(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第6647621号
(P6647621)

(45)発行日　令和2年2月14日(2020.2.14)　(24)登録日　令和2年1月17日(2020.1.17)

(51)Int.Cl.		F I		
H01L 21/22	(2006.01)	H01L	21/22	E
H01L 21/329	(2006.01)	H01L	29/91	A
H01L 29/868	(2006.01)	H01L	29/91	F
H01L 29/861	(2006.01)	H01L	29/86	301D
H01L 29/872	(2006.01)	H01L	29/78	652D

請求項の数 24　(全 32 頁)　最終頁に続く

(21)出願番号　特願2015-169698(P2015-169698)
(22)出願日　平成27年8月28日(2015.8.28)
(65)公開番号　特開2016-157911(P2016-157911A)
(43)公開日　平成28年9月1日(2016.9.1)
審査請求日　平成30年6月15日(2018.6.15)
(31)優先権主張番号　特願2015-35615(P2015-35615)
(32)優先日　平成27年2月25日(2015.2.25)
(33)優先権主張国・地域又は機関
日本国(JP)

(73)特許権者　504145342
国立大学法人九州大学
福岡県福岡市西区元岡７４４
(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　100105854
弁理士　廣瀬　一
(74)代理人　100103850
弁理士　田中　秀▲てつ▼
(72)発明者　池田　晃裕
福岡県福岡市東区箱崎六丁目１０番１号
国立大学法人九州大学

最終頁に続く

(54)【発明の名称】不純物導入装置、不純物導入方法及び半導体素子の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

光パルスの１回あたりの照射時間及び前記光パルスのエネルギー密度を考慮して式（１）を用いて決定された膜厚で、固体材料からなる対象物の表面上に、前記固体材料に対する不純物元素を含む不純物源膜を堆積するステップと、

前記光パルスを、前記照射時間及び前記エネルギー密度で前記不純物源膜に向けて照射して、前記対象物に前記不純物元素を導入するステップと、

を含み、

$t = \alpha \cdot \ln(F) - \beta$　　…（１）

ここでαは、不純物元素の種類と光パルスの照射時間とから定まる熱拡散長であり、Ｆは光パルスのエネルギー密度であり、βは補正係数であることを特徴とする不純物導入方法。

【請求項２】

前記不純物源膜の膜厚は、前記光パルスの照射により前記対象物の表面に生じる陥凹部の分布状態又は深さを更に考慮して決定されることを特徴とする請求項１に記載の不純物導入方法。

【請求項３】

前記エネルギー密度は、３．３Ｊ／ｃｍ^{2}以上６．０Ｊ／ｃｍ^{2}以下であることを特徴とする請求項２に記載の不純物導入方法。

【請求項４】

前記光パルスの波長は、１９０ｎｍ以上であることを特徴とする請求項３に記載の不純物導入方法。

【請求項５】

前記光パルスを照射する処理は、前記対象物を室温以上５００℃以下の状態として行われることを特徴とする請求項４に記載の不純物導入方法。

【請求項６】

前記固体材料が炭化珪素であり、前記不純物源膜がアルミニウム膜であることを特徴とする請求項１に記載の不純物導入方法。

【請求項７】

前記膜厚は、前記エネルギー密度をＦ（Ｊ／ｃｍ^2）としたとき、

２４０ｎｍ以上、

（４．４×１０^3・ｌｎ（Ｆ）－５３５０）ｎｍ以下、の範囲内で決定されることを特徴とする請求項６に記載の不純物導入方法。

【請求項８】

第１導電型の第１の半導体領域を有する中間生成物を用意する工程と、

光パルスの１回あたりの照射時間及び前記光パルスのエネルギー密度を考慮して式（１）を用いて決定される膜厚で、前記第１の半導体領域に対する不純物元素であって、第２導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜を前記第１の半導体領域の表面上に堆積する工程と、

前記光パルスを、前記照射時間及び前記エネルギー密度で前記不純物源膜に向けて照射して、前記第１の半導体領域に前記不純物元素を導入することにより、第２導電型の第２の半導体領域を形成して、前記中間生成物にｐｎ接合を含む素子構造を形成する工程と、

を含み、

ｔ＝α・ｌｎ（Ｆ）－β　　…（１）

ここでαは、不純物元素の種類と光パルスの照射時間とから定まる熱拡散長であり、Ｆは光パルスのエネルギー密度であり、βは補正係数であることを特徴とする半導体素子の製造方法。

【請求項９】

一導電型の半導体領域を有する中間生成物を用意する工程と、

光パルスの１回あたりの照射時間及び前記光パルスのエネルギー密度を考慮して式（１）を用いて決定される膜厚で、前記半導体領域に対する不純物元素であって、前記一導電型と同一導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜を前記半導体領域の表面上に堆積する工程と、

前記光パルスを、前記照射時間及び前記エネルギー密度で前記不純物源膜に向けて照射して、前記半導体領域に前記不純物元素を導入することにより、前記半導体領域よりも高濃度のコンタクト領域を形成する工程と、

前記コンタクト領域に対しオーム性接触をする電極膜を形成して、前記中間生成物にオーム性のコンタクト構造を含む素子構造を形成する工程と、

を含み、

ｔ＝α・ｌｎ（Ｆ）－β　　…（１）

ここでαは、不純物元素の種類と光パルスの照射時間とから定まる熱拡散長であり、Ｆは光パルスのエネルギー密度であり、βは補正係数であることを特徴とする半導体素子の製造方法。

【請求項１０】

前記光パルスを照射する処理は、前記不純物元素を導入した領域をパターニングするように前記光パルスをスキャンして行うことを特徴とする請求項８又は９に記載の半導体素子の製造方法。

【請求項１１】

第１導電型の第１の半導体領域を有する中間生成物を用意する工程と、

前記第１の半導体領域の上に、不純物導入用の窓部を有する不純物導入マスクを形成す

る工程と、
前記第１の半導体領域に対する不純物元素であって、第２導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜を、一部に前記不純物導入マスクを介在して、光パルスの１回あたりの照射時間及び前記光パルスのエネルギー密度を考慮して式（１）を用いて決定される膜厚で前記第１の半導体領域の表面上に堆積する工程と、
前記光パルスを、前記照射時間及び前記エネルギー密度で前記不純物源膜に向けて照射して、前記窓部の直下の前記第１の半導体領域に第２導電型の第２の半導体領域のパターンを選択的に形成する工程と、
を含み、
ｔ＝α・ｌｎ（Ｆ）－β　　…（１）
ここでαは、不純物元素の種類と光パルスの照射時間とから定まる熱拡散長であり、Ｆは光パルスのエネルギー密度であり、βは補正係数であることを特徴とする半導体素子の製造方法。
【請求項１２】
前記不純物導入マスクは、酸化珪素膜であることを特徴とする請求項１１に記載の半導体素子の製造方法。
【請求項１３】
光パルスを出射する光源を有し、前記光パルスを対象物に照射するビーム調整系と、
前記光源を制御する光源制御部と、を備え、
固体材料からなる前記対象物の表面に、前記固体材料に対する不純物元素を含み、前記光パルスの１回あたりの照射時間及び前記光パルスのエネルギー密度を考慮して式（１）を用いて決定された膜厚を有する不純物源膜を形成し、前記不純物源膜に対して前記照射時間及び前記エネルギー密度で前記光パルスを照射して、前記対象物に前記不純物元素を導入し、
ｔ＝α・ｌｎ（Ｆ）－β　　…（１）
ここでαは、不純物元素の種類と光パルスの照射時間とから定まる熱拡散長であり、Ｆは光パルスのエネルギー密度であり、βは補正係数であることを特徴とする不純物導入装置。
【請求項１４】
前記照射時間と、前記エネルギー密度と、前記不純物元素の種類とを入力データとして前記膜厚を決定する演算処理を実行する演算制御装置を更に備えることを特徴とする請求項１３に記載の不純物導入装置。
【請求項１５】
前記演算制御装置は、前記光パルスの照射により前記対象物の表面に生じる陥凹部の分布状態又は深さを更に考慮して前記膜厚を設定することを特徴とする請求項１４に記載の不純物導入装置。
【請求項１６】
前記光源は、前記エネルギー密度が３．３Ｊ／ｃｍ^{2}以上６．０Ｊ／ｃｍ^{2}以下となる前記光パルスを出射することを特徴とする請求項１５に記載の不純物導入装置。
【請求項１７】
前記光源は、波長が１９０ｎｍ以上の前記光パルスを出射することを特徴とする請求項１６に記載の不純物導入装置。
【請求項１８】
前記光源は、前記光パルスを照射領域１箇所につき１回以上１０回以内の照射回数で出射することを特徴とする請求項１７に記載の不純物導入装置。
【請求項１９】
前記光パルスの照射時に前記対象物を室温以上５００℃以下の状態に調温可能な加熱装置を更に有することを特徴とする請求項１８に記載の不純物導入装置。
【請求項２０】
前記固体材料が炭化珪素であり、前記不純物源膜がアルミニウム膜であることを特徴と

する請求項１３に記載の不純物導入装置。
【請求項２１】
前記演算制御装置は、前記膜厚を、前記エネルギー密度をＦ（Ｊ／ｃｍ^{2}）としたとき、
２４０ｎｍ以上、
（４．４×１０^{3}・ｌｎ（Ｆ）－５３５０）ｎｍ以下、の範囲内で決定することを特徴とする請求項１４に記載の不純物導入装置。
【請求項２２】
前記対象物を収納し、前記不純物源膜を前記膜厚で前記対象物の表面上に成膜する処理を実行するチャンバを備えることを特徴とする請求項２１に記載の不純物導入装置。
【請求項２３】
前記チャンバは、前記光パルスを導入する光学窓を備え、
前記対象物を前記チャンバの内側に維持した状態で、前記不純物源膜を前記対象物の表面上に設ける処理と、前記光パルスを前記対象物に照射する処理とを、交互に連続して実行可能に構成されていることを特徴とする請求項２２に記載の不純物導入装置。
【請求項２４】
前記中間生成物が炭化珪素であり、前記不純物源膜がアルミニウム膜であることを特徴とする請求項８～１０のいずれか１項に記載の半導体素子の製造方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、不純物導入装置、不純物導入方法及び半導体素子の製造方法に関し、特に不純物元素の拡散係数の極めて小さい固体材料に対して不純物元素を導入する技術に関する。
【背景技術】
【０００２】
パワー半導体としてシリコンカーバイド（ＳｉＣ）、特に４Ｈのシリコンカーバイド（４Ｈ－ＳｉＣ）等のワイドバンドギャップ半導体は、不純物元素の拡散係数が小さい。半導体基板が４Ｈ－ＳｉＣの場合、４Ｈ－ＳｉＣの（０００１）面（（０００－１）面）に対して、例えば１０^{15}／ｃｍ^{2}程度以上の高ドーズのイオン注入を行う際には、不純物元素の活性化を４Ｈ－ＳｉＣの再結晶化と共に促進するため、半導体基板を事前に３００～８００℃程度に昇温させて加熱すると共に、イオン注入後、１６００～１８００℃程度の高温のアニールを行う必要がある。しかし、このような処理を経ても、例えばｐ型のドーパントであるアルミニウム（Ａｌ）は４Ｈ－ＳｉＣの結晶中でほとんど熱拡散しない。現在までの知見では、Ａｌ以外の他の有用な不純物元素についてもＳｉＣの結晶中での拡散係数は小さいとされている。
【０００３】
これに対し、ｎ型のＳｉＣ半導体基板の表面上にＡｌを蒸着して２００ｎｍ程度の厚みで成膜し、このＡｌ膜にレーザー光の光パルスを照射して、ＳｉＣ基板にｐ型の不純物ドープ層を形成する方法が提案されている（特許文献１参照。）。特許文献１に記載の発明においては、室温、約６．７×１０$^{-5}$Ｐａの低圧状態で、１Ｊ／ｃｍ^{2}程度のエネルギー密度の光パルス（ＫｒＦエキシマレーザー、波長２４８ｎｍ）を、照射時間２０ｎｓで、４発（４ショット）照射して、不純物元素のＡｌを、ｎ型のＳｉＣ半導体基板の表面に４×１０^{20}ｃｍ$^{-3}$レベルの濃度で導入する。しかし、特許文献１の技術を用いても、表面から５０ｎｍ～１００ｎｍレベルの深さにおいては、Ａｌの導入濃度は１×１０^{16}ｃｍ$^{-3}$レベルに留まる。この１×１０^{16}ｃｍ$^{-3}$レベルの値が特許文献１の技術における導入濃度の最下限値である。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００４】

【特許文献１】特開２０１３－２１４６５７号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００５】
本発明は上記した問題に着目して為されたものであって、例えばワイドバンドギャップ半導体材料等の不純物元素の拡散係数の極めて小さい固体材料であっても、固体材料の表面から５０ｎｍ以上の深い位置に、固体材料の固溶濃度に近いレベルの高濃度で不純物元素を導入可能な不純物導入装置、不純物導入方法及び半導体素子の製造方法を提供することを目的とする。
【課題を解決するための手段】
【０００６】
上記課題を解決するために、本発明に係る不純物導入装置のある態様は、光パルスを出射する光源を有し、光パルスを対象物に照射するビーム調整系と、光源を制御する光源制御部と、を備え、不純物元素を含み、光パルスの１回あたりの照射時間及び光パルスのエネルギー密度を考慮して決定された膜厚を有する不純物源膜を固体材料からなる対象物の表面に形成し、不純物源膜に対して膜厚の決定に考慮した照射時間及びエネルギー密度で光パルスを照射して、対象物に不純物元素を導入することを要旨とする。
【０００７】
また本発明に係る不純物導入方法のある態様は、光パルスの１回あたりの照射時間及び光パルスのエネルギー密度を考慮して決定された膜厚で、不純物元素を含む不純物源膜を固体材料からなる対象物の表面上に堆積するステップと、光パルスを、膜厚の決定に考慮した照射時間及びエネルギー密度で不純物源膜に向けて照射するステップと、を含み、対象物に不純物元素を導入することを要旨とする。
【０００８】
また本発明に係る半導体素子の製造方法のある態様は、第１導電型の第１の半導体領域を有する中間生成物を用意する工程と、光パルスの１回あたりの照射時間及び光パルスのエネルギー密度を考慮して決定される膜厚で、第２導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜を半導体領域の表面上に堆積する工程と、光パルスを、膜厚の決定に考慮した照射時間及びエネルギー密度で不純物源膜に向けて照射して、半導体領域に不純物元素を導入することにより、第２導電型の第２の半導体領域を形成する工程と、を含み、中間生成物にｐｎ接合を含む素子構造を形成することを要旨とする。
【０００９】
また本発明に係る半導体素子の製造方法の他の態様は、一導電型の半導体領域を有する中間生成物を用意する工程と、光パルスの１回あたりの照射時間及び光パルスのエネルギー密度を考慮して決定される膜厚で、一導電型と同一導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜を半導体領域の表面上に堆積する工程と、光パルスを、膜厚の決定に考慮した照射時間及びエネルギー密度で不純物源膜に向けて照射して、半導体領域に不純物元素を導入することにより、半導体領域よりも高濃度のコンタクト領域を形成する工程と、コンタクト領域に対しオーム性接触をする電極膜を形成する工程と、を含み、中間生成物にオーム性のコンタクト構造を含む素子構造を形成することを要旨とする。
【００１０】
また本発明に係る半導体素子の製造方法の更に他の態様は、第１導電型の第１の半導体領域を有する中間生成物を用意する工程と、第１の半導体領域の上に、不純物導入用の窓部を有する不純物導入マスクを形成する工程と、第２導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜を、一部に不純物導入マスクを介在して、光パルスの１回あたりの照射時間及び光パルスのエネルギー密度を考慮して決定される膜厚で第１の半導体領域の表面上に堆積する工程と、光パルスを、照射時間及びエネルギー密度で不純物源膜に向けて照射して、窓部の直下の第１の半導体領域に第２導電型の第２の半導体領域のパターンを選択的に形成する工程と、を含むことを要旨とする。
【発明の効果】

