1 対 1 の対応関係で対向している。また、複数のソース領域 33 は、平面視において行列状に配列されている。

[0596] むろん、一方側の複数のコンタクト領域 34 は、他方側の複数のソース領域 33 の間の領域 (つまり、複数のソース領域 33) に 1 対 1 の対応関係で対向していてもよい。つまり、複数のコンタクト領域 34 は、平面視において千鳥状に配列されていてもよい。複数のコンタクト領域 34 は、トレンチ 75 の開口端においてトレンチ 75 の側壁から露出した部分を有し、絶縁膜 76 を挟んで埋設電極 77 および埋設絶縁体 80 に対向している。

[0597] 具体的な図示は省略されるが、前述の層間絶縁膜 40 は、第 1 絶縁膜 41 および第 2 絶縁膜 42 を含む積層構造を有している。第 1 絶縁膜 41 は、第 1 形態例に係る場合と同様、活性面 71、外周面 72 および第 1 ~ 第 4 接続面 73A ~ 73D を選択的に被覆している。

[0598] 第 1 絶縁膜 41 は、この形態では、活性面 71 の周縁部を被覆し、活性面 71 の内方部において複数のゲート構造 35 を一括して露出させている。具体的には、第 1 絶縁膜 41 は、複数のゲート構造 35 の両端部において絶縁膜 76 に接続され、埋設電極 77 を露出させている。また、第 1 絶縁膜 41 は、第 1 形態例に係る場合と同様の態様で外周面 72 および第 1 ~ 第 4 接続

面 7 3 A ~ 7 3 D を被覆している。

[0599] 第 2 絶縁膜 4 2 は、第 1 形態例に係る場合と同様、第 1 絶縁膜 4 1 を挟んで活性面 7 1、外周面 7 2 および第 1 ~ 第 4 接続面 7 3 A ~ 7 3 D を選択的に被覆している。第 2 絶縁膜 4 2 は、この形態では、活性面 7 1 の周縁部を被覆し、活性面 7 1 の内方部において複数のゲート構造 3 5 を一括して露出させている。具体的には、第 2 絶縁膜 4 2 は、複数のゲート構造 3 5 の両端部において第 1 主面 3 (活性面 7 1) の上からトレンチ 7 5 内に入り込み、トレンチ 7 5 内において埋設絶縁体 8 0 に接続されている。

[0600] 層間絶縁膜 4 0 は、この形態では、複数のゲート構造 3 5 の両端部 (埋設電極 7 7) を露出させる複数のコンタクト開口 4 3 (図示略)、および、複数のゲート構造 3 5 の内方部 (埋設絶縁体 8 0)、複数のソース領域 3 3 および複数のコンタクト領域 3 4 を一括して露出させる単一のコンタクト開口 4 3 を含む。

[0601] 前述のゲートパッド 4 5、前述の複数のゲート配線 4 6 および前述のドレインパッド 4 8 は、第 1 形態例の場合と同様の形態を有している。前述のソースパッド 4 7 は、層間絶縁膜 4 0 の上から単一のコンタクト開口 4 3 に入り込み、単一のコンタクト開口 4 3 内において複数のゲート構造 3 5 の内方部 (埋設絶縁体 8 0)、複数のソース領域 3 3 および複数のコンタクト領域 3 4 を一括して被覆している。

[0602] ソースパッド 4 7 は、埋設絶縁体 8 0 によって複数のゲート構造 3 5 (埋設電極 7 7) から電氣的に絶縁され、第 1 主面 3 (活性面 7 1) において複数のソース領域 3 3 および複数のコンタクト領域 3 4 に電氣的に接続されている。ソースパッド 4 7 は、トレンチ 7 5 に埋設された埋設部を有している。ソースパッド 4 7 の埋設部は、トレンチ 7 5 内において埋設絶縁体 8 0 を挟んで埋設電極 7 7 に対向し、トレンチ 7 5 の開口端において複数のソース領域 3 3 および複数のコンタクト領域 3 4 に電氣的に接続されている。

[0603] 図 3 5 は、第 5 形態例に係るゲート構造 3 5 を示す断面斜視図である。図 3 5 を参照して、第 5 形態例に係る複数のゲート構造 3 5 は、第 4 形態例に

に係る複数のゲート構造 35 を変形させた構成をそれぞれ有している。第 5 形態例に係るゲート構造 35 の構成は第 1 ~ 第 3 形態例に係るゲート構造 35 の構成にも適用可能である。

[0604] 複数のゲート構造 35 は、トレンチ 75、絶縁膜 76、埋設電極 77、および、埋設絶縁体 80 をそれぞれ含む。トレンチ 75 は、第 1 形態例の場合と同様の形態を有している。絶縁膜 76 は、この形態では、上絶縁膜 81 および下絶縁膜 82 を含む。

[0605] 上絶縁膜 81 は、チャネル制御用の絶縁膜として形成され、ボディ領域 32 の底部に対してトレンチ 75 の開口側の壁面を被覆している。上絶縁膜 81 は、第 2 反転コラム 16 およびボディ領域 32 の境界部を横切って第 2 反転コラム 16 を被覆する部分を有している。この場合、ボディ領域 32 に対する上絶縁膜 81 の被覆面積は、第 2 反転コラム 16 に対する上絶縁膜 81 の被覆面積よりも大きいことが好ましい。

[0606] 上絶縁膜 81 は、酸化シリコン膜を含んでいてもよい。上絶縁膜 81 は、チップ 2 の酸化物からなる酸化シリコン膜を含むことが好ましい。上絶縁膜 81 は、1 nm 以上 100 nm 以下の厚さを有していてもよい。上絶縁膜 81 の厚さは、1 nm 以上 25 nm 以下、25 nm 以上 50 nm 以下、50 nm 以上 75 nm 以下、および、75 nm 以上 100 nm 以下のいずれか 1 つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0607] 下絶縁膜 82 は、ボディ領域 32 の底部に対してトレンチ 75 の底壁側の壁面を被覆している。下絶縁膜 82 は、第 2 反転コラム 16 を被覆している。第 2 反転コラム 16 に対する下絶縁膜 82 の被覆面積は、ボディ領域 32 に対する上絶縁膜 81 の被覆面積よりも大きい。

[0608] 下絶縁膜 82 は、酸化シリコン膜を含んでいてもよい。下絶縁膜 82 は、チップ 2 の酸化物からなる酸化シリコン膜を含んでいてもよいし、CVD 法によって形成された酸化シリコン膜を含んでいてもよい。下絶縁膜 82 は、上絶縁膜 81 の厚さよりも大きい厚さを有している。下絶縁膜 82 の厚さは、上絶縁膜 81 の厚さの 10 倍以上 50 倍以下であることが好ましい。

- [0609] 下絶縁膜 82 は、100 nm 以上 500 nm 以下の厚さを有していてもよい。下絶縁膜 82 の厚さは、100 nm 以上 150 nm 以下、150 nm 以上 200 nm 以下、200 nm 以上 250 nm 以下、250 nm 以上 300 nm 以下、300 nm 以上 350 nm 以下、350 nm 以上 400 nm 以下、400 nm 以上 450 nm 以下、および、450 nm 以上 500 nm 以下のいずれか 1 つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0610] 埋設電極 77 は、この形態では、上電極 83、下電極 84 および中間絶縁膜 85 を含むマルチ電極構造（ダブル電極構造）を有している。上電極 83 は、絶縁膜 76 を挟んでトレンチ 75 の開口側に埋設されている。具体的には、上電極 83 は、上絶縁膜 81 を挟んでトレンチ 75 の開口側に埋設され、上絶縁膜 81 を挟んでボディ領域 32 に対向している。
- [0611] ボディ領域 32 に対する上電極 83 の対向面積は、第 2 反転コラム 16 に対する上電極 83 の対向面積よりも大きい。上電極 83 は、この形態では、第 1 主面 3（活性面 71）からトレンチ 75 の底壁側に間隔を空けてトレンチ 75 に埋設され、トレンチ 75 の開口端においてトレンチ 75 の底壁に向けて窪んだ開口リセスを区画している。上電極 83 は、トレンチ 75 の開口端において第 1 主面 3（活性面 71）の表層部および上絶縁膜 81 の上端部を露出させている。
- [0612] 上電極 83 には、制御電位としてのゲート電位が付与される。上電極 83 は、ゲート電位に応答してボディ領域 32 内におけるチャネルの反転および非反転を制御する。上電極 83 は、p 型または n 型の導電性ポリシリコンを含んでいてもよい。
- [0613] 下電極 84 は、絶縁膜 76 を挟んでトレンチ 75 の底壁側に埋設されている。具体的には、下電極 84 は、下絶縁膜 82 を挟んでトレンチ 75 の底壁側に埋設され、下絶縁膜 82 を挟んで第 2 反転コラム 16 に対向している。つまり、下電極 84 は、ボディ領域 32 の底部に対してトレンチ 75 の底壁側に埋設されている。具体的な図示は省略されるが、下電極 84 は、トレンチ 75 の一部（この形態では両端部）においてトレンチ 75 の開口側に引き

出されている。

- [0614] 第2反転コラム16に対する下電極84の対向面積は、ボディ領域32に対する上電極83の対向面積よりも大きい。下電極84は、トレンチ75の深さ方向に沿って壁状に延びている。下電極84は、下絶縁膜82から上電極83側に突出した上端部を有し、上電極83の下端部に系合している。下電極84の上端部は、水平方向に上電極83の下端部を挟んで上絶縁膜81（ボディ領域32）に対向している。
- [0615] 下電極84には、ゲート電位またはソース電位が付与されてもよい。下電極84にゲート電位が付与される場合、下電極84は上電極83と同電位になる。したがって、上電極83および下電極84の間の電圧降下が抑制される。これにより、ゲート構造35に対する電界集中が抑制される。
- [0616] 一方、下電極84にソース電位が付与される場合、下電極84をフィールド電極として機能させることができる。したがって、下電極84（フィールド電極）および第2層9の間の寄生容量が低下される。これにより、寄生容量に起因するスイッチング速度の低下が抑制される。下電極84は、p型またはn型の導電性ポリシリコンを含んでいてもよい。
- [0617] 中間絶縁膜85は、上電極83および下電極84の間に介在され、トレンチ75内において上電極83および下電極84を電氣的に絶縁させている。中間絶縁膜85は、上絶縁膜81および下絶縁膜82に連なっている。中間絶縁膜85は、下絶縁膜82の厚さよりも小さい厚さを有している。中間絶縁膜85の厚さは、上絶縁膜81の厚さよりも大きいことが好ましい。中間絶縁膜85は、酸化シリコン膜を含んでいてもよい。中間絶縁膜85は、下電極84の酸化物からなる酸化シリコン膜を含むことが好ましい。
- [0618] 埋設絶縁体80は、第1主面3（活性面71）を露出させるようにトレンチ75（開口リセス）に埋設され、リセス内において上絶縁膜81および上電極83を被覆している。埋設絶縁体80は、第1主面3（活性面71）から上電極83側に間隔を空けてトレンチ75に埋設され、トレンチ75の開口端において第1主面3（活性面71）の表層部を露出させている。

[0619] 前述の複数のソース領域 33 は、この形態では、トレンチ 75 の開口端においてトレンチ 75 の側壁から露出した部分を有し、上絶縁膜 81 を挟んで上電極 83 および埋設絶縁体 80 に対向している。前述の複数のコンタクト領域 34 は、この形態では、トレンチ 75 の開口端においてトレンチ 75 の側壁から露出した部分を有し、上絶縁膜 81 を挟んで上電極 83 および埋設絶縁体 80 に対向している。

[0620] 前述の複数のフィールド領域 38、層間絶縁膜 40、ゲートパッド 45、前述の複数のゲート配線 46、前述のソースパッド 47 および前述のドレインパッド 48 は、第 2 形態例の場合と同様の形態を有している。複数のゲート配線 46 は、この形態では、複数のコンタクト開口 43 を介して層間絶縁膜 40 を貫通し、複数の上電極 83 に電氣的に接続される。下電極 84 にゲート電位が付与される場合、複数のゲート配線 46 は、複数のコンタクト開口 43 を介して層間絶縁膜 40 を貫通し、複数の上電極 83 および複数の下電極 84 に電氣的に接続される。

[0621] 下電極 84 にソース電位が付与される場合、ソースパッド 47 は、複数の下電極 84 に電氣的に接続される。この場合、SiC 半導体装置 1B は、ソースパッド 47 から層間絶縁膜 40 の上に引き出されたソース配線を含んでもよい。この場合、ソース配線は、複数のゲート配線 46 よりも外側の領域において複数のゲート構造 35 の一部（一端部または両端部）に交差（具体的には直交）するように活性面 71 の周縁に沿って延びるライン状に形成される。ソース配線は、複数のコンタクト開口 43 を介して層間絶縁膜 40 を貫通し、複数の下電極 84 に電氣的に接続される。

[0622] 図 36 は、第 3 形態に係る SiC 半導体装置 1C を示す平面図である。図 37A は、図 36 に示す XXXVIIA-XXXVIIA 線に沿う断面図である。図 37B は、図 36 に示す XXXVIIIB-XXXVIIIB 線に沿う断面図である。図 38A は、チップ 2（第 1 層 8）のレイアウト例を示す平面図である。図 38B は、チップ 2（第 2 層 9）のレイアウト例を示す平面図である。図 39 は、チップ 2 のレイアウト例を示す斜視図である。図 40 は、外周領域 11 の構成を示す斜視

図である。図40では、の図示が省略されている。

- [0623] 図36～図40を参照して、SiC半導体装置1Cは、SiC半導体装置1Aの場合と同様、チップ2、ベース層6、積層部7（第1層8および第2層9）、活性領域10、外周領域11、第1不純物領域12、第2不純物領域13、複数の第1反転コラム14、複数の第2反転コラム16、複数の第1非反転コラム15、複数の第2非反転コラム17、および、複数のフィールド領域38を含む。
- [0624] 複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16は、前述の第1～第3基本形態（図5～図10参照）に示されるいずれか1つの特徴を有していてもよい。複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16は、前述の第1～第6形態例（図13A～図13F参照）に示される複数の特徴のうちの少なくとも1つの特徴を有していてもよい。複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16は、前述の第1～第6形態例に示された複数（2つ以上）の特徴が組み合わされた特徴を有していてもよい。
- [0625] SiC半導体装置1Cは、第1主面3を選択的に被覆する層間絶縁膜90を含む。層間絶縁膜90は、酸化シリコン膜、窒化シリコン膜および酸窒化シリコン膜のうちの少なくとも1つを含む単層構造または積層構造を有していてもよい。層間絶縁膜90は、この形態では、酸化シリコン膜を含む単層構造を有している。
- [0626] 層間絶縁膜90は、外周領域11において複数のフィールド領域38を被覆している。層間絶縁膜90は、この形態では、第1主面3の周縁（第1～第4側面5A～5D）に連なっている。むしろ、層間絶縁膜90は、第1主面3の周縁から内方に間隔を空けて形成され、第1主面3の周縁部から第2層9を露出させていてもよい。
- [0627] 層間絶縁膜90は、活性領域10を露出させるコンタクト開口91を有している。コンタクト開口91は、この形態では、最内のフィールド領域38の上に位置された開口壁面を有し、活性領域10の全域および最内のフィー

ルド領域38の内縁部を露出させている。

- [0628] SiC半導体装置1Cは、活性領域10において第1主面3を被覆する第1パッド電極92を含む。第1パッド電極92は、アノードパッドとして形成されている。第1パッド電極92は、チップ2の周縁から内方に間隔を空けて配置されている。第1パッド電極92は、平面視においてチップ2の周縁に沿う多角形状（この形態では四角形状）に形成されている。
- [0629] 第1パッド電極92は、層間絶縁膜90の上からコンタクト開口91に入り込み、コンタクト開口91内において第1主面3および最内のフィールド領域38に電氣的に接続されている。第1パッド電極92は、第1主面3（第2層9）とショットキー接合を形成している。これにより、ダイオード構造（デバイス構造物）としてのSBD構造93（Schottky Barrier Diode structure）が活性領域10に形成されている。
- [0630] SiC半導体装置1Cは、第2主面4を被覆する第2パッド電極94を含む。第2パッド電極94は、カソードパッドとして形成されている。第2パッド電極94は、第2主面4から露出したベース層6とオーミック接触を形成している。つまり、第2パッド電極94は、ベース層6を介して第1層8（複数の第2非反転コラム17）および第2層9（複数の第2反転コラム16）に電氣的に接続されている。
- [0631] 第2パッド電極94は、チップ2の周縁（第1～第4側面5A～5D）に連なるように第2主面4の全域を被覆していてもよい。第2パッド電極94は、チップ2の周縁部を露出させるように、チップ2の周縁から内方に間隔を空けて第2主面4を被覆していてもよい。
- [0632] 第1パッド電極92および第2パッド電極94の間（第1主面3および第2主面4の間）に印加可能なブレイクダウン電圧は、500V3000V以下であってもよい。ブレイクダウン電圧は、500V1000V以下、1000V以上1500V以下、1500V以上2000V以下、2000V以上2500V以下、および、2500V以上3000V以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

- [0633] 2層構造を有する積層部7が採用される場合、ブレイクダウン電圧は500V以上1000V以下、1000V以上1500V以下、および、1500V以上2000V以下のいずれか1つの範囲に属する値に設定されることが好ましい。3層構造を有する積層部7が採用される場合、ブレイクダウン電圧は1000V以上1500V以下、1500V以上2000V以下、2000V以上2500V以下、および、2500V以上3000V以下のいずれか1つの範囲に属する値に設定されることが好ましい。
- [0634] 以下、図41～図45を参照して、SBD構造93の第1～第5形態例が示される。図41は、第1形態例に係るSBD構造93を示す断面斜視図である。図41を参照して、複数の第2非反転コラム17の上端部が第1主面3から第2層9の下端側に間隔を空けて形成されている場合、第1パッド電極92は第2層9のうち第1主面3および上端部の間に介在された部分とショットキー接合を形成する。
- [0635] 図42は、第2形態例に係るSBD構造93を示す断面斜視図である。図42を参照して、複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17が第1主面3から露出している場合（たとえば図13D等も併せて参照）、第1パッド電極92は第1主面3において複数の第2反転コラム16および複数の第2非反転コラム17に機械的および電氣的に接続される。この場合、第1パッド電極92は、複数の第2非反転コラム17とJBS構造（Junction Barrier Controlled Schottky structure）を形成し、複数の第2反転コラム16とショットキー接合を形成する。
- [0636] 図43は、第3形態例に係るSBD構造93を示す断面斜視図である。図43を参照して、積層部7がトップ層30を含む場合（図13F等も併せて参照）、第1パッド電極92はトップ層30（第1主面3）とショットキー接合を形成する。むろん、トップ層30が形成されていない状態において、第2層9において第1主面3および複数の第2非反転コラム17（複数の第2反転コラム16）の間に十分なスペースが形成されている場合、トップ層30は省略されてもよい。

- [0637] 図44は、第4形態例に係るSBD構造93を示す断面斜視図である。図44を参照して、積層部7がトップ層30を含む場合（図13F等も併せて参照）、SiC半導体装置1Cは、活性領域10のトップ層30内において第1主面3の表層部に形成されたp型の複数の表層領域95（不純物領域）を含んでいてもよい。
- [0638] 複数の表層領域95は、この形態では、第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。つまり、複数の表層領域95は、この形態では、複数の第2反転コラム16の第2延在方向De2に沿って延びるストライプ状に配列されている。
- [0639] この例では、第2配列方向Da2がm軸方向（第2方向Y）であり、第2延在方向De2がa軸方向（第1方向X）である。むしろ、複数の表層領域95の配列方向および延在方向は、複数の第2反転コラム16の第2配列方向Da2および第2延在方向De2に応じて変更される。したがって、第2配列方向Da2がa軸方向であり、第2延在方向De2がm軸方向であってもよい。また、第2配列方向Da2がa軸方向およびm軸方向以外の方向であり、第2延在方向De2がa軸方向およびm軸方向以外の方向であってもよい。
- [0640] 複数の表層領域95は、複数の第1非反転コラム15の幅とは異なる幅をそれぞれ有し、複数の第1非反転コラム15のピッチとは異なるピッチで配列されていることが好ましい。表層領域95の幅は複数の第1非反転コラム15の幅未満であり、表層領域95のピッチは複数の第1非反転コラム15のピッチ未満であってもよい。表層領域95の幅は複数の第1非反転コラム15の幅未満であり、表層領域95のピッチは複数の第1非反転コラム15のピッチよりも大きくてもよい。
- [0641] 表層領域95の幅は複数の第1非反転コラム15の幅よりも大きく、表層領域95のピッチは複数の第1非反転コラム15のピッチ未満であってもよい。表層領域95の幅は複数の第1非反転コラム15の幅よりも大きく、表層領域95のピッチは複数の第1非反転コラム15のピッチよりも大きくて

もよい。むろん、複数の表層領域 95 の幅は、複数の第 1 非反転コラム 15 の幅とほぼ等しくてもよい。また、複数の表層領域 95 のピッチは、複数の第 1 非反転コラム 15 のピッチとほぼ等しくてもよい。

[0642] 複数の表層領域 95 は、複数の第 2 非反転コラム 17 の幅とは異なる幅をそれぞれ有し、複数の第 2 非反転コラム 17 のピッチとは異なるピッチで配列されていることが好ましい。表層領域 95 の幅は複数の第 2 非反転コラム 17 の幅未満であり、表層領域 95 のピッチは複数の第 2 非反転コラム 17 のピッチ未満であってもよい。表層領域 95 の幅は複数の第 2 非反転コラム 17 の幅未満であり、表層領域 95 のピッチは複数の第 2 非反転コラム 17 のピッチよりも大きくてもよい。

[0643] 表層領域 95 の幅は複数の第 2 非反転コラム 17 の幅よりも大きく、表層領域 95 のピッチは複数の第 2 非反転コラム 17 のピッチ未満であってもよい。表層領域 95 の幅は複数の第 2 非反転コラム 17 の幅よりも大きく、表層領域 95 のピッチは複数の第 2 非反転コラム 17 のピッチよりも大きくてもよい。むろん、複数の表層領域 95 の幅は、複数の第 2 非反転コラム 17 の幅とほぼ等しくてもよい。また、複数の表層領域 95 のピッチは、複数の第 2 非反転コラム 17 のピッチとほぼ等しくてもよい。

[0644] 複数の表層領域 95 は、複数の第 2 非反転コラム 17 から第 1 主面 3 側に間隔を空けて形成されている。複数の表層領域 95 は、トップ層 30 の下端（第 2 層 9）から第 1 主面 3 側に間隔を空けて形成され、少なくともトップ層 30 の一部を挟んで複数の第 2 層 9 に対向していることが好ましい。複数の表層領域 95 は、積層方向に第 2 非反転コラム 17 および第 2 非反転コラム 17 のいずれか一方または双方に対向していてもよい。

[0645] 複数の表層領域 95 は、第 2 層 9 に対するランダム注入法によって第 2 層 9 の表層部に導入されたランダム不純物領域からなる（図 7 も併せて参照）。したがって、複数の表層領域 95 は、トップ軸チャンネル CHT に沿う方向に関して第 2 非反転コラム 17 の厚さ未満の厚さを有している。複数の表層領域 95 の厚さは、第 1 非反転コラム 15 の厚さ未満である。

- [0646] 複数の表層領域 95 は、第 2 非反転コラム 17 等とは異なり、 $0.5 \mu\text{m}$ 以上の厚さを有する緩慢部 22 を有さず、 $0.5 \mu\text{m}$ の範囲に漸増部 20、ピーク部 21 および漸減部 23 を含む濃度勾配を有している。複数の表層領域 95 は、 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 以下の p 型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。
- [0647] 複数の表層領域 95 の p 型不純物濃度は、少なくとも 1 種の 3 価元素によって調整されていることが好ましい。表層領域 95 の 3 価元素は、第 2 非反転コラム等の 3 価元素と同一種であってもよいし、第 2 非反転コラム等の 3 価元素と異なる種であってもよい。表層領域 95 の 3 価元素は、ホウ素、アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも 1 種であってもよい。
- [0648] 第 1 パッド電極 92 は、第 1 主面 3 においてトップ層 30 に機械的および電氣的に接続されている。この場合、第 1 パッド電極 92 は、第 1 主面 3 において複数の表層領域 95 と JBS 構造を形成し、第 1 主面 3 において複数の表層領域 95 の間の領域とショットキー接合を形成する。つまり、第 4 形態例に係る SBD 構造 93 では、スーパージャンクション構造 SJ（第 2 スーパージャンクション構造 SJ2）のレイアウトに起因する JBS 構造のレイアウトの制限および電氣的特性の制限が緩和される。
- [0649] この例では、複数の表層領域 95 がトップ層 30 に形成されていた。しかし、トップ層 30 が形成されていない状態において、第 2 層 9 において第 1 主面 3 および複数の第 2 非反転コラム 17（複数の第 2 反転コラム 16）の間に十分なスペースが形成されている場合、トップ層 30 は省略されてもよい。
- [0650] 図 45 は、第 5 形態例に係る SBD 構造 93 を示す断面斜視図である。第 5 形態例に係る SBD 構造 93 は、第 4 形態例に係る複数の表層領域 95 のレイアウトを変形させたレイアウトを有している。具体的には、複数の表層領域 95 は、活性領域 10 において複数の第 2 反転コラム 16 の第 2 延在方向 De2 に交差する方向に延びるストライプ状に配列されている。

- [0651] 複数の表層領域 95 は、この形態では、第 1 反転コラム 14 の第 1 配列方向 D_{a1} に間隔を空けて配列され、第 1 反転コラム 14 の第 1 延在方向 D_{e1} に延びている。この例では、第 1 配列方向 D_{a1} が m 軸方向（第 2 方向 Y ）であり、第 1 延在方向 D_{e1} が a 軸方向（第 1 方向 X ）である。
- [0652] むろん、複数の表層領域 95 の配列方向および延在方向は、複数の第 1 反転コラム 14 の第 1 配列方向 D_{a1} および第 1 延在方向 D_{e1} に応じて変更される。したがって、第 1 配列方向 D_{a1} が a 軸方向であり、第 1 延在方向 D_{e1} が m 軸方向であってもよい。また、第 1 配列方向 D_{a1} が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であり、第 1 延在方向 D_{e1} が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であってもよい。
- [0653] むろん、複数の表層領域 95 の配列方向は、第 1 配列方向 D_{a1} および第 2 配列方向 D_2 以外の方向であってもよい。また、複数の表層領域 95 の延在方向は、第 1 延在方向 D_{e1} および第 2 延在方向 D_{e2} 以外の方向であってもよい。つまり、複数の表層領域 95 は、平面視において複数の第 1 反転コラム 14 および複数の第 2 反転コラム 16 の双方に交差していてもよい。
- [0654] たとえば、表層領域 95 の延在方向および第 2 延在方向 D_{e2} の間の角度（絶対値）は、 0° を超えて 90° 以下であってもよい。表層領域 95 の角度（絶対値）は、 0° を超えて 18° 以下、 18° 以上 36° 以下、 36° 以上 54° 以下、 54° 以上 72° 以下、および、 72° 以上 90° 以下のうちのいずれか 1 つの範囲に属する値を有していてもよい。表層領域 95 の角度（絶対値）は、 $30^\circ \pm 5^\circ$ 、 $45^\circ \pm 5^\circ$ 、および、 $60^\circ \pm 5^\circ$ のうちのいずれか 1 つの範囲に属する値に設定されてもよい。
- [0655] 以下、第 1～第 4 変形例に係る複数の第 1 反転コラム 14 および複数の第 2 反転コラム 16（複数の第 1 非反転コラム 15 および複数の第 2 非反転コラム 17）が示される。第 1～第 4 変形例のいずれか 1 つの特徴または複数の特徴は、第 1～第 3 形態（図 5～図 12 参照）にも適用可能である。また、第 1～第 4 変形例のいずれか 1 つの特徴または複数の特徴は、第 1～第 6 形態例（図 13A～図 13F 参照）にも適用可能である。

- [0656] 図46は、第1変形例に係る複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16を示す断面斜視図である。図47は、第2変形例に係る複数の第1反転コラム14および複数の第2反転コラム16を示す断面斜視図である。前述の各形態では、複数の第2反転コラム16が、第1延在方向D e 1とは異なる第2延在方向D e 2に延びていた。
- [0657] これに対して、第1～第2変形例では、複数の第2反転コラム16の第2配列方向D a 2が複数の第1反転コラム14の第1配列方向D a 1に一致し、複数の第2反転コラム16の第2延在方向D e 2が複数の第1反転コラム14の第1延在方向D e 1に一致している。
- [0658] 図46（第1変形例）では、第1配列方向D a 1（第2配列方向D a 2）がm軸方向（第2方向Y）であり、第1延在方向D e 1（第2延在方向D e 2）がa軸方向（第1方向X）である例が示されている。図47（第2変形例）では、第1配列方向D a 1（第2配列方向D a 2）がa軸方向（第1方向X）であり、第1延在方向D e 1（第2延在方向D e 2）がm軸方向（第2方向Y）である例が示されている。むろん、第1配列方向D a 1（第2配列方向D a 2）がm軸方向およびa軸方向以外の方向であり、第1延在方向D e 1（第2延在方向D e 2）がm軸方向およびa軸方向以外の方向であってもよい。
- [0659] 複数の第2反転コラム16は、積層方向に複数の第1反転コラム14に1対1の対応関係でそれぞれ重なっている。複数の第2反転コラム16は、この例では、複数の第1反転コラム14と共に立体ストライプ状の反転コラムを形成している。
- [0660] 一方、複数の第2非反転コラム17は、積層方向に複数の第1非反転コラム15に1対1の対応関係でそれぞれ重なっている。複数の第2非反転コラム17は、この例では、複数の第1非反転コラム15と共に立体ストライプ状の非反転コラムを形成している。
- [0661] 図48は、第3変形例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。前述の各形態では、第2不純物領域13が第2層9内に形成され、第2不純物領域

1 3 の導電型を反転させる n 型の複数の第 2 反転コラム 1 6 が第 2 層 9 内に形成されていた。

[0662] これに対して、第 3 変形例では、第 2 不純物領域 1 3 の形成工程が省略され、第 2 層 9 の導電型を n 型から p 型に反転させる p 型の複数の第 2 反転コラム 9 6 が第 2 層 9 内に形成され、第 2 層 9 の一部からそれぞれなる n 型の複数の第 2 非反転コラム 9 7 が区画されている。

[0663] 複数の第 2 反転コラム 9 6 は、第 2 層 9 内において水平方向に間隔を空けて形成されている。複数の第 2 反転コラム 9 6 は、この例では、積層方向に複数の第 1 非反転コラム 1 5 に重なるように第 2 層 9 内に形成されている。複数の第 2 反転コラム 9 6 は、前述の各形態の場合と同様、第 2 幅 W_2 、第 2 領域厚さ TR_2 、第 2 アスペクト比 TR_2 / W_2 および第 2 ピッチ P_2 を有している。

[0664] 複数の第 2 反転コラム 9 6 は、第 2 層 9 内において第 1 配列方向 D_{a1} とは異なる第 2 配列方向 D_{a2} に間隔を空けて配列され、第 1 延在方向 D_{e1} とは異なる第 2 延在方向 D_{e2} に延びる帯状にそれぞれ形成されている。つまり、複数の第 2 反転コラム 9 6 は第 2 延在方向 D_{e2} に延びるストライプ状に形成されている。

[0665] 図 4 8 では、第 2 配列方向 D_{a2} が m 軸方向（第 2 方向 Y）であり、第 2 延在方向 D_{e2} が a 軸方向（第 1 方向 X）である例が示されている。むしろ、第 2 配列方向 D_{a2} および第 2 延在方向 D_{e2} は、第 1 反転コラム 1 4 の第 1 配列方向 D_{a1} および第 1 延在方向 D_{e1} に応じて変更される。したがって、第 2 配列方向 D_{a2} が a 軸方向であり、第 2 延在方向 D_{e2} が m 軸方向であってもよい。また、第 2 配列方向 D_{a2} が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であり、第 2 延在方向 D_{e2} が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であってもよい。

[0666] 複数の第 2 反転コラム 9 6 は、平面視において複数の第 1 反転コラム 1 4 および複数の第 1 非反転コラム 1 5 に交差している。複数の第 2 反転コラム 9 6 は、積層部 7 内において複数の第 1 非反転コラム 1 5 と共に p 型の立体

格子状の反転非反転コラムを形成している。

- [0667] 複数の第2反転コラム96は、活性領域10から外周領域11に引き出されている(図3B参照)。つまり、複数の第2反転コラム96は、第2層9のうち活性領域10内に位置する部分から第2層9のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。複数の第2反転コラム96は、外周領域11においても第2配列方向Da2に間隔を空けて配列され、第2延在方向De2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。つまり、複数の第2反転コラム96は、外周領域11においても複数の第1反転コラム14および複数の第1非反転コラム15に交差している。
- [0668] さらに、複数の第2反転コラム96は、外周領域11から第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方(この形態では双方)に向けて延び、第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方(この形態では双方)から露出した部分をそれぞれ有している。
- [0669] 複数の第2反転コラム96は、断面視において第2層9内で第2軸チャンネルCH2に沿って延びるチャネリング領域からなる。つまり、第2反転コラム96は、第2層9内において低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域(第2軸チャンネルCH2)に対して平行にまたはほぼ平行に導入された不純物領域であり、第1主面3に対して傾斜して延びている。
- [0670] したがって、複数の第2反転コラム96は、第2軸チャンネルCH2のオフ方向Doffおよびオフ角 θ_{off} にはほぼ一致したオフ方向Doffおよびオフ角 θ_{off} を有している。換言すると、複数の第2反転コラム96は、鉛直軸からオフ方向Doffに向けてオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜している。複数の第2反転コラム96は、第1不純物領域12と同様、上端部から下端部に向けて漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を有している(図6A~図6Eも併せて参照)。
- [0671] 複数の第2反転コラム96は、第2層9の下端側に位置された下端部、および、第2層9の上端側に位置された上端部をそれぞれ有している。この形態では、複数の第2反転コラム96の下端部は第2層9の厚さ範囲中間部に

対して第2層9の下端側の領域に位置され、複数の第2反転コラム96の上端部は第2層9の厚さ範囲中間部に対して第2層9の上端側の領域に位置されている。つまり、複数の第2反転コラム96は、第2軸チャンネルCH2に沿って第2層9の中間部を横切る厚さ（深さ）を有する単一の不純物領域からなる。

[0672] 下端部は、第2層9の下端から上端側に間隔を空けて形成され、第2層9の一部（下端部）を挟んで第1層8（複数の第1非反転コラム15）に対向していてもよい。下端部は、第2層9の下端とほぼ一致し、第1層8に接続されていてもよい。第2層9の下端および下端部間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第2層9の下端および下端部間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0673] 複数の第2反転コラム96の下端部は、第1層8および第2層9の境界部を横切る延部を有していることが好ましい。複数の第2反転コラム96の延部は、第1層8内で複数の第1非反転コラム15に接続されていることが好ましい。つまり、複数の第2反転コラム96は、複数の第1非反転コラム15と共に厚さ方向に連続的に延びる1つの立体格子状の反転コラムを形成していることが好ましい。第2軸チャンネルCH2は第1軸チャンネルCH1とほぼ一致しているため、第2反転コラム96の延部は第1層8内において第1軸チャンネルCH1に沿って形成される。

[0674] この場合、第1層8の上端を基準とする第2反転コラム96の延部の厚さは、 $0\ \mu\text{m}$ を超えて $2\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第2反転コラム96の延部の厚さは、 $0\ \mu\text{m}$ を超えて $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0675] 複数の第2反転コラム96の上端部は、第2層9の上端（つまり第1主面3）から下端側に間隔を空けて形成され、第2層9の一部（上端部）を挟ん

で第2層9の上端に対向していてもよい。この場合、第2層9における第1主面3および上端部の間のスペースは、デバイス構造（他の不純物領域等）を形成するための領域として使用されてもよい。むしろ、上端部は、第2層9の上端（つまり第1主面3）から露出していてもよい。

[0676] 第2層9の上端および第2反転コラム96の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第2層9の上端および第2反転コラム96の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。

[0677] 複数の第2反転コラム96は、 $1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。第2反転コラム96のp型不純物濃度（ピーク値）は、第1非反転コラム15のp型不純物濃度（ピーク値）以上であってもよい。第2反転コラム96のp型不純物濃度（ピーク値）は、第1非反転コラム15のp型不純物濃度（ピーク値）未満であってもよい。第2反転コラム96のp型不純物濃度（ピーク値）は、第1非反転コラム15のp型不純物濃度（ピーク値）とほぼ等しくてもよい。

[0678] 第2反転コラム96のp型不純物濃度は、少なくとも1種の3価元素によって調整されていることが好ましい。第2反転コラム96のp型不純物濃度は、炭素よりも重たい重元素に属する3価元素によって調整されていることが特に好ましい。つまり、第2反転コラム96は、ホウ素以外の3価元素（アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種）を含むことが好ましい。第2反転コラム96のp型不純物濃度は、この形態では、アルミニウムによって調整されている。

[0679] 一方、第2非反転コラム97は、第2層9のうちの複数の第2反転コラム96によって区画されたn型の領域からそれぞれなる。具体的には、複数の第2非反転コラム97は、第2層9内において第2配列方向D a 2に間隔を空けて配列され、第2延在方向D e 2に延びる帯状にそれぞれ区画されている。つまり、複数の第2非反転コラム97は第2延在方向D e 2に延びるス

トライプ状に区画されている。

- [0680] 複数の第2非反転コラム97は、平面視において複数の第1反転コラム14および複数の第1非反転コラム15に交差している。複数の第2非反転コラム97は、積層部7内において複数の第1反転コラム14と共にn型の立体格子状の反転非反転コラムを形成している。
- [0681] 複数の第2非反転コラム97は、この形態では、活性領域10から外周領域11に引き出されている（図3B参照）。つまり、複数の第2非反転コラム97は、第2層9のうち活性領域10内に位置する部分から第1層8のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。複数の第2非反転コラム97は、外周領域11においても第2配列方向D a 2に間隔を空けて配列され、第2延在方向D e 2に延びる帯状にそれぞれ形成されている。
- [0682] さらに、複数の第2非反転コラム97は、外周領域11から第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第2側面5Bおよび第4側面5Dのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。
- [0683] 複数の第2非反転コラム97は、複数の第2反転コラム96と共にチャージバランスを有する複数の第2pn接合部を形成している。つまり、複数の第2非反転コラム97は、複数の第2反転コラム96と第2スーパージャンクション構造S J 2を構成している。チャージバランスを有する状態は、互いに隣り合う複数の第2反転コラム96に関して、一方の第2pn接合部から拡がる空乏層、および、他方の第2pn接合部から拡がる空乏層が、複数の第2非反転コラム97内で接続される状態を意味する。
- [0684] 複数の第2非反転コラム97の下端部が複数の第1反転コラム14に接続されることにより、これらの接続部に形成されるn型の濃度勾配が緩和される。したがって、チャージバランスの精度が向上される。同様に、第2反転コラム96の下端部が第1非反転コラム15に接続されることにより、これらの接続部に形成されるp型の濃度勾配が緩和される。したがって、チャージバランスの精度が向上される。その他、第2層9の説明は、複数の第2非

