

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7452632号
(P7452632)

(45)発行日 令和6年3月19日(2024.3.19)

(24)登録日 令和6年3月11日(2024.3.11)

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 L	21/336 (2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 8 A
H 0 1 L	29/78 (2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 2 G
H 0 1 L	29/06 (2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 2 J
H 0 1 L	29/739 (2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 2 K
H 0 1 L	21/265 (2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 2 P

請求項の数 21 (全42頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2022-511136(P2022-511136)
 (86)(22)出願日 令和3年4月1日(2021.4.1)
 (86)国際出願番号 PCT/JP2021/014179
 (87)国際公開番号 WO2021/201235
 (87)国際公開日 令和3年10月7日(2021.10.7)
 審査請求日 令和4年3月28日(2022.3.28)
 (31)優先権主張番号 特願2020-66314(P2020-66314)
 (32)優先日 令和2年4月1日(2020.4.1)
 (33)優先権主張国・地域又は機関
 日本国(JP)

(73)特許権者 000005234
 富士電機株式会社
 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号
 (74)代理人 110000877
 弁理士法人R Y U K A国際特許事務所
 (72)発明者 窪内 源宜
 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号
 富士電機株式会社内
 (72)発明者 吉村 尚
 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号
 富士電機株式会社内
 (72)発明者 瀧下 博
 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号
 富士電機株式会社内
 (72)発明者 内田 美佐稀

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 半導体装置および半導体装置の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板と、
 前記半導体基板の前記下面側に配置され、水素ドナーを含み、前記半導体基板の深さ方向におけるドーピング濃度分布が単一の第1のドーピング濃度ピークを有する、第1導電型のバッファ領域と、
 前記バッファ領域と前記半導体基板の前記上面との間に配置され、水素ドナーを含み、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い第1導電型の高濃度領域と、
 前記バッファ領域と前記半導体基板の前記下面との間に配置され、前記高濃度領域よりもドーピング濃度の高い第1導電型または第2導電型の下面領域と
 を備え、
 前記バッファ領域の前記第1のドーピング濃度ピークは、水素ドナー以外のN型ドーパントの濃度ピークである
 半導体装置。

【請求項2】

上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板と、
 前記半導体基板の前記下面側に配置され、水素ドナーを含み、前記半導体基板の深さ方向におけるドーピング濃度分布が単一の第1のドーピング濃度ピークを有する、第1導電型のバッファ領域と、
 前記バッファ領域と前記半導体基板の前記上面との間に配置され、水素ドナーを含み、

10

20

バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い第 1 導電型の高濃度領域と、

前記バッファ領域と前記半導体基板の前記下面との間に配置され、前記高濃度領域よりもドーピング濃度の高い第 1 導電型または第 2 導電型の下面領域と、

前記半導体基板の前記上面側に配置された不純物化学濃度ピークを備え、

前記高濃度領域は、前記バッファ領域の前記第 1 のドーピング濃度ピークから前記不純物化学濃度ピークまで設けられている

半導体装置。

【請求項 3】

前記不純物化学濃度ピークの頂点から前記上面側に向かって不純物化学濃度が減少する上側裾は、前記不純物化学濃度ピークの頂点から前記下面側に向かって前記不純物化学濃度が減少する下側裾よりも、前記不純物化学濃度が急峻に減少する

10

請求項 2 に記載の半導体装置。

【請求項 4】

前記バッファ領域の前記第 1 のドーピング濃度ピークと同一の深さ位置に配置された水素化学濃度ピークと、

前記不純物化学濃度ピークと同一の深さ位置に配置された第 2 のドーピング濃度ピークとを更に備え、

前記不純物化学濃度ピークは、水素の化学濃度ピークであり、

それぞれの濃度ピークは、前記半導体基板の前記下面から前記上面に向かうにつれて濃度が増大する下側裾を有し、

20

前記第 2 のドーピング濃度ピークの前記下側裾の傾きを、前記不純物化学濃度ピークの前記下側裾の傾きで規格化した値が、前記第 1 のドーピング濃度ピークの前記下側裾の傾きを、前記水素化学濃度ピークの前記下側裾の傾きで規格化した値よりも小さい

請求項 3 に記載の半導体装置。

【請求項 5】

上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板を備える半導体装置であって、前記半導体装置は、

前記半導体基板の前記下面側に配置され、水素ドナーを含み、前記半導体基板の深さ方向におけるドーピング濃度分布が単一の第 1 のドーピング濃度ピークを有する、第 1 導電型のバッファ領域と、

30

前記バッファ領域と前記半導体基板の前記上面との間に配置され、水素ドナーを含み、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い第 1 導電型の高濃度領域と、

前記バッファ領域と前記半導体基板の前記下面との間に配置され、前記高濃度領域よりもドーピング濃度の高い第 1 導電型または第 2 導電型の下面領域と

を更に備え、

前記半導体装置の定格電圧を x (V) とした場合に、前記バルク・ドナー濃度 (atoms/cm^3) が、 $(9.20245 \times 10^{12}) / x$ 以上、 $(4.60123 \times 10^{16}) / x$ 以下である

半導体装置。

【請求項 6】

40

前記バルク・ドナー濃度 (atoms/cm^3) が、 $(9.20245 \times 10^{14}) / x$ 以上、 $(1.84049 \times 10^{16}) / x$ 以下である

請求項 5 に記載の半導体装置。

【請求項 7】

前記半導体基板の前記深さ方向の中央におけるドナー濃度 ($/\text{cm}^3$) が、 $(9.20245 \times 10^{15}) / x$ 以上、 $(9.20245 \times 10^{16}) / x$ 以下である

請求項 5 または 6 に記載の半導体装置。

【請求項 8】

上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板と、

前記半導体基板の前記下面側に配置され、水素ドナーを含み、前記半導体基板の深さ方

50

向におけるドーピング濃度分布が単一の第 1 のドーピング濃度ピークを有する、第 1 導電型のバッファ領域と、

前記バッファ領域と前記半導体基板の前記上面との間に配置され、水素ドナーを含み、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い第 1 導電型の高濃度領域と、

前記バッファ領域と前記半導体基板の前記下面との間に配置され、前記高濃度領域よりもドーピング濃度の高い第 1 導電型または第 2 導電型の下面領域と

を備え、

前記半導体基板の前記上面側に配置され、前記高濃度領域よりもドーピング濃度の高い蓄積領域を更に備え、

前記高濃度領域は、前記蓄積領域と接する位置まで設けられる半導体装置。

10

【請求項 9】

前記バッファ領域の前記第 1 のドーピング濃度ピークは、水素ドナーの濃度ピークである請求項 2 から 8 のいずれか一項に記載の半導体装置。

【請求項 10】

前記高濃度領域は、前記半導体基板の深さ方向において、前記半導体基板の厚みの 50 % 以上の長さを有する

請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の半導体装置。

【請求項 11】

前記高濃度領域は、前記半導体基板の深さ方向において、70 μm 以上の長さを有する

請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の半導体装置。

20

【請求項 12】

前記高濃度領域のドナー濃度は、前記バルク・ドナー濃度の 2 倍以上である

請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の半導体装置。

【請求項 13】

前記高濃度領域のドナー濃度は、前記バルク・ドナー濃度の 5 倍以上である

請求項 12 に記載の半導体装置。

【請求項 14】

上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板の前記下面から、第 2 の位置に荷電粒子を注入し、且つ、前記第 2 の位置よりも前記下面側の領域において水素化学濃度分布が単一のピークを有するように、第 1 の位置に水素イオンを注入する第 1 注入段階と、

30

前記半導体基板をアニールして、前記第 1 の位置と前記第 2 の位置との間に、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い高濃度領域を形成する第 1 アニール段階と、

前記第 1 アニール段階の後に、前記半導体基板の前記下面側を研削して、前記第 1 の位置を含む領域を除去する研削段階を備える

半導体装置の製造方法。

【請求項 15】

前記研削段階の後に、前記半導体基板の前記下面から、前記第 2 の位置よりも前記下面側に、N 型のドーパントを注入する第 2 注入段階を更に備える

40

請求項 14 に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項 16】

前記研削段階の後に、前記半導体基板の前記下面から、前記第 2 の位置よりも前記下面側に、水素イオンを注入する第 2 注入段階を更に備える

請求項 14 に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項 17】

上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板の前記下面から、第 2 の位置に水素イオンを注入し、且つ、前記第 2 の位置よりも前記下面側の領域において水素化学濃度分布が単一のピークを有するように、第 1 の位置に水素イオンを注入する第 1 注入段階と、

50

前記半導体基板をアニールして、前記第 1 の位置と前記第 2 の位置との間に、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い高濃度領域を形成する第 1 アニール段階とを備え、

前記第 2 の位置は、前記半導体基板の前記上面の側に配置されている半導体装置の製造方法。

【請求項 18】

上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板の前記下面から、第 2 の位置に水素イオンを注入し、且つ、前記第 2 の位置よりも前記下面側の領域において水素化学濃度分布が単一のピークを有するように、第 1 の位置に水素イオンを注入する第 1 注入段階と、

前記半導体基板をアニールして、前記第 1 の位置と前記第 2 の位置との間に、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い高濃度領域を形成する第 1 アニール段階とを備え、

前記第 1 アニール段階を行った後の前記半導体基板が、前記第 2 の位置にドーピング濃度ピークを備える

半導体装置の製造方法。

【請求項 19】

前記第 1 アニール段階を行った後の前記半導体基板が、前記第 2 の位置に設けられる前記ドーピング濃度ピークよりも前記上面の側に、ドーピング濃度が前記バルク・ドナー濃度であるバルク・ドナー領域を有する

請求項 18 に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項 20】

上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板の前記下面から、第 2 の位置に水素イオンを注入し、且つ、前記第 2 の位置よりも前記下面側の領域において水素化学濃度分布が単一のピークを有するように、第 1 の位置に水素イオンを注入する第 1 注入段階と、

前記半導体基板をアニールして、前記第 1 の位置と前記第 2 の位置との間に、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い高濃度領域を形成する第 1 アニール段階とを備え、

前記第 1 アニール段階を行った後の前記半導体基板が、前記第 2 の位置よりも前記上面の側に、ドーピング濃度が前記バルク・ドナー濃度であるバルク・ドナー領域を有する半導体装置の製造方法。

【請求項 21】

前記第 2 の位置は、前記半導体基板の前記上面の側に配置されている

請求項 18 から 20 のいずれか一項に記載の半導体装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、半導体装置および半導体装置の製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、半導体ウエハに水素イオンを注入して、半導体ウエハのドーピング濃度を調整する技術が知られている（例えば、特許文献 1 参照）。

特許文献 1 US 2015/0050754 号

【解決しようとする課題】

【0003】

水素の注入位置から離れた領域まで、水素が容易に拡散できることが好ましい。

【一般的開示】

【0004】

上記課題を解決するために、本発明の一つの態様においては、上面および下面を有し、

10

20

30

40

50

バルク・ドナーを含む半導体基板を備える半導体装置を提供する。半導体装置は、半導体基板の下面側に配置され、水素ドナーを含み、半導体基板の深さ方向におけるドーピング濃度分布が単一の第1のドーピング濃度ピークを有する、第1導電型のバッファ領域を備えてよい。半導体装置は、バッファ領域と半導体基板の上面との間に配置され、水素ドナーを含み、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い第1導電型の高濃度領域を備えてよい。半導体装置は、バッファ領域と半導体基板の下面との間に配置され、高濃度領域よりもドーピング濃度の高い第1導電型または第2導電型の下面領域を備えてよい。

【0005】

バッファ領域のドーピング濃度ピークは、水素ドナーの濃度ピークであってよい。

【0006】

バッファ領域のドーピング濃度ピークは、水素ドナー以外のN型ドーパントの濃度ピークであってよい。

【0007】

半導体装置は、半導体基板の上面側に配置された不純物化学濃度ピークを備えてよい。不純物化学濃度ピークの頂点から上面側に向かって不純物化学濃度が減少する上側裾は、不純物化学濃度ピークの頂点から下面側に向かって不純物化学濃度が減少する下側裾よりも、不純物化学濃度が急峻に減少してよい。高濃度領域は、バッファ領域のドーピング濃度ピークから不純物化学濃度ピークまで設けられていてよい。

【0008】

半導体装置は、バッファ領域の第1のドーピング濃度ピークと同一の深さ位置に配置された水素化学濃度ピークを備えてよい。半導体装置は、不純物化学濃度ピークと同一の深さ位置に配置された第2のドーピング濃度ピークを備えてよい。不純物化学濃度ピークは、水素の化学濃度ピークであってよい。それぞれの濃度ピークは、半導体基板の下面から上面に向かうにつれて濃度が増大する下側裾を有してよい。第2のドーピング濃度ピークの下側裾の傾きを、不純物化学濃度ピークの下側裾の傾きで規格化した値が、第1のドーピング濃度ピークの下側裾の傾きを、水素化学濃度ピークの下側裾の傾きで規格化した値よりも小さくてよい。

【0009】

高濃度領域は、半導体基板の深さ方向において、半導体基板の厚みの50%以上の長さを有してよい。

【0010】

高濃度領域は、半導体基板の深さ方向において、70 μm 以上の長さを有してよい。

【0011】

高濃度領域のドナー濃度は、バルク・ドナー濃度の2倍以上であってよい。

【0012】

高濃度領域のドナー濃度は、バルク・ドナー濃度の5倍以上であってよい。

【0013】

半導体装置の定格電圧を x (V) とした場合に、バルク・ドナー濃度 (atoms/cm^3) が、 $(9.20245 \times 10^{12})/x$ 以上、 $(4.60123 \times 10^{16})/x$ 以下であってよい。

【0014】

バルク・ドナー濃度 (atoms/cm^3) が、 $(9.20245 \times 10^{14})/x$ 以上、 $(1.84049 \times 10^{16})/x$ 以下であってよい。

【0015】

半導体基板の深さ方向の中央におけるドナー濃度 ($/\text{cm}^3$) が、 $(9.20245 \times 10^{15})/x$ 以上、 $(9.20245 \times 10^{16})/x$ 以下であってよい。

【0016】

本発明の第二の態様においては、半導体装置の製造方法を提供する。製造方法は、上面および下面を有し、バルク・ドナーを含む半導体基板の下面から、第2の位置に荷電粒子を注入し、且つ、第2の位置よりも下面側の領域において水素化学濃度分布が単一のピー

10

20

30

40

50

クを有するように、第1の位置に水素イオンを注入する第1注入段階を備えてよい。製造方法は、半導体基板をアニールして、第1の位置と第2の位置との間に、バルク・ドナー濃度よりもドナー濃度が高い高濃度領域を形成する第1アニール段階を備えてよい。

【0017】

製造方法は、第1アニール段階の後に、半導体基板の下面側を研削して、第1の位置を含む領域を除去する研削段階を備えてよい。

【0018】

製造方法は、研削段階の後に、半導体基板の下面から、第2の位置よりも下面側に、N型のドーパントを注入する第2注入段階を備えてよい。

【0019】

製造方法は、研削段階の後に、半導体基板の下面から、第2の位置よりも下面側に、水素イオンを注入する第2注入段階を備えてよい。

【0020】

なお、上記の発明の概要は、本発明の必要な特徴の全てを列挙したものではない。また、これらの特徴群のサブコンビネーションもまた、発明となりうる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】半導体装置100の一例を示す断面図である。

【図2】図1のA-A線に示した位置における、深さ方向の格子欠陥密度 D_V 、水素化学濃度 C_H 、ドーピング濃度 D_d および不純物化学濃度 C_I の各分布を示している。

【図3】比較例に係る格子欠陥密度 D_V 、水素化学濃度 C_H 、ドーピング濃度 D_d および不純物化学濃度 C_I の各分布を示している。

【図4】半導体装置100の製造方法の一例を示すフローチャートである。

【図5】半導体装置100の製造方法の他の例を示すフローチャートである。

【図6】図5の製造方法に係る半導体装置100を説明する図である。

【図7】図6のA-A線に示した位置における、深さ方向の格子欠陥密度 D_V 、水素化学濃度 C_H 、ドーピング濃度 D_d および不純物化学濃度 C_I の各分布を示している。

【図8】第1のドーピング濃度ピーク111の他の例を示す図である。

【図9A】水素化学濃度ピーク131と、第1のドーピング濃度ピーク111との関係を説明する図である。

【図9B】不純物化学濃度ピーク141と、第2のドーピング濃度ピーク121との関係を説明する図である。

【図9C】下側裾142の傾きを説明する図である。

【図10A】下側裾112の傾きの規格化の他の定義を説明する図である。

【図10B】下側裾122の傾きの規格化の他の定義を説明する図である。

【図11】式(12)で示される'と'との関係を、毎に示したグラフである。

【図12】バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。

【図13】'が範囲B(0.01以上、0.333以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。

【図14】'が範囲C(0.03以上、0.25以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。

【図15】'が範囲D(0.1以上、0.2以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。

【図16】'が範囲E(0.001以上、0.1以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。

【図17】'が範囲F(0.002以上、0.05以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。

【図18】'が範囲G(0.005以上、0.02以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。

【図19】'が範囲H(0.01±0.002)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre}

10

20

30

40

50

の好ましい範囲の一例を示す図である。

【図 2 0】半導体装置 1 0 0 の上面図の一例である。

【図 2 1】図 2 0 における領域 A の拡大図である。

【図 2 2 A】図 2 1 における b - b 断面の一例を示す図である。

【図 2 2 B】図 2 2 A の d - d 線におけるドーピング濃度 D_d の分布例を示す図である。

【図 2 3】図 2 1 における b - b 断面の他の例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 2 】

以下、発明の実施の形態を通じて本発明を説明するが、以下の実施形態は請求の範囲にかかる発明を限定するものではない。また、実施形態の中で説明されている特徴の組み合わせの全てが発明の解決手段に必須であるとは限らない。

10

【 0 0 2 3 】

本明細書においては半導体基板の深さ方向と平行な方向における一方の側を「上」、他方の側を「下」と称する。基板、層またはその他の部材の 2 つの主面のうち、一方の面を上面、他方の面を下面と称する。「上」、「下」の方向は、重力方向または半導体装置の実装時における方向に限定されない。

【 0 0 2 4 】

本明細書では、X 軸、Y 軸および Z 軸の直交座標軸を用いて技術的事項を説明する場合がある。直交座標軸は、構成要素の相対位置を特定するに過ぎず、特定の方向を限定するものではない。例えば、Z 軸は地面に対する高さ方向を限定して示すものではない。なお、+ Z 軸方向と - Z 軸方向とは互いに逆向きの方向である。正負を記載せず、Z 軸方向と記載した場合、+ Z 軸および - Z 軸に平行な方向を意味する。

20

【 0 0 2 5 】

本明細書では、半導体基板の上面および下面に平行な直交軸を X 軸および Y 軸とする。また、半導体基板の上面および下面と垂直な軸を Z 軸とする。本明細書では、Z 軸の方向を深さ方向と称する場合がある。また、本明細書では、X 軸および Y 軸を含めて、半導体基板の上面および下面に平行な方向を、水平方向と称する場合がある。

【 0 0 2 6 】

また、半導体基板の深さ方向における中心から、半導体基板の上面までの領域を、上面側と称する場合がある。同様に、半導体基板の深さ方向における中心から、半導体基板の下面までの領域を、下面側と称する場合がある。本明細書では、半導体基板の深さ方向における中心位置を Z_c と称する場合がある。

