(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2019-73402
(P2019-73402A)
(43)公開日　令和1年5月16日(2019.5.16)

(51)Int.Cl.		F I			テーマコード（参考）
C30B 29/38	(2006.01)	C30B	29/38	C	2K102
C30B 33/06	(2006.01)	C30B	33/06		4G077
G02F 1/377	(2006.01)	G02F	1/377		

審査請求 未請求　請求項の数 20　ＯＬ　（全 33 頁）

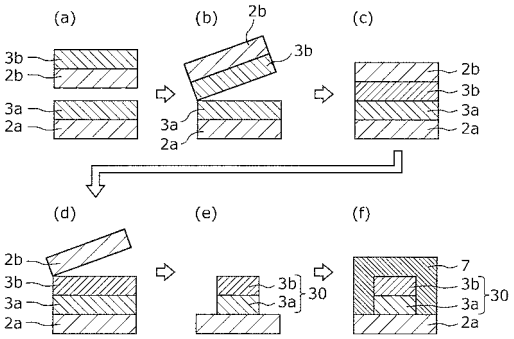
(21)出願番号　特願2017-198914 (P2017-198914)
(22)出願日　平成29年10月12日 (2017.10.12)

(71)出願人　304026696
国立大学法人三重大学
三重県津市栗真町屋町１５７７
(71)出願人　504176911
国立大学法人大阪大学
大阪府吹田市山田丘１番１号
(74)代理人　100109210
弁理士　新居　広守
(72)発明者　林　侑介
三重県津市栗真町屋町１５７７　国立大学法人三重大学内
(72)発明者　三宅　秀人
三重県津市栗真町屋町１５７７　国立大学法人三重大学内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】窒化物半導体基板、窒化物半導体基板の製造方法、窒化物半導体基板の製造装置及び窒化物半導体デバイス

(57)【要約】
【課題】III族極性と窒素極性の極性反転構造を有し、表面が平坦でかつ高品質の結晶層が形成された窒化物半導体基板等を提供する。
【解決手段】窒化物半導体基板１は、サファイア基板２の表面に、ＡｌＮで表わされる窒化アルミニウムの結晶粒の集合体からなる窒化アルミニウム結晶層３を有し、窒化アルミニウム結晶層３内に、III族極性と窒素極性との極性反転層構造をサファイア基板２の表面と平行方向に有する。
【選択図】図５



【特許請求の範囲】
【請求項１】
サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（$0 \leqq x \leqq 1$、$0 \leqq y \leqq 1$、$(x+y) \leqq 1$）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体結晶層を有し、前記III族窒化物半導体結晶層内に、III族極性と窒素極性との極性反転層構造を前記基板の表面と平行方向に有する
窒化物半導体基板。
【請求項２】
前記III族窒化物半導体は、窒化アルミニウム、窒化ガリウム、窒化アルミニウムガリウム、または、窒化アルミニウムガリウムインジウムであり、
前記III族窒化物半導体結晶層の厚さは、２０ｎｍ以上２０００ｎｍ以下であり、
前記極性反転層構造は、原子レベルで接合されている接合構造である
請求項１に記載の窒化物半導体基板。
【請求項３】
前記極性反転層構造は、２枚の前記III族窒化物半導体結晶層を接合したものである
請求項１または２に記載の窒化物半導体基板。
【請求項４】
前記III族窒化物半導体結晶層の（１０－１２）面におけるＸ線回折ロッキングカーブの半値幅は、１０００ａｒｃｓｅｃ以下である
請求項１から３のいずれか１項に記載の窒化物半導体基板。
【請求項５】
前記前記III族窒化物半導体結晶層内に、前記極性反転層構造を２以上有する
請求項１から４のいずれか１項に記載の窒化物半導体基板。
【請求項６】
サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（$0 \leqq x \leqq 1$、$0 \leqq y \leqq 1$、$(x+y) \leqq 1$）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体緩衝層が形成されたIII族窒化物半導体基板を、２枚一組として第１の半導体基板組とし、前記第１の半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて配置し加熱炉内に設置する第１の設置工程と、
前記加熱炉の温度を１３００℃以上１７５０℃以下に制御しながら前記第１の半導体基板組を加熱する加熱工程と、
接合された２枚の前記III族窒化物半導体基板の少なくとも一方の前記基板を剥離する基板剥離工程とを含む
窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項７】
前記第１の設置工程において、前記第１の半導体基板組を、前記第１の半導体基板組の動きを規制するためのホルダに収納し、前記ホルダの開口を閉じるカバー部材により前記ホルダの開口を閉じ、前記カバー部材と対向する基板との隙間を０．５ｍｍ以下とし、
前記加熱中の加熱炉内に不活性ガスを供給する
請求項６に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項８】
前記基板剥離工程で得られた前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層の上に、更にIII族窒化物半導体緩衝層を成長させる成膜工程を有し、
前記III族窒化物半導体緩衝層の厚さは、１０ｎｍ以上１０００ｎｍ以下であり、
前記半導体基板の反り量は、３０μｍ以下であり、
前記第１の設置工程において、前記ホルダ内で前記第１の半導体基板組を、前記III族窒化物半導体基板のＤカット面を揃える配置、または、前記III族窒化物半導体基板のＤカット面を揃えた位置から±６０°、±１２０°あるいは１８０°対向する配置で設置す

る
請求項７に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項９】
前記第１の設置工程において、前記ホルダに複数の前記第１の半導体基板組を設置する
請求項７または８に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項１０】
前記基板剥離工程で得られた前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層同士、または前記基板剥離工程で得られたIII族窒化物半導体結晶層が接合した前記III族窒化物半導体基板とIII族窒化物半導体緩衝層が形成された前記III族窒化物半導体基板とを、第２の半導体基板組とし、前記第２の半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板の前記III族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて密着して加熱炉内に設置する第２の設置工程を含む
請求項６から９のいずれか１項に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項１１】
前記第２の設置工程と、前記加熱工程と前記基板剥離工程とをこの順に複数回繰り返す
請求項１０に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項１２】
前記基板剥離工程で得られた前記III族窒化物半導体基板の前記III族窒化物半導体結晶層上に、III族窒化物半導体薄膜の結晶成長を行う結晶成長工程を有し、
前記結晶成長工程で得られた２枚の前記III族窒化物半導体基板同士または前記結晶成長工程で得られた前記III族窒化物半導体基板と前記III族窒化物半導体緩衝層とが形成された前記III族窒化物半導体基板を、第３の半導体基板組とし、前記第３の半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板の前記III族窒化物半導体薄膜同士を向かい合わせて密着して加熱炉内に設置する第３の設置工程を含む
請求項６から９のいずれか１項に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項１３】
前記第３の設置工程と、前記加熱工程と、前記基板剥離工程とをこの順に複数回繰り返す
請求項１２に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項１４】
前記III族窒化物半導体は、窒化アルミニウム、窒化ガリウム、窒化アルミニウムガリウム、または、窒化アルミニウムガリウムインジウムであり、
前記ホルダの材質は、III族窒化物半導体、炭素、窒化ホウ素、酸化アルミニウム（サファイア）、セラミック、炭化ケイ素、高融点金属（モリブデン、タングステン、イリジウムおよびこれらの合金）、ジルコニア、炭化タンタルの少なくとも一つから構成される
請求項７から９のいずれか１項に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項１５】
前記加熱工程において、１回の加熱中に複数回、前記加熱炉の温度を１３００℃以上１７５０℃以下の異なる２点間の温度に複数回制御するか、または、異なる複数の温度に制御する
請求項６から１４のいずれか１項に記載の窒化物半導体基板の製造方法。
【請求項１６】
加熱炉と、
前記加熱炉を加熱するヒータと、
少なくとも前記ヒータを制御することにより、前記加熱炉内の温度を制御する制御装置と、
前記加熱炉内に配置され、サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（$0 \leqq x \leqq 1$、$0 \leqq y \leqq 1$、$(x+y) \leqq 1$）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体緩衝層が形成されたIII族窒化物半導体基板を２枚一組とした半導体基板組

を複数組収納する開口部を有し、前記開口部に収納された前記半導体基板組の動きを規制するホルダと、
前記加熱炉内に配置され、前記ホルダの前記開口部を覆うように配置された蓋とを有する
窒化物半導体基板の製造装置。
【請求項１７】
前記半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて密着し、
前記開口部およびホルダは、前記半導体基板組を複数組収納する深さを有し、
前記複数組の半導体基板組の上には、前記半導体基板組に荷重を掛ける加重部材を設置し、
前記制御装置は、前記加熱炉の温度を１３００℃以上１７５０℃以下の異なる２点間の温度に複数回制御するか、または異なる複数の温度に制御する
請求項１６に記載の窒化物半導体基板の製造装置。
【請求項１８】
請求項１から５に記載の窒化物半導体基板を用いて、前記III族窒化物半導体結晶層を幅ｗ、厚さｈ、長さｌとなる形状の導波路に形成し、
前記幅ｗ、前記厚さｈ、前記長さｌは、前記長さｌの方向に入射するレーザ光の入射波長に基づき算出される
窒化物半導体デバイス。
【請求項１９】
前記入射波長をλ_1とし、前記窒化物半導体デバイスの出力光の波長をλ_2とした場合の前記III族窒化物半導体結晶層の入射波長における屈折率をn_1、出射波長における屈折率をn_2として、前記幅ｗまたは前記厚さｈの値の一つを固定した後、前記幅ｗまたは前記厚さｈの固定していない値を変化させたときに、$n_1 = n_2$となるときのｗまたはｈの値が算出される
請求項１８に記載の窒化物半導体デバイス。
【請求項２０】
前記長さｌの方向の入射面、出射面以外の前記III族窒化物半導体結晶層は、保護層で覆われている
請求項１８または１９に記載の窒化物半導体デバイス。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、窒化物半導体基板、窒化物半導体基板の製造方法、窒化物半導体基板の製造装置及び窒化物半導体デバイスに関する。
【背景技術】
【０００２】
窒化物半導体を利用したＬＥＤやレーザダイオード（ＬＤ）は幅広い用途で使用されている。特にＩｎＧａＮ（窒化インジウムガリウム）を発光材料として利用した青色光源（波長４５０ｎｍ付近）は、室内照明や車載ヘッドランプで広く利用されている。
【０００３】
近年では、ＡｌＮ（窒化アルミニウム）、ＧａＮ（窒化ガリウム）、ＡｌＧａＮ（窒化アルミニウムガリウム）等を発光材料として利用した紫外光源（波長２００ｎｍ～４００ｎｍ）の研究開発が盛んである（例えば、特許文献１、２参照）。紫外光源の応用先としては、タンパク質分析やＤＮＡ分析、殺菌、浄水、材料加工、視力矯正用の角膜除去といったものが挙げられる。既にＹＡＧレーザの４倍高調波（波長２６６ｎｍ）や５倍高調波（波長２１３ｎｍ）、あるいはＫｒＦエキシマレーザやＡｒＦエキシマレーザといった紫外光源が実用化されており、上述の需要を満たすため利用されている。
【先行技術文献】

【特許文献】
【０００４】
【特許文献１】特開２０１７－０５５１１６号公報
【特許文献２】特開２００８－３０３１３７号公報
【非特許文献】
【０００５】
【非特許文献１】” Polymer waveguides with optimized overlap integral for modal dispersion phasematching” W. Wirges, et.al, Appl. Phys. Lett. 70, 3347 (1997)
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００６】
ただし、これらの光源は極端に電力効率が悪いか、非常に大型で研究室の外に持ち運ぶことが難しいため、研究室のような特殊な環境下でしか利用できないのが現状である。ＡｌＧａＮを用いた半導体ベースの紫外光源も期待はされているが、良質な結晶を得ることが現段階では難しく、ＩｎＧａＮ系青色光源のように優れた特性を得るにはさらに数年、長くて１０年程度の時間を要するものと考えられる。
【０００７】
本発明は、上述した課題を解決しようとするものであり、極性反転構造を有し、表面が平坦でかつ高品質の結晶層が形成された窒化物半導体基板、窒化物半導体基板の製造方法および窒化物半導体デバイス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】
【０００８】
上記目的を達成するために、既存のＩｎＧａＮ青色レーザを光源とし、ＡｌＮを非線形光学結晶として第二次高調波を発生させるような光学系を組めば、コヒーレント性の高い紫外光を発生させることができる。
【０００９】
そのため、本発明の一態様に係る窒化物半導体基板は、サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（０≦ｘ≦1、０≦ｙ≦1、（ｘ＋ｙ）≦１）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体結晶層を有し、前記III族窒化物半導体結晶層内に、III族極性と窒素極性との極性反転層構造を前記基板の表面と平行方向に有する。
【００１０】
本態様によれば、結晶層内に、III族極性、窒素極性の極性反転層構造を有するため、この結晶層を適切なサイズに加工することで、非線形光学結晶を有する部材を実現することができる。
【００１１】
また、本発明の一態様に係る窒化物半導体基板の製造方法は、サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（０≦ｘ≦１、０≦ｙ≦１、（ｘ＋ｙ）≦１）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体緩衝層が形成されたIII族窒化物半導体基板を、２枚一組として第１の半導体基板組とし、前記第１の半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて配置し加熱炉内に設置する第１の設置工程と、前記加熱炉の温度を１３００℃以上１７５０℃以下に制御しながら前記第１の半導体基板組を加熱する加熱工程と、接合された２枚の前記III族窒化物半導体基板の少なくとも一方の前記基板を剥離する基板剥離工程とを含む。
【００１２】
本態様によれば、非線形光学結晶を有する部材用の窒化物半導体基板を、非常に簡単な製造方法により得ることができる。
【００１３】
また、本発明の一態様に係る窒化物半導体基板の製造装置は、加熱炉と、前記加熱炉を

加熱するヒータと、少なくとも前記ヒータを制御することにより、前記加熱炉内の温度を制御する制御装置と、前記加熱炉内に配置され、サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（$0 \leqq x \leqq 1$、$0 \leqq y \leqq 1$、$(x+y) \leqq 1$）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体緩衝層が形成されたIII族窒化物半導体基板を２枚一組とした半導体基板組を複数組収納する開口部を有し、前記開口部に収納された前記半導体基板組の動きを規制するホルダと、前記加熱炉内に配置され、前記ホルダの前記開口部を覆うように配置された蓋とを有する。