反転コラム 97 領域の説明に適用される。

- [0685] 第2反転コラム 96 および第2非反転コラム 97 は、前述の製造方法において、「第2不純物領域 13」の形成工程（図 20 のステップ S 14）を省略し、第2反転コラム 16 の形成工程（図 20 のステップ S 16）において p 型の第2反転コラム 96 の形成工程を実施することによって形成される。
- [0686] 前述の各形態において p 型の第2反転コラム 96 および n 型の第2非反転コラム 97 が適用された構造は、前述の各形態の説明および添付図面において「第2不純物領域 13」を省略し、「第2非反転コラム 17」を「第2反転コラム 96」に置き換え、「第2反転コラム 16」を「第2非反転コラム 97」に置き換えることによって得られる。むろん、p 型の第2反転コラム 96 および n 型の第2非反転コラム 97 は、第1～第2変形例にも適用可能である。
- [0687] 図 49 は、第4変形例に係る反転コラムを示す断面斜視図である。前述の各形態では、第1不純物領域 12 が第1層 8 内に形成され、第1不純物領域 12 の導電型を反転させる n 型の複数の第1反転コラム 14 が第1層 8 内に形成されていた。
- [0688] これに対して、第4変形例では、第1不純物領域 12 の形成工程が省略され、第1層 8 の導電型を n 型から p 型に反転させる p 型の複数の第1反転コラム 98 が第1層 8 内に形成され、第1層 8 の一部からそれぞれなる n 型の複数の第1非反転コラム 99 が区画されている。
- [0689] 複数の第1反転コラム 98 は、第1層 8 内において水平方向に間隔を空けて形成されている。複数の第1反転コラム 98 は、前述の各形態の場合と同様、第1幅 W_1 、第1領域厚さ TR_1 、第1アスペクト比 TR_1/W_1 および第1ピッチ P_1 を有している。
- [0690] 複数の第1反転コラム 98 は、第1層 8 内において第1配列方向 Da_1 に間隔を空けて配列され、第1延在方向 De_1 に延びる帯状にそれぞれ形成されている。つまり、複数の第1反転コラム 98 は第1延在方向 De_1 に延びるストライプ状に形成されている。

- [0691] 図49では、第1配列方向 D_{a1} が a 軸方向（第1方向 X ）であり、第1延在方向 D_{e1} が m 軸方向（第2方向 Y ）である例が示されている。むしろ、第1配列方向 D_{a1} が m 軸方向であり、第1延在方向 D_{e1} が a 軸方向であってもよい。また、第1配列方向 D_{a1} が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であり、第1延在方向 D_{e1} が a 軸方向および m 軸方向以外の方向であってもよい。
- [0692] 複数の第1反転コラム98は、活性領域10から外周領域11に引き出されている（図3B参照）。つまり、複数の第1反転コラム98は、第1層8のうち活性領域10内に位置する部分から第1層8のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。複数の第1反転コラム98は、外周領域11においても第1配列方向 D_{a1} に間隔を空けて配列され、第1延在方向 D_{e1} に延びる帯状にそれぞれ形成されている。
- [0693] さらに、複数の第1反転コラム98は、外周領域11から第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向けて延び、第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。
- [0694] 複数の第1反転コラム98は、断面視において第1層8内で第1軸チャンネル $CH1$ に沿って延びるチャネリング領域からなる。つまり、第1反転コラム98は、第1層8内において低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域（第1軸チャンネル $CH1$ ）に対して平行にまたはほぼ平行に導入された不純物領域であり、第1主面3に対して傾斜して延びている。
- [0695] したがって、複数の第1反転コラム98は、第1軸チャンネル $CH1$ のオフ方向 D_{off} およびオフ角 θ_{off} にはほぼ一致したオフ方向 D_{off} およびオフ角 θ_{off} を有している。換言すると、複数の第1反転コラム98は、鉛直軸からオフ方向 D_{off} に向けてオフ角 θ_{off} 分だけ傾斜している。複数の第1反転コラム98は、第2不純物領域13と同様、上端部から下端部に向けて漸増部20、ピーク部21、緩慢部22および漸減部23を有している（図6A～図6Eも併せて参照）。

- [0696] 複数の第1反転コラム98は、第1層8の下端側に位置された下端部、および、第1層8の上端側に位置された上端部をそれぞれ有している。この形態では、複数の第1反転コラム98の下端部は第1層8の厚さ範囲中間部に対して第1層8の下端側の領域に位置され、複数の第1反転コラム98の上端部は第1層8の厚さ範囲中間部に対して第1層8の上端側の領域に位置されている。つまり、複数の第1反転コラム98は、第1軸チャンネルCH1に沿って第1層8の中間部を横切る厚さ（深さ）を有する単一の不純物領域からなる。
- [0697] 第1反転コラム98の下端部は、第1層8の下端から上端側に間隔を空けて形成され、第1層8の一部（下端部）を挟んでベース層6に対向していてもよい。第1反転コラム98の下端部は、第1層8の下端とほぼ一致し、ベース層6に接続されていてもよい。
- [0698] 第1層8の下端および第1反転コラム98の下端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1層8の下端および第1反転コラム98の下端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0699] 第1反転コラム98の下端部は、ベース層6および第1層8の境界部を横切り、ベース層6内に位置する延部を有していてもよい。この場合、ベース層6の上端を基準とする第1反転コラム98の延部の厚さは、 $0\ \mu\text{m}$ を超えて $2\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1反転コラム98の延部の厚さは、 $0\ \mu\text{m}$ を超えて $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下、 $1\ \mu\text{m}$ 以上 $1.5\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $1.5\ \mu\text{m}$ 以上 $2\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0700] 第1反転コラム98の上端部は、第1層8の上端（つまり第2層9）から下端側に間隔を空けて形成され、第1層8の一部（上端部）を挟んで第1層8の上端に対向していてもよい。第1反転コラム98の上端部は、第1層8の上端とほぼ一致し、第2層9に接続されていてもよい。

- [0701] 第1層8の上端および第1反転コラム98の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第1層8の上端および第1反転コラム98の上端部の間の距離は、 $0\ \mu\text{m}$ 以上 $0.25\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $0.75\ \mu\text{m}$ 以下、および、 $0.75\ \mu\text{m}$ 以上 $1\ \mu\text{m}$ 以下のいずれか1つの範囲に属する値を有していてもよい。
- [0702] 複数の第1反転コラム98は、 $1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 以下のp型不純物濃度をピーク値として有していてもよい。第1反転コラム98のp型不純物濃度は、少なくとも1種の3価元素によって調整されていることが好ましい。第1反転コラム98のp型不純物濃度は、炭素よりも重たい重元素に属する3価元素によって調整されていることが特に好ましい。つまり、第1反転コラム98は、ホウ素以外の3価元素（アルミニウム、ガリウムおよびインジウムのうちの少なくとも1種）を含むことが好ましい。第1反転コラム98のp型不純物濃度は、この形態では、アルミニウムによって調整されている。
- [0703] 一方、第1非反転コラム99は、第1層8のうちの複数の第1反転コラム98によって区画されたn型の領域からそれぞれなる。具体的には、複数の第1非反転コラム99は、第1層8内において第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ区画されている。つまり、複数の第1非反転コラム99は第1延在方向De1に延びるストライプ状に区画されている。
- [0704] 複数の第1非反転コラム99は、この形態では、活性領域10から外周領域11に引き出されている（図3B参照）。つまり、複数の第1非反転コラム99は、第1層8のうち活性領域10内に位置する部分から第1層8のうち外周領域11内に位置する部分に引き出されている。複数の第1非反転コラム99は、外周領域11においても第1配列方向Da1に間隔を空けて配列され、第1延在方向De1に延びる帯状にそれぞれ形成されている。
- [0705] さらに、複数の第1非反転コラム99は、外周領域11から第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）に向け

て延び、第1側面5Aおよび第3側面5Cのいずれか一方または双方（この形態では双方）から露出した部分をそれぞれ有している。

[0706] 複数の第1非反転コラム99は、複数の第1反転コラム98と共にチャージバランスを有する複数の第1pn接合部を形成している。つまり、複数の第1非反転コラム99は、複数の第1反転コラム98と第1スーパージャンクション構造SJ1を構成している。チャージバランスを有する状態は、互いに隣り合う複数の第1反転コラム98に関して、一方の第1pn接合部から拡がる空乏層、および、他方の第1pn接合部から拡がる空乏層が、複数の第1非反転コラム99内で接続される状態を意味する。その他、第1層8の説明は、複数の第1非反転コラム99領域の説明に適用される。

[0707] 複数の第2反転コラム16および第2非反転コラム17は、前述の各形態の場合と同様の態様でそれぞれ形成されている。複数の第2反転コラム16は、この例では、平面視において複数の第1反転コラム98および複数の第1非反転コラム99に交差している。

[0708] 複数の第2反転コラム16は、活性領域10および外周領域11の双方の積層部7内において複数の第1非反転コラム99と共にn型の立体格子状の反転非反転コラムを形成している。複数の第2反転コラム16は、第1層8および第2層9の境界部を横切り、第1層8内において複数の第1非反転コラム99に接続されていることが好ましい。つまり、複数の第2反転コラム16は、複数の第1非反転コラム99と共に厚さ方向に連続的に延びるn型の立体格子状の反転非反転コラムを形成していることが好ましい。

[0709] 第2非反転コラム17は、この例では、平面視において複数の第1反転コラム98および複数の第1非反転コラム99に交差している。複数の第2非反転コラム17は、活性領域10および外周領域11の双方の積層部7内において複数の第1反転コラム98と共にp型の立体格子状の反転非反転コラムを形成している。

[0710] 複数の第2非反転コラム17は、第1層8および第2層9の境界部を横切り、第1層8内において複数の第1反転コラム98に接続されていることが

好ましい。つまり、複数の第2非反転コラム17は、複数の第1反転コラム98と共に厚さ方向に連続的に延びるp型の立体格子状の反転非反転コラムを形成していることが好ましい。

[0711] 複数の第2反転コラム16の下端部が複数の第1非反転コラム99に接続されることにより、これらの接続部に形成されるn型の濃度勾配が緩和される。したがって、チャージバランスの精度が向上される。同様に、複数の第2非反転コラム17の下端部が複数の第1反転コラム98に接続されることにより、これらの接続部に形成されるp型の濃度勾配が緩和される。したがって、チャージバランスの精度が向上される。

[0712] 第1反転コラム98および第1非反転コラム99は、前述の製造方法において、「第1不純物領域12」の形成工程（図20のステップS6）を省略し、第1反転コラム14の形成工程（図20のステップS8）においてp型の第1反転コラム98の形成工程を実施することによって形成される。

[0713] 前述の各形態においてp型の第1反転コラム98およびn型の第1非反転コラム99が適用された構造は、前述の各形態の説明および添付図面において、「第1不純物領域12」を省略し、「第1非反転コラム15」を「第1反転コラム98」に置き換え、「第1反転コラム14」を「第1非反転コラム99」に置き換えることによって得られる。むろん、p型の第1反転コラム98およびn型の第1非反転コラム99は、第1～第2変形例にも適用可能である。

[0714] 前述の形態はさらに他の形態で実施できる。前述の各形態では、SiC単結晶をそれぞれ含むベース層6、第1層8、第2層9、バッファ層26およびトップ層30が採用された。しかし、ベース層6、第1層8、第2層9、バッファ層26およびトップ層30の少なくとも1つまたは全部は、SiC単結晶以外のワイドバンドギャップ半導体の単結晶を含んでいてもよい。

[0715] ワイドバンドギャップ半導体は、シリコンのバンドギャップよりも大きいバンドギャップを有する半導体である。ワイドバンドギャップ半導体の単結晶として、炭化シリコン（SiC）、窒化ガリウム（GaN）、ダイヤモンド

ド(C)、酸化ガリウム(Ga_2O_3)等が例示される。ベース層6、第1層8、第2層9、バッファ層26およびトップ層30は、同一種類の単結晶によって構成されていてもよいし、異なる種類の単結晶によって構成されていてもよい。

[0716] 前述のチャネリング注入工程(原子列が疎な領域に不純物を注入する工程)は立方晶を構成する単結晶にも適用可能である。したがって、ワイドバンドギャップ半導体の単結晶は、立方晶または六方晶であってもよい。ベース層6、第1層8、第2層9、バッファ層26およびトップ層30のうちの少なくとも1つまたは全部に対して立方晶の単結晶が適用される場合、これらの軸チャンネルは、立方晶の結晶軸のうち低指数結晶軸に沿う原子列によって取り囲まれた領域によって形成される。

[0717] 立方晶に係る低指数結晶軸は、ミラー指数(h、k、l)に関して、「h」、「k」および「l」の絶対値がいずれも2以下(好ましくは1以下)で表現される結晶軸である。むろん、ベース層6、第1層8、第2層9、バッファ層26およびトップ層30のうちの少なくとも1つまたは全部は、シリコン単結晶を含んでいてもよい。

[0718] 前述の各形態では、MIS構造31およびSBD構造93が異なるチップ2に個別的に形成された例が示された。しかし、MIS構造31およびSBD構造93は1つのチップ2に形成されてもよい。この場合、SBD構造93は、MIS構造31に対する還流ダイオードとしてソースパッド47(アノードパッド)およびドレインパッド48(カソードパッド)の間に電氣的に介装されてもよい。

[0719] 前述の各形態では、n型のベース層6が示された。しかし、p型のベース層6が採用されてもよい。この場合、MISFET構造に代えてIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)構造が形成される。この場合、前述の説明において、MISFET構造の「ソース」がIGBT構造の「エミッタ」に置き換えられ、MISFET構造の「ドレイン」がIGBT構造の「コレクタ」に置き換えられる。p型のベース層6はイオン注入法によってチッ

プ2の第2主面4の表層部に導入された3価元素を含むp型領域であってもよい。

[0720] 以下、この明細書および図面から抽出される特徴例が示される。以下、括弧内の英数字等は前述の各形態における対応構成要素等を表すが、各項目（Clause）の範囲を前述の各形態に限定する趣旨ではない。以下の項目に係る「半導体装置」は、必要に応じて「SiC半導体装置」、「ワイドバンドギャップ半導体装置」、「半導体スイッチング装置」、「MISFET装置」、「IGBT装置」等に置き換えられてもよい。

[0721] [A1] 第1層（8）と、前記第1層（8）の上に積層された第2層（9）と、前記第1層（8）内に形成されたp型の第1不純物領域（12）と、前記第2層（9）内に形成されたp型の第2不純物領域（13）と、前記第1不純物領域（12）の導電型を反転させるように前記第1層（8）内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第1反転コラム（14）と、前記第2不純物領域（13）の導電型を反転させるように前記第2層（9）内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第2反転コラム（16）と、を含む、半導体装置（1A、1B、1C）。

[0722] [A2] 前記第1層（8）の導電型は、n型であり、前記第2層（9）の導電型は、n型であり、前記第1不純物領域（12）は、前記第1層（8）の導電型を反転させ、前記第2不純物領域（13）は、前記第2層（9）の導電型を反転させている、A1に記載の半導体装置（1A、1B、1C）。

[0723] [A3] 複数の前記第2反転コラム（16）は、前記第1層（8）および前記第2層（9）の境界部を横切り、前記第1層（8）内において複数の前記第1反転コラム（14）に接続されている、A1またはA2に記載の半導体装置（1A、1B、1C）。

[0724] [A4] 各前記第1反転コラム（14）は、前記第1層（8）の中間部を横切る単一の領域からなり、各前記第2反転コラム（16）は、前記第2層（9）の中間部を横切る単一の領域からなる、A1～A3のいずれか一つに記載の半導体装置（1A、1B、1C）。

- [0725] [A 5] 前記第1層(8)は、積層方向に第1軸チャンネル(CH1)を有し、前記第2層(9)は、積層方向に第2軸チャンネル(CH2)を有し、複数の前記第1反転コラム(14)は、前記第1軸チャンネル(CH1)に沿って延び、複数の前記第2反転コラム(16)は、前記第2軸チャンネル(CH2)に沿って延びている、A1~A4のいずれか一つに記載の半導体装置(1A、1B、1C)。
- [0726] [A 6] 複数の前記第1反転コラム(14)は、平面視で第1延在方向(De1)に帯状に延び、複数の前記第2反転コラム(16)は、平面視で前記第1延在方向(De1)以外の第2延在方向(De2)に帯状に延び、複数の前記第1反転コラム(14)に交差している、A1~A5のいずれか一つに記載の半導体装置(1A、1B、1C)。
- [0727] [A 7] 複数の前記第1反転コラム(14)は、平面視で一方方向に帯状に延び、複数の前記第2反転コラム(16)は、平面視で前記一方方向に帯状に延びている、A1~A5のいずれか一つに記載の半導体装置(1A、1B、1C)。
- [0728] [A 8] 第1層(8)と、前記第1層(8)の上に積層されたn型の第2層(9)と、前記第1層(8)内に形成されたp型の不純物領域(12)と、前記不純物領域(12)の導電型を反転させるように前記第1層(8)内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第1反転コラム(14)と、前記第2層(9)の導電型を反転させるように前記第2層(9)内に間隔を空けて形成されたp型の複数の第2反転コラム(96)と、を含む、半導体装置(1A、1B、1C)。
- [0729] [A 9] 前記第1層(8)の導電型は、n型であり、前記不純物領域(12)は、前記第1層(8)の導電型を反転させている、A8に記載の半導体装置(1A、1B、1C)。
- [0730] [A 10] 前記不純物領域(12)のうちの複数の前記第1反転コラム(14)によって区画された領域からそれぞれなるp型の複数の非反転コラム(15)をさらに含み、複数の前記第2反転コラム(96)は、前記第1層

(8) および前記第2層(9)の境界部を横切り、前記第1層(8)内において複数の前記非反転コラム(15)に接続されている、A8またはA9に記載の半導体装置(1A、1B、1C)。

[0731] [A11] 各前記第1反転コラム(14)は、前記第1層(8)の中間部を横切る単一の領域からなり、各前記第2反転コラム(96)は、前記第2層(9)の中間部を横切る単一の領域からなる、A8~A10のいずれか一つに記載の半導体装置(1A、1B、1C)。

[0732] [A12] 前記第1層(8)は、積層方向に第1軸チャンネル(CH1)を有し、前記第2層(9)は、積層方向に第2軸チャンネル(CH2)を有し、複数の前記第1反転コラム(14)は、前記第1軸チャンネル(CH1)に沿って延び、複数の前記第2反転コラム(96)は、前記第2軸チャンネル(CH2)に沿って延びている、A8~A11のいずれか一つに記載の半導体装置(1A、1B、1C)。

[0733] [A13] 複数の前記第1反転コラム(14)は、平面視で第1延在方向(De1)にそれぞれ帯状に延び、複数の前記第2反転コラム(96)は、平面視で前記第1延在方向(De1)以外の第2延在方向(De2)にそれぞれ帯状に延び、複数の前記第1反転コラム(14)に交差している、A8~A12のいずれか一つに記載の半導体装置(1A、1B、1C)。

[0734] [A14] 複数の前記第1反転コラム(14)は、平面視で一方方向にそれぞれ帯状に延び、複数の前記第2反転コラム(96)は、平面視で前記一方方向にそれぞれ帯状に延びている、A8~A12のいずれか一つに記載の半導体装置(1A、1B、1C)。

[0735] [A15] n型の第1層(8)と、前記第1層(8)の上に積層された第2層(9)と、前記第2層(9)内に形成されたp型の不純物領域(13)と、前記第1層(8)の導電型を反転させるように前記第1層(8)内に間隔を空けて形成されたp型の複数の第1反転コラム(98)と、前記不純物領域(13)の導電型を反転させるように前記第2層(9)内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第2反転コラム(16)と、を含む、半導体装置

(1 A、1 B、1 C)。

[0736] [A 1 6] 前記第2層(9)の導電型は、n型であり、前記不純物領域(1 3)は、前記第2層(9)の導電型を反転させている、A 1 5に記載の半導体装置(1 A、1 B、1 C)。

[0737] [A 1 7] 前記第1層(8)のうちの複数の前記第1反転コラム(9 8)によって区画された領域からそれぞれなるn型の複数の非反転コラム(9 9)をさらに含み、複数の前記第2反転コラム(1 6)は、前記第1層(8)および前記第2層(9)の境界部を横切り、前記第1層(8)内において複数の前記非反転コラム(9 9)に接続されている、A 1 5またはA 1 6に記載の半導体装置(1 A、1 B、1 C)。

[0738] [A 1 8] 各前記第1反転コラム(9 8)は、前記第1層(8)の中間部を横切る単一の領域からなり、各前記第2反転コラム(1 6)は、前記第2層(9)の中間部を横切る単一の領域からなる、A 1 5～A 1 7のいずれか一つに記載の半導体装置(1 A、1 B、1 C)。

[0739] [A 1 9] 複数の前記第1反転コラム(9 8)は、平面視で第1延在方向(D e 1)にそれぞれ帯状に延び、複数の前記第2反転コラム(1 6)は、平面視で前記第1延在方向(D e 1)以外の第2延在方向(D e 2)にそれぞれ帯状に延び、複数の前記第1反転コラム(9 8)に交差している、A 1 5～A 1 8のいずれか一つに記載の半導体装置(1 A、1 B、1 C)。

[0740] [A 2 0] 複数の前記第1反転コラム(9 8)は、平面視で一方方向にそれぞれ帯状に延び、複数の前記第2反転コラム(1 6)は、平面視で前記一方方向にそれぞれ帯状に延びている、A 1 5～A 1 8のいずれか一つに記載の半導体装置(1 A、1 B、1 C)。

[0741] [A 2 1] 前記第1層(8)は、SiC単結晶を含む第1SiC層(8)であり、前記第2層(9)は、SiC単結晶を含む第2SiC層(9)である、A 1～A 2 0のいずれか一つに記載の半導体装置(1 A、1 B、1 C)。

[0742] 以上、具体的な形態が詳細に説明されたが、これらは技術的内容を明示す

る具体例に過ぎない。この明細書から抽出される種々の技術的思想は、明細書内の説明順序や形態例の順序等に制限されずにそれらの間で適宜組み合わせ可能である。

符号の説明

[0743]	1 A	S i C半導体装置
	1 B	S i C半導体装置
	1 C	S i C半導体装置
	8	第1層
	9	第2層
	1 2	第1不純物領域
	1 3	第2不純物領域
	1 4	第1反転コラム
	1 5	第1非反転コラム
	1 6	第2反転コラム
	1 7	第2非反転コラム
	9 6	第2反転コラム
	9 7	第2非反転コラム
	9 8	第1反転コラム
	9 9	第1非反転コラム
	C H 1	第1軸チャネル
	C H 2	第2軸チャネル
	D e 1	第1延在方向
	D e 2	第2延在方向

請求の範囲

- [請求項1] 第1 SiC層と、
前記第1 SiC層の上に積層された第2 SiC層と、
前記第1 SiC層内に形成されたp型の第1不純物領域と、
前記第2 SiC層内に形成されたp型の第2不純物領域と、
前記第1不純物領域の導電型を反転させるように前記第1 SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第1反転コラムと、
前記第2不純物領域の導電型を反転させるように前記第2 SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第2反転コラムと、を含む、SiC半導体装置。
- [請求項2] 前記第1 SiC層の導電型は、n型であり、
前記第2 SiC層の導電型は、n型であり、
前記第1不純物領域は、前記第1 SiC層の導電型を反転させ、
前記第2不純物領域は、前記第2 SiC層の導電型を反転させている、請求項1に記載のSiC半導体装置。
- [請求項3] 複数の前記第2反転コラムは、前記第1 SiC層および前記第2 SiC層の境界部を横切り、前記第1 SiC層内において複数の前記第1反転コラムに接続されている、請求項1または2に記載のSiC半導体装置。
- [請求項4] 各前記第1反転コラムは、前記第1 SiC層の中間部を横切る単一の領域からなり、
各前記第2反転コラムは、前記第2 SiC層の中間部を横切る単一の領域からなる、請求項1～3のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。
- [請求項5] 前記第1 SiC層は、積層方向に第1軸チャンネルを有し、
前記第2 SiC層は、積層方向に第2軸チャンネルを有し、
複数の前記第1反転コラムは、前記第1軸チャンネルに沿って延び、
複数の前記第2反転コラムは、前記第2軸チャンネルに沿って延びて

いる、請求項1～4のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

[請求項6] 複数の前記第1反転コラムは、平面視で第1延在方向に帯状に延び

、

複数の前記第2反転コラムは、平面視で前記第1延在方向以外の第2延在方向に帯状に延び、複数の前記第1反転コラムに交差している、請求項1～5のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

[請求項7] 複数の前記第1反転コラムは、平面視で一方方向に帯状に延び、

複数の前記第2反転コラムは、平面視で前記一方方向に帯状に延びている、請求項1～5のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

[請求項8] 第1SiC層と、

前記第1SiC層の上に積層されたn型の第2SiC層と、

前記第1SiC層内に形成されたp型の不純物領域と、

前記不純物領域の導電型を反転させるように前記第1SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第1反転コラムと、

前記第2SiC層の導電型を反転させるように前記第2SiC層内に間隔を空けて形成されたp型の複数の第2反転コラムと、を含む、SiC半導体装置。

[請求項9] 前記第1SiC層の導電型は、n型であり

前記不純物領域は、前記第1SiC層の導電型を反転させている、請求項8に記載のSiC半導体装置。

[請求項10] 前記不純物領域のうちの複数の前記第1反転コラムによって区画された領域からそれぞれなるp型の複数の非反転コラムをさらに含み、

複数の前記第2反転コラムは、前記第1SiC層および前記第2SiC層の境界部を横切り、前記第1SiC層内において複数の前記非反転コラムに接続されている、請求項8または9に記載のSiC半導体装置。

[請求項11] 各前記第1反転コラムは、前記第1SiC層の中間部を横切る単一の領域からなり、

各前記第2反転コラムは、前記第2SiC層の中間部を横切る単一の領域からなる、請求項8～10のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

[請求項12] 前記第1SiC層は、積層方向に第1軸チャンネルを有し、
前記第2SiC層は、積層方向に第2軸チャンネルを有し、
複数の前記第1反転コラムは、前記第1軸チャンネルに沿って延び、
複数の前記第2反転コラムは、前記第2軸チャンネルに沿って延びている、請求項8～11のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

[請求項13] 複数の前記第1反転コラムは、平面視で第1延在方向にそれぞれ帯状に延び、
複数の前記第2反転コラムは、平面視で前記第1延在方向以外の第2延在方向にそれぞれ帯状に延び、複数の前記第1反転コラムに交差している、請求項8～12のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

[請求項14] 複数の前記第1反転コラムは、平面視で一方方向にそれぞれ帯状に延び、
複数の前記第2反転コラムは、平面視で前記一方方向にそれぞれ帯状に延びている、請求項8～12のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

[請求項15] n型の第1SiC層と、
前記第1SiC層の上に積層された第2SiC層と、
前記第2SiC層内に形成されたp型の不純物領域と、
前記第1SiC層の導電型を反転させるように前記第1SiC層内に間隔を空けて形成されたp型の複数の第1反転コラムと、
前記不純物領域の導電型を反転させるように前記第2SiC層内に間隔を空けて形成されたn型の複数の第2反転コラムと、を含む、SiC半導体装置。

[請求項16] 前記第2SiC層の導電型は、n型であり、

前記不純物領域は、前記第2 SiC層の導電型を反転させている、請求項15に記載のSiC半導体装置。

[請求項17] 前記第1 SiC層のうちの複数の前記第1反転コラムによって区画された領域からそれぞれなるn型の複数の非反転コラムをさらに含み、

複数の前記第2反転コラムは、前記第1 SiC層および前記第2 SiC層の境界部を横切り、前記第1 SiC層内において複数の前記非反転コラムに接続されている、請求項15または16に記載のSiC半導体装置。

[請求項18] 各前記第1反転コラムは、前記第1 SiC層の中間部を横切る単一の領域からなり、

各前記第2反転コラムは、前記第2 SiC層の中間部を横切る単一の領域からなる、請求項15～17のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

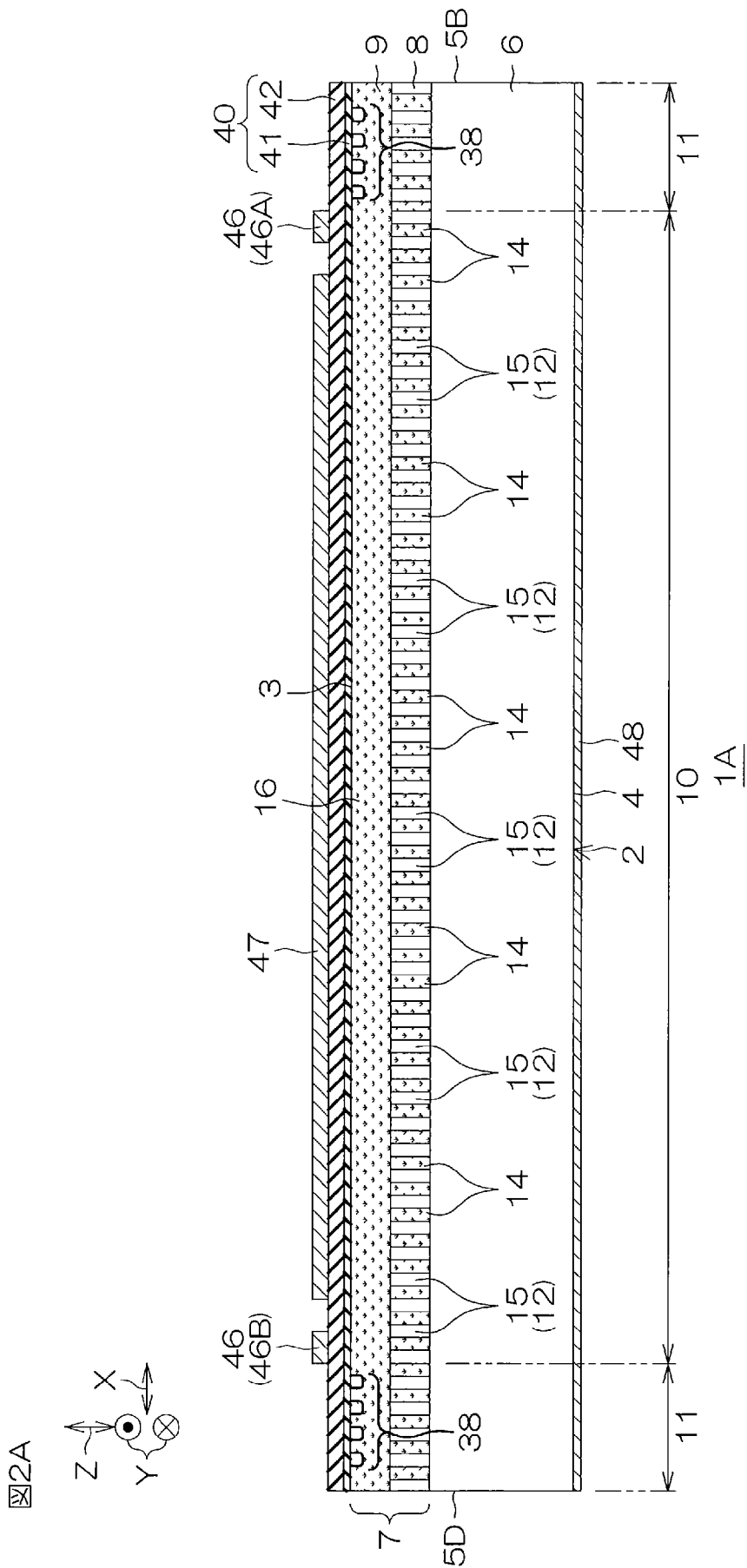
[請求項19] 複数の前記第1反転コラムは、平面視で第1延在方向にそれぞれ帯状に延び、

複数の前記第2反転コラムは、平面視で前記第1延在方向以外の第2延在方向にそれぞれ帯状に延び、複数の前記第1反転コラムに交差している、請求項15～18のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

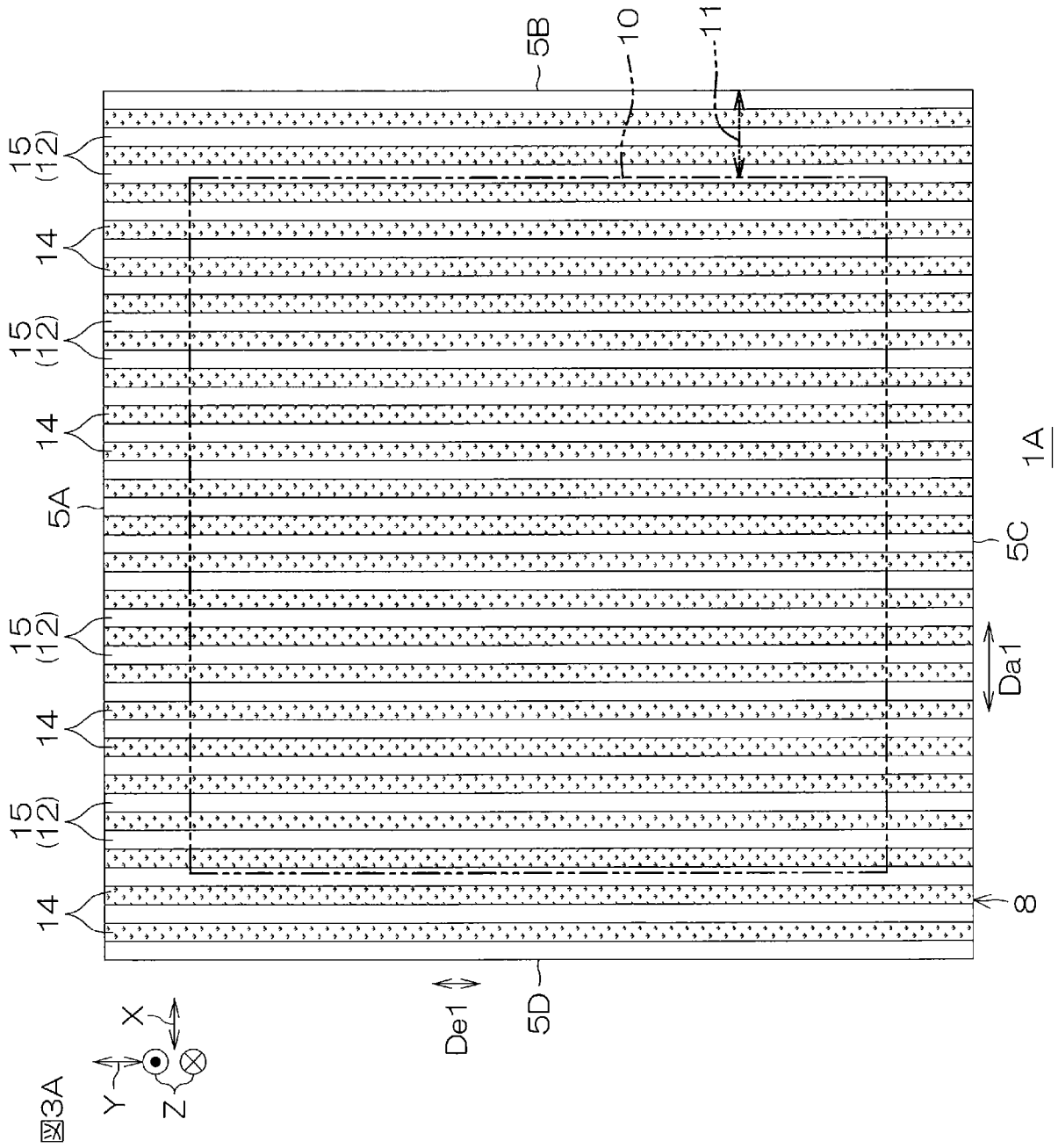
[請求項20] 複数の前記第1反転コラムは、平面視で一方方向にそれぞれ帯状に延び、

複数の前記第2反転コラムは、平面視で前記一方方向にそれぞれ帯状に延びている、請求項15～19のいずれか一項に記載のSiC半導体装置。

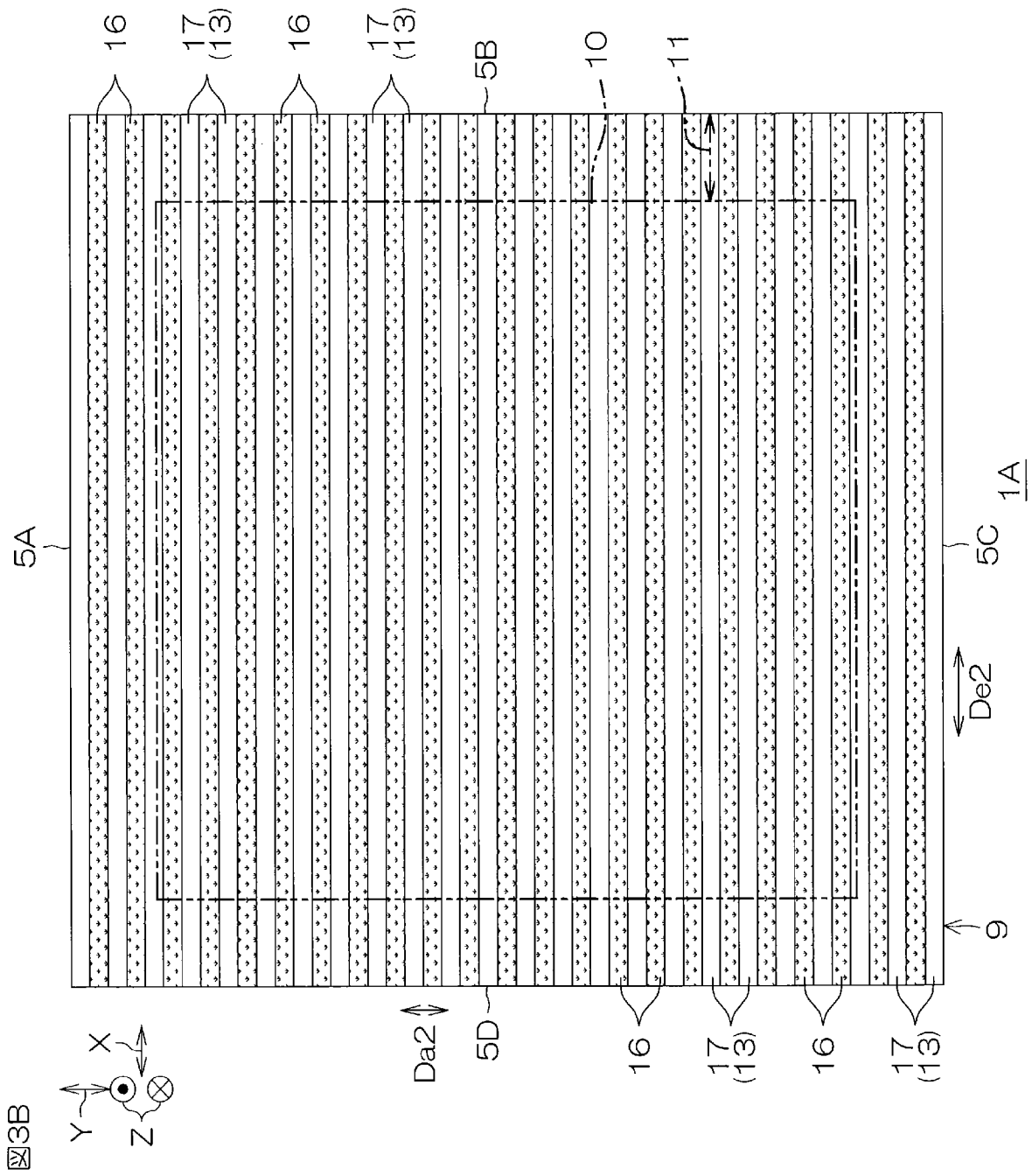
[図2A]