30

【 0 0 2 7 】

本明細書において「同一」または「等しい」のように称した場合、製造ばらつき等に起因する誤差を有する場合も含んでよい。当該誤差は、例えば 1 0 % 以内である。

【 0 0 2 8 】

本明細書においては、不純物がドーピングされたドーピング領域の導電型を P 型または N 型として説明している。本明細書においては、不純物とは、特に N 型のドナーまたは P 型のアクセプタのいずれかを意味する場合があり、ドープメントと記載する場合がある。本明細書においては、ドーピングとは、半導体基板にドナーまたはアクセプタを導入し、N 型の導電型を示す半導体または P 型の導電型を示す半導体とすることを意味する。

40

【 0 0 2 9 】

本明細書においては、ドーピング濃度とは、熱平衡状態におけるドナーの濃度またはアクセプタの濃度を意味する。本明細書においては、ネット・ドーピング濃度とは、ドナー濃度を正イオンの濃度とし、アクセプタ濃度を負イオンの濃度として、電荷の極性を含めて足し合わせた正味の濃度を意味する。一例として、ドナー濃度を N_D 、アクセプタ濃度を N_A とすると、任意の位置における正味のネット・ドーピング濃度は $N_D - N_A$ となる。本明細書では、ネット・ドーピング濃度を単にドーピング濃度と記載する場合がある。

【 0 0 3 0 】

ドナーは、半導体に電子を供給する機能を有している。アクセプタは、半導体から電子

50

を受け取る機能を有している。ドナーおよびアクセプタは、不純物自体には限定されない。例えば、半導体中に存在する空孔（V）、酸素（O）および水素（H）が結合したVOH欠陥は、電子を供給するドナーとして機能する。本明細書では、VOH欠陥を水素ドナーと称する場合がある。

【0031】

本明細書においてP+型またはN+型と記載した場合、P型またはN型よりもドーピング濃度が高いことを意味し、P-型またはN-型と記載した場合、P型またはN型よりもドーピング濃度が低いことを意味する。また、本明細書においてP++型またはN++型と記載した場合には、P+型またはN+型よりもドーピング濃度が高いことを意味する。本明細書の単位系は、特に断りがなければSI単位系である。長さの単位をcmで表示することがあるが、諸計算はメートル（m）に換算してから行ってよい。

10

【0032】

本明細書において化学濃度とは、電気的な活性化の状態によらずに測定される不純物の原子密度を指す。化学濃度（原子密度）は、例えば二次イオン質量分析法（SIMS）により計測できる。上述したネット・ドーピング濃度は、電圧-容量測定法（CV法）により測定できる。また、拡がり抵抗測定法（SR法）により計測されるキャリア濃度を、ネット・ドーピング濃度としてよい。CV法またはSR法により計測されるキャリア濃度は、熱平衡状態における値としてよい。また、N型の領域においては、ドナー濃度がアクセプタ濃度よりも十分大きいので、当該領域におけるキャリア濃度を、ドナー濃度としてもよい。同様に、P型の領域においては、当該領域におけるキャリア濃度を、アクセプタ濃度としてもよい。本明細書では、N型領域のドーピング濃度をドナー濃度と称する場合があり、P型領域のドーピング濃度をアクセプタ濃度と称する場合がある。

20

【0033】

また、ドナー、アクセプタまたはネット・ドーピングの濃度分布がピークを有する場合、当該ピーク値を当該領域におけるドナー、アクセプタまたはネット・ドーピングの濃度としてよい。ドナー、アクセプタまたはネット・ドーピングの濃度がほぼ均一な場合等においては、当該領域におけるドナー、アクセプタまたはネット・ドーピングの濃度の平均値をドナー、アクセプタまたはネット・ドーピングの濃度としてよい。本明細書において、単位体積当りの濃度表示に $at\ ms/cm^3$ 、または、 $/cm^3$ を用いる場合がある。この単位は、半導体基板内のドナーまたはアクセプタ濃度、または、化学濃度に用いられる。 $at\ ms$ 表記は省略してもよい。

30

【0034】

SR法により計測されるキャリア濃度が、ドナーまたはアクセプタの濃度より低くてもよい。拡がり抵抗を測定する際に電流が流れる範囲において、半導体基板のキャリア移動度が結晶状態の値よりも低い場合がある。キャリア移動度の低下は、格子欠陥等による結晶構造の乱れ（ディスオーダー）により、キャリアが散乱されることで生じる。

【0035】

CV法またはSR法により計測されるキャリア濃度から算出したドナーまたはアクセプタの濃度は、ドナーまたはアクセプタを示す元素の化学濃度よりも低くてもよい。一例として、シリコンの半導体においてドナーとなるリンまたはヒ素のドナー濃度、あるいはアクセプタとなるボロン（ホウ素）のアクセプタ濃度は、これらの化学濃度の99%程度である。一方、シリコンの半導体においてドナーとなる水素のドナー濃度は、水素の化学濃度の0.1%から10%程度である。本明細書における各濃度は、室温における値でよい。室温における値は、一例として300K（ケルビン）（約26.9）のときの値を用いてよい。

40

【0036】

イオンまたは電子等の荷電粒子を所定の加速エネルギーで半導体基板に注入した場合、これらの粒子は深さ方向において所定の分布を有する。本明細書では、当該分布のピーク位置を、当該粒子が注入された位置、または、注入された深さ等と称する場合がある。

【0037】

50

図1は、半導体装置100の一例を示す断面図である。半導体装置100は半導体基板10を備える。半導体基板10は、半導体材料で形成された基板である。一例として半導体基板10はシリコン基板である。

【0038】

半導体基板10には、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ(IGBT)等のトランジスタ素子、および、還流ダイオード(FWD)等のダイオード素子の少なくとも一方が形成されている。図1においては、トランジスタ素子およびダイオード素子の各電極、半導体基板10の内部に設けられた各領域を省略している。トランジスタ素子およびダイオード素子の構成例は後述する。

【0039】

本例の半導体基板10は、N型のバルク・ドナーが全体に分布している。バルク・ドナーは、半導体基板10の元となるインゴットの製造時に、インゴット内に略一様に含まれたドーパントによるドナーである。本例のバルク・ドナーは、水素以外の元素である。バルク・ドナーのドーパントは、例えばリン、アンチモン、ヒ素、セレンまたは硫黄であるが、これに限定されない。本例のバルク・ドナーは、リンである。バルク・ドナーは、P型の領域にも含まれている。半導体基板10は、半導体のインゴットから切り出したウエハであってよく、ウエハを個片化したチップであってよい。半導体のインゴットは、チョクラルスキー法(CZ法)、磁場印加型チョクラルスキー法(MCZ法)、フロートゾーン法(FZ法)のいずれかで製造されよい。本例におけるインゴットは、MCZ法で製造されている。MCZ法で製造された基板に含まれる酸素濃度は $1 \times 10^{17} \sim 7 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ である。FZ法で製造された基板に含まれる酸素濃度は $1 \times 10^{15} \sim 5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ である。酸素濃度が高い方が水素ドナーが生成しやすい傾向がある。バルク・ドナー濃度は、半導体基板10の全体に分布しているバルク・ドナーの化学濃度を用いてよく、当該化学濃度の90%から100%の間の値であってよい。また、半導体基板10は、リン等のドーパントを含まないノンドープ基板を用いてもよい。その場合、ノンドープ基板のバルク・ドナー濃度は例えば $1 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ 以上、 $5 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ 以下である。ノンドープ基板のバルク・ドナー濃度は、好ましくは $1 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ 以上である。ノンドープ基板のバルク・ドナー濃度は、好ましくは $5 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ 以下である。

【0040】

半導体基板10は、上面21および下面23を有する。上面21および下面23は、半導体基板10の2つの主面である。本明細書では、上面21および下面23と平行な面における直交軸をX軸およびY軸、上面21および下面23と垂直な軸をZ軸とする。

【0041】

半導体基板10には、下面23から第2の深さ位置Z2に荷電粒子が注入されている。荷電粒子は、例えば水素イオン、ヘリウムイオン、電子等である。本例の半導体基板10は、第2の深さ位置Z2に、水素またはヘリウム等の不純物化学濃度ピーク141を有する。なお第2の深さ位置Z2は、上面21よりも上側の位置であってよい。つまり、荷電粒子は、半導体基板10を貫通するように注入されてよい。

【0042】

深さ位置とは、半導体基板10の深さ方向(Z軸方向)における位置である。本明細書では、下面23から各位置までの距離を、各位置の深さ位置と称する場合がある。例えば、第2の深さ位置Z2は、下面23からの距離がZ2である。第2の深さ位置Z2は、半導体基板10の上面21側(即ち、上面21と、深さ方向の中央位置Zcとの間の領域)に配置されてよい。

【0043】

荷電粒子が半導体基板10の内部を通過する平均距離(飛程とも称される)は、荷電粒子を加速する加速エネルギーにより制御できる。本例においては、荷電粒子の平均飛程が距離Z2となるように、加速エネルギーが設定される。荷電粒子の平均飛程Z2は、半導体基板10の深さ方向の厚みの半分より大きくてよい。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 4 】

本明細書では、注入された荷電粒子が通過した領域を通過領域 1 0 6 と称する場合がある。図 1 の例では、半導体基板 1 0 の下面 2 3 から第 2 の深さ位置 Z 2 までが通過領域 1 0 6 である。図 1 の例では、半導体基板 1 0 の下面 2 3 の全体から荷電粒子を注入している。他の例では、下面 2 3 の一部の領域だけに荷電粒子を注入してよい。これにより、X Y 面において局所的に通過領域 1 0 6 を形成することもできる。

【 0 0 4 5 】

半導体基板 1 0 の下面 2 3 側（即ち、下面 2 3 と、深さ方向の中央位置 Z c との間の領域）には、N 型のバッファ領域 2 0 が設けられている。バッファ領域 2 0 と下面 2 3 との間には、下面領域 2 0 1 が設けられている。下面領域 2 0 1 は、後述する高濃度領域 1 5 0 よりもドーピング濃度の高い、N 型または P 型の領域である。下面領域 2 0 1 は、後述するカソード領域またはコレクタ領域であってよい。バッファ領域 2 0 は、半導体基板 1 0 の上面 2 1 側から広がる空乏層が、下面領域 2 0 1 に到達すること（パンチスルー）を抑制する。

10

【 0 0 4 6 】

バッファ領域 2 0 は、半導体基板 1 0 の深さ方向におけるドーピング濃度分布が、単一の第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 を有する。第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 は、第 1 の深さ位置 Z 1 に配置されている。第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 を設けることで、上述した空乏層が、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 を越えて下面 2 3 側まで広がることを抑制できる。バッファ領域 2 0 は、水素ドナーを含んでよい。

20

【 0 0 4 7 】

本例においては、下面 2 3 から第 1 の深さ位置 Z 1 に、プロトン等の水素イオンが注入されている。本例では、第 1 の深さ位置 Z 1 と、第 2 の深さ位置 Z 2 との間には、上述した水素イオンおよび荷電粒子以外には、不純物イオンが局所的に注入されていない。

【 0 0 4 8 】

半導体基板 1 0 において荷電粒子が通過した通過領域 1 0 6 には、荷電粒子が通過したことにより、単原子空孔（V）、複原子空孔（VV）等の、空孔を主体とする格子欠陥が形成されている。空孔に隣接する原子は、ダングリング・ボンドを有する。格子欠陥には格子間原子や転位等も含まれ、広義ではドナーやアクセプタも含まれ得るが、本明細書では空孔を主体とする格子欠陥を空孔型格子欠陥、空孔型欠陥、あるいは単に格子欠陥と称する場合がある。また、半導体基板 1 0 への荷電粒子注入により、格子欠陥が多く形成されることで、半導体基板 1 0 の結晶性が強く乱れることがある。本明細書では、この結晶性の乱れをディスオーダーと称する場合がある。

30

【 0 0 4 9 】

また、半導体基板 1 0 の全体には酸素が含まれる。当該酸素は、半導体のインゴットの製造時において、意図的にまたは意図せずに導入される。半導体基板 1 0 の内部では、水素（H）、空孔（V）および酸素（O）が結合し、VOH 欠陥が形成される。また、半導体基板 1 0 を熱処理することで第 1 の深さ位置 Z 1 に注入した水素が拡散し、VOH 欠陥の形成が促進される。第 2 の深さ位置 Z 2 に注入した荷電粒子が水素イオンの場合、第 2 の深さ位置 Z 2 から水素が拡散し、VOH 欠陥の形成が更に促進される。

40

【 0 0 5 0 】

VOH 欠陥は、電子を供給するドナーとして機能する。本明細書では、VOH 欠陥を単に水素ドナーと称する場合がある。本例では、荷電粒子の通過領域 1 0 6 に水素ドナーが形成される。水素ドナーのドーピング濃度は、水素の化学濃度よりも低い。水素の化学濃度に対する水素ドナーのドーピング濃度の割合を活性化率とすると、活性化率は 0 . 1 % ~ 3 0 % の値であってよい。本例では、活性化率は 1 % ~ 5 % である。

【 0 0 5 1 】

半導体基板 1 0 の通過領域 1 0 6 に水素ドナーを形成することで、通過領域 1 0 6 におけるドナー濃度を、バルク・ドナー濃度よりも高くできる。通常は、半導体基板 1 0 に形成すべき素子の特性、特に定格電圧または耐圧に対応させて、所定のバルク・ドナー濃度

50

を有する半導体基板 10 を準備しなければならない。これに対して、図 1 に示した半導体装置 100 によれば、荷電粒子および水素イオンのドーズ量を制御することで、半導体基板 10 のドナー濃度を調整できる。このため、素子の特性等に対応していないバルク・ドナー濃度の半導体基板 10 を用いて、半導体装置 100 を製造できる。半導体基板 10 の製造時におけるバルク・ドナー濃度のバラツキは比較的にか大いだが、荷電粒子および水素イオンのドーズ量は比較的にか高精度に制御できる。このため、荷電粒子を注入することで生じる格子欠陥の濃度も高精度に制御でき、また、格子欠陥と結合する水素濃度も高精度に制御できる。従って、通過領域 106 のドナー濃度を高精度に制御できる。

【0052】

また、第 1 の深さ位置 Z1 に注入した水素は、上面 21 に向かって、より遠い位置まで拡散することが好ましい。これにより、通過領域 106 の Z 軸方向における長さを大きくでき、半導体基板 10 の広い領域に渡ってドーピング濃度を調整しやすくなる。

10

【0053】

第 1 の深さ位置 Z1 と、第 2 の深さ位置 Z2 との間に、上述した水素イオンおよび荷電粒子以外の不純物が注入されると、当該注入位置の近傍には格子欠陥が多く形成される。格子欠陥が多く形成された領域では、水素イオンの拡散が抑制される。このため、第 1 の深さ位置 Z1 と、第 2 の深さ位置 Z2 との間に、高密度の格子欠陥を有する領域が存在すると、水素イオンの拡散が抑制されてしまう。

【0054】

一般にバッファ領域 20 は、電界集中を抑制しつつ、空乏層の広がりを抑制するために、複数のドーピング濃度ピークが設けられる。空乏層が下面領域 201 に到達することを防止するべく、複数のドーピング濃度ピークのうち、最も下面 23 側のドーピング濃度ピークが、最大濃度に設定される。しかし、バッファ領域 20 が複数のドーピング濃度ピークを有し、且つ、通過領域 106 に水素ドナーを形成しようとする、バッファ領域 20 の最大濃度ピークに注入された水素の拡散が、他のドーピング濃度ピークの位置に形成された格子欠陥により阻害されてしまう。このため、通過領域 106 の全体に水素が拡散しない場合があった。

20

【0055】

本例では、バッファ領域 20 が単一の第 1 のドーピング濃度ピーク 111 を有する。このため、少なくともバッファ領域 20 においては、水素の拡散が抑制されない。従って、第 1 の深さ位置 Z1 に注入された水素が、上面 21 に向かって拡散しやすくなる。

30

【0056】

図 2 は、図 1 の A - A 線に示した位置における、深さ方向の格子欠陥密度 D_V 、水素化学濃度 C_H 、ドーピング濃度 D_d および不純物化学濃度 C_I の各分布を示している。本例の不純物はヘリウムまたは水素である。図 2 の横軸は、下面 23 からの深さ位置を示しており、縦軸は、単位体積当たりの水素化学濃度、ドナー濃度および不純物化学濃度を対数軸で示している。図 2 の分布のうち、格子欠陥密度 D_V はアニール前の分布であり、他の濃度は水素イオンおよび荷電粒子（不純物）を注入してアニールした後の分布を示している。

【0057】

図 2 における水素化学濃度および不純物化学濃度は、例えば SIMS 法で計測される。図 2 におけるドーピング濃度は、例えば CV 法または SR 法で計測される、電気的に活性化したドーピング濃度である。

40

【0058】

本例の水素化学濃度 C_H は、第 1 の深さ位置 Z1 に水素化学濃度ピーク 131 を有する。水素化学濃度ピーク 131 は、第 1 の深さ位置 Z1 において極大値を示している。

【0059】

本例の不純物化学濃度 C_I は、第 2 の深さ位置 Z2 に不純物化学濃度ピーク 141 を有する。不純物化学濃度ピーク 141 は、第 2 の深さ位置 Z2 において極大値を示している。

【0060】

ドーピング濃度 D_d は、第 1 のドーピング濃度ピーク 111 と、第 2 のドーピング濃度

50

ピーク 1 2 1 を有する。また、ドーピング濃度 D_d は、下面領域 2 0 1 においてドーピング濃度ピークを有してよい。本例の下面領域 2 0 1 は、P 型のドーピング濃度ピークを有している。下面領域 2 0 1 には、ボロン（ホウ素）等の P 型ドーパントが注入されていてよい。他の例では、下面領域 2 0 1 は、N 型のドーピング濃度ピークを有してよい。この場合、下面領域 2 0 1 には、リン等の N 型ドーパントが注入されていてよい。

【 0 0 6 1 】

本例の第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 は、第 1 の深さ位置 Z_1 に水素イオンが注入されたことによる格子欠陥と、第 1 の深さ位置 Z_1 に注入された水素とが結合した水素ドナー（VOH 欠陥）の濃度ピークである。このため、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 は、第 1 の深さ位置 Z_1 において極大値を示している。

10

【 0 0 6 2 】

第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 は、第 2 の深さ位置 Z_2 に荷電粒子が注入されたことによる格子欠陥と、第 1 の深さ位置 Z_1 から拡散した水素が結合した水素ドナーの濃度ピークである。このため、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 は、第 2 の深さ位置 Z_2 において極大値を示している。

【 0 0 6 3 】

なお、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 が極大値を示す位置は、第 1 の深さ位置 Z_1 と厳密に一致していなくともよい。例えば、第 1 の深さ位置 Z_1 を基準とした第 1 の水素化学濃度ピーク 1 3 1 の半値全幅の範囲内に、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 が極大値を示す位置が含まれていれば、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 が実質的に第 1 の深さ位置 Z_1 に配置されているとしてよい。同様に、第 2 の深さ位置 Z_2 を基準とした不純物化学濃度ピーク 1 4 1 の半値全幅の範囲内に、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 が極大値を示す位置が含まれていれば、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 が実質的に第 2 の深さ位置 Z_2 に配置されているとしてよい。

