

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5955226号
(P5955226)

(45) 発行日 平成28年7月20日(2016.7.20)

(24) 登録日 平成28年6月24日(2016.6.24)

(51) Int. Cl.		F I	
HO 1 L	33/22	(2010.01)	HO 1 L 33/22
HO 1 L	33/34	(2010.01)	HO 1 L 33/34
HO 1 L	33/52	(2010.01)	HO 1 L 33/52
HO 1 L	33/62	(2010.01)	HO 1 L 33/62
HO 1 L	21/338	(2006.01)	HO 1 L 29/80
			H
			請求項の数 46 (全 77 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2012-550884 (P2012-550884)	(73) 特許権者	000005049
(86) (22) 出願日	平成23年12月21日(2011.12.21)		シャープ株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2011/079635		大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号
(87) 国際公開番号	W02012/090818	(74) 代理人	110001195
(87) 国際公開日	平成24年7月5日(2012.7.5)		特許業務法人深見特許事務所
審査請求日	平成26年10月1日(2014.10.1)	(72) 発明者	荒木 正浩
(31) 優先権主張番号	特願2010-294413 (P2010-294413)		大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号
(32) 優先日	平成22年12月29日(2010.12.29)		シャープ株式会社内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(72) 発明者	吉田 慎也
(31) 優先権主張番号	特願2011-16496 (P2011-16496)		大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号
(32) 優先日	平成23年1月28日(2011.1.28)		シャープ株式会社内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(72) 発明者	瀧口 治久
(31) 優先権主張番号	特願2011-66010 (P2011-66010)		大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号
(32) 優先日	平成23年3月24日(2011.3.24)		シャープ株式会社内
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		
最終頁に続く			

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体構造、窒化物半導体発光素子、窒化物半導体トランジスタ素子、窒化物半導体構造の製造方法および窒化物半導体素子の製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

凹部(1b)と前記凹部(1b)の間に設けられた凸部(1a)とを表面に有する基板(1)と、

前記基板(1)上に設けられた窒化物半導体中間層(2)と、

前記窒化物半導体中間層(2)上に設けられた第1の窒化物半導体下地層(4)と、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)上に設けられた第2の窒化物半導体下地層(5)と、を備え、

前記基板(1)は、三方晶コランダムまたは六方晶の結晶からなり、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)は、前記凸部(1a)の外側において、前記凸部(1a)を取り囲む少なくとも6つの第1の斜めファセット面(4r)を有し、

前記第2の窒化物半導体下地層(5)の下面は、前記第1の窒化物半導体下地層(4)の前記第1の斜めファセット面(4r)に接し、

前記第2の窒化物半導体下地層(5)の上面(5a)は、平坦である、窒化物半導体構造。

【請求項2】

前記第1の斜めファセット面(4r)は、六方晶構造をとる窒化物半導体のm軸に対して傾斜している、請求項1に記載の窒化物半導体構造。

【請求項3】

前記凸部(1a)は、前記基板(1)の<11-20>方向に沿って配列されている、

請求項 1 に記載の窒化物半導体構造。

【請求項 4】

前記基板 (1) の前記表面の平面視における前記凸部 (1 a) の中心を通る断面視において、前記凸部 (1 a) は先端部 (1 c) を備える形状である、請求項 1 に記載の窒化物半導体構造。

【請求項 5】

前記窒化物半導体中間層 (2) は、 AlN または $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.5 < x < 1$) の式で表わされる窒化物半導体からなる、請求項 1 に記載の窒化物半導体構造。

【請求項 6】

前記基板 (1) は、サファイア基板である、請求項 1 に記載の窒化物半導体構造。

10

【請求項 7】

請求項 1 に記載の窒化物半導体構造と、
前記窒化物半導体構造上に設けられた第 1 導電型窒化物半導体層 (7) と、
前記第 1 導電型窒化物半導体層 (7) 上に設けられた窒化物半導体活性層 (1 1) と、
前記窒化物半導体活性層 (1 1) 上に設けられた第 2 導電型窒化物半導体層 (1 3) と、
前記第 1 導電型窒化物半導体層 (7) に接する第 1 電極 (2 0) と、
前記第 2 導電型窒化物半導体層 (1 3) に接する第 2 電極 (2 1) と、を備えた、窒化物半導体発光素子 (1 0 0) 。

【請求項 8】

20

請求項 1 に記載の窒化物半導体構造と、
前記窒化物半導体構造上に設けられた第 1 導電型窒化物半導体電子走行層 (7 1) と、
前記第 1 導電型窒化物半導体電子走行層 (7 1) 上に設けられた第 1 導電型窒化物半導体電子供給層 (7 3) と、
前記第 1 導電型窒化物半導体電子供給層 (7 3) 上に設けられた電極 (7 7) と、を備えた、窒化物半導体トランジスタ素子 (3 0 0) 。

【請求項 9】

凹部 (1 b) と前記凹部 (1 b) の間に設けられた凸部 (1 a) とを c 面または c 面に対して 5° 以内の範囲内で傾斜した表面に有するサファイア基板 (1) と、
前記サファイア基板 (1) 上に設けられた窒化物半導体中間層 (2) と、
前記窒化物半導体中間層 (2) を介して前記凹部 (1 b) 上に設けられた第 1 の窒化物半導体下地層 (4) と、
前記第 1 の窒化物半導体下地層 (4) 上に設けられた第 2 の窒化物半導体下地層 (5) と、を備え、
前記凸部 (1 a) は前記サファイア基板 (1) の $\langle 11-20 \rangle$ 方向に沿って配列され、

30

前記第 1 の窒化物半導体下地層 (4) は、前記凸部 (1 a) の外側において、前記凸部 (1 a) を取り囲む第 1 の斜めファセット面 (4 r) を有し、

前記第 2 の窒化物半導体下地層 (5) の下面 (5 b) は、前記第 1 の窒化物半導体下地層 (4) の前記第 1 の斜めファセット面 (4 r) に接し、

40

前記第 2 の窒化物半導体下地層 (5) の上面 (5 a) は、平坦である、窒化物半導体構造。

【請求項 10】

三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなり、c 面または c 面に対して 5° 以内の範囲内で傾斜した表面を有する基板 (1) を準備する工程と、

前記基板 (1) の前記表面に凹部 (1 b) と前記凹部 (1 b) の間に設けられた凸部 (1 a) とを形成する工程と、

前記凹部 (1 b) と前記凸部 (1 a) とが形成された前記基板 (1) の前記表面上に窒化物半導体中間層 (2) を形成する工程と、

前記窒化物半導体中間層 (2) 上に、前記凸部 (1 a) を中心として、前記凸部 (1 a

50

)の外側において前記凸部(1a)を取り囲む少なくとも6つの第1の斜めファセット面(4r)を有する第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程と、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)上に、上面(5a)が平坦となるように第2の窒化物半導体下地層(5)を形成する工程と、を含む、窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項11】