【００１４】

本態様によれば、非線形光学結晶を有する部材用の窒化物半導体基板を、上述した簡単な製造方法により得ることができる。

【００１５】

また、上記特徴を有する窒化物半導体基板を用いて、前記III族窒化物半導体結晶層を幅ｗ、厚さｈ、長さｌとなる形状の導波路に形成し、前記幅ｗ、前記厚さｈ、前記長さｌは、前記長さｌの方向に入射するレーザ光の入射波長に基づき算出される。

【００１６】

本態様によれば、非線形光学結晶を有する窒化物半導体デバイスとして、例えば光学的第二次高調波発生素子（ＳＨＧ素子）を実現し、入射したレーザ光波長の１／２波長の出力光を効率よく得ることができる。

【発明の効果】

【００１７】

本発明によれば、極性反転層構造を有し、表面が平坦でかつ高品質の結晶層が形成された窒化物半導体基板、窒化物半導体基板の製造方法、窒化物半導体基板の製造装置および窒化物半導体デバイスを提供することができる。

【００１８】

さらに、上記基板を用いて高効率のＳＨＧ素子を提供することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【００１９】

【図１】実施の形態１に係る窒化物半導体基板の概略図である。

【図２】図１に示す窒化物半導体基板のIII族極性、窒素極性がIII族結晶層内で反転している状態示す電子顕微鏡写真を示す図である。

【図３】図２に示した電子顕微鏡写真の倍率を２５０万倍とした電子顕微鏡写真である。

【図４】極性反転層を複数層持つ結晶構造の概略図である。

【図５】実施の形態１に係る窒化物半導体基板の作製方法を示す断面図である。

【図６】実施の形態１に係る窒化物半導体基板の作製方法を示すフローチャートである。

【図７】図５の（ａ）～（ｅ）の各ステップを立体的に描いた模式図である。

【図８】実施の形態１に係る半導体基板のそり量を説明するための模式図である。

【図９】実施の形態１に係る半導体基板同士を対向させた模式図である。

【図１０】実施の形態１に係る半導体基板の組合わせの例を示す模式図である。

【図１１】実施の形態１に係る半導体素子におけるＡｌＮ結晶層の（１１－２０）面をＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭで観察した結果である。

【図１２】実施の形態１に係る半導体基板を原子間力顕微鏡のダイナミックモードにより表面状態を観察した像である。

【図１３】実施の形態１に係る窒化物半導体基板１のＸ線回折ロッキングカーブ測定（ＸＲＣ）結果である。

【図１４】実施の形態１に係る半導体基板のラマン分光測定結果である。

【図１５】実施の形態１に係る半導体基板の（１０－１２）のＸ線回折極点図である。

【図１６】実施の形態２に係る製造装置の概略構成図である。

【図１７】実施の形態２に係る基板組ホルダの概略構成図である。

【図１８】実施の形態３に係る窒化物半導体基板のＸ線回折ロッキングカーブ測定（ＸＲ

Ｃ）結果である。
【図１９】実施の形態３に係る窒化物半導体基板の分光エリプソメトリの測定結果である。
【図２０】実施の形態３に係るＳＨＧデバイスの構成を示す概略図である。
【図２１】実施の形態３に係るＳＨＧデバイスの電界分布図である。
【図２２】実施の形態３に係る導波路の設計の一例である。
【発明を実施するための形態】
【００２０】
具体的な実施態様の説明の前に、本発明の主要な技術を説明する。
【００２１】
既に説明したように、本発明の一態様に係る窒化物半導体基板は、サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（０≦ｘ≦1、０≦ｙ≦1、（ｘ＋ｙ）≦１）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体結晶層を有し、前記III族窒化物半導体結晶層内に、III族極性と窒素極性との極性反転層構造を前記基板の表面と平行方向に有する。
【００２２】
ここで、前記III族窒化物半導体は、窒化アルミニウム、窒化ガリウム、窒化アルミニウムガリウム、または、窒化アルミニウムガリウムインジウムであり、前記III族窒化物半導体結晶層の厚さは、２０ｎｍ以上２０００ｎｍ以下であり、前記極性反転層構造は、原子レベルで接合されている接合構造であってもよい。
【００２３】
また、前記極性反転層構造は、２枚の前記III族窒化物半導体結晶層を接合したものであってもよい。
【００２４】
また、前記III族窒化物半導体結晶層の（１０－１２）面におけるＸ線回折ロッキングカーブの半値幅は、１０００ａｒｃｓｅｃ以下であってもよい。
【００２５】
また、前記III族窒化物半導体結晶層内に、前記極性反転層構造を２以上有してもよい。
【００２６】
また、本発明の一態様に係る窒化物半導体基板の製造方法は、サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（０≦ｘ≦１、０≦ｙ≦１、（ｘ＋ｙ）≦１）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体緩衝層が形成されたIII族窒化物半導体基板を、２枚一組として第１の半導体基板組とし、前記第１の半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて配置し加熱炉内に設置する第１の設置工程と、前記加熱炉の温度を１３００℃以上１７５０℃以下に制御しながら前記第１の半導体基板組を加熱する加熱工程と、接合された２枚の前記III族窒化物半導体基板の少なくとも一方の前記基板を剥離する基板剥離工程とを含む。
【００２７】
ここで、前記第１の設置工程において、前記第１の半導体基板組を、前記第１の半導体基板組の動きを規制するためのホルダに収納し、前記ホルダの開口を閉じるカバー部材により前記ホルダの開口を閉じ、前記カバー部材と対向する基板との隙間を０．５ｍｍ以下とし、前記加熱中の加熱炉内に不活性ガスを供給してもよい。
【００２８】
また、前記基板剥離工程で得られた前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層の上に、更にIII族窒化物半導体緩衝層を成長させる成膜工程を有し、前記III族窒化物半導体緩衝層の厚さは、１０ｎｍ以上１０００ｎｍ以下であり、前記半導体基板の反り量は、３０μｍ以下であり、前記第１の設置工程において、前記ホルダ内で前記第１の半

導体基板組を、前記III族窒化物半導体基板のＤカット面を揃える配置、または、Ｄカット面を揃えた位置から±６０°、±１２０°あるいは１８０°対向する配置で設置してもよい。

【００２９】

また、前記第１の設置工程において、前記ホルダに複数の前記第１の半導体基板組を設置してもよい。

【００３０】

また、前記基板剥離工程で得られた前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層同士、または前記基板剥離工程で得られたIII族窒化物半導体結晶層が接合した前記III族窒化物半導体基板とIII族窒化物半導体緩衝層が形成された前記III族窒化物半導体基板とを、第２の半導体基板組とし、前記第２の半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板の前記III族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて密着して加熱炉内に設置する第２の設置工程を含んでもよい。

【００３１】

また、前記第２の設置工程と、前記加熱工程と前記基板剥離工程とをこの順に複数回繰り返してもよい。

【００３２】

また、前記基板剥離工程で得られた前記III族窒化物半導体基板の前記III族窒化物半導体結晶層上に、III族窒化物半導体薄膜の結晶成長を行う結晶成長工程を有し、前記結晶成長工程で得られた２枚の前記III族窒化物半導体基板同士または前記結晶成長工程で得られた前記III族窒化物半導体基板と前記III族窒化物半導体緩衝層とが形成された前記III族窒化物半導体基板を、第３の半導体基板組とし、前記第３の半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板の前記III族窒化物半導体薄膜同士を向かい合わせて密着して加熱炉内に設置する第３の設置工程を含んでもよい。

【００３３】

また、前記第３の設置工程と、前記加熱工程と、前記基板剥離工程とをこの順に複数回繰り返してもよい。

【００３４】

また、前記III族窒化物半導体は、窒化アルミニウム、窒化ガリウム、窒化アルミニウムガリウム、または、窒化アルミニウムガリウムインジウムであり、前記ホルダの材質は、III族窒化物半導体、炭素、窒化ホウ素、酸化アルミニウム（サファイア）、セラミック、炭化ケイ素、高融点金属（モリブデン、タングステン、イリジウムおよびこれらの合金）、ジルコニア、炭化タンタルの少なくとも一つから構成されてもよい。

【００３５】

また、前記加熱工程において、１回の加熱中に複数回、前記加熱炉の温度を１３００℃以上１７５０℃以下の異なる２点間の温度に複数回制御するか、または、異なる複数の温度に制御してもよい。

【００３６】

また、本実施の形態に係る窒化物半導体基板の製造装置は、加熱炉と、前記加熱炉を加熱するヒータと、少なくとも前記ヒータを制御することにより、前記加熱炉内の温度を制御する制御装置と、前記加熱炉内に配置され、サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウム、シリコンの一つからなる基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（$0 \leqq x \leqq 1$、$0 \leqq y \leqq 1$、$(x+y) \leqq 1$）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体緩衝層が形成されたIII族窒化物半導体基板を２枚一組とした半導体基板組を複数組収納する開口部を有し、前記開口部に収納された前記半導体基板組の動きを規制するホルダと、前記加熱炉内に配置され、前記ホルダの前記開口部を覆うように配置された蓋とを有する。

【００３７】

また、前記半導体基板組の各前記III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて密着し、前記開口部および前記ホルダは、前記半導体基板組を複数組

収納する深さを有し、前記複数組の半導体基板組の上には、前記半導体基板組に荷重を掛ける加重部材を設置し、前記温度制御装置は、前記加熱炉の温度を１３００℃以上１７５０℃以下の異なる２点間の温度に複数回制御するか、または異なる複数の温度に制御してもよい。

【００３８】

さらに、他の実施の態様である窒化物半導体デバイスは、上記した特徴を有する窒化物半導体基板を用いて、前記III族窒化物半導体結晶層を幅ｗ、厚さｈ、長さｌとなる形状の導波路に形成し、前記幅ｗ、前記厚さｈ、前記長さｌは、前記長さｌの方向に入射するレーザ光の入射波長に基づき算出される。

【００３９】

また、前記入射波長をλ_1とし、前記窒化物半導体デバイスの出力光の波長をλ_2とした場合の前記III族窒化物半導体結晶層の入射波長における屈折率をn_1、出射波長における屈折率をn_2として、前記幅ｗまたは前記厚さｈの値の一つを固定した後、前記幅ｗまたは前記厚さｈの固定していない値を変化させたときに、$n_1=n_2$となるときのｗまたはｈの値が算出されてもよい。

【００４０】

ここで、前記長さｌの方向の入射面、出射面以外の前記III族窒化物半導体結晶層は、保護層で覆われていてもよい。

【００４１】

以下、本発明の実施の形態について、図面を用いて詳細に説明する。以下の説明においては、窒化アルミニウムをＡｌＮ、窒化アルミニウムガリウムをＡｌＧａＮ、窒化アルミニウムガリウムインジウムをＡｌＧａＩｎＮ、サファイアをAl_2O_3、炭化ケイ素をＳｉＣと示す。

【００４２】

なお、以下で説明する実施の形態は、いずれも本発明の好ましい一具体例を示すものである。以下の実施の形態で示される数値、形状、材料、構成要素、構成要素の配置位置及び接続形態、ステップ、ステップの順序などは、一例であり、本発明を限定する主旨ではない。本発明は、特許請求の範囲によって特定される。よって、以下の実施の形態における構成要素のうち、独立請求項に記載されていない構成要素については、任意の構成要素として説明される。

【００４３】

（実施の形態１）

［１．窒化物半導体基板の構成］

図１および図２を参照して本実施の形態に係る窒化物半導体基板１について説明する。図１は、本実施の形態に係る窒化物半導体基板１の概略図である。図２は、図１に示す窒化物半導体基板１のｃ軸結晶方位（III族極性および窒素極性）が結晶層内で反転している状態を示す電子顕微鏡写真である。

【００４４】

本実施の形態に係る窒化物半導体基板１は、例えば極性反転型ＳＨＧ素子等に用いる窒化物半導体基板である。窒化物半導体基板１は、基板の表面に、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（$0\leqq x\leqq 1$、$0\leqq y\leqq 1$、$(x+y)\leqq 1$）で表わされるIII族窒化物半導体の結晶粒の集合体からなるIII族窒化物半導体結晶層を有している。また、窒化物半導体基板１は、III族窒化物半導体結晶層内に、III族極性であるＡｌ極性と窒素極性との極性反転層構造を有している。

【００４５】

具体的には、図１に示すように、窒化物半導体基板１は、基板の一例であるサファイア基板２と、III族窒化物半導体の一例である窒化アルミニウム（ＡｌＮ）結晶層３と、窒化アルミニウム結晶層４を有している。

【００４６】

サファイア基板２の上に形成された窒化アルミニウム結晶層３と窒化アルミニウム結晶

層４とは、サファイア基板２のｃ軸方向に沿って互いに反平行な自発分極ないしピエゾ分極を有している。ここで、ウルツ鉱型結晶中のＡｌ－Ｎ結合のうちｃ軸に平行な結合に着目し、サファイア基板側にＡｌが位置する場合をＡｌ極性、Ｎが位置する場合を窒素極性の結晶方位と定義するのが一般的である。よって、窒化アルミニウム結晶層３と窒化アルミニウム結晶層４はそれぞれ、Ａｌ極性、窒素極性である。以下では、サファイア基板２の上に配置された窒化アルミニウム結晶層について、Ａｌ極性を有する窒化アルミニウム結晶層を、＋ｃＡｌＮ結晶層と呼ぶ。また、窒素極性を有する窒化アルミニウム結晶層を、－ｃＡｌＮ結晶層と呼ぶ。本実施の形態では、窒化アルミニウム結晶層３は、＋ｃＡｌＮ結晶層であり、第１のIII族窒化物半導体結晶層である。窒化アルミニウム結晶層４は、－ｃＡｌＮ結晶層であり、第２のIII族窒化物半導体結晶層である。

【００４７】

ここで、Ａｌ極性と窒素極性が反転している窒化アルミニウム結晶層３および４が積層された構造を極性反転構造という。つまり、＋ｃＡｌＮ結晶層上に－ｃＡｌＮ結晶層が積層された構造を極性反転構造という。また、窒化アルミニウム結晶層３および４との極性反転構造において、Ａｌ極性と窒素極性が反転している層を、極性反転層と定義する。極性反転層は、１乃至２原子の厚さの中での構造であり、かつ、窒化アルミニウム結晶層３と４との界面という側面を持つものである。また、窒化物半導体基板１において、＋ｃＡｌＮ結晶層上に－ｃＡｌＮ結晶層が積層された構造を極性反転構造は、サファイア基板２の表面と平行方向に、＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層との界面が配置される構成となっている。つまり、窒化物半導体基板１において、極性反転層は、図１にも示すようにサファイア基板２の表面と平行方向に存在する。