20

【 0 0 6 4 】

また、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 が、下面領域 2 0 1 のドーピング濃度ピークと重なって、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 が判別しにくい場合には、水素化学濃度ピーク 1 3 1 の頂点の深さ位置 Z_1 におけるドーピング濃度を、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 としてもよい。

【 0 0 6 5 】

それぞれの濃度ピークは、頂点から下面 2 3 に向かって濃度が減少する下側裾と、頂点から上面 2 1 に向かって濃度が減少する上側裾とを有する。本例では、水素化学濃度ピーク 1 3 1 は下側裾 1 3 2 および上側裾 1 3 3 を有する。不純物化学濃度ピーク 1 4 1 は下側裾 1 4 2 および上側裾 1 4 3 を有する。第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 は下側裾 1 1 2 および上側裾 1 1 3 を有する。第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 は下側裾 1 2 2 および上側裾 1 2 3 を有する。

30

【 0 0 6 6 】

第 1 の深さ位置 Z_1 には、下面 2 3 から水素イオンが注入されるので、水素は第 1 の深さ位置 Z_1 と下面 2 3 との間にも比較的によく存在する。同様に、第 2 の深さ位置 Z_2 と下面 2 3 との間に、荷電粒子として注入された不純物が多く存在する。このため、各化学濃度分布における各濃度ピークにおいて、下側裾よりも上側裾のほうが、急峻に濃度が減少してよい。また、ドーピング濃度は、水素化学濃度または不純物化学濃度に依存するので、各ドーピング濃度ピークにおいても、下側裾よりも上側裾のほうが、急峻に濃度が減少してよい。

40

【 0 0 6 7 】

第 1 の深さ位置 Z_1 および第 2 の深さ位置 Z_2 の近傍には、水素イオンまたは荷電粒子が注入されたことにより、比較的によくの格子欠陥が形成される。このため、格子欠陥密度 D_v は、第 1 の深さ位置 Z_1 に第 1 の欠陥密度ピーク 2 1 1 を有し、第 2 の深さ位置 Z_2 に第 2 の欠陥密度ピーク 2 1 2 を有する。また、第 2 の深さ位置 Z_2 から下面 2 3 までの通過領域 1 0 6（図 1 参照）には、第 1 の深さ位置 Z_1 および第 2 の深さ位置 Z_2 の近

50

傍を除き、荷電粒子が通過したことにより生じる格子欠陥が、ほぼ様な密度で形成される。図2の格子欠陥密度 D_v の分布図において点線で示すように、格子欠陥密度 D_v は、ピーク212を超えない範囲で、ピーク212に向かってなだらかに増加してよい。このように格子欠陥密度 D_v がピーク212に向かって増加する場合も、荷電粒子が通過したことにより生じる格子欠陥が、ほぼ様な密度で形成されるとしてよい。

【0068】

第1の深さ位置 Z_1 に注入された水素は、アニール処理により上面21に向かって拡散する。本例では、バッファ領域20が単一の第1のドーピング濃度ピーク111を有する。このため、バッファ領域20には、第1の欠陥密度ピーク211以外の欠陥密度ピークが存在しない。従って、第1の深さ位置 Z_1 から第2の深さ位置 Z_2 まで水素が拡散しやすくなる。通過領域106において一定以上の濃度の水素が拡散した領域ではVOH欠陥（水素ドナー）が形成され、水素ドナーを含む高濃度領域150が形成される。高濃度領域150は、ドナー濃度が、バルク・ドナー濃度 D_b よりも高い領域である。高濃度領域150は、バッファ領域20と、半導体基板10の上面21との間に配置されている。

10

【0069】

高濃度領域150は、深さ方向においてほぼ様なドーピング濃度の領域であってよい。ドーピング濃度が深さ方向においてほぼ様とは、例えば、ドーピング濃度の最大値と最小値との差分がドーピング濃度の最大値の50%以内である領域が、深さ方向に連続している状態を指してよい。当該差分は、当該領域のドーピング濃度の最大値の30%以下であってよく、10%以下であってよい。

20

【0070】

あるいは、深さ方向の所定範囲におけるドーピング濃度分布の平均濃度に対して、ドーピング濃度分布の値が、当該ドーピング濃度分布の平均濃度の $\pm 50\%$ 以内であってよく、 $\pm 30\%$ 以内であってよく、 $\pm 10\%$ 以内であってよい。深さ方向の所定範囲 W は、一例として以下の通りでよい。つまり、第1の深さ位置 Z_1 から第2の深さ位置 Z_2 までの長さを Z_L として、 Z_1 と Z_2 との間の中心 Z_{1+2c} から、第1の深さ位置 Z_1 側および第2の深さ位置 Z_2 側にそれぞれ $0.25Z_L$ 離れた2点間の長さ $0.5Z_L$ の区間を当該範囲としてよい。高濃度領域150の長さに応じて、所定範囲の長さを $0.75Z_L$ としてもよく、 $0.3Z_L$ としてもよく、 $0.9Z_L$ としてもよい。バッファ領域20の上面21側の端部位置は、高濃度領域150においてほぼ様なドーピング濃度が、第1のドーピング濃度ピーク111に向かって、単調に増加し始める深さ位置であってよい。

30

【0071】

なお、ドーピング濃度 D_d の分布の測定結果には、ドーパントが注入されていない領域であっても、測定時の雑音等により微小なピークが含まれる場合がある。本例において、ドーピング濃度 D_d におけるピークとは、長さ $10\mu\text{m}$ 以内におけるドーピング濃度 D_d の最小値と最大値との比が、1.1倍以上であるものを指してよい。当該比は1.2倍以上であってよく、1.5倍以上であってよい。同様に、各化学濃度のピークも、当該比を有するものを指してよい。

【0072】

また、第1の深さ位置 Z_1 および第2の深さ位置 Z_2 の間には、第1のドーピング濃度ピーク111および第2のドーピング濃度ピーク121以外のドーピング濃度ピークが存在しないことが好ましい。また、第1の深さ位置 Z_1 および第2の深さ位置 Z_2 の間には、水素化学濃度ピーク131および不純物化学濃度ピーク141以外の化学濃度ピークが存在しないことが好ましい。また、第1の深さ位置 Z_1 および第2の深さ位置 Z_2 の間には、第1の欠陥密度ピーク211および第2の欠陥密度ピーク212以外の欠陥密度ピークが存在しないことが好ましい。これにより、第1の深さ位置 Z_1 から第2の深さ位置 Z_2 まで水素が拡散しやすくなる。

40

【0073】

水素が拡散しやすくなることで、高濃度領域150を深さ方向に長く形成しやすくなる。高濃度領域150は、第1のドーピング濃度ピーク111から、不純物化学濃度ピーク

50

141まで連続して設けられていてよい。高濃度領域150は、バッファ領域20の上端から、第2の深さ位置Z2まで連続して設けられていてよい。

【0074】

高濃度領域150の深さ方向における長さは、半導体基板10の深さ方向における厚みの50%以上であってよく、60%以上であってよく、70%以上であってよく、80%以上であってよい。また、高濃度領域150の深さ方向における長さは、70 μ m以上であってよく、80 μ m以上であってよく、90 μ m以上であってよく、100 μ m以上であってよい。本例では、第2の深さ位置Z2まで水素が拡散しやすいので、高濃度領域150が形成される範囲を、第2の深さ位置Z2で規定しやすくなる。

【0075】

高濃度領域150のドナー濃度の最小値は、半導体基板10のバルク・ドナー濃度 D_b より高い。つまり、高濃度領域150のドナー濃度（またはドーピング濃度）は、高濃度領域150の全体にわたって、バルク・ドナー濃度 D_b より高い。高濃度領域150のドナー濃度は、バルク・ドナー濃度と、水素ドナー濃度（VOH欠陥濃度）との和で定まる。水素ドナー濃度は、第2の深さ位置Z2に対する荷電粒子のドーズ量、および、第1の深さ位置Z1に対する水素イオンのドーズ量で精度よく制御できる。このため、バルク・ドナー濃度に比べて水素ドナー濃度を十分高くすることで、バルク・ドナー濃度がばらついた場合でも、高濃度領域150のドナー濃度のばらつきを低減できる。高濃度領域150のドナー濃度は、バルク・ドナー濃度 D_b の2倍以上であってよく、5倍以上であってよく、10倍以上であってよい。

【0076】

図3は、比較例に係る格子欠陥密度 D_v 、水素化学濃度 C_H 、ドーピング濃度 D_d および不純物化学濃度 C_I の各分布を示している。比較例の半導体装置は、バッファ領域20において、第1のドーピング濃度ピーク111よりも上面21側に、一つ以上のドーピング濃度ピーク117を有している。各ドーピング濃度ピーク117は、一例として水素イオンを注入して形成される。

【0077】

本例の水素化学濃度 C_H は、それぞれのドーピング濃度ピーク117と同一の深さ位置に、水素化学濃度ピーク137を有する。また、格子欠陥密度 D_v は、それぞれの水素化学濃度ピーク137と同一の深さ位置に、欠陥密度ピーク213を有する。つまり、バッファ領域20は、第1の深さ位置Z1よりも上面21側に、一つ以上の欠陥密度ピーク213を有する。

【0078】

図3の例では、水素化学濃度ピーク131は、他の水素化学濃度ピーク137よりも10倍以上高濃度である。このため、バッファ領域20から上面21側に拡散する水素のほとんどは、第1の深さ位置Z1に注入された水素である。しかし、第1の深さ位置Z1に注入された水素の拡散は、欠陥密度ピーク213により阻害されてしまう。例えば、水素が格子欠陥と結合し、または、格子欠陥が存在することで水素の移動が妨げられる。

【0079】

このため図3の例では、第2の深さ位置Z2まで水素が十分に拡散しない。この場合、第2の深さ位置Z2まで高濃度領域150が形成されずに、ドナー濃度が低い低濃度領域181が残存してしまう。低濃度領域181のドナー濃度は、バルク・ドナー濃度 D_b と同程度であってよい。また、低濃度領域181に格子欠陥が多く残存している場合には、低濃度領域181のキャリア濃度は、バルク・ドナー濃度 D_b より低い場合もある。低濃度領域181には、水素ドナーがほとんど形成されないため、低濃度領域181のドナー濃度は、バルク・ドナー濃度の影響が大きくなる。このため、低濃度領域181のドナー濃度は、比較的ばらつきが大きくなってしまふ。また、ドーピング濃度分布に谷状の部分が出来てしまうので、半導体装置100の特性に影響を与える場合がある。これに対して図2に示した半導体装置100によれば、高濃度領域150を広く形成できるので、ドーピング濃度のばらつきを抑制でき、また、半導体装置100の特性を精度よく調整でき

10

20

30

40

50

る。

【0080】

なお、バッファ領域20において、最も上面21に近い水素化学濃度ピーク137を高濃度にすることも考えられる。これにより上面21に近い位置まで水素を拡散しやすくなる。ただし、上面21に近い水素化学濃度ピーク137を高濃度にすると、エミッタ・コレクタ間電圧が比較的の高い状態で、空乏層が高濃度のドーピング濃度ピークに到達することになり、アバランシェ耐量が低下する場合がある。図2に示した例によれば、高濃度の第1のドーピング濃度ピーク111を下面23の近傍に配置してアバランシェ耐量の低下を抑制しつつ、高濃度領域150を上面21の近傍まで形成できる。第1の深さ位置Z1と下面23との距離は、5 μ m以下であってよく、3 μ m以下であってよい。

10

【0081】

図4は、半導体装置100の製造方法の一例を示すフローチャートである。まず、上面側構造形成段階S400において、半導体基板10の上面21側の構造を形成する。上面21側の構造とは、後述するゲートトレンチ、ダミートレンチ、エミッタ領域、ベース領域、蓄積領域、層間絶縁膜、エミッタ電極およびゲート配線の少なくとも一部を含む。上面側構造形成段階S400では、これらの全ての構造を形成してもよい。

【0082】

次に研削段階S402において、半導体基板10の下面23側を研削して、半導体基板10の厚みを調整する。研削段階S402においては、半導体装置100が有するべき耐圧に応じて、半導体基板10の厚みを調整してよい。

20

【0083】

次に下面領域形成段階S404において、半導体基板10の下面23と接する領域に下面領域201を形成する。下面領域形成段階S404では、N型ドーパントまたはP型ドーパントを下面23から注入し、下面23の近傍をレーザー等により局所アニールすることで、下面領域201を形成してよい。

【0084】

次に、第1注入段階S406において、荷電粒子および水素イオンを半導体基板10に注入する。第1注入段階S406は、荷電粒子注入段階S408および水素注入段階S410を有する。荷電粒子注入段階S408において、半導体基板10の下面23から、第2の深さ位置Z2に荷電粒子を注入する。荷電粒子は水素イオン、ヘリウムイオン、または電子線であってよい。また、水素注入段階S410において、半導体基板10の下面23から、第1の深さ位置Z1に水素イオンを注入する。水素注入段階S410においては、第2の深さ位置Z2よりも下面23側の領域において、水素化学濃度分布が単一のピークを有するように、第1の深さ位置Z1に水素イオンを注入する。なお、第2の深さ位置Z2に水素イオンを注入する場合、第2の深さ位置Z2には水素化学濃度のピークが存在してよい。荷電粒子注入段階S408および水素注入段階S410は、いずれを先に行ってもよい。

30

【0085】

次に、アニール段階S412において、半導体基板10をアニールする。アニール段階S412においては、半導体基板10をアニール炉に投入し、半導体基板10の全体をアニールする。アニール段階S412により、第1の深さ位置Z1と第2の深さ位置Z2の間に、高濃度領域150を形成する。アニール段階S412は、第1の深さ位置Z1に注入した水素が、第2の深さ位置Z2まで拡散できる条件で行うことが好ましい。例えばアニール段階S412のアニール温度は、350以上、400以下である。アニール温度は、360以上であってよく、380以下であってよい。アニール段階S412におけるアニール時間は、30分以上であってよく、1時間以上であってよく、3時間以上であってよい。アニール時間は10時間以下であってよく、7時間以下であってよい。

40

【0086】

次に、下面側電極形成段階S414において、半導体基板10の下面23に金属電極を

50

形成する。当該金属電極は、後述するコレクタ電極であってよい。また、アニール段階 S 4 1 2 と下面側電極形成段階 S 4 1 4 との間に、半導体基板 1 0 にヘリウム等の不純物を注入することで、格子欠陥を局所的に形成して、キャリアのライフタイムを調整してもよい。

【 0 0 8 7 】

図 5 は、半導体装置 1 0 0 の製造方法の他の例を示すフローチャートである。本例の製造方法は、図 4 に示した例に対して、研削段階 S 5 0 0、第 2 注入段階 S 5 0 2 および第 2 アニール段階 S 5 0 4 を更に備える点で相違する。他の工程は、図 4 に示した例と同様であってよい。ただし本例では、第 1 注入段階 S 4 0 6 の前に、下面領域形成段階 S 4 0 4 を行わない。

10

【 0 0 8 8 】

本例では、第 1 アニール段階 S 4 1 2 の後に、研削段階 S 5 0 0 において、半導体基板 1 0 の下面 2 3 側を研削する。研削段階 S 5 0 0 では、第 1 の深さ位置 Z 1 を含む領域を半導体基板 1 0 から除去するように、下面 2 3 を研削する。研削段階 S 5 0 0 では、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 の上側裾 1 1 3 の一部が半導体基板 1 0 に残存するように研削してよく、上側裾 1 1 3 が半導体基板 1 0 に残存しないように研削してもよい。研削段階 S 5 0 0 では、高濃度領域 1 5 0 が下面 2 3 に露出するように半導体基板 1 0 を研削してよい。

【 0 0 8 9 】

本例では、研削段階 S 4 0 2 および研削段階 S 5 0 0 により研削された半導体基板 1 0 の厚みが、所定の耐圧に応じた厚みになっている。研削段階 S 4 0 2 と研削段階 S 5 0 0 における研削量は任意に設定してよい。研削段階 S 4 0 2 は省略してもよい。次に、下面領域形成段階 S 4 0 4 において、下面領域 2 0 1 を形成する。

20

【 0 0 9 0 】

次に、第 2 注入段階 S 5 0 2 において、第 3 の深さ位置 Z 3 に N 型ドーパントを注入する。第 3 の深さ位置 Z 3 は、パuffers領域 2 0 を形成すべき位置である。N 型ドーパントは、水素であってよく、リン等の水素以外のドーパントであってもよい。

【 0 0 9 1 】

次に、第 2 アニール段階 S 5 0 4 において、半導体基板 1 0 をアニールする。第 2 アニール段階 S 5 0 4 では、第 3 の深さ位置 Z 3 に注入した N 型ドーパントを活性化してドナー化させる。これによりパuffers領域 2 0 を形成できる。第 2 アニール段階 S 5 0 4 では、半導体基板 1 0 の全体をアニールしてよく、局所的にアニールしてもよい。次に、下面側電極形成段階 S 4 1 4 において、半導体基板 1 0 の下面 2 3 に金属電極を形成する。

30

【 0 0 9 2 】

図 6 は、図 5 の製造方法に係る半導体装置 1 0 0 を説明する図である。研削段階 S 5 0 0 によって研削される前の半導体基板 1 0 の下面を下面 2 3 - 2 とし、研削後の下面を下面 2 3 - 1 とする。

【 0 0 9 3 】

第 1 注入段階 S 4 0 6 において、下面 2 3 - 2 から第 1 の深さ位置 Z 1 に水素イオンを注入し、下面 2 3 - 2 から第 2 の深さ位置 Z 2 に荷電粒子を注入する。また、第 1 アニール段階 S 4 1 2 により、第 1 の深さ位置 Z 1 に注入した水素を拡散させる。

40

【 0 0 9 4 】

次に研削段階 S 5 0 0 により、下面 2 3 - 2 を研削して、第 1 の深さ位置 Z 1 を含む領域を除去する。次に、下面領域形成段階 S 4 0 4 において、下面 2 3 - 1 と接する領域に下面領域 2 0 1 を形成する。

【 0 0 9 5 】

次に、第 2 注入段階 S 5 0 2 により、第 3 の深さ位置 Z 3 に N 型ドーパントを注入する。次に、第 2 アニール段階 S 5 0 4 で半導体基板 1 0 をアニールして、第 3 の深さ位置 Z 3 に注入した N 型ドーパントを活性化させ、パuffers領域 2 0 を形成する。

【 0 0 9 6 】

50

図7は、図6のA-A線に示した位置における、深さ方向の格子欠陥密度 D_V 、水素化学濃度 C_H 、ドーピング濃度 D_d および不純物化学濃度 C_I の各分布を示している。本例の不純物はヘリウムまたは水素である。図7の分布のうち、格子欠陥密度 D_V は、第1の深さ位置 Z_1 、第2の深さ位置 Z_2 、第3の深さ位置 Z_3 に水素イオン等を注入した際に形成される格子欠陥密度を示している。つまり、格子欠陥密度 D_V は、下面領域201を形成する際に形成される格子欠陥は省略している。図2の例と同様に、格子欠陥密度 D_V は、ピーク212を超えない範囲で、ピーク212に向かってなだらかに増加してよい。図7において、格子欠陥密度 D_V が増加している態様を点線で示す。このように格子欠陥密度 D_V がピーク212に向かって増加する場合も、荷電粒子が通過したことにより生じる格子欠陥が、ほぼ一樣な密度で形成されるとしてよい。また、アニールによって水素ドナー化した格子欠陥も含めた密度を示している。格子欠陥密度以外の他の濃度は、第2アニール段階S504を行った後の分布を示している。