【００１１】
従って本発明に係る不純物導入装置、不純物導入方法及び半導体素子の製造方法によれば、不純物元素の拡散係数の極めて小さい固体材料であっても、固体材料の表面から５０ｎｍ以上の深い位置に、固体材料の固溶濃度に近いレベルの高濃度で不純物元素を導入することができる。
【図面の簡単な説明】
【００１２】
【図１】本発明の第１の実施の形態に係る不純物導入装置の構成の概略を模式的に説明する断面図を含むブロック図である。
【図２】第１の実施の形態に係る不純物導入方法で用いられる光パルスのエネルギー密度と不純物源膜の膜厚との関係を説明するグラフ図である。
【図３】第１の実施の形態に係る不純物導入方法を説明するフローチャートである。
【図４】第１の実施の形態に係る不純物導入方法を説明する工程断面図である（その１）。
【図５】第１の実施の形態に係る不純物導入方法を説明する工程断面図である（その２）。
【図６】第１の実施の形態に係る不純物導入方法を説明する工程断面図である（その３）。
【図７】第１の実施の形態に係る不純物導入方法を説明する工程断面図である（その４）。
【図８】図８（ａ）及び図８（ｂ）は、第１の実施の形態に係る不純物導入方法によりそれぞれ異なる膜厚の不純物源膜を用いて得られた不純物導入領域の上面の、残存する不純物源膜を除去する前の状態を示すＳＥＭ画像の一部である。
【図９】第１の実施の形態に係る不純物導入方法を説明する工程断面図である（その５）。
【図１０】図１０（ａ）及び図１０（ｂ）は、第１の実施の形態に係る不純物導入方法によりそれぞれ異なる膜厚の不純物源膜を用いて得られた不純物導入領域の上面の、残存する不純物源膜を除去した後の状態を示すＳＥＭ画像の一部である。
【図１１】図１１（ａ）は、図１０（ａ）中の一部の領域を拡大した図であり、図１１（ｂ）は、図１１（ａ）中のＡ部分のＡＥＳ分析結果を示すグラフ図であり、図１１（ｃ）は、図１１（ａ）中のＢ部分のＡＥＳ分析結果を示すグラフ図である。
【図１２】第１の実施の形態に係る不純物導入方法を説明する工程断面図である（その６）。
【図１３】第１の実施の形態に係る不純物導入方法を用いて得られた半導体基板の内部の不純物元素の濃度と侵入深さのプロファイルを示すグラフ図である。
【図１４】図１４（ａ）及び図１４（ｂ）は、第１の実施の形態に係る不純物導入方法を用いて得られた半導体基板の内部のｐｎ接合ダイオードのＩ－Ｖ特性を、それぞれスケールを変えて示すグラフ図である。
【図１５】図１５（ａ）及び図１５（ｂ）は、比較例に係る不純物導入方法によりそれぞれ異なる膜厚の不純物源膜を用いて得られた不純物導入領域の上面の、残存する不純物源膜を除去する前の状態を示すＳＥＭ画像の一部である。
【図１６】図１６（ａ）及び図１６（ｂ）は、比較例に係る不純物導入方法によりそれぞれ異なる膜厚の不純物源膜を用いて得られた不純物導入領域の上面の、残存する不純物源膜を除去した後の状態を示すＳＥＭ画像の一部である。
【図１７】図１７（ａ）及び図１７（ｂ）は、第１の実施の形態及び比較例に係る不純物導入方法を用いて得られた半導体基板の内部のｐｎ接合ダイオードのＩ－Ｖ特性を、それぞれスケールを変えて示すグラフ図である。
【図１８】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法を説明する工程断面図である。
【図１９】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第１変形例を説明する工程断面図である（その１）。

【図２０】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第１変形例を説明する工程断面図である（その２）。
【図２１】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第１変形例を説明する工程断面図である（その３）。
【図２２】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第１変形例を説明する工程断面図である（その４）。
【図２３】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程断面図である（その１）。
【図２４】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程上面図である（その２）。
【図２５】図２４中のＡ－Ａ方向から見た工程断面図である。
【図２６】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程断面図である（その３）。
【図２７】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程断面図である（その４）。
【図２８】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程断面図である（その５）。
【図２９】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程断面図である（その６）。
【図３０】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程断面図である（その７）。
【図３１】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程断面図である（その８）。
【図３２】第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例を説明する工程断面図である（その９）。
【図３３】第２変形例に係る半導体素子の製造方法において、カソード電極膜を先に形成する場合のプロセスを説明する工程断面図である。
【図３４】第２変形例に係る半導体素子の製造方法を用いて得られた実施例に係る半導体素子を、アノード電極膜の上面の高さで水平に断面した状態を、光学顕微鏡で見た上面図である。
【図３５】比較例に係る半導体素子を、アノード電極膜の上面の高さで水平に断面した状態を、光学顕微鏡で見た上面図である。
【図３６】実施例及び比較例に係るそれぞれの半導体素子の、正の電圧領域におけるＩ－Ｖ特性を示すグラフ図である。
【図３７】実施例及び比較例に係るそれぞれの半導体素子の、負の電圧領域におけるＩ－Ｖ特性を示すグラフ図である。
【図３８】本発明の第２の実施の形態に係る不純物導入装置の構成の概略を模式的に説明する断面図を含むブロック図である。
【発明を実施するための形態】
【００１３】
以下に本発明の第１及び第２の実施の形態を説明する。以下の図面の記載において、同一又は類似の部分には同一又は類似の符号を付している。但し、図面は模式的なものであり、厚みと平面寸法との関係、各装置や各部材の厚みの比率等は現実のものとは異なることに留意すべきである。したがって、具体的な厚みや寸法は以下の説明を参酌して判定すべきものである。また、図面相互間においても互いの寸法の関係や比率が異なる部分が含まれていることは勿論である。
【００１４】
また、以下の説明における「左右」や「上下」の方向は、単に説明の便宜上の定義であって、本発明の技術的思想を限定するものではない。よって、例えば、紙面を９０度回転すれば「左右」と「上下」とは交換して読まれ、紙面を１８０度回転すれば「左」が「右

」に、「右」が「左」になることは勿論である。また本明細書及び添付図面においては、ｎ又はｐを冠した領域や層では、それぞれ電子又は正孔が多数キャリアであることを意味する。またｎやｐに付す＋や－は、＋及び－が付記されていない半導体領域に比して、それぞれ相対的に不純物濃度が高い又は低い半導体領域であることを意味する。

【００１５】

（第１の実施の形態）

－不純物導入装置の構造－

本発明の第１の実施の形態に係る不純物導入装置１ａは、図１に示すように、固体材料からなる対象物２の表面に不純物元素を含む不純物源膜４を設ける成膜装置１０と、不純物源膜４を介して平坦な表面を有する対象物２にレーザー光６等の照射フルエンス（エネルギー密度）の大きな光パルスを照射して不純物元素を導入する光照射装置２０と、不純物源膜４の膜厚等の成膜条件及びレーザー光６のエネルギー密度や対象物２に対する光パルスの相対的な光照射位置等の光照射条件を制御可能な演算制御装置３０と、を備える。

【００１６】

成膜装置１０は、例えばスパッタ装置、電子ビーム蒸着装置、プラズマＣＶＤ装置等が採用可能である。第１の実施の形態に係る成膜装置１０では、図１に示すように、真空排気可能なチャンバ１１と、チャンバ１１内に設けられ対象物２を載置する下部電極１２ａと、を備えるスパッタ装置の場合を例示している。チャンバ１１内では、チャンバ上板１３側に、下部電極１２ａに対向して不純物元素を含むターゲット１４が配置される。

【００１７】

スパッタ装置としては、更に下部電極１２ａとターゲット１４との間に接続された電源１５と、チャンバ１１に接続されチャンバ１１内にアルゴン（Ａｒ）ガス等の希ガスを導入するガス導入バルブ１６と、チャンバ１１に接続されチャンバ１１内を真空状態にするロータリーポンプ、ターボ分子ポンプ或いはクライオポンプ等で構成される真空ポンプ１７と、が設けられる。電源１５、ガス導入バルブ１６及び真空ポンプ１７には、成膜される不純物源膜４の膜厚を制御する膜厚制御部３１が接続されている。また膜厚制御部３１は成膜装置１０に装備された図示を省略した膜厚計からの信号をインシツ（ｉｎ　ｓｉｔｕ）モニタして帰還制御することができる。電源１５、ガス導入バルブ１６及び真空ポンプ１７は、膜厚制御部３１を介して演算制御装置３０に接続されている。

【００１８】

図１のＤＣスパッタ装置の場合で説明すれば、下部電極１２ａとターゲット１４との間に電源１５によって直流電圧を印加して、導入した希ガスをイオン化してターゲット１４に衝突させ、ターゲット１４からはじき飛ばされた不純物元素の粒子を対象物２の表面に衝突、付着させて成膜することになる。成膜装置１０は、ＤＣスパッタ装置以外にＲＦスパッタ装置、マグネトロンスパッタ装置、イオンビームスパッタ装置等で構成してもよい。成膜される不純物源膜４の膜厚は、成膜時の処理時間を調整することで制御できる。

【００１９】

第１の実施の形態に係る不純物導入装置１ａの光照射装置２０は、対象物２の表面に不純物源膜４を介して光パルスを一定寸法の照射領域でスキャン照射するビーム調整系３３と、支持台１２ｂを介して対象物２を対象物２の主面に平行な面内に定義されるＸ－Ｙ方向に自在に移動させるＸ－Ｙ移動ステージ２３と、を備える。光照射装置２０は、不純物源膜４を介して対象物２の上面にレーザー光６の光パルスをスキャン照射して、レーザー光６で与えたエネルギー効果によって対象物２の内部の一部に不純物元素を導入する。エネルギー効果には熱エネルギーの効果も含まれる。

【００２０】

第１の実施の形態に係る不純物導入装置１ａの対象物２としてはＳｉＣ基板を用いる場合を例示的に採用し、具体的にはパワー半導体用として期待されている４Ｈ－ＳｉＣ基板を用いる場合について説明する。対象物２は、（０００１）面（（０００－１）面）を有するｎ$^{+}$型の半導体基板２１の上に、図４に例示したように、１×１０^{16}／ｃｍ^{3}程度の濃度で１０μｍ程度の厚みを有するｎ$^{-}$型の４Ｈ－ＳｉＣのエピタキシャル成長層（以

下、「エピ層」と称する。）２２を設けた２層構造である。対象物２は、エピ層２２側の面を表面としてビーム調整系３３側に向けて配置されている。対象物２の表面上には図示を省略するが位置合わせのための基準マークが設けられていてもよい。尚、対象物２の材料はＳｉＣに限定されることなく、例えば窒化ガリウム（ＧａＮ）、酸化ガリウム（Ga_2O_3）、ダイヤモンド等、他のワイドバンドギャップ半導体材料であっても本発明を適用できるし、ワイドバンドギャップ半導体材料に限定されるものでもない。

【００２１】

不純物源膜４は、対象物２にドーピングさせる不純物元素を不純物導入源として含む膜であり、例えばｐ型の不純物元素としてＡｌを選択した場合は、Ａｌ薄膜が使用できる。また不純物源膜４は、不純物元素そのものの単一元素膜に限定されることなく、他の元素との化合物、例えば窒化物等の化合物や混合物からなる薄膜であってもよいし、或いはこれらを積層した多層の複合膜等であってもよい。また、不純物元素はＡｌに限定されるものではなく、導電型の選択、或いは母相の元素の置換位置又は格子間位置に対応して、ホウ素（Ｂ）、ガリウム（Ｇａ）、窒素（Ｎ）、リン（Ｐ）、砒素（Ａｓ）等の他の不純物元素が適宜用いられてよい。

【００２２】

第１の実施の形態に係る不純物導入装置１ａのビーム調整系３３は、図１に示すように、レーザー光６等のエネルギー密度の大きな光パルスを出射する光源３４と、出射されたレーザー光６を集光する図示を省略するレンズ系や所定の形状に成形する可変スリット等を備える。ビーム調整系３３には、照射されるレーザー光６の照射条件を制御する光源制御部３２が接続されると共に、光源制御部３２は演算制御装置３０に接続されている。ビーム調整系３３の光源３４は、光源制御部３２を介して演算制御装置３０に制御されている。

【００２３】

またビーム調整系３３は、レーザー光６を掃引する場合、必要であれば、成形されたレーザー光６を反射して図示を省略するレンズ等の集光装置に導く、不図示の反射ミラーやプリズム等の他の光学系を備えるようにしてもよい。成形されたレーザー光６等のエネルギー密度の大きな光パルスは、対象物２の上面と不純物源膜４との界面領域に向けて照射される。

【００２４】

成形されるレーザー光６の形状は、長方形（矩形）状が好適に用いられるが、矩形に限定されることなく、他の形状であってもよい。またいずれも図示を省略しているが、対象物２に対する光パルスの照射位置を制御するに際し、ビーム調整系３３には、対象物２の基準マークを撮像するＣＣＤカメラ等の撮像装置、照明光を照射する照明光発光装置、照明光を反射及び透過させるミラー及びアライメント機構等を必要に応じて別途設けてもよい。

【００２５】

エネルギー密度の大きな光パルスとしては、不純物源膜４を介して十分な反応エネルギーが生じるように、光エネルギーを不純物元素及び対象物２の格子振動に与えることが可能な波長を有するレーザー光６のパルスが好ましい。例えば、２４８ｎｍ（ＫｒＦ）、１９３ｎｍ（ＡｒＦ）、３０８ｎｍ（ＸｅＣｌ）、３５１ｎｍ（ＸｅＦ）等の発振波長を有するエキシマレーザーや、２６６ｎｍ（ＹＡＧ第４高調波）、３５５ｎｍ（ＹＡＧ第３高調波）、５３２ｎｍ（ＹＡＧ第２高調波）レーザーや、１．０６４μｍ（ＹＡＧ基本波）、１０．６μｍ（炭酸（CO_2）ガス）レーザー等を用いることができる。また水銀（Ｈｇ）ランプやキセノン（Ｘｅ）ランプ等の高出力の連続光を分光器やフィルターで波長選択してもエネルギー密度の大きな光パルスを得ることが可能であるので、必ずしもレーザーに限定されるものではない。

