

【公報種別】特許法第 17 条の 2 の規定による補正の掲載
 【部門区分】第 7 部門第 2 区分
 【発行日】平成 26 年 8 月 28 日 (2014.8.28)

【公開番号】特開 2013-110238 (P2013-110238A)
 【公開日】平成 25 年 6 月 6 日 (2013.6.6)
 【年通号数】公開・登録公報 2013-028
 【出願番号】特願 2011-253556 (P2011-253556)
 【国際特許分類】

H 0 1 L 29/78 (2006.01)

H 0 1 L 29/12 (2006.01)

H 0 1 L 21/336 (2006.01)

【F I】

H 0 1 L 29/78 6 5 2 T

H 0 1 L 29/78 6 5 3 A

H 0 1 L 29/78 6 5 2 K

H 0 1 L 29/78 6 5 8 G

【手続補正書】
 【提出日】平成 26 年 7 月 2 日 (2014.7.2)
 【手続補正 1】
 【補正対象書類名】明細書
 【補正対象項目名】全文
 【補正方法】変更
 【補正の内容】
 【発明の詳細な説明】
 【発明の名称】炭化珪素半導体装置およびその製造方法
 【技術分野】
 【0001】

この発明は、炭化珪素半導体装置およびその製造方法に関し、より特定的には、トレンチが形成された炭化珪素層を有する炭化珪素半導体装置およびその製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

特開 2009-188221 号公報によれば、トレンチが形成された炭化珪素基板を有する MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) が開示されている。また高いチャネル移動度を有する MOSFET を得るためには、トレンチ側壁の角度を特定の角度に制御する必要があることが開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】特開 2009-188221 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、トレンチ側壁の角度をチャネル移動度の観点で定めた場合、トレンチのアスペクト比が高くなることでトレンチ内にゲート電極を埋め込む工程が困難になることがあった。本発明は、このような課題を解決するためになされたものであり、この発明の目的は、好ましいチャネル特性と、トレンチ中へのゲート電極の埋め込みの容易性とを兼ね備えた炭化珪素半導体装置およびその製造方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明の炭化珪素半導体装置は、炭化珪素層と、ゲート絶縁膜と、ゲート電極とを有する。炭化珪素層は、厚さ方向を有し、第1の主面と第1の主面に対して厚さ方向において対向する第2の主面とを有する。また炭化珪素層は、第1の主面をなし第1の導電型を有する第1の領域と、第1の領域上に設けられ、第1の導電型と異なる第2の導電型を有する第2の領域と、第2の領域の上に設けられ、第1の導電型を有する第3の領域とを含む。炭化珪素層の第2の主面上には内面を有するトレンチが形成されている。トレンチは第2および第3の領域を貫通している。ゲート絶縁膜はトレンチの内面を覆っている。ゲート電極はトレンチの少なくとも一部を埋めている。トレンチの内面は、第1の側壁と、第1の側壁よりも深くに位置しかつ第2の領域からなる部分を有する第2の側壁とを有する。第2の主面に対する第1の側壁の傾斜は、第2の主面に対する第2の側壁の傾斜に比して小さい。

【0006】

上記炭化珪素半導体装置によれば、トレンチの内面は、チャンネルとして機能し得る第2の領域からなる部分を有する第2の側壁を含む。この第2の側壁の、炭化珪素層の第2の主面に対する傾斜は、好ましいチャンネル特性が得られるように選択され得る。第2の側壁よりも浅くに位置する第1の側壁の傾斜がより小さくされることで、トレンチの浅い部分がより大きく開口するので、トレンチ中にゲート電極をより容易に埋め込むことができる。

【0007】

好ましくは、第2の側壁は、第1および第2の領域の境界と、第2および第3の領域の境界とをつないでいる。

【0008】

これにより、チャンネル特性上好ましい傾斜が設けられた第2の側壁からなる部分により、第1および第2の領域の間を結ぶチャンネルが設けられる。このチャンネルはその全体が、好ましい傾斜を有する側壁からなるので、チャンネル特性をより好ましいものとすることができる。