10

【0097】

第1の深さ位置 Z_1 には、第2の深さ位置 Z_2 まで水素を拡散させるべく、高濃度の水素を注入する。このため、第1の深さ位置 Z_1 には、バッファ領域20が有すべき濃度の水素ドナーよりも高濃度の水素ドナーが形成されてしまう場合がある。

【0098】

本例では、第1の深さ位置 Z_1 に注入した水素を拡散させた後に、研削段階S500により第1の深さ位置 Z_1 を含む領域を研削する。そして、第3の深さ位置 Z_3 に、バッファ領域20が有すべき濃度のN型ドーパントを注入する。これにより、高濃度領域150を広い範囲に形成しつつ、適切な濃度のバッファ領域20を形成しやすくなる。なお、第3の深さ位置 Z_3 には、N型ドーパントの注入により欠陥密度ピーク214が形成される。しかし、欠陥密度ピーク214の形成は、第1アニール段階S412よりも後なので、第1の深さ位置 Z_1 に注入された水素の拡散を妨げない。

20

【0099】

本例においては、第1の深さ位置 Z_1 における水素化学濃度ピーク131は除去される。ただし、下面23から第2の深さ位置 Z_2 に向かって水素化学濃度 C_H は徐々に減少している。

【0100】

図7の例では、第3の深さ位置 Z_3 に水素以外のN型ドーパントを注入した。つまり、第1のドーピング濃度ピーク111は、水素ドナー以外のN型ドーパントの濃度ピークである。他の例では、第3の深さ位置 Z_3 に水素を注入してもよい。この場合、第1のドーピング濃度ピーク111は、水素ドナーの濃度ピークである。また、水素化学濃度 C_H は、第1の深さ位置 Z_1 に化学濃度ピーク(不図示)を有する。

30

【0101】

図8は、第1のドーピング濃度ピーク111の他の例を示す図である。本例の第1のドーピング濃度ピーク111は、図1から図7において説明した各例に適用してよい。本例の第1のドーピング濃度ピーク111は、水素ドナーと、水素ドナー以外のN型ドーパントの両方を含む濃度ピークである。一例としてN型ドーパントはリンである。他の例では、N型ドーパントはセレンまたは砒素である。

40

【0102】

本例では、下面23から第1の深さ位置 Z_1 にリンを注入して第1のドーピング濃度ピーク111を形成する。図8では、リン化学濃度 C_P を破線で示している。リン化学濃度 C_P は、第1の深さ位置 Z_1 に化学濃度ピーク119を有する。また、リンが活性化してドナー化した濃度であるドーピング濃度 D_P を一点鎖線で示している。ドーピング濃度 D_P は、リン化学濃度 C_P にリンの活性化率を乗じた濃度である。リンの活性化率は、1としてもよい。この場合、ドーピング濃度 D_P として、リン化学濃度 C_P を用いてよい。

【0103】

第1のドーピング濃度ピーク111のドーピング濃度 D_1 は、リン化学濃度 C_P に応じたドーピング濃度 D_P と、水素ドナーの濃度 D_H と、バルク・ドナー濃度 D_b の和とほぼ等

50

しい。半導体基板 10 には、第 1 の深さ位置 Z 1 に水素が注入されていてよい。この場合、水素化学濃度 C_H は、第 1 の深さ位置 Z 1 にピークを有する。他の例では、水素化学濃度 C_H は、第 1 の深さ位置 Z 1 にピークを有さなくてもよい。例えば第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 は、図 7 に示したように研削された領域に注入された水素が拡散して形成された水素ドナーを含んでいてもよい。

【 0 1 0 4 】

また、リン等の N 型ドーパントの注入は、水素イオンの注入の後に行ってもよい。この場合、N 型ドーパントを注入した後、第 1 の深さ位置 Z 1 の近傍をレーザー等により局所的にアニールすることが好ましい。これにより、半導体基板 10 に含まれる水素ドナーの減少を抑制できる。

10

【 0 1 0 5 】

図 9 A は、水素化学濃度ピーク 1 3 1 と、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 との関係を説明する図である。本例では、水素化学濃度ピーク 1 3 1 の下側裾 1 3 2 の傾き 1 3 4 を用いて、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 の下側裾 1 1 2 の傾き 1 1 4 を規格化する。規格化は、一例として傾き 1 3 4 で傾き 1 1 4 を除算する処理である。

【 0 1 0 6 】

下側裾の傾きは、濃度が極大値を示す位置と、濃度が極大値に対して予め定められた比率となる位置との傾きであってよい。予め定められた比率は、80% であってよく、50% であってよく、10% であってよく、1% であってよく、他の比率を用いてもよい。また、水素化学濃度ピーク 1 3 1 および第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 においては、第 1 の深さ位置 Z 1 と、半導体基板 10 の下面 2 3 との間の濃度分布の傾きを用いてもよい。

20

【 0 1 0 7 】

図 9 A に示す例では、水素化学濃度ピーク 1 3 1 の傾き 1 3 4 は、 $(H1 - aH1) / (Z1 - Z4)$ で与えられ、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 の傾き 1 1 4 は $(D1 - aD1) / (Z1 - Z5)$ で与えられる。H1 は第 1 の深さ位置 Z 1 における水素化学濃度であり、D1 は第 1 の深さ位置 Z 1 におけるドーピング濃度であり、a は予め定められた比率であり、Z4 は水素化学濃度ピーク 1 3 1 の下側裾 1 3 2 において水素濃度が aH1 となる深さであり、Z5 は第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 の下側裾 1 1 2 においてドーピング濃度が aD1 となる深さである。例えば、傾き 1 3 4 で傾き 1 1 4 を規格化すると、 $(D1 - aD1) / (Z1 - Z5) \cdot (Z1 - Z4) / (H1 - aH1)$ となる。傾き 1 3 4 で傾き 1 1 4 を規格化した傾きを とする。

30

【 0 1 0 8 】

図 9 B は、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 と、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 との関係を説明する図である。本例では、第 2 の深さ位置 Z 2 に、荷電粒子として水素イオンを注入している。本例では、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 の下側裾 1 4 2 の傾き 1 4 4 を用いて、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の下側裾の傾き 1 2 4 を規格化する。

【 0 1 0 9 】

図 9 B に示す例では、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 の傾き 1 4 4 は $(H2 - aH2) / (Z2 - Z6)$ で与えられ、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の傾き 1 2 4 は $(D2 - aD2) / (Z2 - Z7)$ で与えられる。H2 は第 2 の深さ位置 Z 2 における水素化学濃度であり、D2 は第 2 の深さ位置 Z 2 におけるドーピング濃度であり、a は予め定められた比率であり、Z6 は不純物化学濃度ピーク 1 4 1 の下側裾 1 4 2 において水素化学濃度が aH2 となる深さであり、Z7 は第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の下側裾 1 2 2 においてドーピング濃度が aD2 となる深さである。第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の傾きを規格化するのに用いる比率 a は、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 の傾きを規格化するのに用いる比率 a と同一であってよく、異なってもよい。例えば、傾き 1 4 4 で傾き 1 2 4 を規格化すると、 $(D2 - aD2) / (Z2 - Z7) \cdot (Z2 - Z6) / (H2 - aH2)$ となる。傾き 1 4 4 で傾き 1 2 4 を規格化した傾きを とする。

40

【 0 1 1 0 】

第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の下側裾 1 2 2 の規格化された傾き は、第 1 のド

50

ーピング濃度ピーク 1 1 1 の下側裾 1 1 2 の規格化された傾き よりも小さい。つまり、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 のほうが、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 に比べて、水素化学濃度のピークに対してなだらかなピークになっている。このような第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 が形成されるように水素イオンを注入することで、平坦な濃度分布を有する高濃度領域 1 5 0 を形成できる。また、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 をなだらかな形状にすることで、高濃度領域 1 5 0 の先端におけるドーピング濃度の変化を緩やかにすることもできる。第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の下側裾 1 2 2 の規格化された傾き は、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 の下側裾の規格化された傾き の 1 倍以下であってよく、0 . 1 倍以下であってよく、0 . 0 1 倍以下であってよい。

【 0 1 1 1 】

また、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 の下側裾 1 4 2 の傾き 1 4 4 は、上側裾 1 4 3 の傾き 1 4 5 よりも小さくてよい。下面 2 3 から深い位置に注入した水素の化学濃度分布は、下面 2 3 側にゆるやかな裾を引く場合があるので、下側裾 1 4 2 の傾き 1 4 4 と、上側裾 1 4 3 の傾き 1 4 5 とを比較することで、第 2 の深さ位置 Z 2 に注入された水素が、下面 2 3 側から注入されたか否かを判別できる場合がある。傾き 1 4 5 は $(H_2 - a H_2) / (Z_8 - Z_2)$ で与えられる。傾き 1 2 5 は $(D_2 - a D_2) / (Z_9 - Z_2)$ で与えられる。Z 8 は、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 の上側裾 1 4 3 において水素化学濃度が $a H_2$ となる深さであり、Z 9 は第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の上側裾 1 2 3 においてドーピング濃度が $a D_2$ となる深さである。なお、図 9 B においては、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の下側裾 1 2 2 の傾き 1 2 4 が、上側裾 1 2 3 の傾き 1 2 5 より大きい
が、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 と同様に、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の下側裾 1 2 2 の傾き 1 2 4 は、上側裾 1 2 3 の傾き 1 2 5 より小さくてもよい。

【 0 1 1 2 】

図 9 C は、下側裾 1 4 2 の傾きを説明する図である。下側裾 1 4 2 の傾きは、以下のように考えてもよい。図 9 C に記載しているように、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 において、ピーク濃度 H_2 の 1 0 % ($0 . 1 \times H_2$) の濃度となる 2 つの位置 Z 1 0、Z 1 1 の間の幅 (1 0 % 全幅) を、 $FW 1 0 \% M$ とする。2 つの位置 Z 1 0、Z 1 1 は、第 2 の深さ位置 Z 2 を挟んで、水素化学濃度が $0 . 1 \times H_2$ となる点のうち、第 2 の深さ位置 Z 2 に最も近い 2 つの位置である。2 つの位置 Z 1 0、Z 1 1 のうち水素化学濃度ピーク 1 3 1 側の位置を Z 1 0 とする。位置 Z 1 0 におけるドーピング濃度の傾きはほぼ平坦である。
位置 Z 1 0 における水素化学濃度の傾きは、位置 Z 1 0 におけるドーピング濃度の傾きの 1 0 0 倍を超える。例えば、位置 Z 1 0 における水素化学濃度の傾きは、位置 Z 1 0 におけるドーピング濃度の傾きの 1 0 0 倍以上であってよく、1 0 0 0 倍以上であってよい。

【 0 1 1 3 】

図 1 0 A は、下側裾 1 1 2 の傾きの規格化の他の定義を説明する図である。下側裾 1 1 2 の傾きの規格化においては、例えば、以下の指標 を導入する。図 9 A の例では位置 Z 4 と位置 Z 5 とが異なっていたが、本例では位置 Z 4 と位置 Z 5 を同じ位置とする ($Z 4 = Z 5$)。位置 Z 4 は、ここでは予め定められた位置である。位置 Z 4 は、水素化学濃度 C_H およびドーピング濃度 D_d が、第 1 の深さ位置 Z 1 よりも下面 2 3 側にて下側裾 1 3 2、1 1 2 となっている位置であればよい。位置 Z 4 における水素化学濃度を $a \times H_1$ 、
ドーピング濃度を $b \times D_1$ とする。a は第 1 の深さ位置 Z 1 の水素化学濃度ピーク 1 3 1 の濃度 H_1 に対する、位置 Z 4 における水素化学濃度の比率である。b は第 1 の深さ位置 Z 1 の第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 の濃度 D_1 に対する、位置 Z 4 のドーピング濃度の比率である。ここで、区間 Z 4 ~ Z 1 における水素化学濃度およびドーピング濃度のそれぞれ傾きの比と、当該傾きの比を規格化した傾き比 を導入する。区間 Z 4 ~ Z 1 における水素化学濃度の傾きの比を、 $(H_1 / a H_1) / (Z_1 - Z_4)$ と定義する。同じく、区間 Z 4 ~ Z 1 におけるドナー濃度の傾きの比を、 $(D_1 / b D_1) / (Z_1 - Z_4)$ と定義する。そして、区間 Z 4 ~ Z 1 における水素化学濃度の傾きの比で、ドーピング濃度の傾きの比を規格化した傾き比 を、 $\{ (D_1 / b D_1) / (Z_1 - Z_4) \} / \{ (H_1 / a H_1) / (Z_1 - Z_4) \}$ と定義する。規格化した傾き比 は、前式を計算する

ことにより、簡単な比 a / b となる。

【 0 1 1 4 】

図 1 0 B は、下側裾 1 2 2 の傾きの規格化の他の定義を説明する図である。下側裾 1 2 2 の傾きの規格化においては、例えば、指標 と同様の指標 を導入する。図 9 B の例では位置 Z 6 と位置 Z 7 とが異なっていたが、本例では位置 Z 6 と位置 Z 7 を同じ位置とする ($Z 6 = Z 7$)。位置 Z 6 は、ここでは予め定められた位置である。位置 Z 6 は、水素化学濃度およびドーピング濃度が、第 2 の深さ位置 Z 2 よりも下面 2 3 側にて下側裾 1 4 2、1 2 2 となっている位置であればよい。位置 Z 6 における水素化学濃度を $c \times H 2$ 、ドーピング濃度を $d \times D 2$ とする。c は第 2 の深さ位置 Z 2 の水素化学濃度 H 2 に対する、位置 Z 6 における水素化学濃度の比率である。d は第 2 の深さ位置 Z 2 の第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の濃度 D 2 に対する、位置 Z 6 のドーピング濃度の比率である。ここで、区間 Z 6 ~ Z 2 における水素化学濃度およびドーピング濃度のそれぞれ傾きの比と、当該傾きの比を規格化した傾き比 を導入する。区間 Z 6 ~ Z 2 における水素化学濃度の傾きの比を、 $(H 2 / c H 2) / (Z 2 - Z 6)$ と定義する。同じく、区間 Z 6 ~ Z 2 におけるドーピング濃度の傾きの比を、 $(D 2 / d D 2) / (Z 2 - Z 6)$ と定義する。そして、区間 Z 6 ~ Z 2 における水素化学濃度の傾きの比で、ドーピング濃度の傾きの比を規格化した傾き比 を、 $\{(D 2 / d D 2) / (Z 2 - Z 6)\} / \{(H 2 / c H 2) / (Z 2 - Z 6)\}$ と定義する。規格化した傾き比 は、前式を計算することにより、簡単な比 (c / d) となる。

10

【 0 1 1 5 】

水素化学濃度ピーク 1 3 1 と第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 については、水素化学濃度分布とドーピング濃度分布は相似形になることが多い。ここで相似形になるとは、例えば横軸を深さ、縦軸を濃度の常用対数としたときに、ドーピング濃度分布は水素化学濃度分布を反映した分布を示すことを意味する。すなわち、所定の区間 Z 4 ~ Z 1 において、水素イオンをイオン注入し、さらにアニールを行うことにより、ドーピング濃度分布は水素化学濃度分布を反映した分布となる。一例として、水素化学濃度ピーク 1 3 1 の H 1 が $1 \times 10^{17} \text{ a t m s } / \text{ c m }^3$ で、位置 Z 4 の水素化学濃度 a H 1 が $2 \times 10^{16} \text{ a t m s } / \text{ c m }^3$ とすると、a は 0 . 2 となる。一方、第 1 のドーピング濃度ピーク 1 1 1 の D 1 が $1 \times 10^{16} / \text{ c m }^3$ で、位置 Z 4 のドーピング濃度 b D 1 が $2 \times 10^{15} / \text{ c m }^3$ とすると、b は 0 . 2 となる。したがって、規格化した傾き比 は、 a / b であるので、1 となる。すなわち、下面 2 3 に近い第 1 の深さ位置 Z 1 においては、水素化学濃度分布の傾きの比 a とドーピング濃度分布の傾きの比 b はほぼ同じ値となり、相似形であると言える。

20

30

【 0 1 1 6 】

一方、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 と第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 については、水素化学濃度分布とドーピング濃度分布は相似形にならなくてもよい。すなわち、所定の区間 Z 6 ~ Z 2 において、ドーピング濃度分布は水素化学濃度分布を反映しなくてもよい。一例として、不純物化学濃度ピーク 1 4 1 の水素化学濃度 H 2 が $1 \times 10^{16} \text{ a t m s } / \text{ c m }^3$ で、位置 Z 6 の水素化学濃度 c H 2 が $1 \times 10^{15} \text{ a t m s } / \text{ c m }^3$ とすると、c は 0 . 1 となる。一方、第 2 のドーピング濃度ピーク 1 2 1 の濃度 D 2 が $3 \times 10^{14} / \text{ c m }^3$ で、位置 Z 6 のドーピング濃度 d D 2 が $1 . 5 \times 10^{14} / \text{ c m }^3$ とすると、d は 0 . 5 となる。したがって、規格化した傾き比 は、 c / d であるので、0 . 2 となる。すなわち、下面 2 3 から十分深い第 2 の深さ位置 Z 2 においては、水素化学濃度分布の傾きの比 c はドーピング濃度分布の傾きの比 d よりも 0 . 2 倍小さい値となり、相似とは離れた形を示すと言える。

40

【 0 1 1 7 】

規格化した傾き比 と を比較すると、水素化学濃度分布のピーク位置が下面 2 3 に近い場合には 1 に近くなり、水素化学濃度分布のピーク位置が下面 2 3 から十分深い場合には 1 よりも十分高い値になってよい。すなわち、規格化した傾き比 は、規格化した傾き比 よりも大きくてよい。さらに、傾き比 は、1 . 1 以上であってよく、1 . 5

50

以上であってよく、2以上であってよい。あるいは、10以上であってよく、100以上であってよい。

【0118】

なお、水素化学濃度ピーク131および不純物化学濃度ピーク141の実際の位置と、第1のドーピング濃度ピーク111および第2のドーピング濃度ピーク121の実際の位置が、異なる場合もある。このように化学濃度ピークの位置とドーピング濃度ピークの位置が一致しない場合は、化学濃度ピークの位置を第1の深さ位置Z1または第2の深さ位置Z2とし、ドーピング濃度については第1の深さ位置Z1または第2の深さ位置Z2における濃度を便宜的にピークの位置としてもよい。これにより、上記の定義による計算は可能となる。

10

【0119】

図11から図19は、バルク・ドナー濃度、および、高濃度領域150のドナー濃度の好ましい範囲を決定する方法の一例を説明する図である。本例では、バルク・ドナー濃度がばらついた場合でも、高濃度領域150における最終的なドナー濃度(ドーピング濃度)が比較的安定した濃度となるように、バルク・ドナー濃度およびドナー濃度を設定する。

【0120】

本例では、バルク・ドナー濃度の仕様値を N_{B0} とし、実際のバルク・ドナー濃度を N_{Bre} とする。バルク・ドナー濃度の仕様値とは、半導体ウエハの製造者が規定する仕様値である。仕様値に幅がある場合、仕様値の中央値を用いてよい。バルク・ドナー濃度は、リン等のバルク・ドナーの濃度で定まる比抵抗 に対して、 $N = 1 / q\mu$ で与えられる。qは電気素量であり、 μ は半導体基板10中における電子の移動度である。