【００２６】

またエキシマレーザーのように、多くの半導体材料の禁制帯幅よりも大きなエネルギーとなる、紫外線領域の波長のレーザー光６を照射するように構成すれば、紫外線領域の光

エネルギーによる光触媒作用等の表面反応を光励起させることができる。このため不純物元素の導入対象となる固体表面の格子振動を励起し、不純物元素を目的とする固体材料の格子間位置や置換位置等の導入位置に移動させる表面マイグレーション等を含めた表面反応等を容易にすることができる。ただし、ＡｒＦ（＝１９３ｎｍ）レーザー等よりも短波長、すなわち真空紫外光の範囲に含まれる短波長の光は、大気中の酸素分子に吸収され伝播が阻害されるため、大気中でのレーザードーピングにおいては、１９０ｎｍ程度以上の波長を有するレーザー光６であることが好ましい。

【００２７】

Ｘ－Ｙ移動ステージ２３は、支持台１２ｂを下方から水平に支持するとともに、図示を省略する移動ステージ駆動装置に接続され、移動ステージ駆動装置を演算制御装置３０によって制御することにより支持台１２ｂを水平面内の方向（Ｘ－Ｙ方向）にそれぞれ自在に移動することで、対象物２を光パルスの照射位置に対し自在に移動できるように構成されている。例えば光パルスの照射位置に対する対象物２の相対的な位置を自在に移動することにより、直接描画の手法が可能になる。更に、支持台１２ｂとＸ－Ｙ移動ステージ２３との間に、支持台１２ｂをＸ－Ｙ方向に垂直なＺ方向に移動させるＺ移動ステージを設けることで、Ｘ－Ｙ方向に加えＺ方向にも移動可能に支持台１２ｂを構成して焦点等の調整ができるようにしてもよい。

【００２８】

演算制御装置３０には入力装置４１及びデータ記憶装置４２が接続されており、演算制御装置３０は、データ記憶装置４２の内部に格納されたデータにアクセス可能に構成されている。データ記憶装置４２には、入力装置４１を介して、不純物元素の種類（物性値）、１パルス（１ショット）の照射時間（パルス幅）及びレーザー光６のエネルギー密度が入力される。演算制御装置３０は、データ記憶装置４２に格納された不純物元素の種類、１パルスの照射時間及びエネルギー密度を経験則である式（１）を用いて、不純物源膜４の膜厚t_fを算出するように設定することが可能である。

$t=\alpha\cdot\ln(F)-\beta$　　…（１）

ここでαは、不純物元素の種類とレーザー光６の照射時間とから定まる熱拡散長（ｎｍ）、Ｆはレーザー光６のエネルギー密度（Ｊ／ｃｍ^2）である。またβは、事前の実験データから不純物元素の種類とレーザー光６の照射時間とを考慮した経験則として設定される補正係数（ｎｍ）である。熱拡散長α及び補正係数βは入力装置４１を介してデータ記憶装置４２に格納されている。

【００２９】

式（１）について詳述する。Ａｌ膜表面で吸収されたレーザーエネルギーは熱拡散により基板内部に拡散する。この時、ある時刻ｔでの熱拡散長αは，熱拡散係数をＤとするとα＝２√（Ｄｔ）で与えられる。従って、レーザーパルスを照射した直後の深さｘでの温度Ｔ（ｘ）は近似的に

Ｔ（ｘ）＝ＡＦｅｘｐ（－ｘ／２√（Ｄτ））

で与えられる。ここでτはレーザーのパルス幅（照射時間）、Ｆはレーザー照射フルエンス（エネルギー密度）であり、Ａは固体の比熱、密度、反射率などの関数であり、近似的に一定の係数とおける。

【００３０】

ある照射フルエンスでドーピングを行うことが可能な最大膜厚x_{max}は、ドーピングを行うことが可能なＡｌ／ＳｉＣ界面での最低温度をT_{limit}（$x=x_{max}$）とすると下式が得られる。

【数１】

$$T_{limit}(x=x_{max})=AF\exp\left(\frac{-x_{max}}{2\sqrt{D\tau}}\right) \qquad \cdots(2)$$

式（２）より

【数２】

$$x_{max} = 2\sqrt{D\tau}\ln(F) + 2\sqrt{D\tau}\ln\left(\frac{A}{T_{limit}(x = x_{max})}\right) \quad \cdots (3)$$

を得る。ここでＡｌの熱伝導率はｋ＝２．３×１０^{2}Ｗ／ｍＫ，比熱はρ＝０．９０Ｊ／ｇＫ、密度はＣ＝２．７ｇ／ｃｍ^{3}であるので、熱拡散係数Ｄは、

Ｄ＝ｋ／ρＣ　０．９５ｃｍ^{2}／ｓ　　…（４）

と求められる。よってレーザーパルス照射直後の熱拡散長αは、パルス幅が約５０ｎｓであるので、

【数３】

$$2\sqrt{D\tau} \fallingdotseq 4.4\times10^{3}(nm) \quad \cdots (5)$$

と求められる。また（３）、（５）式より

【数４】

$$x_{max} = 4.4\times10^{3}\ln(F) + 4.4\times10^{3}\ln\left(\frac{A}{T_{limit}(x = x_{max})}\right) \quad \cdots (6)$$

を得る。

【００３１】

ここで、Ａｌ膜厚が１２０ｎｍ程度と薄い場合には表面荒れ（表面欠陥）が多く形成され、逆方向リーク電流の増加、及びＯＮ電流の低減などが生じ電気特性が劣化する。Ａｌ膜厚が２４０ｎｍ程度と厚くなり表面欠陥が減少すると逆方向飽和電流（リーク電流）の減少、及びＯＮ電流の増加が達成され電気特性が改善する。すなわち膜厚は、図２中での下限膜厚（下限厚さ）として点線で示したように、Ａｌ膜厚を２４０ｎｍ程度以上と厚くする方が特性の良いドーピングが達成される。

【００３２】

また、図２の実験結果と式（６）とをフィッティングすることで、ある照射フルエンスＦにおけるＡｌ膜厚の最大値（上限厚さ）ｔ$_{fmax}$は、下式（７）で与えられることが明らかになった。

ｔ$_{fmax}$＝４．４×１０^{3}・ｌｎ（Ｆ）－５３５０（ｎｍ）　…（７）

【００３３】

すなわちＡｌ膜をレーザーアブレーションすることでドーピングを行うためには、Ａｌの膜厚ｔ$_{f}$は、

ｔ$_{f}$≧２４０ｎｍ（下限厚さｔ$_{fmin}$）

であることが望ましく、また、

ｔ$_{f}$≦４．４×１０^{3}・ｌｎ（Ｆ）－５３５０ｎｍ（上限厚さｔ$_{fmax}$）

であることが望ましい。

【００３４】

不純物元素の種類及び照射時間τに応じて熱拡散長α及び補正係数βが設定されることにより、図２に示したような膜厚上限直線Ｌが得られる。尚、式（１）は自然対数を用いた式であるので厳密には直線とはならないが、図２に示した範囲等に着目すれば略直線と見做せることから、説明のため本明細書では式（１）を「直線」の語を用いて説明する。

【００３５】

図２中の膜厚上限直線Ｌの右側には、丸印（○）をデータ点とする３個のプロットａ１～ａ３、三角印（△）をデータ点とする１個のプロットａ４及びプラス（＋）をデータ点とする１個のプロットｃ１が含まれている。３個の○印のプロットａ１～ａ３のうち図中右側の２個のプロットａ１，ａ２の場合、エネルギー密度Ｆはいずれも４．０Ｊ／ｃｍ^{2}程度であり、膜厚ｔ$_{f}$はそれぞれ２４０ｎｍ程度と４８０ｎｍ程度である。また３個のプロットａ１～ａ３のうち図中左側の○印のプロットａ３及び△印のプロットａ４の場合、

エネルギー密度Ｆはいずれも３．７Ｊ／ｃｍ^{2}程度であり、膜厚ｔ$_f$はそれぞれ２４０ｎｍ程度と１２０ｎｍ程度である。また＋印のプロットｃ１の場合、エネルギー密度Ｆは４．０Ｊ／ｃｍ^{2}程度であり、膜厚ｔ$_f$は１２０ｎｍ程度である。

【００３６】

エネルギー密度Ｆ＝４．０Ｊ／ｃｍ^{2}で、照射時間τ＝５０ｎｓ、１ショットの光パルスをＡｌの不純物源膜４に照射する場合、不純物源膜４の膜厚ｔ$_f$の上限厚さｔ$_{fmax}$は、式（７）で表す膜厚上限直線Ｌの方程式を用いて、

ｔ$_{fmax}$＝４．４×１０^3・ｌｎ（４．０）－５３５０　７５０ｎｍ

となる。

【００３７】

すなわち光パルス照射前の膜厚ｔ$_f$を、２４０≦ｔ$_f$≦７５０（ｎｍ）の範囲内で設定することにより、光パルス照射後に対象物２の表面に不純物源膜４が少なくとも一原子層相当の膜厚分残存するようにできる。一定の範囲内で膜厚ｔ$_f$を１点設定する方法は適宜決められてよいし、或いは例えば、上限厚さｔ$_{fmax}$と下限厚さｔ$_{fmin}$との中間値である「（ｔ$_{fmax}$＋ｔ$_{fmin}$）／２」等を用いて決めてもよい。

【００３８】

そして図２中の４個のプロットａ１～ａ４のように、光パルスのエネルギー密度Ｆの値と不純物源膜４の膜厚ｔ$_f$の値との組み合わせ（Ｆ，ｔ$_f$）が式（７）を満たすものであれば、１ショットで、対象物２の表面に不純物元素を高濃度、且つ、表面から深く導入することが可能となる。更に下限厚さｔ$_{fmin}$以上である３個のプロットａ１～ａ３では、光パルス照射後に対象物２の表面に不純物源膜４が少なくとも一原子層相当の膜厚分残存させて、対象物２の表面に電極を設けて半導体素子を形成した際に所望のダイオード特性を得られるように、表面の欠陥を許容範囲に抑えることができる。一方、下限厚さｔ$_{fmin}$＝２４０ｎｍ未満である○印のプロットａ４及び＋印のプロットｃ１の場合、ドーピングできても表面の欠陥の程度が大きくなり、電気特性が劣化する。

【００３９】

尚、図２中の膜厚上限直線Ｌとエネルギー密度Ｆを表す横軸との交点で示されるように、１ショットで所望のドーピングを行うためには、光パルスのエネルギー密度Ｆに下限値がある。図２に例示した、不純物元素がＡｌ、照射時間τ＝５０ｎｓである場合には、膜厚上限直線Ｌと横軸との交点の値より、エネルギー密度Ｆの下限値としては約３．３Ｊ／ｃｍ^{2}に設定できる。一方、エネルギー密度Ｆの上限値は、不純物源膜４の膜厚ｔ$_f$に応じて大きくすることが可能であるが、エネルギー効率の観点から第１の実施の形態に係る不純物導入装置１ａにおいては、６．０Ｊ／ｃｍ^{2}以下であることが好ましい。

【００４０】

式（７）及び下限厚さｔ$_{fmin}$を満たすような任意の光パルスのエネルギー密度Ｆの値と不純物源膜４の膜厚ｔ$_f$の値との組み合わせ（Ｆ，ｔ$_f$）を選択することにより、一定のエネルギー密度Ｆに対して光パルス照射後に対象物２の表面に不純物源膜４が少なくとも一原子層相当の膜厚分残存可能となる最も薄い膜厚ｔ$_f$が設定可能である。また同時に、一定の膜厚ｔ$_f$に対する最も小さいエネルギー密度Ｆも設定可能である。

【００４１】

また図２中の膜厚上限直線Ｌより左側の領域には、３個の×印をデータ点とするプロットｂ１～ｂ３が例示されている。３個のプロットｂ１～ｂ３のような、光パルスのエネルギー密度Ｆの値と不純物源膜４の膜厚ｔ$_f$の値との組み合わせ（Ｆ，ｔ$_f$）の場合、上記した３個のプロットａ１～ａ３の場合と異なり、所望のレーザードーピングを行うことができない。

【００４２】

３個の×印のプロットｂ１～ｂ３のうち中央のｂ１及び右側のｂ２の場合、エネルギー密度Ｆが膜厚ｔ$_f$に対して大きすぎる、又は膜厚ｔ$_f$がエネルギー密度Ｆに対して薄すぎるため、不純物元素を対象物２の表面にドーピングできても、光パルス照射後に対象物２の表面に不純物源膜４が少なくとも一原子層相当の膜厚分残存できなくなるようになり、

図７中の陥凹部Ｍや図１６（ａ）に示すような、不純物導入領域２ａの表面欠陥の程度が激しくなる。

【００４３】

そして後工程で、対象物２の表面に電極を設けて半導体素子を製造した際、順方向の電流値低下や、逆バイアス時のリーク電流の増加を招き、十分な特性を備えることができない。また３個の×印のプロットｂ１～ｂ３のうち左側のｂ３の場合、光パルスのエネルギー密度Ｆが下限値未満となる。すなわち膜厚上限直線Ｌを用いてプロセスウィンドウを規定して、光パルスのエネルギー密度Ｆと不純物源膜４の膜厚t_fとを設定することにより、対象物２の表面に陥凹部Ｍを過剰に形成することなく、表面欠陥が発生しても、欠陥の程度を許容できる一定の範囲内に留める。

【００４４】

演算制御装置３０が算出した膜厚t_fのデータは、膜厚制御部３１に入力されると共に、演算制御装置３０に入力された照射時間τ、エネルギー密度Ｆのデータ、及びパルス数を１回とするデータは、光源制御部３２に入力される。また演算制御装置３０には、図示を省略する表示装置が接続されることで、膜厚t_f、照射時間τ、エネルギー密度Ｆ、及びパルス数のデータ等が表示されるように構成されてもよい。

【００４５】

膜厚制御部３１は、入力された膜厚t_fで不純物源膜４が対象物２上に成膜されるように、成膜装置１０の電源１５の電圧、ガス導入バルブ１６及び真空ポンプ１７の動作を制御する。光源制御部３２は、入力されたエネルギー密度Ｆ、パルス数及び照射時間τで光パルスのスキャン照射が行われるようにビーム調整系３３の動作を制御する。

【００４６】

－第１の実施の形態に係る不純物導入方法－

次に、本発明の第１の実施の形態に係る不純物導入方法を、図３のフローチャート及び図４～図１２を参照して説明する。まず、図３のステップＳ１において図４に示すように、n^+型の半導体基板２１の上面側にn^-型のエピ層２２が形成された対象物２を用意し、図１中の成膜装置１０の内部に２点鎖線で示したように、対象物２の上面をターゲット１４側に向けて載置し固定する。