【００４８】

なお、図１では窒化物半導体基板１を模式的に表現しているため、サファイア基板と窒化アルミニウム結晶層３および４とが同等の厚さにみえるが、実際にはサファイア基板２は、２００μｍ以上１０００μｍ以下程度であり、窒化アルミニウム結晶層３および４は、それぞれ１０ｎｍ以上１０００ｎｍ以下程度である。そのため、窒化アルミニウム結晶層３および４の厚さを合計した厚さは、２０ｎｍ以上２０００ｎｍ以下程度の範囲で作製される。図１に示す窒化物半導体基板１では、窒化アルミニウム結晶層３および４の界面である厚みの中央付近に極性反転層を有する。しかし、窒化アルミニウム結晶層３と４は同じ厚さでなくてもよい。そのため、極性反転層は、必ずしも結晶層３および４の合計厚さの中央付近にできるものではなく、窒化物半導体基板１を加工して得られるデバイスの特性要求に応じて、極性反転層の位置を自由に設定できるものである。

【００４９】

図２の（ａ）および（ｂ）は、窒化物半導体基板１のIII族極性と窒素極性とがIII族結晶層内で反転している状態を示す電子顕微鏡写真である。より詳細には、図２の（ａ）および（ｂ）に示す電子顕微鏡写真は、ＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭ（高角散乱環状暗視野走査透過顕微鏡）による窒化物半導体基板の観測像（ＳＴＥＭ像）である。図２の（ａ）および（ｂ）では、窒化物半導体基板が有するサファイア基板と、サファイア基板のｃ軸方向の一方向を正としたときの正の極性を示す＋ｃＡｌＮ結晶層と、ｃ軸方向の正の方向と反対方向を負としたときの負の極性を示す－ｃＡｌＮ結晶層とが観測されている。極性が反転している部分、すなわち＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層との界面は、後述する方法でＡｌＮ基板を貼り合わせた場合の界面である。なお、図２の（ｂ）は、図２の（ａ）に示した半導体基板における＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層との界面近傍の一部を１５００万倍の高倍率で測定した結果を示している。

【００５０】

ＳＴＥＭ像では、重い原子ほど明るく見える。このことより、図２の（ｂ）において、白いドットはＮ原子よりも重いＡｌ原子を示しており、そこから彗星の尾のように伸びている部分にＮ原子が存在していることがわかる。＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層とは、もともと２枚の独立したＡｌＮ基板であったが、界面にはくっきりとした原子像が見られており、非常に高い結晶性を示していることが分かる。＋ｃＡｌＮ結晶層から－ｃＡ

ｌＮ結晶層への極性反転は、単原子層で生じており、これまでの結晶成長法では難しかった急峻な極性反転を実現している。ここで、原子構造の乱れが１ｎｍ以下であること、＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層とが１乃至２原子レベルで完全に接合していること、および、＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層との界面にアモルファス層が存在していないことを、ＳＴＥＭ像から読み取ることができる。

【００５１】

また、ＳＴＥＭ像からＡｌ原子の原子間距離を抽出すると、貼り合わせ界面では２．８Åであり、貼り合わせ界面から離れた箇所では２．５Åであった。貼り合わせ界面では原子間距離が１割ほど大きくなっていることから、貼り合わせ界面には酸素や炭素などの不純物が含まれており、これらを介した原子結合になっていることが考えられる。また、図３には上記で説明した電子顕微鏡写真の倍率を２５０万倍とした写真を示す。図３に示す矢印の長さは１０ｎｍであり、界面がまっすぐに数十ｎｍ延びていて、結晶状態及び極性反転構造が良好な界面が続いていることが観察できる。

【００５２】

ここで、本実施の形態に係る窒化物半導体基板１の展開例（変形例）を図４に示す。窒化物半導体基板１は、以下のように、サファイア基板２の上に窒化アルミニウム結晶層３および４だけでなく、複数の窒化アルミニウム結晶層を備えてもよい。図４は、極性反転層を複数層持つ結晶構造の概略図である。

【００５３】

図４の（ａ）は、図１の窒化アルミニウム結晶層３と４に窒化アルミニウム結晶層５を加えて、極性反転層を２層持つ結晶構造を示している。図４の（ｂ）は、さらに窒化アルミニウム結晶層６を加えて、極性反転層を３層持つ結晶構造を示している。上記したように極性反転層の位置に関する設計の自由度を明示するために、図４の（ａ）および（ｂ）では窒化アルミニウム結晶層３および４と窒化アルミニウム結晶層５および６との厚さを変えて示している。

【００５４】

なお、基板は、サファイア基板２だけに限られず、サファイア、炭化ケイ素（ＳｉＣ）および窒化アルミニウム（ＡｌＮ）、シリコン（Ｓｉ）の少なくとも一つからなる基板であればよい。また、第１のIII族窒化物半導体および第２のIII族窒化物半導体を構成する窒化アルミニウム結晶層は、窒化アルミニウム（ＡｌＮ）だけに限られず、$Al_xGa_yIn_{(1-x-y)}N$（０≦ｘ≦１、０≦ｙ≦１、（ｘ＋ｙ）≦１）で表わされる窒化アルミニウム（ＡｌＮ）、窒化ガリウム（ＧａＮ）、窒化アルミニウムガリウム（ＡｌＧａＮ）、または、窒化アルミニウムガリウムインジウム（ＡｌＮＧａＩｎ）であってもよい。第１のIII族窒化物半導体、第２のIII族窒化物半導体は、異なるIII族窒化物材質であっても接合できるが、熱膨張係数差による応力と界面に生じるダングリングボンドを抑制する観点から、同じ材質であることが好ましい。

【００５５】

［２．窒化物半導体基板の作製方法］

次に、上記した極性反転型ＳＨＧ素子等に用いる窒化物半導体基板１の作製方法を、図５および図６を用いて説明する。図５は、本実施の形態に係る窒化物半導体基板１の作製方法を示す断面図である。図６は、本実施の形態に係る窒化物半導体基板１の作製方法を示すフローチャートである。図７は、図５の（ａ）～（ｅ）の各ステップを立体的に描き、より理解を促進するための図である。図７に示す工程は図５と同じであるため、説明は省略する。

【００５６】

なお、以下において、ＡｌＮ緩衝層３ａおよび３ｂを熱処理したものを、それぞれＡｌＮ結晶層３ａおよび３ｂと呼ぶ。また、Ａｌ極性を有するＡｌＮ緩衝層３ａおよび３ｂ並びにＡｌＮ結晶層３ａおよび３ｂを、それぞれ＋ｃＡｌＮ緩衝層３ａおよび３ｂ並びに＋ｃＡｌＮ結晶層３ａおよび３ｂと呼ぶ。同様に、窒素極性を有するＡｌＮ緩衝層３ｂおよびＡｌＮ結晶層３ｂを、それぞれ－ｃＡｌＮ緩衝層３ｂおよび－ｃＡｌＮ結晶層３ｂと呼

ぶ。

【００５７】

図５および図６に示すように、窒化物半導体基板１の作製方法は大きく分けて次の６つのステップからなる。

【００５８】

はじめに、図５の（ａ）に示されるように、サファイア基板２ａの上にＡｌＮ緩衝層３ａを成膜する工程が行われる（ステップＳ１１）。ＡｌＮ緩衝層３ａは、窒化アルミニウム結晶層３の前駆体であり、後の構成において熱処理されることにより、窒化アルミニウム結晶層３となる層である。ＡｌＮ緩衝層３ａは、例えば、７００Ｗ、６００℃の条件でスパッタ法を用いて成膜される。このとき生成されるＡｌＮ緩衝層３ａは、例えば２００ｎｍの厚さである。なお、サファイア基板２ａ上にＡｌＮ緩衝層３ａが成膜された基板を、III族窒化物半導体基板（以下、単に「半導体基板」）と呼ぶ。

【００５９】

なお、ＡｌＮ緩衝層３ａの製膜は、スパッタ法に限らず、ＭＯＶＰＥ法、ハイドライド気相成長（Ｈｙｄｒｉｄｅ　ｖａｐｏｒ　ｐｈａｓｅ　ｅｐｉｔａｘｙ：ＨＶＰＥ）法、分子線エピタキシャル（Ｍｏｌｅｃｕｌａｒ　ｂｅａｍ　ｅｐｉｔａｘｙ：ＭＢＥ）法などであってもよい。また、ＡｌＮ緩衝層が成膜されるサファイア基板２の面方位は、サファイアｃ面に限られず、ａ面、ｒ面、ｎ面、ｍ面およびそれらの面から±４°以内のオフ角の誤差を含むものであってもよい。さらに、基板の材料は、上述したように、サファイアに限られず、ＳｉＣ、ＡｌＮ、シリコンなどであってもよい。また、基板は、特許文献１の手法により一度アニールされ、結晶状態を改善した基板を使っても良い。

【００６０】

さらに、サファイア基板２ａおよびＡｌＮ緩衝層３ａにより形成されたIII族窒化物半導体基板と同様、サファイア基板２ｂおよびＡｌＮ緩衝層３ｂにより形成されたIII族窒化物半導体基板を用意する。

【００６１】

次に、図５の（ｂ）に示すように、サファイア基板２ａ上にＡｌＮ緩衝層３ａが成膜された半導体基板とサファイア基板２ｂ上にＡｌＮ緩衝層３ｂが成膜された半導体基板とを２枚一組として半導体基板組とし、各半導体基板におけるＡｌＮ緩衝層３ａと３ｂが配置された面（ＡｌＮ面）を対向して密着させる（ステップＳ１２）。なお、このときの半導体基板組は、第１の半導体基板組である。ここで、２枚の半導体基板のＡｌＮ緩衝層３ａおよび３ｂの対向するＡｌＮ面同士の結晶方位はｃ軸周りの回転の自由度があるが、この面内の結晶方位（例えばａ軸方位）のズレは、±１°以内、または、±６０±１°、±１２０±１°、１８０±１°以内が望ましい。また、２枚の半導体基板を固定するために、２枚の半導体基板をサファイア基板２ａおよび２ｂと同形状の底面形状を持つ円筒形のホルダに入れ、更に実質的に不活性ガスの滞留状態とするためにカバー部材でホルダに蓋をすることが望ましい。カバー部材と対向するサファイア基板２ｂとの距離は、０．５ｍｍ以下、好ましくは０．１ｍｍ以下とする。なお、ホルダおよび蓋については後に詳述する。

【００６２】

次に、図５の（ｃ）に示すように、ＡｌＮ面を対向して密着させた半導体基板組の熱処理を行う。熱処理は、電気炉などを用いた熱処理工程である。例えば、１７００℃の温度で３時間熱処理を行う。熱処理の条件はIII族半導体、基板材料および基板の反り量等によって選択される。例えば、温度に関しては１３００℃以上１７５０℃以下、時間に関しては１０分以上５時間以下が許容範囲であり、時間に関しては好ましくは３０分以上３時間以下程度である。熱処理中は炉の内部を不活性ガスの窒素等により、０．３気圧以上３気圧以下程度で保ちつつ、不純物を排出するために、窒素ガスなどの不活性ガスを常時、供給し排出する制御を行っている。しかし、半導体基板組の主面対向面や周囲では、ガスが実質的に流れない滞留状態としており、熱処理時にＡｌＮの成分が解離して抜け出すのが抑制され、表面が平坦でかつ高品質のＡｌＮ結晶層が形成された窒化物半導体基板１が

作製される。

【００６３】

ステップＳ１１～Ｓ１３に示した処理は、特許文献１に記載された内容と類似している。しかし、特許文献１の記載技術は、半導体基板単体のＡｌＮ結晶層の結晶品質を格段に向上させる技術であるのに対し、本発明に係る技術は、ＡｌＮ結晶層の結晶品質を格段に向上させる技術を利用した上で、２枚の半導体基板を原子レベルの精度で接合させるものである。

【００６４】

次に、図５の（ｄ）に示すように、２枚の半導体基板のうちの一方について、サファイア基板２ｂを剥離する処理を行う（ステップＳ１４）。サファイア基板２ｂを剥離した窒化物半導体基板１は、サファイア基板２ａ上にＡｌ極性のＡｌＮ結晶層３ａが配置され、ＡｌＮ結晶層３ａの上に窒素極性のＡｌＮ結晶層３ｂが配置された構成となっている。このような製法で極性反転されたＡｌＮ結晶層の評価結果を以下に説明する。

【００６５】

本実施の形態では、スパッタ法で成膜した厚さ２００ｎｍのＡｌＮ結晶層３ａおよび３ｂの２枚を使用している。図８に例示するように、スパッタ法で製膜したＡｌＮ結晶層３ａの極性はＡｌ極性であり、＋ｃＡｌＮと表現される。逆に、窒素（Ｎ）極性のＡｌＮ結晶層３ｂは－ｃＡｌＮと表現される。上記した様に、ウェハを重ねる際に、２枚のＡｌＮ結晶層の面内の結晶方位（例えばａ軸方位）が一致するようにオリエンテーションフラット（以下オリフラと記す）と呼ばれる切れ込みの角度を一致させている。また、熱処理（またはアニールと記す）温度を１７００℃、熱処理時間を３時間として熱処理を行った。サファイア基板２の剥離は、ブレードＢ（図７の（ｄ）参照）を挿入することにより行っており、貼り合わせ界面にブレードＢを挿入し、てこの原理で機械的に剥離しているが、精密切削などの他の方法であっても良い。

【００６６】

次に、図５の（ｅ）及び（ｆ）、図６のステップＳ１５及びステップＳ１６は、上記した様に得られた半導体基板を、デバイスとして加工する工程である。本実施の形態では、ＳＨＧ素子を例に取り簡単に説明する。なお、ＳＨＧ素子の詳細については、後に詳述する。