20

【0121】

水素ドナー(VOH欠陥)の濃度を N_H とする。水素ドナー濃度 N_H のばらつきは、バルク・ドナー濃度のばらつきに比べて無視できる程度に小さい。本例では水素ドナー濃度 N_H のばらつきを0とする。

【0122】

最終的なドナー濃度の目標値を N_{F0} とする。また、実際に得られた最終的なドナー濃度を N_{Fre} とする。上述した濃度は、全て単位体積当たりの濃度(/ cm^3)である。

【0123】

最終的なドナー濃度の目標値 N_{F0} は、バルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} に、水素ドナー濃度 N_H を加算したものであるので、下式で与えられる。

$$N_{F0} = N_H + N_{B0} \quad \dots \text{式(1)}$$

一方、実際のドナー濃度 N_{Fre} は、実際のバルク・ドナー濃度 N_{Bre} に、水素ドナー濃度 N_H を加算したものであるので、下式で与えられる。

$$N_{Fre} = N_H + N_{Bre} \quad \dots \text{式(2)}$$

【0124】

パラメータ を、下式で定義する。

$$= N_{Bre} / N_{B0} \quad \dots \text{式(3)}$$

パラメータ は、実際のバルク・ドナー濃度 N_{Bre} と仕様値 N_{B0} との比であり、1から離れるほど実際のバルク・ドナー濃度 N_{Bre} が仕様値 N_{B0} からずれていることを示す。

40

【0125】

パラメータ を、下式で定義する。

$$= N_{Fre} / N_{F0} \quad \dots \text{式(4)}$$

パラメータ は、実際のドナー濃度 N_{Fre} と目標値 N_{F0} との比であり、1から離れるほど実際のドナー濃度 N_{Fre} が目標値 N_{F0} からずれていることを示す。つまり、 が十分に1に近ければ、実際のバルク・ドナー濃度 N_{Bre} が仕様値 N_{B0} に対して 倍ずれた場合でも、 にほとんど依らずに、実際のドナー濃度 N_{Fre} が目標値 N_{F0} とほぼ一致していることを示している。

50

【0126】

ここで、バルク・ドナー濃度のばらつきが比較的小さいFZ法で製造されたシリコンウエハの比抵抗ばらつきは、一般に下記の通りである。

- ・中性子照射FZウエハ・・・±8%（比では0.92から1.08）
- ・ガスドープFZウエハ・・・±12%（比では0.88から1.12）

このため、 β が0.85以上、1.15以下であれば、最終的なドナー濃度 N_{Fre} のばらつきが、上述したFZ法のシリコンウエハのバルク・ドナー濃度と同程度になる。本明細書では、 β の許容値を0.85以上、1.15以下とする。

【0127】

実際のドナー濃度 N_{Fre} は、実際のバルク・ドナー濃度 N_{Bre} のばらつき（ β ）の影響を受ける。一方で、水素ドナー濃度 N_H のばらつきは、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} のばらつきに比べると、ほぼ0であると見做すことができる。このため、ドナー濃度の目標値 N_{F0} に対してバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} を小さくすることで、ドナー濃度 N_{Fre} においてばらつく成分の割合を小さくすることが可能となる。

10

【0128】

パラメータ β を、下式で定義する。

$$N_{B0} = \beta \times N_{F0} \quad \dots \text{式(5)}$$

ただし、 $0 < \beta < 1$ 。パラメータ β は、ドナー濃度の目標値 N_{F0} に対して、バルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} を β だけ小さく設定する、という意味のパラメータである。

β を、0にならない範囲で1よりもどれだけ小さい値とすれば、 β が β によらずに、且つ、十分1に近づくかを検討する。

20

【0129】

パラメータ β を、下式で定義する。

$$\beta = 1 / \beta \quad \dots \text{式(6)}$$

式(5)および式(6)から、下式が得られる。

$$N_{B0} = N_{F0} / \beta \quad \dots \text{式(7)}$$

式(1)に式(7)を代入して、下式が得られる。

$$N_{F0} = N_H + N_{F0} / \beta \quad \text{つまり、} N_H = (1 - 1/\beta) N_{F0} \quad \dots \text{式(8)}$$

式(2)に式(8)および式(3)を代入して、下式が得られる。

$$N_{Fre} = (1 - 1/\beta) N_{F0} + N_{B0} \quad \dots \text{式(9)}$$

30

式(9)に式(7)を代入して、下式が得られる。

$$N_{Fre} = (1 - 1/\beta) N_{F0} + (\beta / \beta) N_{F0} \\ = (1 - 1/\beta + \beta / \beta) N_{F0} \quad \dots \text{式(10)}$$

式(4)に式(10)を代入して、下式が得られる。

$$\beta = 1 - 1/\beta + \beta / \beta \\ = 1 + (\beta - 1) / \beta \quad \dots \text{式(11)}$$

式(6)および式(11)から、下式が得られる。

$$\beta = 1 + \beta(\beta - 1) \quad \dots \text{式(12)}$$

【0130】

図11は、式(12)で示される β と β との関係を、毎に示したグラフである。上述したように、 β は実際のドナー濃度 N_{Fre} の目標値 N_{F0} に対する比率を示しており、 β は実際のバルク・ドナー濃度 N_{Bre} の仕様値 N_{B0} に対する比率を示している。また、 β の許容値は0.85以上、1.15以下である。

40

【0131】

例えば、バルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} を、ドナー濃度の目標値 N_{F0} の0.5倍以下、すなわち、 β を0.5以下とする。この場合、例えば β が1.3の場合でも、 β は1.15以下となり許容範囲になる。つまり実際のバルク・ドナー濃度 N_{Bre} が仕様値 N_{B0} に比べて30%高い場合でも、実際のドナー濃度 N_{Fre} は、目標値 N_{F0} の1.15倍以下となる。また、 β が0.7の場合でも、 β が0.5以下であれば、 β は許容範囲となる。 β を0に近づけると、 β は1に収束する。例えば $\beta = 2$ の場合、 β がほぼ0.2以

50

下であれば、 σ は許容範囲となる。

【0132】

を上記の許容範囲とするために、 σ の好ましい範囲として、例えば下記の範囲 A ~ D が考えられる。

(範囲 A)

σ が 0.001 以上、0.5 以下。 σ が 0.5 の場合、 σ が 0.7 ~ 1.3 の範囲内であれば、 σ が許容範囲内となる。例えばバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ であり、 σ が 0.001 の場合、ドナー濃度の目標値 N_{F0} は $1 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ であり、約 46000 cm に相当する。

【0133】

(範囲 B)

σ が 0.01 以上、0.333 以下。 σ が 0.333 の場合、 σ が 0.5 ~ 1.5 の範囲内であれば、 σ が許容範囲内となる。例えばバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ であり、 σ が 0.01 の場合、ドナー濃度の目標値 N_{F0} は $1 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ であり、約 4600 cm に相当する。

【0134】

(範囲 C)

σ が 0.03 以上、0.25 以下。 σ が 0.25 の場合、 σ が概ね 0.4 ~ 1.6 の範囲内であれば、 σ が許容範囲内となる。例えばバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ であり、 σ が 0.03 の場合、ドナー濃度の目標値 N_{F0} は $3 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ であり、約 1500 cm に相当する。

【0135】

(範囲 D)

σ が 0.1 以上、0.2 以下。 σ が 0.2 の場合、 σ が概ね 0.2 ~ 1.8 の範囲内であれば、 σ が許容範囲内となる。例えばバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ であり、 σ が 0.1 の場合、ドナー濃度の目標値 N_{F0} は $1 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ であり、約 460 cm に相当する。

【0136】

尚、比抵抗のバラつきが少ない方が実用に向いているため、 σ は 0.1 以下が好ましく、更に 0.02 以下が好ましい。この場合、例えば下記の範囲 E ~ H が考えられる。

(範囲 E)

σ が 0.001 以上、0.1 以下。 σ が 0.1 の場合、 σ が概ね 0.05 (図示しない) ~ 3.0 の範囲内であれば、 σ が十分許容範囲内となる。例えばバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ であり、 σ が 0.1 の場合、ドナー濃度の目標値 N_{F0} は $1 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ であり、約 460 cm に相当する。

【0137】

(範囲 F)

σ が 0.002 以上、0.05 以下。 σ が 0.05 の場合、 σ が概ね 0.01 (図示しない) ~ 5.0 の範囲内であれば、 σ が十分許容範囲内となる。例えばバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ であり、 σ が 0.05 の場合、ドナー濃度の目標値 N_{F0} は $5 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ であり、約 920 cm に相当する。

【0138】

(範囲 G)

σ が 0.005 以上、0.02 以下。 σ が 0.02 の場合、 σ が概ね 0.01 (図示しない) ~ 10.0 の範囲内であれば、 σ が十分許容範囲内となる。例えばバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ であり、 σ が 0.02 の場合、ドナー濃度の目標値 N_{F0} は $2 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ であり、約 2300 cm に相当する。

【0139】

(範囲 H)

σ が 0.01 ± 0.002 (20%) の幅を有する場合。 σ が 0.01 の場合、 σ が

10

20

30

40

50

概ね 0.01 (図示しない) ~ 20.0 (図示しない) の範囲内であれば、 γ が十分許容範囲内となる。例えばバルク・ドナー濃度の仕様値 N_{B0} が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ であり、 γ が 0.01 の場合、ドナー濃度の目標値 N_{F0} は $1 \times 10^{12} / \text{cm}^3$ であり、約 4600 cm に相当する。

【0140】

上述したように、実際のドナー濃度 N_{Fre} は、高濃度領域 150 のドナー濃度に対応する。半導体基板 10 において大きな領域を占める高濃度領域 150 のドナー濃度によって、半導体装置 100 の耐圧がほぼ定まる。このため、半導体装置 100 の定格電圧によって、高濃度領域 150 のドナー濃度 N_{Fre} の好ましい範囲が定まる。ドナー濃度 N_{Fre} に応じて、当該ドナー濃度 N_{Fre} を安定させることができるバルク・ドナー濃度 N_{Bre} の範囲が定まる。

10

【0141】

図12は、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。本例においては、半導体基板 10 の深さ方向の中央 Zc におけるドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ は、 $(9.20245 \times 10^{15}) / x$ 以上、 $(9.20245 \times 10^{16}) / x$ 以下である。ただし、 x は定格電圧 (V) である。ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ は、FZ法で形成された一般的な半導体基板におけるドリフト領域のドーピング濃度を参照して決定したが、MCZ法で形成された半導体基板のドリフト領域のドーピング濃度を参照して決定しても構わない。図12においては、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の好ましい範囲の上限 311 および下限 312 を破線で示している。

20

【0142】

図12においては、上述した範囲 A (γ が 0.001 以上、 0.5 以下) の場合のバルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の上限 313 および下限 314 を実線で示している。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限 313 は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の上限 311 に γ の上限値 (0.5) を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の下限 314 は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の下限 312 に γ の下限値 (0.001) を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限 313 および下限 314 は下記の通りである。なお、各例における上限 313 および下限 314 の単位は $(/ \text{cm}^3)$ である。上述したように、 x は定格電圧 (V) である。

$$\cdot \text{下限 } 314 : (9.20245 \times 10^{12}) / x$$

$$\cdot \text{上限 } 313 : (4.60123 \times 10^{16}) / x$$

30

【0143】

図13は、 γ が範囲 B (0.01 以上、 0.333 以下) の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。なお、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の上限 311 および下限 312 は、図12の例と同一である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限 313 は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の上限 311 に γ の上限値 (0.333) を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の下限 314 は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の下限 312 に γ の下限値 (0.01) を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限 313 および下限 314 は下記の通りである。

$$\cdot \text{下限 } 314 : (9.20245 \times 10^{13}) / x$$

$$\cdot \text{上限 } 313 : (3.06442 \times 10^{16}) / x$$

40

【0144】

図14は、 γ が範囲 C (0.03 以上、 0.25 以下) の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。なお、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の上限 311 および下限 312 は、図12の例と同一である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限 313 は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の上限 311 に γ の上限値 (0.25) を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の下限 314 は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/ \text{cm}^3)$ の下限 312 に γ の下限値 (0.03) を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限 313 および下限 314 は下記の通りである。

$$\cdot \text{下限 } 314 : (2.76074 \times 10^{14}) / x$$

50

$$\cdot \text{上限 } 313 : (2.30061 \times 10^{16}) / x$$

【0145】

図15は、 δ が範囲D(0.1以上、0.2以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。なお、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311および下限312は、図12の例と同一である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311に δ の上限値(0.2)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の下限314は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の下限312に δ の下限値(0.1)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313および下限314は下記の通りである。

$$\cdot \text{下限 } 314 : (9.20245 \times 10^{14}) / x$$

$$\cdot \text{上限 } 313 : (1.84049 \times 10^{16}) / x$$

【0146】

図16は、 δ が範囲E(0.001以上、0.1以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。なお、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311および下限312は、図12の例と同一である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311に δ の上限値(0.1)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の下限314は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の下限312に δ の下限値(0.001)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313および下限314は下記の通りである。

$$\cdot \text{下限 } 314 : (9.20245 \times 10^{12}) / x$$

$$\cdot \text{上限 } 313 : (9.20245 \times 10^{15}) / x$$

【0147】

図17は、 δ が範囲F(0.002以上、0.05以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。なお、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311および下限312は、図12の例と同一である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311に δ の上限値(0.05)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の下限314は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の下限312に δ の下限値(0.002)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313および下限314は下記の通りである。

$$\cdot \text{下限 } 314 : (1.84049 \times 10^{13}) / x$$

$$\cdot \text{上限 } 313 : (4.60123 \times 10^{15}) / x$$

【0148】

図18は、 δ が範囲G(0.005以上、0.02以下)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。なお、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311および下限312は、図12の例と同一である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311に δ の上限値(0.02)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の下限314は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の下限312に δ の下限値(0.005)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313および下限314は下記の通りである。

$$\cdot \text{下限 } 314 : (4.60123 \times 10^{13}) / x$$

$$\cdot \text{上限 } 313 : (1.84049 \times 10^{15}) / x$$

【0149】

図19は、 δ が範囲H(0.01±0.002)の場合の、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の好ましい範囲の一例を示す図である。なお、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311および下限312は、図12の例と同一である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の上限311に δ の上限値(0.01)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の下限314は、ドナー濃度 $N_{Fre} (/cm^3)$ の下限312に δ の下限値(0.01)を乗じた値である。バルク・ドナー濃度 N_{Bre} の上限313および下限314は下記の通りである。

$$\cdot \text{下限 } 314 : (9.20245 \times 10^{13}) / x$$

・上限 313 : $(9.20245 \times 10^{14}) / x$

なお、各範囲における上限 313 および下限 314 は、 $\pm 20\%$ の幅を有してよい。

【0150】

図 12 から図 19 に示したように、バルク・ドナー濃度 N_{Bre} を、各例における上限 313 および下限 314 の間の濃度にする事で、最終的なドナー濃度 N_{Fre} のばらつきを示す を、許容範囲内に抑制できる。なお、下限 314 の曲線は、真性キャリア濃度よりも小さい場合がある。ここで真性キャリア濃度は、室温（例えば 300 K）において $1.45 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ である。下限 314 の曲線の値が真性キャリア濃度よりも小さい場合は、下限 314 は真性キャリア濃度に置き換えてもよい。

【0151】

図 20 は、半導体装置 100 の上面図の一例である。図 20 においては、各部材を半導体基板 10 の上面に投影した位置を示している。図 20 においては、半導体装置 100 の一部の部材だけを示しており、一部の部材は省略している。

【0152】

半導体装置 100 は、図 1 から図 19 において説明した半導体基板 10 を備えている。半導体基板 10 は、上面視において端辺 102 を有する。本明細書で単に上面視と称した場合、半導体基板 10 の上面側から見ることを意味している。本例の半導体基板 10 は、上面視において互いに向かい合う 2 組の端辺 102 を有する。図 20 においては、X 軸および Y 軸は、いずれかの端辺 102 と平行である。また Z 軸は、半導体基板 10 の上面と垂直である。

【0153】

半導体基板 10 には活性部 160 が設けられている。活性部 160 は、半導体装置 100 が動作した場合に半導体基板 10 の上面と下面との間で、深さ方向に主電流が流れる領域である。活性部 160 の上方には、エミッタ電極が設けられているが図 20 では省略している。

【0154】

活性部 160 には、IGBT 等のトランジスタ素子を含むトランジスタ部 70 と、還流ダイオード (FWD) 等のダイオード素子を含むダイオード部 80 の少なくとも一方が設けられている。図 20 の例では、トランジスタ部 70 およびダイオード部 80 は、半導体基板 10 の上面における所定の配列方向（本例では X 軸方向）に沿って、交互に配置されている。他の例では、活性部 160 には、トランジスタ部 70 およびダイオード部 80 の一方だけが設けられていてもよい。

【0155】

図 20 においては、トランジスタ部 70 が配置される領域には記号「I」を付し、ダイオード部 80 が配置される領域には記号「F」を付している。本明細書では、上面視において配列方向と垂直な方向を延伸方向（図 20 では Y 軸方向）と称する場合がある。トランジスタ部 70 およびダイオード部 80 は、それぞれ延伸方向に長手を有してよい。つまり、トランジスタ部 70 の Y 軸方向における長さは、X 軸方向における幅よりも大きい。同様に、ダイオード部 80 の Y 軸方向における長さは、X 軸方向における幅よりも大きい。トランジスタ部 70 およびダイオード部 80 の延伸方向と、後述する各トレンチ部の長手方向とは同一であってよい。

【0156】

ダイオード部 80 は、半導体基板 10 の下面と接する領域に、N+ 型のカソード領域を有する。本明細書では、カソード領域が設けられた領域を、ダイオード部 80 と称する。つまりダイオード部 80 は、上面視においてカソード領域と重なる領域である。半導体基板 10 の下面には、カソード領域以外の領域には、P+ 型のコレクタ領域が設けられてよい。本明細書では、ダイオード部 80 を、後述するゲート配線まで Y 軸方向に延長した延長領域 81 も、ダイオード部 80 に含める場合がある。延長領域 81 の下面には、コレクタ領域が設けられている。

【0157】

10

20

30

40

50

トランジスタ部 70 は、半導体基板 10 の下面と接する領域に、P+型のコレクタ領域を有する。また、トランジスタ部 70 は、半導体基板 10 の上面側に、N型のエミッタ領域、P型のベース領域、ゲート導電部およびゲート絶縁膜を有するゲート構造が周期的に配置されている。

【0158】

半導体装置 100 は、半導体基板 10 の上方に1つ以上のパッドを有してよい。本例の半導体装置 100 は、ゲートパッド 164 を有している。半導体装置 100 は、アノードパッド、カソードパッドおよび電流検出パッド等のパッドを有してもよい。各パッドは、端辺 102 の近傍に配置されている。端辺 102 の近傍とは、上面視における端辺 102 と、エミッタ電極との間の領域を指す。半導体装置 100 の実装時において、各パッドは、ワイヤ等の配線を介して外部の回路に接続されてよい。