【００４７】

次に、ステップＳ２において入力装置４１を介して、不純物元素の種類、１パルスの照射時間τ及びレーザー光６のエネルギー密度Ｆをデータ記憶装置４２に格納する。尚、ステップＳ２をステップＳ１の前に実施してもよい。不純物元素はＡｌ、照射時間τ＝５０ｎｓ、エネルギー密度Ｆ＝４．０Ｊ／ｃｍ^{2}であるとする。また式（１）の熱拡散長αは上記した４．４×１０^{3}ｎｍ、また補正係数βは５３５０ｎｍの値を予め設定する。

【００４８】

演算制御装置３０は、ステップＳ３においてデータ記憶装置４２から１パルスの照射時間τ、レーザー光６のエネルギー密度Ｆ、熱拡散長α及び補正係数βを読み出して、式（１）を用いて、

$$t_f\ (F=4.0,\ ns=50) < 4.4\times10^3 \cdot \ln(4.0) - 5350 < 750\,nm$$

と、不純物源膜４の膜厚t_fを算出し、後続の成膜工程における成膜条件として設定する。本実施例では膜厚t_f＝２４０ｎｍとした。

【００４９】

またレーザー光６の照射工程における照射条件として、パルス数を１ショット、照射時間τ＝５０ｎｓ、エネルギー密度Ｆ＝４．０Ｊ／ｃｍ^{2}と設定する。そして設定した膜厚t_f＝２４０ｎｍを成膜装置１０の膜厚制御部３１に出力すると共に、パルス数１回、照射時間τ＝５０ｎｓ及びエネルギー密度Ｆ＝４．０Ｊ／ｃｍ^{2}のそれぞれを光照射装置２０の光源制御部３２に出力する。

【００５０】

次に、成膜装置１０の膜厚制御部３１は、ステップＳ４において下部電極１２ａとター

ゲット１４間の電圧、ガス導入バルブ１６及び真空ポンプ１７の動作を制御して、図５に示すように、対象物２のエピ層２２の上面に設定された膜厚t_f＝２４０ｎｍで、Ａｌの薄膜からなる不純物源膜４を成膜する。

【００５１】

次に、不純物源膜４が成膜された対象物２を成膜装置１０から取り出して光照射装置２０へ搬送し、不純物源膜４の上面をビーム調整系３３側に向けて、支持台１２ｂ上に載置し固定する。光照射装置２０は、室温状態の大気の雰囲気中に配置されている。そして対象物２上のエピ層２２に対し不純物元素をドーピングさせる最初の照射目標位置に応じた基準マークの位置を、レーザー光６の光軸に合致させるように、ビーム調整系３３をＸ方向及びＹ方向に所定量移動させる。

【００５２】

次に、光照射装置２０の光源制御部３２は、設定されたパルス数１回、照射時間τ＝５０ｎｓ及びエネルギー密度Ｆ＝４．０Ｊ／ｃｍ^{2}でレーザー光６が照射されるように、ビーム調整系３３の動作を制御して、ステップＳ５において図６に示すように、対象物２のエピ層２２の上面に不純物源膜４を介してレーザー光６の光パルスを照射する。レーザー光６は例えば２４８ｎｍ（ＫｒＦ）エキシマレーザーを用い、照射領域が平面パターンで約３５０μｍ角の正方形状となるようにビームを成形する。

【００５３】

このとき、照射する光パルスのエネルギー密度Ｆは、４．０Ｊ／ｃｍ^{2}と高エネルギー状態であるので、光パルスが照射された不純物源膜４の照射領域では、Ａｌが飛躍的に活性化して溶融し、エピ層２２との界面ではＡｌがエピ層２２の内部に導入される。また不純物源膜４のレーザー光６側の表面には、アブレーションによるプルーム２４が生じ、照射領域の周囲にＡｌが飛散すると共に照射領域周辺には溶融流動領域が生じる。その結果、図７に示すように、照射領域Ｓでは不純物源膜４の膜厚t_fが減じると共に、照射領域Ｓと非照射領域との境界近傍の領域の一部には、溶融流動によりＡｌの一部が盛り上がる。

【００５４】

光パルスの照射後、照射領域Ｓの不純物源膜４の内部では、高エネルギーの光パルスの照射により、対象物２の上面の一部もアブレーションし、対象物２の表面欠陥をなす陥凹部Ｍ（段差）が、多様な深さをなして複数形成されるが、先行して行われたステップＳ２及びＳ３の処理により、照射領域Ｓに形成される陥凹部Ｍの分布状態及び最大深さｄが制御されている。陥凹部Ｍのエピ層２２の表面からの最大深さｄは、１２０ｎｍ～２００ｎｍ程度である。

【００５５】

また陥凹部Ｍの内側には、陥凹部Ｍを介してエピ層２２の表面に固着し、且つ、上方に突出する複数の突起部３が、多様な高さをなして形成される。突起部３のエピ層２２の表面からの最大高さｈは、１２０ｎｍ～２００ｎｍ程度である。また光パルスの照射領域Ｓには、光パルス照射後に不純物導入領域２ａの表面に少なくとも一原子層相当の厚さが残るように、不純物源膜４の一部が、複数の突起部３を覆うように一定の厚みで堆積して残留している。そのため、図８（ａ）のＳＥＭ画像の上面図に示すように、図中に略正方形状で示されるショットの輪郭線の内側には、残留したＡｌ薄膜の淡い金属光沢が表れている。またショットの輪郭線の外側には、光パルス照射後にＡｌのアブレーションによって照射領域の周囲に溶融流動したＡｌ等により、黒みがかった色調で表れている。

【００５６】

図８（ｂ）は、不純物源膜４の膜厚t_fを４８０ｎｍとした以外、膜厚t_fが２４０ｎｍの場合のレーザー光６の照射条件を同じとしてドーピングを行った場合の、照射領域の上面を撮影したＳＥＭ画像である。図８（ａ）の上面図と同様に、ショットの輪郭線の内側には、光パルス照射後に残留したＡｌ薄膜の淡い金属光沢が表れていると共に、ショットの輪郭線の外側には、Ａｌのアブレーションによって照射領域の周囲に溶融流動したＡｌが、図８（ａ）の場合よりも更に黒みを増した色調で表れている。尚、図７中に示す陥

凹部Ｍの断面形状は、説明のため模式的に示されており、実際の形状を限定するものではない。また同様に、突起部３の断面形状も例示的に示されており、実際の形状は、略円柱状、略三角錐状、他角柱状等、各種の幾何学形状をなしうる。

【００５７】

次に、ステップＳ６において不純物源膜４がＡｌの場合は熱リン酸（H_3PO_4）等を用いて、図９に示すように、対象物２のエピ層２２の表面上に残留した不純物源膜４を除去する。図１０（ａ）のＳＥＭ画像の上面図には、照射領域の内側に黒みがかった色調がグラデーションをなすように表れ、残留していた不純物源膜４が概ね除去されると共に、対象物２上に固着して残留した突起部３が示されている。

【００５８】

尚、図１０（ｂ）は、図８（ｂ）の場合（不純物源膜４の膜厚t_f＝４８０ｎｍ）の対象物２の照射領域の上面を、図１０（ａ）の場合と同様に、熱リン酸等を用いて、光パルス照射後に残留した不純物源膜４を除去した後の、ＳＥＭ画像の上面図である。図１０（ａ）の上面図と同様に、照射領域の内側に、膜厚t_f＝２４０ｎｍの場合と略同程度の色調及びグラデーションが表れ、残留していた不純物源膜４が概ね除去されると共に、対象物２上に固着して残留した突起部３が示されている。

【００５９】

図１０（ａ）の中央部における黒みがかった領域には、図１１（ａ）の拡大図に示すように、複数の突起部３が高密度で集積している。また図１１（ｂ）のエネルギースペクトル図に示すように、図１１（ａ）中の突起部３に位置するＡ部分をＡＥＳ分析すると、突起部３は、Ａｌを含むＳｉ系の反応生成物であることがわかる。また図１１（ｂ）中の、複数の突起部３間に位置し突起部３よりも低いＢ部分で示す領域にも、図１１（ｃ）のエネルギースペクトル図に示すように、Ａｌを含むＳｉ系の反応生成物が堆積していることがわかる。

【００６０】

次に、ステップＳ７においてエピ層２２の表面を、例えばテトラフルオロメタン（CF_4）を用いたプラズマエッチング等で２０分間程度処理し、対象物２の表面上に固着した突起部３を除去する。突起部３の除去により、図１２に示すように、エピ層２２の表面上に複数の陥凹部Ｍが露出し、第１の実施の形態に係る不純物導入方法が終了する。

【００６１】

以上のような第１の実施の形態に係る不純物導入方法によれば、図１３に示すように、Ａｌをエピ層２２の最表面では４Ｈ－ＳｉＣの固溶濃度を超える、濃度$6\times10^{21}cm^{-3}$程度以上で、かつ、エピ層２２の内部には深さ１００ｎｍ近傍位置までＡｌを導入することができる。またエピ層２２の表面から５０ｎｍ程度の深さ位置では、Ａｌを４Ｈ－ＳｉＣの固溶濃度に近いレベルである、$1\times10^{20}cm^{-3}$程度にまで導入することができる。この点、図１３中のＳｉのイオン強度を表す軌跡が示すように、エピ層２２の表面から５０ｎｍ程度の深さ位置の間に亘って、Ｓｉの濃度が大きく減少し、対象物２の表面近傍の領域では、ＡｌとＳｉとの合金等の化合物又は混合物が形成されていることがわかる。

【００６２】

また参考値として、図１３中に、塩化アルミニウム（$AlCl_3$）水溶液中で、４．５Ｊ／cm^2のエネルギー密度Ｆでレーザー光６を照射して液相のＡｌを４Ｈ－ＳｉＣへ導入した場合のＳＩＭＳ測定結果を破線で示す。溶液中でのドーピングに関する他の条件や方法については、非特許文献「液体中に浸漬した４Ｈ－ＳｉＣへのエキシマレーザ照射による燐ドーピング（Phosphorus doping of 4H SiC by liquid immersion excimer laser irradiation）」池田晃裕　他３名、アプライド・フィジックス・レターズ（Applied Physics Letters）、第１０２巻、ｐ０５２１０４－１～０５２１０４－４（２０１３年１月）等に記載の方法に準じた。

【００６３】

図１３に示すように、$AlCl_3$水溶液中を用いたドーピングによる４Ｈ－ＳｉＣの表

面濃度は、２×１０^{20}ｃｍ$^{-3}$以下、かつ、対象物２の内部への侵入深さは４０ｎｍ近傍までであり、Ａｌ薄膜を用いて固相からレーザードーピングすることで、液相からのドーピングに比し、より高濃度でより深いドーピングが行えることがわかる。また、Ａｌを４Ｈ－ＳｉＣへドーピングして形成したｐ$^{++}$型の不純物導入領域２ａと、ｎ$^{-}$型のエピ層２２の表面の領域とで形成したｐｎ接合ダイオードの特性を、不純物導入領域２ａとオーミック接触性を有するタングステンプローブを不純物導入領域２ａに接触させて測定した。図１４（ａ）に示すように、ｐｎ接合ダイオードの立ち上がり電圧は、対象物２である４Ｈ－ＳｉＣのビルトイン電圧である約２．５Ｖ近傍であった。また図１４（ｂ）に示すように、ｐｎ接合ダイオードのオンオフ比は４桁程度の整流性であり、十分なｐｎ接合が形成されていることが確認できた。

【００６４】

（比較例に係る不純物導入方法）

一方、図１５に、比較例に係る不純物導入方法を用いてｐ型の不純物導入領域を４Ｈ－ＳｉＣに形成した対象物２の上面のＳＥＭ画像を示す。図１５は第１の実施の形態に係る不純物導入方法における対象物２の上面を示した図８に対応する比較例の画像である。比較例では、図２中に示した膜厚上限直線Ｌと膜厚下限を示す点線との間に挟まれた、図２中右上側に表れるプロセスウィンドウ以外の、エネルギー密度Ｆと膜厚ｔ$_{f}$との組み合わせを用いてドーピングを行った。尚、他の導入条件は上記した膜厚ｔ$_{f}$＝２４０ｎｍの場合と同様とした。

【００６５】

図１５（ａ）は、図２中の＋印のプロットｃ１の場合（膜厚ｔ$_{f}$＝１２０ｎｍ）の上面図であり、エネルギー密度Ｆ＝４．０Ｊ／ｃｍ^{2}の光パルス照射後、ショットの輪郭線の内側は黒みがかった色調で変色すると共に金属光沢は表れておらず、不純物源膜４が残存していないことがわかる。またショットの輪郭線の外側には、光パルス照射後に、溶融流動したＡｌの痕跡が表れている。そしてこの場合、図１６（ａ）の上面図に示すように、照射領域の広範囲に亘って変色した状態が形成され、陥凹部Ｍ及び突起部３が大量に形成され広く分布している。

【００６６】

また図１５（ｂ）は、図２中の３個の×印のプロットｂ１～ｂ３のうち最も上側のｂ１の場合（膜厚ｔ$_{f}$＝８１０ｎｍ）の上面図であり、エネルギー密度Ｆ＝４．０Ｊ／ｃｍ^{2}の光パルス照射後、ショットの輪郭線の内側は極めて黒みがかった色調で変色すると共に金属光沢が表れている。またショットの輪郭線の外側には、光パルス照射後に、溶融流動したＡｌの痕跡が表れていない。そしてこの場合、図１６（ｂ）の上面図に示すように、対象物２の上面は全く変色しておらず、陥凹部Ｍ及び突起部３が一切形成されていない。

【００６７】

ここで、第１の実施の形態に係る膜厚ｔ$_{f}$＝２４０ｎｍ、４８０ｎｍのそれぞれの場合、及び、比較例に係る膜厚ｔ$_{f}$＝１２０ｎｍ、８１０ｎｍのそれぞれの場合について、各種の電圧を印加した際に流れる電流を測定して、ダイオード特性を検証した。図１７（ａ）に示すように、膜厚ｔ$_{f}$＝２４０ｎｍ、４８０ｎｍのいずれの場合も、膜厚ｔ$_{f}$＝１２０ｎｍの場合に比べ、表面の欠陥の程度が抑制されたため、逆電圧印加時のリーク電流が少なくなった。また図１７（ｂ）に示すように、膜厚ｔ$_{f}$＝２４０ｎｍ、４８０ｎｍのいずれの場合も、膜厚ｔ$_{f}$＝１２０ｎｍの場合に比べ、順方向の電流を大きくすることができた。尚、膜厚ｔ$_{f}$＝８１０ｎｍの場合、照射領域上にタングステンプローブを接触させて電流を測定したが、電圧を大きくしても、ピコアンペア（ｐＡ）レベルの電流しか検出されず、対象物２の表面の照射領域には、ほとんどドーピングできていなかった。