【００６７】

まず、図５の（ｅ）に示すように、サファイア基板２ａの上に積層された＋ｃＡｌＮ結晶層３ａと－ｃＡｌＮ結晶層３ｂとを、リソグラフィー、ドライエッチングといった半導体加工プロセスで一般的な手法を用いて導波路コア層のパターンに形成する（ステップＳ１５）。その後、図５の（ｆ）に示すように、導波路コア層内に光を閉じ込めるための保護層として、クラッド層７を形成する。クラッド層７は、酸化アルミニウム（Al_2O_3）をスパッタ法によりサファイア基板２ａおよび導波路コア層を構成する＋ｃＡｌＮ結晶層３ａと－ｃＡｌＮ結晶層３ｂのｙ軸方向（図２０の（ａ）参照）の入射面および出射面以外を覆うように成膜することで形成する（ステップＳ１６）。また、ＳＨＧ素子において基本波およびＳＨ波が導波路を伝搬する際に、エバネッセント波がクラッド層だけでなくその上の空気中に漏れ出すことを防ぐために、AlO_xの膜厚を１μｍに設定している。

【００６８】

なお、図５の（ｄ）の段階で、必要に応じて他の一方のサファイア基板２ａも剥離して、極性反転構造を有する＋ｃＡｌＮ結晶層３ａと－ｃＡｌＮ結晶層３ｂのみを残すことも可能であるが、加工の都合上、図５の（ｅ）の工程を終えた後に、極性反転構造を有する＋ｃＡｌＮ結晶層３ａと－ｃＡｌＮ結晶層３ｂをサファイア基板２ａから外してもよい。これにより、＋ｃＡｌＮ結晶層３ａと－ｃＡｌＮ結晶層３ｂをクラッド層として、導波路コア層の全周を同じ材料にすることができる。クラッド層７の材料は、ＳＨＧ素子の場合には酸化ケイ素（ＳｉＯ）などがあげられる。

【００６９】

ここで、図５の（ｂ）の工程において、窒化物半導体基板１の接合に用いられる各半導体基板は、各半導体基板の反り量、初期の結晶品質を接合が起こりやすい範囲に選ぶことが重要な条件となる。そこで、以下、接合に用いられる半導体基板の反り量および初期の結晶品質について説明する。

【００７０】

図８は、接合に用いられる半導体基板の反り量を説明する為の模式図である。図８では、理解を容易にするため半導体基板の反り量を実際の反り量より大きく描いている。図８において、Ｐは曲率半径の中心点、Ｒは曲率半径、ｒ１は基板の反り量を示している。

【００７１】

例えば、２インチ径、厚さ４００μｍの円形のサファイア基板２ａの上に、図８に示すようにＡｌＮ緩衝層３ａが形成されている。例えば、ＡｌＮ緩衝層３ａの膜厚は２００ｎｍとしている。また、サファイア基板２ａは、ウェハの中央がほぼ球形に反っている凹型の反りを有しており、反りの曲率半径Ｒは約８９ｍである。曲率半径が凹型約８９ｍの場合のおおよその基板中心付近の反り量（基板周縁からの深さ）は、５μｍ程度になる。また、ＡｌＮ緩衝層３ａの表面粗さは、０．２ｎｍ以上０．３ｎｍ以下程度である。このような半導体基板を用い、２枚の半導体基板のＡｌＮ面を向かい合わせて密着すると、２枚の半導体基板は原子間結合によりＡｌＮ緩衝層３ａ同士が接合する。

【００７２】

一方、ＡｌＮ緩衝層３ａの膜厚が２００ｎｍで、曲率半径Ｒが約１１ｍ、表面粗さが０．４ｎｍ以上０．６ｎｍ以下程度の半導体基板を用いた場合には、２枚の半導体基板は原子間結合をするには至らなかった。曲率半径が約１１ｍの場合の、おおよその基板中心付近の反り量は、４５μｍ程度になる。

【００７３】

上記した様に、ほぼ同じ条件で熱処理しても、ＡｌＮ緩衝層３ａの接合体ができるものとできないものがあるが、それは半導体基板の反り量、表面荒さなどが影響している。しかしながら、接合体ができた半導体基板組のサファイア基板２ａを剥離して観察すると、表面から干渉縞が見えないことから、空気層の入り込んでいる形跡はなく、完全に全面にわたって接合しているため、全てのウェハ面をデバイス用に活用できる。また、接合しなかった半導体基板は、ＡｌＮ単層の優れた結晶層を持つ基板として活用できることはいうまでもない。

【００７４】

また、後述するように、２枚の半導体基板を接合する際、ホルダ内において、複数組の窒化物半導体基板のそれぞれにおいて、２枚の半導体基板を向かい合わせて密着させ、この半導体基板組を積み上げているため、最下段の半導体基板組には上段の２枚分の半導体基板の重さ６．８ｇ、または、４枚分の半導体基板の重さ１３．６ｇの加重を与えていることになる。ここで、半導体基板組の上に、基板と同形状で反りのなるべく少ない、曲率半径Ｒが約３０ｍ以上の加重部材１８２（図１７参照）を載せることは有効である。

【００７５】

加重部材１８２に使う材質としては、III族窒化物半導体、炭素、窒化ホウ素、酸化アルミニウム（サファイア）、セラミック、炭化ケイ素、高融点金属（モリブデン、タングステン、イリジウムなどの融点の高い材料およびこれらの合金など）、ジルコニア、炭化タンタルの中から選ぶことができる。

【００７６】

さらに、接合をより確実に実現するため、反り量を改善する目的で熱処理の前に２枚の基板を貼り合わせた状態で、１時間以上２０時間以下程度、２５ｋＰａ以上５００ｋＰａ以下程度の荷重をかけて反り量を改善した半導体基板組を使用することも、本発明の範囲に含まれる。

【００７７】

半導体基板における反りの中央付近最大値ｒ１と曲率半径Ｒの関係は、２インチウェハによる場合、Ｒ（ｍ）＝５、１０、２０、４０、６０、８０、１００に対応する反り量ｒ

１（μｍ）＝８４、４２、２１、１０、７、５、４程度となる。曲率半径２０ｍ程度になると反り量は２０μｍ程度に収まり、接合し易くなると考えられる。また、基板の反りの量ｒ１は上記した様に小さい方が接合のためには好ましい。

【００７８】

図９は、凹型の反りを持つ半導体基板同士を対向させた模式図である。図９では、図８で説明した凹型の半導体基板を、２枚向かい合わせに密着させて載置している。図９の（ａ）に示すサファイア基板２ａおよび２ｂは、同じ厚さで示しているが、異なる厚さであってもよい。また、図９に示すＡｌＮ緩衝層３ａおよび３ｂは、例えば厚さが１０ｎｍ以上１０００ｎｍ以下程度である。ＡｌＮ緩衝層３ａおよび３ｂは、同じ厚さであっても異なる厚さであってもよい。特に、ＡｌＮ緩衝層３ａおよび３ｂは、接合後の光特性等のデバイス設計上、厚さを異ならせたものであってもよい。

【００７９】

ここで、図９の（ａ）のｒ０は、半導体基板中央付近にできる最大間隙を示している。上述したように、２枚の半導体基板の反り量が２０μｍであれば、最大隙間ｒ０は約４０μｍになる。ウェハの直径は、２インチで約５０．８ｍｍであるため、図９では最大隙間ｒ０を大きく描いているが、実際には僅かな隙間が残ることになる。この隙間が少ない方が、接合体を作る上でより好ましい。

【００８０】

また、図示はしないが、２枚の半導体基板は、後述するように、半導体基板の半径方向の動きを規制するホルダ内に収められ、カバー部材で蓋をした状態で、加熱処理のため温度を上げる前に加熱炉の中で一旦真空にする工程を経る。加熱炉の中を真空にするのは、不純物を排出するためである。そのため、ホルダまたはカバー部材には、直径１ｍｍの空気抜きの穴が１つまたは複数設けられている。ここで、徐々に温度を上げながら真空にする過程で、温度を１３００℃以上１７５０℃以下程度に上げることで、膨張の関係、硬度軟化の関係で、最大隙間ｒ０が小さくなる方向に力が働く。これにより、図９の（ｂ）に示すように、完全に平坦な状態を経由することと、初期の表面粗さの良好なことに加えて、アニール効果により結晶品質が非常に良好な状態になっていることから、ＡｌＮ緩衝層３ａおよび３ｂとの表面では原子間結合が起こっていると考えられる。そのため、２枚の半導体基板の反りの形状や量は、ほぼ同じであることが望ましい。これは、窒化物半導体層の厚さを揃えるよりは、厚さは異なっても反り量を測定してペアを決めることが考えられる。一方、サファイア基板２ａおよび２ｂのうちの一方は剥離して不要となるものであるので、剥離する方を、サファイア基板として残るものの厚さに合わせることは、反りの量を揃える上で有効である。

【００８１】

ここで、図５の（ｄ）でのサファイア基板２ｂの剥離を容易にする方法について説明する。実験では完全に隔離できた基板と、一部隔離側の基板にＡｌＮの極性反転構造を持つ結晶層が残ったケースがあった。サファイア基板２ａおよび２ｂのうちのどちらの基板もデバイスを作る上で利用することができるが、完全に一方または両方の基板が剥離できる方が好ましい。そこで、図８に示すサファイア基板２ａ上にＡｌＮ緩衝層３ａを成膜する前に、剥離層として、１０ｎｍ以上５０ｎｍ以下程度のＢＮ（窒化ホウ素）膜やＢＧａＮ（窒化ガリウムホウ素）膜を設けることで、基板の剥離を容易に行える様になり生産性の向上を図ることができる。この剥離層は、III族窒化物半導体基板組を構成する２枚のIII族窒化物半導体基板の両方に生成してもよいが、一方の基板が剥がれやすければよいため、剥離層を有するIII族窒化物半導体基板と剥離層を有しないIII族窒化物半導体基板とで半導体基板組を作ることができる。また、剥離面のクリーニングは必要に応じて実施する事ができる。剥離層の有無に関わらず、１０００℃以上１２５０℃以下程度の温度範囲で、水素ガスを供給しながら５分以上３０分以下の間クリーニングを行うことが有効である。

【００８２】

また、図１０に示すような基本形の基板を組み合わせ半導体基板組とすることが有効で

ある。図１０の（ａ）は、サファイア基板２ａの上にＡｌＮ緩衝層３ａを成膜した基板である。図１０の（ｂ）は、サファイア基板２の上に＋ｃＡｌＮ極性のＡｌＮ結晶層３と－ｃＡｌＮ極性のＡｌＮ結晶層４が接合した基板であり、図１で説明した形態である。なお、図１０の（ａ）のサファイア基板２ａ、ＡｌＮ緩衝層３ａは、熱処理前を示しており、ＡｌＮ結晶層と区別するためにＡｌＮ層はＡｌＮ緩衝層としているが、ＡｌＮ膜として記載することもある。図１０（ｃ）は、サファイア基板２の上に＋ｃＡｌＮ極性のＡｌＮ結晶層３と－ｃＡｌＮ極性のＡｌＮ結晶層４が接合した基板であり、さらにその上にＡｌＮ緩衝層５ａを成膜した状態の基板であり、最上層のＡｌＮ緩衝層５ａは熱処理を経ていない状態のものである。ここで、半導体基板組の組合せとして（ａ）－（ａ）、（ａ）－（ｂ）、（ａ）－（ｃ）、（ｂ）－（ｃ）が考えられる。接合した形の半導体基板としては（ｂ）、（ｃ）が単体でデバイス用として用いることができる状態であり、さらに（ａ）－（ｂ）、（ａ）－（ｃ）、（ｂ）－（ｃ）を繰り返して、何層もの極性反転層を有する窒化物半導体基板を手に入れることができる。

【００８３】

ここで、熱処理前のＡｌＮ緩衝層では熱処理後のＡｌＮ結晶層に比べＡｌＮの結晶粒が小さいとされている。特許文献１では、基板温度を１７００℃まで上昇すると、ＡｌＮ緩衝層において隣接するグレイン同士が合体され、ＡｌＮ緩衝層の表面が平坦化される。また、グレイン同士の境界には、転位が存在するが、グレイン同士が合体して大きなグレインが形成されることにより、単位面積当たりに占めるグレインの数は熱処理する基板温度の上昇と共に減少する。よって、単位面積当たりに占める転位の数も減少する。したがって、熱処理後のＡｌＮ結晶層では、貫通転位密度が低減され、表面の平坦性がよく高品質なＡｌＮ結晶層を得ることができると説明されている。そのため、上記で説明した熱処理前の＋ｃＡｌＮ極性は接合後の説明のためであり、熱処理を施している間に＋ｃＡｌＮ極性になるものも含んでいる。

【００８４】

［３．窒化物半導体基板の特性］

以下、上述した方法で作製された窒化物半導体基板１の特性について説明する。

【００８５】

はじめに、図１１を用いて、図５の（ｄ）の段階で得た、一方のサファイア基板を剥離した側のＡｌＮ結晶層の剥離表面近傍の構造特性について、ＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭ（High-angle Annular Dark Field Scanning Transmission Electron Microscopy）像を用いて説明する。図１１は、窒化物半導体基板１におけるＡｌＮ結晶層の（１１－２０）面をＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭで観察した結果である。

【００８６】

ＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭは、透過電子を利用した材料観察方法である。細く絞った電子線を試料に走査させながら当て、透過電子のうち高角に散乱したものを環状の検出器で検出することにより像が得られる。一般的なＴＥＭ像では、結晶格子のひずみや欠陥といった情報を得られるが、ＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭでは、結晶の組成についての情報が得られる。本観察でＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭを利用した目的は、高倍率の原子像でＡｌ原子とＮ原子を判別し、極性反転の様子を観察するためである。

【００８７】

図１１の（ａ）では、窒化物半導体基板１におけるＡｌＮ結晶層の（１１－２０）面をＨＡＡＤＦ－ＳＴＥＭで観察した結果を示している。また、図１１の（ｂ）は、図１１の（ａ）の一部を拡大した像である。窒化物半導体基板１における＋ｃＡｌＮ結晶層の膜厚は１９４ｎｍで、スパッタ法で成膜時に想定していた値と一致したが、－ｃＡｌＮ結晶層の膜厚は１７８ｎｍとなっており、＋ｃ側と比較して１５ｎｍほど薄くなっていることがわかった。

【００８８】

この理由として、一方の窒化物半導体基板１におけるサファイア基板を剥離する際に、厚さ１５ｎｍのＡｌＮ膜が、剥離したサファイア基板側に持っていかれたことが考えられ

る（図１１の（ｂ）参照）。これまでの実験結果から、サファイア基板と＋ｃＡｌＮ結晶層との界面には－ｃＡｌＮ結晶層が２０ｎｍほど形成されることがわかっており、－ｃＡｌＮ結晶層の領域は機械的強度が弱く、剥離の起点となったことが考えられる。