前記第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程および前記第2の窒化物半導体下地層(5)を形成する工程は、それぞれ、MOCVD法による成長工程であって、

(i-1)前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の成長温度を前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の成長温度よりも低くする、

(ii-1)前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の圧力を前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の圧力よりも高くする、および

(iii-1)前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時に供給されるガスのV/III比を前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時に供給されるガスのV/III比よりも高くする、の前記(i-1)、前記(ii-1)および前記(iii-1)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれる、請求項10に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

10

【請求項12】

前記窒化物半導体中間層(2)はスパッタ法により形成される、請求項10に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項13】

前記第1の斜めファセット面(4r)は、六方晶構造をとる窒化物半導体のm軸に対して傾斜している面である、請求項10に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

20

【請求項14】

前記凸部(1a)は、前記基板(1)の<11-20>方向に沿って配列されている、請求項10に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項15】

前記基板(1)の前記表面の平面視における前記凸部(1a)の中心を通る断面視において、前記凸部(1a)は先端部(1c)を備える形状である、請求項10に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項16】

三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなり、c面またはc面に対して5°以内の範囲内で傾斜した表面を有する基板(1)を準備する工程と、

前記基板(1)の前記表面に凹部(1b)と前記凹部(1b)の間に設けられた凸部(1a)とを形成する工程と、

前記凹部(1b)と前記凸部(1a)とが形成された前記基板(1)の前記表面上に窒化物半導体中間層(2)を形成する工程と、

前記窒化物半導体中間層(2)上に、前記凸部(1a)を中心として、前記凸部(1a)の外側において前記凸部(1a)を取り囲む少なくとも6つの第1の斜めファセット面(4r)を有する第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程と、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)上に、上面(5a)が平坦となるように第2の窒化物半導体下地層(5)を形成する工程と、

前記第2の窒化物半導体下地層(5)上に少なくとも1層の窒化物半導体層を形成する工程と、を含む、窒化物半導体素子(100, 300)の製造方法。

30

40

【請求項17】

凹部(1b)と前記凹部(1b)の間に設けられた凸部(1a)とを表面に有する基板(1)と、

前記基板(1)上に設けられた窒化物半導体中間層(2)と、

少なくとも前記凹部(1b)における前記窒化物半導体中間層(2)上に設けられた第3の窒化物半導体下地層(3)と、

少なくとも前記第3の窒化物半導体下地層(3)上に設けられた第1の窒化物半導体下

50

地層(4)と、

少なくとも前記第1の窒化物半導体下地層(4)上に設けられた第2の窒化物半導体下地層(5)と、を備え、

前記基板(1)は、三方晶コランダムまたは六方晶の結晶からなり、

前記第3の窒化物半導体下地層(3)の表面は、第3の斜めファセット面(3f)と、第3の平坦領域(3c)とを有しており、

前記第3の窒化物半導体下地層(3)の前記表面における前記第3の斜めファセット面(3f)の面積割合が、前記第3の平坦領域(3c)の面積割合よりも小さく、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)は、前記凸部(1a)を取り囲む第1の斜めファセット面(4r)を有し、

前記第2の窒化物半導体下地層(5)の下面(5L)は、前記第1の斜めファセット面(4r)に接し、

前記第2の窒化物半導体下地層(5)の上面(5U)は、平坦である、窒化物半導体構造。

【請求項18】

前記第1の斜めファセット面(4r)は、六方晶構造をとる窒化物半導体のm軸に対して傾斜している面を含む、請求項17に記載の窒化物半導体構造。

【請求項19】

前記凸部(1a)は、前記基板(1)の<11-20>方向に沿って配列されている、請求項17に記載の窒化物半導体構造。

【請求項20】

前記基板(1)の前記表面の平面視における前記凸部(1a)の中心を通る断面視において、前記凸部(1a)は先端部(1c)を備える形状である、請求項17に記載の窒化物半導体構造。

【請求項21】

前記窒化物半導体中間層(2)は、 AlN または $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.5 < x < 1$)の式で表わされる窒化物半導体からなる、請求項17に記載の窒化物半導体構造。

【請求項22】

前記基板(1)は、サファイア基板である、請求項17に記載の窒化物半導体構造。

【請求項23】

請求項17に記載の窒化物半導体構造と、

前記窒化物半導体構造上に設けられた第1導電型窒化物半導体層(7)と、

前記第1導電型窒化物半導体層(7)上に設けられた窒化物半導体発光層(11)と、

前記窒化物半導体発光層(11)上に設けられた第2導電型窒化物半導体層(13)と

、前記第1導電型窒化物半導体層(7)に接する第1電極(20)と、

前記第2導電型窒化物半導体層(13)に接する第2電極(21)と、を備えた、窒化物半導体発光素子(200)。

【請求項24】

請求項17に記載の窒化物半導体構造と、

前記窒化物半導体構造上に設けられた第1導電型窒化物半導体電子走行層(71)と、

前記第1導電型窒化物半導体電子走行層(71)上に設けられた第1導電型窒化物半導体電子供給層(73)と、

前記第1導電型窒化物半導体電子供給層(73)上に設けられた電極と、を備えた、窒化物半導体トランジスタ素子(400)。

【請求項25】

凹部(1b)と前記凹部(1b)の間に設けられた凸部(1a)とをc面またはc面に対して 5° 以内の範囲内で傾斜した表面に有するサファイア基板(1)と、

前記サファイア基板(1)上に設けられた窒化物半導体中間層(2)と、

少なくとも前記凹部(1b)における前記窒化物半導体中間層(2)上に設けられた第

10

20

30

40

50

3の窒化物半導体下地層(3)と、

少なくとも前記第3の窒化物半導体下地層(3)上に設けられた第1の窒化物半導体下地層(4)と、

少なくとも前記第1の窒化物半導体下地層(4)上に設けられた第2の窒化物半導体下地層(5)と、を備え、

前記凸部(1a)は前記サファイア基板(1)の<11-20>方向に沿って配列され、

前記第3の窒化物半導体下地層(3)の表面は、第3の斜めファセット面(3f)と、第3の平坦領域(3c)とを有しており、

前記第3の窒化物半導体下地層(3)の前記表面における前記第3の斜めファセット面(3f)の面積割合が、前記第3の平坦領域(3c)の面積割合よりも小さく、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)は、前記凸部(1a)を取り囲む第1の斜めファセット面(4r)と、第1の平坦領域(4c)とを有し、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)の平面視における前記第1の斜めファセット面(4r)の面積割合が、前記第1の平坦領域(4c)の面積割合よりも大きく、