【0009】

より好ましくは、ゲート電極は、少なくとも第1および第2の側壁の間に達するまでトレンチを埋めている。

【0010】

これによりゲート電極は深さ方向において第2の側壁の全体に対向するように埋められる。よって、第2の側壁からなる部分により設けられるチャンネルの全体を制御することができるように、トレンチ中に十分にゲート電極が埋められる。

【0011】

本発明の炭化珪素半導体装置の製造方法は、次の工程を有する。厚さ方向を有し、第1の主面と第1の主面に対して厚さ方向において対向する第2の主面とを有する炭化珪素層が準備される。炭化珪素層は、第1の主面をなし第1の導電型を有する第1の領域と、第1の領域上に設けられ、第1の導電型と異なる第2の導電型を有する第2の領域と、第2の領域の上に設けられ、第1の導電型を有する第3の領域とを含む。炭化珪素層の第2の主面上に、開口部を有するマスクが形成される。マスクを用いて炭化珪素層をエッチングすることにより、炭化珪素層の第2の主面上に、内面を有し、第2および第3の領域を貫通するトレンチが形成される。トレンチを形成する工程は、トレンチの内面が、第1の側壁と、第1の側壁よりも深くに位置しかつ第2の領域からなる部分を有する第2の側壁とを有するように、かつ、第2の主面に対する第1の側壁の傾斜が、第2の主面に対する第2の側壁の傾斜に比して小さくなるように行われる。トレンチの内面を覆うゲート絶縁膜が形成される。トレンチの少なくとも一部を埋めるゲート電極が形成される。

【0012】

上記製造方法によれば、トレンチの内面は、チャンネルとして機能し得る第2の領域から

なる部分を有する第２の側壁を含む。この第２の側壁の、炭化珪素層の第２の主面に対する傾斜は、好ましいチャネル特性が得られるように選択され得る。第２の側壁よりも浅くに位置する第１の側壁の傾斜がより小さくされることで、トレンチの浅い部分がより大きく開口するので、トレンチ中にゲート電極をより容易に埋め込むことができる。

【００１３】

上記製造方法におけるトレンチを形成する工程は、次の工程を含んでもよい。炭化珪素層を物理的にエッチングすることにより、炭化珪素層の第２の主面上に凹部が形成される。凹部の内面に対して熱エッチングが行われる。

【００１４】

これにより、第２の主面に対する第１の側壁の傾斜が、第２の主面に対する第２の側壁の傾斜に比して小さくなるように、トレンチを形成することができる。

【００１５】

好ましくは、凹部を形成する工程は、凹部が第２の領域よりも浅くに位置するように行われる。

【００１６】

これにより、第１の側壁が過度に深く形成されることを避けることができる。よってチャネルのより多くの部分を、チャネル特性上好ましい傾斜を有する第２の側壁によってなすことができる。

【００１７】

より好ましくは、凹部を形成する工程は、凹部の内面が、第１の側面と、第１の側面よりも深くに位置し、かつ第１の側面に対して傾斜した第２の側面とを含むように行われる。

【００１８】

これにより、物理的なエッチングにより形成された第１および第２の側面のそれぞれが熱エッチングによって侵食されることで、第１および第２の側壁をより確実に形成することができる。

【００１９】

上記製造方法は、トレンチを形成する工程の前に、炭化珪素層中にマスクを用いてイオンを注入することにより、炭化珪素層中に変質層を形成する工程をさらに有してもよい。この場合、トレンチを形成する工程は、炭化珪素層のうち変質層を含む領域を熱エッチングにより除去する工程を含み得る。

【００２０】

これにより、炭化珪素層中に形成された変質層において熱エッチングのエッチングレートを高めることができる。よって熱エッチングの前半過程においては主に変質層のエッチングが相対的に高いレートで行われ、後半過程においては通常の炭化珪素層のエッチングが相対的に低いレートで行われる。このような２段階の過程を経ることで、互いに傾斜の程度が異なる第１および第２の側壁がより確実に形成される。

【００２１】

好ましくは、変質層を形成する工程は、変質層が第２の領域よりも浅くに位置するように行われる。

【００２２】

これにより、第２の側壁がより浅い位置にまで形成されるので、第２の領域のうち浅くに位置する部分にも第２の側壁を形成することができる。よって第２の領域からなるチャネルのより広い部分を、好ましい傾斜を有する側壁によってなすことができるので、チャネル特性をより好ましいものとすることができる。