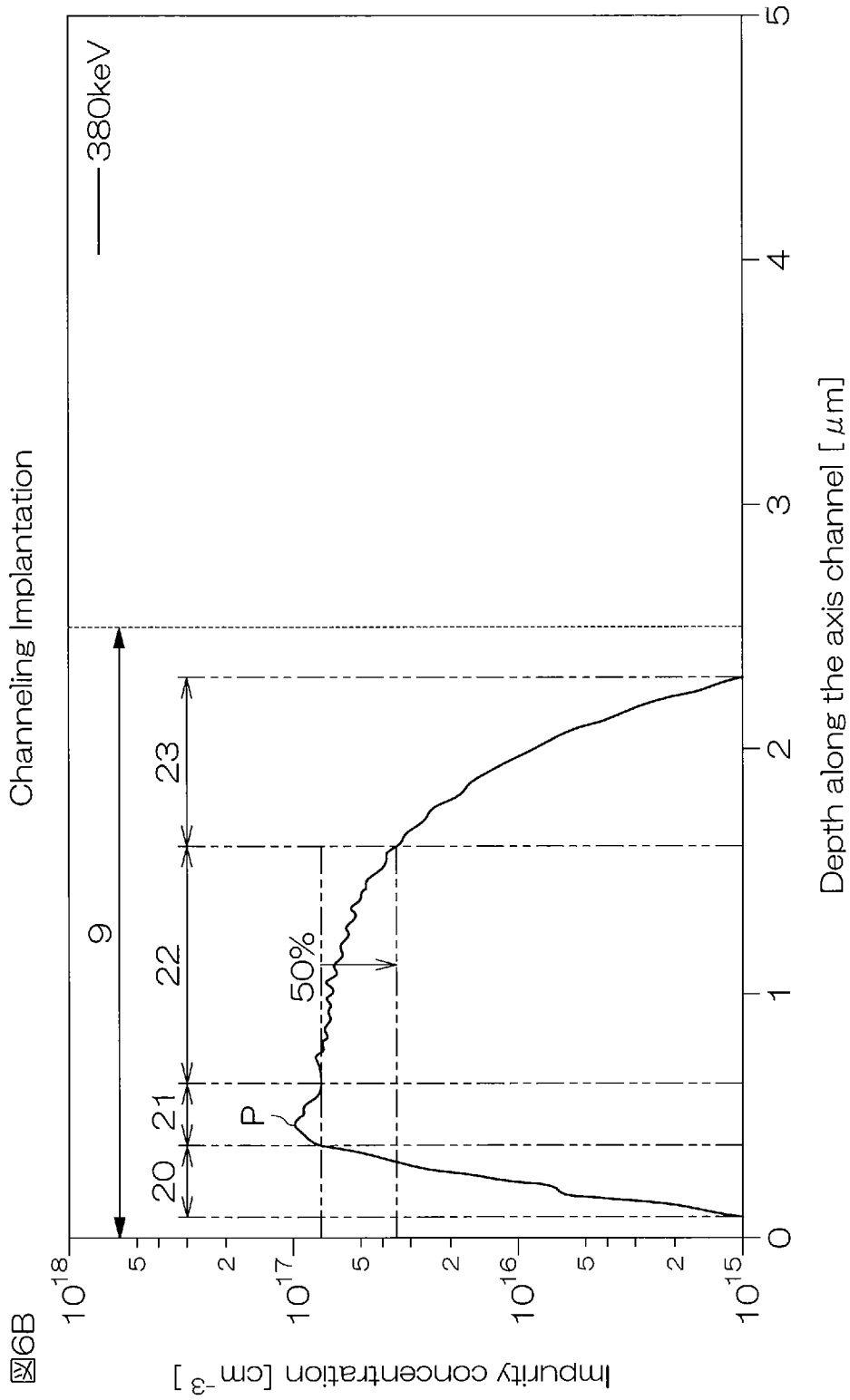
[3A]



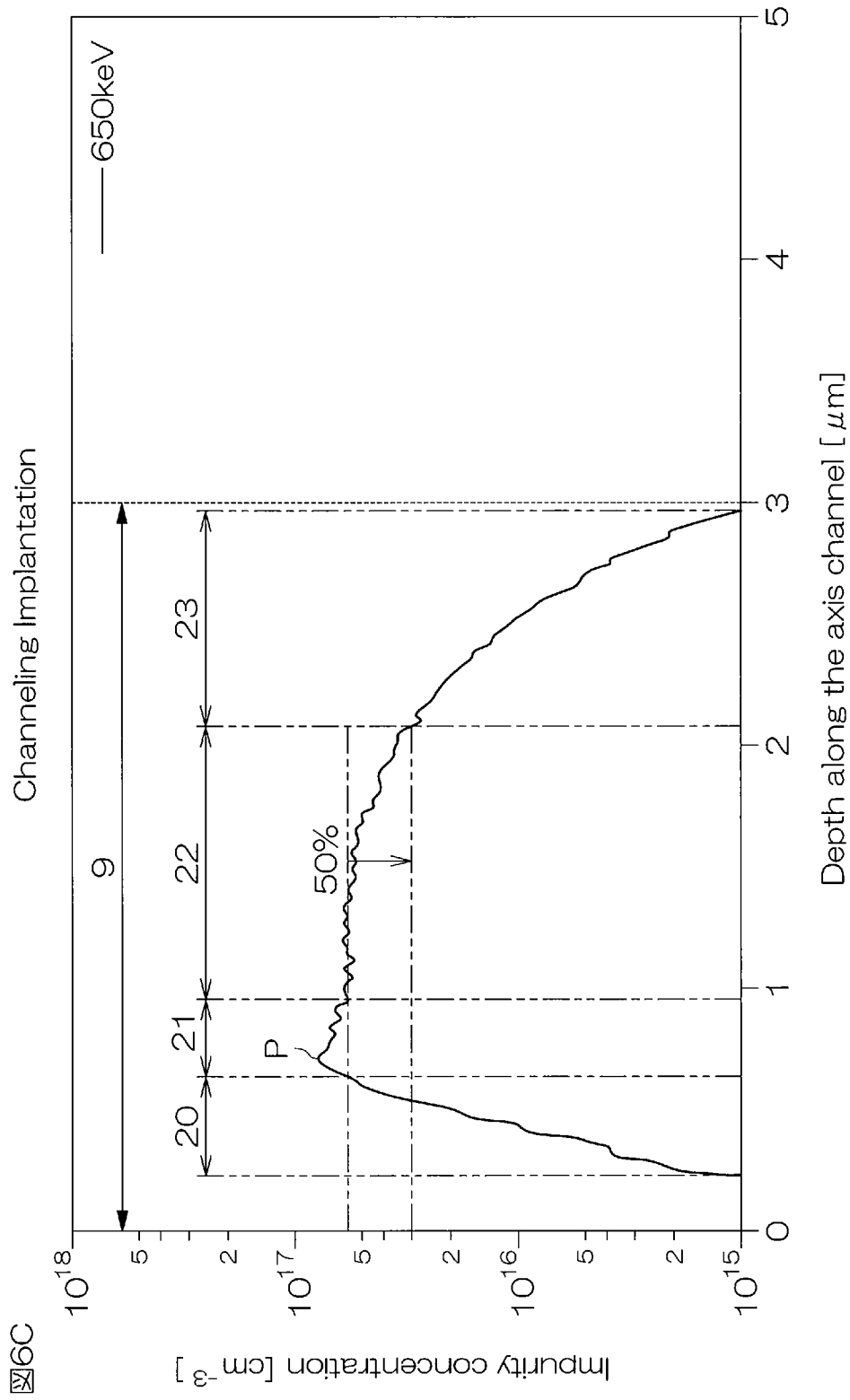
[3B]



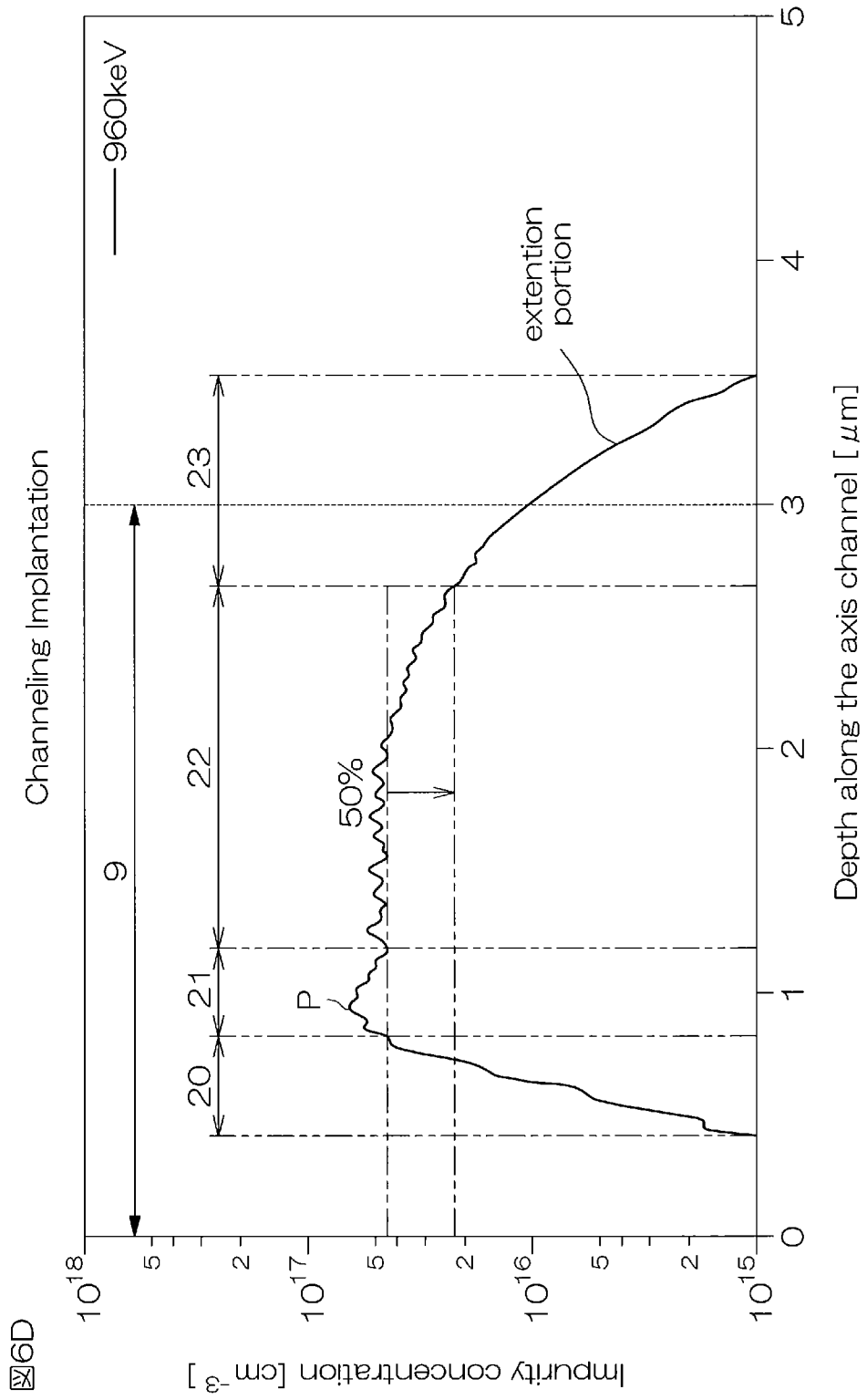
[6B]



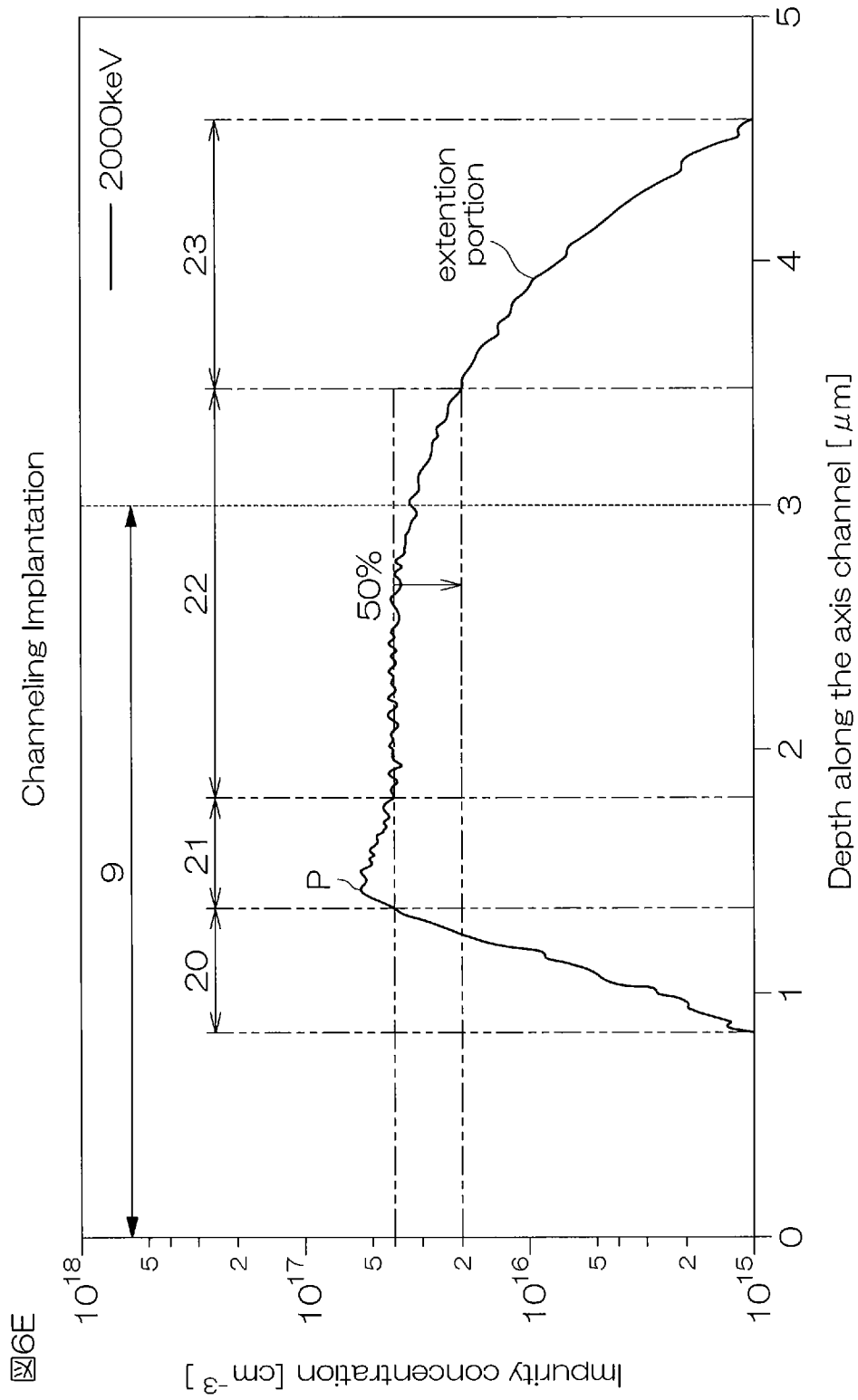
[圖6C]



[6D]

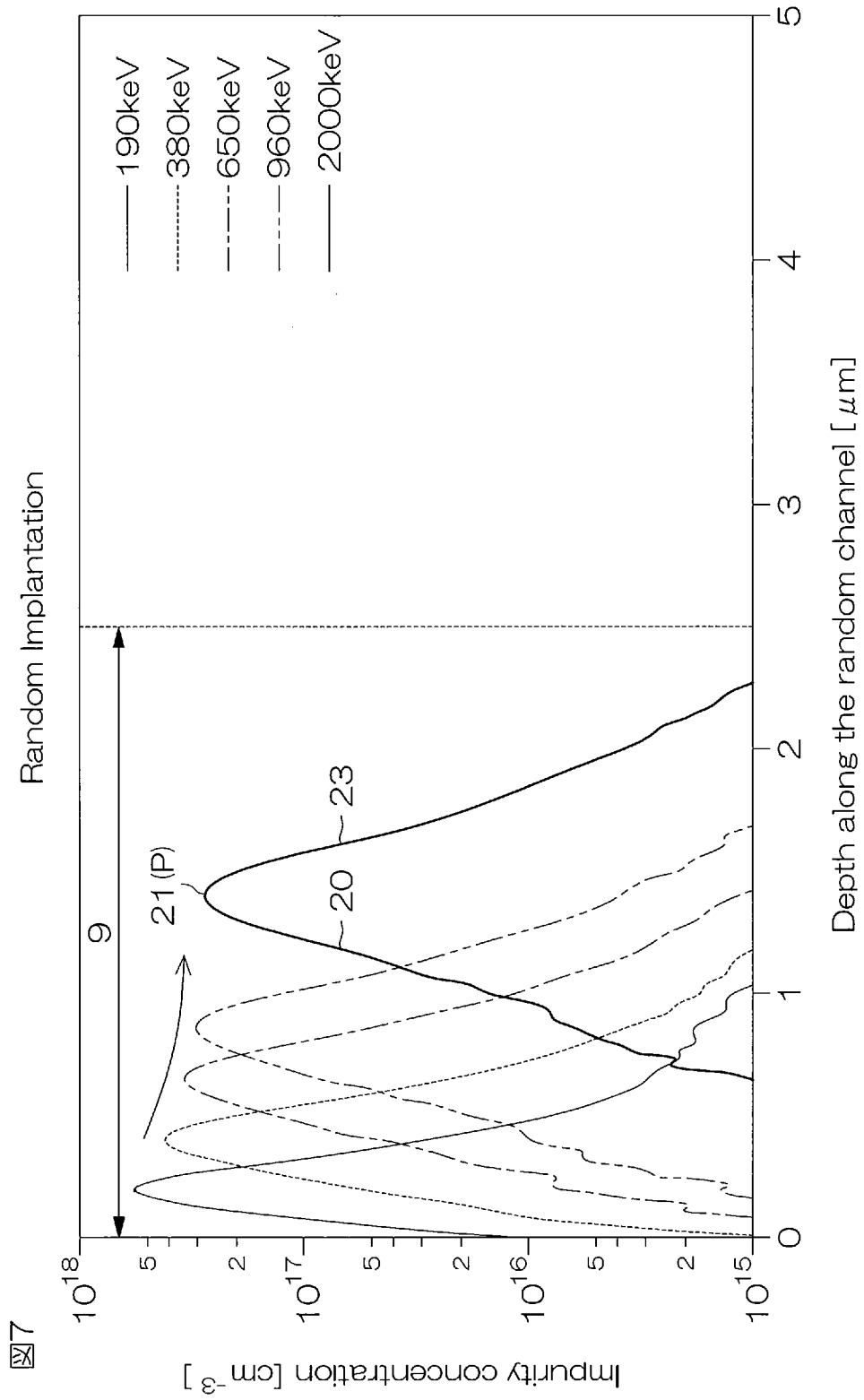


[圖6E]

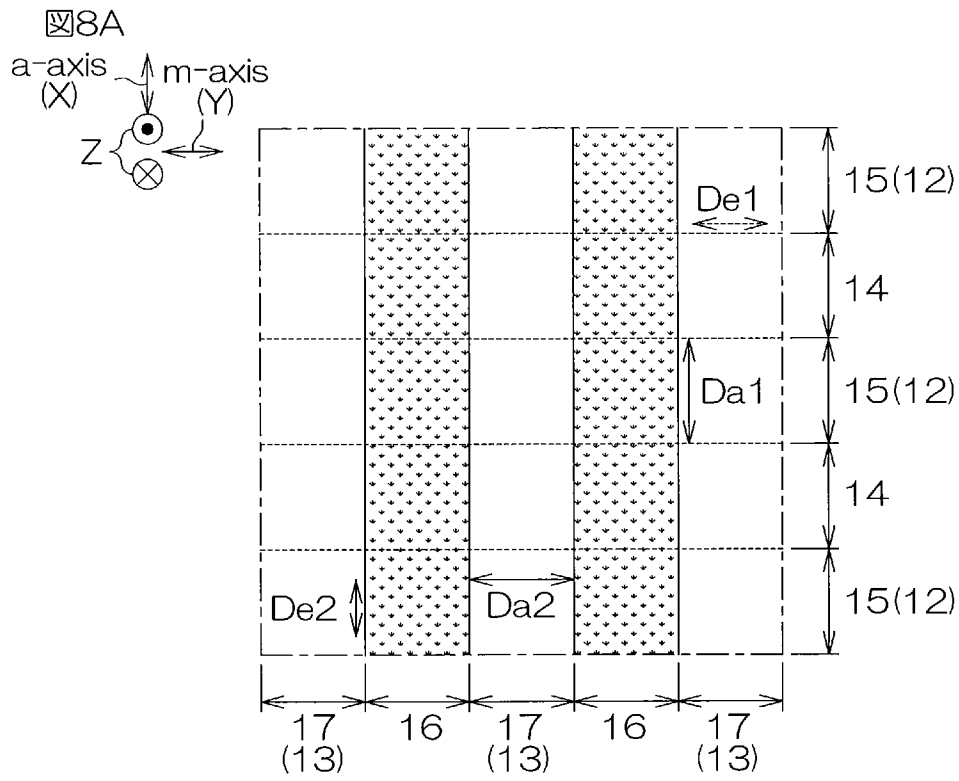


[圖6E]

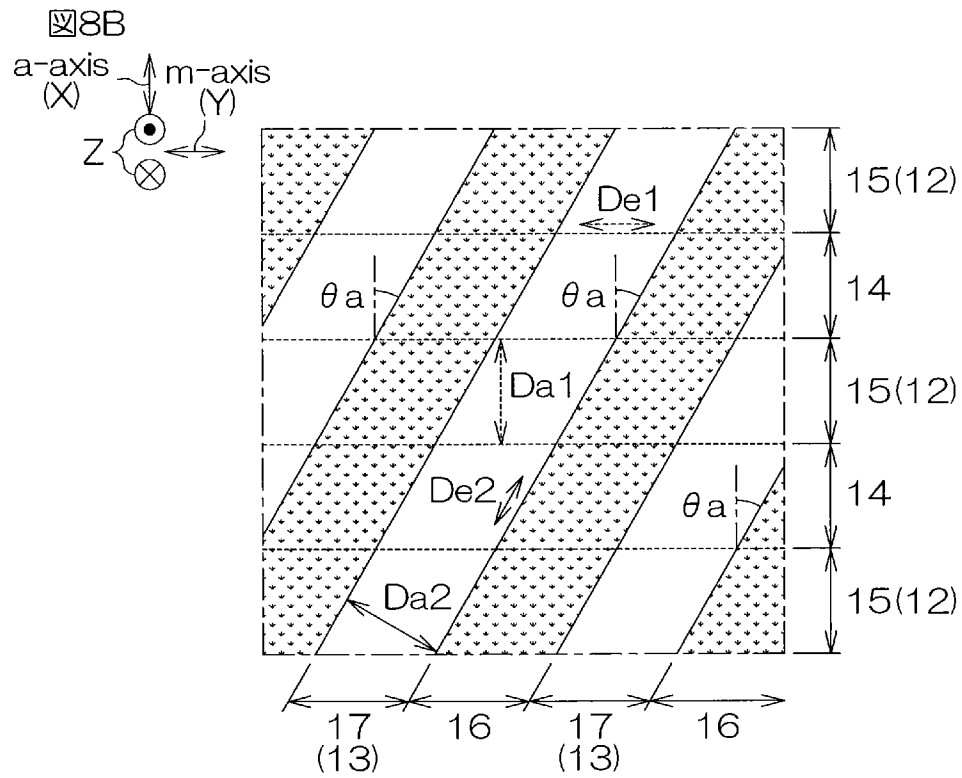
[7]



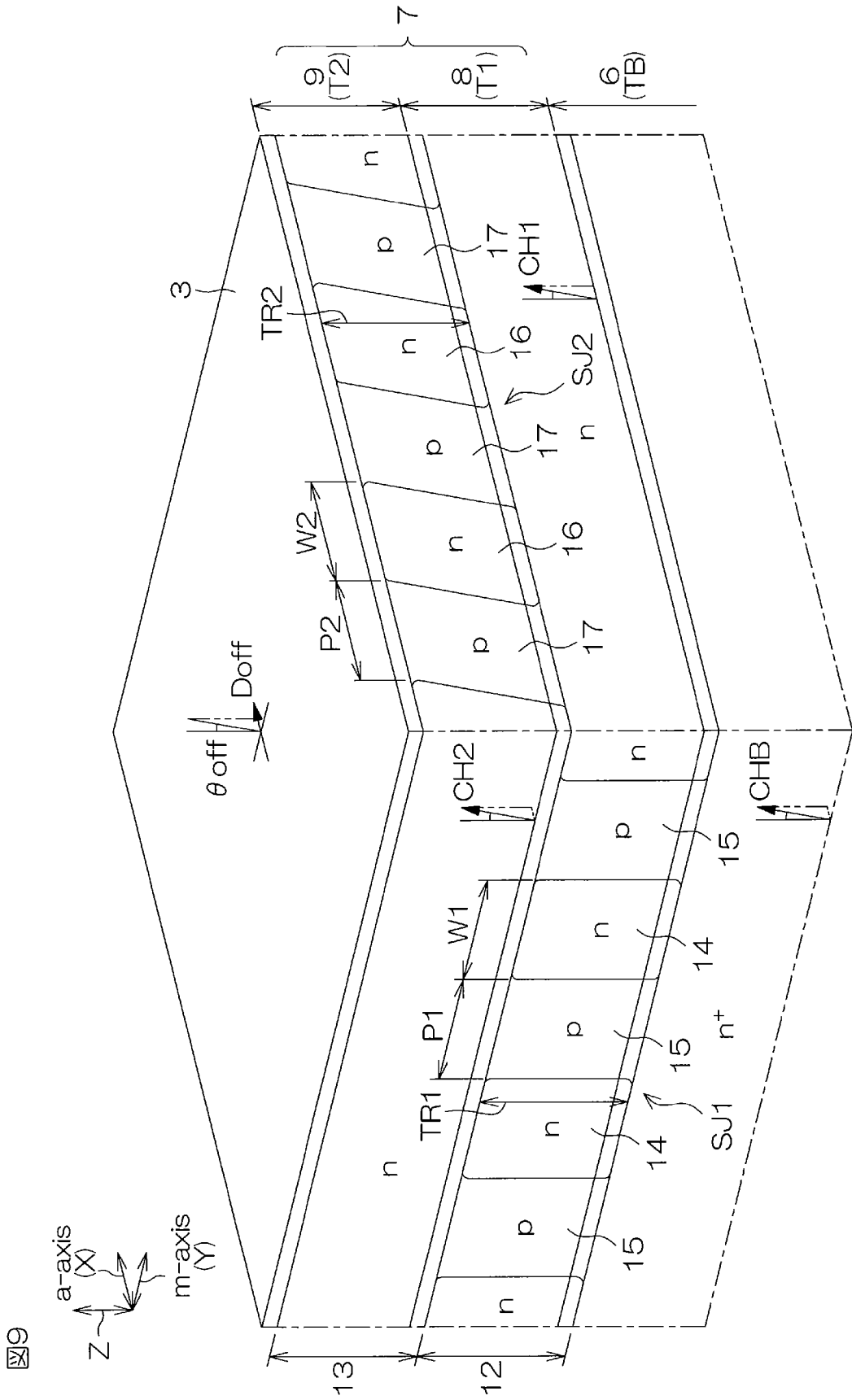
[図8A]



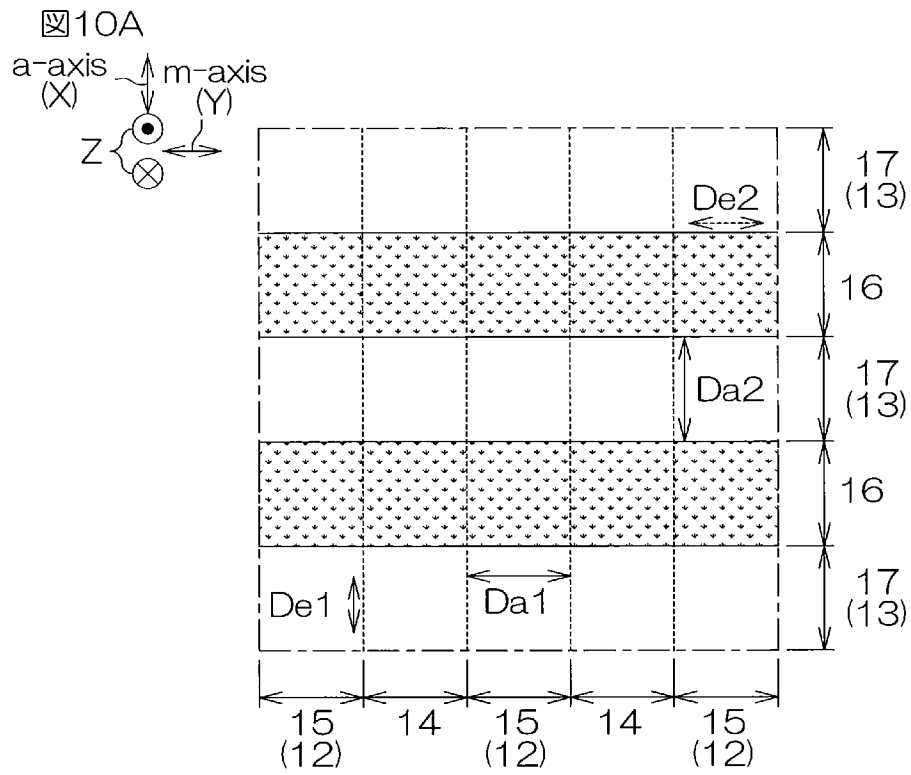
[図8B]



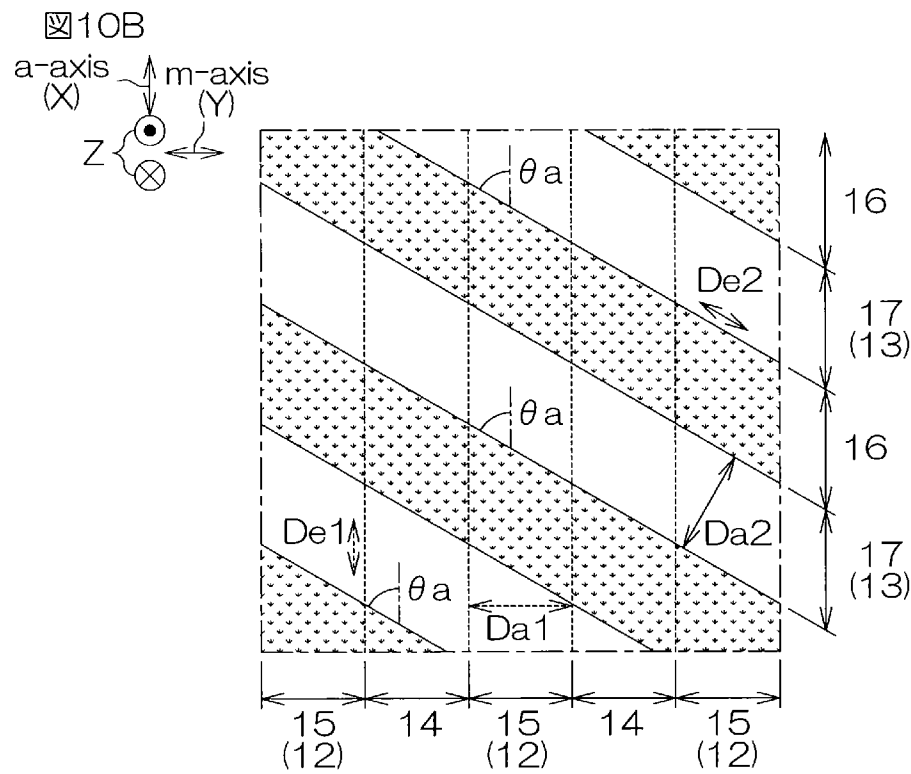
[図9]



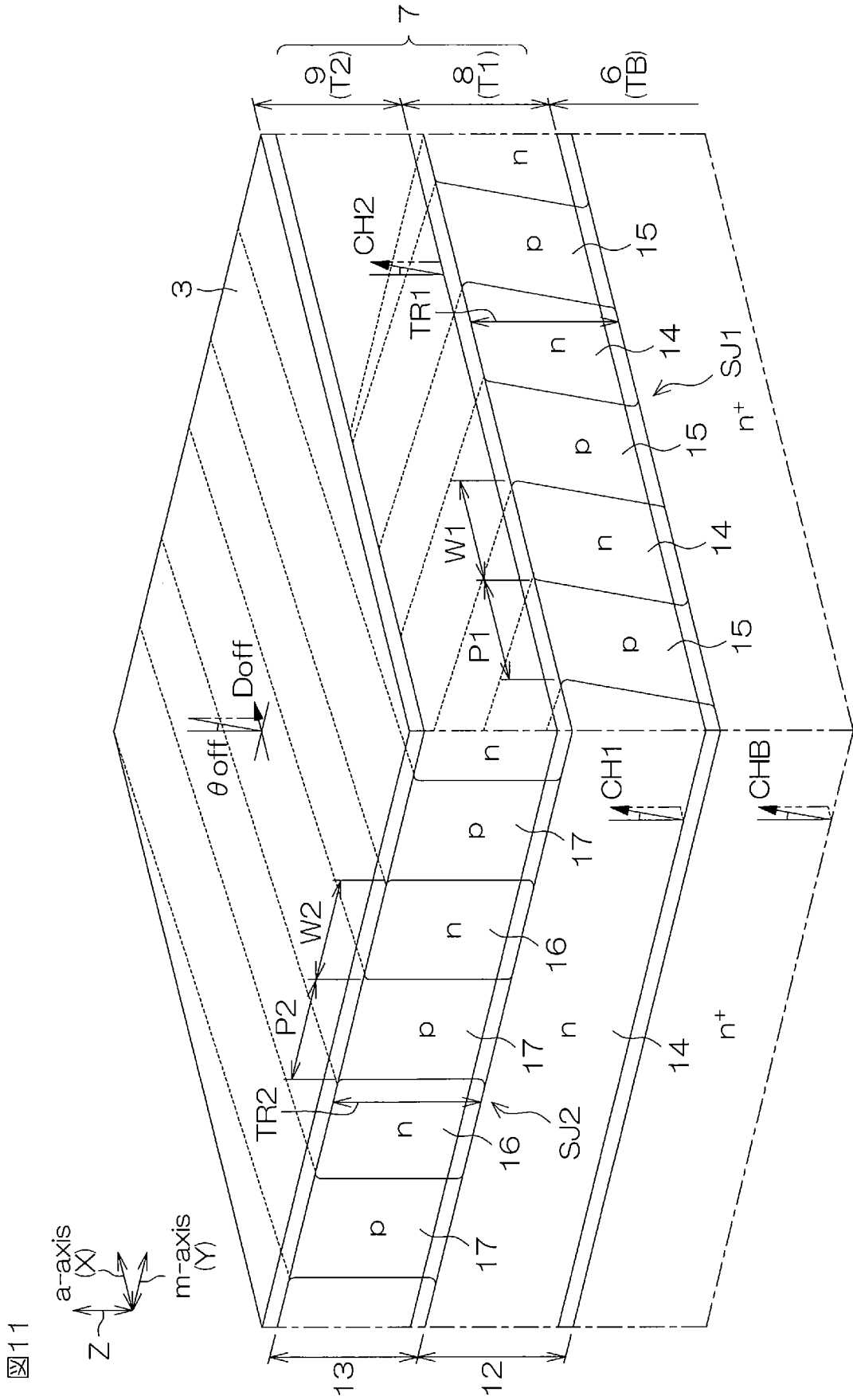
[図10A]



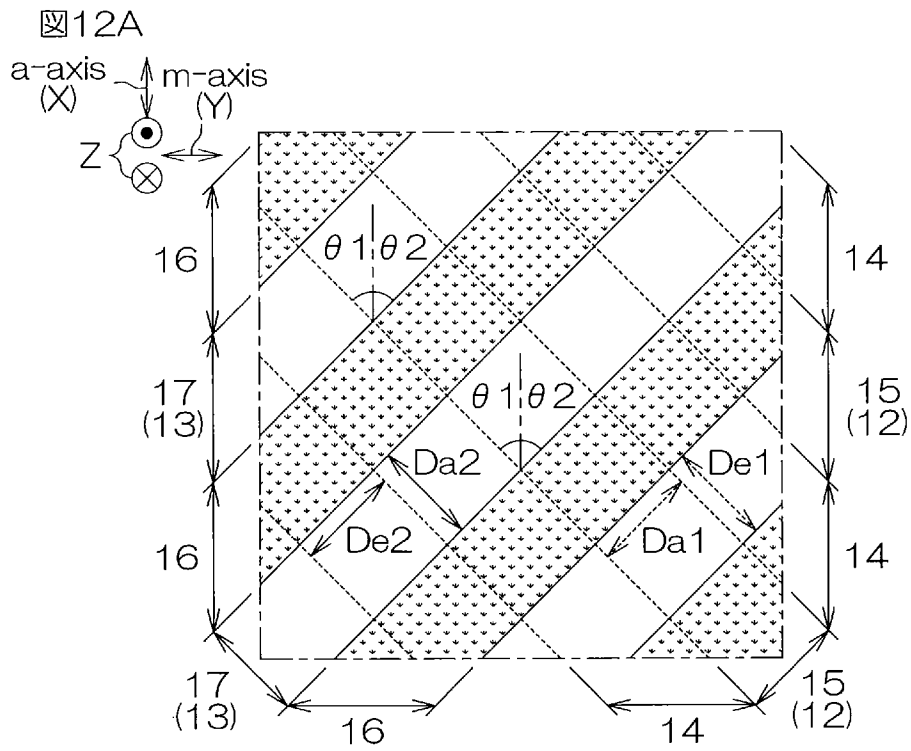
[図10B]



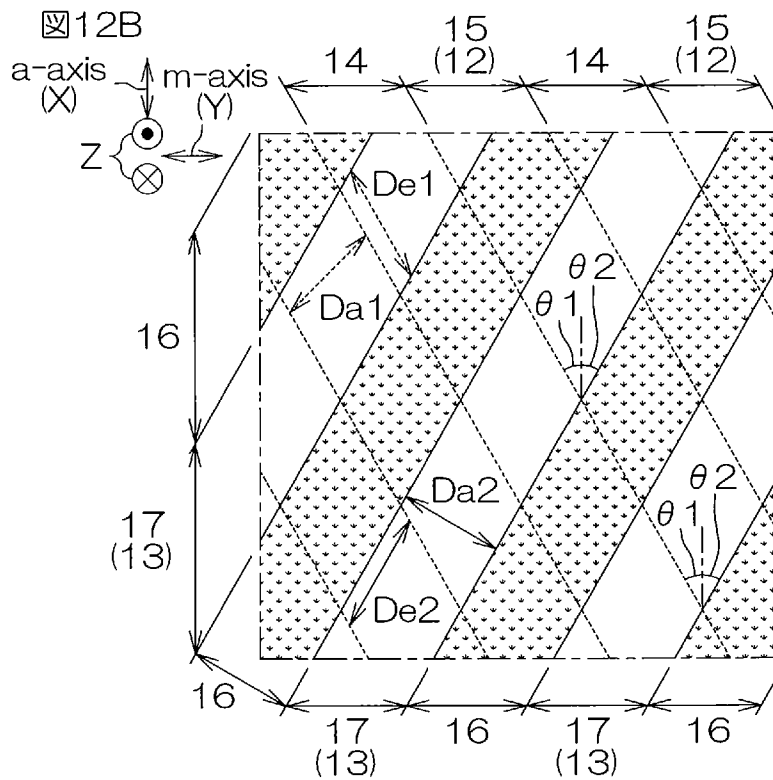
[図11]



[図12A]