前記第2の窒化物半導体下地層(5)の下面(5L)は、前記第1の斜めファセット面(4r)に接し、

前記第2の窒化物半導体下地層(5)の上面(5U)は、平坦である、窒化物半導体構造。

【請求項26】

請求項25に記載の窒化物半導体構造と、

前記窒化物半導体構造上に設けられた第1導電型窒化物半導体層(7)と、

前記第1導電型窒化物半導体層(7)上に設けられた窒化物半導体発光層(11)と、

前記窒化物半導体発光層(11)上に設けられた第2導電型窒化物半導体層(13)と

、前記第1導電型窒化物半導体層(7)に接する第1電極(20)と、

前記第2導電型窒化物半導体層(13)に接する第2電極(21)と、を備えた、窒化物半導体発光素子(200)。

【請求項27】

請求項25に記載の窒化物半導体構造と、

前記窒化物半導体構造上に設けられた第1導電型窒化物半導体電子走行層(71)と、

前記第1導電型窒化物半導体電子走行層(71)上に設けられた第1導電型窒化物半導体電子供給層(73)と、

前記第1導電型窒化物半導体電子供給層(73)上に設けられた電極(77)と、を備えた、窒化物半導体トランジスタ素子(400)。

【請求項28】

三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなり、c面またはc面に対して5°以内の範囲内で傾斜した表面を有する基板(1)を準備する工程と、

前記基板(1)の前記表面に凹部(1b)と前記凹部(1b)の間に設けられた凸部(1a)とを形成する工程と、

前記凹部(1b)と前記凸部(1a)とが形成された前記基板(1)の前記表面上に窒化物半導体中間層(2)を形成する工程と、

少なくとも前記凹部(1b)における前記窒化物半導体中間層(2)上に第3の窒化物半導体下地層(3)を形成する工程と、

少なくとも前記第3の窒化物半導体下地層(3)上に第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程と、

少なくとも前記第1の窒化物半導体下地層(4)上に第2の窒化物半導体下地層(5)を形成する工程と、を含み、

前記第3の窒化物半導体下地層(3)を形成する工程は、前記第3の窒化物半導体下地層(3)の表面が第3の斜めファセット面(3r)と第3の平坦領域(3c)とを有する

10

20

30

40

50

とともに、前記第3の窒化物半導体下地層(3)の前記表面における前記第3の斜めファセット面(3r)の面積割合が前記第3の平坦領域(3c)の面積割合よりも小さくなる条件で行なわれ、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程は、前記凸部(1a)を取り囲む第1の斜めファセット面(4r)が形成される条件で行なわれ、

前記第2の窒化物半導体下地層(5)を形成する工程は、前記第2の窒化物半導体下地層(5)の下面(5L)が前記第1の斜めファセット面(4r)に接するとともに、前記第2の窒化物半導体下地層(5)の上面(5U)が平坦となる条件で行なわれる、窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項29】

前記第3の窒化物半導体下地層(3)を形成する工程は、前記第3の窒化物半導体下地層(3)の前記表面における粗面領域(3d)の面積割合が5%以下となる条件で行なわれる、請求項28に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項30】

前記第3の窒化物半導体下地層(3)および前記第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程は、

(i-2)前記第3の窒化物半導体下地層(3)の成長時の成長温度を前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の成長温度よりも高くする、

(ii-2)前記第3の窒化物半導体下地層(3)の成長時の圧力を前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の圧力よりも低くする、および

(iii-2)前記第3の窒化物半導体下地層(3)の成長時に供給されるガスのV/III比を前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時に供給されるガスのV/III比よりも低くする、の前記(i-2)、前記(ii-2)および前記(iii-2)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれる、請求項28に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項31】

前記第3の窒化物半導体下地層(3)、前記第1の窒化物半導体下地層(4)および前記第2の窒化物半導体下地層(5)を形成する工程は、

(I-2)前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の成長温度を前記第3の窒化物半導体下地層(3)の成長時の成長温度よりも高くする、

(II-2)前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の圧力を前記第3の窒化物半導体下地層(3)の成長時の圧力よりも低くする、および

(III-2)前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時に供給されるガスのV/III比を前記第3の窒化物半導体下地層(3)の成長時に供給されるガスのV/III比よりも低くする、の前記(I-2)、前記(II-2)および前記(III-2)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれるとともに、

(a-2)前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の成長温度を前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の成長温度よりも高くする、

(b-2)前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の圧力を前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の圧力よりも低くする、および

(c-2)前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時に供給されるガスのV/III比を前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時に供給されるガスのV/III比よりも低くする、

の前記(a-2)、前記(b-2)および前記(c-2)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれる、請求項28に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項32】

前記窒化物半導体中間層(2)はスパッタ法により形成される、請求項28に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項33】

10

20

30

40

50

前記第1の斜めファセット面(4r)は、六方晶構造をとる窒化物半導体のm軸に対して傾斜している面を含む、請求項28に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項34】

前記凸部(1a)は、前記基板の<11-20>方向に沿って配列されている、請求項28に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項35】

前記基板(1)の前記表面の平面視における前記凸部(1a)の中心を通る断面視において、前記凸部(1a)は先端部(1c)を備える形状である、請求項28に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項36】

請求項17に記載の窒化物半導体構造を形成する工程と、
前記窒化物半導体構造上に少なくとも1層の窒化物半導体層を形成する工程と、を含む、窒化物半導体素子(200, 400)の製造方法。

【請求項37】

請求項25に記載の窒化物半導体構造を形成する工程と、
前記窒化物半導体構造上に少なくとも1層の窒化物半導体層を形成する工程と、を含む、窒化物半導体素子(200, 400)の製造方法。

【請求項38】

凹部(1b)と前記凹部(1b)の間に設けられた凸部(1a)とを表面に有する基板(1)を準備する工程と、

前記基板(1)上に窒化物半導体中間層(2)を形成する工程と、
前記窒化物半導体中間層(2)上に、前記凸部(1a)を中心として、前記凸部(1a)の外側において前記凸部(1a)を取り囲む少なくとも6つの第1の斜めファセット面(4r)を有する第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程と、を含み、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程は、前記基板(1)を回転させながら、水素ガスを含むキャリアガスを用いた縦型MOCVD装置によるMOCVD法によって前記第1の窒化物半導体下地層(4)を成長させる工程を含み、

前記基板(1)の単位時間当たりの回転数は400RPM以上1000RPM以下であって、

前記キャリアガスの全体積に対する前記水素ガスの体積比が0.7以上1以下である、窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項39】

前記第1の窒化物半導体下地層(4)上に第2の窒化物半導体下地層(5)を形成する工程をさらに含み、

前記第1の窒化物半導体下地層(4)を形成する工程および前記第2の窒化物半導体下地層(5)を形成する工程は、それぞれ、前記基板(1)を回転させながら、水素ガスを含むキャリアガスを用いたMOCVD法によって前記第1の窒化物半導体下地層(4)および前記第2の窒化物半導体下地層(5)を成長させる工程であって、