【００８９】

上述した方法でサファイア基板を機械的に剥離したＡｌＮ結晶層の表面は、機械的剥離という行為に反して比較的平坦であった。図１２により、原子間力顕微鏡（ＡＦＭ）のダイナミックモードにより表面状態を観察した像を示す。図１２は、窒化物半導体基板１を原子間力顕微鏡のダイナミックモードにより表面状態を観察した像である。図１２の（ａ）に示す５×５μｍ範囲での表面粗さは、ＲＭＳ値で０．９０ｎｍ、図１２の（ｂ）に示す１×１μｍ範囲での表面粗さは、ＲＭＳ値で０．８２ｎｍであった。

【００９０】

一般的に、表面粗さが１ｎｍ以下であれば接合は可能であるとされており、図４で説明したように、本プロセスを繰り返すことで４層以上の多層極性反転構造の実現も可能である。または、２層の極性反転構造上に＋ｃＡｌＮ結晶層をスパッタ法により成膜することで３層の極性反転構造も作製可能である。上述した剥離された１５ｎｍ程度の＋ｃＡｌＮ膜を追加して成膜することで、サファイア基板側から見て－ｃＡｌＮ結晶層（約２０ｎｍ）、＋ｃＡｌＮ結晶層（約１７０ｎｍ）、－ｃＡｌＮ結晶層（約１７０ｎｍ）、＋ｃＡｌＮ結晶層（約２０ｎｍ）というバランスを整えることも可能である。

【００９１】

次に、図１３を用いて、図５の（ｄ）の段階で得た、一方のサファイア基板を剥離した側の結晶について、Ｘ線回折装置（ＸＲＤ）で（０００２）面におけるＸ線回折と（１０－１２）面におけるＸ線回折のロッキングカーブ測定（ＸＲＣ）を行った結果を示す。図１３は、窒化物半導体基板１のＸ線回折ロッキングカーブ測定（ＸＲＣ）結果であり、（ａ）は（０００２）面の測定結果、（ｂ）は（１０－１２）面の測定結果である。図１３の（ａ）および（ｂ）に示す破線は、本実施の形態の方法により作製された極性反転構造を有するＡｌＮ結晶層の結果（実施例）であり、実線はスパッタ成膜した直後のＡｌＮ膜（ＡｌＮ単膜）の結果（比較例１）を参考値として示している。図１３の（ａ）は（０００２）面におけるＸ線回折結果を、図１３の（ｂ）は（１０－１２）面におけるＸ線回折結果を示している。

【００９２】

ＡｌＮ緩衝層３ａと３ｂとを向かい合わせて密着させて熱処理することにより得られたＡｌＮ結晶層では、（１０－１２）面におけるＸ線回折の結果が大幅に改善される傾向は、ＡｌＮ単膜が形成された基板を向かい合わせて密着させて熱処理した時と同様であり、ＦＷＨＭは３０２ａｒｃｓｅｃと非常に良好である。ＡｌＮ結晶層の（０００２）面についてはＦＷＨＭがやや悪化しているものの、大きな悪影響は確認されなかった。したがって、接合による極性反転を導入した場合も、熱処理による結晶性向上の効果は十分維持していることを確認した。

【００９３】

また、２θ－ω測定から見積もられた、ＡｌＮ結晶層のｃ軸およびａ軸の格子定数（ｃ軸は４．９９０Åで引張１．１６％、ａ軸は３．０９８Åで圧縮０．４５％）およびそこから導出される２軸性応力（２軸性応力σ_{xx}＝２．１１ＧＰａ）は、ＡｌＮ単膜基板のアニール時の結果とほぼ一致する結果である。したがって、上述した方法により作製された窒化物半導体基板１におけるＡｌＮ結晶層は、ＳＨＧ素子等のデバイス用として好適な特性を有している。

【００９４】

また、図１４の（ａ）を用いてラマン分光測定結果について説明する。図１４は、窒化物半導体基板１のラマン分光測定結果である。

【００９５】

ラマン分光法とは、試料に光を照射したときに生じるラマン散乱光から結晶構造や構造品質を評価する測定手法である。ラマン散乱光の波長は試料の結晶構造を反映して、格子

振動の固有モードに対応したフォノンエネルギー分だけ入射光より長波側にシフトすることが知られており、この変化量をラマンシフトと呼んでいる。ラマンシフト量とラマンスペクトルの半値幅から、本実施の形態の方法により作製された極性反転構造を有するＡｌＮ結晶層の結晶性を評価した。

【００９６】

ＡｌＮ膜のラマンスペクトル中のピークはいくつか存在するが、このうち代表的なE_2（ｈｉｇｈ）ピークは、結晶中の歪量に比例してラマンシフト量が変化し、構造の不完全性を反映してその線幅（ＦＷＨＭ）が広がることが知られる。単層膜ＡｌＮ基板であれば、図１４の（ａ）に破線で示すように６５８ｃｍ$^{-1}$に存在する。図５の（ｄ）の段階で得た、一方のサファイア基板を剥離した側の極性反転構造の結晶については、図１４の（ａ）に示す実線のＡｌＮ　E_2（ｈｉｇｈ）に示すように、ラマンシフト量は６６３．６ｃｍ$^{-1}$であり、単層膜ＡｌＮ基板のアニール後の値とほぼ一致するものである。また、ピークのＦＷＨＭは５．８ｃｍ$^{-1}$であり良好な結晶性を示している。

【００９７】

また、図１４の（ｂ）に、経験的に得られたラマンシフト量とσ_{xx}の関係を示す。ラマンシフト量からは、結晶の面内に生じる２軸性応力を導出することができる。両者の比例関係は経験的に求められており、比例係数は－４．０４ｃｍ$^{-1}$／ＧＰａであるとされる。ここから２軸性応力を求めると、１．４７ＧＰａの圧縮応力が生じていることになる。この値は、ＸＲＤの２θ－ω測定から求められた２軸性応力σ_{xx}の値２．１１ＧＰａと比較して３０％低い値であるが、それでも大きな圧縮応力が生じていることがラマン分光測定からも明らかにされた。

【００９８】

また、ウェハの置き方と、＋ｃＡｌＮ結晶層および－ｃＡｌＮ結晶層の面内結晶方位の角度ズレについて説明する。図１５は、窒化物半導体基板１の（１０－１２）のＸ線回折極点図である。

【００９９】

ウェハの置き方によって＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層の間で面内結晶方位の角度ズレが予想されたため、（１０－１２）の極点図を測定したものを図１５に示す。極点図とは、円の半径方向に煽り角χ、円周方向に回転角φとしてＸ線回折測定結果をマッピングしたものである。一般には、異種基板上に結晶成長した際に、結晶の配向性を評価するために利用されるが、本実施の形態では＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層との面内結晶方位の角度ズレを評価するために利用している。図１５の各グラフは、煽り角χを測定用の回折量が最大になる点を選び、煽り角χを固定して窒化物半導体基板１を回転し測定した結果である。

【０１００】

ＡｌＮ結晶層は六方晶系の結晶構造を有しており、六方晶系の結晶構造は６回回転対称であるため、極点図の６つの方向から観測したときのピークもその特性を反映している。極点図を見る限り、各ピーク位置にはずれが見られないが、より詳細に評価するため、それぞれのピークを細かくφスキャンした結果も示している。一部の観測結果では、ダブルピークの波形が見られるが、ピークの間隔は最大で０．８７度であり、＋ｃＡｌＮ結晶層と－ｃＡｌＮ結晶層との角度ズレは１度以下に抑えられているといえる。１度という角度は原理的に要求されるような根拠ある数字ではないが、結晶の対称性を考えると角度ずれは可能な限り小さいほうがよいと考えられる。

【０１０１】

以上のように、本実施の形態に係る極性反転層構造を有する窒化物半導体基板１は、極性反転構造を有し、表面が平坦でかつ高品質の結晶層が形成された半導体基板である。これにより、窒化物半導体基板１は、結晶の光学特性として非常に良好な特性を示すので、紫外光発光素子等の光源に適した窒化物半導体基板を提供することができる。

【０１０２】

［４．効果等］

以上、本実施の形態に係る窒化物半導体基板１によると、サファイア等の基板上にＡｌＮ等のIII族窒化物半導体緩衝層が形成された半導体基板を、２枚一組として半導体基板組とし、III族窒化物半導体緩衝層同士を向かい合わせて密着して熱処理することにより、原子層オーダで急峻な極性反転層を持つ半導体基板を、ウェハスケールで実現することができる。また、このときの熱処理により、結晶性の向上も同時に図ることができる。また本発明により、従来用いられてきた親水化接合において必須となる「ボールねじや空圧シリンダとベローズ型直線導入機構を組み合わせた特殊な接合圧力印加機構」や、表面活性化接合のような「高真空環境」を不要とする事ができるという大きな効果を実現するものである。

【０１０３】

図２で説明したように、極性反転層にアモルファス層が存在しないことは、ＳＨＧ素子等への応用上において重要である。ＳＨＧ素子において、基本波の最大振幅は、極性の異なるＡｌＮ結晶層の貼り合わせ界面（極性反転層）に一致しており、アモルファス層との重なりにより光の吸収が生じることが予想されるためである。さらに詳しく説明すれば、アモルファス層は構造が無秩序であることから屈折率や吸収係数が緩やかに変化するバンドテイリングが生じ、高い光強度を必要とするＳＨＧ素子ではこのテイル準位に共鳴した２光子吸収が生じやすく、これが大きな光吸収につながる可能性がある。

【０１０４】

このことより、本実施の形態に係る窒化物半導体基板１は、後述するように、疑似位相整合型ＳＨＧデバイスを作製する基板として適している。

【０１０５】

（実施の形態２）

次に、上記したIII族窒化物半導体基板組の製造装置６０について説明する。

【０１０６】

図１６は、本実施の形態に係る製造装置６０の概略構成図である。理解を容易にするため、図１６では製造装置６０を簡略化し、正面からみた断面図と主要な構成だけを記載している。

【０１０７】

図１６には、製造装置６０の全体の構成を示している。製造装置６０は、加熱炉６１と、容器６２と、容器蓋６３と、穴６４と、基板組ホルダ６５と、温度センサ６６と、指令装置６７と、比較装置６８と、制御装置６９と、流入ガス配管７０と、流入ガス制御弁７１と、排出ガス配管７２と、排出ガス制御弁７３と、加熱ヒータ７４ａ、７４ｂ、７４ｃおよび７４ｄとを備えている。

【０１０８】

加熱炉６１は製造装置６０内の炉空間である。加熱炉６１の前方または後方には窒化物半導体基板を出し入れする開閉用の扉（図示せず）が設けられている。

【０１０９】

製造装置６０である加熱炉６１の全体的な形状は、略直方体または略円柱状である。加熱炉６１の材質は、炭素または窒化ホウ素などの高耐熱性素材である。

【０１１０】

容器６２は、高純度カーボン製の容器である。容器６２は、加熱炉６１における加熱方式が誘導加熱の場合は発熱部材としての機能も果たす。高純度カーボンは、本来、高温に対して安定な物質であり、かつ、加工がしやすく安価であるという特徴を有している。

【０１１１】

容器蓋６３は容器６２の蓋であり、容器６２と一体になって熱処理するＡｌＮ緩衝層を有する半導体基板組をほぼ気密状態にする為の容器である。

【０１１２】

穴６４は、加熱炉６１内に充填された不活性ガスのガス抜き用穴である。穴６４は、半導体基板組の加熱を開始する前に、加熱炉６１の内部を真空置換する際に、容器６２中のガスを排除するための穴である。本実施の形態では、穴６４は、容器蓋６３に直径１ｍｍ

程度で２箇所設けられている。なお、この穴６４は、容器蓋６３に限らず、容器６２の容器６２に設けられても良い。

【０１１３】

基板組ホルダ６５は、加熱炉６１内に配置され、上述した半導体基板組を加熱するときに半導体基板組の動きを規制するためのホルダである。基板組ホルダ６５の中には、半導体基板組８１が２組設置されている。基板組ホルダ６５は、高純度カーボンを使用しているが、III族窒化物半導体、炭素、窒化ホウ素、酸化アルミニウム（サファイア）、セラミック、炭化ケイ素、高融点金属（モリブデン、タングステン、イリジウムなどの融点の高い材料およびこれらの合金など）、ジルコニア、炭化タンタルの中から選ぶことができる。

【０１１４】

温度センサ６６は、図示では一つであるが、加熱炉６１内の内部温度の分布を見る為に、加熱炉６１内に複数配置されている。この実施の形態では容器蓋６３は、基板組ホルダ６５の蓋も兼ねているが、基板組ホルダ６５に独立した蓋を設けてもよい。なお、基板組ホルダ６５の構成については、後に詳述する。

【０１１５】

加熱ヒータ７４ａ～７４ｄは、加熱炉６１の外側に配置され、加熱炉６１の内部に配置された基板組ホルダ６５を加熱する機能を有している。加熱ヒータ７４ａ～７４ｄは、例えば誘導加熱式の加熱ヒータである。

【０１１６】

指令装置６７は、操作者の指示に従って、起動、停止、加熱制御、真空化、不活性ガスなどの流入排出制御等の指令を出す装置である。指令装置６７は、より具体的には、プログラムで制御されたコンピュータが使用されている。先に記載したように加熱炉６１の内部を真空に置換した後に窒素ガスを流入しながら高速度で昇温し、９００℃～１３００℃以降は昇温速度を１／２程度に下げるプログラムも、この指令装置６７内に組み込まれている。

【０１１７】

比較装置６８は、加熱炉６１内の圧力を検出する気圧センサ（図示せず）で検出された測定値を数値化し、指令装置６７からの指示と比較する。比較装置６８の出力は、制御装置６９に伝えられ、流入ガス制御弁７１、排出ガス制御弁７３および加熱ヒータ７４ａ～７４ｄを制御する信号を出力する。なお、流入ガス配管７０、排出ガス配管７２は、それぞれ一つには限定されない。また、流入ガスは高温にしておいた方が昇温の際に有利である為、流入ガスの加熱装置（図示せず）を備えていてもよい。

【０１１８】

本実施の形態に係る窒化物半導体基板１用の製造装置６０は、加熱ヒータ７４ａ～７４ｄによって加熱制御される加熱炉６１の内部に、厚さ１０ｎｍ以上１０００ｎｍ以下のIII族窒化物半導体からなる緩衝層の前駆体を有し、サファイア、炭化ケイ素および窒化アルミニウムの少なくとも一つからなる１組以上の半導体基板を保持する基板組ホルダ６５を、半導体基板の加熱時に有する。加熱ヒータは、例えば制御装置６９等に制御され、均一に加熱炉６１の内部を過熱する方式であれば、誘導加熱、電波加熱、抵抗加熱、ガス・石油等の燃焼加熱であっても構わない。