10

【0159】

ゲートパッド 164 には、ゲート電位が印加される。ゲートパッド 164 は、活性部 160 のゲートトレンチ部の導電部に電氣的に接続される。半導体装置 100 は、ゲートパッド 164 とゲートトレンチ部とを接続するゲート配線を備える。図 20 においては、ゲート配線に斜線のハッチングを付している。

【0160】

本例のゲート配線は、外周ゲート配線 130 と、活性側ゲート配線 129 とを有している。外周ゲート配線 130 は、上面視において活性部 160 と半導体基板 10 の端辺 102 との間に配置されている。本例の外周ゲート配線 130 は、上面視において活性部 160 を囲んでいる。上面視において外周ゲート配線 130 に囲まれた領域を活性部 160 としてもよい。また、外周ゲート配線 130 は、ゲートパッド 164 と接続されている。外周ゲート配線 130 は、半導体基板 10 の上方に配置されている。外周ゲート配線 130 は、アルミニウム等を含む金属配線であってよい。

20

【0161】

活性側ゲート配線 129 は、活性部 160 に設けられている。活性部 160 に活性側ゲート配線 129 を設けることで、半導体基板 10 の各領域について、ゲートパッド 164 からの配線長のばらつきを低減できる。

【0162】

活性側ゲート配線 129 は、活性部 160 のゲートトレンチ部と接続される。活性側ゲート配線 129 は、半導体基板 10 の上方に配置されている。活性側ゲート配線 129 は、不純物がドーブされたポリシリコン等の半導体で形成された配線であってよい。

30

【0163】

活性側ゲート配線 129 は、外周ゲート配線 130 と接続されてよい。本例の活性側ゲート配線 129 は、Y軸方向の略中央で一方の外周ゲート配線 130 から他方の外周ゲート配線 130 まで、活性部 160 を横切るように、X軸方向に延伸して設けられている。活性側ゲート配線 129 により活性部 160 が分割されている場合、それぞれの分割領域において、トランジスタ部 70 およびダイオード部 80 がX軸方向に交互に配置されてよい。

【0164】

また、半導体装置 100 は、ポリシリコン等で形成されたPN接合ダイオードである不図示の温度センス部や、活性部 160 に設けられたトランジスタ部の動作を模擬する不図示の電流検出部を備えてもよい。

40

【0165】

本例の半導体装置 100 は、活性部 160 と端辺 102 との間に、エッジ終端構造部 90 を備える。本例のエッジ終端構造部 90 は、外周ゲート配線 130 と端辺 102 との間に配置されている。エッジ終端構造部 90 は、半導体基板 10 の上面側の電界集中を緩和する。エッジ終端構造部 90 は、複数のガードリング 92 を有する。ガードリング 92 は、半導体基板 10 の上面と接するP型の領域である。ガードリング 92 は、上面視において活性部 160 を囲んでいてよい。複数のガードリング 92 は、外周ゲート配線 130 と

50

端辺 102 との間において、所定の間隔で配置されている。外側に配置されたガードリング 92 は、一つ内側に配置されたガードリング 92 を囲んでいてよい。外側とは、端辺 102 に近い側を指し、内側とは、外周ゲート配線 130 に近い側を指す。複数のガードリング 92 を設けることで、活性部 160 の上面側における空乏層を外側に伸ばすことができ、半導体装置 100 の耐圧を向上できる。エッジ終端構造部 90 は、活性部 160 を囲んで環状に設けられたフィールドプレートおよびリサーフのうちの少なくとも一つを更に備えていてもよい。

【0166】

図 21 は、図 20 における領域 A の拡大図である。領域 A は、トランジスタ部 70、ダイオード部 80、および、活性側ゲート配線 129 を含む領域である。本例の半導体装置 100 は、半導体基板 10 の上面側の内部に設けられたゲートトレンチ部 40、ダミートレンチ部 30、ウェル領域 11、エミッタ領域 12、ベース領域 14 およびコンタクト領域 15 を備える。ゲートトレンチ部 40 およびダミートレンチ部 30 は、それぞれがトレンチ部の一例である。また、本例の半導体装置 100 は、半導体基板 10 の上面の上方に設けられたエミッタ電極 52 および活性側ゲート配線 129 を備える。エミッタ電極 52 および活性側ゲート配線 129 は互いに分離して設けられる。

10

【0167】

エミッタ電極 52 および活性側ゲート配線 129 と、半導体基板 10 の上面との間には層間絶縁膜が設けられるが、図 21 では省略している。本例の層間絶縁膜には、コンタクトホール 54 が、当該層間絶縁膜を貫通して設けられる。図 21 においては、それぞれのコンタクトホール 54 に斜線のハッチングを付している。

20

【0168】

エミッタ電極 52 は、ゲートトレンチ部 40、ダミートレンチ部 30、ウェル領域 11、エミッタ領域 12、ベース領域 14 およびコンタクト領域 15 の上方に設けられる。エミッタ電極 52 は、コンタクトホール 54 を通って、半導体基板 10 の上面におけるエミッタ領域 12、コンタクト領域 15 およびベース領域 14 と接触する。また、エミッタ電極 52 は、層間絶縁膜に設けられたコンタクトホールを通して、ダミートレンチ部 30 内のダミー導電部と接続される。エミッタ電極 52 は、Y 軸方向におけるダミートレンチ部 30 の先端において、ダミートレンチ部 30 のダミー導電部と接続されてよい。

【0169】

活性側ゲート配線 129 は、層間絶縁膜に設けられたコンタクトホールを通して、ゲートトレンチ部 40 と接続する。活性側ゲート配線 129 は、Y 軸方向におけるゲートトレンチ部 40 の先端部 41 において、ゲートトレンチ部 40 のゲート導電部と接続されてよい。活性側ゲート配線 129 は、ダミートレンチ部 30 内のダミー導電部とは接続されない。

30

【0170】

エミッタ電極 52 は、金属を含む材料で形成される。図 21 においては、エミッタ電極 52 が設けられる範囲を示している。例えば、エミッタ電極 52 の少なくとも一部の領域はアルミニウムまたはアルミニウム シリコン合金、例えば AlSi、AlSiCu 等の金属合金で形成される。エミッタ電極 52 は、アルミニウム等で形成された領域の下層に、チタンやチタン化合物等で形成されたバリアメタルを有してよい。さらにコンタクトホール内において、バリアメタルとアルミニウム等に接するようにタングステン等を埋め込んで形成されたプラグを有してもよい。

40

【0171】

ウェル領域 11 は、活性側ゲート配線 129 と重なって設けられている。ウェル領域 11 は、活性側ゲート配線 129 と重ならない範囲にも、所定の幅で延伸して設けられている。本例のウェル領域 11 は、コンタクトホール 54 の Y 軸方向の端から、活性側ゲート配線 129 側に離れて設けられている。ウェル領域 11 は、ベース領域 14 よりもドーピング濃度の高い第 2 導電型の領域である。本例のベース領域 14 は P - 型であり、ウェル領域 11 は P + 型である。

50

【 0 1 7 2 】

トランジスタ部 7 0 およびダイオード部 8 0 のそれぞれは、配列方向に複数配列されたトレンチ部を有する。本例のトランジスタ部 7 0 には、配列方向に沿って 1 以上のゲートトレンチ部 4 0 と、1 以上のダミートレンチ部 3 0 とが交互に設けられている。本例のダイオード部 8 0 には、複数のダミートレンチ部 3 0 が、配列方向に沿って設けられている。本例のダイオード部 8 0 には、ゲートトレンチ部 4 0 が設けられていない。

【 0 1 7 3 】

本例のゲートトレンチ部 4 0 は、配列方向と垂直な延伸方向に沿って延伸する 2 つの直線部分 3 9 (延伸方向に沿って直線状であるトレンチの部分) と、2 つの直線部分 3 9 を接続する先端部 4 1 を有してよい。図 2 1 における延伸方向は Y 軸方向である。

10

【 0 1 7 4 】

先端部 4 1 の少なくとも一部は、上面視において曲線状に設けられることが好ましい。2 つの直線部分 3 9 の Y 軸方向における端部どうしを先端部 4 1 が接続することで、直線部分 3 9 の端部における電界集中を緩和できる。

【 0 1 7 5 】

トランジスタ部 7 0 において、ダミートレンチ部 3 0 はゲートトレンチ部 4 0 のそれぞれの直線部分 3 9 の間に設けられる。それぞれの直線部分 3 9 の間には、1 本のダミートレンチ部 3 0 が設けられてよく、複数本のダミートレンチ部 3 0 が設けられていてもよい。ダミートレンチ部 3 0 は、延伸方向に延伸する直線形状を有してよく、ゲートトレンチ部 4 0 と同様に、直線部分 2 9 と先端部 3 1 とを有していてもよい。図 2 1 に示した半導体装置 1 0 0 は、先端部 3 1 を有さない直線形状のダミートレンチ部 3 0 と、先端部 3 1 を有するダミートレンチ部 3 0 の両方を含んでいる。

20

【 0 1 7 6 】

ウェル領域 1 1 の拡散深さは、ゲートトレンチ部 4 0 およびダミートレンチ部 3 0 の深さよりも深くてもよい。ゲートトレンチ部 4 0 およびダミートレンチ部 3 0 の Y 軸方向の端部は、上面視においてウェル領域 1 1 に設けられる。つまり、各トレンチ部の Y 軸方向の端部において、各トレンチ部の深さ方向の底部は、ウェル領域 1 1 に覆われている。これにより、各トレンチ部の当該底部における電界集中を緩和できる。

【 0 1 7 7 】

配列方向において各トレンチ部の間には、メサ部が設けられている。メサ部は、半導体基板 1 0 の内部において、トレンチ部に挟まれた領域を指す。一例としてメサ部の上端は半導体基板 1 0 の上面である。メサ部の下端の深さ位置は、トレンチ部の下端の深さ位置と同一である。本例のメサ部は、半導体基板 1 0 の上面において、トレンチに沿って延伸方向 (Y 軸方向) に延伸して設けられている。本例では、トランジスタ部 7 0 にはメサ部 6 0 が設けられ、ダイオード部 8 0 にはメサ部 6 1 が設けられている。本明細書において単にメサ部と称した場合、メサ部 6 0 およびメサ部 6 1 のそれぞれを指している。

30

【 0 1 7 8 】

それぞれのメサ部には、ベース領域 1 4 が設けられる。メサ部において半導体基板 1 0 の上面に露出したベース領域 1 4 のうち、活性側ゲート配線 1 2 9 に最も近く配置された領域をベース領域 1 4 - e とする。図 2 1 においては、それぞれのメサ部の延伸方向における一方の端部に配置されたベース領域 1 4 - e を示しているが、それぞれのメサ部の他方の端部にもベース領域 1 4 - e が配置されている。それぞれのメサ部には、上面視においてベース領域 1 4 - e に挟まれた領域に、第 1 導電型のエミッタ領域 1 2 および第 2 導電型のコンタクト領域 1 5 の少なくとも一方が設けられてよい。本例のエミッタ領域 1 2 は N + 型であり、コンタクト領域 1 5 は P + 型である。エミッタ領域 1 2 およびコンタクト領域 1 5 は、深さ方向において、ベース領域 1 4 と半導体基板 1 0 の上面との間に設けられてよい。

40

【 0 1 7 9 】

トランジスタ部 7 0 のメサ部 6 0 は、半導体基板 1 0 の上面に露出したエミッタ領域 1 2 を有する。エミッタ領域 1 2 は、ゲートトレンチ部 4 0 に接して設けられている。ゲ-

50

トレンチ部 40 に接するメサ部 60 は、半導体基板 10 の上面に露出したコンタクト領域 15 が設けられていてよい。

【0180】

メサ部 60 におけるコンタクト領域 15 およびエミッタ領域 12 のそれぞれは、X 軸方向における一方のトレンチ部から、他方のトレンチ部まで設けられる。一例として、メサ部 60 のコンタクト領域 15 およびエミッタ領域 12 は、トレンチ部の延伸方向 (Y 軸方向) に沿って交互に配置されている。

【0181】

他の例においては、メサ部 60 のコンタクト領域 15 およびエミッタ領域 12 は、トレンチ部の延伸方向 (Y 軸方向) に沿ってストライプ状に設けられていてもよい。例えばトレンチ部に接する領域にエミッタ領域 12 が設けられ、エミッタ領域 12 に挟まれた領域にコンタクト領域 15 が設けられる。

10

【0182】

ダイオード部 80 のメサ部 61 には、エミッタ領域 12 が設けられていない。メサ部 61 の上面には、ベース領域 14 およびコンタクト領域 15 が設けられてよい。メサ部 61 の上面においてベース領域 14 - e に挟まれた領域には、それぞれのベース領域 14 - e に接してコンタクト領域 15 が設けられてよい。メサ部 61 の上面においてコンタクト領域 15 に挟まれた領域には、ベース領域 14 が設けられてよい。ベース領域 14 は、コンタクト領域 15 に挟まれた領域全体に配置されてよい。

【0183】

20

それぞれのメサ部の上方には、コンタクトホール 54 が設けられている。コンタクトホール 54 は、ベース領域 14 - e に挟まれた領域に配置されている。本例のコンタクトホール 54 は、コンタクト領域 15、ベース領域 14 およびエミッタ領域 12 の各領域の上方に設けられる。コンタクトホール 54 は、ベース領域 14 - e およびウェル領域 11 に対応する領域には設けられない。コンタクトホール 54 は、メサ部 60 の配列方向 (X 軸方向) における中央に配置されてよい。

【0184】

ダイオード部 80 において、半導体基板 10 の下面と隣接する領域には、N + 型のカソード領域 82 が設けられる。半導体基板 10 の下面において、カソード領域 82 が設けられていない領域には、P + 型のコレクタ領域 22 が設けられてよい。図 21 においては、カソード領域 82 およびコレクタ領域 22 の境界を点線で示している。

30

【0185】

カソード領域 82 は、Y 軸方向においてウェル領域 11 から離れて配置されている。これにより、比較的ドーピング濃度が高く、且つ、深い位置まで形成されている P 型の領域 (ウェル領域 11) と、カソード領域 82 との距離を確保して、耐圧を向上できる。本例のカソード領域 82 の Y 軸方向における端部は、コンタクトホール 54 の Y 軸方向における端部よりも、ウェル領域 11 から離れて配置されている。他の例では、カソード領域 82 の Y 軸方向における端部は、ウェル領域 11 とコンタクトホール 54 との間に配置されていてもよい。

【0186】

40

図 22 A は、図 21 における b - b 断面の一例を示す図である。b - b 断面は、エミッタ領域 12 およびカソード領域 82 を通過する XZ 面である。本例の半導体装置 100 は、当該断面において、半導体基板 10、層間絶縁膜 38、エミッタ電極 52 およびコレクタ電極 24 を有する。層間絶縁膜 38 は、半導体基板 10 の上面に設けられている。層間絶縁膜 38 は、ホウ素またはリン等の不純物が添加されたシリケートガラス等の絶縁膜、熱酸化膜、および、その他の絶縁膜の少なくとも一層を含む膜である。層間絶縁膜 38 には、図 21 において説明したコンタクトホール 54 が設けられている。

【0187】

エミッタ電極 52 は、層間絶縁膜 38 の上方に設けられる。エミッタ電極 52 は、層間絶縁膜 38 のコンタクトホール 54 を通って、半導体基板 10 の上面 21 と接触している

50

。コレクタ電極 24 は、半導体基板 10 の下面 23 に設けられる。エミッタ電極 52 およびコレクタ電極 24 は、アルミニウム等の金属材料で形成されている。本明細書において、エミッタ電極 52 とコレクタ電極 24 とを結ぶ方向（Z 軸方向）を深さ方向と称する。

【0188】

半導体基板 10 は、N 型のドリフト領域 19 を有する。本例のドリフト領域 19 は、蓄積領域 16 の下端から、バッファ領域 20 の上端までの N 型の領域である。本例のドリフト領域 19 は、図 1 から図 19 において説明した高濃度領域 150 を有する。図 22A においては、高濃度領域 150 に斜線のハッチングを付している。高濃度領域 150 は、トランジスタ部 70 に設けられてよく、ダイオード部 80 に設けられてよく、トランジスタ部 70 およびダイオード部 80 の両方に設けられてもよい。高濃度領域 150 は、バッファ領域 20 の上端から上面 21 に向かって設けられた領域である。高濃度領域 150 の上端部分には、不純物化学濃度ピーク 141（図 1 等参照）が配置されている。

10

【0189】

ドリフト領域 19 は、N - 型のバルク・ドナー領域 18 を有してよい。バルク・ドナー領域 18 は、ドーピング濃度がバルク・ドナーのドナー濃度と一致する領域である。バルク・ドナー領域 18 は、高濃度領域 150 よりも上側に配置された領域である。本例においてバルク・ドナー領域 18 は、トランジスタ部 70 およびダイオード部 80 のそれぞれに設けられている。

【0190】

トランジスタ部 70 のメサ部 60 には、N + 型のエミッタ領域 12 および P - 型のベース領域 14 が、半導体基板 10 の上面 21 側から順番に設けられている。ベース領域 14 の下方にはバルク・ドナー領域 18 が設けられている。メサ部 60 には、N + 型の蓄積領域 16 が設けられてもよい。蓄積領域 16 は、ベース領域 14 とバルク・ドナー領域 18 との間に配置される。

20

【0191】

エミッタ領域 12 は半導体基板 10 の上面 21 に露出しており、且つ、ゲートトレンチ部 40 と接して設けられている。エミッタ領域 12 は、メサ部 60 の両側のトレンチ部と接してよい。エミッタ領域 12 は、バルク・ドナー領域 18 よりもドーピング濃度が高い。

【0192】

ベース領域 14 は、エミッタ領域 12 の下方に設けられている。本例のベース領域 14 は、エミッタ領域 12 と接して設けられている。ベース領域 14 は、メサ部 60 の両側のトレンチ部と接してよい。

30

【0193】

蓄積領域 16 は、ベース領域 14 の下方に設けられている。蓄積領域 16 は、ドリフト領域 19 よりもドーピング濃度が高い N + 型の領域である。蓄積領域 16 は、高濃度領域 150 よりもドーピング濃度が高くてよい。ドリフト領域 19 とベース領域 14 との間に高濃度の蓄積領域 16 を設けることで、キャリア注入促進効果（IE 効果）を高めて、オン電圧を低減できる。蓄積領域 16 は、各メサ部 60 におけるベース領域 14 の下面全体を覆うように設けられてよい。

40

【0194】

ダイオード部 80 のメサ部 61 には、半導体基板 10 の上面 21 に接して、P - 型のベース領域 14 が設けられている。ベース領域 14 の下方には、バルク・ドナー領域 18 が設けられている。メサ部 61 において、ベース領域 14 の下方に蓄積領域 16 が設けられていてもよい。

【0195】

トランジスタ部 70 およびダイオード部 80 のそれぞれにおいて、高濃度領域 150 よりも下面 23 側には N + 型のバッファ領域 20 が設けられている。バッファ領域 20 の構造は、図 1 から図 19 において説明したバッファ領域 20 と同一である。バッファ領域 20 は、ベース領域 14 の下端から広がる空乏層が、P + 型のコレクタ領域 22 および N +