(i-3)前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の成長温度を前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の成長温度よりも低くする、

(ii-3)前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の圧力を前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の圧力よりも高くする、

(iii-3)前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時に供給される原料ガスのV/III比を前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時に供給される原料ガスのV/III比よりも高くする、

(iv-3)前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の前記基板(1)の単位時間当たりの回転数を、前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の前記基板(1)の単位時間当たりの回転数よりも小さくする、および

(v-3)前記第1の窒化物半導体下地層(4)の成長時の前記キャリアガスの全体積に対する前記水素ガスの体積比を、前記第2の窒化物半導体下地層(5)の成長時の前記キ

10

20

30

40

50

キャリアガスの全体積に対する前記水素ガスの体積比以上とする、
 の前記 (i - 3)、前記 (i i - 3)、前記 (i i i - 3)、前記 (i v - 3) および前
 記 (v - 3) からなる群から選択された少なくとも 1 つの条件を満たすように行なわれる
 、請求項 3 8 に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項 4 0】

前記基板 (1) を準備する工程は、前記基板 (1) の c 面または c 面に対して 5 ° 以内
 の範囲内で傾斜した表面に前記凸部および前記凹部を形成する工程を含む、請求項 3 8 に
 記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項 4 1】

前記基板 (1) は、三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなる、請求項 3 8 に記
 載の窒化物半導体構造の製造方法。

10

【請求項 4 2】

前記凸部 (1 a) は、前記基板 (1) の < 1 1 - 2 0 > 方向に沿って配列されている、
 請求項 3 8 に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

【請求項 4 3】

前記基板 (1) の前記表面の平面視における前記凸部 (1 a) の中心を通る断面視にお
 いて、前記凸部 (1 a) は先端部 (1 c) を備える形状である、請求項 3 8 に記載の窒化
 物半導体構造の製造方法。

【請求項 4 4】

前記窒化物半導体中間層 (2) を形成する工程は、前記窒化物半導体中間層 (2) をス
 パッタ法により形成する工程を含む、請求項 3 8 に記載の窒化物半導体構造の製造方法。

20

【請求項 4 5】

前記窒化物半導体中間層 (2) は、 AlN または $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.5 < x < 1$) の
 式で表わされる窒化物半導体からなる、請求項 3 8 に記載の窒化物半導体構造の製造方法
 。

【請求項 4 6】

請求項 3 9 に記載の窒化物半導体構造の製造方法により製造された前記第 2 の窒化物半
 導体下地層 (5) の表面上に窒化物半導体層を形成する工程を含む、窒化物半導体素子 (
 5 0 0 , 6 0 0) の製造方法。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

本発明は、窒化物半導体構造、窒化物半導体発光素子、窒化物半導体トランジスタ素子
 、窒化物半導体構造の製造方法および窒化物半導体素子の製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

窒素を含む III - V 族化合物半導体 (III 族窒化物半導体) は、赤外から紫外領域
 の波長を有する光のエネルギーに相当するバンドギャップを有しているため、赤外から紫外
 領域の波長を有する光を発光する発光素子やその領域の波長を有する光を受光する受光素
 子の材料として有用である。

40

【0003】

また、III 族窒化物半導体は、III 族窒化物半導体を構成する原子間の結合が強く
 、絶縁破壊電圧が高く、飽和電子速度が大きいことから、耐高温・高出力・高周波ラン
 ジスタなどの電子デバイスの材料としても有用である。

【0004】

さらに、III 族窒化物半導体は、環境を害することがほとんどなく、取り扱いやすい
 材料としても注目されている。

【0005】

上述したような優れた材料である III 族窒化物半導体を用いて実用的な窒化物半導体
 素子を作製するためには、所定の基板上に III 族窒化物半導体の薄膜からなる III 族

50

窒化物半導体層を積層して、所定の素子構造を形成する必要がある。

【0006】

ここで、基板としては、基板上にⅢ族窒化物半導体を直接成長させることが可能な格子定数や熱膨張係数を有するⅢ族窒化物半導体からなる基板を用いることが最も好適であり、Ⅲ族窒化物半導体からなる基板としては、たとえば窒化ガリウム(GaN)基板などを用いることが好ましい。

【0007】

しかしながら、GaN基板は、現状ではその寸法が直径2インチ以下と小さく、また非常に高価であるため、実用的ではない。

【0008】

そのため、現状では、窒化物半導体素子の作製用の基板としては、Ⅲ族窒化物半導体とは格子定数差および熱膨張係数差が大きいサファイア基板や炭化珪素(SiC)基板などが用いられている。

【0009】

サファイア基板と代表的なⅢ族窒化物半導体であるGaNとの間には約16%程度の格子定数差が存在する。また、SiC基板とGaNとの間には約6%程度の格子定数差が存在する。このような大きな格子定数差が基板とその上に成長するⅢ族窒化物半導体との間に存在する場合には、基板上にⅢ族窒化物半導体からなる結晶をエピタキシャル成長させることは一般的に困難である。たとえば、サファイア基板上に直接GaN結晶をエピタキシャル成長させた場合には、GaN結晶の3次元的な成長が避けられず、平坦な表面を有するGaN結晶が得られないという問題がある。

【0010】

そこで、基板とⅢ族窒化物半導体との間に、基板とⅢ族窒化物半導体との間の格子定数差を解消させるための所謂バッファ層と呼ばれる層を形成することが一般的に行なわれている。

【0011】

たとえば、特許文献1(特許第3026087号公報)には、サファイア基板上にAlNのバッファ層をMOVPE法によって形成した後に、 $Al_xGa_{1-x}N$ からなるⅢ族窒化物半導体を成長させる方法が記載されている。

【0012】

しかしながら、特許文献1に記載の方法においても、平坦な表面を有するAlNのバッファ層を再現性良く得ることは困難であった。これは、MOVPE法によってAlNのバッファ層を形成する場合には、原料ガスとして用いられるトリメチルアルミニウム(TMA)ガスとアンモニア(NH₃)ガスとが気相中で反応しやすいためと考えられる。

【0013】

したがって、特許文献1に記載の方法においては、表面が平坦であって、かつ欠陥密度が小さい高品質の $Al_xGa_{1-x}N$ からなるⅢ族窒化物半導体をAlNのバッファ層上に再現性良く成長させることは困難であった。

【0014】

また、たとえば特許文献2(特公平5-86646号公報)には、サファイア基板上に直流バイアスを印加した高周波スパッタ法で $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$)バッファ層を形成する方法が開示されている。

【0015】

しかしながら、特許文献2に記載されている方法によって $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$)バッファ層上に形成されたⅢ族窒化物半導体は、特許文献3の段落[0004]および特許文献4の段落[0004]に記載されているように、優れた結晶性を有するものではなかった。