【００２３】

好ましくは、変質層を形成する工程は常温下で行われる。

これにより、常温下でイオン注入が行われるので、高温下でイオン注入が行われる場合に比して、イオン注入の際に生じる結晶欠陥の程度がより大きくなる。この結果、変質層に対する熱エッチングのエッチングレートがより高まるので、炭化珪素層中の変質層とそ

れ以外の部分とのエッチングレートの差異がより大きくなる。よって、互いに傾斜の程度が異なる第１および第２の側壁がより確実に形成される。

【００２４】

上記製造方法における炭化珪素層を準備する工程は、第３の領域の結晶性が第２の領域の結晶性よりも低くなるように行われてもよい。

【００２５】

これにより熱エッチングにおいて、第３の領域のエッチングレートが、第２の領域のエッチングレートよりも高くなる。よって、互いに傾斜の程度が異なる第１および第２の側壁がより確実に形成される。

【発明の効果】

【００２６】

上述したように本発明によれば、好ましいチャネル特性と、トレンチ中へのゲート電極の埋め込みの容易性とを両立させることができる。

【図面の簡単な説明】

【００２７】

【図１】本発明の実施の形態１における炭化珪素半導体装置の構造を概略的に示す断面図である。

【図２】本発明の実施の形態１における炭化珪素半導体装置の製造方法の第１工程を概略的に示す断面図である。

【図３】本発明の実施の形態１における炭化珪素半導体装置の製造方法の第２工程を概略的に示す断面図である。

【図４】本発明の実施の形態１における炭化珪素半導体装置の製造方法の第３工程を概略的に示す断面図である。

【図５】本発明の実施の形態１における炭化珪素半導体装置の製造方法の第４工程を概略的に示す断面図である。

【図６】本発明の実施の形態１における炭化珪素半導体装置の製造方法の第５工程を概略的に示す断面図である。

【図７】本発明の実施の形態１における炭化珪素半導体装置の製造方法の第６工程を概略的に示す断面図である。

【図８】本発明の実施の形態１における炭化珪素半導体装置の製造方法の第７工程を概略的に示す断面図である。

【図９】図１の炭化珪素半導体装置の構造の第１の変形例を概略的に示す断面図である。

【図１０】図１の炭化珪素半導体装置の構造の第２の変形例を概略的に示す断面図である。

【図１１】本発明の実施の形態２における炭化珪素半導体装置の製造方法の第１工程を概略的に示す断面図である。

【図１２】本発明の実施の形態２における炭化珪素半導体装置の製造方法の第２工程を概略的に示す断面図である。

【図１３】本発明の実施の形態３における炭化珪素半導体装置の製造方法の第１工程を概略的に示す断面図である。

【図１４】本発明の実施の形態３における炭化珪素半導体装置の製造方法の第２工程を概略的に示す断面図である。

【発明を実施するための形態】

【００２８】

以下、図面に基づいて本発明の実施の形態について説明する。なお、以下の図面において同一または相当する部分には同一の参照番号を付しその説明は繰返さない。また、本明細書中における結晶学的説明においては、個別方位を〔 〕、集合方位を< >、個別面を（ ）、集合面を{ }でそれぞれ示している。また、負の指数については、結晶学上、“ - ”（バー）を数字の上に付けることになっているが、本明細書中では、数字の前に負の符号を付けている。

【 0 0 2 9 】

(実施の形態 1)

図 1 に示すように、本実施の形態の炭化珪素半導体装置としての MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 101 は、基板 40 と、エピタキシャル層 (炭化珪素層) 50 と、ゲート絶縁膜 61 と、層間絶縁膜 62 と、ゲート電極 70 と、ソース電極 71 と、ソース配線電極 72 と、ドレイン電極 81 とを有する。

【 0 0 3 0 】

基板 40 は、n 型 (第 1 の導電型) の半導体、または導体から作られており、好ましくは単結晶炭化珪素基板である。基板 40 の一方側の上にはドレイン電極 81 が設けられており、他方側の上にはエピタキシャル層 50 が設けられている。ドレイン電極 81 はオーミック電極である。