50

型のカソード領域 8 2 に到達することを防ぐフィールドストップ層として機能してよい。

【 0 1 9 6 】

トランジスタ部 7 0 において、バッファ領域 2 0 の下には、P + 型のコレクタ領域 2 2 が設けられる。コレクタ領域 2 2 は、図 1 から図 1 9 において説明した下面領域 2 0 1 の一例である。コレクタ領域 2 2 のアクセプタ濃度は、ベース領域 1 4 のアクセプタ濃度より高い。コレクタ領域 2 2 は、ベース領域 1 4 と同一のアクセプタを含んでよく、異なるアクセプタを含んでもよい。コレクタ領域 2 2 のアクセプタは、例えばボロンである。

【 0 1 9 7 】

ダイオード部 8 0 において、バッファ領域 2 0 の下には、N + 型のカソード領域 8 2 が設けられる。カソード領域 8 2 は、図 1 から図 1 9 において説明した下面領域 2 0 1 の一例である。カソード領域 8 2 のドナー濃度は、高濃度領域 1 5 0 のドナー濃度より高い。カソード領域 8 2 のドナーは、例えば水素またはリンである。なお、各領域のドナーおよびアクセプタとなる元素は、上述した例に限定されない。コレクタ領域 2 2 およびカソード領域 8 2 は、半導体基板 1 0 の下面 2 3 に露出しており、コレクタ電極 2 4 と接続している。コレクタ電極 2 4 は、半導体基板 1 0 の下面 2 3 全体と接触してよい。エミッタ電極 5 2 およびコレクタ電極 2 4 は、アルミニウム等の金属材料で形成される。

10

【 0 1 9 8 】

半導体基板 1 0 の上面 2 1 側には、1 以上のゲートトレンチ部 4 0、および、1 以上のダミートレンチ部 3 0 が設けられる。各トレンチ部は、半導体基板 1 0 の上面 2 1 から、ベース領域 1 4 を貫通して、ドリフト領域 1 9 に到達している。エミッタ領域 1 2、コンタクト領域 1 5 および蓄積領域 1 6 の少なくともいずれかが設けられている領域においては、各トレンチ部はこれらのドーピング領域も貫通して、バルク・ドナー領域 1 8 に到達している。トレンチ部がドーピング領域を貫通するとは、ドーピング領域を形成してからトレンチ部を形成する順序で製造したものに限定されない。トレンチ部を形成した後に、トレンチ部の間にドーピング領域を形成したのも、トレンチ部がドーピング領域を貫通しているものに含まれる。

20

【 0 1 9 9 】

上述したように、トランジスタ部 7 0 には、ゲートトレンチ部 4 0 およびダミートレンチ部 3 0 が設けられている。ダイオード部 8 0 には、ダミートレンチ部 3 0 が設けられ、ゲートトレンチ部 4 0 が設けられていない。本例においてダイオード部 8 0 とトランジスタ部 7 0 の X 軸方向における境界は、カソード領域 8 2 とコレクタ領域 2 2 の境界である。

30

【 0 2 0 0 】

ゲートトレンチ部 4 0 は、半導体基板 1 0 の上面 2 1 に設けられたゲートトレンチ、ゲート絶縁膜 4 2 およびゲート導電部 4 4 を有する。ゲート絶縁膜 4 2 は、ゲートトレンチの内壁を覆って設けられる。ゲート絶縁膜 4 2 は、ゲートトレンチの内壁の半導体を酸化または窒化して形成してよい。ゲート導電部 4 4 は、ゲートトレンチの内部においてゲート絶縁膜 4 2 よりも内側に設けられる。つまりゲート絶縁膜 4 2 は、ゲート導電部 4 4 と半導体基板 1 0 とを絶縁する。ゲート導電部 4 4 は、ポリシリコン等の導電材料で形成される。

【 0 2 0 1 】

ゲート導電部 4 4 は、深さ方向において、ベース領域 1 4 よりも長く設けられてよい。当該断面におけるゲートトレンチ部 4 0 は、半導体基板 1 0 の上面 2 1 において層間絶縁膜 3 8 により覆われる。ゲート導電部 4 4 は、ゲート配線に電氣的に接続されている。ゲート導電部 4 4 に所定のゲート電圧が印加されると、ベース領域 1 4 のうちゲートトレンチ部 4 0 に接する界面の表層に電子の反転層によるチャンネルが形成される。

40

【 0 2 0 2 】

ダミートレンチ部 3 0 は、当該断面において、ゲートトレンチ部 4 0 と同一の構造を有してよい。ダミートレンチ部 3 0 は、半導体基板 1 0 の上面 2 1 に設けられたダミートレンチ、ダミー絶縁膜 3 2 およびダミー導電部 3 4 を有する。ダミー導電部 3 4 は、ゲートパッドとは異なる電極に接続されてよい。例えば、ゲートパッドとは異なる外部回路に接

50

続する図示しないダミーパッドに、ダミー導電部 34 を接続し、ゲート導電部 44 とは異なる制御を行ってもよい。また、ダミー導電部 34 をエミッタ電極 52 に電氣的に接続させてもよい。ダミー絶縁膜 32 は、ダミートレンチの内壁を覆って設けられる。ダミー導電部 34 は、ダミートレンチの内部に設けられ、且つ、ダミー絶縁膜 32 よりも内側に設けられる。ダミー絶縁膜 32 は、ダミー導電部 34 と半導体基板 10 とを絶縁する。ダミー導電部 34 は、ゲート導電部 44 と同一の材料で形成されてよい。例えばダミー導電部 34 は、ポリシリコン等の導電材料で形成される。ダミー導電部 34 は、深さ方向においてゲート導電部 44 と同一の長さを有してよい。

【0203】

本例のゲートトレンチ部 40 およびダミートレンチ部 30 は、半導体基板 10 の上面 21 において層間絶縁膜 38 により覆われている。なお、ダミートレンチ部 30 およびゲートトレンチ部 40 の底部は、下側に凸の曲面状（断面においては曲線状）であってよい。

10

【0204】

半導体基板 10 は、図 1 から図 19 において説明したいずれかの例と同様の、不純物化学濃度 C_I 、水素化学濃度 C_H 、および、ドーピング濃度 D_d の分布を有する。本例の半導体装置 100 によれば、高濃度領域 150 を設けることで、ドリフト領域 19 におけるドーピング濃度のばらつきを抑制できる。

【0205】

図 22B は、図 22A の d-d 線におけるドーピング濃度 D_d の分布例を示す図である。d-d 線は、コレクタ領域 22 およびメサ部 60 を通過する Z 軸と平行な線である。本例のドーピング濃度 D_d の分布は、コレクタ領域 22 からドーピング濃度ピーク 121 までは、図 2 に示したドーピング濃度 D_d の分布と同様である。本例のドーピング濃度 D_d は、蓄積領域 16、ベース領域 14 およびエミッタ領域 12 のそれぞれにおいて、濃度ピークを有している。本例の半導体基板 10 は、蓄積領域 16 およびドーピング濃度ピーク 121 の間に、バルク・ドナー領域 18 を有している。バルク・ドナー領域 18 は、蓄積領域 16 と接してよい。つまり、バルク・ドナー領域 18 と蓄積領域 16 との境界においては、バルク・ドナー濃度 D_b から蓄積領域 16 の濃度ピークの頂点まで、ドーピング濃度 D_d が連続して増加してよい。

20

【0206】

図 23 は、図 21 における b-b 断面の他の例を示す図である。本例の半導体装置 100 においては、高濃度領域 150 が、ドリフト領域 19 の全体に渡って設けられている点で図 22A の例と相違する。他の構造は、図 22A の例と同一であってよい。

30

【0207】

本例の高濃度領域 150 は、バッファ領域 20 の上端から、蓄積領域 16 と接する位置まで設けられてよい。高濃度領域 150 は、蓄積領域 16 の内部まで形成されてもよい。この場合、第 2 のドーピング濃度ピーク 121 は、蓄積領域 16 に配置されてよい。半導体装置 100 が蓄積領域 16 を有さない場合、高濃度領域 150 は、ベース領域 14 と接する位置まで設けられてよい。本例によれば、ドリフト領域 19 全体に渡って、ドーピング濃度のばらつきを抑制できる。

【0208】

以上、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。上記実施の形態に、多様な変更または改良を加えることが可能であることが当業者に明らかである。その様な変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれ得ることが、請求の範囲の記載から明らかである。

40

【0209】

請求の範囲、明細書、および図面中において示した装置、システム、プログラム、および方法における動作、手順、ステップ、および段階等の各処理の実行順序は、特段「より前に」、「先立って」等と明示しておらず、また、前の処理の出力を後の処理で用いるのでない限り、任意の順序で実現しうることに留意すべきである。請求の範囲、明細書、および図面中の動作フローに関して、便宜上「まず」、「次に、」等を用いて説明したと

50

しても、この順で実施することが必須であることを意味するものではない。

【符号の説明】

【0210】

10・・・半導体基板、11・・・ウェル領域、12・・・エミッタ領域、14・・・ベース領域、15・・・コンタクト領域、16・・・蓄積領域、18・・・バルク・ドナー領域、19・・・ドリフト領域、20・・・バッファ領域、21・・・上面、22・・・コレクタ領域、23・・・下面、24・・・コレクタ電極、29・・・直線部分、30・・・ダミートレンチ部、31・・・先端部、32・・・ダミー絶縁膜、34・・・ダミー導電部、38・・・層間絶縁膜、39・・・直線部分、40・・・ゲートトレンチ部、41・・・先端部、42・・・ゲート絶縁膜、44・・・ゲート導電部、52・・・エミッタ電極、54・・・コンタクトホール、60、61・・・メサ部、70・・・トランジスタ部、80・・・ダイオード部、81・・・延長領域、82・・・カソード領域、90・・・エッジ終端構造部、92・・・ガードリング、100・・・半導体装置、102・・・端辺、106・・・通過領域、111・・・第1のドーピング濃度ピーク、112・・・下側裾、113・・・上側裾、114・・・傾き、117・・・ドーピング濃度ピーク、119・・・化学濃度ピーク、121・・・第2のドーピング濃度ピーク、122・・・下側裾、123・・・上側裾、124・・・傾き、125・・・傾き、129・・・活性側ゲート配線、130・・・外周ゲート配線、131・・・水素化学濃度ピーク、132・・・下側裾、133・・・上側裾、134・・・傾き、137・・・水素化学濃度ピーク、141・・・不純物化学濃度ピーク、142・・・下側裾、143・・・上側裾、144・・・傾き、145・・・傾き、150・・・高濃度領域、160・・・活性部、164・・・ゲートパッド、181・・・低濃度領域、201・・・下面領域、211・・・第1の欠陥密度ピーク、212・・・第2の欠陥密度ピーク、213・・・欠陥密度ピーク、214・・・欠陥密度ピーク、311・・・上限、312・・・下限、313・・・上限、314・・・下限