【0016】

そこで、特許文献3(特許第3440873号公報)には、DCマグネトロンスパッタ法で形成したⅢ族窒化物半導体からなるバッファ層を水素ガスとアンモニアガスとの

10

20

30

40

50

混合ガスの雰囲気下で熱処理する方法が提案されており、また、特許文献4（特許第3700492号公報）には、400以上に昇温されたサファイア基板上にDCマグネトロンスパッタ法によって500Å以上3000Å以下の膜厚のIII族窒化物半導体からなるバッファ層を形成する方法が提案されている。

【0017】

また、特許文献5（特開2008-34444号公報）には、750に加熱されたサファイア基板上に高周波スパッタ法によってAlNの柱状結晶からなるバッファ層を形成する方法が提案されている。

【0018】

また、特許文献6（特許第3950471号公報）には、結晶欠陥の少ないIII族窒化物半導体を成長するため、基板表面に凹凸構造を設け、その上にIII族窒化物半導体をラテラル成長させることが記載されている。

10

【0019】

さらに、特許文献7（特開2006-352084号公報）の段落[0043]および[0044]には、凹凸構造を設けた基板上に、GaN層を「サファイア基板11の主面に対して傾斜したファセットを斜面に有する二等辺三角形の断面形状となるようにGaN層12を成長させる」ステップと、「次に、成長条件を横方向成長が支配的となる条件に設定して成長を続け・・・GaN層12をその表面がサファイア基板11の主面と平行な平坦面となるまで横方向成長させる。」というステップからなる2段階の成長が記載されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0020】

【特許文献1】特許第3026087号公報

【特許文献2】特公平5-86646号公報

【特許文献3】特許第3440873号公報

【特許文献4】特許第3700492号公報

【特許文献5】特開2008-34444号公報

【特許文献6】特許第3950471号公報

【特許文献7】特開2006-352084号公報

30

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0021】

しかしながら、上記の特許文献3～5に記載の方法によりIII族窒化物半導体からなるバッファ層を形成し、そのバッファ層上にIII族窒化物半導体層を形成した場合にも優れた結晶性を有するIII族窒化物半導体層を再現性良く形成することはできず、その結果、良好な特性を有する窒化物半導体素子を再現性良く作製することができなかった。

【0022】

また、上記の特許文献6に記載の方法により凹凸基板上に、上記の特許文献5に記載の方法によりIII族窒化物半導体からなるバッファ層を形成し、そのバッファ層上にさらに上記の特許文献7に記載の横方向成長を用いてIII族窒化物半導体層を形成した場合にも、目標とする優れた結晶性を有するIII族窒化物半導体層を再現性良く形成することはできなかった。

40

【0023】

さらに、基板サイズが2インチから、3インチ、4インチ、6インチおよび8インチと大きくなるほど、基板面内に均一に優れた結晶性を有するIII族窒化物半導体層を形成することが難しかった。

【0024】

上記の事情に鑑みて、本発明の目的は、優れた結晶性を有する窒化物層をその上方に再現性良く形成することができる窒化物半導体構造、窒化物半導体発光素子、窒化物半導体

50

トランジスタ素子、窒化物半導体構造の製造方法および窒化物半導体素子の製造方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0025】

本発明の第1の態様によれば、凹部と凹部の間に設けられた凸部とを表面に有する基板と、基板上に設けられた窒化物半導体中間層と、窒化物半導体中間層上に設けられた第1の窒化物半導体下地層と、第1の窒化物半導体下地層上に設けられた第2の窒化物半導体下地層と、を備え、基板は、三方晶コランダムまたは六方晶の結晶からなり、第1の窒化物半導体下地層は、凸部の外側において、凸部を取り囲む少なくとも6つの第1の斜めファセット面を有し、第2の窒化物半導体下地層の下面は第1の窒化物半導体下地層の第1の斜めファセット面に接し、第2の窒化物半導体下地層の上面は平坦である窒化物半導体構造を提供することができる。

10

【0026】

ここで、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造において、第1の斜めファセット面は、六方晶構造をとる窒化物半導体のm軸に対して傾斜していることが好ましい。

【0027】

また、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造において、凸部は、基板の $\langle 11-20 \rangle$ 方向に沿って配列されていることが好ましい。

【0028】

また、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造において、基板の表面の平面視における凸部の中心を通る断面視において、凸部は先端部を備える形状であることが好ましい。

20

【0029】

また、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造において、窒化物半導体中間層は、 AlN または $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.5 < x < 1$) の式で表わされる窒化物半導体からなることが好ましい。

【0030】

また、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造において、基板は、サファイア基板であることが好ましい。

【0031】

また、本発明の第1の態様によれば、上記のいずれかの窒化物半導体構造と、窒化物半導体構造上に設けられた第1導電型窒化物半導体層と、第1導電型窒化物半導体層上に設けられた窒化物半導体活性層と、窒化物半導体活性層上に設けられた第2導電型窒化物半導体層と、第1導電型窒化物半導体層に接する第1電極と、第2導電型窒化物半導体層に接する第2電極と、を備えた、窒化物半導体発光素子を提供することができる。

30

【0032】

また、本発明の第1の態様によれば、上記のいずれかの窒化物半導体構造と、窒化物半導体構造上に設けられた第1導電型窒化物半導体電子走行層と、第1導電型窒化物半導体電子走行層上に設けられた第1導電型窒化物半導体電子供給層と、第1導電型窒化物半導体電子供給層上に設けられた電極と、を備えた、窒化物半導体トランジスタ素子を提供することができる。

40

【0033】

また、本発明の第1の態様によれば、凹部と凹部の間に設けられた凸部とをc面またはc面に対して 5° 以内の範囲内で傾斜した表面に有するサファイア基板と、サファイア基板上に設けられた窒化物半導体中間層と、窒化物半導体中間層を介して凹部上に設けられた第1の窒化物半導体下地層と、第1の窒化物半導体下地層上に設けられた第2の窒化物半導体下地層と、を備え、凸部はサファイア基板の $\langle 11-20 \rangle$ 方向に沿って配列され、第1の窒化物半導体下地層は、凸部の外側において、凸部を取り囲む第1の斜めファセット面を有し、第2の窒化物半導体下地層の下面は第1の窒化物半導体下地層の第1の斜めファセット面に接し、第2の窒化物半導体下地層の上面は平坦である窒化物半導体構造を提供することができる。