【 0 0 3 1 】

エピタキシャル層 50 は、厚さ方向 (図中、縦方向) を有し、基板 40 に面する下面 (第 1 の主面) P1 と、下面 P1 に対して厚さ方向において対向する上面 (第 2 の主面) P2 とを有する。エピタキシャル層 50 の結晶構造が六方晶の場合、上面 P2 の面方位は好ましくは、実質的に { 0 0 0 - 1 } 面であり、より好ましくは、実質的に (0 0 0 - 1) 面である。またその結晶構造が立方晶の場合、上面 P2 の面方位は好ましくは、実質的に { 1 1 1 } 面である。エピタキシャル層 50 は、第 1 ~ 第 3 の領域 51 ~ 53 と、コンタクト領域 54 とを有する。第 1 の領域 51 は、下面 P1 をなしており、n 型を有する。第 2 の領域 52 は、第 1 の領域 51 上に設けられており、n 型とは異なる導電型すなわち p 型 (第 2 の導電型) を有する。第 3 の領域 53 は、第 2 の領域 52 の上に設けられており、n 型を有する。コンタクト領域 54 は、p 型を有し、第 2 の領域 52 とソース電極 71 とをつないでいる。

【 0 0 3 2 】

エピタキシャル層 50 の上面 P2 上には、内面を有するトレンチ TR が形成されている。トレンチ TR は、第 2 および第 3 の領域 52、53 を貫通している。トレンチ TR の内面は、側壁 SW を有する。側壁 SW は、上部側壁 (第 1 の側壁) SW1 と、上部側壁 SW1 よりも深くに位置しかつ第 2 の領域 52 からなる部分を有する下部側壁 SW2 (第 2 の側壁) とを有する。上面 P2 に対する上部側壁 SW1 の傾斜は、上面 P2 に対する下部側壁 SW2 の傾斜に比して小さい。エピタキシャル層 50 の結晶構造が六方晶の場合、下部側壁 SW2 の結晶面は、好ましくは、実質的に { 0 - 3 3 - 8 } 面または { 0 1 - 1 - 4 } 面となっている。またその結晶構造が立方晶である場合、下部側壁 SW2 の結晶面は、好ましくは、実質的に { 1 0 0 } 面となっている。下部側壁 SW2 は、第 1 および第 2 の領域 51、52 の境界と、第 2 および第 3 の領域 52、53 の境界とをつないでいる。トレンチ TR の内面上における上部側壁 SW1 および下部側壁 SW2 の間の屈曲点 K101 は、第 2 および第 3 の領域 52、53 の境界に位置している。

【 0 0 3 3 】

ゲート絶縁膜 61 はトレンチ TR の内面を覆っている。ゲート電極 70 はトレンチ TR の少なくとも一部を埋めている。また本実施の形態においては、ゲート電極 70 は、少なくとも上部側壁 SW1 および下部側壁 SW2 の間に達するまでトレンチ TR を埋めている。すなわちゲート電極 70 は少なくとも屈曲点 K101 に達するまで埋め込まれており、本実施の形態においては、ゲート電極 70 は屈曲点 K101 を越えて埋め込まれている。

【 0 0 3 4 】

ソース電極 71 は、第 3 の領域 53 およびコンタクト領域 54 の各々に接するように配置されたオーミック電極である。ソース配線電極 72 は、ソース電極 71 上に配置されている。ソース配線電極 72 は、層間絶縁膜 62 によってゲート電極 70 と電氣的に絶縁されている。

【 0 0 3 5 】

次に MOSFET 101 (図 1) の製造方法について説明する。

図2に示すように、基板40上にn型のエピタキシャル層50が形成される。このためのエピタキシャル成長は、たとえば原料ガスとしてシラン(SiH_4)とプロパン(C_3H_8)との混合ガスを用い、キャリアガスとしてたとえば水素ガス(H_2)を用いたCVD法により実施することができる。またエピタキシャル成長の際に、n型を付与するための導電型不純物としてたとえば窒素(N)またはリン(P)を導入することが好ましい。エピタキシャル層50のこのn型不純物の濃度は、たとえば $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