【００６８】

第１の実施の形態に係る不純物導入方法によれば、室温、大気圧下で、光パルスの１回あたりのエネルギー密度Ｆを、従来に比して飛躍的に高めて高エネルギー状態で照射することにより、不純物源膜４における光パルスの照射領域の格子振動を一気に活性化させ昇温する。同時に４Ｈ－ＳｉＣの対象物２のエピ層２２の不純物源膜４との界面近傍におけ

る格子振動を活性化させ、エピ層２２の表面がアブレーションし始める状態となるように昇温させる。これにより、大気圧中での１ショットあたりの４Ｈ－ＳｉＣのエピ層２２の表面への不純物元素の導入を促進する。

【００６９】

また第１の実施の形態に係る不純物導入方法によれば、光パルスの１ショットあたりのエネルギー密度Ｆを高めることにより、高エネルギーの光パルスの影響で不純物源膜４の下側のエピ層２２の表面の欠陥状態（荒れ）が生じることを考慮して、光パルスの照射前に、不純物源膜４の厚みを不純物源膜４が光パルス照射後に残存するレベルの厚さに予め設定してエピ層２２の表面上に成膜する。これにより高エネルギーの光パルスを不純物源膜４に照射しても、照射後に不純物源膜４がエピ層２２の表面に残存するのでエピ層２２の表面の欠陥状態を所定の許容範囲内に収まるように制御する。

【００７０】

この結果、第１の実施の形態に係る不純物導入方法によれば、対象物２としての４Ｈ－ＳｉＣのエピ層２２の表面の不純物元素の濃度を１×１０^{２１}の後半レベルという、４Ｈ－ＳｉＣの通常の固溶濃度を大きく上回る高濃度で導入することができると共に、対象物２の表面から５０ｎｍ程度の深さ位置までに亘り、Ａｌを$１\times１０^{２０}ｃｍ^{-３}$程度以上導入することができる。また５０ｎｍ以降の深さ位置においても、Ａｌを表面から１００ｎｍレベルの深さまで導入することができる。

【００７１】

この点、不純物元素のイオンを高電圧で加速して結晶に注入する場合、基板の表面から深さ３０ｎｍまでの範囲であっても、$１０^{１９}ｃｍ^{-３}$以上の不純物を注入することは困難である。第１の実施の形態に係る不純物導入方法によれば、イオン注入法による導入の上限値を、最表面の濃度及び侵入深さのいずれの点でも上回る。また第１の実施の形態に係る不純物導入方法によれば、イオン注入法において、必要とされる対象物のイオン注入前の加熱処理や注入後の高温アニールを省ける点でも有利である。

【００７２】

また従来は、４Ｈ－ＳｉＣの対象物２上に不純物元素を固相導入源として設けてレーザー光６を照射しレーザードーピングする際、約$６．７\times１０^{-５}$Ｐａの低圧状態で行っていたが、第１の実施の形態に係る不純物導入方法によれば、大気圧下でも不純物元素を導入可能になるため、低圧状態とするための設備負担や作業負担を無くし、従来以上に容易かつ迅速にレーザードーピングを行うことができる。

【００７３】

－第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法－

第１の実施の形態に係る不純物導入方法で用いた図４～図７、図９、図１２及び図１８を用いて第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法を説明する。例えば、まず図４に示したのと同様に、第１導電型の第１の半導体領域となるエピ層２２を有する中間生成物を対象物２として用意する。第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法では、第１導電型はｎ型であり、第２導電型は第１導電型の反対のｐ型であると選択する。その後、図５に示したのと同様に、第１導電型の第１の半導体領域の$ｎ^{-}$型のエピ層２２側の上面に第２導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜４を成膜する。

【００７４】

次に、図６に示したのと同様に、第１の半導体領域であるエピ層２２の上面に不純物源膜４を介してレーザー光６の光パルスを照射する。この際、エピ層２２の上面にレーザー光６をスキャンして照射し、エピ層２２の上部に、第２導電型の不純物元素を導入し、$ｐ^{++}$型の第２の半導体領域２ａを所望のパターンで選択的に形成し、ｐｎ接合を得る。スキャンは、図１中のＸ－Ｙ移動ステージ２３の内部に双方向矢印で示したようなＸ－Ｙ移動ステージ２３の移動、又はビーム調整系３３側の移動により行えばよい。また第２の半導体領域２ａのパターニングは、予め不純物源膜４をエピ層２２の表面上で所望のパターンに成膜した上で、膜のパターンに沿ってスキャン照射して行ってもよいし、或いは不純物源膜４をエピ層２２の表面全面に成膜した上で、所望のパターンに沿ってスキャン照射

して行ってもよい。

【００７５】

次に、図９に示したのと同様に、エピ層２２の表面上に残留した不純物源膜４を除去し、その後、図１２に示したのと同様に、エピ層２２の表面上に固着した突起部３を除去して第２の半導体領域２ａを露出する。そして図１８に示すように、露出した第２の半導体領域２ａの上に、例えばニッケル（Ｎｉ）や、チタン（Ｔｉ）やＡｌの積層膜等のオーム性接触をするアノード電極膜７を接合して形成する。また半導体基板２１の裏面には、例えばＮｉからなるカソード電極膜８を形成する。

【００７６】

その後、真空アニールを８７５℃で６分間程度施し、アノード電極膜７を例えば$Ti_3Si_3C_2$等の電極膜として、第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法が終了する。尚、第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法では、導入する不純物元素の種類や、それぞれの濃度、形成する照射パターンを適宜変化させて組み合わせることで、各種の半導体素子を製造することが可能である。

【００７７】

本発明の第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法によれば、対象物２の表面に生じる欠陥状態を制御するように不純物源膜４の膜厚t_fを調整することにより、高エネルギーの光パルスを用いることで生じる問題を克服し、固相の不純物元素に対するレーザードーピングの高速化と、半導体素子の高品質化とを両立させる。そして１ショットの光パルスであっても、充分な侵入深さ及び表面濃度で不純物元素の導入領域を形成可能となるので、半導体領域をパターニングする作業時間を大きく低減できると共に、一定の品質を維持した半導体素子を効率よく大量生産できる。

また第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法によれば、不純物元素を対象物２の表面から非常に深い位置まで導入すると共に、高濃度で導入して半導体領域を形成するので、大電流を使用するパワー半導体等向けの半導体素子として好適な半導体素子を得ることができる。

【００７８】

（第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第１変形例）

第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法では、第１導電型（ｎ型）の第１の半導体領域を有する中間生成物を対象物２として、対象物２のn^-型のエピ層２２の内部にp^{++}型の不純物元素を導入して第２の半導体領域２ａを形成する場合を例として説明した。これに対し、図１９～図２２に示すように、例えば第２導電型（ｐ型）の第１の半導体領域をベース層７３として有する中間生成物のｐ型のベース層７３の内部に、ベース層７３より高濃度のp^{++}型の第２の半導体領域をベースコンタクト領域７４ａとして形成するようにすれば、ＭＯＳＦＥＴの製造方法の一部を構成できる。

【００７９】

この場合も、まず図１９に示すように、ドレイン領域７１の上にn^-型のドリフト層７２をエピタキシャル成長させて形成し、更にドリフト層７２の上にｐ型のベース層７３を連続エピタキシャル成長させて形成した中間生成物を用意する。その後、図２０に示すように、第２導電型のベース層７３の上面に、第２導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜７４を、光パルスの１回あたりの照射時間τ及びエネルギー密度Ｆを考慮して決定した膜厚t_fで成膜する。

【００８０】

次に、不純物源膜７４を介してレーザー光６の光パルスを照射する。この際、ベース層７３の上面にレーザー光６をスキャンして照射し、ベース層７３の上部に、第２導電型の不純物元素を導入し、ベース層７３よりも高濃度のp^{++}型のベースコンタクト領域７４ａを所望のパターンで選択的に形成する。レーザー光６のスキャン及びベースコンタクト領域７４ａのパターニングの方法は、図６等に示した半導体素子の製造方法に準じればよい。

【００８１】

次に、ベース層７３及びベースコンタクト領域７４ａの表面上に残留した不純物源膜７４を除去し、その後、図２１に示すように、ベースコンタクト領域７４ａの表面上に固着した突起部３を除去する。そしてそれぞれ図示を省略したソース領域の形成、ベース層７３を貫通するＵ溝の形成、Ｕ溝の内側におけるゲート絶縁膜の形成、ゲート絶縁膜の上のゲート電極の形成等の工程を経て、図２２に示すように、露出したベース層７３及びベースコンタクト領域７４ａの上に、例えばＮｉやＴｉやＡｌの積層膜等のオーム性接触をするソース電極膜７５を形成し、ドレイン領域７１の裏面に図示を省略するドレイン電極膜を形成すれば、第１の実施の形態に係る半導体素子としてのＭＯＳＦＥＴの製造工程が終了する。

第１変形例に係る半導体素子の製造方法を用いたＭＯＳＦＥＴの製造方法によれば、ベース層７３の内部で中間生成物の表面に、ベース層７３に比し極めて高濃度のベースコンタクト領域７４ａを迅速に形成可能となるので、ＭＯＳＦＥＴの品質を維持しつつ効率よく大量生産できる。

【００８２】

（第１の実施の形態に係る半導体素子の製造方法の第２変形例）

また第１の実施の形態に係る不純物導入方法を用いれば、図３２に示すように、エピタキシャル成長層（エピ層）８２の上部に高濃度のp^{++}型の第２の半導体領域８４ａ～８４ｃを所望する任意のパターンで形成することにより、主面に平行なｐｎ接合を構成した半導体素子（ダイオード）が製造できる。以下に図２３～図３３を用いて第１導電型（ｎ型）の第１の半導体領域をエピ層８２として有する中間生成物を用意し、この中間生成物のｎ型のエピ層８２と不純物源膜８４の間に、不純物元素の導入を選択的に阻止する障壁をなす、第１導入阻止パターン８３ａ、第２導入阻止パターン８３ｂ及び第３導入阻止パターン８３ｃを有する不純物導入マスクを設けて選択的なレーザードーピングを行う方法について説明する。

【００８３】

まず図２３に示すように、n^{+}型の半導体基板８１の上に、n^{-}型の半導体領域をエピタキシャル成長させて形成したエピ層８２を有する中間生成物を用意する。エピ層８２は、例えば$1\times10^{16}cm^{-3}$程度の濃度であり、厚みは１０μｍ程度で構成できる。その後、エピ層８２の上面に、例えばプラズマＣＶＤ（ＰＥＣＶＤ）等により、酸化珪素（SiO_2）からなる薄膜を成膜する。そして成膜されたSiO_2膜の上にフォトレジスト膜を塗布し、塗布したフォトレジスト膜をフォトリソグラフィ技術でパターニングし、このパターニングされたフォトレジスト膜をマスクとして薄膜をエッチングして所望のパターンに形成する。薄膜がSiO_2膜の場合、エッチングは、例えばフッ化アンモニウム（NH_4F）及びフッ化水素酸（ＨＦ）を含む水溶液である緩衝フッ酸（ＢＨＦ）を用いて行うことができる。

【００８４】

図２４の上面図（平面図）には、エピ層８２の主面の中央に形成された円環状の第１導入阻止パターン８３ａと、この第１導入阻止パターン８３ａと同心位置で第１導入阻止パターン８３ａの外側に導入窓部となる隙間を介して形成された円環状の第２導入阻止パターン８３ｂと、この第２導入阻止パターン８３ｂの外側に導入窓部となる隙間を介して形成された枠状の第３導入阻止パターン８３ｃとを有するパターンが、薄膜をエッチングすることにより形成された場合が例示されている。第１導入阻止パターン８３ａ、第２導入阻止パターン８３ｂ及び第３導入阻止パターン８３ｃによって、本発明の「不純物導入マスク」が構成されている。

【００８５】

第１導入阻止パターン８３ａと第２導入阻止パターン８３ｂの隙間及び第２導入阻止パターン８３ｂと第３導入阻止パターン８３ｃの隙間は所定の間隔を有し、それぞれ不純物元素の選択的な導入用の窓部をなし、図２５に示すように、エピ層８２の上面の一部がそれぞれの隙間に露出している。尚、図２４及び図２５中に例示した窓部をなす隙間の幅は略等幅であるが、この幅は、エピ層８２と第２の半導体領域８４ａ～８４ｃのｐｎ接合か

ら生じる空乏層の延伸状態を考慮して設定されるため、実際には例示したものに限定されず、適宜変更され得る。

【００８６】

次に、図２６に示すように、エピ層８２の上に、第２導電型を呈する不純物元素を含む不純物源膜８４を、光パルスの１回あたりの照射時間τ及びエネルギー密度Ｆを考慮して決定した膜厚t_fで、第１導入阻止パターン８３ａ、第２導入阻止パターン８３ｂ及び第３導入阻止パターン８３ｃを介して成膜する。不純物元素がＡｌの場合、膜厚t_fは例えば２４０ｎｍ程度である。尚、図２６中では説明の便宜のため、エピ層８２の厚みと不純物源膜８４の厚みは略同程度に描かれている。

【００８７】

次に、図２７に示すように、大気雰囲気中で、不純物源膜８４を介してレーザー光６としてＫｒＦエキシマレーザーの光パルスを照射する。不純物元素がＡｌの場合、光パルスのエネルギー密度Ｆは例えば４．０Ｊ／ｃｍ^{2}とし、照射回数は１回とする。光パルスの照射は、１回の照射範囲に、第３導入阻止パターン８３ｃの枠の内側の領域が漏れなくすべて含まれるようにビームを成形して行う。図２７中では、第１導入阻止パターン８３ａ、第２導入阻止パターン８３ｂ及び第３導入阻止パターン８３ｃのすべての表面に対して光パルスが照射された状態が例示されている。

【００８８】

光パルスの照射により、第１導入阻止パターン８３ａと第２導入阻止パターン８３ｂの隙間に露出したエピ層８２の上部の一部に、堆積した不純物源膜８４を介してp^{++}型の不純物元素を選択的に導入する。また第２導入阻止パターン８３ｂと第３導入阻止パターン８３ｃの隙間に露出したエピ層８２の上部の一部にも、堆積した不純物源膜８４を介してp^{++}型の不純物元素を選択的に導入する。

【００８９】

その結果、エピ層８２の上部には、平面パターンで、p^{++}型の不純物元素が選択的に導入された半導体領域８４ａ～８４ｃの上面と、導入されないエピ層８２の上面とが等間隔で交互に同心円状のパターンとして表れる。すなわちエピ層８２の上部にｎ型の半導体領域とｐ型の半導体領域とが、主面に平行な面内に繰り返し形成された表面パターンが構成される。尚、p^{++}型の半導体領域８４ａ～８４ｃの幅及びp^{++}型の半導体領域８４ａ～８４ｃ間の隙間の幅は、適宜変更して設定できる。