50

【0034】

また、本発明の第1の態様によれば、三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなり、c面またはc面に対して5°以内の範囲内で傾斜した表面を有する基板を準備する工程と、基板の表面に凹部と凹部の間に設けられた凸部とを形成する工程と、凹部と凸部とが形成された基板の表面上に窒化物半導体中間層を形成する工程と、窒化物半導体中間層上に、凸部を中心として、凸部の外側において凸部を取り囲む少なくとも6つの第1の斜めファセット面を有する第1の窒化物半導体下地層を形成する工程と、第1の窒化物半導体下地層上に上面が平坦となるように第2の窒化物半導体下地層を形成する工程と、を含む、窒化物半導体構造の製造方法を提供することができる。

【0035】

ここで、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、第1の窒化物半導体下地層を形成する工程および第2の窒化物半導体下地層を形成する工程は、それぞれ、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法による成長工程であって、

(i-1) 第1の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度を第2の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度よりも低くする、

(ii-1) 第1の窒化物半導体下地層の成長時の圧力を第2の窒化物半導体下地層の成長時の圧力よりも高くする、および

(iii-1) 第1の窒化物半導体下地層の成長時に供給されるガスのV/III比を第2の窒化物半導体下地層の成長時に供給されるガスのV/III比よりも高くする、の(i-1)、(ii-1)および(iii-1)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれることが好ましい。

【0036】

また、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、窒化物半導体中間層はスパッタ法により形成されることが好ましい。

【0037】

また、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、第1の斜めファセット面は、六方晶構造をとる窒化物半導体のm軸に対して傾斜している面であることが好ましい。

【0038】

また、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、凸部は、基板の<11-20>方向に沿って配列されていることが好ましい。

【0039】

また、本発明の第1の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、基板の表面の平面視における凸部の中心を通る断面視において、凸部は先端部を備える形状であることが好ましい。

【0040】

さらに、本発明の第1の態様によれば、三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなりc面またはc面に対して5°以内の範囲内で傾斜した表面を有する基板を準備する工程と、基板の表面に凹部と凹部の間に設けられた凸部とを形成する工程と、凹部と凸部とが形成された基板の表面上に窒化物半導体中間層を形成する工程と、窒化物半導体中間層上に凸部を中心として凸部の外側において凸部を取り囲む少なくとも6つの第1の斜めファセット面を有する第1の窒化物半導体下地層を形成する工程と、第1の窒化物半導体下地層上に上面が平坦となるように第2の窒化物半導体下地層を形成する工程と、第2の窒化物半導体下地層上に少なくとも1層の窒化物半導体層を形成する工程と、を含む、窒化物半導体素子の製造方法を提供することができる。

【0041】

本発明の第2の態様によれば、凹部と凹部の間に設けられた凸部とを表面に有する基板と、基板上に設けられた窒化物半導体中間層と、少なくとも凹部における窒化物半導体中間層上に設けられた第3の窒化物半導体下地層と、少なくとも第3の窒化物半導体下地層

10

20

30

40

50

上に設けられた第1の窒化物半導体下地層と、少なくとも第1の窒化物半導体下地層上に設けられた第2の窒化物半導体下地層と、を備え、基板は、三方晶コランダムまたは六方晶の結晶からなり、第3の窒化物半導体下地層の表面は、第3の斜めファセット面と、第3の平坦領域とを有しており、第3の窒化物半導体下地層の表面における第3の斜めファセット面の面積割合が第3の平坦領域の面積割合よりも小さく、第1の窒化物半導体下地層は凸部を取り囲む第1の斜めファセット面を有し、第2の窒化物半導体下地層の下面は第1の斜めファセット面に接し、第2の窒化物半導体下地層の上面は平坦である窒化物半導体構造を提供することができる。

【0042】

ここで、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造において、第1の斜めファセット面は、六方晶構造をとる窒化物半導体のm軸に対して傾斜している面を含むことが好ましい。

10

【0043】

また、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造において、凸部は、基板の $\langle 11-20 \rangle$ 方向に沿って配列されていることが好ましい。

【0044】

また、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造において、基板の表面の平面視における凸部の中心を通る断面視において凸部は先端部を備える形状であることが好ましい。

【0045】

また、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造において、窒化物半導体中間層は、 AlN または $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.5 < x < 1$)の式で表わされる窒化物半導体からなることが好ましい。

20

【0046】

また、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造において、基板は、サファイア基板であることが好ましい。

【0047】

また、本発明の第2の態様によれば、凹部と凹部の間に設けられた凸部とをc面またはc面に対して 5° 以内の範囲内で傾斜した表面に有するサファイア基板と、サファイア基板上に設けられた窒化物半導体中間層と、少なくとも凹部における窒化物半導体中間層上に設けられた第3の窒化物半導体下地層と、少なくとも第3の窒化物半導体下地層上に設けられた第1の窒化物半導体下地層と、少なくとも第1の窒化物半導体下地層上に設けられた第2の窒化物半導体下地層と、を備え、凸部はサファイア基板の $\langle 11-20 \rangle$ 方向に沿って配列され、第3の窒化物半導体下地層の表面は第3の斜めファセット面と、第3の平坦領域とを有しており、第3の窒化物半導体下地層の表面における第3の斜めファセット面の面積割合が第3の平坦領域の面積割合よりも小さく、第1の窒化物半導体下地層は凸部を取り囲む第1の斜めファセット面と、第1の平坦領域とを有し、第1の窒化物半導体下地層の平面視における第1の斜めファセット面の面積割合が第1の平坦領域の面積割合よりも大きく、第2の窒化物半導体下地層の下面は第1の斜めファセット面に接し、第2の窒化物半導体下地層の上面は平坦である窒化物半導体構造を提供することができる。

30

【0048】

また、本発明の第2の態様によれば、上記のいずれかに記載の窒化物半導体構造と、窒化物半導体構造上に設けられた第1導電型窒化物半導体層と、第1導電型窒化物半導体層上に設けられた窒化物半導体発光層と、窒化物半導体発光層上に設けられた第2導電型窒化物半導体層と、第1導電型窒化物半導体層に接する第1電極と、第2導電型窒化物半導体層に接する第2電極と、を備えた窒化物半導体発光素子を提供することができる。

40

【0049】

また、本発明の第2の態様によれば、上記のいずれかに記載の窒化物半導体構造と、窒化物半導体構造上に設けられた第1導電型窒化物半導体電子走行層と、第1導電型窒化物半導体電子走行層上に設けられた第1導電型窒化物半導体電子供給層と、第1導電型窒化物半導体電子供給層上に設けられた電極と、を備えた、窒化物半導体トランジスタ素子を