【０１１９】

加熱処理時の加熱炉６１は、加熱炉６１内の不純物を排出するため常温において一旦真空置換される。その後、加熱ヒータ７４ａ～７４ｄにより温度を上昇させながら、窒素、アルゴン、ヘリウム等の不活性ガス、または、不活性ガスにアンモニアを添加したガスが、流入ガス制御弁７１を通して加熱炉６１の内部に充填される。また、不活性ガスを主成分として、アンモニア、酸素、シラン（SiH_4）、モノメチルシラン（SiH_3CH_3）やゲルマン（GeH_4）、トリメチルアルミニウム（ＴＭＡ）、トリメチルガリウム（ＴＭＧ）などの有機金属ガスも混入させてもよい。混合比は不活性ガスに対して２０％以下が好ましい。排出ガス制御弁７３を通して上記窒素ガス等が一定の気圧になるように制

御すると共に、炉空間内で発生する不純物が一定量以下になるように常時排出されている。

【０１２０】

ここで、使用できるガスは、塩素などの腐食性ガスを除き、上記以外の種類のガスであっても混合ガスとして用いられても良い。実施の形態１で説明した極性反転層構造を有する窒化物半導体基板１を作製するには、上記したような加熱炉を用いて、温度に関しては１３００℃以上１７５０℃以下、時間に関しては１０分以上５時間以下が許容範囲であり、好ましくは３０分以上３時間以下程度である。また、温度は１３００℃以上１７５０℃以下の異なる２点間（例えば１４００℃と１７００℃）の温度に１０分～２０分毎に複数回制御するか、または異なる複数の温度になるように（例えば１４００℃１０分、１５００℃３０分、１７００℃６０分）に温度制御装置によって制御されても良い。これらの温度や時間は基板やIII族半導体層の材料によって選ばれる。

【０１２１】

次に、図１７を用いて基板組ホルダ１６５の説明をする。図１７は、本実施の形態に係る基板組ホルダ１６５の概略構成図であり、（ａ）は上面断面図、（ｂ）は側面断面図を示している。図１７に示す基板組ホルダ１６５は、図１６における基板組ホルダ６５に相当するものであり、内部に３組の半導体基板組１８１が設置される。

【０１２２】

図１７に示すように、基板組ホルダ１６５は、内部に半導体基板組１８１を収容するための空間である開口部を有している。また、基板組ホルダ１６５の上方には、開口部を覆うように蓋１６３が配置される。

【０１２３】

また、基板組ホルダ１６５の内部には、ガス置換用の穴１６４が設けられている。穴１６４は、基板組ホルダ１６５の側壁を貫通する直径１ｍｍ程度の穴であり、基板組ホルダ１６５において２または数カ所設けられている。真空化処理等の際に必要となるが、ホルダ内部での不活性ガスの移動が極力少なくなるように、穴径は細くして、基板組ホルダ１６５の内部ではガスが実質的に流れない滞留状態としている。

【０１２４】

また、基板組ホルダ１６５の内部には、半導体基板組１８１を上部から押さえる加重部材１８２が配置されている。加重部材１８２は、半導体基板組１８１と蓋との隙間を調整し、０．５ｍｍ以下、好ましくは０．１ｍｍ以下になるように調整する機能も果たしている。加重部材１８２の重量は、例えば半導体基板４枚程度に対して１３ｇ以上１４ｇ以下程度である。加重部材の材質は、基板組ホルダ１６５、蓋１６３と同様にIII族窒化物半導体、炭素、窒化ホウ素、酸化アルミニウム（サファイア）、セラミック、炭化ケイ素、高融点金属（モリブデン、タングステン、イリジウムなどの融点の高い材料およびこれらの合金など）、ジルコニア、炭化タンタルの中から選ぶことができる。

【０１２５】

また、図１７の（ａ）に示すように、基板組ホルダ１６５を上方から見たときに、基板組ホルダ１６５の側壁の一部には、オリフラ規制部材１８３が設けられている。オリフラ規制部材１８３は、図１５で説明したように、基板組ホルダ１６５内に収納された半導体基板組１８１の結晶軸のズレの影響を少なくするため、半導体基板のオリフラ部分を押さえることにより複数の半導体基板の面内の配置位置（向き）を統一する部材である。オリフラ規制部材１８３の形状は、オリフラのカット部分と同形状が好ましいが、図１７のように楕円断面を持つ円柱形状や長方体の様なものでもよい。オリフラ規制部材１８３の材質は、基板組ホルダ１６５の部材により、適宜変更してもよい。

【０１２６】

（実施の形態３）

以下に、本発明の窒化物半導体を用いた極性反転層を有する窒化物半導体基板１を用いたＳＨＧデバイス（第二次高調波発生素子）について図を使って説明する。

【０１２７】

ＳＨＧデバイスの説明の前に、特許文献１の技術で熱処理をした単層ＡｌＮ結晶層を有する半導体基板の性能について説明する。後述する極性反転型のＳＨＧデバイスを作製するにあたり、特許文献１による熱処理後の単層ＡｌＮ結晶層を有する基板を測定した。図１８は、Ｘ線回折ロッキングカーブ測定（ＸＲＣ）を行った結果であり、（ａ）は単層ＡｌＮ結晶層の（０００２）面の測定結果、（ｂ）は単層ＡｌＮ結晶層の（１０－１２）面の測定結果を示す。

【０１２８】

図１８の（ａ）に示すように、単層ＡｌＮ結晶層の（０００２）面については、Ｘ線回折ロッキングカーブの半値幅は、熱処理前には５３２ａｒｃｓｅｃであったが、熱処理後には４９ａｒｃｓｅｃとなっている。また、図１８の（ｂ）に示すように、単層ＡｌＮ結晶層の（１０－１２）面については、熱処理前に６０３１ａｒｃｓｅｃであった値が熱処理後には２８７ａｒｃｓｅｃとなり、結晶性が大幅に改善している。

【０１２９】

図１９は、窒化物半導体基板１の分光エリプソメトリの測定結果である。分光エリプソメトリの測定結果から常屈折率n_oと異常屈折率n_eの波長分散を測定した。

【０１３０】

図１９の測定結果より、窒化物屈折率の波長分散を研究した論文である”R. Goldhahn, “Dielectric Function of Nitride Semiconductors: Recent Experimental Results”, ACTA PHYSICA POLONICA A, Vol 104 (2003)”と一致する傾向が見られた。なお、図１９において、n_o（ＦＦＡ　ＡｌＮ）は窒化物半導体基板１の常屈折率、n_e（ＦＦＡ　ＡｌＮ）は窒化物半導体基板１の異常屈折率、n_o（ｒｅｆ．［６］）は上述した論文における常屈折率、n_e（ｒｅｆ．［６］）は上述した論文における異常屈折率である。なお、異常屈折率とは異常光線についての屈折率であり、後述する図２０の（ａ）の座標ではｚ軸方向に偏光した電磁波に対する屈折率となる。同様に、常屈折率は常光線についての屈折率であり、図２０の（ａ）の座標ではｘ－ｙ面内の任意の方位に偏光した電磁波に対する屈折率である。

【０１３１】

図１９の測定結果より、窒化物半導体基板１の結晶性が良好であり、窒化物半導体基板１は、光学素子として利用できることを実験的に確認することができた。

【０１３２】

ここで、既存のＩｎＧａＮ青色レーザを光源とし、ＡｌＮ結晶層を非線形光学結晶として第二次高調波を発生させるような光学部材を用いて光学系を組めば、コヒーレント性の高い紫外光を発生させることができる。そこで、以下、上述した方法により作製された窒化物半導体基板１のＡｌＮ結晶層を光学部材として利用したＳＨＧデバイスについて説明する。

【０１３３】

図２０は、図５の（ｅ）、（ｆ）に示した工程によって、ＳＨＧデバイスの構成を示す概略図である。図２０の（ａ）は、ＳＨＧデバイス３００の断面模式図である。また、図２０の（ｂ）は、ＳＨＧデバイス３００の斜視図である。

【０１３４】

本実施の形態に係るＳＨＧデバイス３００は、導波路３０１と、サファイアで構成されるクラッド層３０２とを有している。導波路３０１は、＋ｃＡｌＮ結晶層３０３と、－ｃＡｌＮ結晶層３０４とを有している。＋ｃＡｌＮ結晶層３０３と－ｃＡｌＮ結晶層３０４とは、上述した方法で作製された極性反転構造となっている。

【０１３５】

ここで、導波路３０１は、窒化物半導体基板１を用いて、極性反転構造を有するＡｌＮ結晶層を導波路幅ｗ、導波路厚さｈ、導波路長ｌとなる形状の導波路に形成したものである。このときの導波路幅ｗ、導波路厚さｈ、導波路長ｌは、後述するように、導波路長ｌの方向つまり図２０の（ａ）に示すｙ軸方向に入射するレーザ光の入射波長に基づき算出される。

【０１３６】
ここで、図２０の（ａ）を用いて極性反転層を中心とした、第二次高調波発生の仕組みを説明する。
【０１３７】
＋ｃＡｌＮ結晶層３０３と－ｃＡｌＮ結晶層３０４とで構成された導波路３０１は、光学非線形性を有している。光学非線形性を有する導波路３０１により第二次高調波（ＳＨ波）を得るには、位相整合条件を満たす必要がある。すなわち、導波路３０１に入力された光（基本波）と発生する光（ＳＨ波）とは結晶中で進む速さが異なるため、光の位相がπ異なる場合には両者が打ち消しあってしまう。そこで、導波路３０１では、異方性結晶の複屈折を利用して位相整合させることが一般的である。すなわち、異方性結晶への入射角度をうまく調整することで基本波とＳＨ波の屈折率を一致させる。これにより、導波路３０１において位相整合条件が満たされるので、効率よくＳＨ波を発生させることが可能となる。なお、複屈折位相整合については、「非線形光学結晶による高調波変換の基礎」（Journal of Plasma and Fusion Research Vol.85, No.5 May 2009　P239-242）に詳細が記されている。
【０１３８】
ここで、ＡｌＮ結晶層は、自立基板の作製に大きなコストがかかることから、数ｍｍ角のＡｌＮ結晶を要する従来の複屈折位相整合方法は実用的ではない。かつ、複屈折性が弱いことから、深紫外波長域では複屈折を用いた位相整合はそもそも不可能である。そこで、極性反転させたＡｌＮ結晶層（薄膜）を利用した疑似位相整合を用いている。このＳＨＧデバイス３００からの出力は、下記の（式１）で示されるように、ｙ軸方向（伝搬方向）とｚ軸方向（垂直方向）の位相整合を満たす必要がある。このとき、ｙ軸方向の位相整合は導波路中のモード分散を利用し、ｚ軸方向の位相整合はＡｌＮの極性反転を利用する。なお、（式１）において、ｌはｙ軸方向に延びる導波路の導波路長、ｋは光の波数、d_{33}は非線形光学係数である。
【０１３９】
【数１】

$$P_{2\omega} \propto \frac{\sin^2(\Delta kl)}{(\Delta kl)^2} \times \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} [E_z^{\omega}(z)]^2 \cdot E_z^{2\omega}(z) \cdot d_{33}(z) dz \right\}^2 \qquad (式１)$$

【０１４０】
まず、ｙ軸に関する項については、（式２）のように表せる。
【０１４１】
【数２】

$$\Delta k = k_{\omega} - 2k_{2\omega} = \frac{2n_{\omega}\pi}{\lambda} - 2\frac{2n_{2\omega}\pi}{\frac{\lambda}{2}} = \frac{2\pi}{\lambda_{\omega}}(n_{\omega} - n_{2\omega}) \qquad (式２)$$

【０１４２】
（式２）において、λ_{ω}は基本波の波長、n_{ω}は基本波における実効屈折率、$n_{2\omega}$はＳＨ波における実効屈折率を示す。基本波とＳＨ波の実効屈折率が一致するとΔｋは０になり、第１項はｓｉｎｃ関数として１を示すため、高いＳＨＧ効率を得ることができる。ここでは、一般的な複屈折は利用せず、上述したようにモード分散を利用して位相整合条件を満たしている。つまり、ＳＨ波には導波路の層の中央に電界分布の節が存在する高次モードを用いることで、基底次モード間では一致することのない実効屈折率の一致を実現している。
【０１４３】
図２０の（ａ）は導波路３０１を側面から見た図、図２０の（ｂ）は導波路３０１の斜視図になる。図２０の（ａ）では、ＡｌＮ結晶層により形成された導波路３０１を伝搬する基本波の電界分布（TM_{00}　E_z^{ω}）とＳＨ波の電界分布（TM_{01}　$E_z^{2\omega}$）とを実線で示している。また、図２１の（ａ）に示された電界分布図は、TM_{00}　E_z^{ω}

を、図２１の（ｂ）にＴＭ$_{01}$　Ｅ$_{z}^{2\omega}$の電界分布をｘｚ平面上にプロットしたものである。図２１の（ａ）および（ｂ）において、フィールド中にＢｌで指示している分布が正の値、Ｒｄで指示している分布が負の値を示している。

【０１４４】

ここで、ＴＭとは、Ｔｒａｎｓｖｅｒｓｅ　ｍａｇｎｅｔｉｃ　ｍｏｄｅを意味しており、図２０の（ａ）では、ｘ軸方向にのみ磁界成分が存在するような電磁波を指す。さらに、ＴＭ$_{ij}$の添字ｉ、ｊはｘ軸方向とｚ軸方向のそれぞれの電界分布の節の数を表している。図２０の（ａ）では、ＴＭ$_{00}$　Ｅ$_{z}^{\omega}$には節がないが、ＴＭ$_{01}$　Ｅ$_{z}^{2\omega}$には節が中央に１つ見られる。ＡｌＮは屈折率が高く、サファイア（Ａｌ$_{2}$Ｏ$_{3}$）は屈折率が低いことを利用して、それぞれの材料における電界分布を調整することで、両者の実効屈折率を調整することができる。なお、図２０の（ａ）において、ＴＭ$_{00}$　Ｅ$_{z}^{\omega}$およびＴＭ$_{01}$　Ｅ$_{z}^{2\omega}$のカーブを示した近傍に記載されている破線は、電界０の位置を示している。