【0036】

図3に示すように、エピタキシャル層50上への不純物イオンの注入によって、エピタキシャル層50中に第1～第3の領域51～53が形成される。第2の領域52を形成するためのイオン注入においては、たとえばアルミニウム(Al)が用いられる。第3の領域53を形成するためのイオン注入においては、たとえばリン(P)が用いられる。イオンの加速エネルギーを調整することにより、第2および第3の領域52、53の各々が形成される領域の深さは調整される。

【0037】

図4に示すように、エピタキシャル層50の上面P2上にマスク90が形成される。好ましくはマスク90の形成は堆積法によって行われる。ここで堆積法とは、形成される膜の材料のすべてが外部から供給されることを特徴とする方法である。よって堆積法は、熱酸化法、すなわち、膜が形成されることになる領域に既に存在していた元素を材料の一部として利用する方法を含まない。堆積法としては、たとえば、CVD(Chemical Vapor Deposition)法、スパッタ法、または抵抗加熱型蒸着法を用いることができる。

【0038】

図5に示すように、マスク90に開口部が形成される。開口部の形成は、たとえば、フォトリソグラフィおよびエッチングを用いて行い得る。開口部の幅は、たとえば $0.1 \mu\text{m}$ 以上 $2 \mu\text{m}$ 以下である。次にマスク90を用いてエピタキシャル層50をエッチングすることにより、エピタキシャル層50の上面P2上に、内面を有し、第2および第3の領域53を貫通するトレンチTR(図1)が形成される。トレンチTRを形成する工程は、トレンチTRの内面が、上部側壁SW1と、上部側壁SW1よりも深くに位置しかつ第2の領域52からなる部分を有する下部側壁SW2とを有するように、かつ、上面P2に対する上部側壁SW1の傾斜が、上面P2に対する下部側壁SW2の傾斜に比して小さくなるように行われる。以下、このエッチング工程について説明する。

【0039】

図6および図7に示すように、エピタキシャル層50を物理的にエッチングすることにより、エピタキシャル層50の上面P2上に凹部RCが形成される。本実施の形態においては、凹部RCは、図7に示すように、第2の領域52よりも浅くに位置するように形成される。また凹部RCは、その側面SDが、上部側面(第1の側面)SD1と、上部側面SD1よりも深くに位置し、かつ上部側面SD1に対して傾斜した下部側面(第2の側面)SD2とを含むように形成される。これにより、上部側面SD1および下部側面SD2の間に屈曲点K1が設けられる。

【0040】

具体的には、まず、矢印RT(図6)に示すように上面P2を面内回転させながら、上面P2に対して傾いた入射角を有するイオンビームIBを用いたイオンビームエッチングが行われる。このイオンビームエッチングにより上面P2上に凹部RCpが形成される。凹部RCpは、上面P2に対して傾いた内面を有する。次に、イオンビームIBの入射角が上面P2に対してより垂直に近いものとされたイオンビームエッチング、またはRIE(Reactive Ion Etching)が行われることで、図7に示すように、エピタキシャル層50の上面P2上に凹部(RC)が形成される。RIEとしては、たとえば、反応ガスとして SF_6 または SF_6 と O_2 との混合ガスを用いたICP-RIE(Induction Coupled Plasma-RIE)を用いることができる。

【 0 0 4 1 】

次に凹部 R C の内面に対して熱エッチングが行われる。具体的には、炭化珪素層に、反応ガスを含むプロセスガスに接触させながら炭化珪素層を加熱する処理が行われる。反応性ガスとしては、塩素系ガスを用いることができ、たとえば塩素ガスを用いることができる。またプロセスガス中に酸素原子を含むガスが混ぜられてもよく、たとえば酸素ガスが混ぜられてもよい。またプロセスガスは、窒素ガス、アルゴンガス、またはヘリウムガスなどのキャリアガスを含んでもよい。熱エッチングにおける熱処理温度は、好ましくは 700 以上 1200 以下とされる。熱処理温度を 700 以上とすることで、SiC のエッチング速度 70 $\mu\text{m}/\text{hr}$ 程度を確保し得る。下限温度は、より好ましくは 800 以上とされ、さらに好ましくは 900 以上とされる。上限温度は、より好ましくは 1100 以下とされ、さらに好ましくは 1000 以下とされる。また、この場合にマスク 90 の材料として酸化珪素、窒化珪素、酸化アルミニウム、窒化アルミニウム、または窒化ガリウムを用いると、マスク 90 の材料に対する SiC のエッチング選択比を極めて大きくすることができるので、SiC のエッチング中のマスク 90 の消耗を抑制することができる。