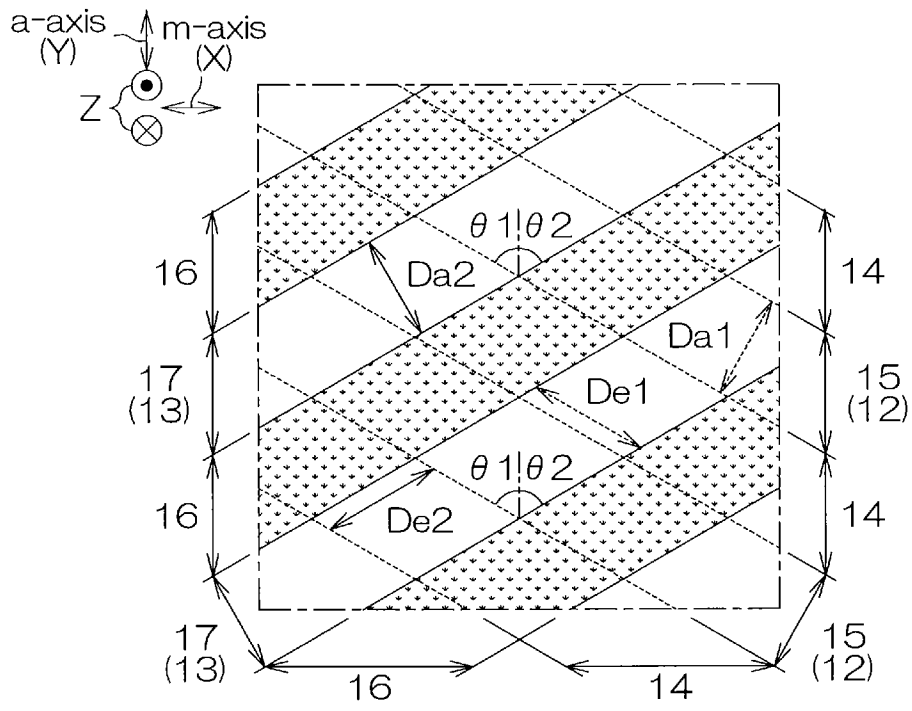



[図12B]

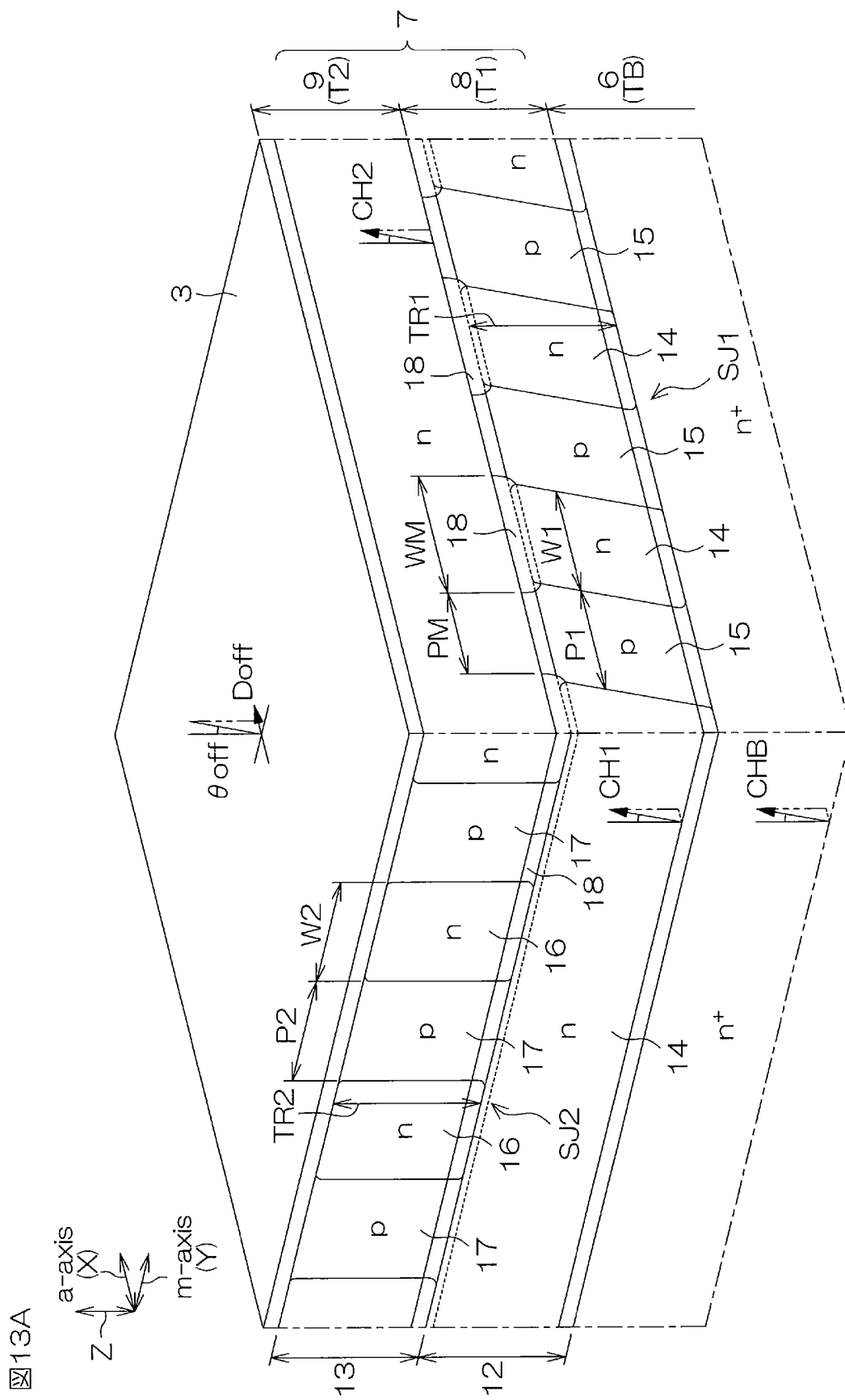



[図12C]

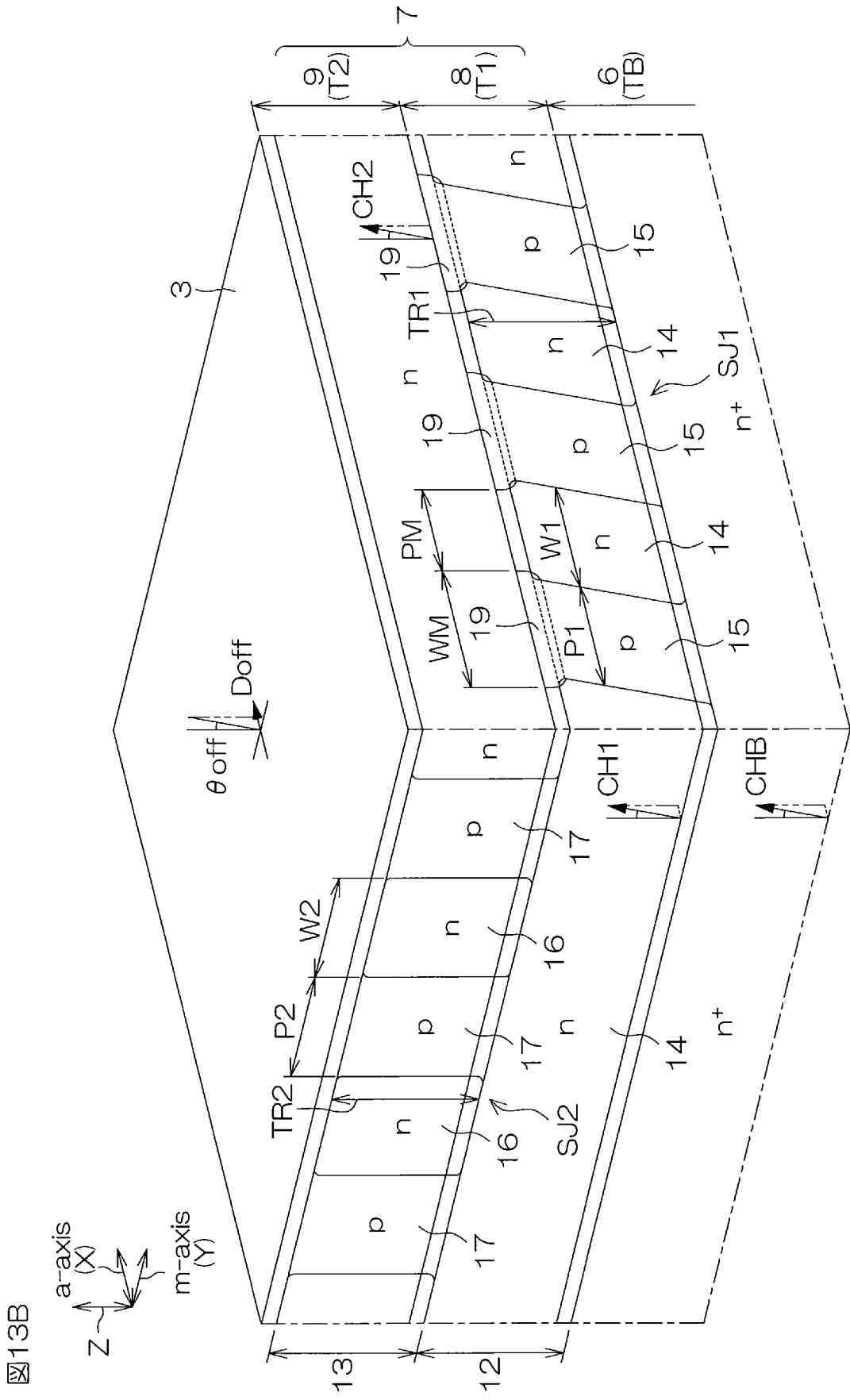
図12C



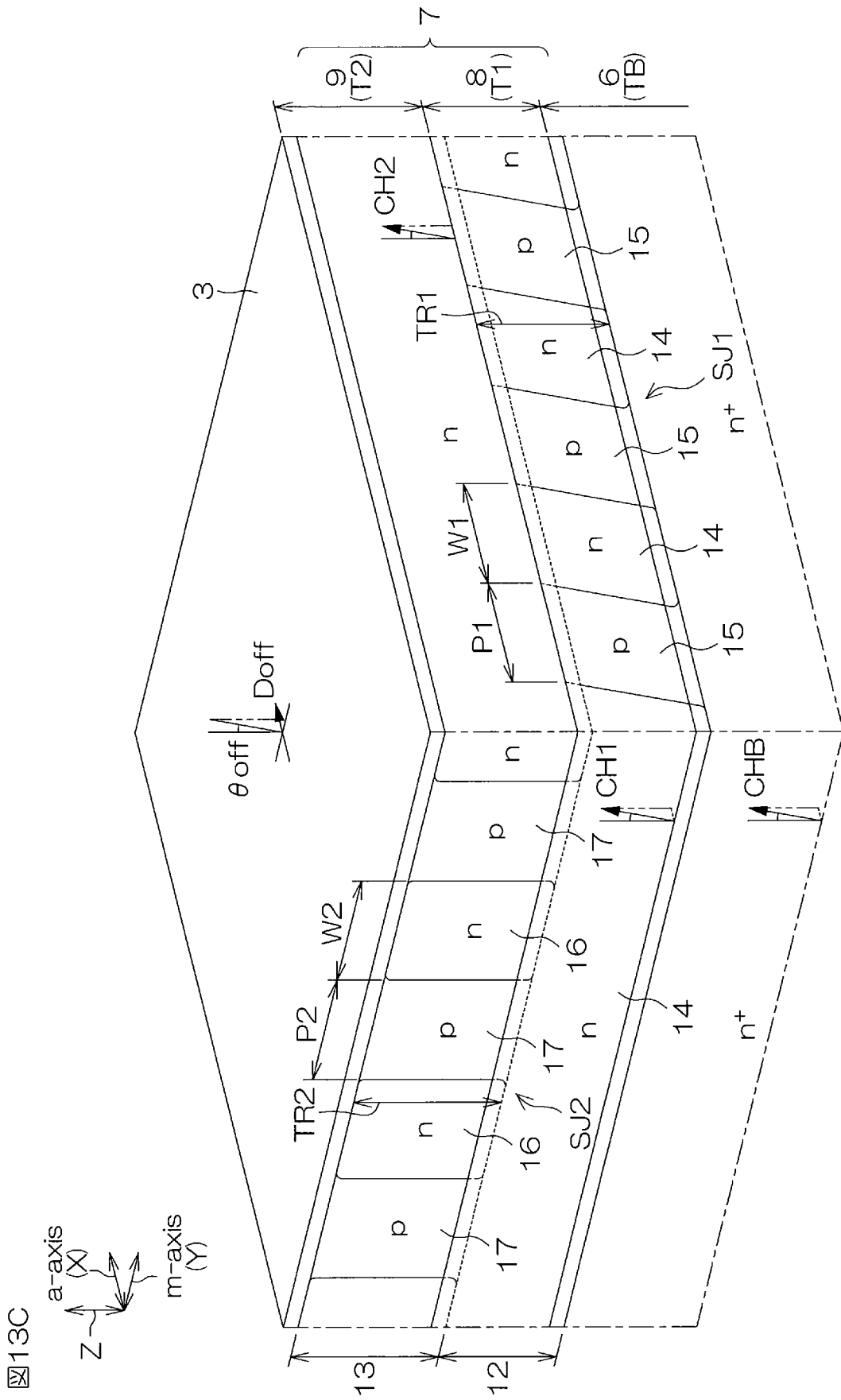
[ 13A]




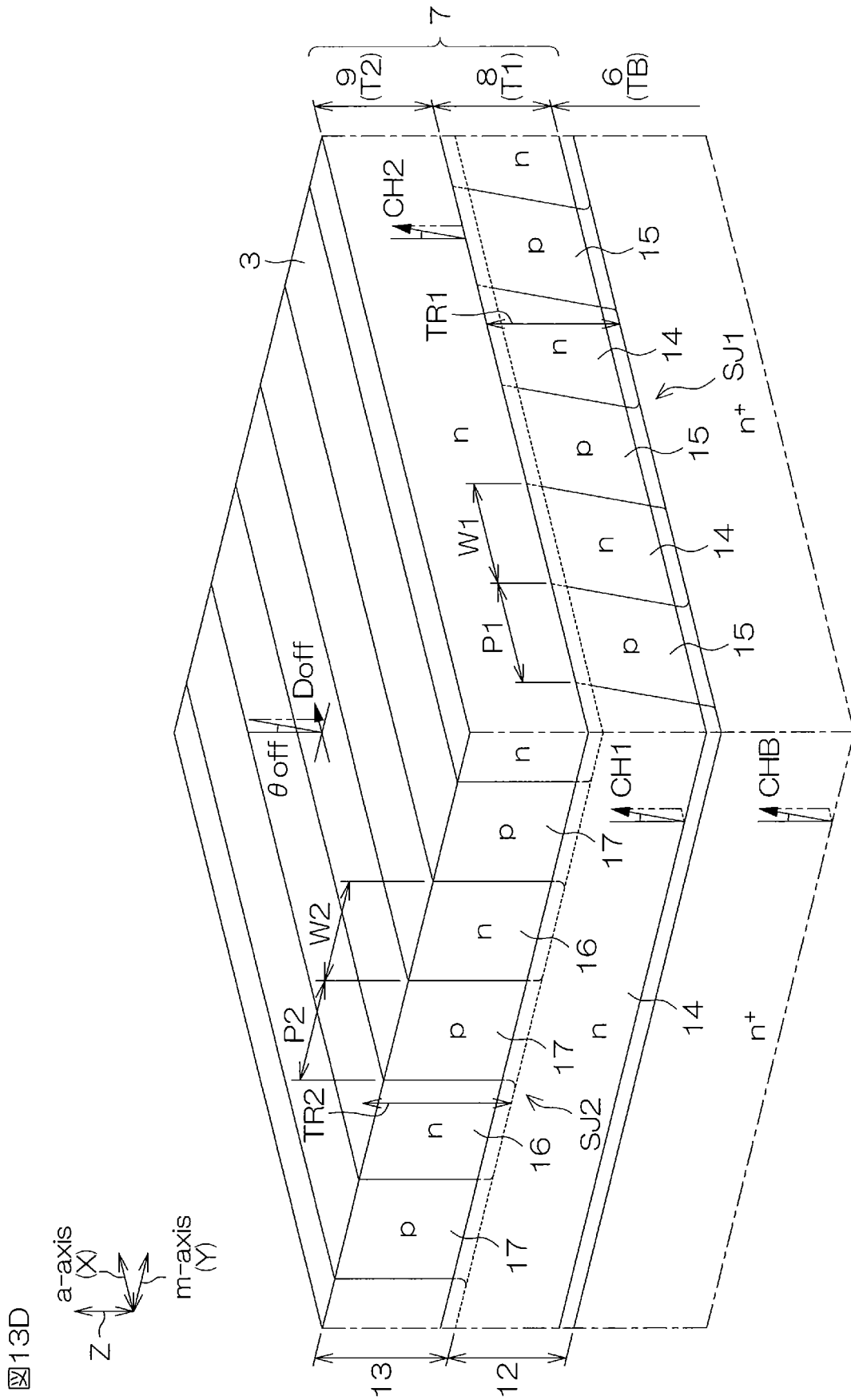
[ 13B]



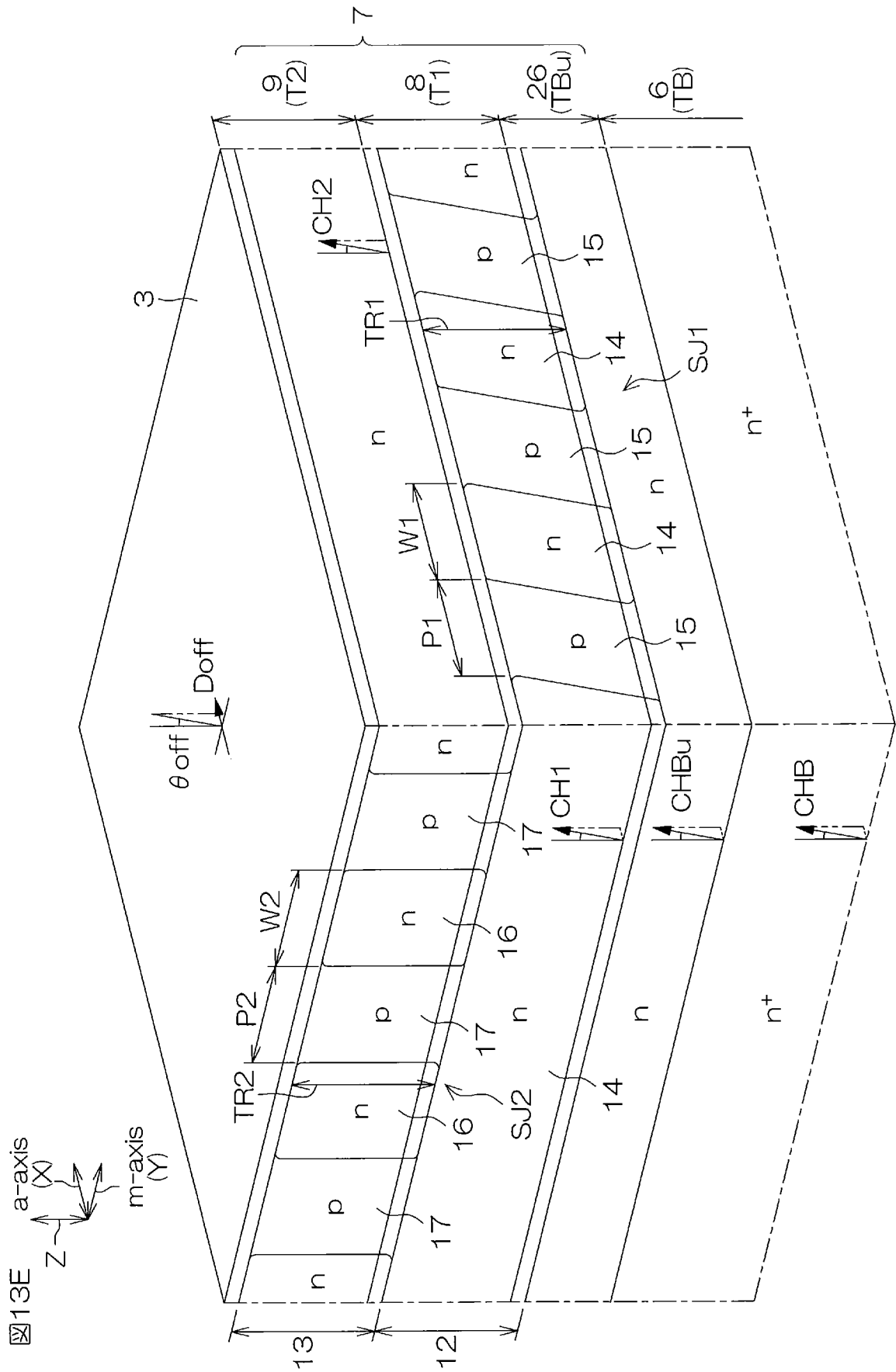
[13C]



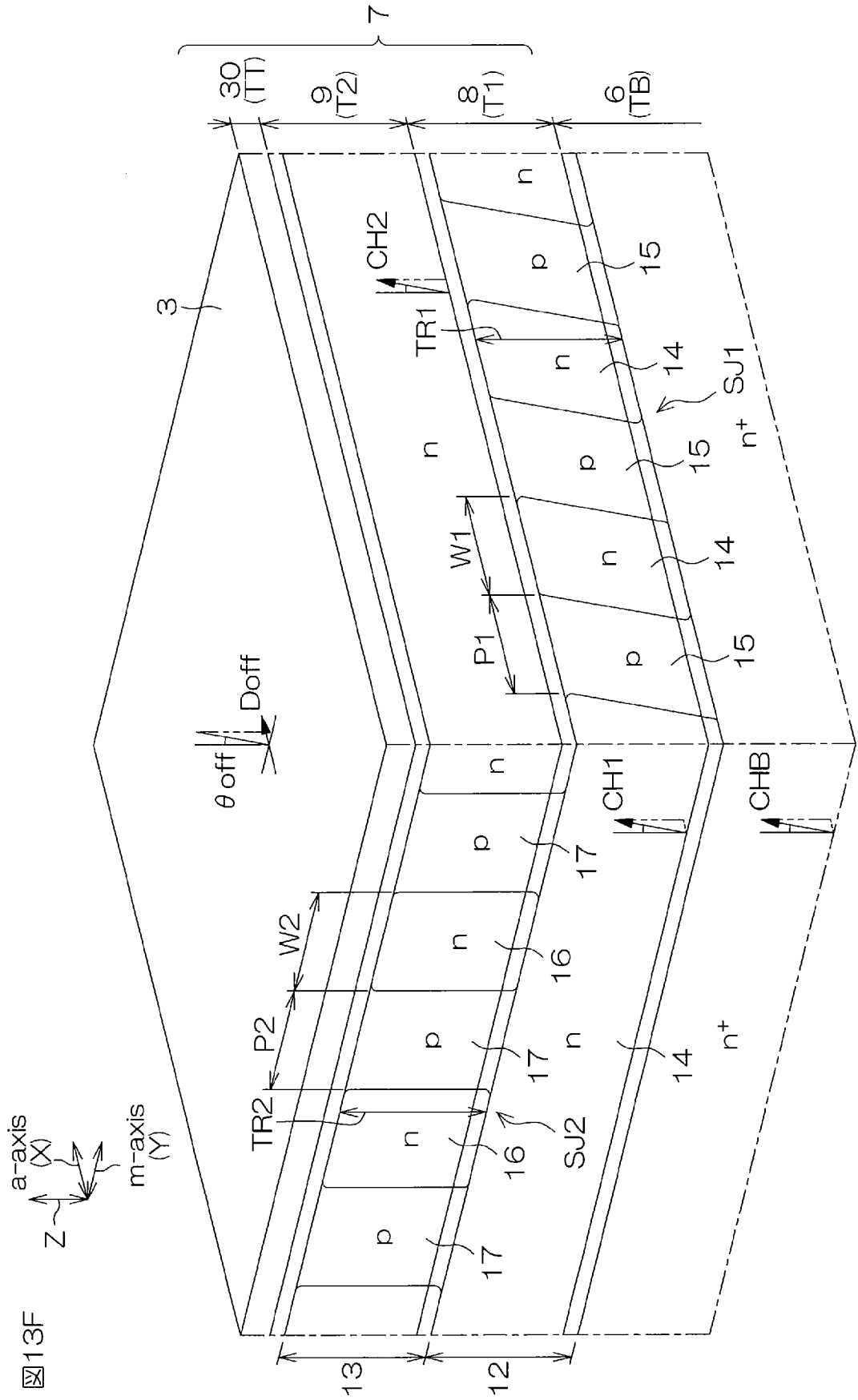
[ 13D]



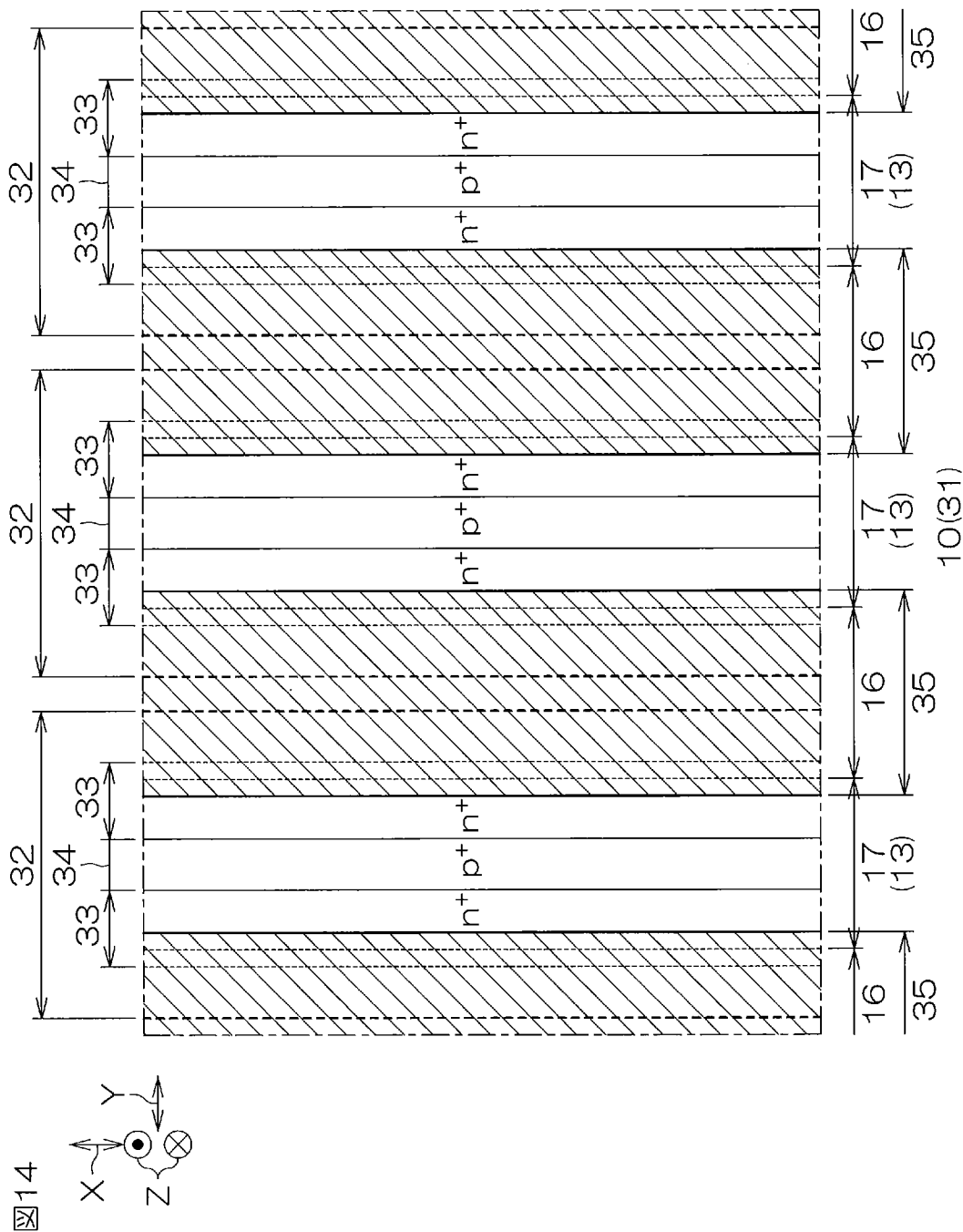
[13E]



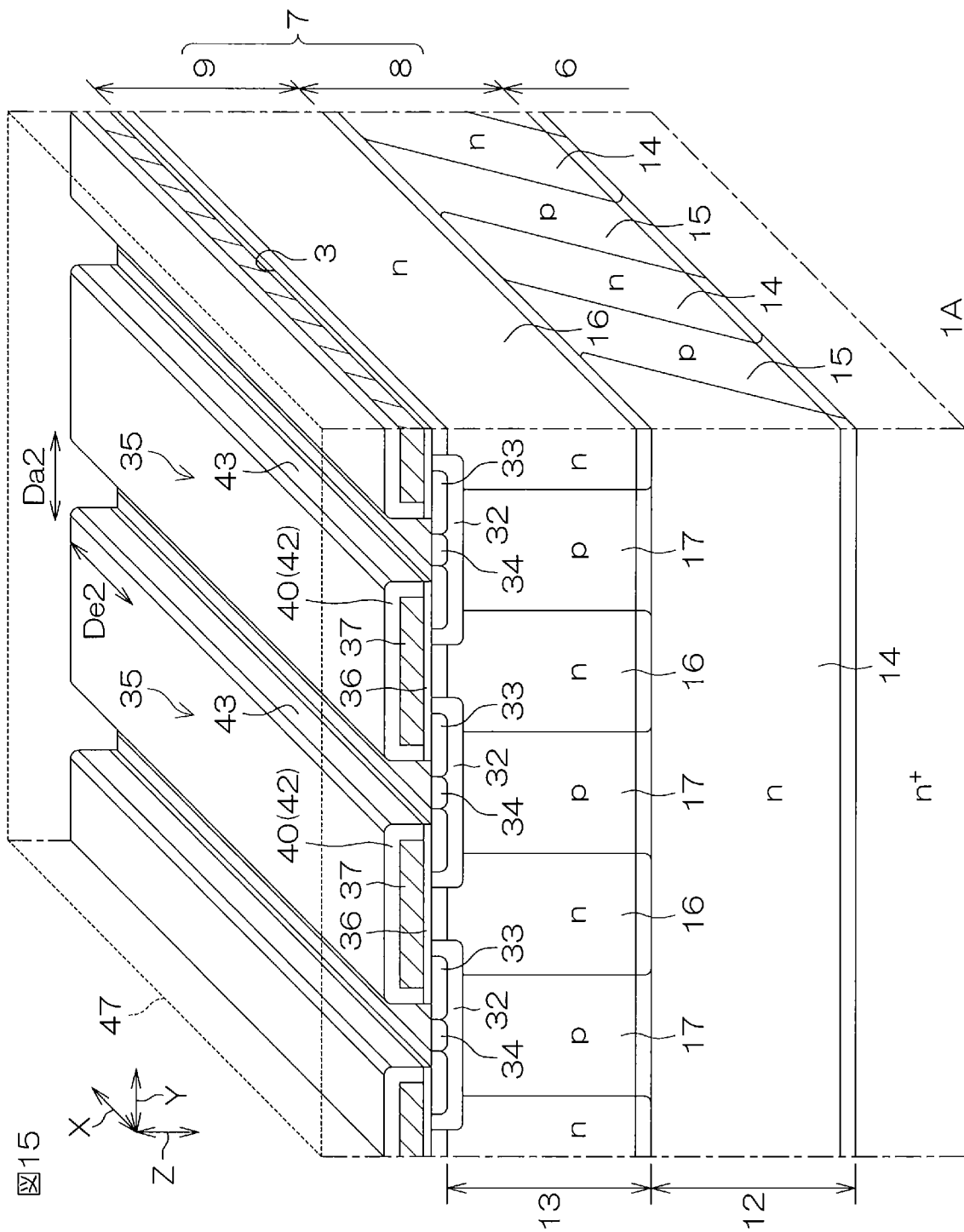
[図13F]



[圖14]



[圖15]



[図16]

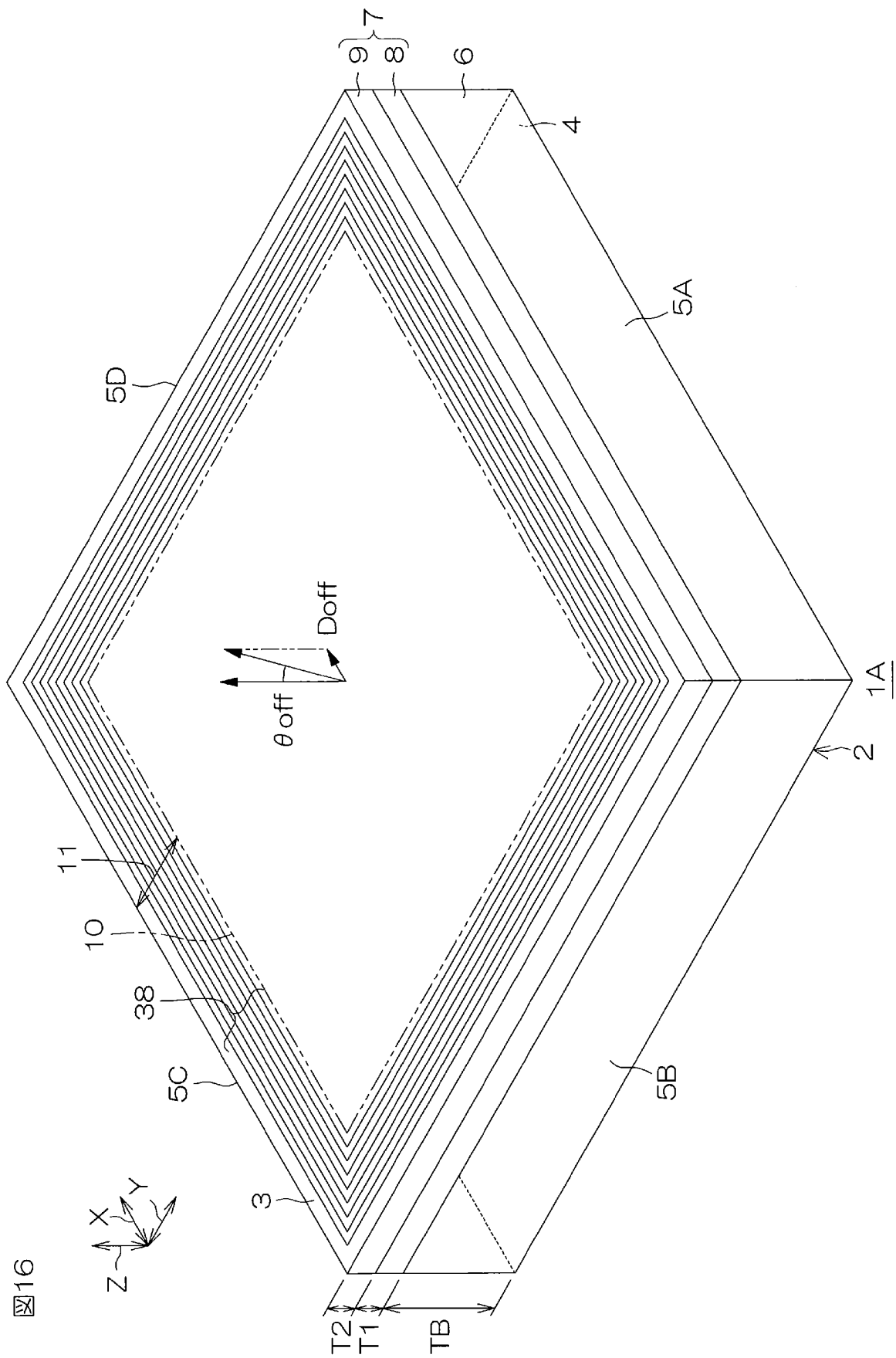

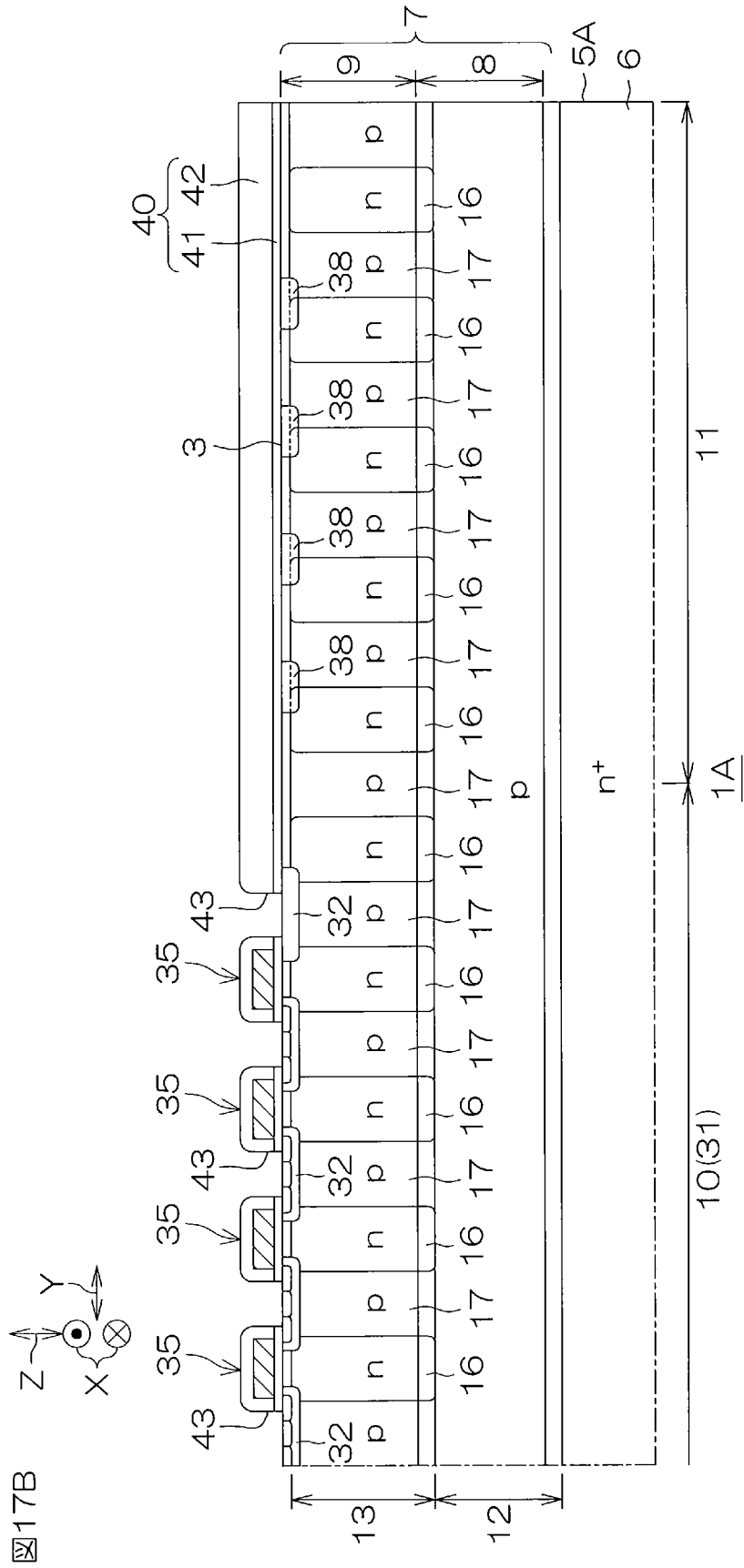
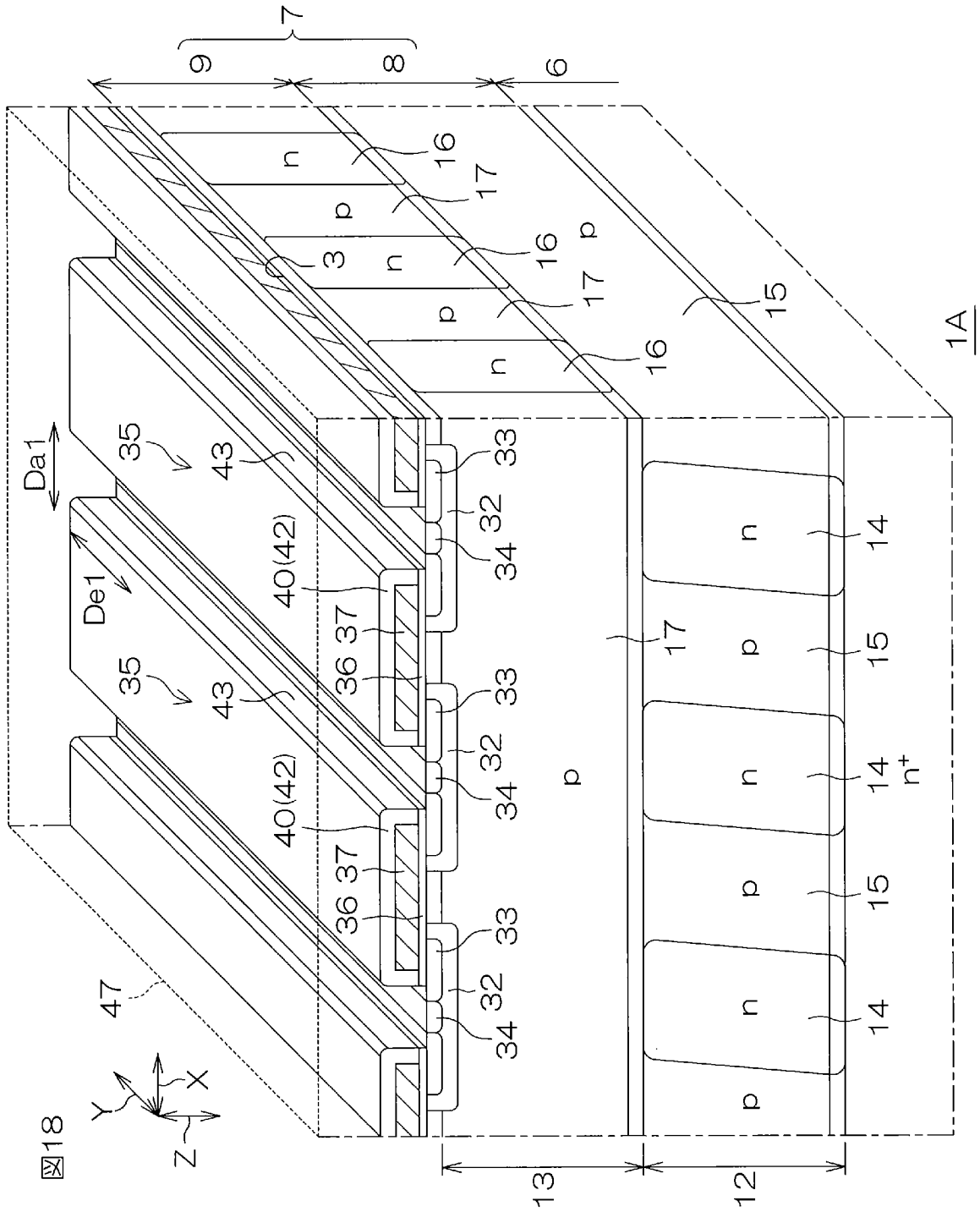