【０１４５】

例えば、厚さｈと導波路幅ｗを適宜調整することにより電界分布を調整することができる。図２０の（ｂ）ではサファイア基板３０２を残しているが、図５の（ｄ）の段階でも記載したように、基板を全て剥離して、別のクラッド層を周囲全周施すことができる。ＳＨＧ素子の場合には酸化ケイ素（ＳｉＯ$_{2}$）にすると、より光の閉じ込め効果を向上させ、波長変換効率を向上させることができる。

【０１４６】

ただし、ＴＭ$_{01}$　Ｅ$_{z}^{2\omega}$は電界に正負があるため通常の単一の極性を有するＡｌＮ膜だと位相整合項の重なり積分が０になってしまうことが問題となる。そのため、上記した極性反転を行い、非線形光学係数ｄ$_{33}$（ｚ）の符号をＳＨ波電界分布の節にあたる膜厚において反転させる必要がある。これにより（式１）の積分項は非０の値になり、ＳＨＧ光が出力される。これらの取り組みにより、最終的にｙ軸方向とｚ軸方向の位相整合条件が満たされ、高効率なＳＨＧ出力を実現することができる。

【０１４７】

なお、モード分散位相整合と分極反転による疑似位相整合型ＳＨＧについては論文”Polymer waveguides with optimized overlap integral for modal dispersion phasematching”に詳細な説明が記されている。

【０１４８】

このように、既存のＩｎＧａＮ青色レーザを光源とし、窒化物半導体基板１のＡｌＮ結晶層を非線形光学結晶として第二次高調波を発生させるようなＳＨＧデバイスを用いて光学系を組めば、コヒーレント性の高い紫外光を発生させることができる。

【０１４９】

なお、ＡｌＮ結晶層を非線形光学結晶として用いる利点として、次の３点が挙げられる。

（１）ＡｌＮ結晶層の吸収端波長は２１０ｎｍであるから、紫外の広い領域で透明である。

（２）既存の非線形光学結晶であるＢＢＯ（ホウ酸バリウム）やＣＬＢＯ（ホウ酸セシウムリチウム）よりも高い非線形光学係数ｄ$_{33}$を有する。

（３）ＡｌＮ結晶層は、化学的および機械的に安定な材料であり、ＢＢＯやＣＬＢＯのような潮解性および有毒性がない。

【０１５０】

次に、図２２に、本実施の形態に係る導波路３０１の設計の一例を示す。以下では、導波路３０１において、導波路幅ｗの設計の一例を示している。なお、図２２に示すグラフの横軸は導波路幅、縦軸は基本波（入射波長λ_{1}＝５３２ｎｍ）とＳＨ波（出射波長λ_{2}＝２６６ｎｍ）の実効屈折率を示している。導波路３０１を構成するＡｌＮ結晶層の膜厚はｈ＝１１０ｎｍ、導波路長はｌ＝１ｍｍとした。

【０１５１】

図２２には、ＴＭ$_{00}$　Ｅｚ$^{\omega}$およびＴＭ$_{01}$　Ｅｚ$^{2\omega}$の実効屈折率$n_{eff,1}$と$n_{eff,2}$が導波路３０１の導波路幅ｗによって変化する曲線を示している。導波路３０１の導波路幅ｗを、２つの曲線の交点である導波路幅ｗ＝１．９４μｍにすると、実効屈折率の差がゼロとなり、波長変換効率は最大となる。本設計では、基本波にλ_1＝５３２ｎｍの波長を用いたが、これは測定系の都合でＹＡＧレーザのＳＨ波を使用するためである。より短波長での波長変換を行う場合、λ_1＝４５０ｎｍ付近の波長で設計を行えば、λ_2＝２２５ｎｍのＳＨ波との間で位相整合を満たすことができる。

【０１５２】

ここで、上述した設計例は、入射波長をλ_1とし、ＳＨＧデバイスから出力される出力光の波長を$\lambda_2=\lambda_1/2$とした場合の結晶層の入射波長における屈折率をn_1、出射波長における屈折率をn_2として、ＡｌＮ結晶層の膜厚（導波路厚さ）ｈをｈ＝１１０ｎｍに固定して導波路幅ｗの値を変化させたときに、$n_1=n_2$となる導波路幅ｗの値を求めたものである。n_1とn_2の許容差は$(n_1-n_2)/n_1$で計算した場合好ましくは０．１％以下、より好ましくは±０．００５％である。導波路３０１の設計はこれに限らず、例えば導波路幅ｗの値を固定してＡｌＮ結晶層の膜厚ｈを変化させるグラフを用いることもできる。

【０１５３】

以上、上記した様に、ＡｌＮ等のIII族窒化物半導体緩衝層が形成された窒化物半導体基板を、２枚一組として半導体基板組とし、III族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて密着して熱処理することにより、原子層オーダで急峻な極性反転層を持つ半導体基板を、ウェハスケールで実現することができる。また、この熱処理により、結晶性の向上も同時に図ることができる。したがって、上述した極性反転層を持つ窒化物半導体基板１を導波路状に加工することで、疑似位相整合型ＳＨＧデバイスの作製ができるものである。これにより、波長４００ｎｍ台の半導体レーザと上述したＳＨＧデバイスの組合せにより、波長２００ｎｍ台の発光素子を実現することができる。

【０１５４】

（その他の実施の形態）

以上、本発明に係る窒化物半導体基板、窒化物半導体基板の製造方法及び窒化物半導体デバイスについて、実施の形態に基づいて説明したが、本発明は実施の形態に限定されるものではない。実施の形態に対して当業者が思いつく変形を施して得られる形態、および、複数の実施の形態における構成要素を任意に組み合わせて実現される別の形態も本発明に含まれる。

【０１５５】

例えば、上述した実施の形態では、III族窒化物半導体緩衝層が形成された窒化物半導体基板を、２枚一組として半導体基板組とし、III族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて密着して熱処理したが、基板剥離工程で得られたIII族窒化物半導体結晶層が接合したIII族窒化物半導体基板とIII族窒化物半導体緩衝層が形成されたIII族窒化物半導体基板とを、第２の半導体基板組とし、第２の半導体基板組の各III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層同士を向かい合わせて密着して加熱炉内に設置し（第２の設置工程）、熱処理してもよい。また、第２の設置工程と、加熱工程と基板剥離工程とをこの順に複数回繰り返してもよい。

【０１５６】

また、基板剥離工程で得られたIII族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体結晶層上に、III族窒化物半導体薄膜の結晶成長を行う結晶成長工程を有し、結晶成長工程で得られた２枚のIII族窒化物半導体基板同士または結晶成長工程で得られたIII族窒化物半導体基板とIII族窒化物半導体緩衝層とが形成されたIII族窒化物半導体基板を、第３の半導体基板組とし、第３の半導体基板組の各III族窒化物半導体基板のIII族窒化物半導体薄膜同士を向かい合わせて密着して加熱炉内に設置し（第３の設置工程）、熱処理してもよい。また、第３の設置工程と、加熱工程と基板剥離工程とをこの順に複数回繰り返してもよい。

【０１５７】

また、製造装置の構成、ホルダの形状等については、上述した構成および形状に限定されず、適宜変更してもよい。

【産業上の利用可能性】

【０１５８】

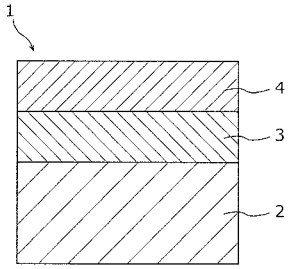
本発明は、照明、殺菌、フォトリソグラフィ、レーザ加工機、医療機器、ＤＮＡ分析器、蛍光体用光源、分光分布分析、紫外線硬化などの光源として使用される紫外光発光素子に利用することができる。また、光デバイス以外にも各種の電子部品への応用が期待できるものである。

【符号の説明】

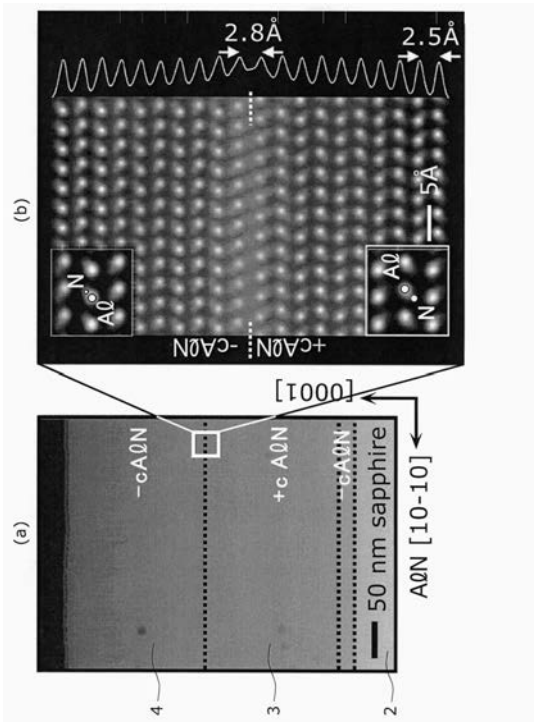
【０１５９】

１　窒化物半導体基板
２、２ａ、２ｂ　サファイア基板
３、３ａ、３ｂ、５、５ａ　窒化アルミニウム結晶層（第１のIII族窒化物半導体結晶層）
４、６　窒化アルミニウム結晶層（第２のIII族窒化物半導体結晶層）
７、３０２　クラッド層
６１　加熱炉
６２　容器
６３　容器蓋
６４　穴
６５、１６５　基板組ホルダ
６６　温度センサ
６７　指令装置
６８　比較装置
６９　制御装置
７０　流入ガス配管
７１　流入ガス制御弁
７２　排出ガス配管
７３　排出ガス制御弁
７４ａ、７４ｂ、７４ｃ、７４ｄ　加熱ヒータ
１６３　蓋
１６４　穴
１８１　半導体基板組
１８２　加重部材
１８３　オリフラ規制部材
３００　ＳＨＧデバイス（窒化物半導体デバイス）
３０１　導波路
３０３　＋ｃＡｌＮ結晶層
３０４　－ｃＡｌＮ結晶層

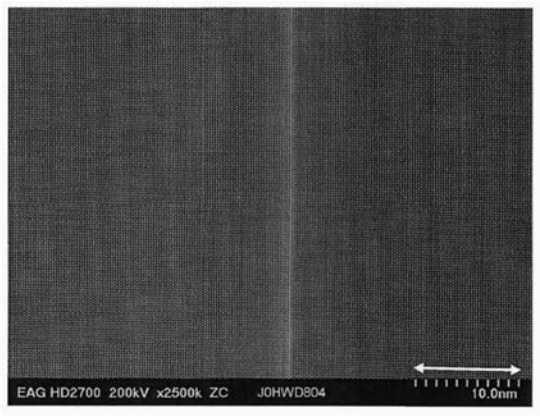
【図１】


1
4
3
2

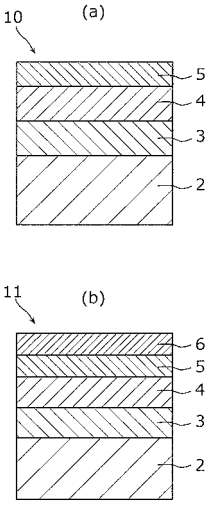
【図２】


2.8Å
2.5Å
5Å
(b)
Al
N
Al
N
-cAlN
+cAlN
[0001]
(a)
-cAlN
+c AlN
-cAlN
50 nm sapphire
AlN [10-10]
4
3
2

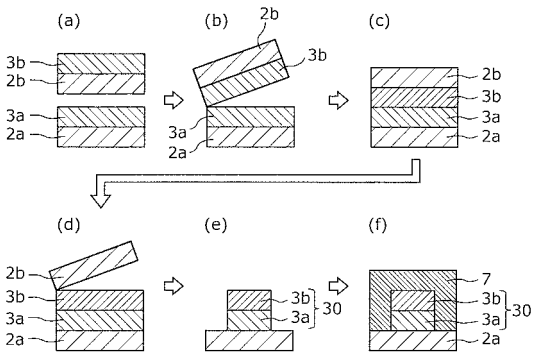
【図３】


EAG HD2700 200kV x2500k ZC J0HWD804
10.0nm

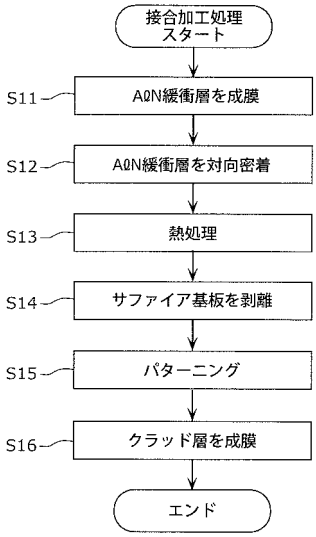
【図４】


10
(a)
5
4
3
2
11
(b)
6
5
4
3
2

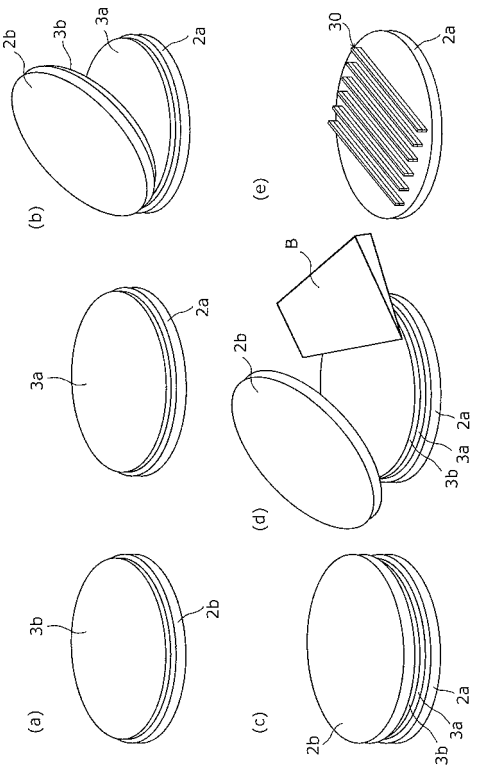
【図５】


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
2b
3b
3a
2a
30
7

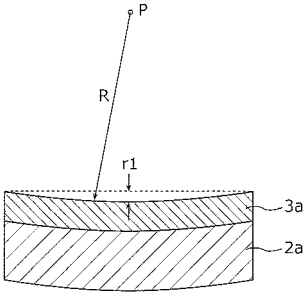
【図６】


接合加工処理
スタート
S11
AlN緩衝層を成膜
S12
AlN緩衝層を対向密着
S13
熱処理
S14
サファイア基板を剥離
S15
パターニング
S16
クラッド層を成膜
エンド