【 0 0 4 2 】

図 8 に示すように、上記の熱エッチングにより、トレンチ T R が形成される。なおこの熱エッチングの進行にともなって、屈曲点 K 1 (図 7) が徐々に移動して屈曲点 K 1 0 1 に至る。次にマスク 90 が、たとえばエッチングにより除去される。

【 0 0 4 3 】

再び図 1 を参照して、上面 P 2 の一部の上への選択的なイオン注入によって、コンタクト領域 5 4 が形成される。次にエピタキシャル層 5 0 中の不純物イオンを活性化するためのアニールが行われる。次にエピタキシャル層 5 0 のトレンチ T R の内面および上面 P 2 を覆うゲート絶縁膜 6 1 が形成される。ゲート絶縁膜 6 1 は、好ましくは酸化珪素膜である。酸化珪素膜は、たとえばエピタキシャル層 5 0 を熱酸化することによって形成され得る。

【 0 0 4 4 】

次にトレンチ T R の少なくとも一部を埋めるゲート電極 7 0 が形成される。この形成は、たとえば、ゲート電極 7 0 となる材料を堆積した後に CMP (Chemical Mechanical Polishing) を行うことで行い得る。次に、層間絶縁膜 6 2、ソース電極 7 1、およびソース配線電極 7 2 が形成される。これにより、図 1 に示す MOSFET 101 が得られる。

【 0 0 4 5 】

本実施の形態によれば、トレンチ T R の内面は、MOSFET 101 のチャネルとして機能し得る第 2 の領域 5 2 からなる部分を有する下部側壁 S W 2 を含む。この下部側壁 S W 2 の、エピタキシャル層 5 0 の上面 P 2 に対する傾斜は、好ましいチャネル特性が得られるように選択され得る。一方で、下部側壁 S W 2 よりも浅くに位置する上部側壁 S W 1 の傾斜がより 小さく されることで、トレンチ T R の浅い部分がより大きく開口するので、トレンチ T R 中にゲート電極 7 0 をより容易に埋め込むことができる。

【 0 0 4 6 】

下部側壁 S W 2 は、第 1 および第 2 の領域 5 1、5 2 の境界と、第 2 および第 3 の領域 5 2、5 3 の境界とをつないでいる。これにより、チャネル特性上好ましい傾斜が設けられた下部側壁 S W 2 からなる部分により、第 1 および第 2 の領域 5 1、5 2 の間を結ぶチャネルが設けられる。このチャネルはその全体が、好ましい傾斜を有する側壁からなるので、チャネル特性をより好ましいものとすることができる。

【 0 0 4 7 】

ゲート電極 7 0 は、少なくとも上部側壁 S W 1 および下部側壁 S W 2 の間に達するまでトレンチ T R を埋めている。これによりゲート電極 7 0 は深さ方向において下部側壁 S W 2 の全体に対向するように埋められる。よって、下部側壁 S W 2 からなる部分により設けられるチャネルの全体を制御することができるように、トレンチ T R 中に十分にゲート電

極 70 が埋められる。

【0048】

エピタキシャル層 50 を物理的にエッチングすることにより、エピタキシャル層 50 の上面 P2 上に凹部 RC が形成される。凹部 RC の内面に対して熱エッチングが行われる。これによりより確実に、上面 P2 に対する上部側壁 SW1 の傾斜が、上面 P2 に対する下部側壁 SW2 の傾斜に比して小さくなるように、トレンチ TR を形成することができる。

【0049】

凹部が第 2 の領域 52 よりも浅くに位置するように形成される。これにより、上部側壁 SW1 が過度に深く形成されることを避けることができる。よってチャンネルのより多くの部分を、チャンネル特性上好ましい傾斜を有する下部側壁 SW2 によってなすことができる。