50

提供することができる。

【0050】

また、本発明の第2の態様によれば、三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなり、c面またはc面に対して5°以内の範囲内で傾斜した表面を有する基板を準備する工程と、基板の表面に凹部と凹部の間に設けられた凸部とを形成する工程と、凹部と凸部とが形成された基板の表面上に窒化物半導体中間層を形成する工程と、少なくとも凹部における窒化物半導体中間層上に第3の窒化物半導体下地層を形成する工程と、少なくとも第3の窒化物半導体下地層上に第1の窒化物半導体下地層を形成する工程と、少なくとも第1の窒化物半導体下地層上に第2の窒化物半導体下地層を形成する工程と、を含み、第3の窒化物半導体下地層を形成する工程は、第3の窒化物半導体下地層の表面が第3の斜めファセット面と第3の平坦領域とを有するとともに、第3の窒化物半導体下地層の表面における第3の斜めファセット面の面積割合が第3の平坦領域の面積割合よりも小さくなる条件で行なわれ、第1の窒化物半導体下地層を形成する工程は、凸部を取り囲む第1の斜めファセット面が形成される条件で行なわれ、第2の窒化物半導体下地層を形成する工程は、第2の窒化物半導体下地層の下面が第1の斜めファセット面に接するとともに、第2の窒化物半導体下地層の上面が平坦となる条件で行なわれる窒化物半導体構造の製造方法を提供することができる。

10

【0051】

ここで、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、第3の窒化物半導体下地層を形成する工程は、第3の窒化物半導体下地層の表面における粗面領域の面積割合が5%以下となる条件で行なわれることが好ましい。

20

【0052】

また、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、第3の窒化物半導体下地層および第1の窒化物半導体下地層を形成する工程は、(i-2)第3の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度を第1の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度よりも高くする、(ii-2)第3の窒化物半導体下地層の成長時の圧力を第1の窒化物半導体下地層の成長時の圧力よりも低くする、および(iii-2)第3の窒化物半導体下地層の成長時に供給されるガスのV/III比を第1の窒化物半導体下地層の成長時に供給されるガスのV/III比よりも低くする、の(i-2)、(ii-2)および(iii-2)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれることが好ましい。

30

【0053】

また、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、第3の窒化物半導体下地層、第1の窒化物半導体下地層および第2の窒化物半導体下地層を形成する工程は、(I-3)第2の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度を第3の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度よりも高くする、(II-3)第2の窒化物半導体下地層の成長時の圧力を第3の窒化物半導体下地層の成長時の圧力よりも低くする、および(III-3)第2の窒化物半導体下地層の成長時に供給されるガスのV/III比を第3の窒化物半導体下地層の成長時に供給されるガスのV/III比よりも低くする、の(I-3)、(II-3)および(III-3)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれるとともに、(a-3)第2の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度を第1の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度よりも高くする、(b-3)第2の窒化物半導体下地層の成長時の圧力を第1の窒化物半導体下地層の成長時の圧力よりも低くする、および(c-3)第2の窒化物半導体下地層の成長時に供給されるガスのV/III比を第1の窒化物半導体下地層の成長時に供給されるガスのV/III比よりも低くする、の(a-3)、(b-3)および(c-3)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれることが好ましい。

40

【0054】

また、本発明の第2の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、窒化物半導体中間層はスパッタ法により形成されることが好ましい。

50

【 0 0 5 5 】

また、本発明の第 2 の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、第 1 の斜めファセット面は、六方晶構造をとる窒化物半導体の m 軸に対して傾斜している面を含むことが好ましい。

【 0 0 5 6 】

また、本発明の第 2 の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、凸部は基板の < 1 1 - 2 0 > 方向に沿って配列されていることが好ましい。

【 0 0 5 7 】

また、本発明の第 2 の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、基板の表面の平面視における凸部の中心を通る断面視において、凸部は先端部を備える形状であることが好ましい。

10

【 0 0 5 8 】

さらに、本発明の第 2 の態様によれば、上記のいずれかに記載の窒化物半導体構造を形成する工程と、窒化物半導体構造上に少なくとも 1 層の窒化物半導体層を形成する工程と、を含む、窒化物半導体素子の製造方法を提供することができる。

【 0 0 5 9 】

また、本発明の第 3 の態様によれば、凹部と凹部の間に設けられた凸部とを表面に有する基板を準備する工程と、基板上に窒化物半導体中間層を形成する工程と、窒化物半導体中間層上に、凸部を中心として、凸部の外側において凸部を取り囲む少なくとも 6 つの第 1 の斜めファセット面を有する第 1 の窒化物半導体下地層を形成する工程と、を含み、第 1 の窒化物半導体下地層を形成する工程は、基板を回転させながら、水素ガスを含むキャリアガスを用いた縦型 MOCVD 装置による MOCVD 法によって第 1 の窒化物半導体下地層を成長させる工程を含み、基板の単位時間当たりの回転数は 400 RPM 以上 1000 RPM 以下であって、キャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比が 0.7 以上 1 以下である窒化物半導体構造の製造方法を提供することができる。

20

【 0 0 6 0 】

ここで、本発明の第 3 の態様の窒化物半導体構造の製造方法は、第 1 の窒化物半導体下地層上に第 2 の窒化物半導体下地層を形成する工程をさらに含み、第 1 の窒化物半導体下地層を形成する工程および第 2 の窒化物半導体下地層を形成する工程は、それぞれ、基板を回転させながら、水素ガスを含むキャリアガスを用いた MOCVD 法によって第 1 の窒化物半導体下地層および第 2 の窒化物半導体下地層を成長させる工程であって、

30

(i - 3) 第 1 の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度を第 2 の窒化物半導体下地層の成長時の成長温度よりも低くする、

(i i - 3) 第 1 の窒化物半導体下地層の成長時の圧力を第 2 の窒化物半導体下地層の成長時の圧力よりも高くする、

(i i i - 3) 第 1 の窒化物半導体下地層の成長時に供給される原料ガスの V / I I I 比を第 2 の窒化物半導体下地層の成長時に供給される原料ガスの V / I I I 比よりも高くする、

(i v - 3) 第 1 の窒化物半導体下地層の成長時の基板の単位時間当たりの回転数を、第 2 の窒化物半導体下地層の成長時の基板の単位時間当たりの回転数よりも小さくする、

および (v - 3) 第 1 の窒化物半導体下地層の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比を、第 2 の窒化物半導体下地層の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比以上とする、

40

の (i - 3)、(i i - 3)、(i i i - 3)、(i v - 3) および (v - 3) からなる群から選択された少なくとも 1 つの条件を満たすように行なわれることが好ましい。

【 0 0 6 1 】

また、本発明の第 3 の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、基板を準備する工程は、基板の c 面または c 面に対して 5 ° 以内の範囲内で傾斜した表面に凸部および凹部を形成する工程を含むことが好ましい。

【 0 0 6 2 】

また、本発明の第 3 の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、基板は、三方晶コ

50

ランダムあるいは六方晶の結晶からなることが好ましい。

【0063】

また、本発明の第3の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、凸部は、基板の $\langle 11-20 \rangle$ 方向に沿って配列されていることが好ましい。