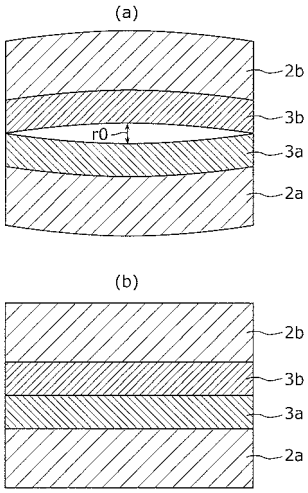
【図７】


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
2b
3b
3a
2a
30
B

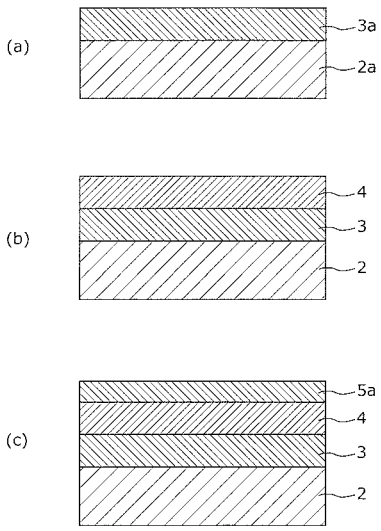
【図８】


P
R
r1
3a
2a

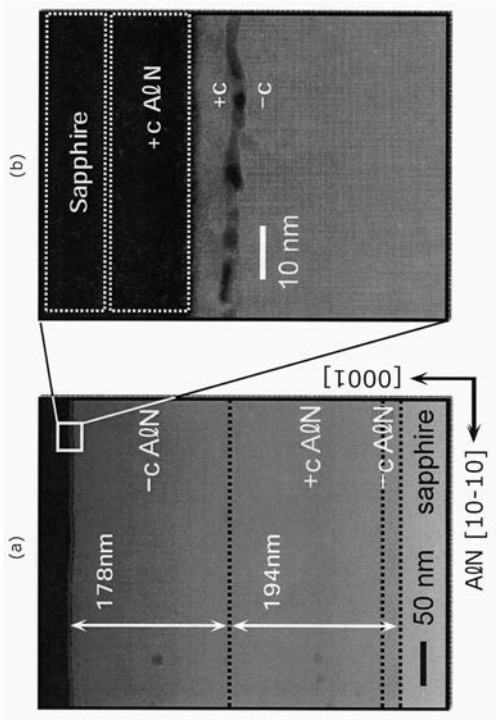
【図９】


(a)
(b)
2b
3b
3a
2a
r0

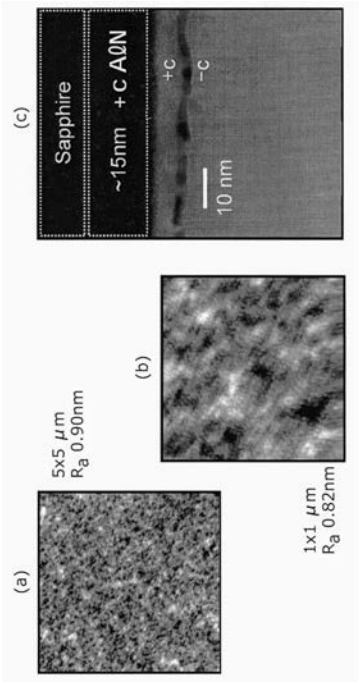
【図１０】



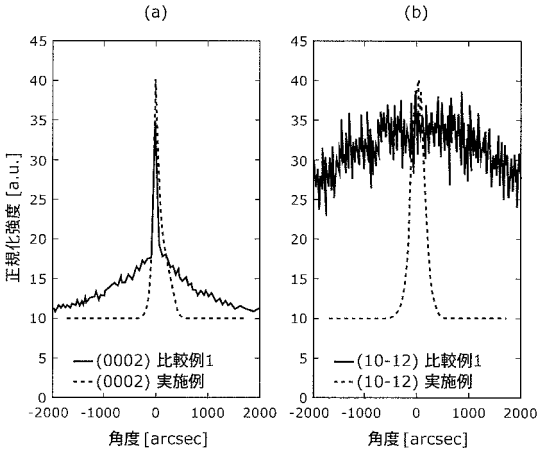
【図１１】



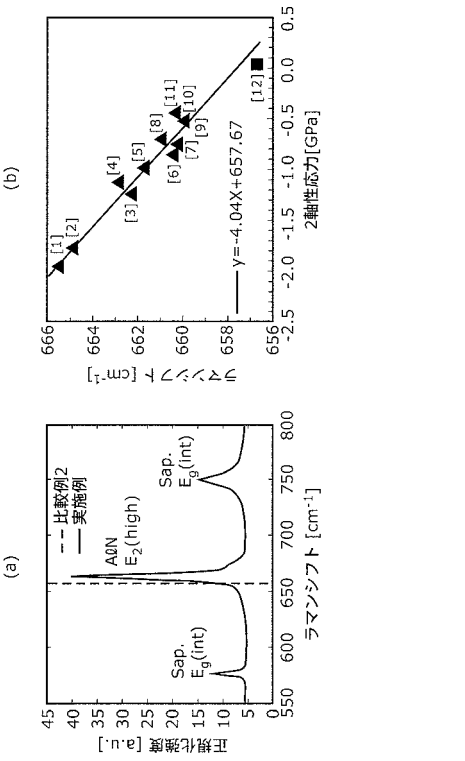
【図１２】



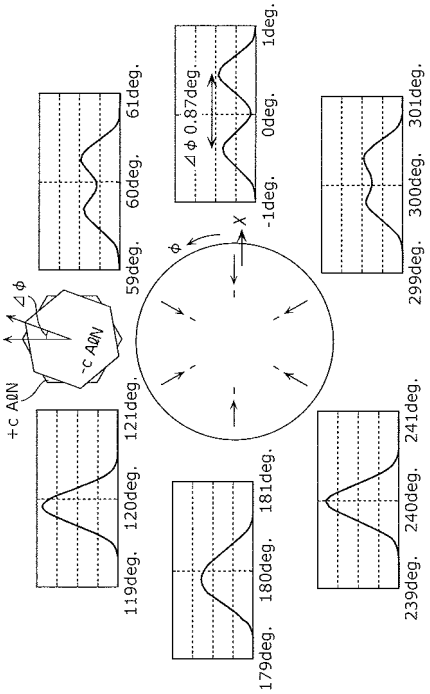
【図１３】



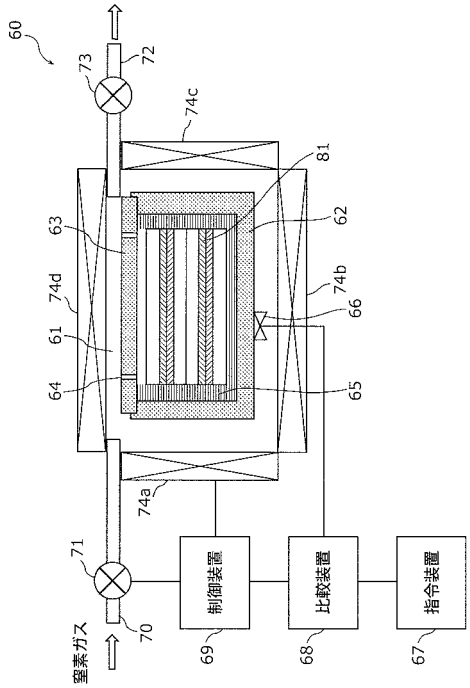
【図１４】



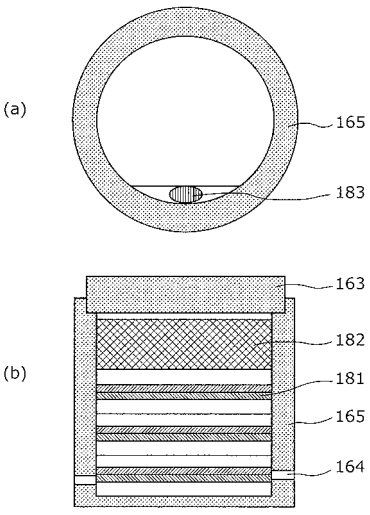
【図１５】



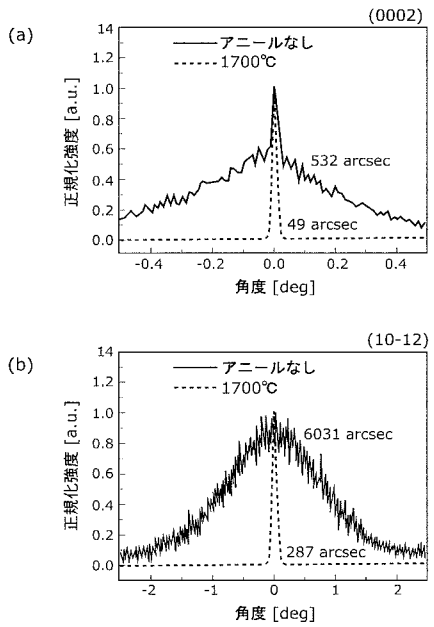
【図１６】



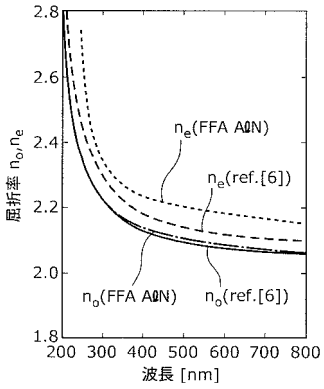
【図１７】



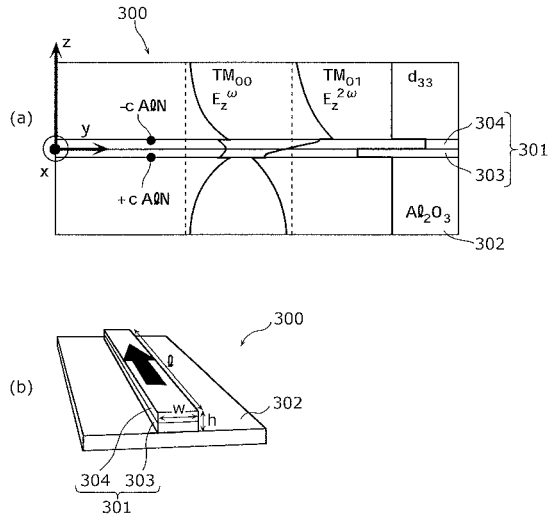
【図１８】



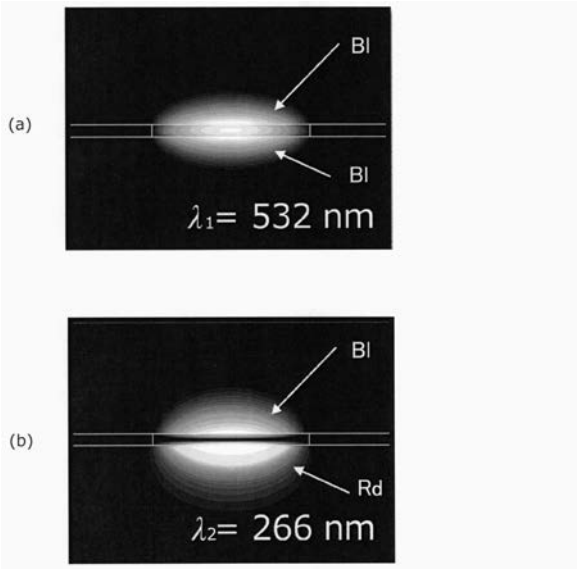
【図１９】



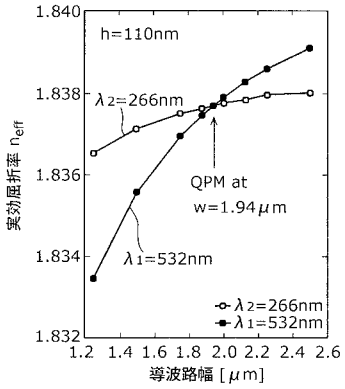
【図２０】



【図２１】



【図２２】


h=110nm
λ2=266nm
QPM at
w=1.94μm
λ1=532nm
λ2=266nm
λ1=532nm
実効屈折率 neff
導波路幅 [μm]
1.840
1.838
1.836
1.834
1.832
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
2.2
2.4
2.6

フロントページの続き

特許法第３０条第２項適用申請有り　平成２９年７月１３日に「第９回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会」にて発表　平成２９年７月１３日に「第９回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会」冊子にて公開　平成２９年８月２５日に「第７８回応用物理学会秋季学術講演会」の講演予稿集掲載ウェブサイト（ｈｔｔｐｓ：／／ｃｏｎｆｉｔ．ａｔｌａｓ．ｊｐ／ｇｕｉｄｅ／ｅｖｅｎｔ／ｊｓａｐ２０１７ａ／ｓｕｂｊｅｃｔ／７ｐ－Ａ３０１－５／ａｄｖａｎｃｅｄ）にて公開　平成２９年８月２５日に「２０１７年第７８回応用物理学会秋季学術講演会［講演予稿集］」（ＤＶＤ）にて公開　平成２９年８月２５日に「第７８回応用物理学会秋季学術講演会」スマートフォンアプリにて公開　平成２９年９月７日に「第７８回応用物理学会秋季学術講演会」にて発表　平成２９年９月２６日に「Ｔｈｅ　８ｔｈ　Ａｓｉａ－Ｐａｃｉｆｉｃ　Ｗｏｒｋｓｈｏｐ　ｏｎ　Ｗｉｄｅｇａｐ　Ｓｅｍｉｃｏｎｄｕｃｔｏｒｓ」にて発表

(72)発明者　片山　竜二
大阪府吹田市山田丘１番１号　国立大学法人大阪大学内

Ｆターム(参考) 2K102 AA08 BA18 BB02 BC01 CA28 DA04 DA20 DD03
4G077 AA02 AB02 BE13 BE15 DA11 DB01 ED05 ED06 FF07 HA02
SA04 SB01 TA04 TB03 TB05 TK01 TK06