図16

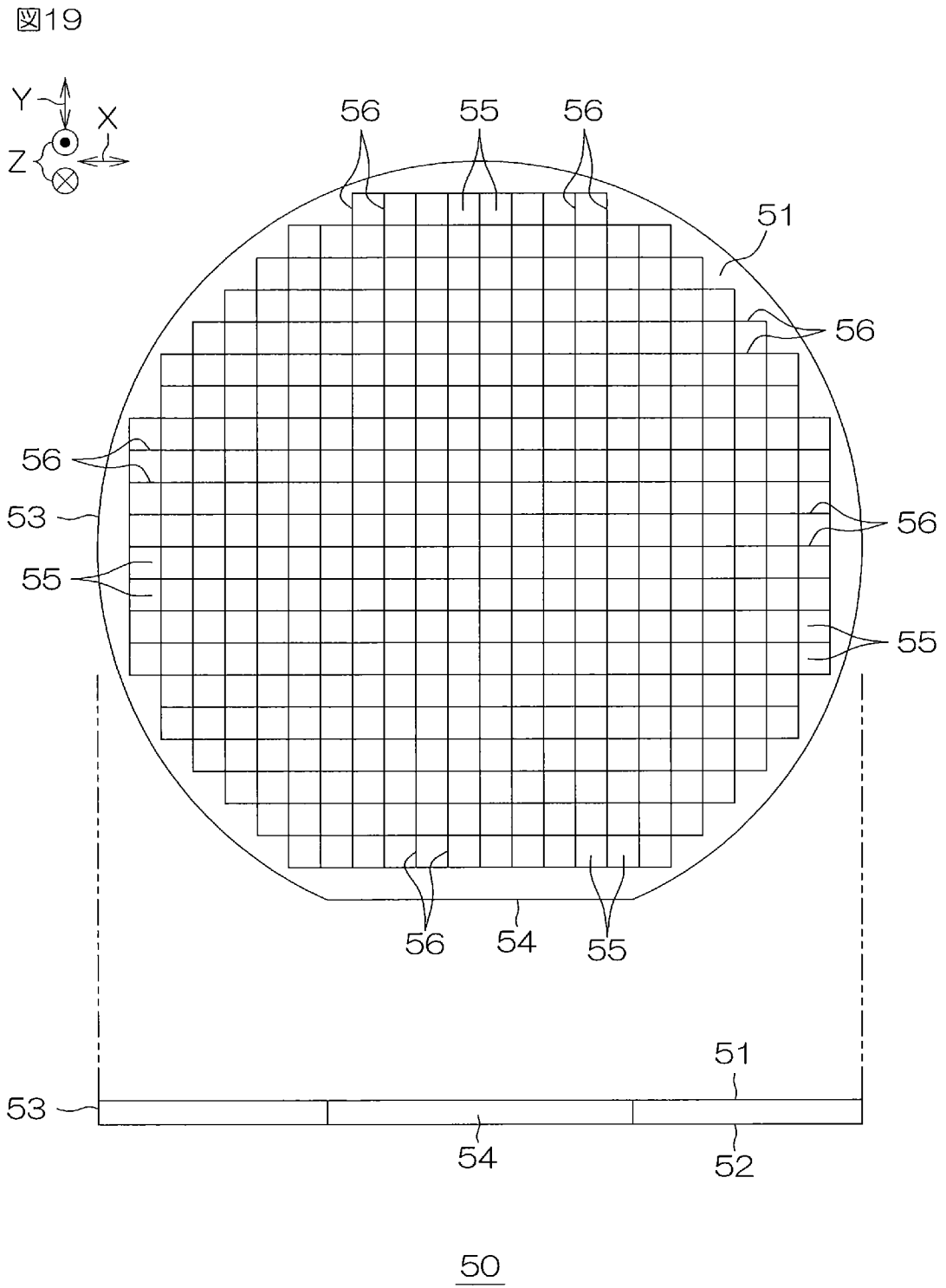
[ 17B]



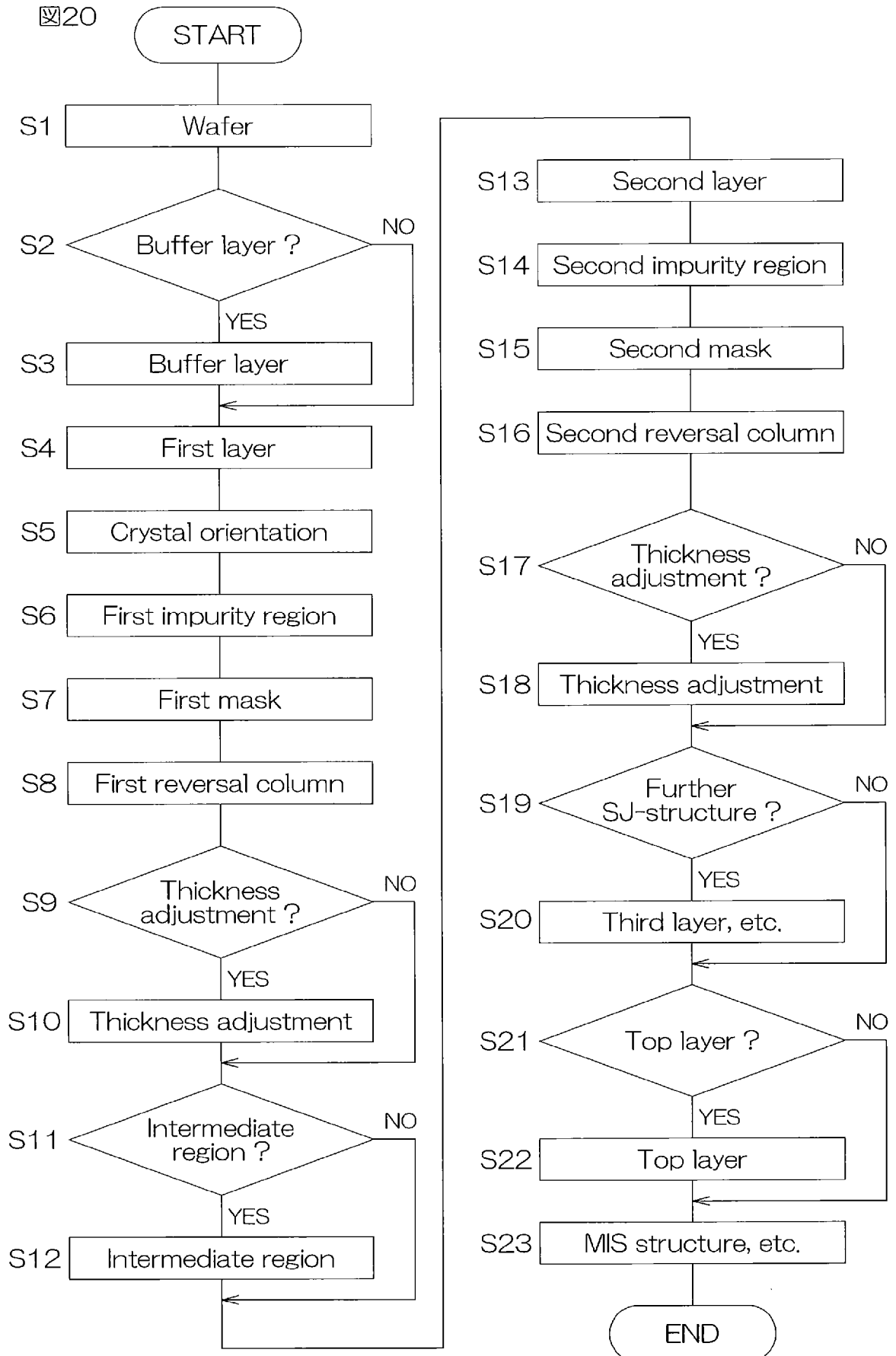
[図18]



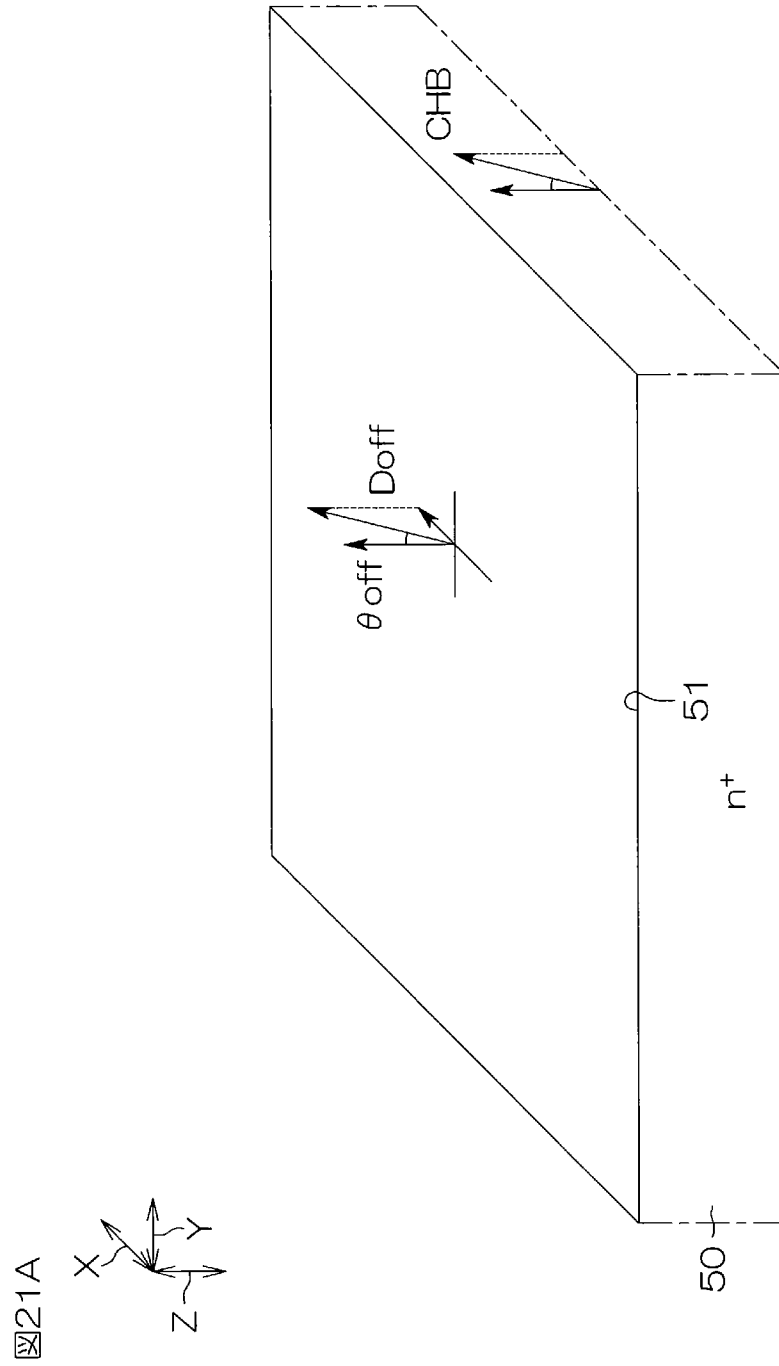
[図19]




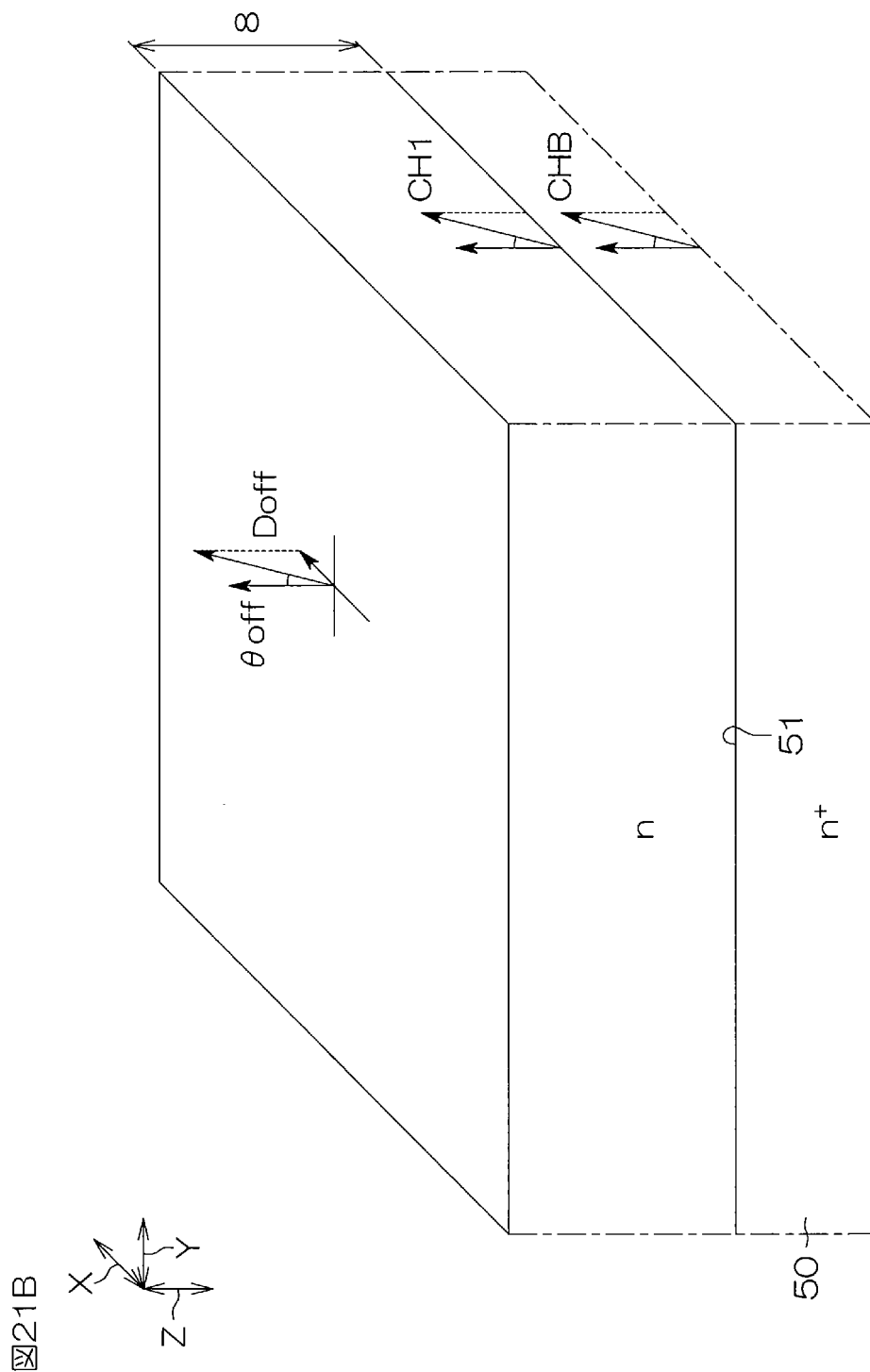
[図20]




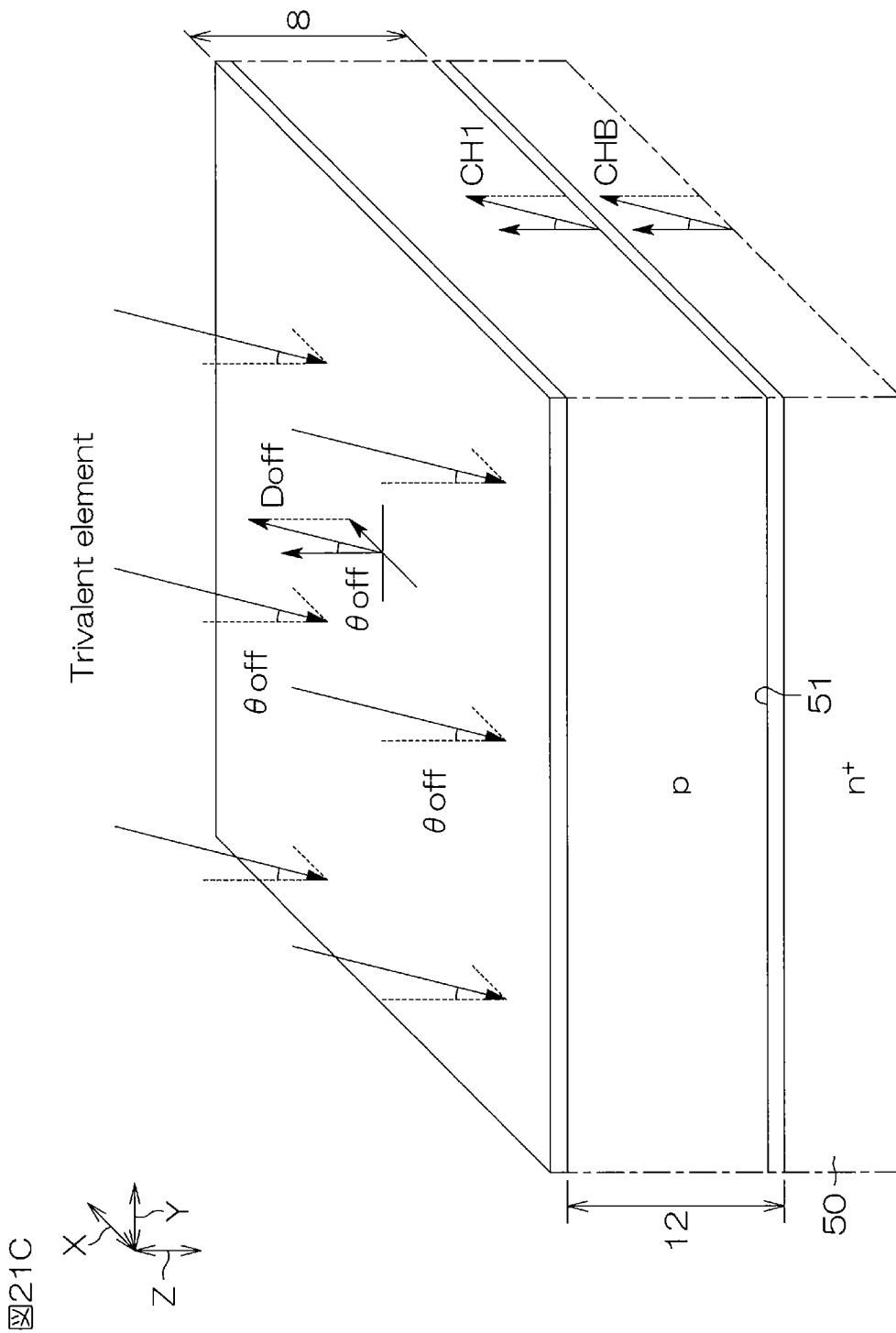
[図21A]



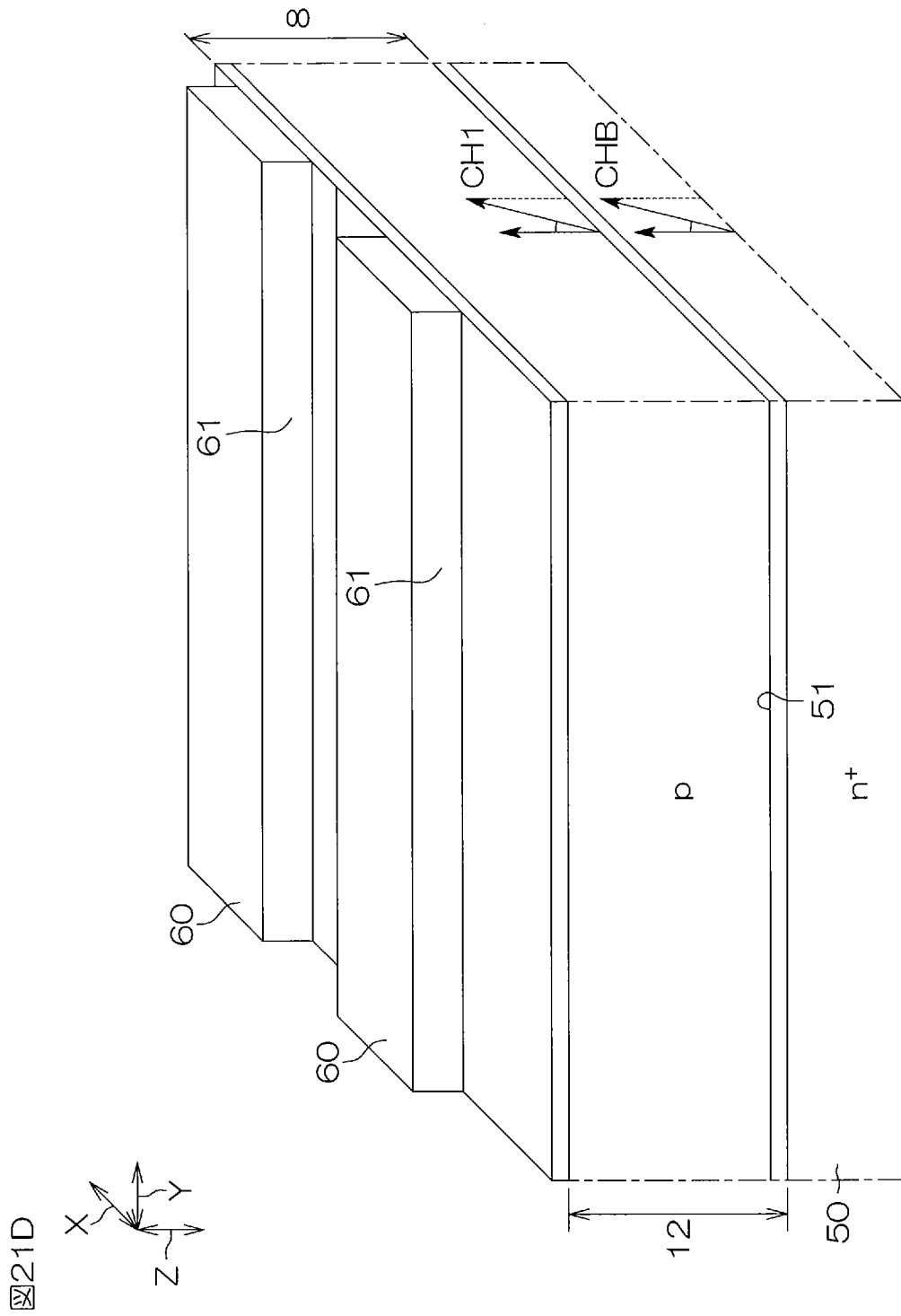
[ 21B]



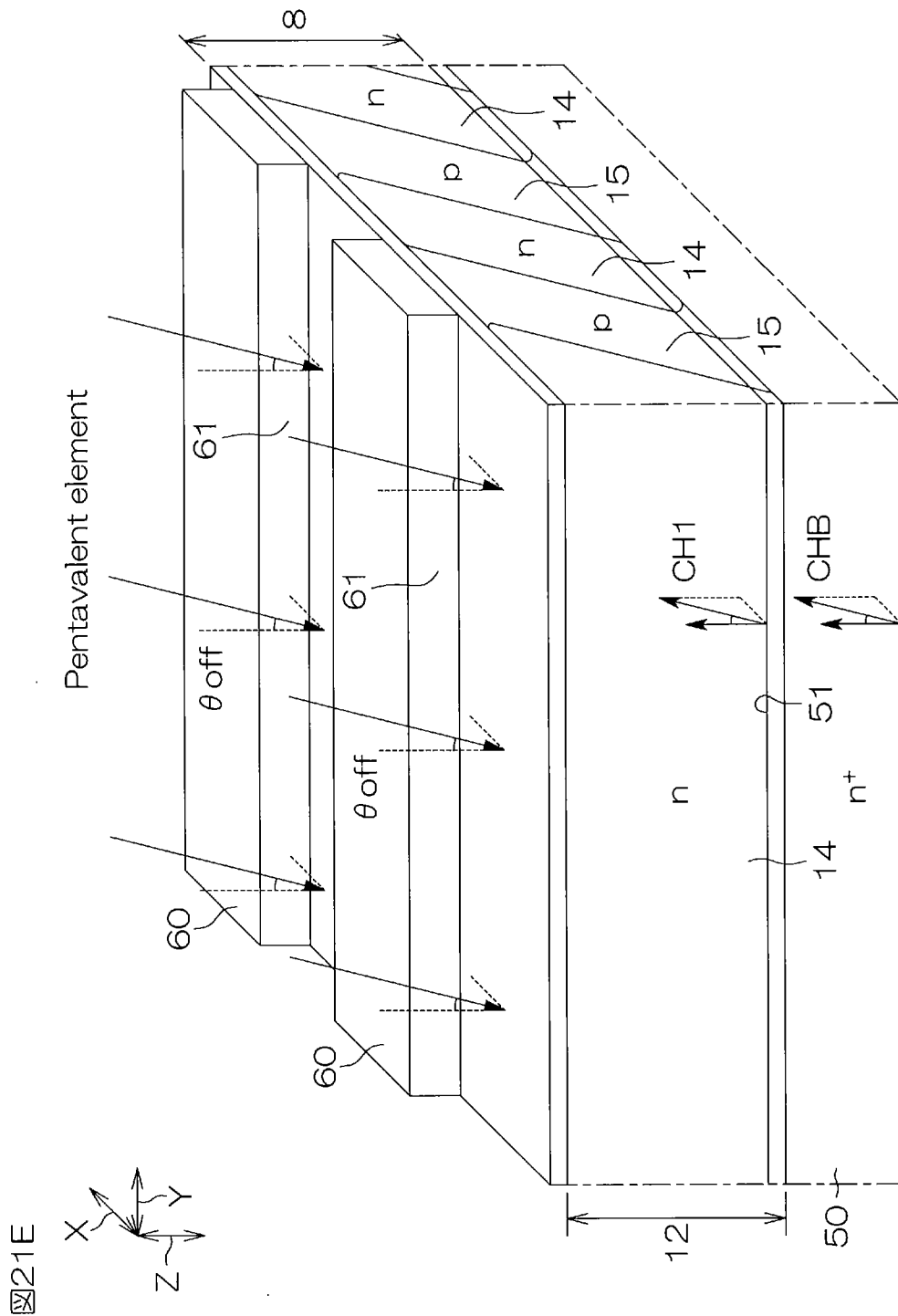
[21C]




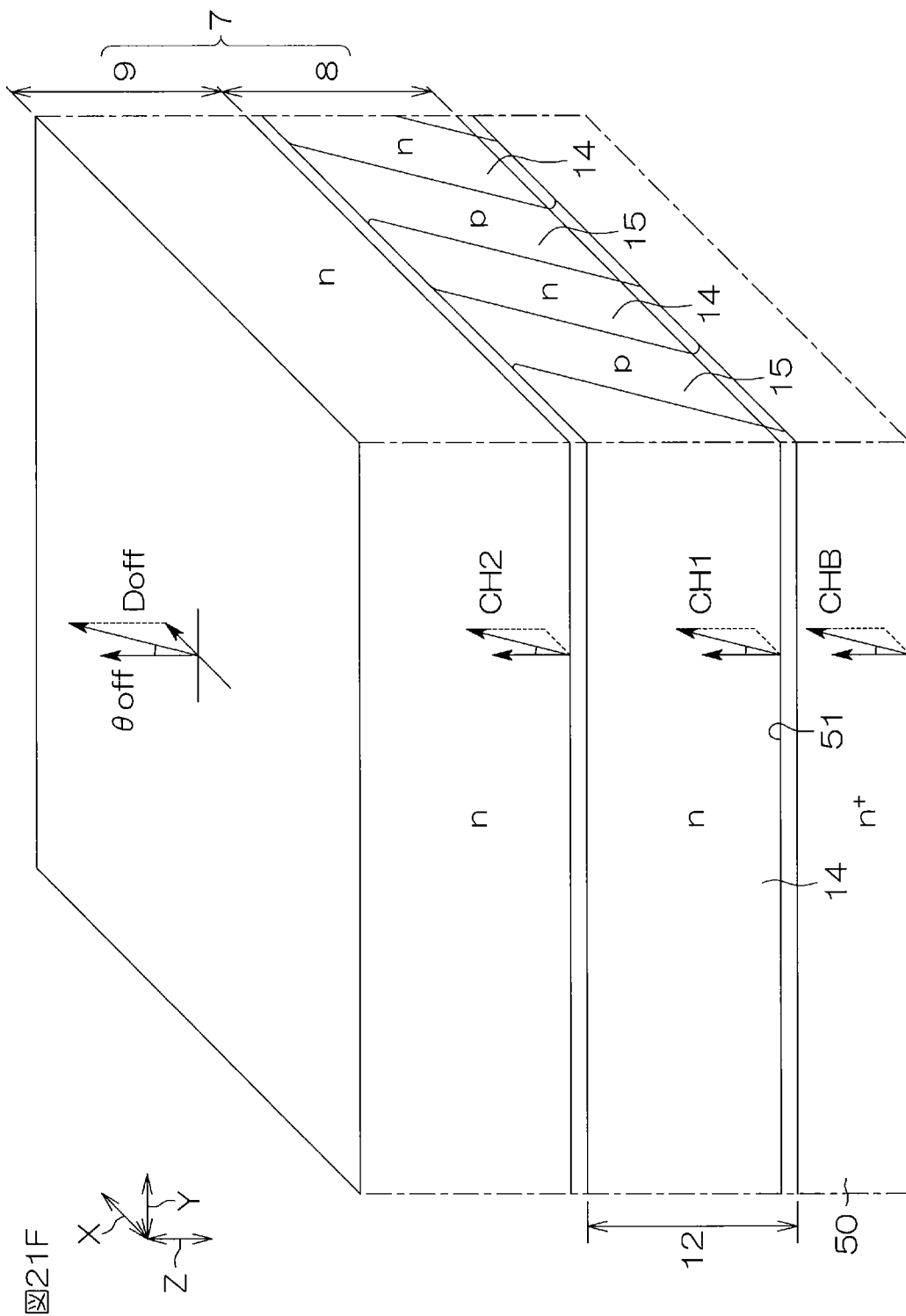
[21D]




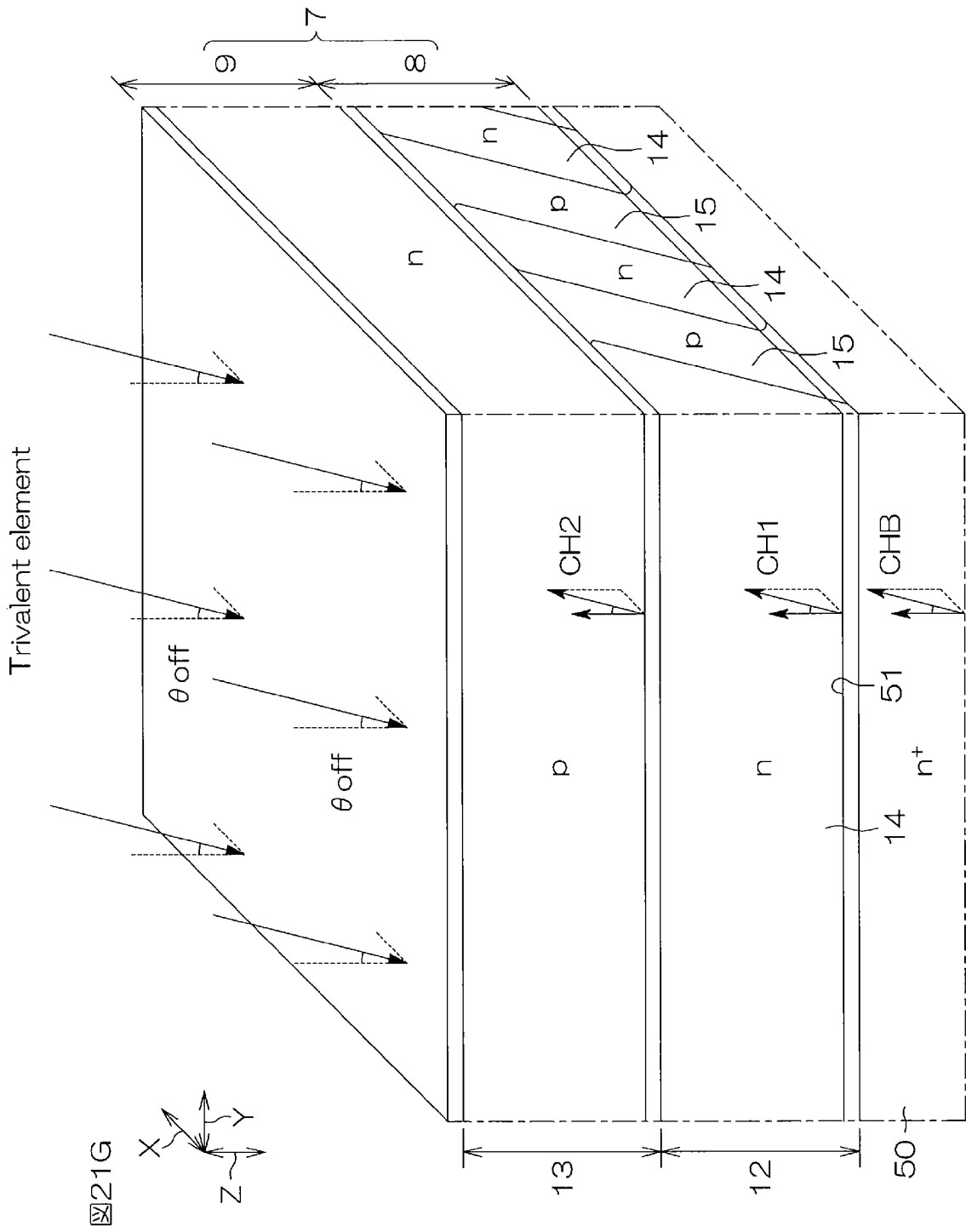
[21E]



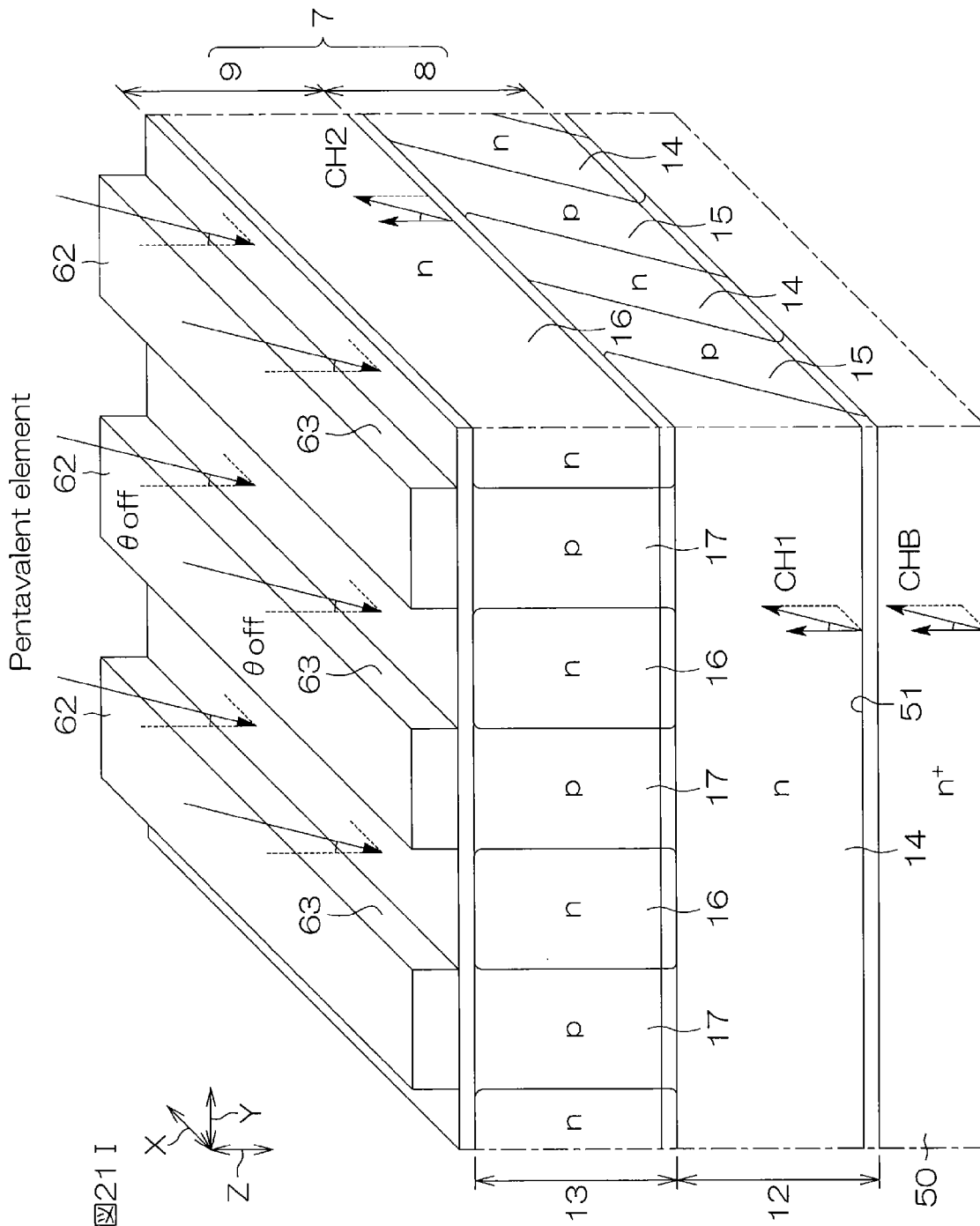
[21F]