【００９０】

次に、図２８に示すように、第１導入阻止パターン８３ａ、第２導入阻止パターン８３ｂ及び第３導入阻止パターン８３ｃの表面上に残留した不純物源膜８４の一部を、所定のエッチング液で除去し、その後、p^{++}型の半導体領域８４ａ～８４ｃの表面上に発生して固着した図９に示したような突起部を除去する。不純物源膜８４がＡｌの場合は、例えば７５℃程度の熱リン酸（H_3PO_4）等をエッチング液として使用可能である他、リン酸／硝酸／酢酸混合液や王水等の種々の酸も使用可能である。

【００９１】

次に、エピ層８２の上面と、第１導入阻止パターン８３ａ、第２導入阻止パターン８３ｂ及び第３導入阻止パターン８３ｃの上面とにフォトレジスト膜を塗布して、フォトリソグラフィ技術でフォトレジスト膜をパターニングする。そしてパターニングされたフォトレジスト膜をマスクとし、ＢＨＦ等を用いたエッチングにより、エピ層８２の上面に残存する不純物導入マスクを選択的に除去した後、フォトレジスト膜を除去すると、図２９に例示するように、第３導入阻止パターン８３ｃのみが残留したパターンが形成される。すなわち第１導入阻止パターン８３ａ及び第２導入阻止パターン８３ｂが除去され、平面パターンで円形状の開口部が形成されている。この開口部には、エピ層８２の上部のp^{++}型の半導体領域８４ａ～８４ｃが同心円状に形成された領域の上面が露出している。

【００９２】

次に、図３０に示すように、エピ層８２のp^{++}型の半導体領域８４ａ～８４ｃが同心円状に形成された領域を覆うように、例えばＴｉ等の金属膜を成膜する。そして、半導体

基板８１に所定の温度で所定の時間、アニールを施し、表面側のアノード電極膜８６を形成する。図３０中には、エピ層８２のｐ＋＋型の半導体領域８４ａ～８４ｃが形成された領域の上面に、アノード電極膜８６が積層された状態が例示されている。尚、第３導入阻止パターン８３ｃの内縁側の一部の領域の上面にも、アノード電極膜８６が積層され、アノード電極膜８６の周縁部をなすように形成されている。第３導入阻止パターン８３ｃの内側の円形状のエピ層８２の領域とアノード電極膜８６との界面がショットキー界面をなし、ｐ＋＋型の半導体領域８４ａ～８４ｃとアノード電極膜８６との界面がオーミックコンタクトする。

【００９３】

次に、図３１に示すように、ショットキー界面上のアノード電極膜８６の上面に電極パッド８７を形成する。その後、半導体素子の裏面側をなす半導体基板８１のエピ層８２と反対側の表面上に、例えばＮｉ等の金属膜を成膜した上で、半導体基板８１に所定のアニールを施し、裏面側のカソード電極膜８５を形成する。

【００９４】

次に、エピ層８２側の全面にポリイミド膜等を堆積させてパッシベーション膜８８を形成する。尚、エピ層８２の表面上に残存させた第３導入阻止パターン８３ｃは層間絶縁膜として用いるが、ＣＶＤ法等により別途SiO_2膜を追加して積層させることにより、層間絶縁膜として必要な厚みを適宜形成してもよい。

【００９５】

次に、図３２に示すように、電極パッド８７上のパッシベーション膜８８の一部を、フォトリソグラフィ技術及びエッチング技術により開口させ、その後、半導体基板８１を複数のチップ状にダイシングして、電極パッド８７を介してワイヤーボンディングし、パッケージに搭載（マウント）すれば、第２変形例に係る半導体素子の製造工程が終了する。

【００９６】

尚、エピ層８２とアノード電極膜８６とのショットキー接合の特性改善及び半導体基板８１とカソード電極膜８５とのオーミックコンタクト特性改善のため、アノード電極膜８６の堆積後のアニール温度をカソード電極膜８５より低くする場合は、図３３に示すように、先にカソード電極膜８５を形成した後で、図３０に示したようなアノード電極膜８６を形成し、以下、図３１及び図３２で説明したようなプロセスを行ってもよい。このとき例えば、カソード電極膜８５のアニール温度を９００℃とし、アノード電極膜８６のアニール温度を５００℃とすることができる。

【００９７】

第２変形例の実施例として、図３４に示すように、平面パターンで約２００μｍ程度の円形状のショットキー界面を有する半導体素子を例示する。この円の内側には、ｐ＋＋型の半導体領域８４ａ～８４ｃの上面とエピ層８２の一部の上面とが、それぞれ４μｍ程度の幅をなして同心で表れるように、ｐ型の不純物元素であるＡｌが選択的に導入されている。すなわち実施例に係る半導体素子は、エピ層８２の上部に形成された主面に平行なｐｎ接合が、いわゆる接合障壁ショットキー構造（Ｊｕｎｃｔｉｏｎ Ｂａｒｒｉｅｒ Ｓｈｏｔｔｋｙ構造）をなすダイオードである。この実施例に係る半導体素子の表面と裏面に電圧を印加し、表面と裏面の間の縦方向に流れる電流を測定した。

【００９８】

一方、ｐ＋＋型の半導体領域８４ａ～８４ｃのレーザードーピング以外、図２３～図３３で説明したプロセスを同様に行って、図３５に示すように、選択的なｐ＋＋型の半導体領域のパターンが形成されていない半導体素子を比較例として製造した。すなわち比較例に係る半導体素子は、通常のショットキーバリアダイオード（ＳＢＤ）である。比較例に係る半導体素子についても、実施例に係る半導体素子と同様に電圧を印加して電流を測定した

【００９９】

図３６中に実線の軌跡で示したように、正の電圧（順バイアス）を印加したとき、実施例に係る半導体素子は、破線の軌跡で示した比較例と同様に、２Ｖ以下の僅かな電圧の印

加で、同等程度の電流が流れた。また負の電圧（逆バイアス）を印加すると、図３７中に実線の軌跡で示したように、破線の軌跡で示した比較例と同様に、流れる電流（リーク電流）が小さく抑えられ、ダイオードとしての整流性を備えていることが分かった。一方、例えば－３０Ｖの電圧を印加したとき、比較例に係る半導体素子のリーク電流は１×１０$^{-8}$Ａ程度であったが、実施例に係る半導体素子のリーク電流は１×１０$^{-10}$Ａ程度に抑えられ、比較例の場合よりおよそ２桁低減した。

【０１００】

このように第２変形例に係る半導体素子は、接合障壁ショットキー構造の特性を著しく向上させることができた。第２変形例に係る半導体素子の製造方法によれば、ｐ型の不純物元素を選択的に高濃度で導入し、導入された半導体領域と導入しない半導体領域とにより所望のパターンを描くことにより、ワイドバンドギャップ半導体を用いた高耐圧、低オン抵抗で、且つ、リーク電流を低減させた半導体素子が実現できる。

【０１０１】

（第２の実施の形態）

－不純物導入装置の構造－

本発明の第２の実施の形態に係る不純物導入装置１ｂは、図３８に示すように、対象物２の表面に不純物元素を含む不純物源膜４を設けると共に、不純物源膜４を介して対象物２にレーザー光６等のエネルギー密度の大きな光パルスを照射して不純物元素を導入する導入処理装置５０と、この導入処理装置５０の不純物源膜４の膜厚等の成膜条件及びレーザー光６のエネルギー密度や対象物２に対する光パルスの相対的な光照射位置等の光照射条件を制御可能な演算制御装置３０と、を備える。

【０１０２】

導入処理装置５０は、真空排気可能なチャンバ５１と、チャンバ５１内に設けられ対象物２を支持し絶縁材料を含んで構成された支持台６２と、支持台６２の上に設けられた下部電極１２と、を備える。チャンバ５１内では不純物元素を含むターゲット５４が下部電極１２に対向して配置されている。チャンバ５１の上部の対象物２に対向する位置には、光学窓（ビューポート）５１ａがチャンバ上板５３の上に保持されて設けられると共に、チャンバ上板５３及びこのチャンバ上板５３の下に設けられたターゲット５４には互いに同軸の貫通孔がそれぞれ形成されている。

【０１０３】

光学窓５１ａの上方には光源３４を有するビーム調整系３３が設けられ、ビーム調整系３３からレーザー光６が、光学窓５１ａ、チャンバ上板５３及びターゲット５４のそれぞれの貫通孔を貫通して対象物２の上面に照射される。また導入処理装置５０には支持台６２の内部に、対象物２を加熱するシートヒータ等の加熱装置６１が埋め込まれている。

【０１０４】

導入処理装置５０には、更に下部電極１２とターゲット５４との間に接続された電源１５と、チャンバ５１に接続されチャンバ５１内に希ガスを導入するガス導入バルブ１６と、チャンバ１１に接続されチャンバ１１内を真空状態にする真空ポンプ１７と、が設けられる。電源１５、ガス導入バルブ１６及び真空ポンプ１７はいずれも膜厚制御部３１を介して演算制御装置３０に接続されており、第１の実施の形態に係る不純物導入装置１ａの場合と同様に、それぞれの動作が制御される。

【０１０５】

またビーム調整系３３は光パルスを出射する光源３４を有し、光源制御部３２を介して演算制御装置３０に接続され、第１の実施の形態に係る不純物導入装置１ａの場合と同様に、動作が制御される。図３８中において、図１に示した不純物導入装置１ａの同じ符号を付した部材については詳細な説明を省略する。

【０１０６】

第２の実施の形態に係る不純物導入装置１ｂにおいては、図１に示した成膜装置１０と光照射装置２０とを一体化して、対象物２をチャンバ５１の内側に維持した状態で、成膜処理とレーザー光照射処理とを導入処理装置５０の同じチャンバ５１内で交互に連続的に

行うことができるように構成されている点が、第１の実施の形態に係る不純物導入装置１ａと異なる特徴である。また第２の実施の形態に係る不純物導入装置１ｂでは、真空中でレーザー光６を照射可能であるため、１０～２００ｎｍ付近の真空紫外光の範囲に含まれるＡｒＦエキシマレーザー（１９３ｎｍ）やＦ$_2$レーザー（１５７ｎｍ）のような短波長の光パルスを使用できる。

【０１０７】

第２の実施の形態に係る不純物導入装置１ｂによれば、成膜装置１０と光照射装置２０とを一体化して不純物元素の固相からのレーザードーピングを行うので、不純物源膜４の成膜処理後に対象物２を別の場所に搬送する必要がない。また例えば、レーザー光６を１ショットした後、照射領域上に再度、不純物源膜４を成膜し、先行のショットと同一の照射領域上にレーザー光６を更に１ショット、…のように、光パルスの照射処理と成膜処理とを連続して交互に繰り返し行うことも可能となり、不純物元素の導入速度をより早めて導入濃度を高めることができる。

【０１０８】

また第２の実施の形態に係る不純物導入装置１ｂによれば、対象物２を搭載した下部電極１２の温度を加熱装置６１によって調節して、対象物２を一定の温度に昇温させた状態で、光パルスを照射してレーザードーピングを行うことができる。対象物２を昇温させる熱効果により、不純物元素の注入及び拡散によって欠損した４Ｈ－ＳｉＣの結晶の回復を促進することができる。不純物元素がＡｌの場合、対象物２の温度が、室温以上５００℃程度以下の状態であることが好ましい。５００℃を超える場合、対象物２の周辺の装置の発熱量等も考慮して、Ａｌが溶融し固相を維持できない場合がある。尚、第２の実施の形態に係る不純物導入装置１ｂを用いた不純物導入方法については、第１の不純物導入方法と同様であるため、説明を省略する。また第２の実施の形態に係る不純物導入方法を用いた半導体素子の製造方法についても同様であるため、説明を省略する。

【０１０９】

（第２の実施の形態に係る不純物導入装置の変形例）

第１の実施の形態に係る不純物導入方法では、レーザー光６の光パルスを照射する際には大気圧下で照射するように構成した。これに対し例えば、第２の実施の形態に係る不純物導入装置１ｂを用いて、チャンバ５１中の雰囲気ガスに気相の不純物元素を含ませると共に、不純物源膜４と同一の不純物元素からなる分子の分圧を高めることによって、ドーピング時のチャンバ５１内の圧力を大気圧よりも高めて、光パルスを照射するように構成してもよい。これにより、雰囲気ガスに含まれる不純物元素の分圧を用いて不純物元素の導入を促進することができる。

【０１１０】

（その他の実施の形態）

本発明は上記の開示した第１及び第２の実施の形態によって説明したが、この開示の一部をなす論述及び図面は、本発明を限定するものであると理解すべきではない。この開示から当業者には様々な代替実施の形態、実施例及び運用技術が明らかになると考えられるべきである。例えば、対象物２の表面の欠陥状態の程度を一定の範囲に制御できる限り、光パルスの照射回数を１回に限定することなく、２回、３回等、複数回照射するように構成してもよい。

【０１１１】

不純物元素がレーザー光６のエネルギーを複数回吸収することにより、活性化率を高めることができる。特に第２の実施の形態に係る不純物導入装置１ｂによれば、このような連続的な照射を効率的に実行可能になる。ただし、照射回数が多すぎると作業時間がかかり過ぎ、半導体素子の生産性が低下するため、多くても１０回程度以内、より好ましくは３回以内に留めることが好ましい。照射回数の制御は、演算制御装置３０を介して光照射装置２０の動作を制御すればよい。

【０１１２】

また本発明の実施の形態に係る半導体素子の製造方法では、ｐｎ接合ダイオードやＭＯ

ＳＦＥＴを半導体素子の代表例として説明したが、半導体素子としてはダイオードやＭＯＳＦＥＴに限定されるものではない。本発明はＩＧＢＴ、ＳＩＴ、ＧＴＯ、ＳＩサイリスタ等、各種の半導体素子（半導体装置）に適用することができる。

【０１１３】

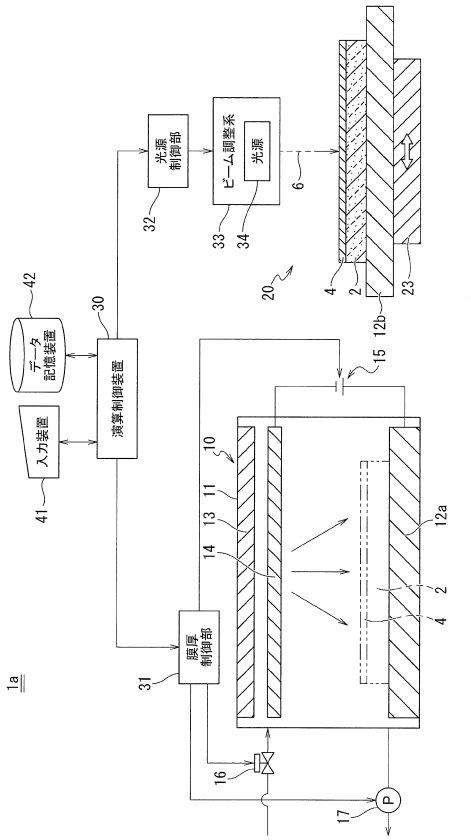
また本発明に係る不純物導入装置、不純物導入方法及び半導体素子の製造方法は、図１～図３８で示したようなそれぞれの実施の形態の技術的思想を互いに組み合わせて構成してもよい。以上のとおり本発明は、上記に記載していない様々な実施の形態等を含むとともに、本発明の技術的範囲は、上記の説明から妥当な特許請求の範囲に係る発明特定事項によってのみ定められるものである。