10

20

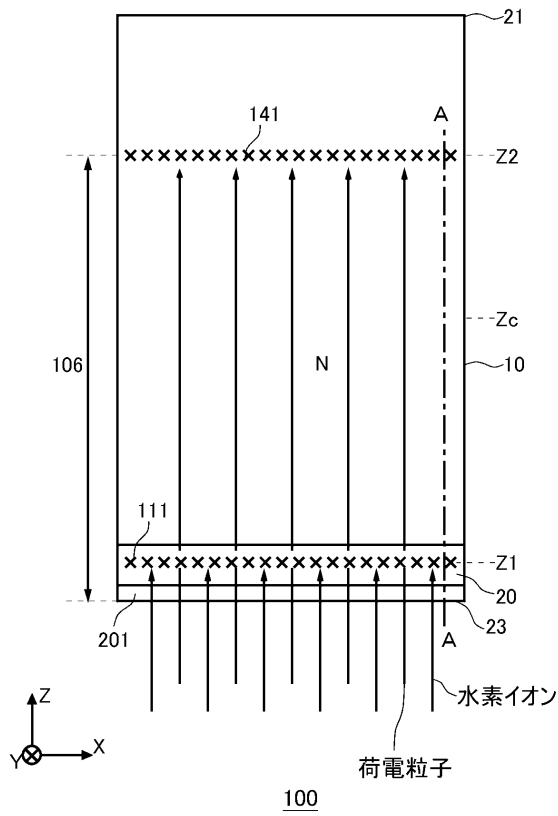
30

40

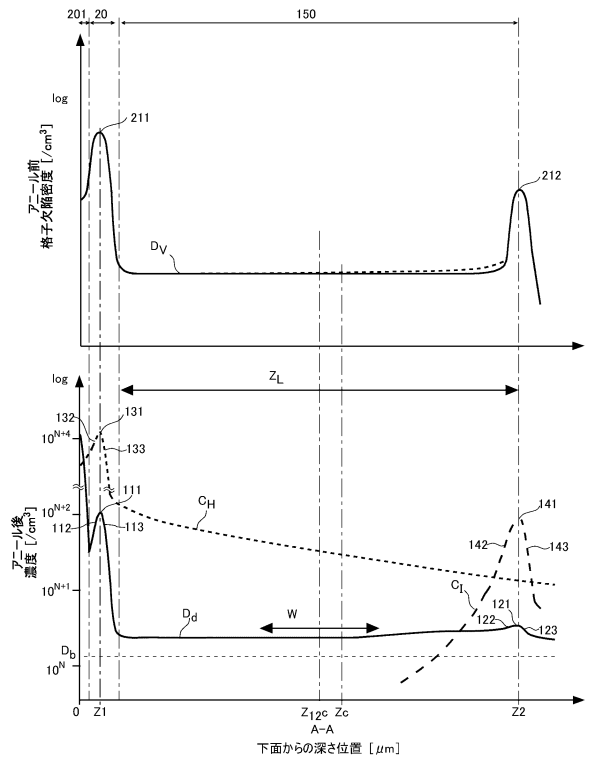
50

【図面】

【図1】



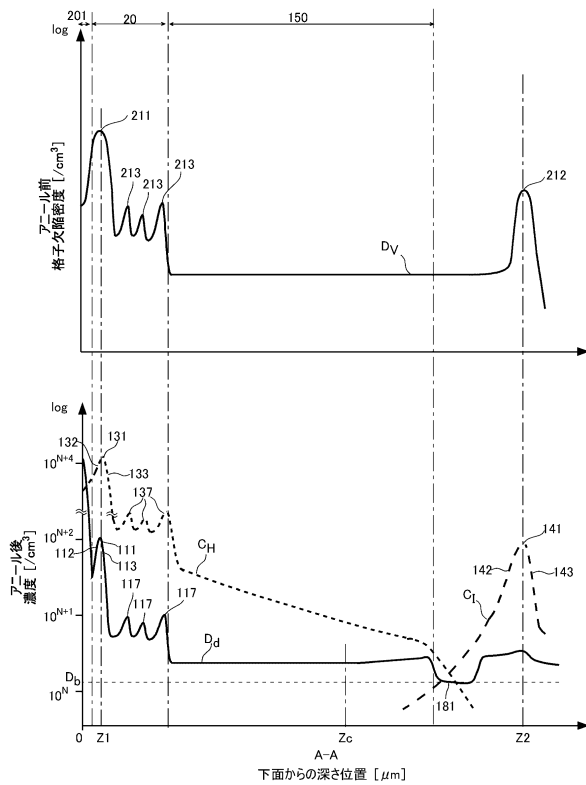
【図2】



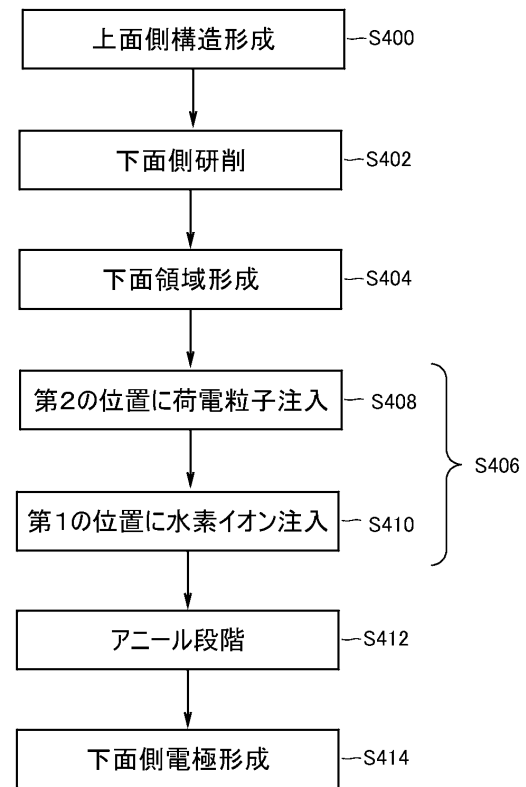
10

20

【図3】



【図4】

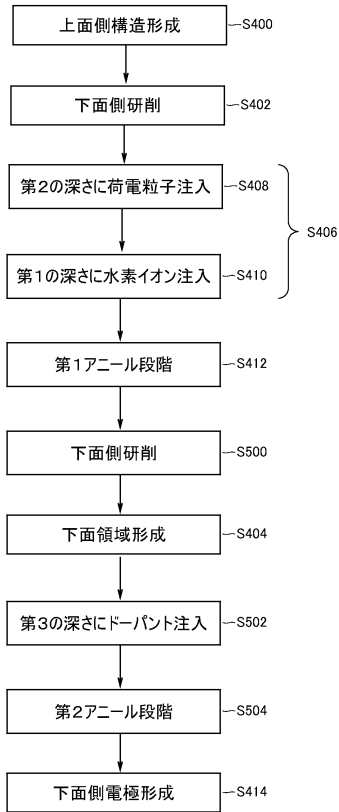


30

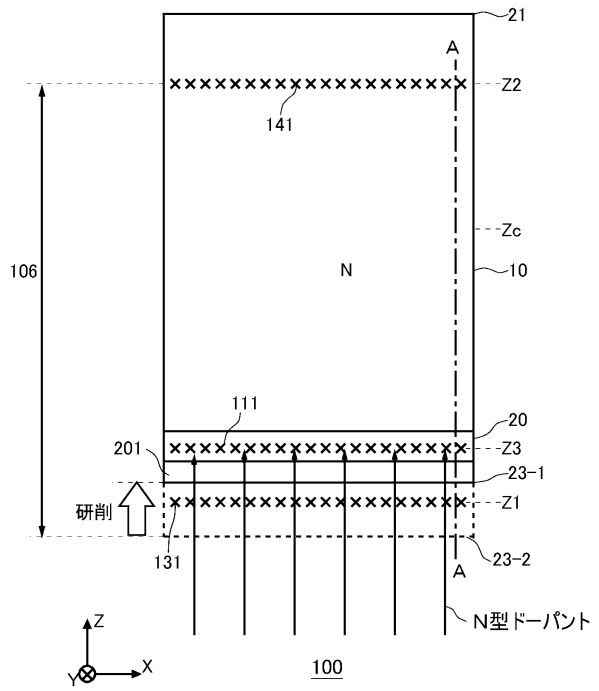
40

50

【 図 5 】



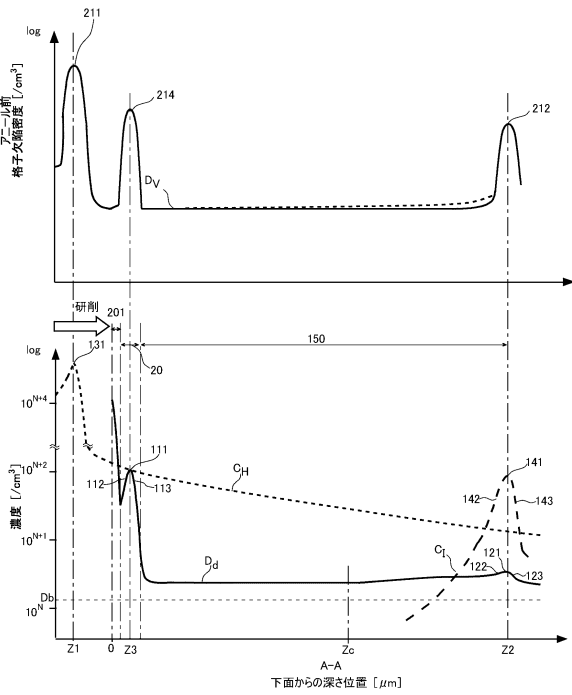
【 図 6 】



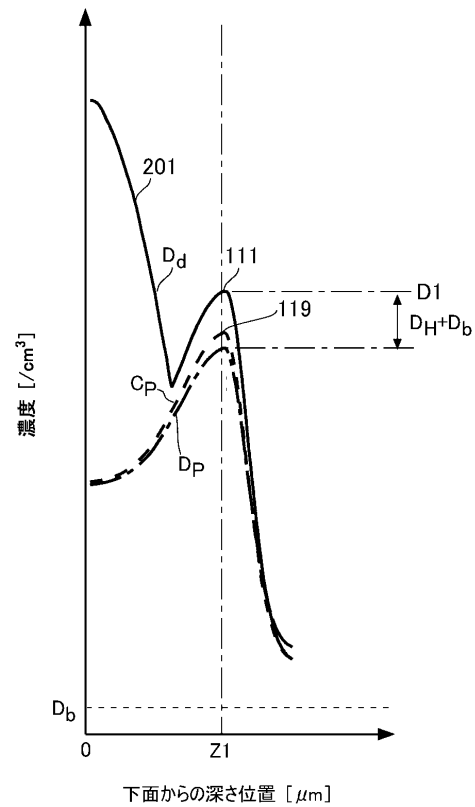
10

20

【 図 7 】



【 図 8 】

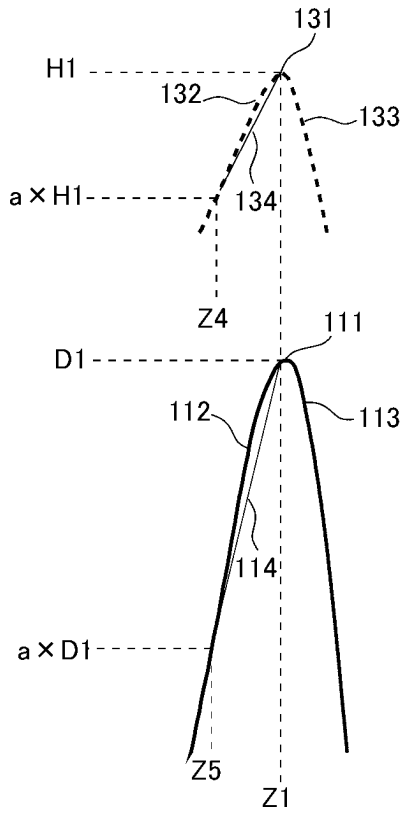


30

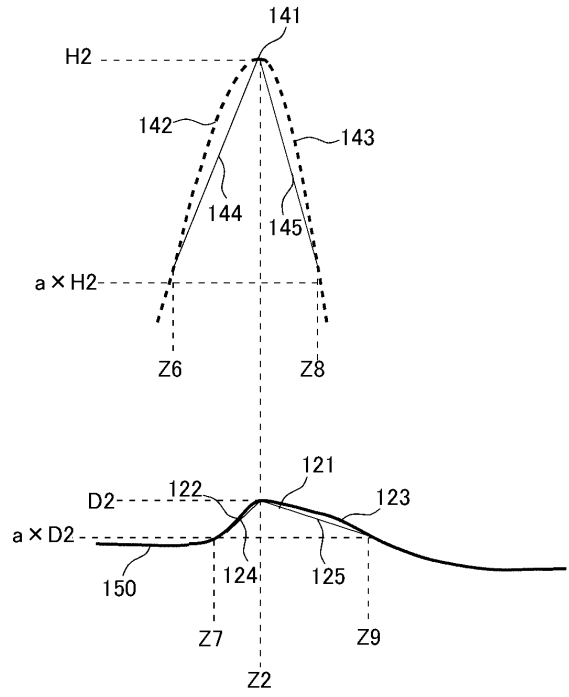
40

50

【図 9 A】



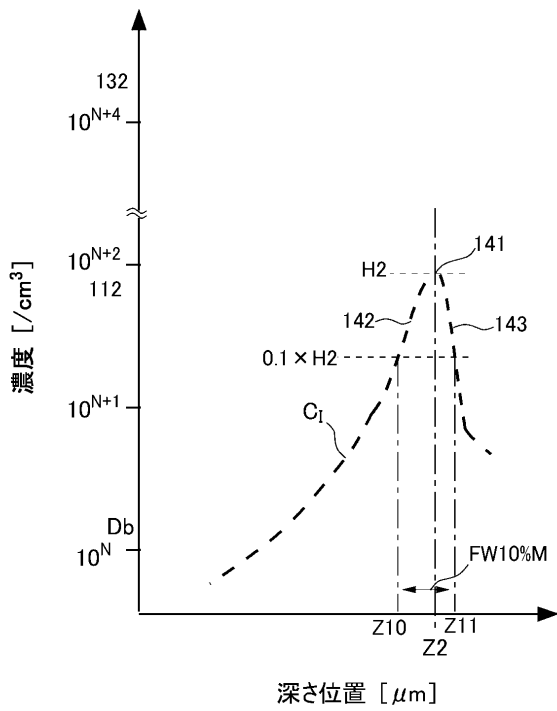
【図 9 B】



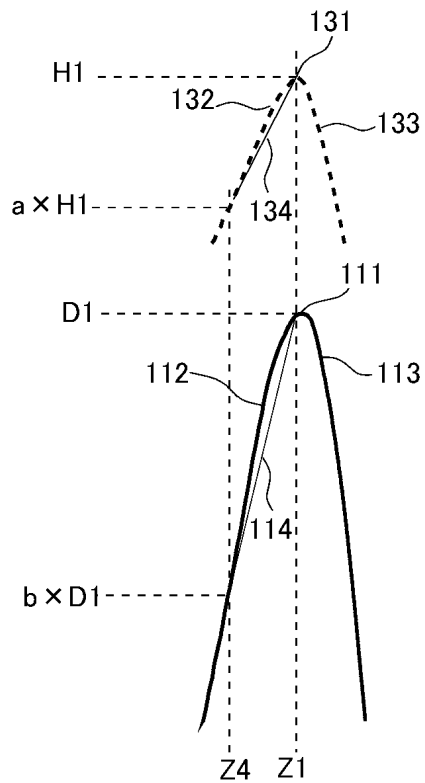
10

20

【図 9 C】



【図 10 A】

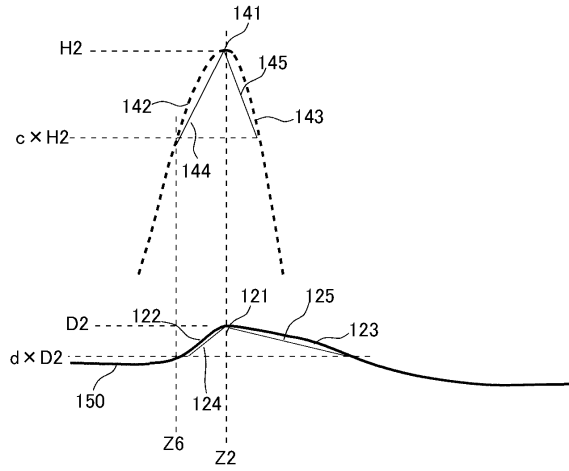


30

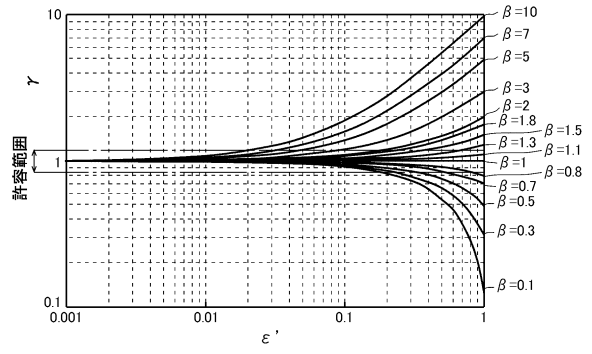
40

50

【 図 1 0 B 】

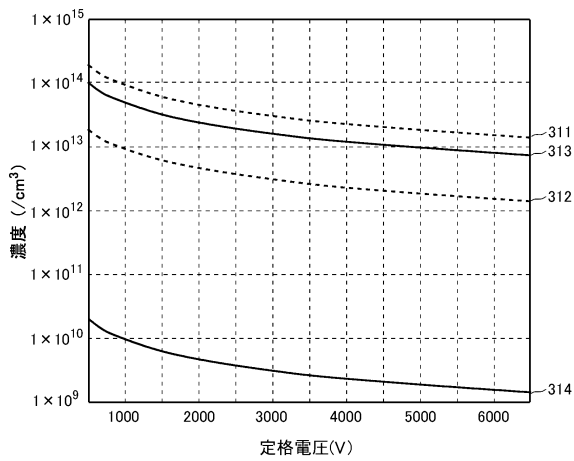


【 図 1 1 】

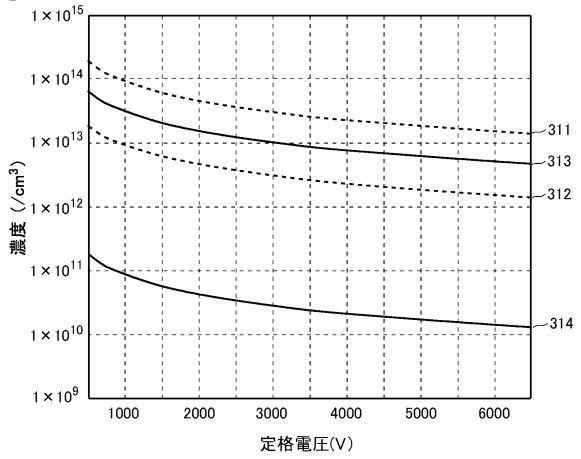


10

【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



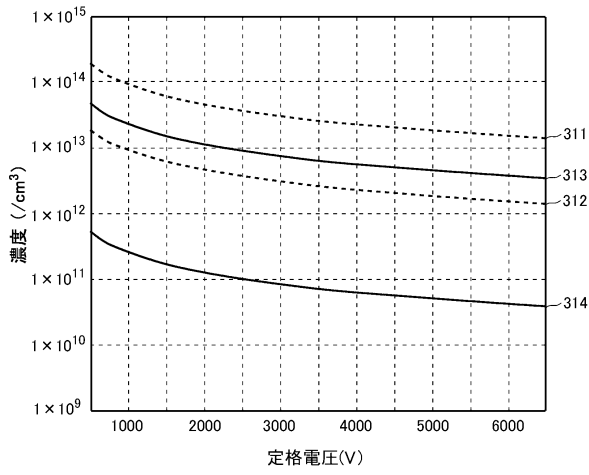
20

30

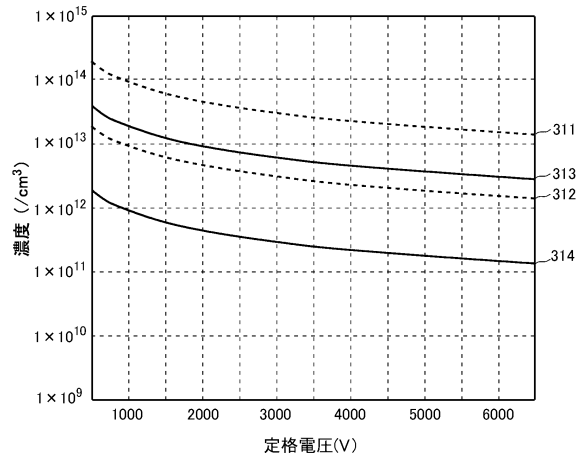
40

50

【図 1 4】

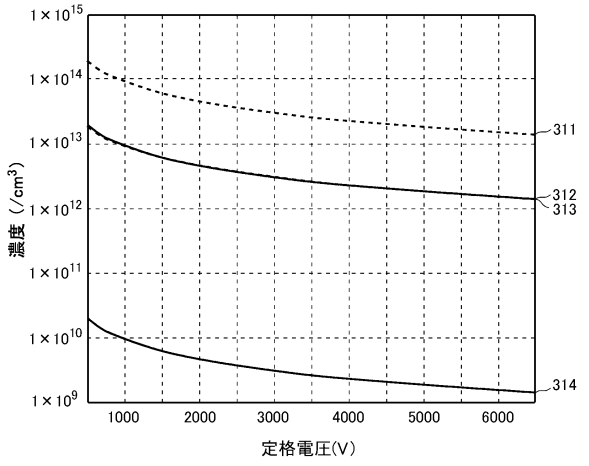


【図 1 5】

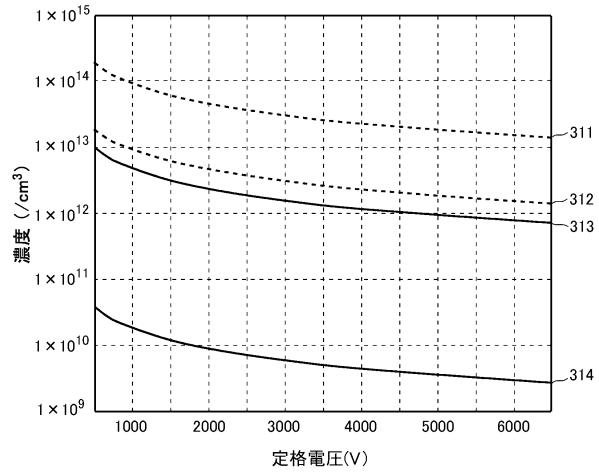


10

【図 1 6】



【図 1 7】



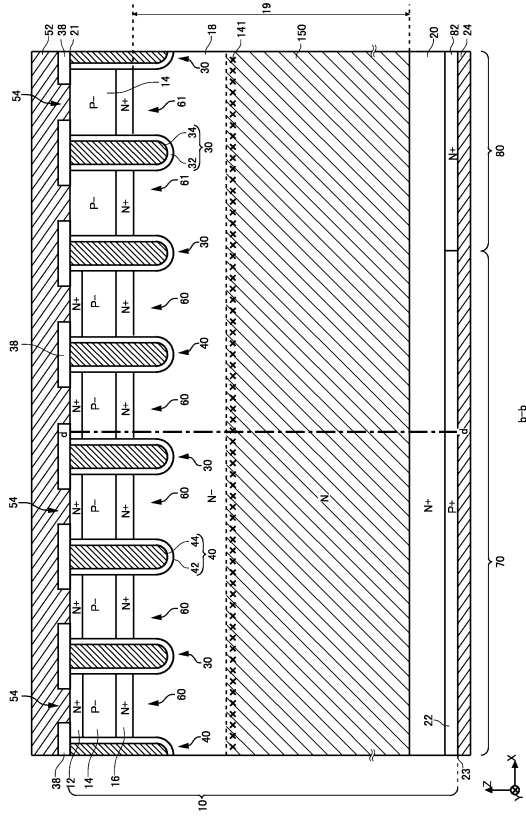
20

30

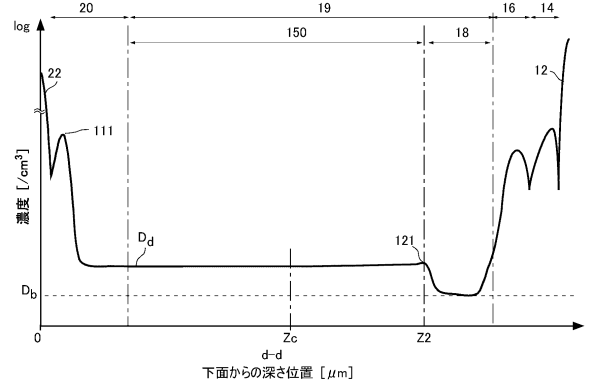
40

50

【図 2 2 A】



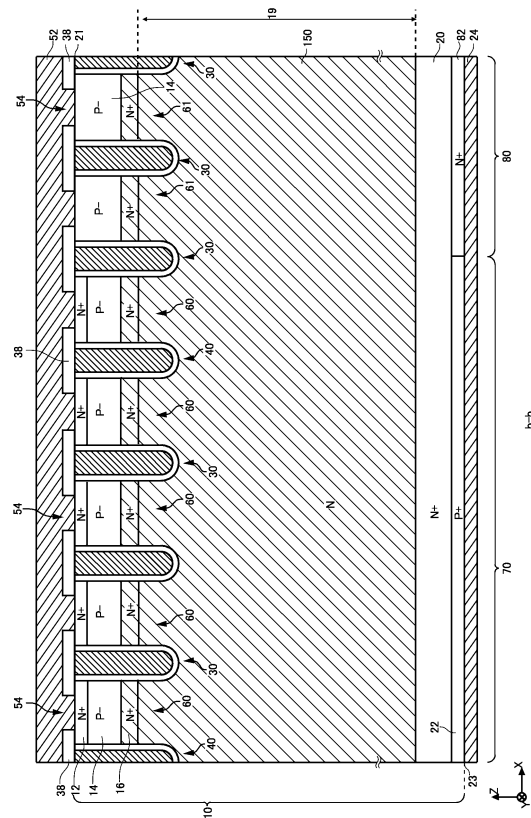
【図 2 2 B】



10

20

【図 2 3】



30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類	F I		
H 0 1 L 21/322(2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 2 Q
H 0 1 L 29/861(2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 3 A
H 0 1 L 29/868(2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 5 B
H 0 1 L 21/8234(2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 5 G
H 0 1 L 27/06 (2006.01)	H 0 1 L	29/78	6 5 7 A
	H 0 1 L	29/78	6 5 7 D
	H 0 1 L	29/78	6 5 7 F
	H 0 1 L	29/78	6 5 8 H
	H 0 1 L	21/265	F
	H 0 1 L	21/265	6 0 2 C
	H 0 1 L	21/322	J
	H 0 1 L	21/322	L
	H 0 1 L	29/91	C
	H 0 1 L	29/91	J
	H 0 1 L	29/06	3 0 1 D
	H 0 1 L	29/06	3 0 1 G
	H 0 1 L	29/06	3 0 1 V
	H 0 1 L	27/06	1 0 2 A

神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号 富士電機株式会社内

(72)発明者 根本 道生

神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号 富士電機株式会社内

審査官 石塚 健太郎

(56)参考文献 国際公開第2019/181852(WO, A1)
 国際公開第2017/047276(WO, A1)
 国際公開第2017/047285(WO, A1)
 特開2013-138172(JP, A)
 国際公開第2007/055352(WO, A1)
 国際公開第2020/036015(WO, A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H 0 1 L 2 1 / 3 3 6
 H 0 1 L 2 9 / 7 8
 H 0 1 L 2 9 / 0 6
 H 0 1 L 2 9 / 7 3 9
 H 0 1 L 2 1 / 2 6 5
 H 0 1 L 2 1 / 3 2 2
 H 0 1 L 2 9 / 8 6 1
 H 0 1 L 2 1 / 8 2 3 4