【0050】

凹部 RC を形成する工程は、凹部の内面が、上部側面 SD1 と、上部側面 SD1 よりも深くに位置し、かつ 上部側面 SD1 に対して傾斜した 下部側面 SD2 とを含むように行われる。これにより、物理的なエッチングにより形成された上部側面 SD1 および下部側面 SD2 のそれぞれが熱エッチングによって侵食されることで、上部側壁 SW1 および下部側壁 SW2 をより確実に形成することができる。

【0051】

次に MOSFET 101 の 2 つの変形例について説明する。

図 9 に示すように、MOSFET 102 においては、トレンチ TR の内面上における上部側壁 SW1 および下部側壁 SW2 の間の屈曲点 K102 は、第 2 および第 3 の領域 52、53 の境界から離れて第 3 の領域 53 上に位置している。この変形例によれば、工程ばらつきによって屈曲点 K102 の位置がばらついて、下部側壁 SW2 が、第 1 および第 2 の領域 51、52 の境界と、第 2 および第 3 の領域 52、53 の境界とをより確実につなぐことができる。

【0052】

図 10 に示すように、MOSFET 103 においては、トレンチ TR の内面上における上部側壁 SW1 および下部側壁 SW2 の間の屈曲点 K103 は、第 2 および第 3 の領域 52、53 の境界から離れて第 2 の領域 52 上に位置している。この変形例によれば、トレンチ TR の浅い部分がより大きく開口するので、トレンチ TR 中にゲート電極 70 をより容易に埋め込むことができる。

【0053】

(実施の形態 2)

本実施の形態においては、まず実施の形態 1 における図 5 までと同様の工程が行われる。次に図 11 に示すように、エピタキシャル層 50 中にマスク 90 を用いてイオンを注入することにより、エピタキシャル層 50 中に変質層 99 が形成される。好ましくは、変質層 99 を形成する工程は、変質層 99 が第 2 の領域 52 よりも浅くに位置するように行われる。好ましくは、変質層 99 を形成する工程は常温下で行われる。次に実施の形態 1 と同様の熱エッチングが行われる。この場合、熱エッチングの前半過程において、図 12 に示すように、エピタキシャル層 50 のうち変質層 99 を含む領域が除去される。これにより形成される凹部は、屈曲点 K2 を有する。なおこれ以外の工程は実施の形態 1 とほぼ同様であるためその説明を省略する。

【0054】

本実施の形態によれば、トレンチ TR を形成する工程の前に、エピタキシャル層 50 中にマスク 90 を用いてイオンを注入することにより、エピタキシャル層 50 中に変質層 99 が形成される。この結果、トレンチ TR を形成する工程は、エピタキシャル層 50 のうち変質層 99 を含む領域を熱エッチングにより除去する工程を含む。これにより、エピタキシャル層 50 中に形成された変質層 99 において熱エッチングのエッチングレートを高めることができる。よって熱エッチングの前半過程においては主に変質層 99 のエッチングが相対的に高いレートで行われ、屈曲点 K2 (図 12) が形成される。後半過程におい

ては通常のエピタキシャル層 5 0 のエッチングが相対的に低いレートで行われ、熱エッチングの進行にともなって、屈曲点 K 2 (図 1 2) が徐々に移動して屈曲点 K 1 0 1 ~ K 1 0 3 (図 1、図 9、図 1 0) のいずれかに至る。これにより上部側壁 S W 1 および下部側壁 S W 2 がより確実に形成される。

【 0 0 5 5 】

屈曲点 K 1 0 1 ~ K 1 0 3 のいずれが得られるかは、変質層 9 9 の厚さによって調整され得る。屈曲点 K 1 0 1 または K 1 0 2 を得るには、図 1 1 に示すように、変質層 9 9 の厚さは第 3 の領域 5 3 の厚さよりも小さくされる。言い換えれば、変質層 9 9 を形成する工程が、変質層 9 9 が第 2 の領域 5 2 よりも浅くに位置するように行われる。これにより、下部側壁 S W 2 がより浅い位置にまで形成されるので、第 2 の領域 5 2 うち浅くに位置する部分にも下部側壁 S W 2 を形成することができる。よって第 2 の領域 5 2 からなるチャネルのより広い部分を、好ましい傾斜を有する側壁によってなすことができるので、チャネル特性をより好ましいものとすることができる。