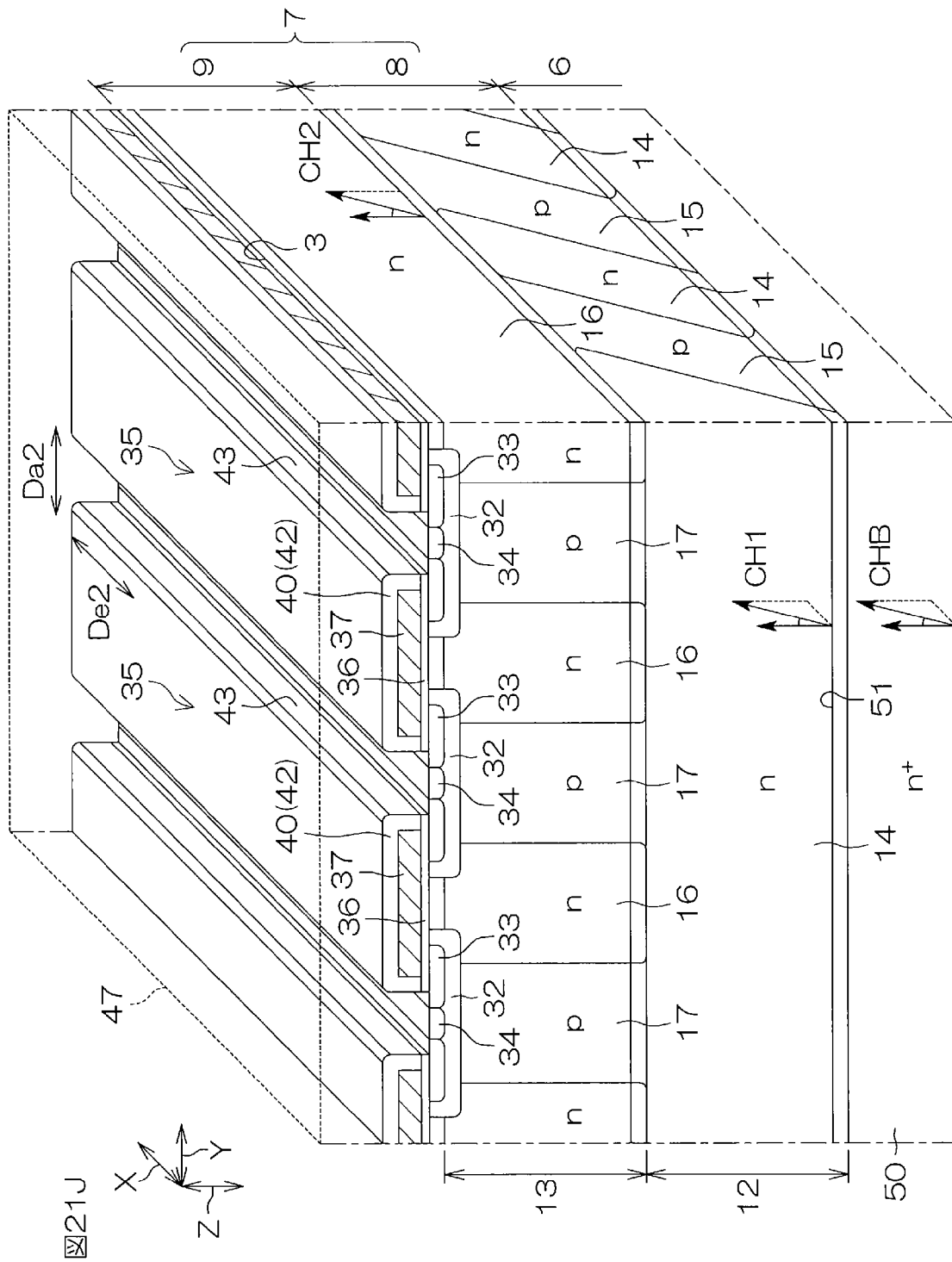
[21G]



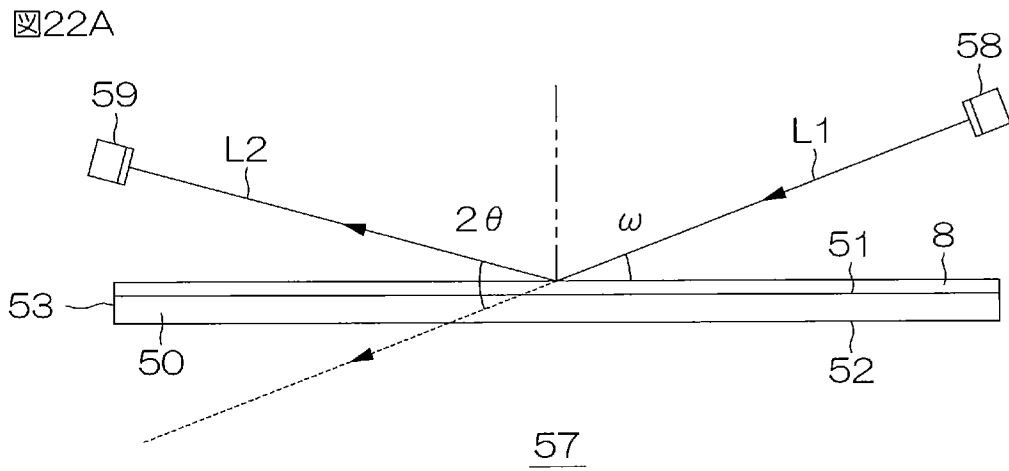
[21I]



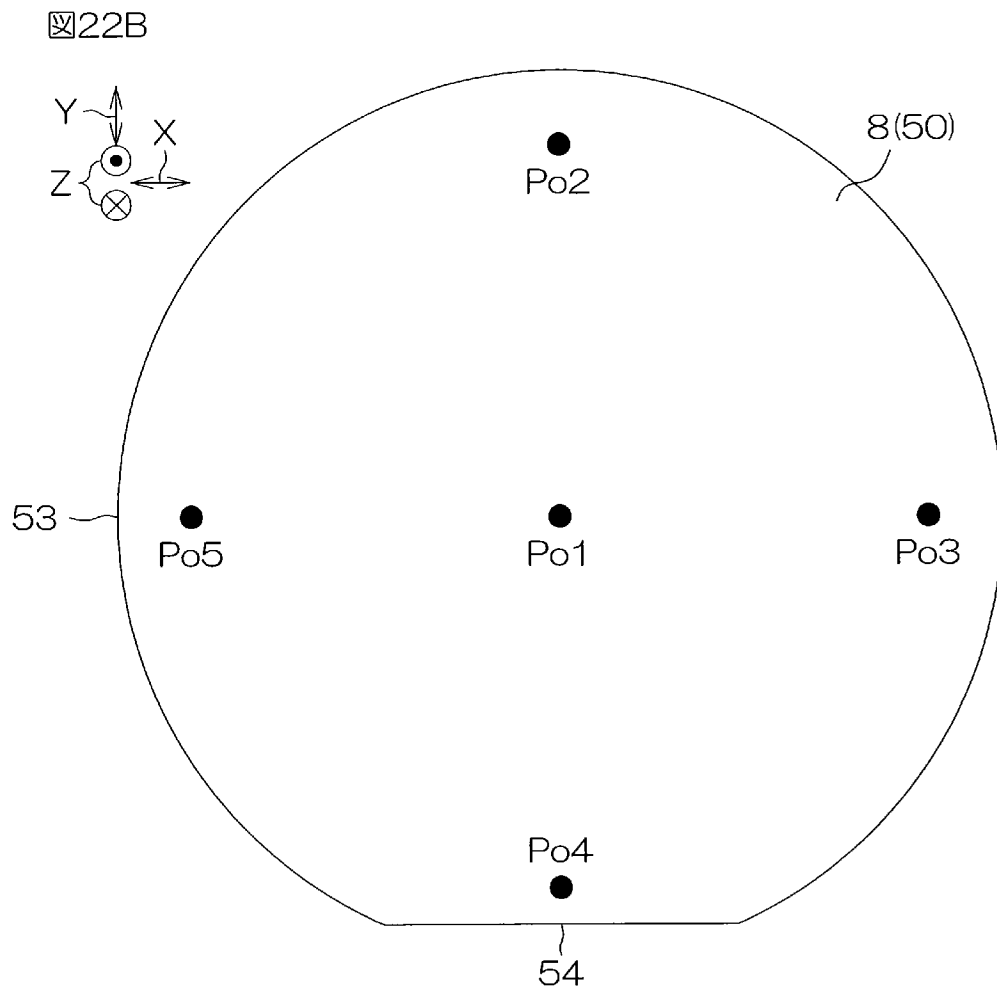
[図21J]



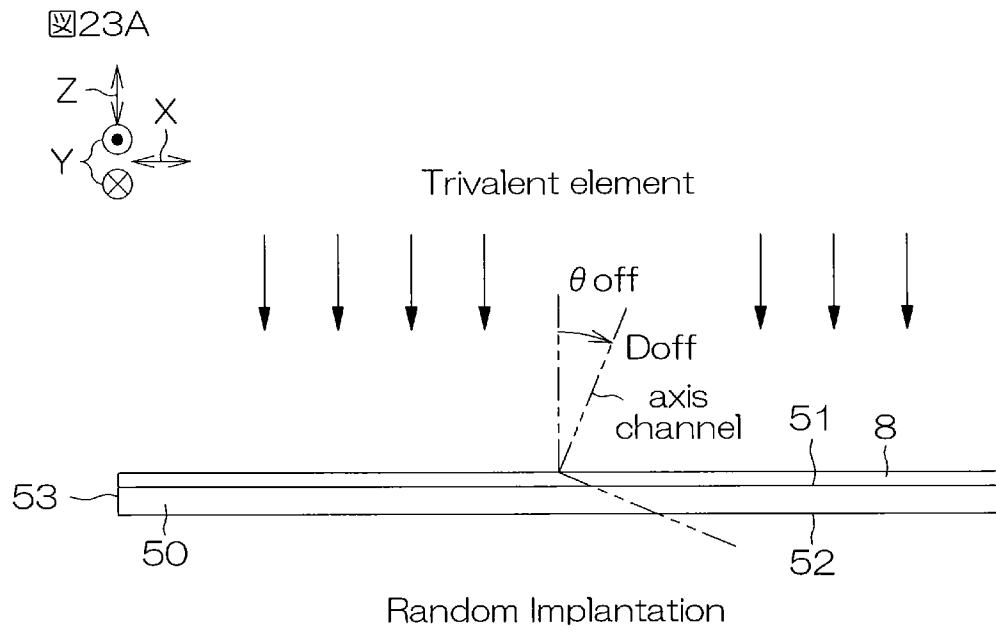
[図22A]



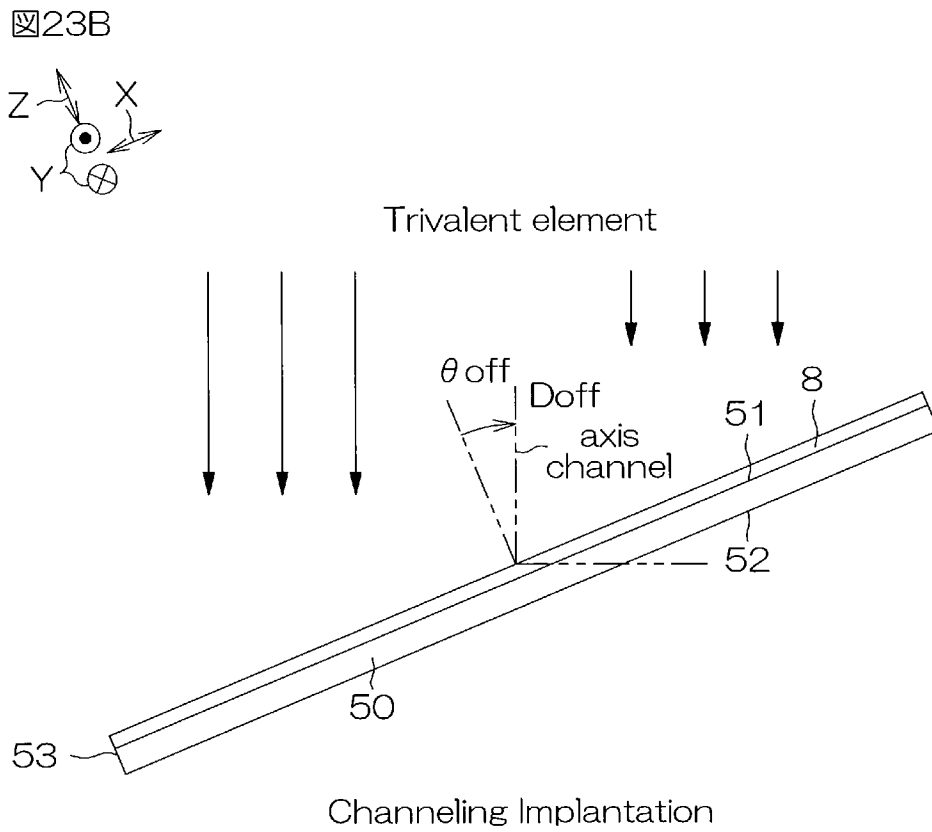
[図22B]



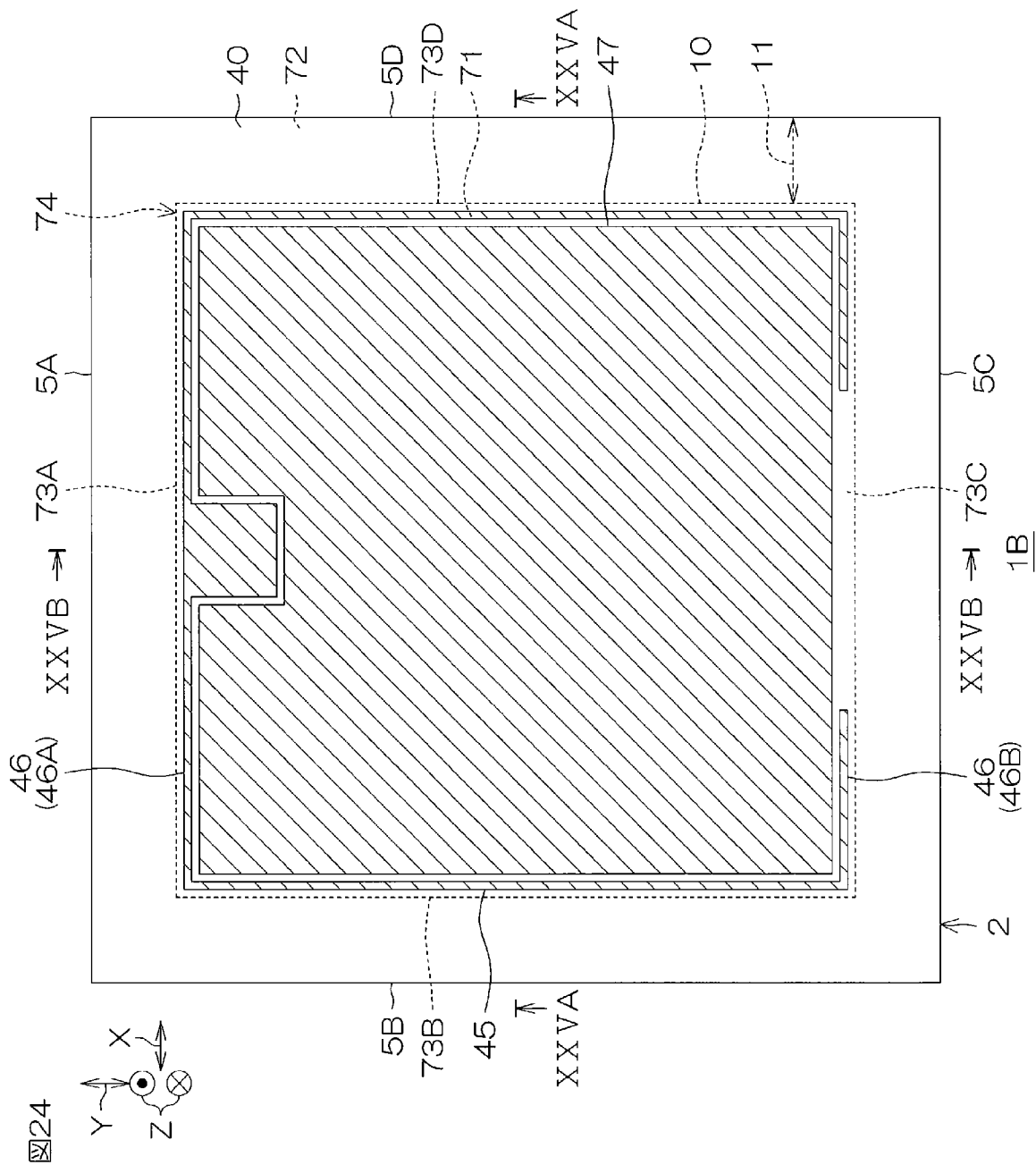
[23A]



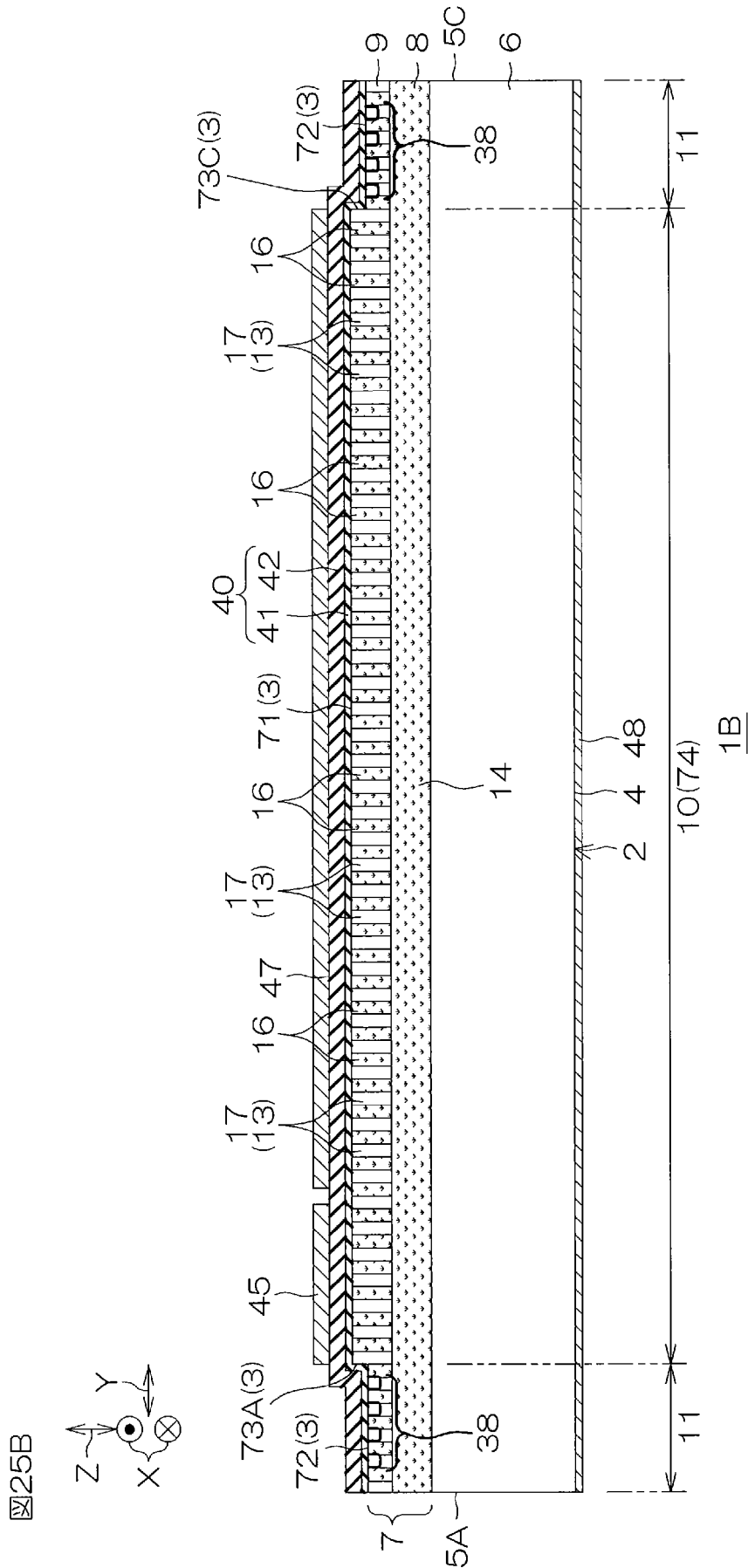
[23B]



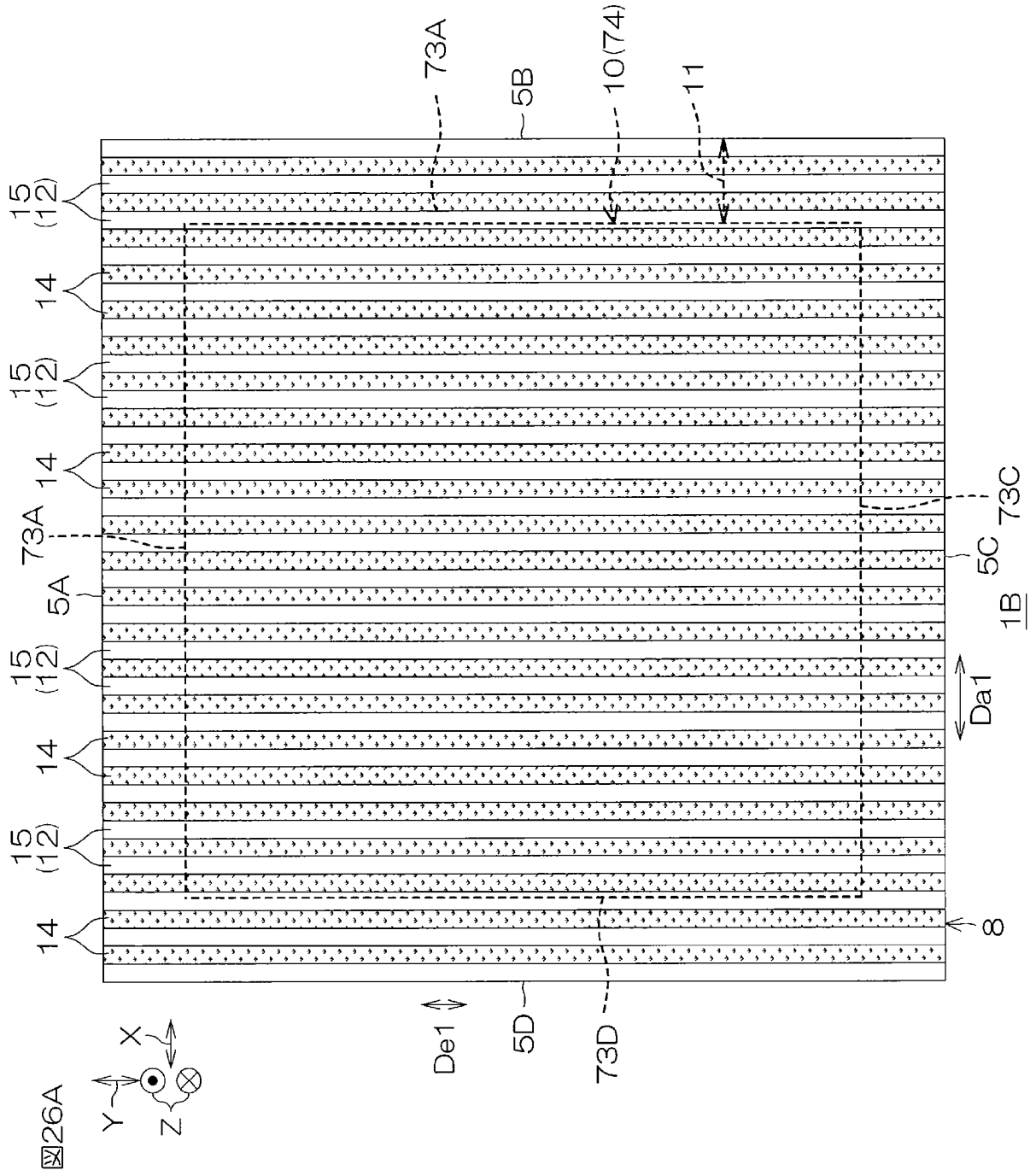
[図24]



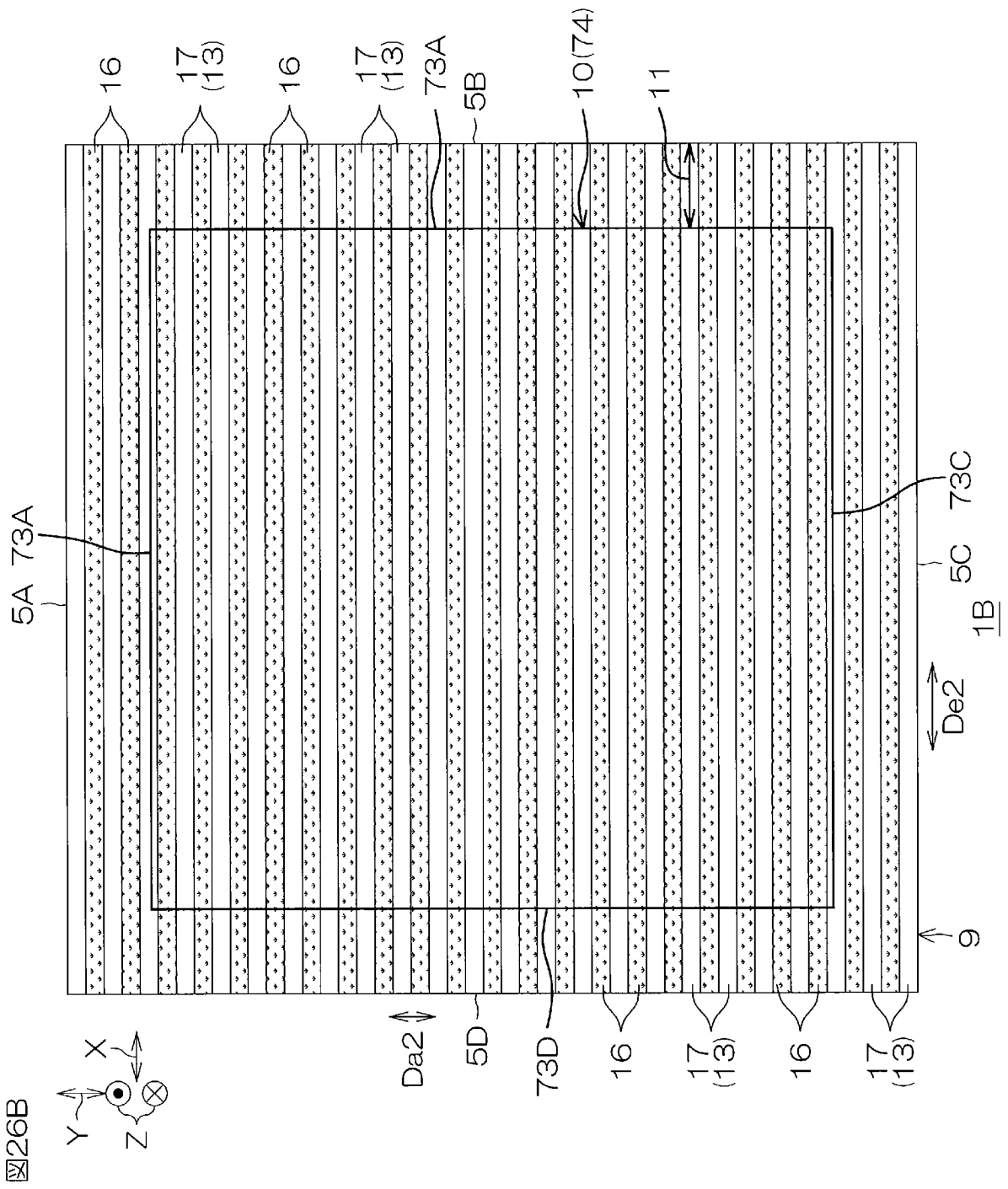
[図25B]




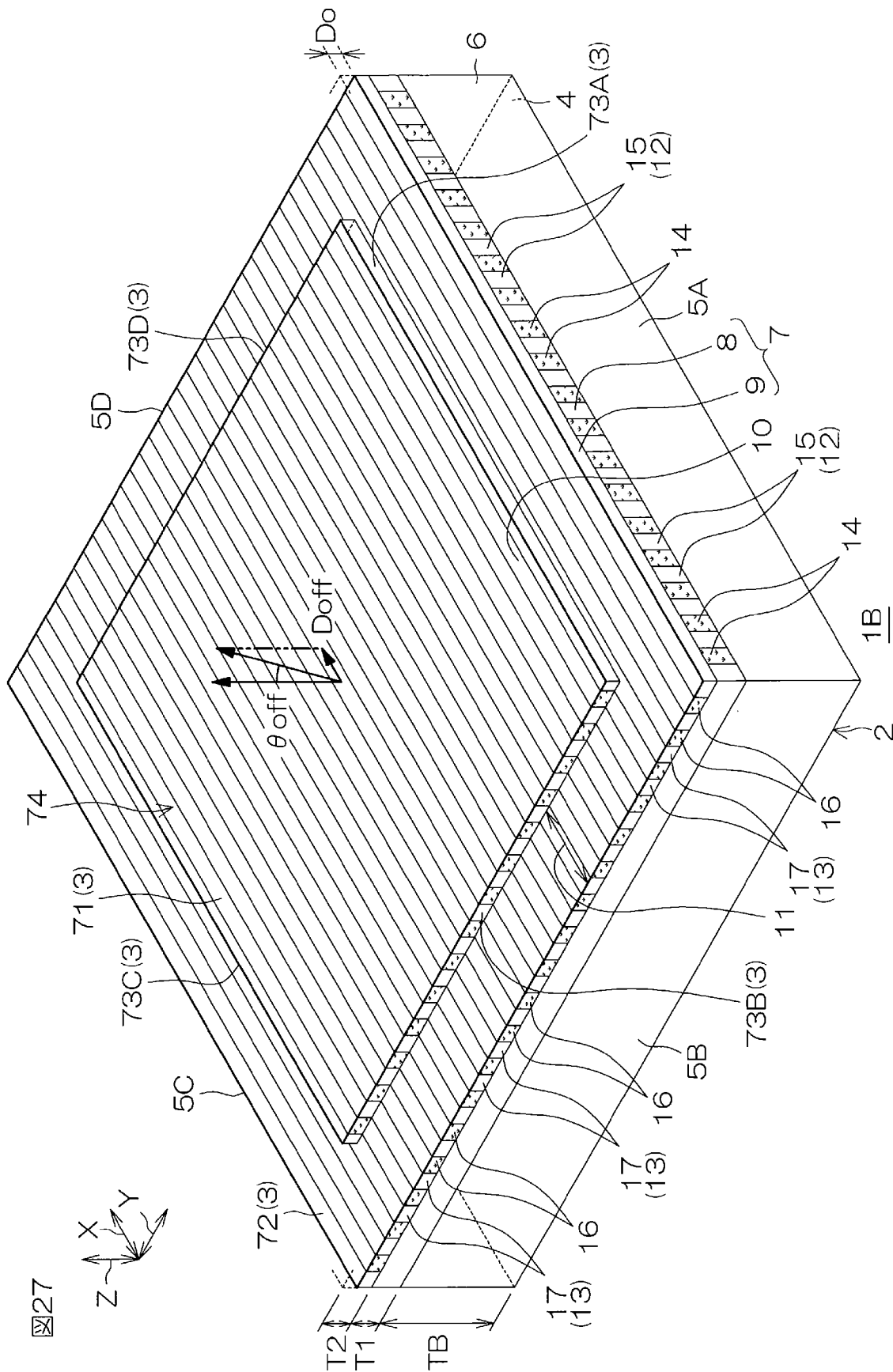
[26A]



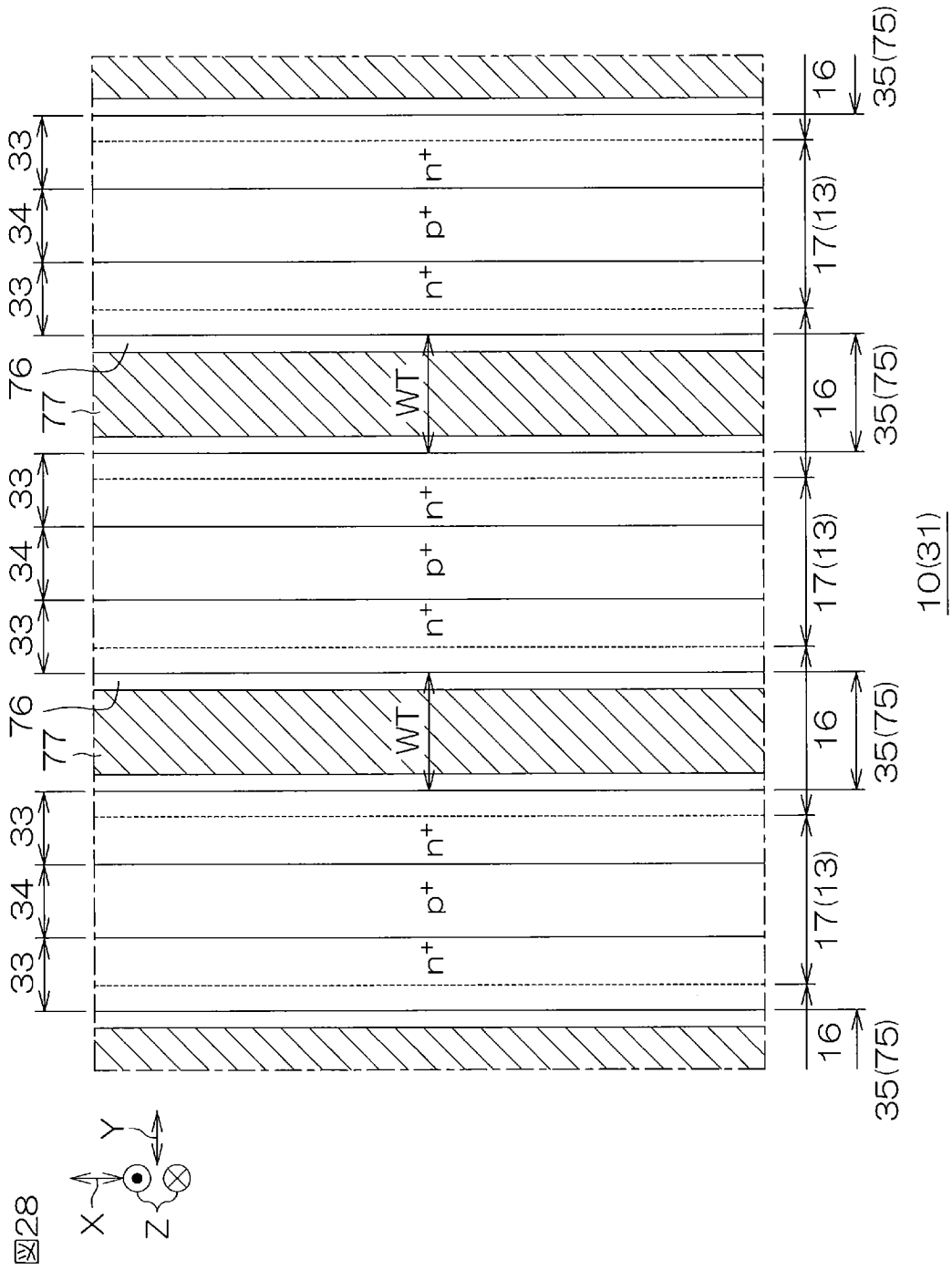
[26B]



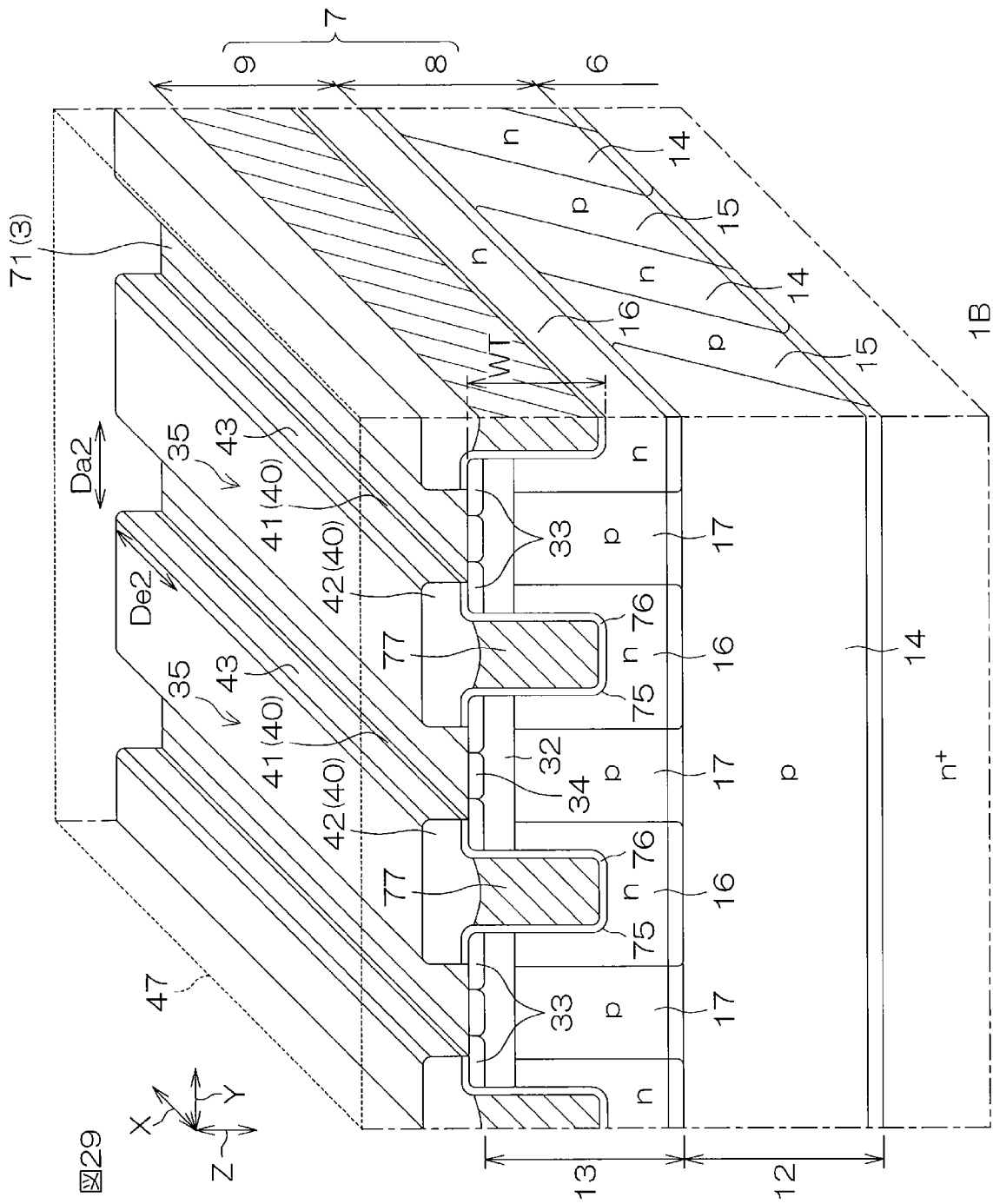
[ 27]