【符号の説明】

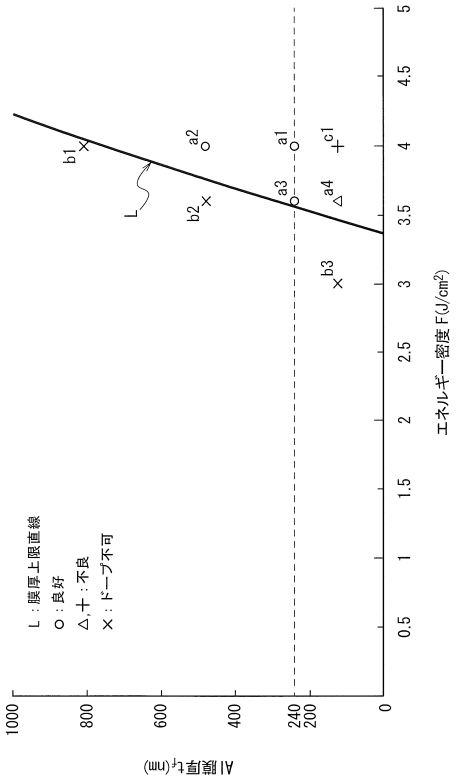
【０１１４】

１ａ，１ｂ　不純物導入装置
２　対象物（中間生成物）
２ａ　不純物導入領域（半導体領域）
３　突起部
４　不純物源膜
６　レーザー光
１０　成膜装置
２０　光照射装置
２１　半導体基板
２２　エピタキシャル成長層
３０　演算制御装置
３１　膜厚制御部
３２　光源制御部
３３　ビーム調整系
３４　光源
５０　導入処理装置
５１　チャンバ
５１ａ　光学窓
６１　加熱装置
７３　ベース層
７４　不純物源膜
７４ａ　ベースコンタクト領域（コンタクト領域）
７５　ソース電極膜（電極膜）
８１　半導体基板
８２　エピタキシャル成長層
８３ａ　第１導入阻止パターン
８３ｂ　第２導入阻止パターン
８３ｃ　第３導入阻止パターン
８４　不純物源膜
８４ａ～８４ｃ　半導体領域
８５　カソード電極膜
８６　アノード電極膜
Ｆ　エネルギー密度
Ｍ　陥凹部
t_f　膜厚
τ　照射時間

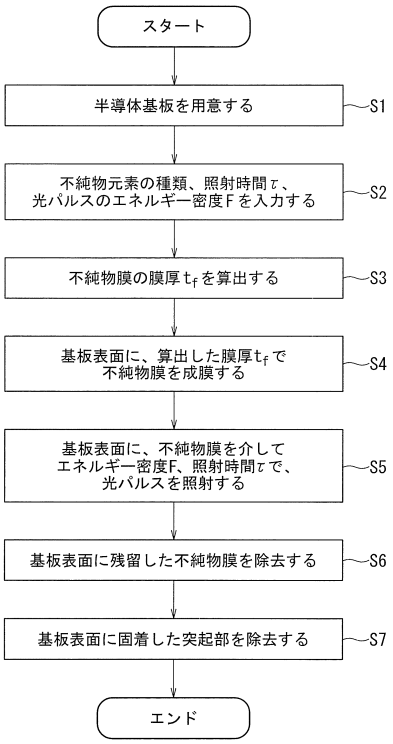
【図１】


光源制御部
ビーム調整系
光源
データ記憶装置
入力装置
演算制御装置
膜厚制御部
1a

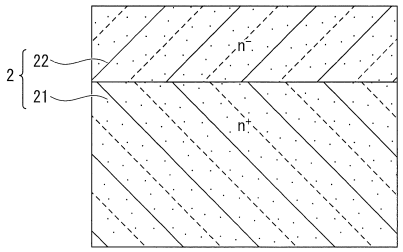
【図２】


L：膜厚上限直線
○：良好
△,＋：不良
×：ドープ不可
Al膜厚t_f(nm)
エネルギー密度 F(J/cm²)

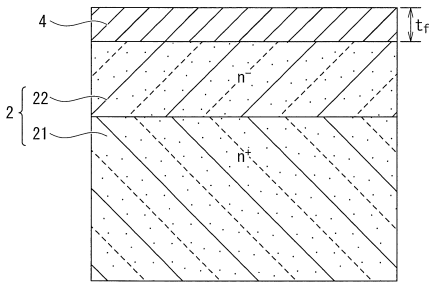
【図３】


スタート
半導体基板を用意する
S1
不純物元素の種類、照射時間τ、光パルスのエネルギー密度Fを入力する
S2
不純物膜の膜厚t_fを算出する
S3
基板表面に、算出した膜厚t_fで不純物膜を成膜する
S4
基板表面に、不純物膜を介してエネルギー密度F、照射時間τで、光パルスを照射する
S5
基板表面に残留した不純物膜を除去する
S6
基板表面に固着した突起部を除去する
S7
エンド