【 0 0 5 6 】

変質層 9 9 を形成するためのイオン注入が常温下で行われると、高温下の場合に比して、イオン注入の際に生じる結晶欠陥の程度がより大きくなる。この結果、変質層 9 9 に対する熱エッチングのエッチングレートがより高まるので、エピタキシャル層 5 0 中の変質層 9 9 とそれ以外の部分とのエッチングレートの差異がより大きくなる。よって、互いに傾斜の程度が異なる上部側壁 S W 1 および下部側壁 S W 2 がより確実に形成される。

【 0 0 5 7 】

(実施の形態 3)

本実施の形態においては、実施の形態 1 における第 3 の領域 5 3 を形成するためのイオン注入 (図 3) において、結晶欠陥が特に生じやすいような方法が選択される。たとえば、第 3 の領域 5 3 を形成するためのイオン注入が常温下で行われる。この結果、第 3 の領域 5 3 の結晶性は、第 2 の領域 5 2 の結晶性に比して十分に低くなる。その後、実施の形態 1 における図 5 までと同様の工程が行われる。次に実施の形態 1 と同様の熱エッチングが行われる。この場合、熱エッチングの前半過程において、図 1 3 に示すように、エピタキシャル層 5 0 のうち第 3 の領域 5 3 が除去される。これにより形成される凹部は、屈曲点 K 3 を有する。そして熱エッチングの後半工程を経て、たとえば図 1 4 に示すように、トレンチ T R が形成される。なおこれ以外の工程は実施の形態 1 とほぼ同様であるためその説明を省略する。

【 0 0 5 8 】

本実施の形態によれば、エピタキシャル層 5 0 を準備する工程は、第 3 の領域 5 3 の結晶性が第 2 の領域 5 2 の結晶性よりも十分に低くなるように行われる。これにより熱エッチングにおいて、第 3 の領域 5 3 のエッチングレートが、第 2 の領域 5 2 のエッチングレートよりも高くなる。よって熱エッチングの前半過程においては第 3 の領域 5 3 のエッチングが相対的に高いレートで行われ、屈曲点 K 3 (図 1 3) が形成される。後半過程においてはエピタキシャル層 5 0 の第 2 の領域 5 2 および第 1 の領域 5 1 のエッチングが相対的に低いレートで行われ、熱エッチングの進行にともなって、屈曲点 K 3 (図 1 3) が徐々に移動して屈曲点 K 1 0 1 ~ K 1 0 3 のいずれか (図 1、図 9、図 1 0) に至る。これにより、上部側壁 S W 1 および下部側壁 S W 2 が形成される。これにより上部側壁 S W 1 および下部側壁 S W 2 がより確実に形成される。

【 0 0 5 9 】

なお上記各実施の形態においては M O S F E T について特に説明したが、炭化珪素半導体装置は M O S F E T 以外の M I S F E T (M e t a l I n s u l a t o r S e m i c o n d u c t o r F i e l d E f f e c t T r a n s i s t o r) であってもよい。また炭化珪素半導体装置は M I S F E T 以外ののものであってもよく、たとえば I G B T (I n s u l a t e d G a t e B i p o l a r T r a n s i s t o r) であってもよい。

【 0 0 6 0 】

また上記各実施の形態における n 型と p 型とが入れ替えられた形態が用いられてもよい。

【 0 0 6 1 】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【 符号の説明 】

【 0 0 6 2 】

4 0 基板、5 0 エピタキシャル層、5 1 ~ 5 3 第 1 ~ 第 3 の領域、5 4 コンタクト領域、6 1 ゲート絶縁膜、6 2 層間絶縁膜、7 0 ゲート電極、7 1 ソース電極、7 2 ソース配線電極、8 1 ドレイン電極、9 0 マスク、9 9 変質層、P 1 下面（第 1 の主面）、P 2 上面（第 2 の主面）、R C 凹部、S W 側壁、S W 1 上部側壁（第 1 の側壁）、S W 2 下部側壁（第 2 の側壁）、T R トレンチ。