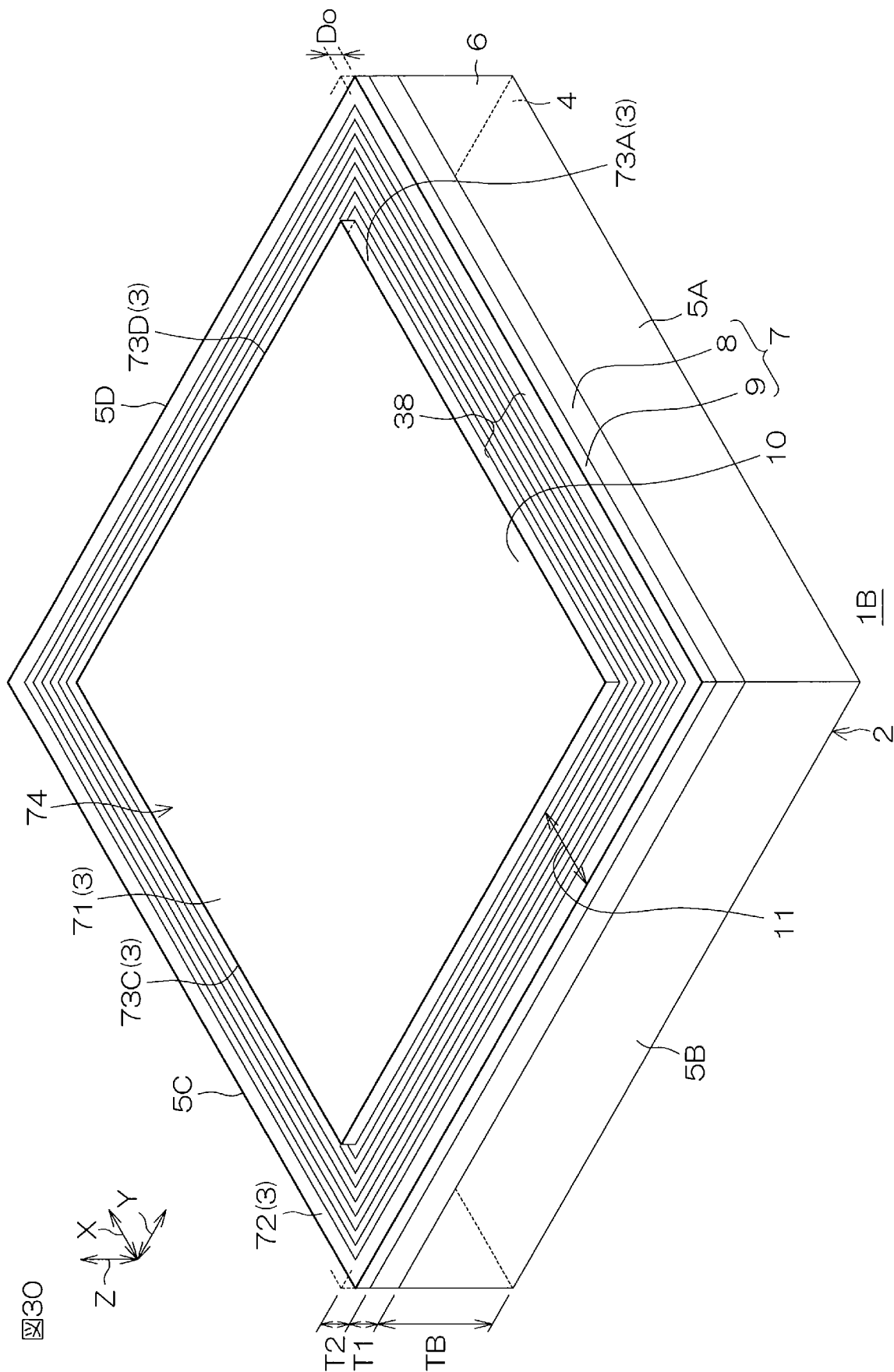
[圖28]




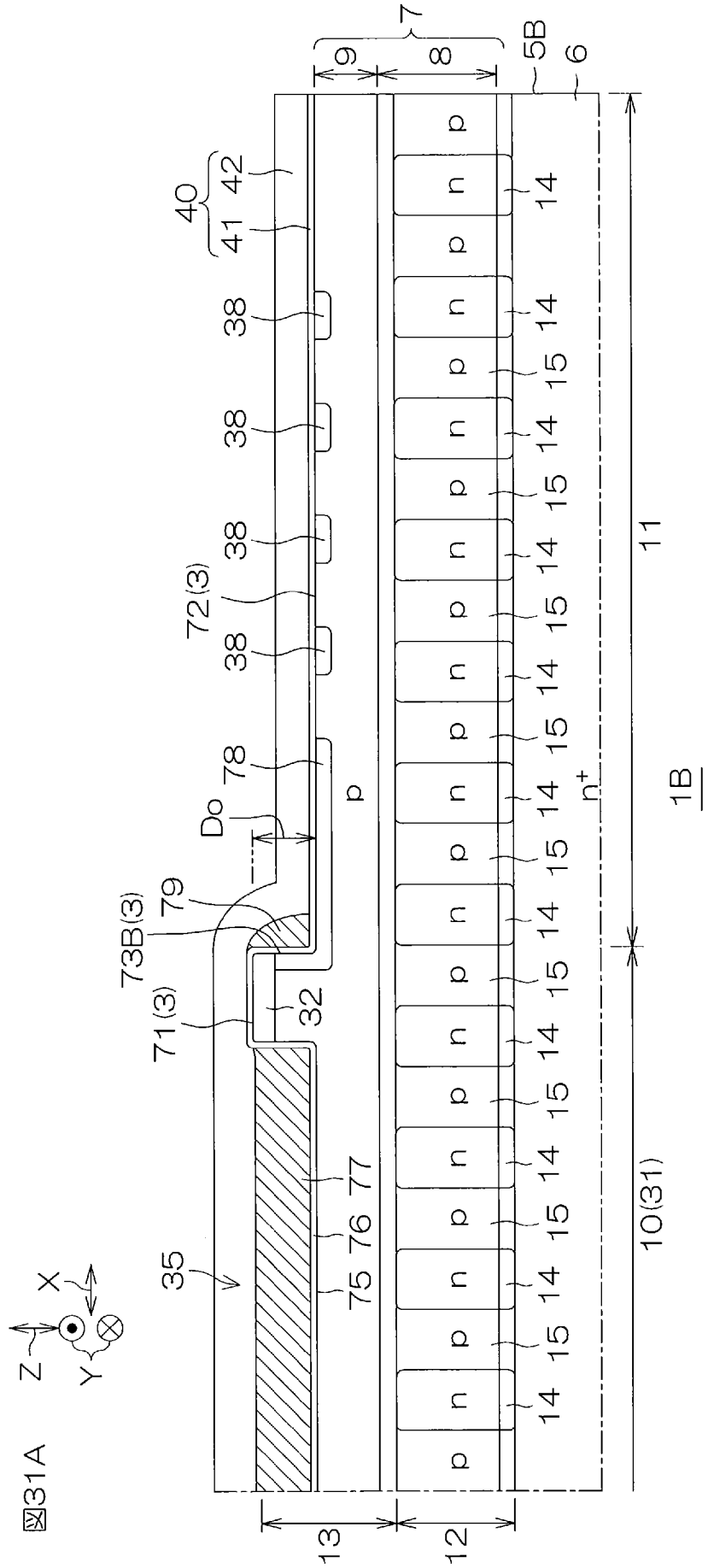
[ 29]




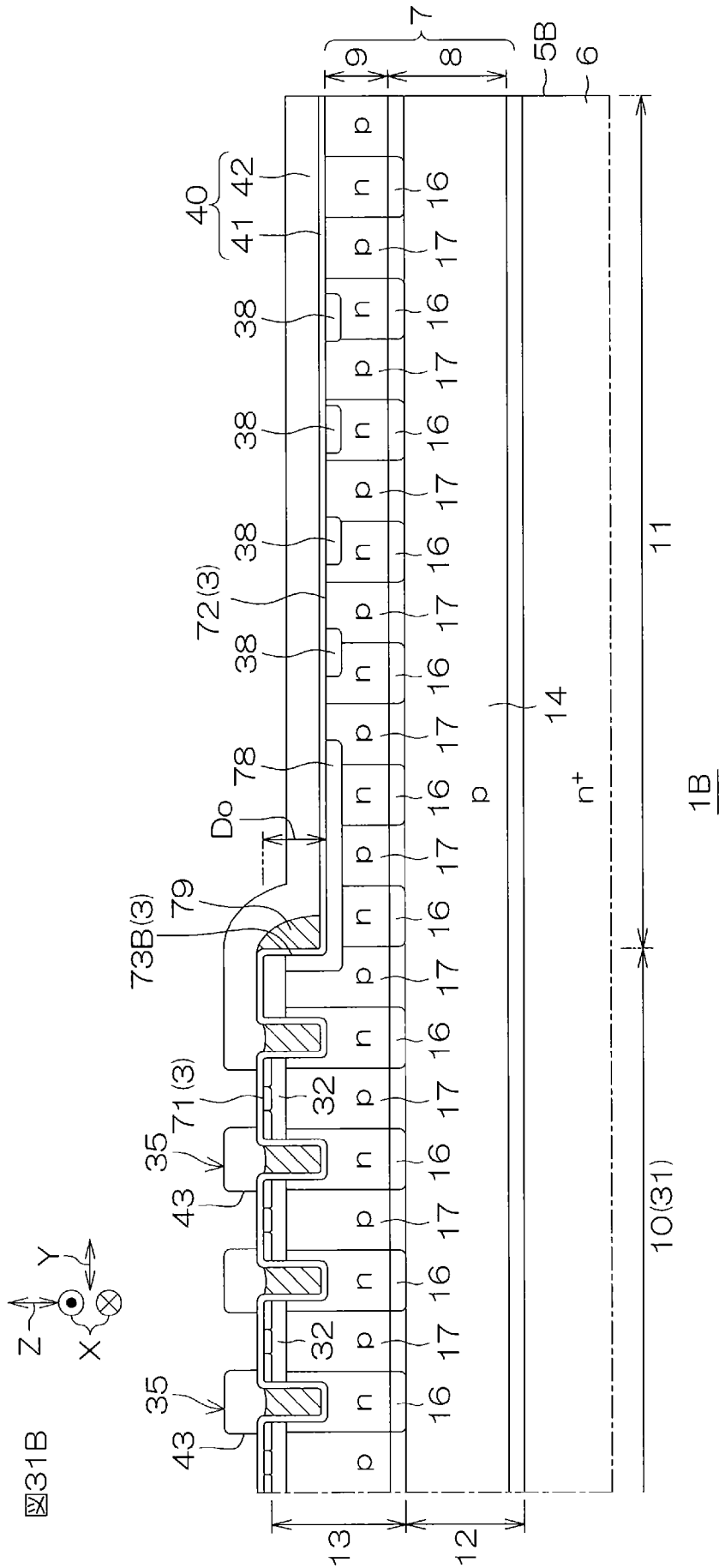
[図30]



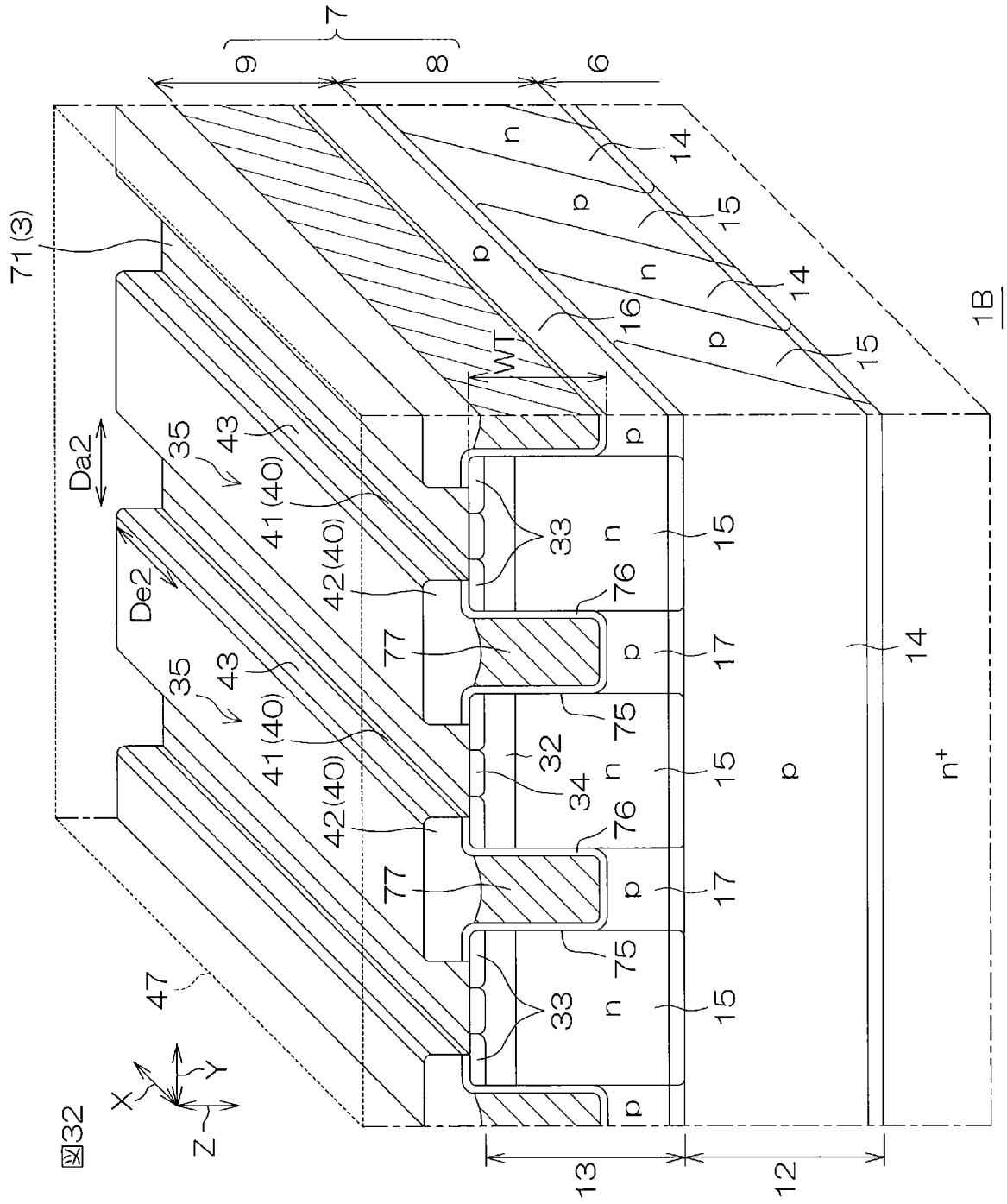
[31A]



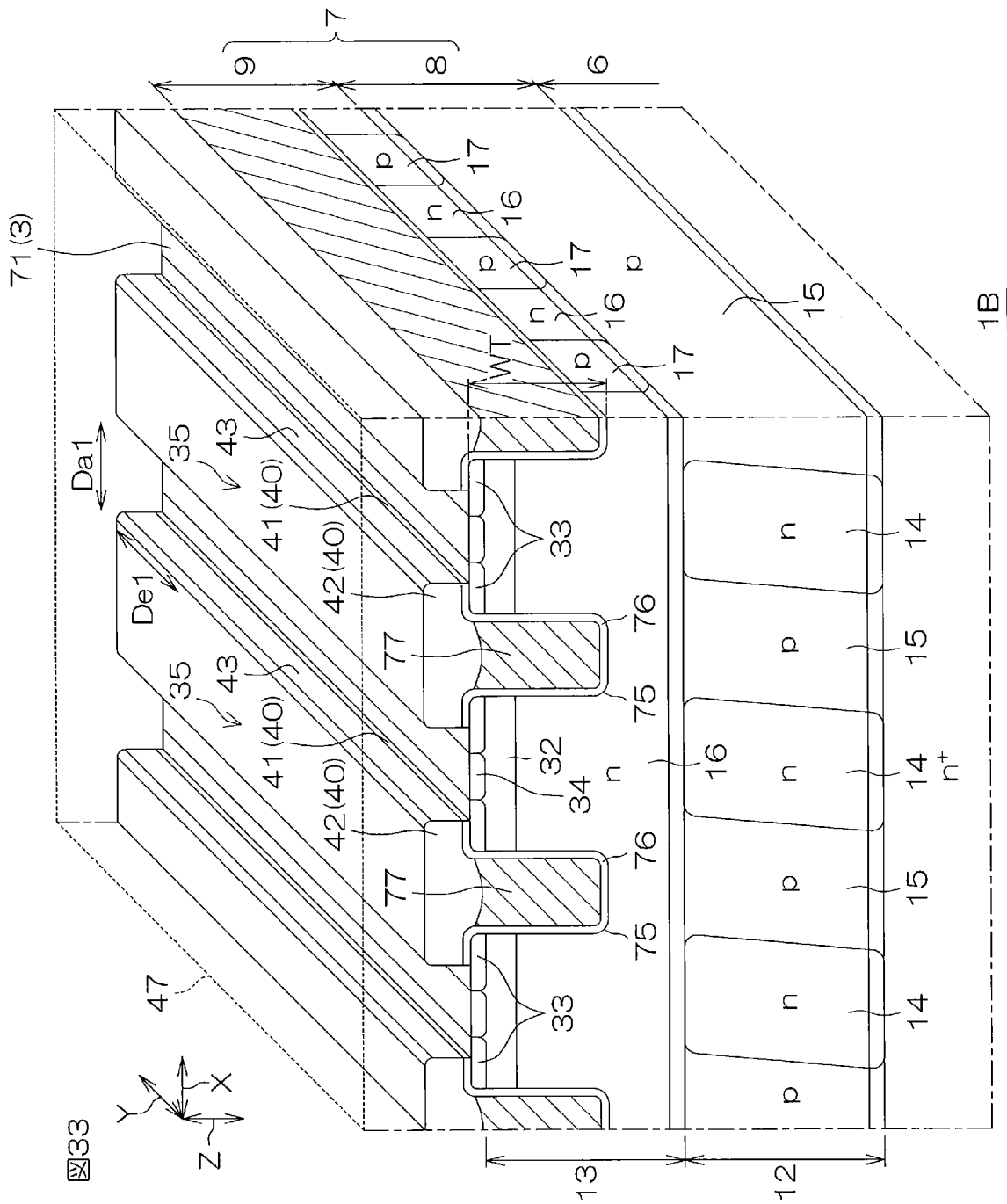
[31B]



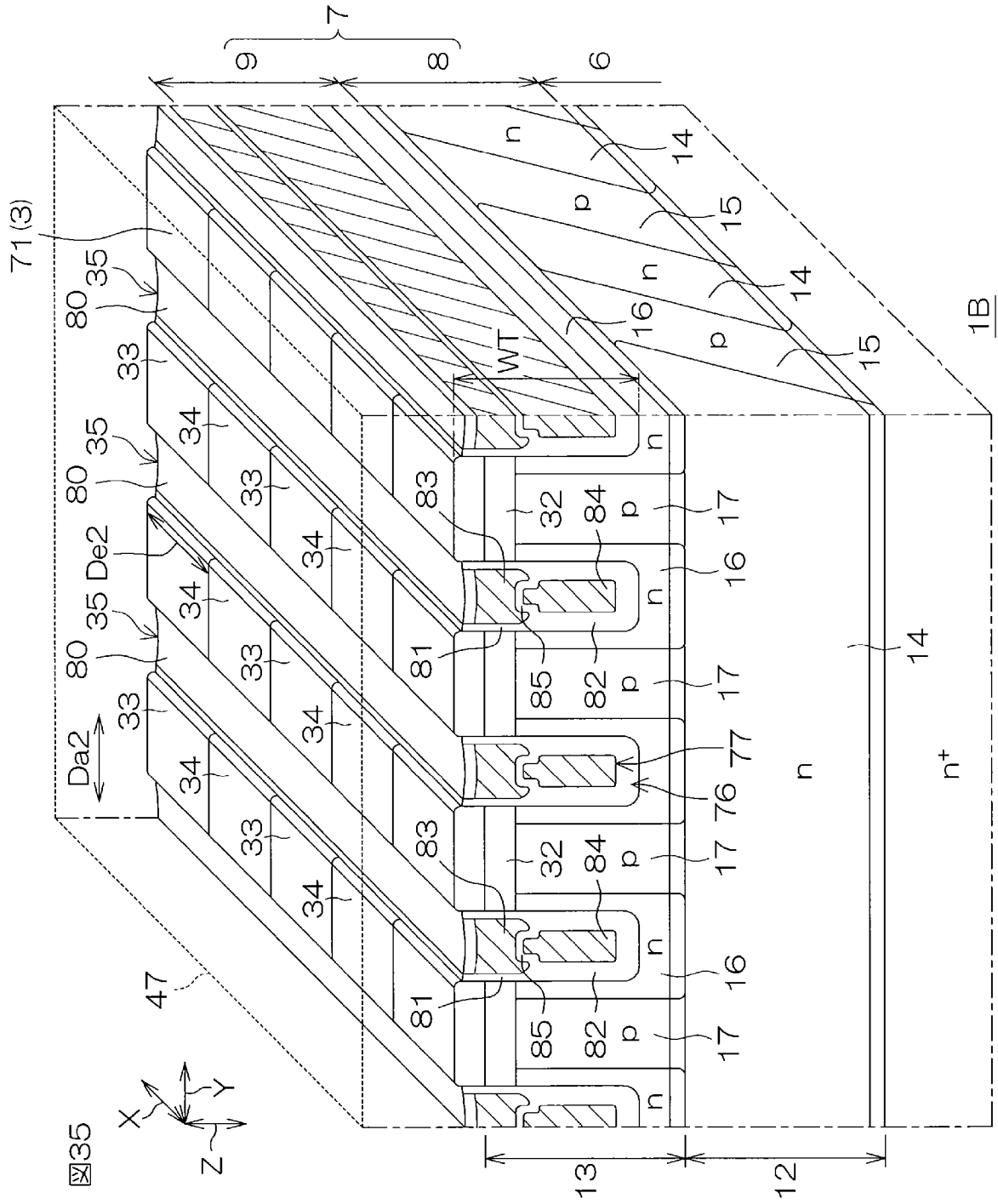
[図32]



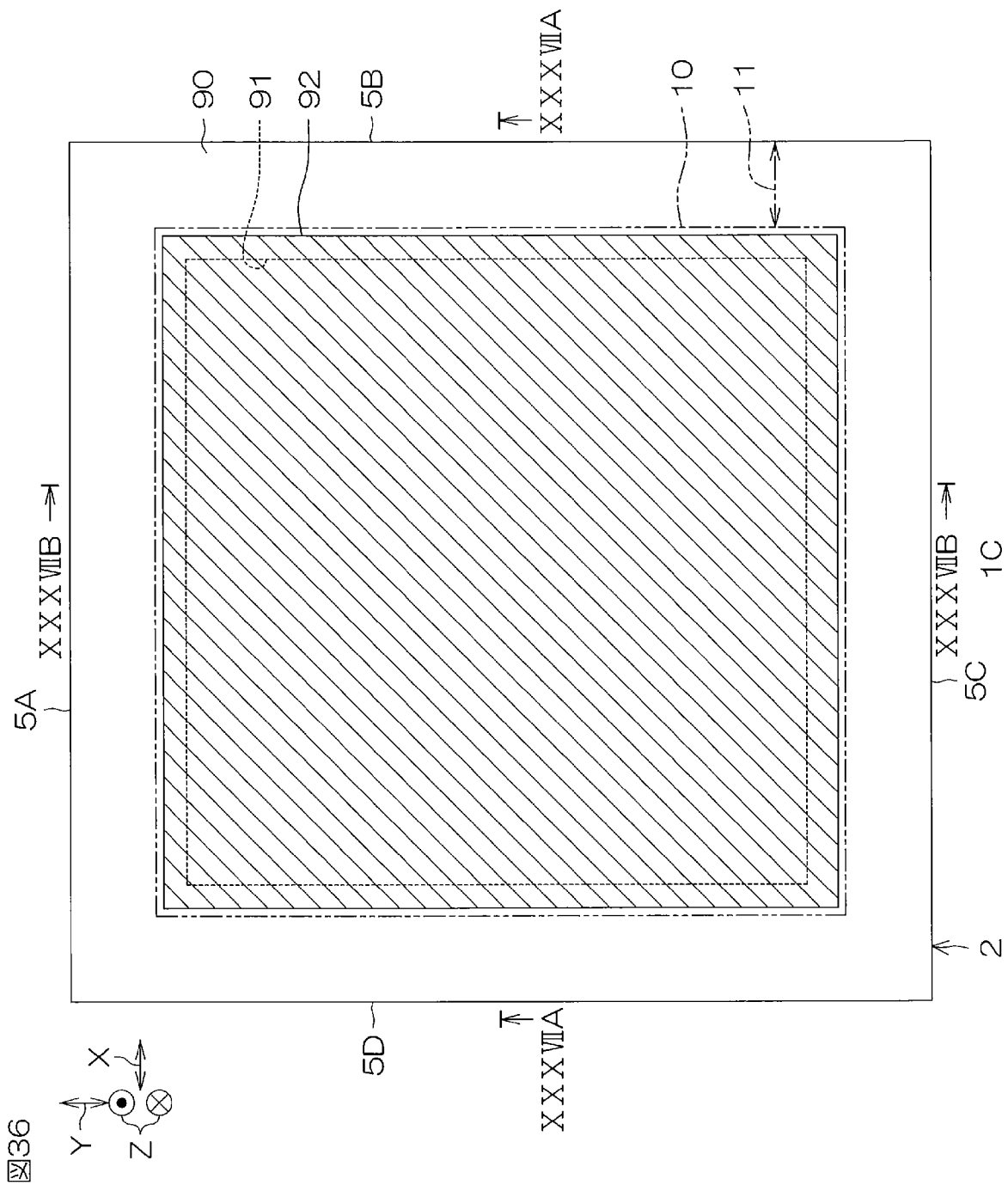
[] 33



[35]

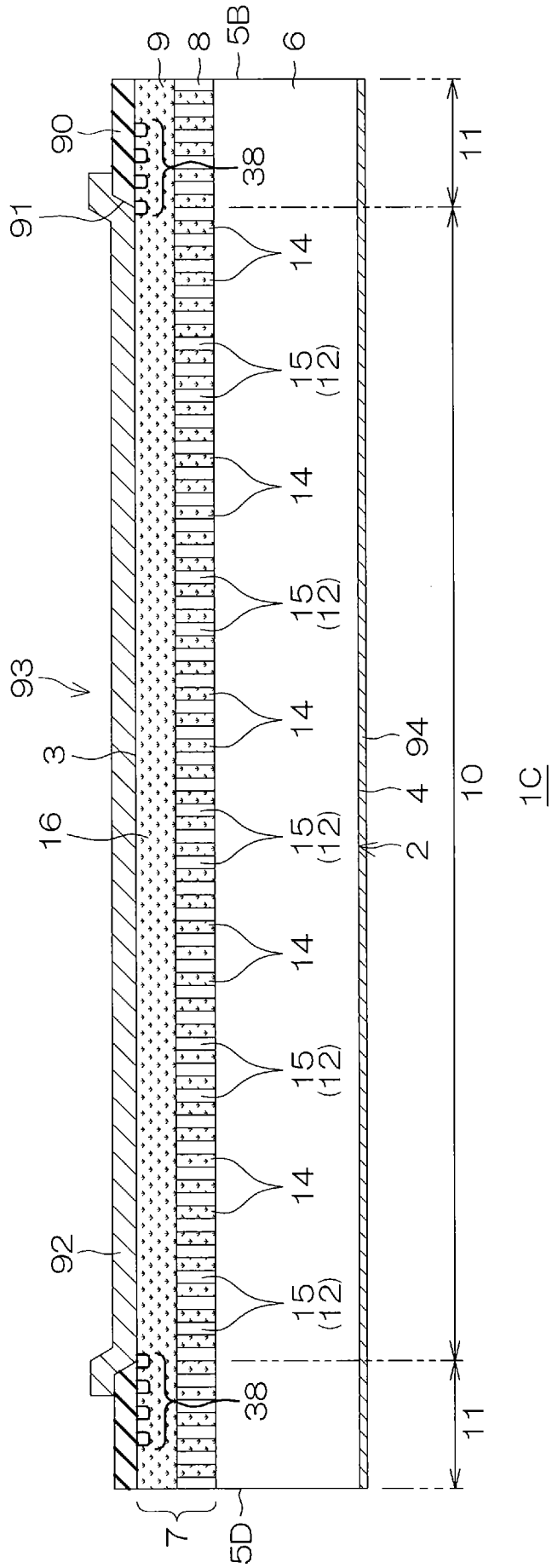
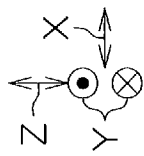


[図36]



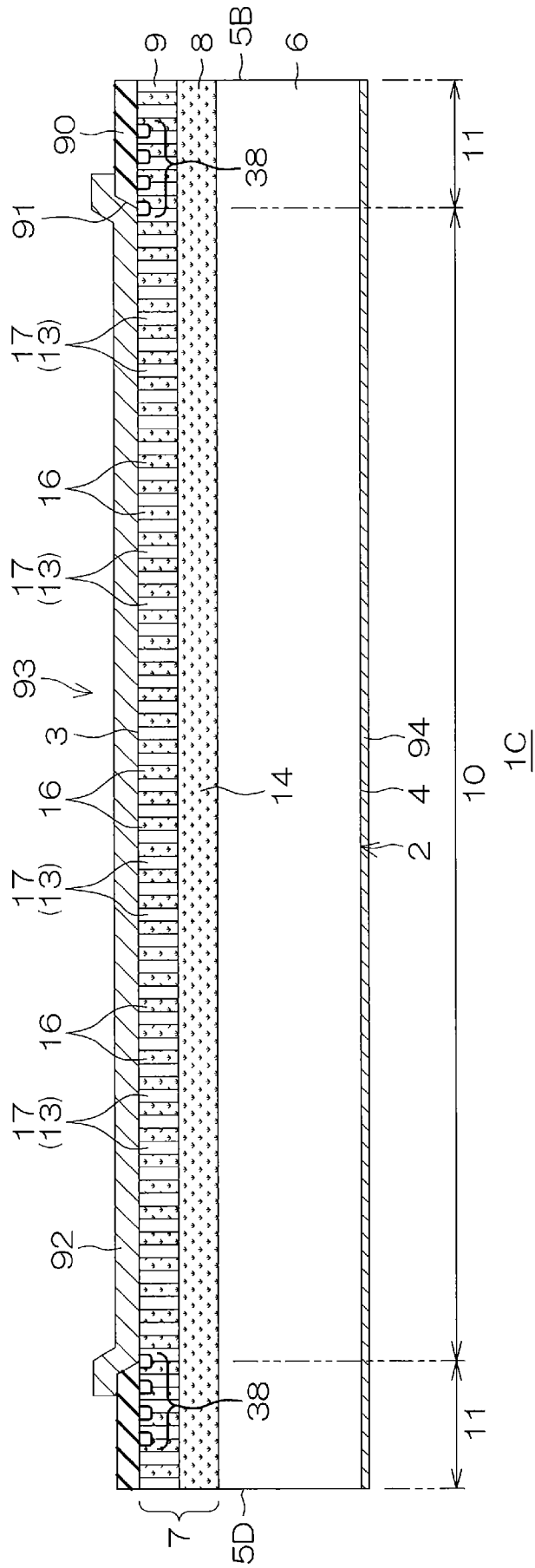
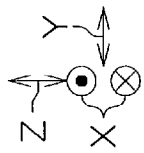
[図37A]


図37A

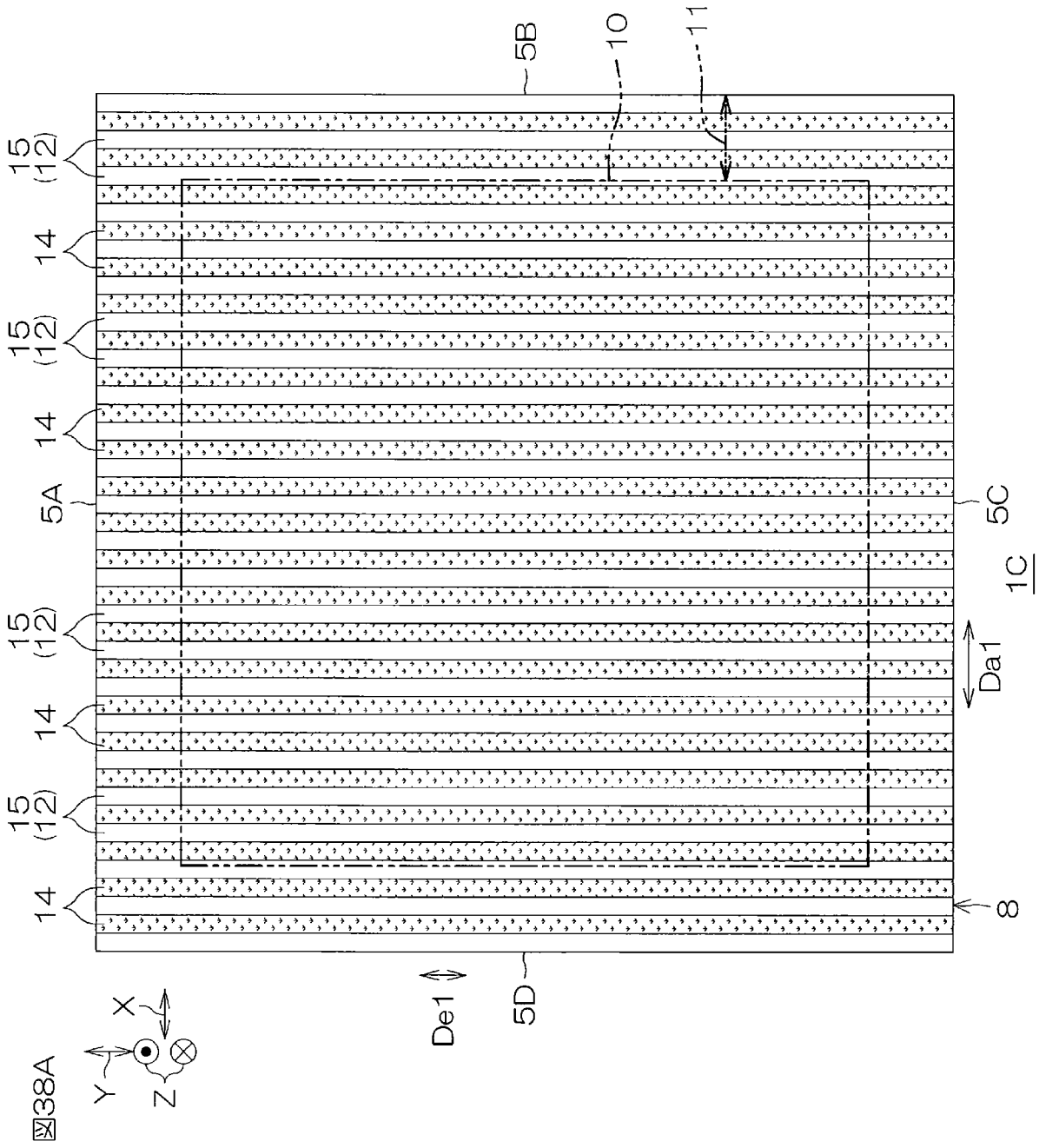


[図37B]