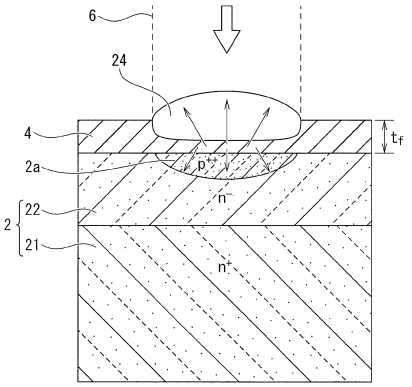
【図４】


2
22
21
n⁻
n⁺

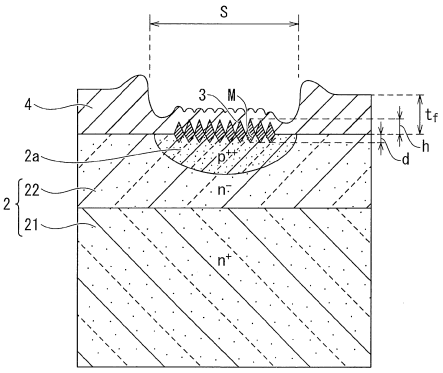
【図５】


4
t_f
2
22
21
n⁻
n⁺

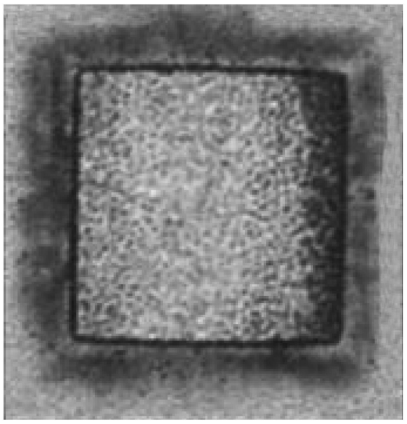
【図６】

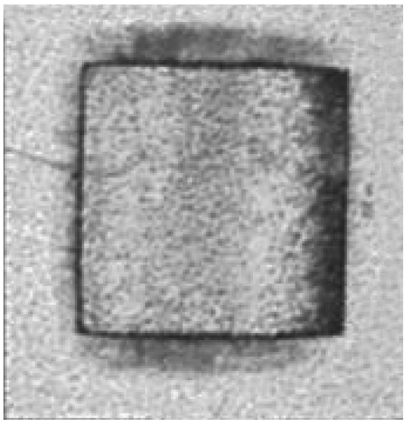


【図７】

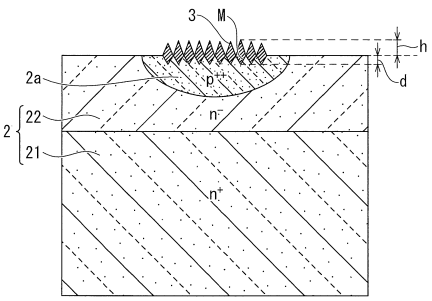


【図８】

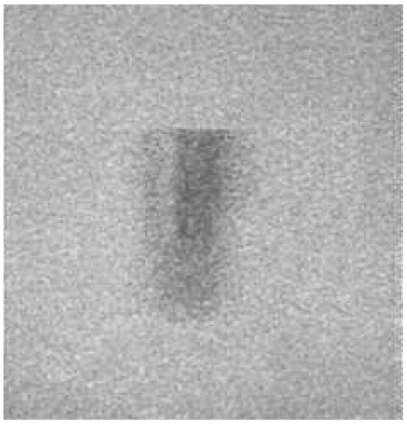


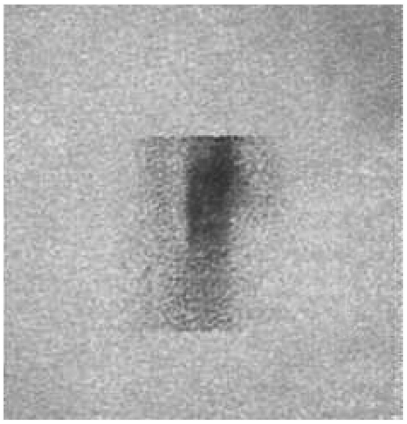


【図９】

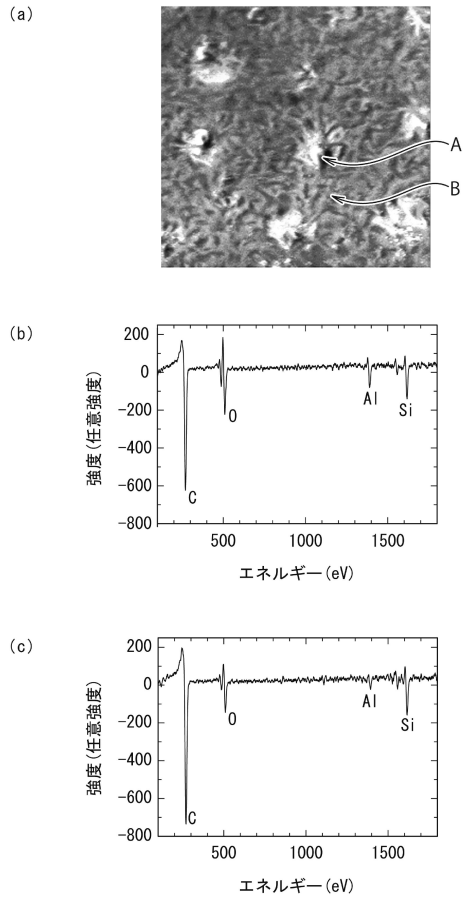


【図１０】

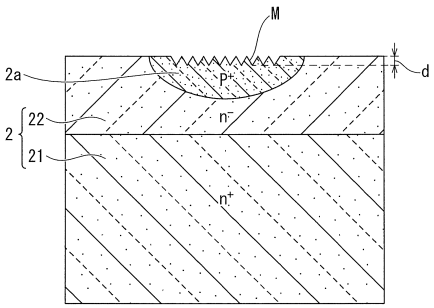




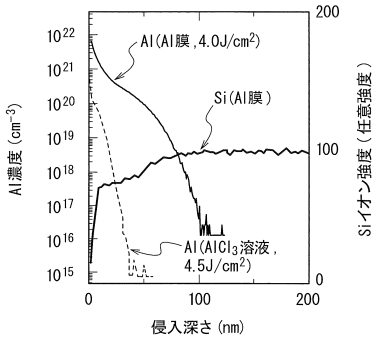
【図１１】



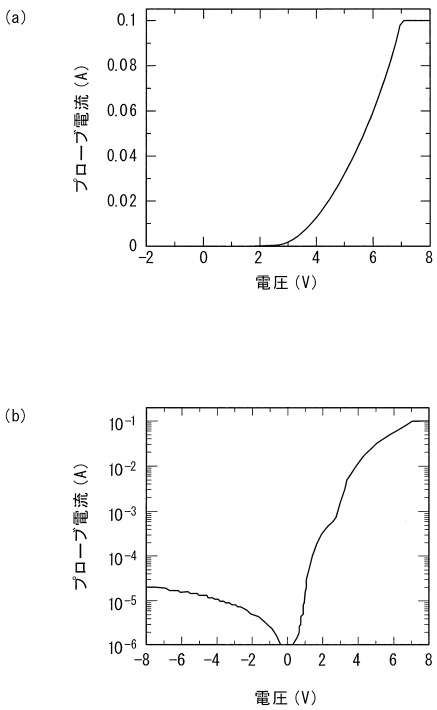
【図１２】



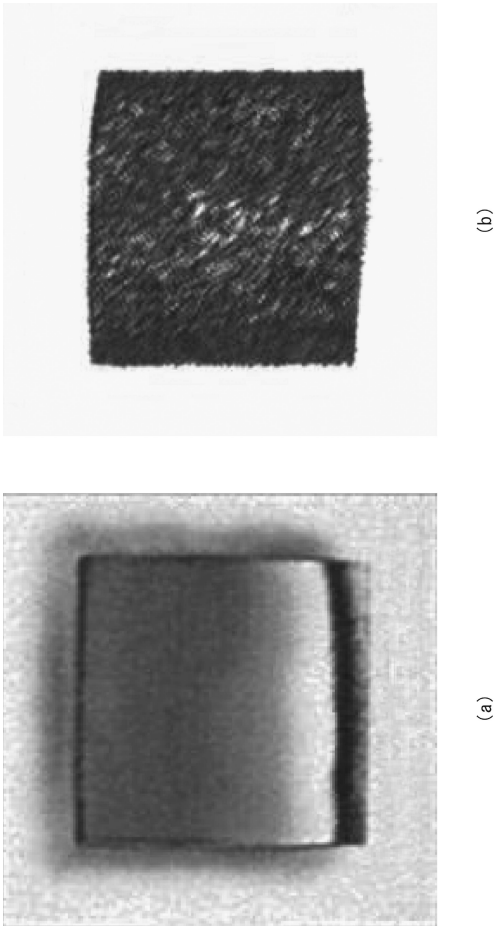
【図１３】



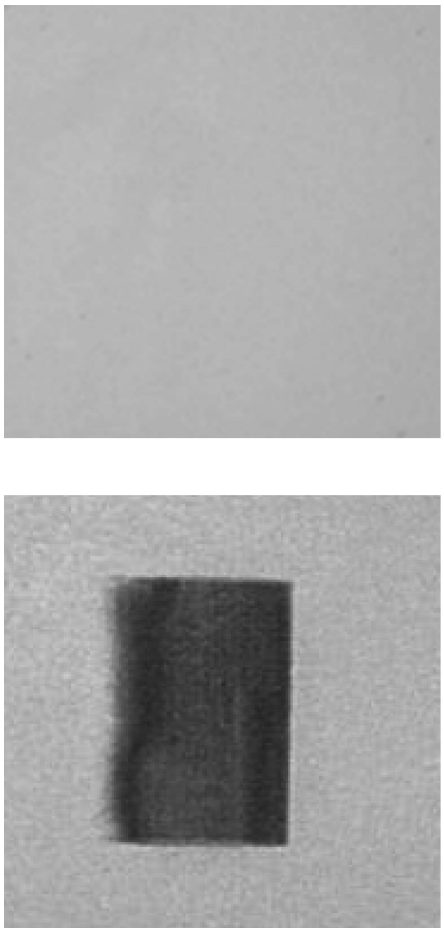
【図１４】



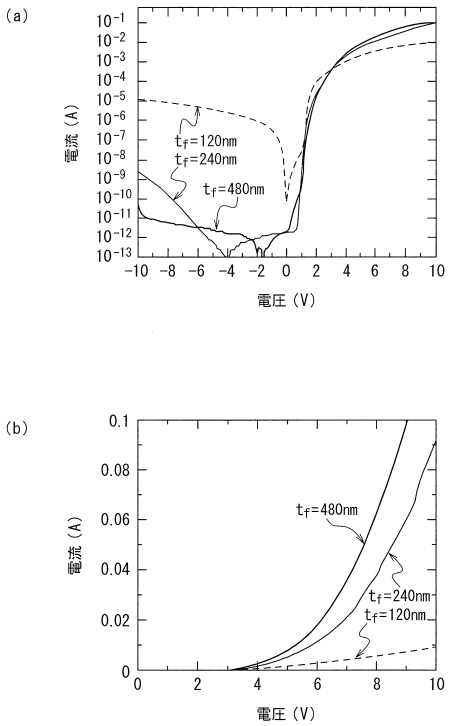
【図１５】



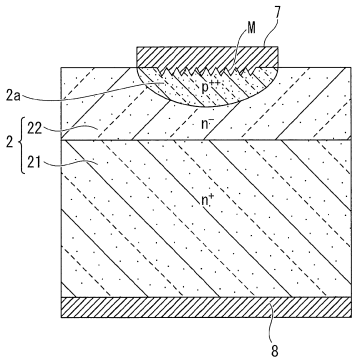
【図１６】



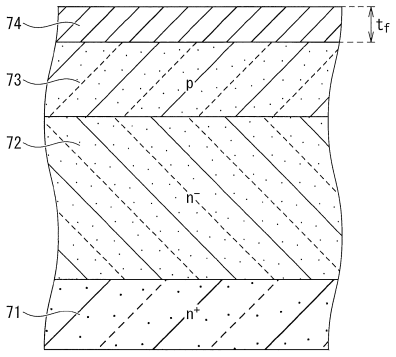
【図１７】



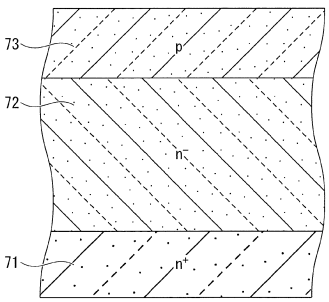
【図１８】



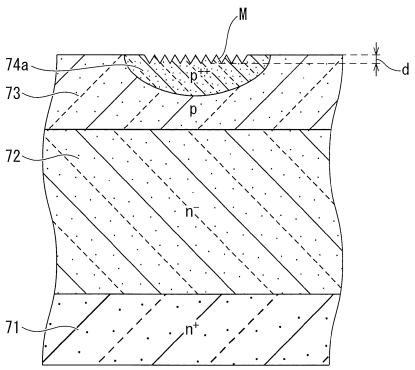
【図２０】



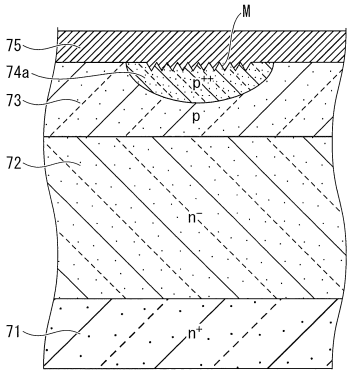
【図１９】



【図２１】

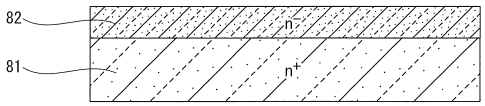


【図２２】

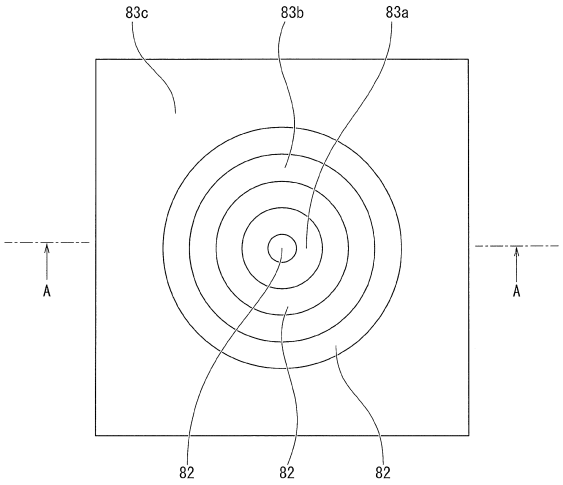


【図２３】

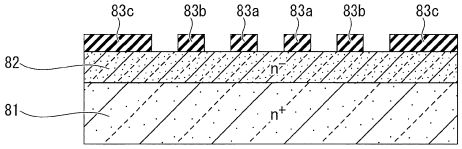
3】



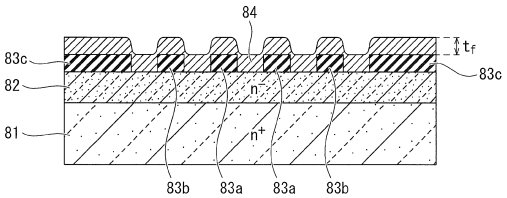
【図２４】



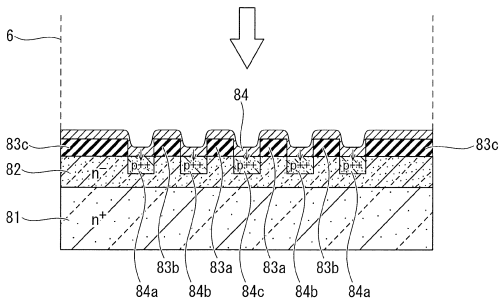
【図２５】



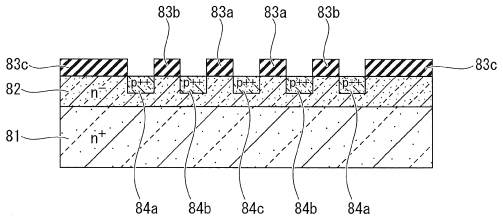
【図２６】



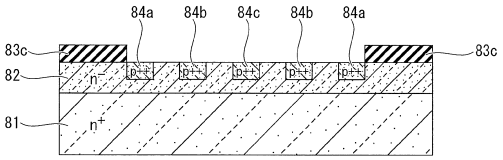
【図２７】



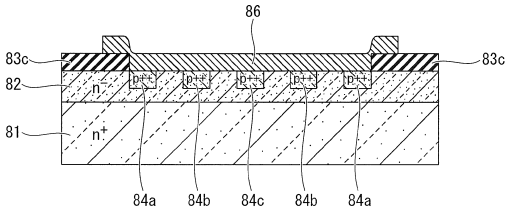
【図２８】



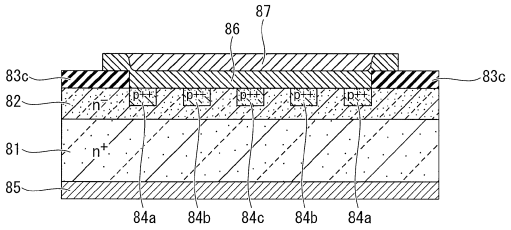
【図２９】



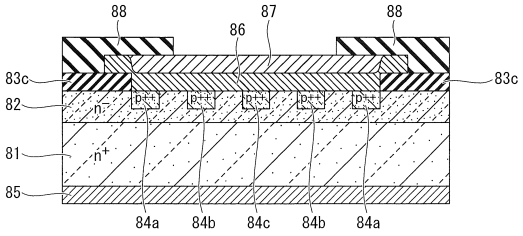
【図３０】



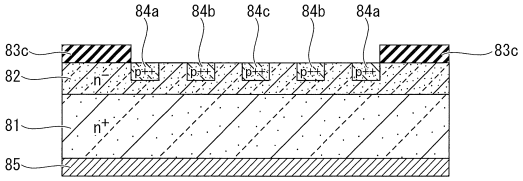
【図３１】



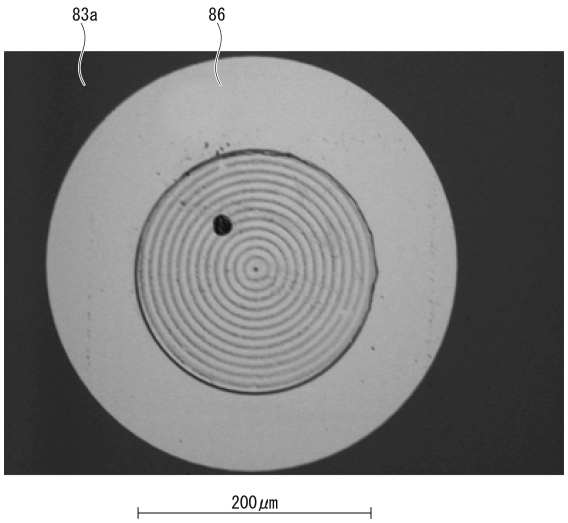
【図３２】



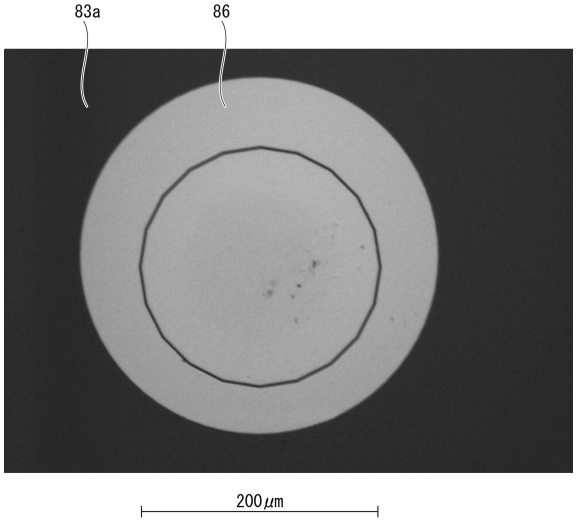
【図３３】



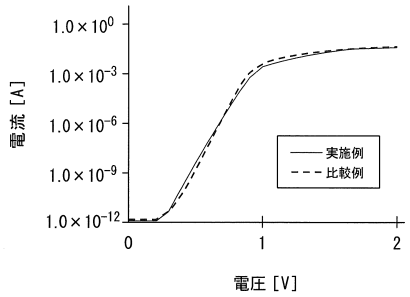
【図３４】



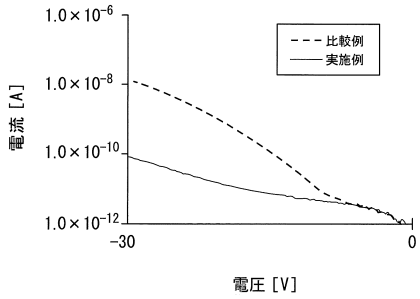
【図３５】



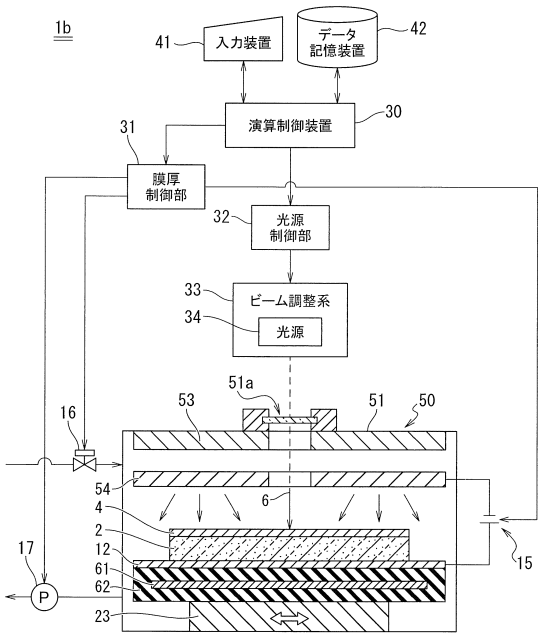
【図３６】


1.0×10^0
1.0×10^-3
1.0×10^-6
1.0×10^-9
1.0×10^-12
電流［A］
実施例
比較例
0
1
2
電圧［V］

【図３７】


1.0×10^-6
1.0×10^-8
1.0×10^-10
1.0×10^-12
電流［A］
比較例
実施例
−30
0
電圧［V］

【図３８】


1b
41
入力装置
データ記憶装置
42
演算制御装置
30
31
膜厚制御部
32
光源制御部
33
ビーム調整系
34
光源
51a
53
51
50
16
54
4
6
2
12
61
62
17
P
23
15

フロントページの続き

(51)Int.Cl.			F I		
H01L	***29/78***	***(2006.01)***	H01L	29/78	652T
H01L	***29/12***	***(2006.01)***	H01L	29/78	658A
H01L	***21/336***	***(2006.01)***	H01L	29/78	658E
H01L	***29/47***	***(2006.01)***	H01L	29/48	F
			H01L	29/48	P
			H01L	29/48	D

(72)発明者　池上　浩
福岡県福岡市東区箱崎六丁目１０番１号　国立大学法人九州大学
(72)発明者　浅野　種正
福岡県福岡市東区箱崎六丁目１０番１号　国立大学法人九州大学
(72)発明者　井口　研一
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　中澤　治雄
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　関　康和
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　桑原　清

(56)参考文献　国際公開第２０１３／１４７２０２（WO，Ａ１）
特開昭５５－０９９７２１（ＪＰ，Ａ）
特開昭５５－０５２２２１（ＪＰ，Ａ）
特開平０３－０６００２８（ＪＰ，Ａ）
特開２０１２－１７８５４６（ＪＰ，Ａ）
特公昭４７－０１２０５６（ＪＰ，Ｂ１）
特開平０８－２６４４６８（ＪＰ，Ａ）
特開平０１－３１６９２９（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｌ　２１／２２
Ｈ０１Ｌ　２１／３２９
Ｈ０１Ｌ　２１／３３６
Ｈ０１Ｌ　２９／１２
Ｈ０１Ｌ　２９／４７
Ｈ０１Ｌ　２９／７８
Ｈ０１Ｌ　２９／８６１
Ｈ０１Ｌ　２９／８６８
Ｈ０１Ｌ　２９／８７２