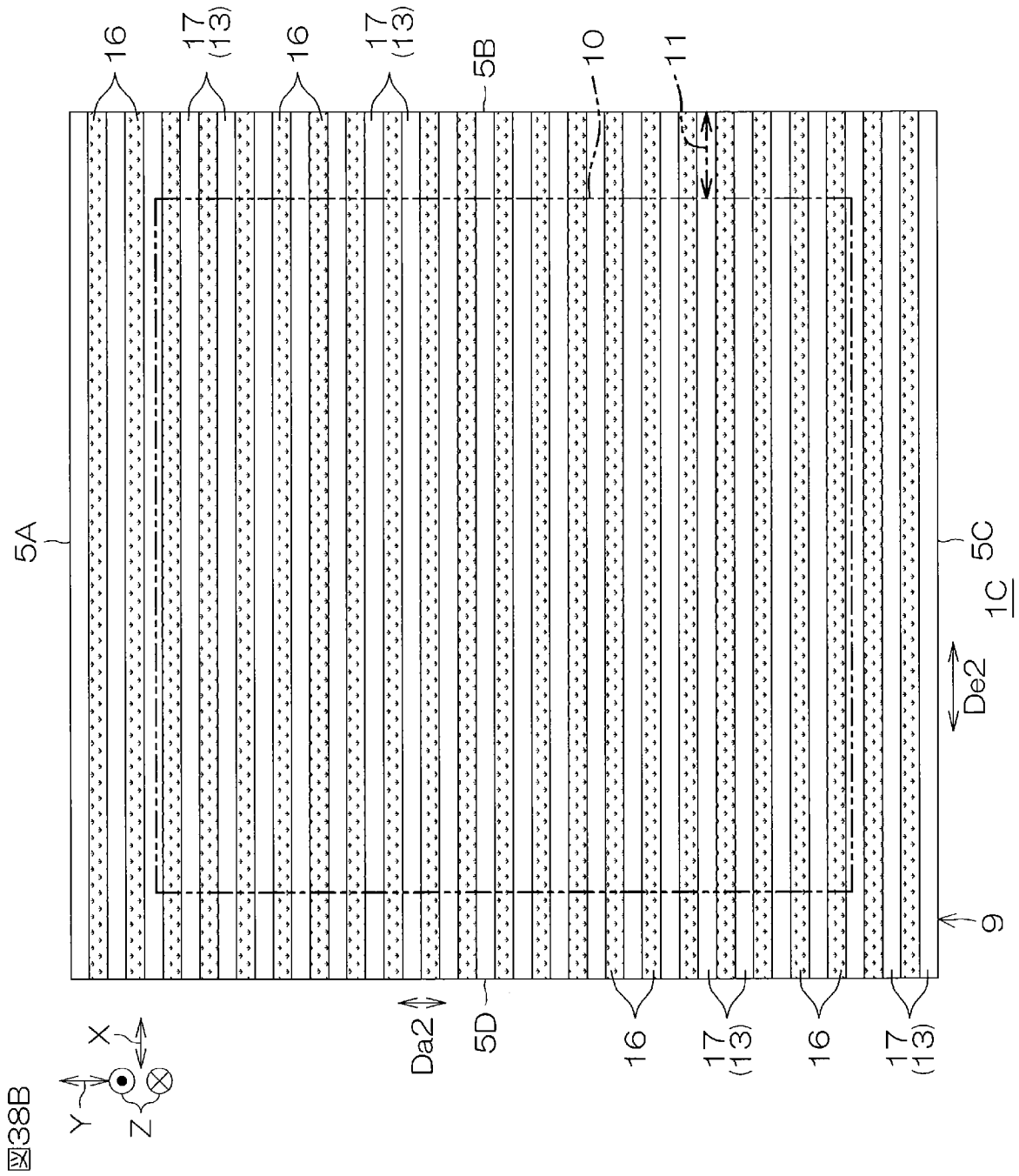
図37B



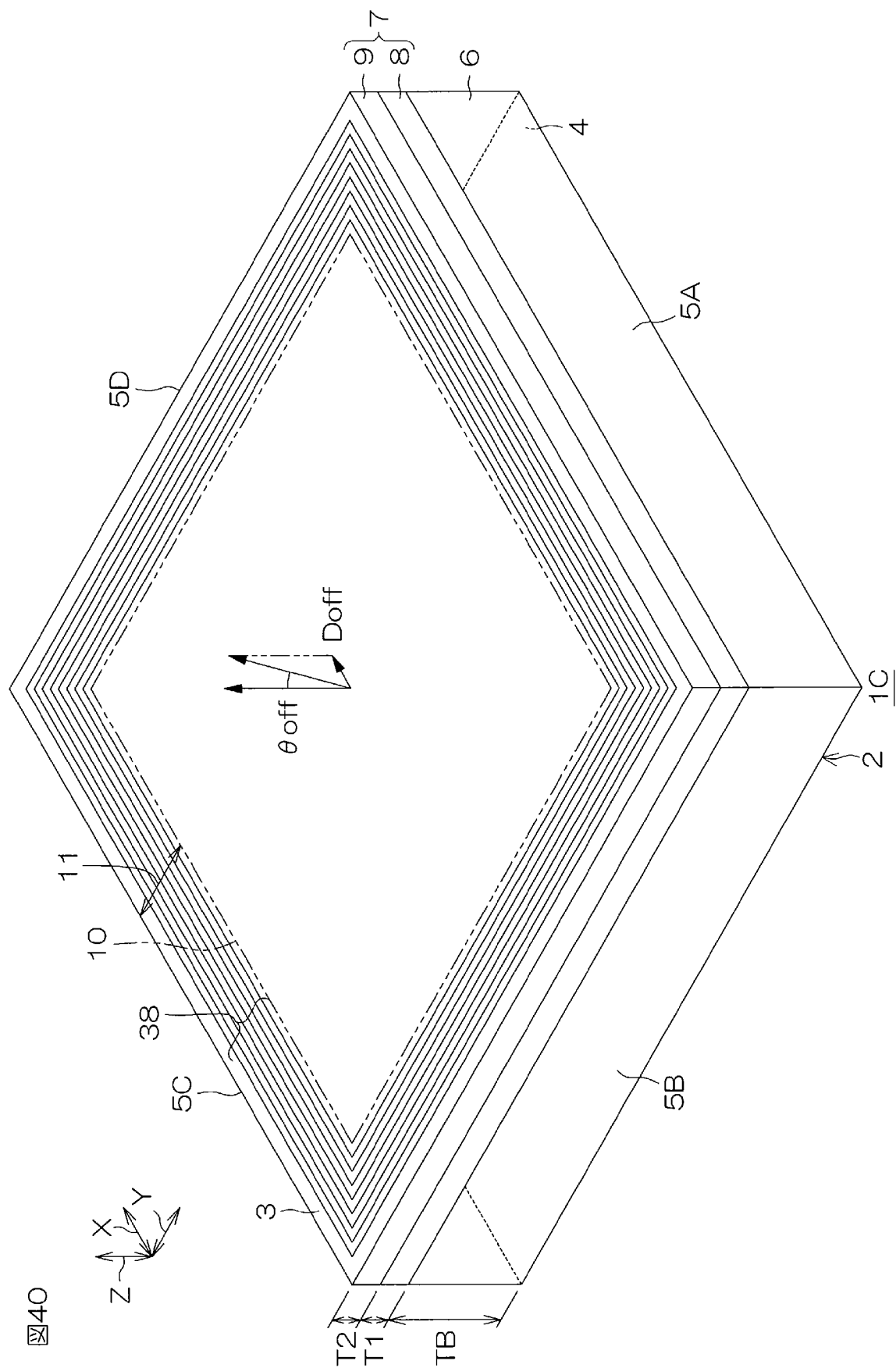
[ 38A]



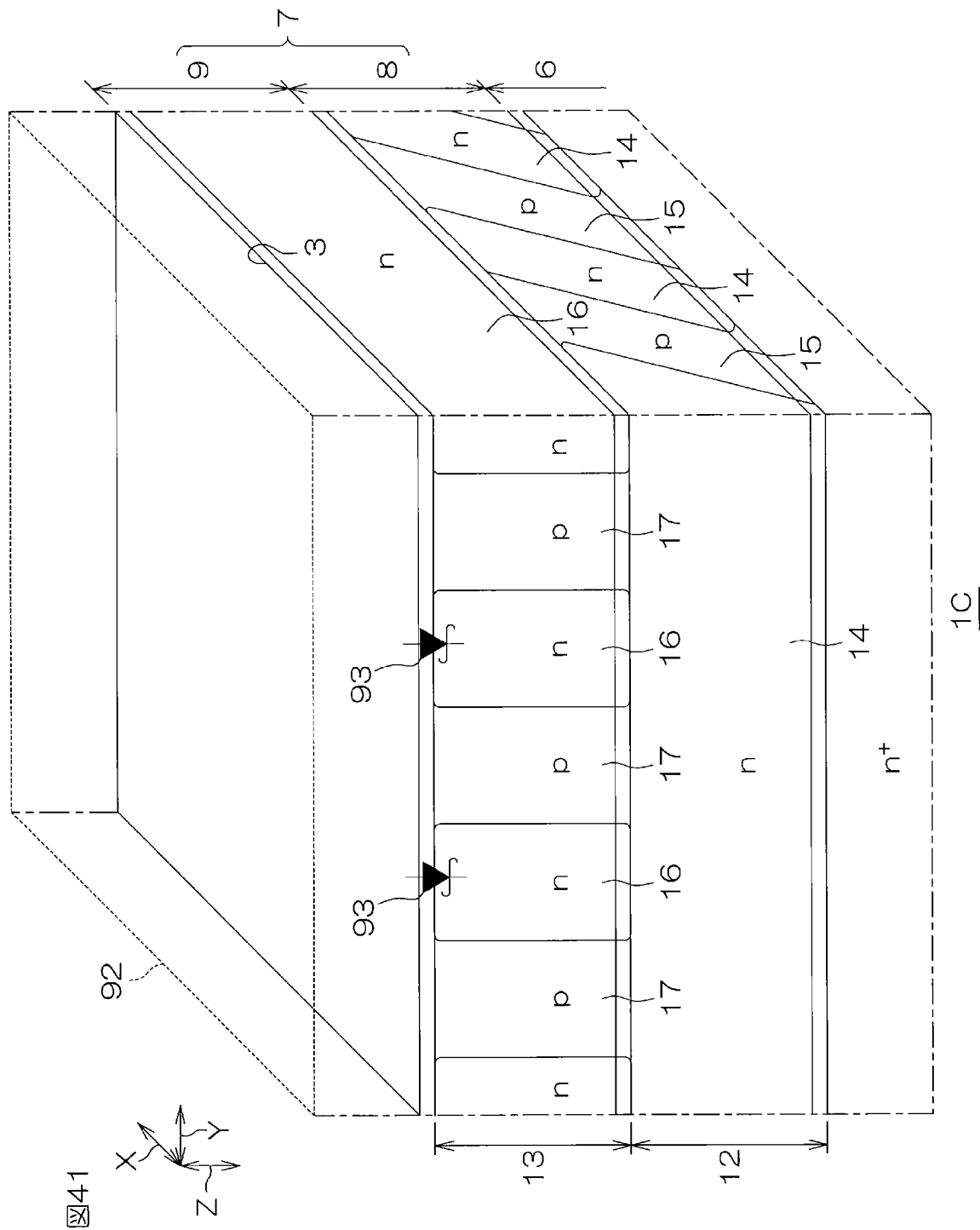
[38B]



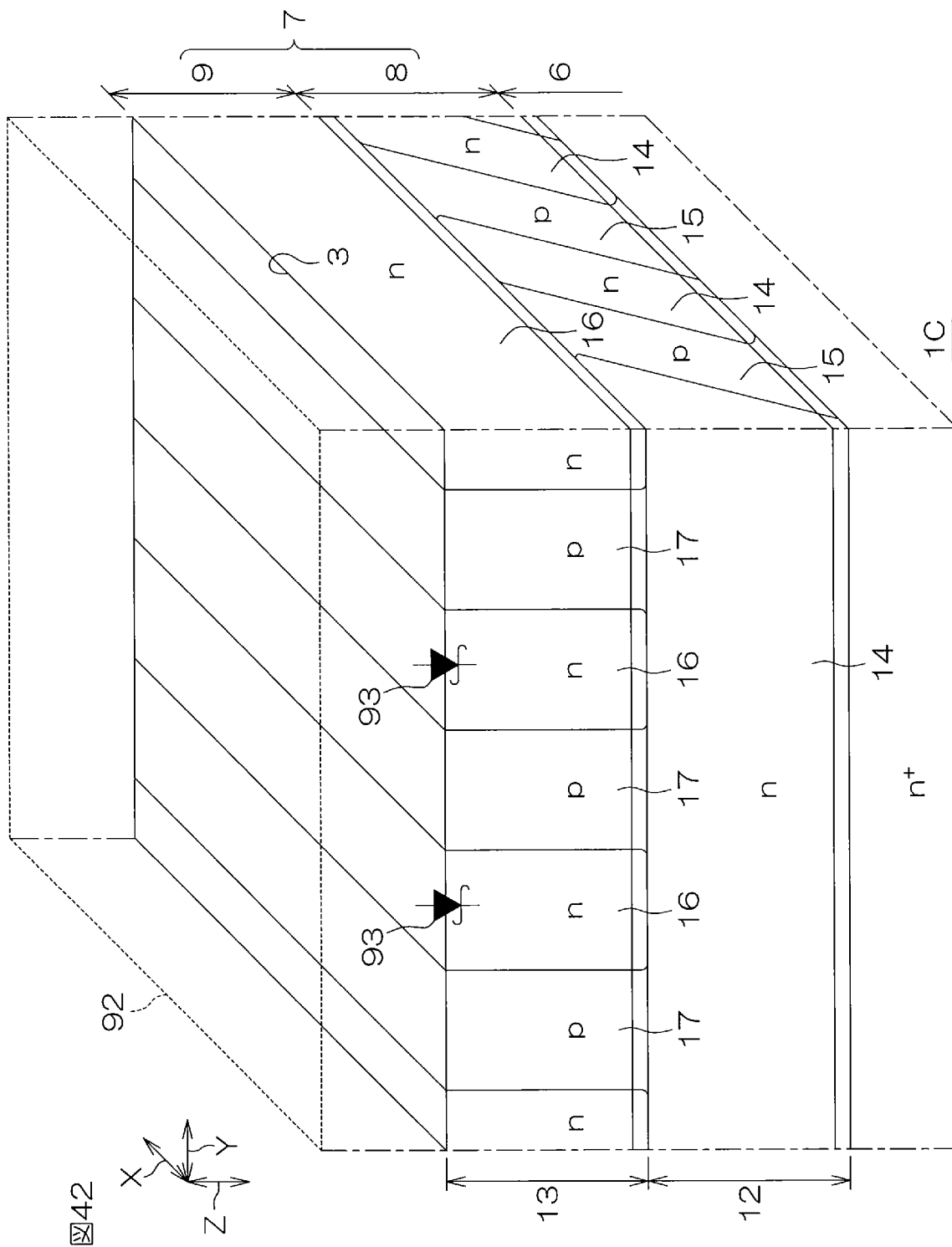
[図40]



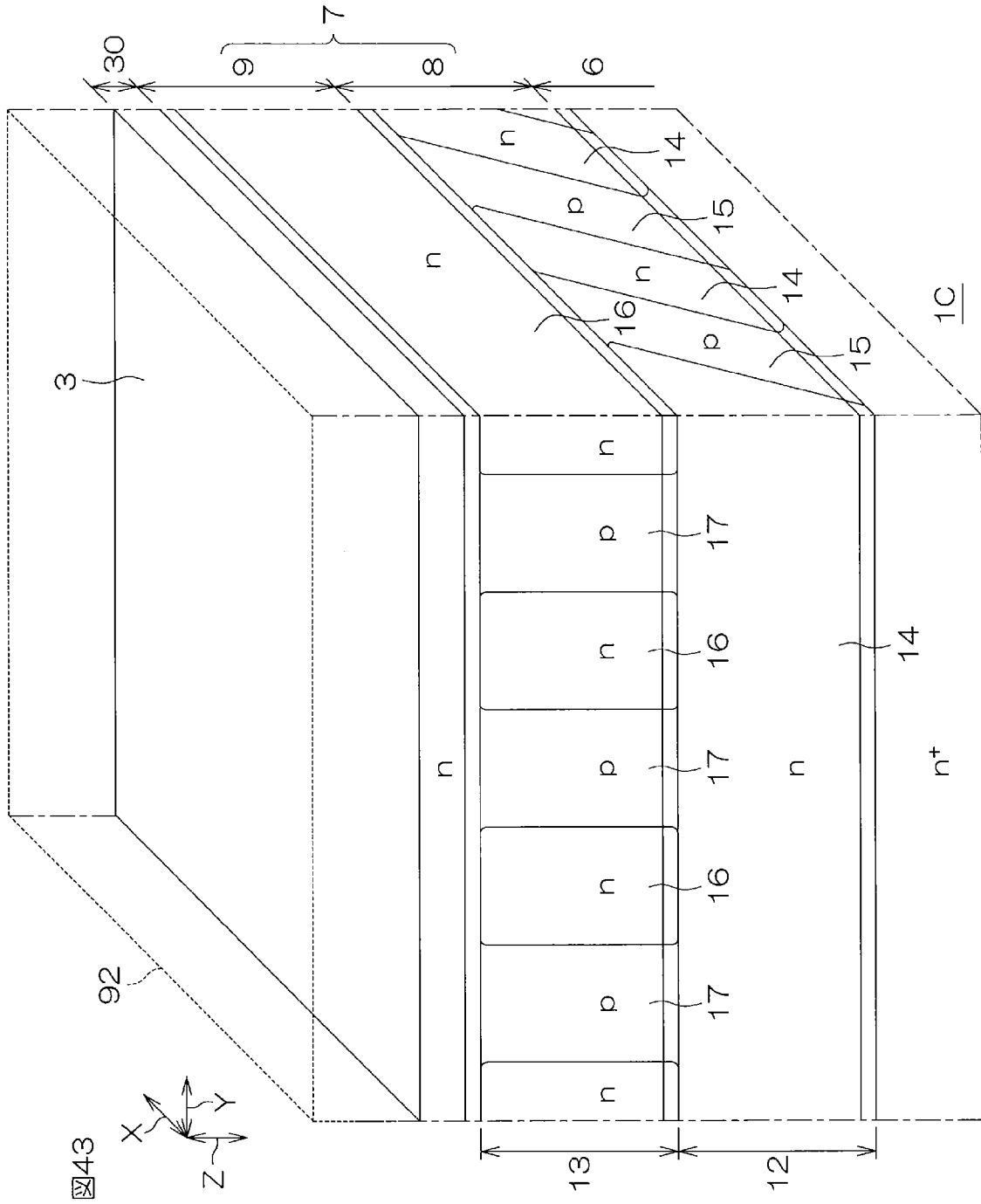
[圖41]



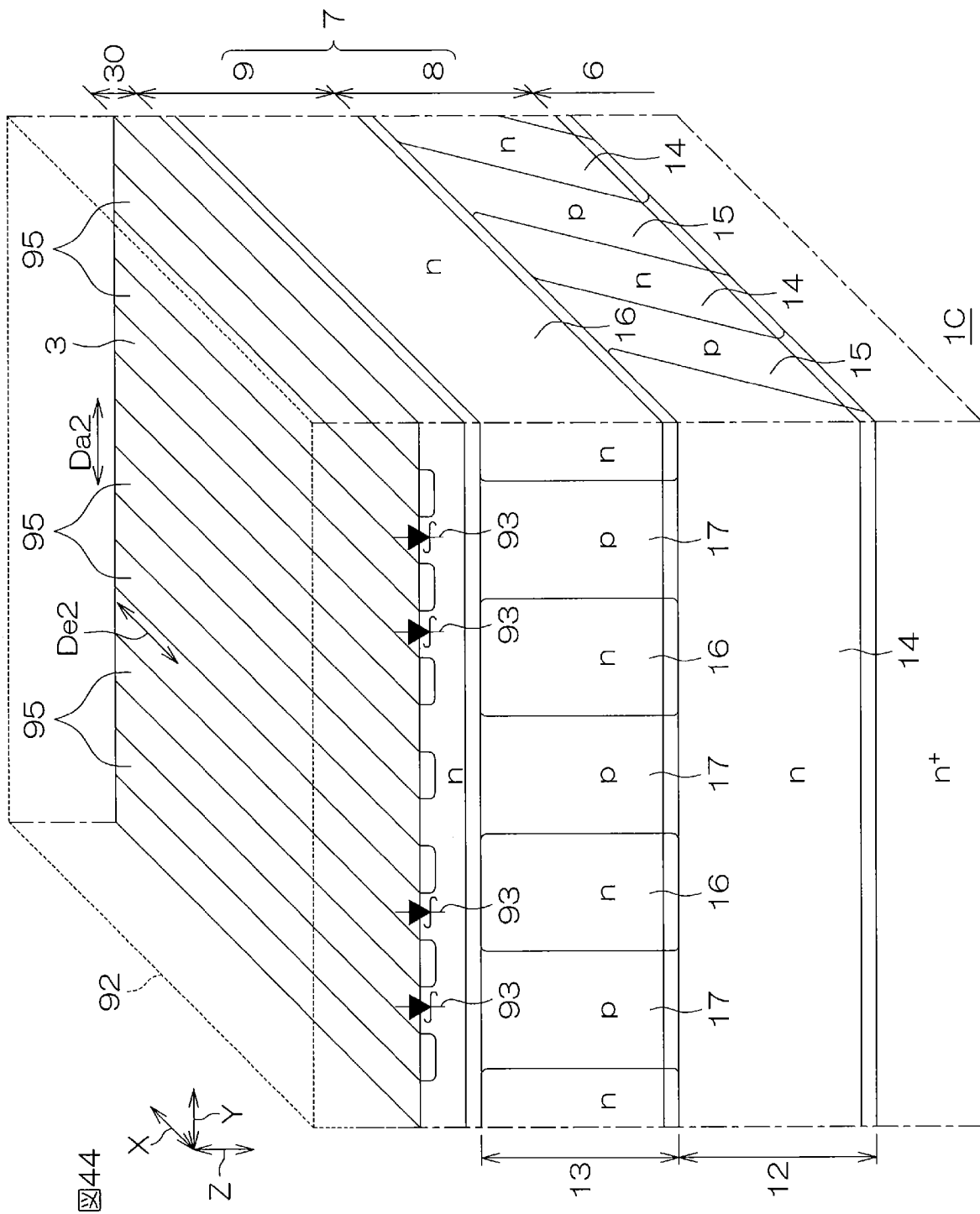
[図42]



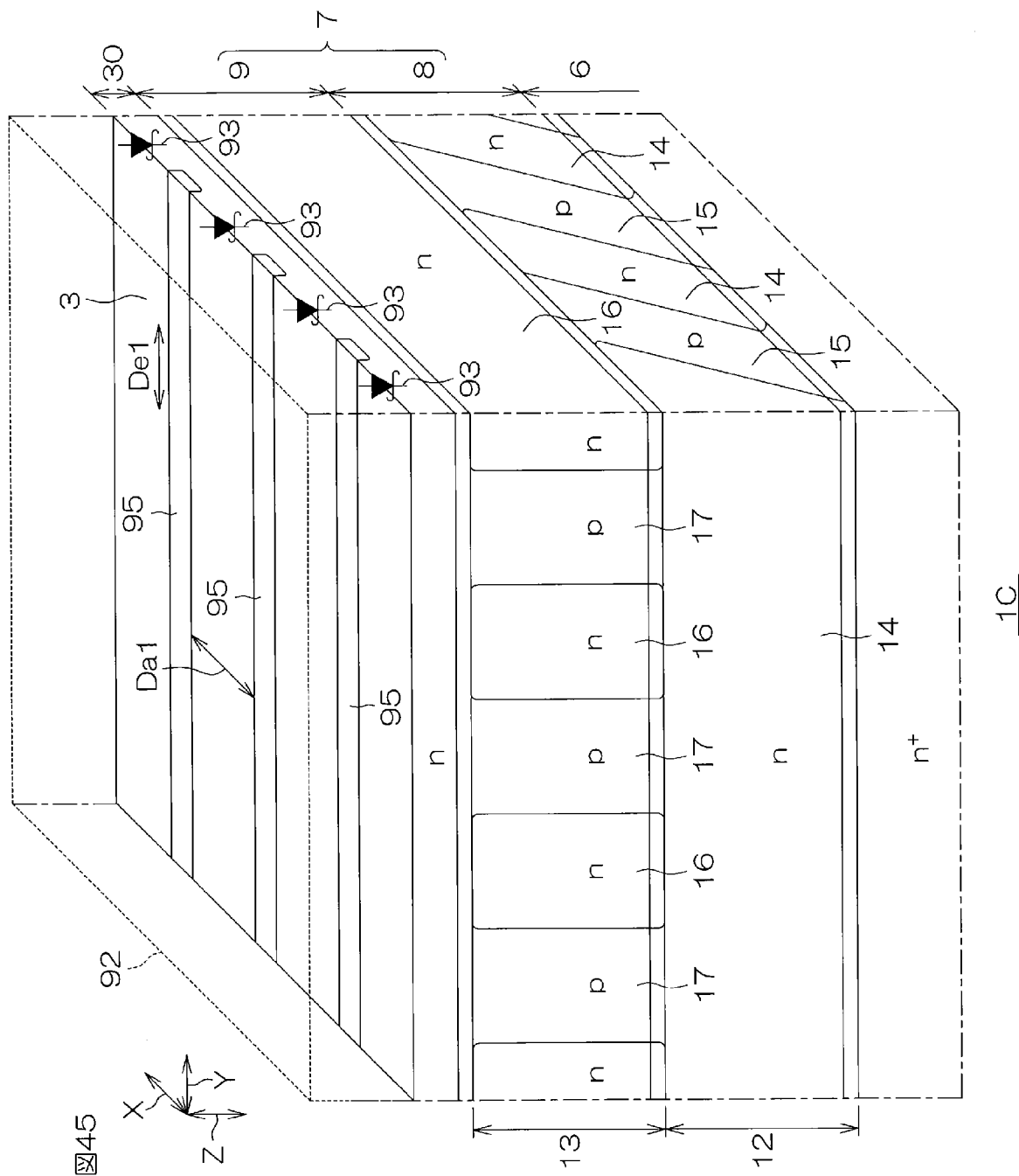
[図43]



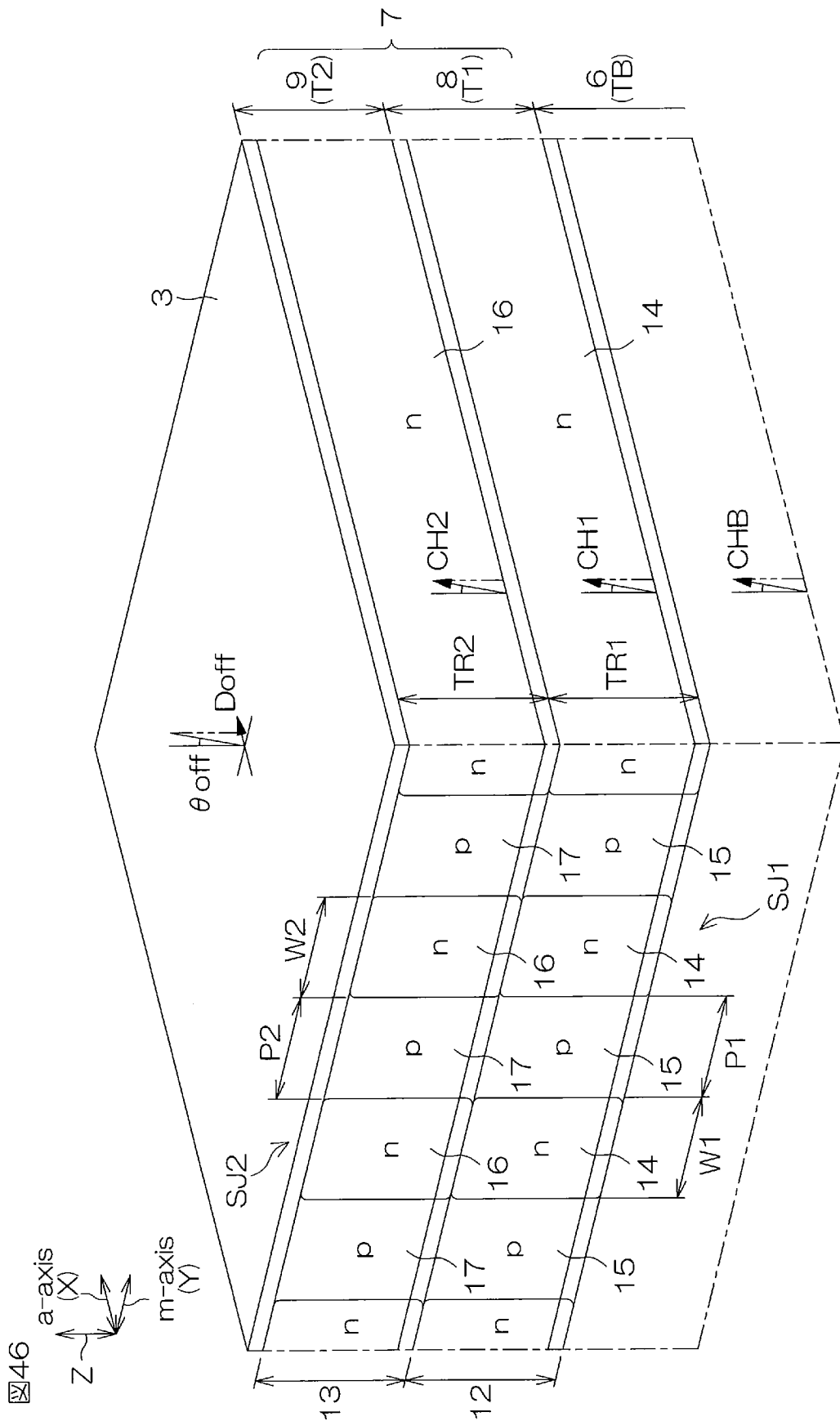
[図44]



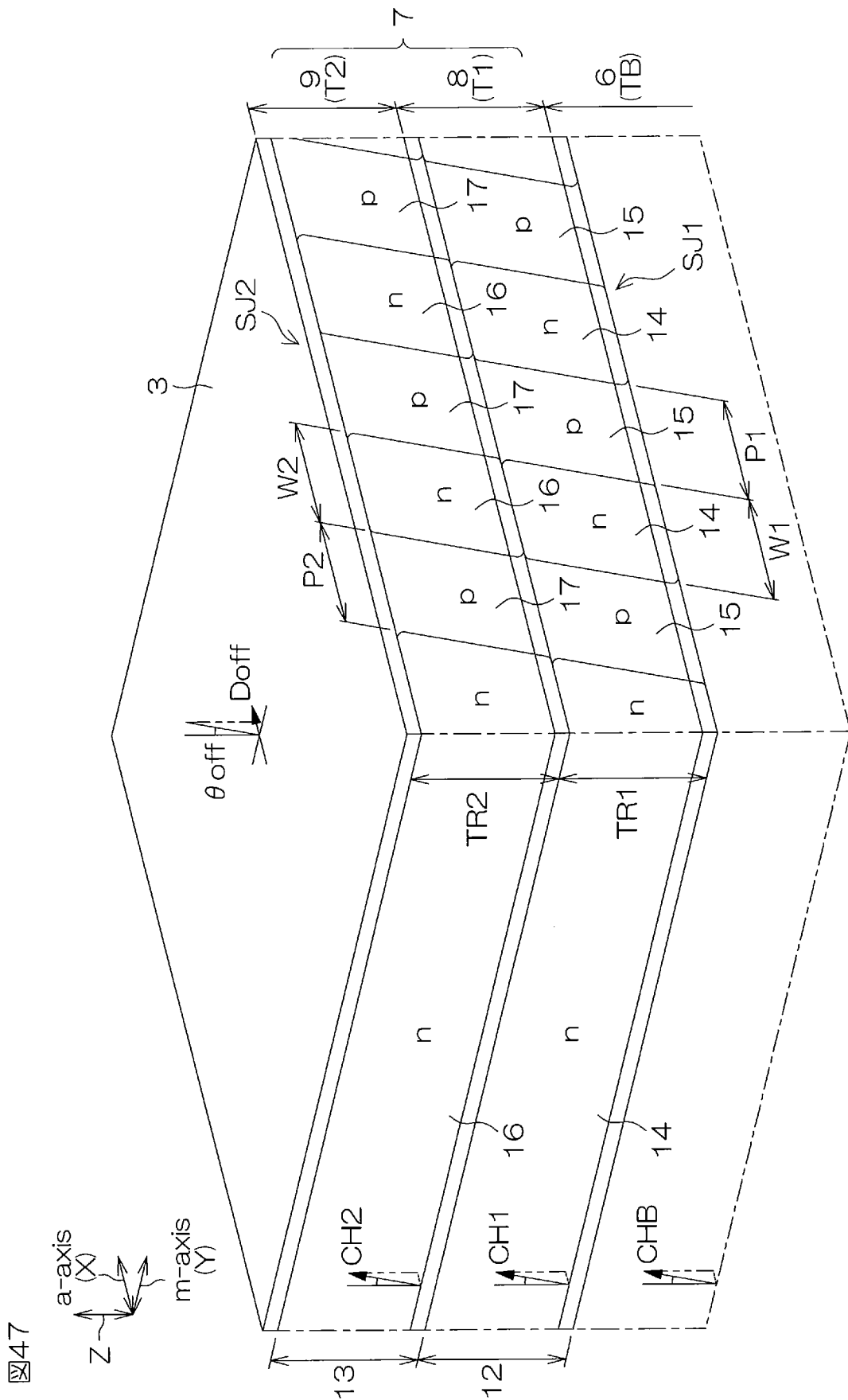
[図45]



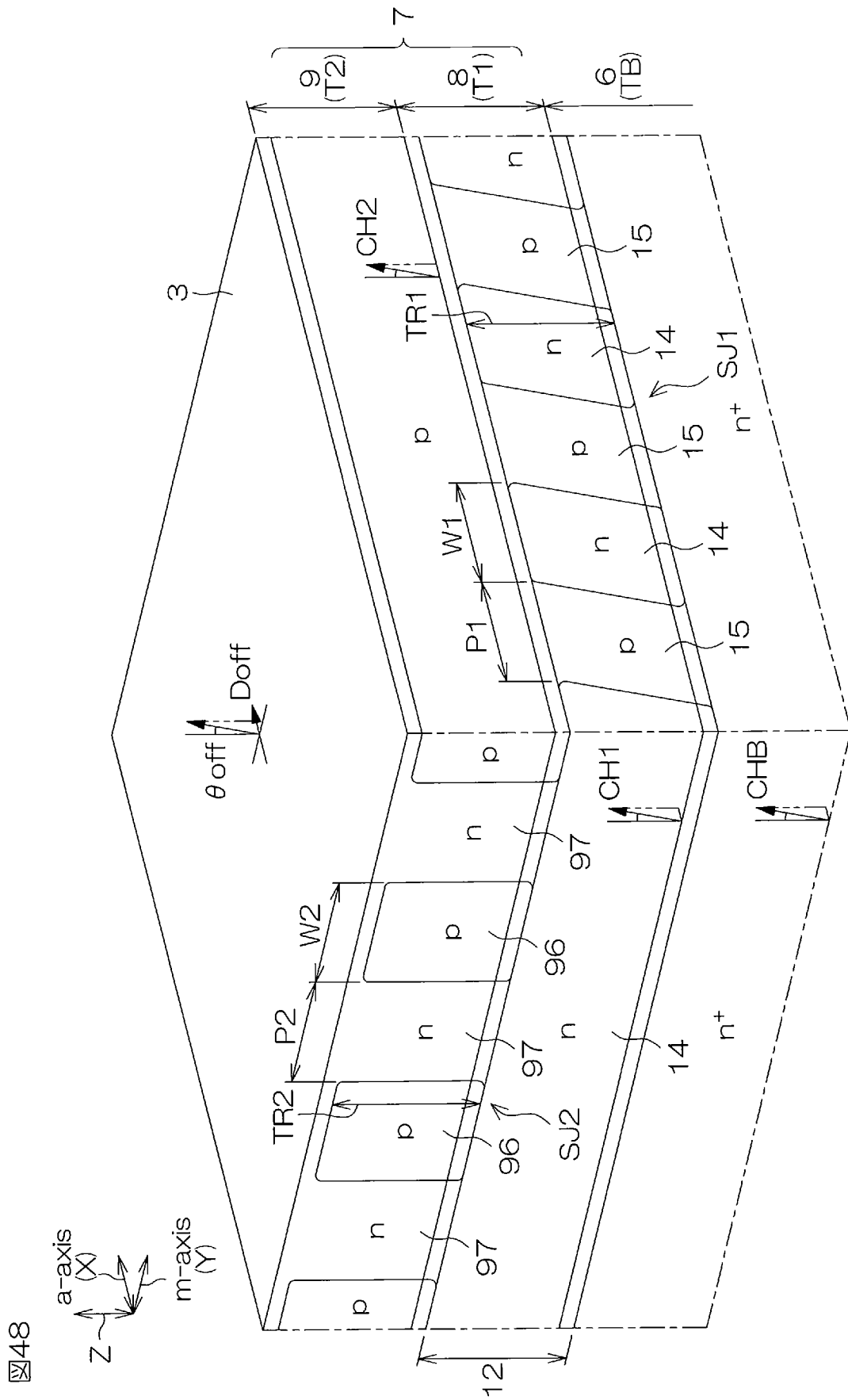
[圖46]



[圖47]



[圖48]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/046703

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<p>H01L 29/78(2006.01)i; H01L 21/265(2006.01)i; H01L 21/266(2006.01)i; H01L 21/336(2006.01)i; H01L 29/06(2006.01)i; H01L 29/12(2006.01)i; H01L 29/41(2006.01)i; H01L 29/47(2006.01)i; H01L 29/861(2006.01)i; H01L 29/868(2006.01)i; H01L 29/872(2006.01)i</p> <p>FI: H01L29/78 652H; H01L29/78 652T; H01L29/78 652Q; H01L29/78 652P; H01L29/78 652F; H01L29/06 301D; H01L29/06 301V; H01L29/06 301G; H01L29/78 658A; H01L29/78 658E; H01L21/265 M; H01L21/265 V; H01L29/78 658L; H01L29/06 301M; H01L29/78 653C; H01L29/78 652J; H01L29/06 301F; H01L29/44 Y; H01L29/86 301F; H01L29/86 301D; H01L29/48 F; H01L29/48 D; H01L29/91 K; H01L29/78 652K; H01L29/78 652N</p> <p>According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC</p>		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
H01L29/78; H01L21/265; H01L21/266; H01L21/336; H01L29/06; H01L29/12; H01L29/41; H01L29/47; H01L29/861; H01L29/868; H01L29/872		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
<p>Published examined utility model applications of Japan 1922-1996</p> <p>Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2024</p> <p>Registered utility model specifications of Japan 1996-2024</p> <p>Published registered utility model applications of Japan 1994-2024</p>		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2022-93100 A (DENSO CORPORATION) 23 June 2022 (2022-06-23) paragraphs [0047]-[0058], [0068]-[0087], fig. 9	1-20
A	WO 2022/163081 A1 (ROHM CO., LTD.) 04 August 2022 (2022-08-04)	1-20
A	JP 2021-89916 A (FUJI ELECTRIC CO., LTD.) 10 June 2021 (2021-06-10)	1-20
A	JP 2020-47623 A (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 26 March 2020 (2020-03-26)	1-20
A	JP 2020-191327 A (TOYOTA CENTRAL R&D LABS., INC.) 26 November 2020 (2020-11-26)	1-20
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“D” document cited by the applicant in the international application</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“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)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search		Date of mailing of the international search report
16 February 2024		05 March 2024
Name and mailing address of the ISA/JP		Authorized officer
Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/JP2023/046703

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
JP	2022-93100	A	23 June 2022	(Family: none)			
WO	2022/163081	A1	04 August 2022	CN	116783715	A	
JP	2021-89916	A	10 June 2021	US	2021/0167167	A1	
JP	2020-47623	A	26 March 2020	US	2020/0091335	A1	
				CN	110911471	A	
JP	2020-191327	A	26 November 2020	(Family: none)			

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））
 H01L 29/78(2006.01)i; H01L 21/265(2006.01)i; H01L 21/266(2006.01)i; H01L 21/336(2006.01)i;
 H01L 29/06(2006.01)i; H01L 29/12(2006.01)i; H01L 29/41(2006.01)i; H01L 29/47(2006.01)i;
 H01L 29/861(2006.01)i; H01L 29/868(2006.01)i; H01L 29/872(2006.01)i
 FI: H01L29/78 652H; H01L29/78 652T; H01L29/78 652Q; H01L29/78 652P; H01L29/78 652F; H01L29/06 301D;
 H01L29/06 301V; H01L29/06 301G; H01L29/78 658A; H01L29/78 658E; H01L21/265 M; H01L21/265 V;
 H01L29/78 658L; H01L29/06 301M; H01L29/78 653C; H01L29/78 652J; H01L29/06 301F; H01L29/44 Y;
 H01L29/86 301F; H01L29/86 301D; H01L29/48 F; H01L29/48 D; H01L29/91 K; H01L29/78 652K; H01L29/78 652N

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））
 H01L29/78; H01L21/265; H01L21/266; H01L21/336; H01L29/06; H01L29/12; H01L29/41; H01L29/47; H01L29/861;
 H01L29/868; H01L29/872

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2024年
日本国実用新案登録公報	1996-2024年
日本国登録実用新案公報	1994-2024年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリ*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2022-93100 A (株式会社デンソー) 23.06.2022 (2022-06-23) 段落[0047]-[0058], [0068]-[0087], 図9	1-20
A	WO 2022/163081 A1 (ローム株式会社) 04.08.2022 (2022-08-04)	1-20
A	JP 2021-89916 A (富士電機株式会社) 10.06.2021 (2021-06-10)	1-20
A	JP 2020-47623 A (株式会社東芝) 26.03.2020 (2020-03-26)	1-20
A	JP 2020-191327 A (株式会社豊田中央研究所) 26.11.2020 (2020-11-26)	1-20

C欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリ
 “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技术水準を示すもの
 “D” 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献
 “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
 “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献

“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 “&” 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 16.02.2024	国際調査報告の発送日 05.03.2024
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 石塚 健太郎 5F 4815 電話番号 03-3581-1101 内線 3516

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2023/046703

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2022-93100 A	23.06.2022	(ファミリーなし)	
WO 2022/163081 A1	04.08.2022	CN 116783715 A	
JP 2021-89916 A	10.06.2021	US 2021/0167167 A1	
JP 2020-47623 A	26.03.2020	US 2020/0091335 A1	
		CN 110911471 A	
JP 2020-191327 A	26.11.2020	(ファミリーなし)	