【0064】

また、本発明の第3の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、基板の表面の平面視における凸部の中心を通る断面視において、凸部は先端部を備える形状であることが好ましい。

【0065】

また、本発明の第3の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、窒化物半導体中間層を形成する工程は、窒化物半導体中間層をスパッタ法により形成する工程を含むことが好ましい。

10

【0066】

また、本発明の第3の態様の窒化物半導体構造の製造方法において、窒化物半導体中間層は、 AlN または $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.5 < x < 1$) の式で表わされる窒化物半導体からなることが好ましい。

【0067】

さらに、本発明の第3の態様によれば、上記の窒化物半導体構造の製造方法により製造された第2の窒化物半導体下地層の表面上に窒化物半導体層を形成する工程を含む窒化物半導体素子の製造方法を提供することができる。

20

【発明の効果】

【0068】

本発明によれば、優れた結晶性を有する窒化物層をその上方に再現性良く形成することができる窒化物半導体構造、窒化物半導体発光素子、窒化物半導体トランジスタ素子、窒化物半導体構造の製造方法および窒化物半導体素子の製造方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0069】

【図1】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の模式的な断面図である。

【図2】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の一部について図解する模式的な断面図である。

30

【図3】図2に示す基板の表面の一例の模式的な拡大平面図である。

【図4】図3に示す凸部の中心を通るB-B線に沿った模式的な拡大断面図である。

【図5】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図6】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図7】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図8】図6に示す第1の窒化物半導体下地層の表面の一例の模式的な拡大平面図である。

40

【図9】図6に示す第1の窒化物半導体下地層の表面の他の一例の模式的な拡大平面図である。

【図10】図6に示す第1の窒化物半導体下地層の表面の他の一例の模式的な拡大平面図である。

【図11】図6に示す第1の窒化物半導体下地層の表面の他の一例の模式的な拡大平面図である。

【図12】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図13】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

50

【図 1 4】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図 1 5】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図 1 6】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図 1 7】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図 1 8】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

10

【図 1 9】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図 2 0】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子を用いた発光装置の一例の模式的な断面図である。

【図 2 1】実施の形態の窒化物半導体トランジスタ素子の模式的な断面図である。

【図 2 2】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の模式的な断面図である。

【図 2 3】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の製造工程の他の一部を図解する模式的な断面図である。

【図 2 4】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の製造工程の他の一部を図解する模式的な断面図である。

20

【図 2 5】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の製造工程の他の一部を図解する模式的な断面図である。

【図 2 6】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の製造方法の一例の製造工程の他の一部を図解する模式的な断面図である。

【図 2 7】実施の形態の窒化物半導体下地層の各層の形成後のウエハの一例の模式的な断面図である。

【図 2 8】実施の形態の窒化物半導体下地層の各層の形成後のウエハの一例の模式的な断面図である。

【図 2 9】第 3 の窒化物半導体下地層の表面の一例の模式的な拡大平面図である。

【図 3 0】第 3 の窒化物半導体下地層の表面の他の一例の模式的な拡大平面図である。

30

【図 3 1】図 3 0 の B - B に沿った模式的な断面図である。

【図 3 2】第 3 の窒化物半導体下地層の表面の他の一例の模式的な拡大平面図である。

【図 3 3】第 3 の窒化物半導体下地層の形成後に成長させた第 1 の窒化物半導体下地層の表面の一例の模式的な拡大平面図である。

【図 3 4】図 3 3 の B - B に沿った模式的な断面図である。

【図 3 5】第 3 の窒化物半導体下地層の形成後に成長させた第 1 の窒化物半導体下地層の表面の他の一例の模式的な拡大平面図である。

【図 3 6】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子を用いた発光装置の一例の模式的な断面図である。

【図 3 7】実施の形態の窒化物半導体トランジスタ素子の模式的な断面図である。

40

【図 3 8】実施の形態の窒化物半導体構造の製造方法の製造工程の一部について図解する模式的な断面図である。

【図 3 9】実施の形態の窒化物半導体構造の製造方法の製造工程の他の一部について図解する模式的な断面図である。

【図 4 0】実施の形態の窒化物半導体発光ダイオード素子の模式的な断面図である。

【図 4 1】実施の形態の発光装置の模式的な断面図である。

【図 4 2】実施の形態の窒化物半導体トランジスタ素子の模式的な断面図である。

【図 4 3】サンプル 1 のウエハの表面上に成長させた第 3 の窒化物半導体下地層の表面の SEM 像である。

【図 4 4】サンプル 2 のウエハの表面上に成長させた第 3 の窒化物半導体下地層の表面の

50

S E M像である。

【図45】サンプル3のウエハの表面上に成長させた第3の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【図46】サンプル4のウエハの表面上に成長させた第3の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【図47】サンプル5のウエハの表面上に成長させた第3の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【図48】サンプル6のウエハの表面上に成長させた第3の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【図49】第3の窒化物半導体下地層の成長温度 T_1 と第2の窒化物半導体下地層の上面のG a N (0 0 4) 面におけるX R Cの半値幅(a r c s e c)との関係を示す図である。

10

【図50】第3の窒化物半導体下地層の成長温度 T_1 ()と、第2の窒化物半導体下地層の成長時のウエハの反り(μm)との関係を示す図である。

【図51】実施例1の成長初期の第1の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【図52】実施例1の成長後の第1の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【図53】比較例1の成長初期の第1の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【図54】比較例1の成長後の第1の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【図55】比較例2の成長後の第1の窒化物半導体下地層の表面のS E M像である。

【発明を実施するための形態】

20

【0070】

以下、本発明の実施の形態について説明する。なお、本発明の図面において、同一の参照符号は、同一部分または相当部分を表わすものとする。

【0071】

< サファイア基板および窒化物半導体結晶の結晶方位 >

(A l G a I n) N 系の窒化物半導体結晶の結晶系は通常六方晶であり、またサファイアの結晶系は三方晶コランダムであるが六方晶の表記法で表わすことができる。そこで、サファイア基板および窒化物半導体結晶のいずれにおいても、c軸方向を[0 0 0 1]とし、a1軸方向を[- 2 1 1 0]とし、a2軸方向を[1 - 2 1 0]とし、a3軸方向を[1 1 - 2 0]とし、a1軸方向、a2軸方向およびa3軸方向の3方向を合わせてa軸方向あるいは< 1 1 - 2 0 >方向と表記する。また、c軸方向および< 1 1 - 2 0 >方向に垂直で等価な3方向をm軸方向(最も代表的には< 1 - 1 0 0 >方向)と表記する。

30

【0072】

なお、結晶面および方向を表わす場合に、本来であれば所要の数字の上にバーを付した表現をするべきであるが、表現手段に制約があるため、本明細書においては、所要の数字の上にバーを付す表現の代わりに、所要の数字の前に「 - 」を付して表現している。たとえば、結晶学の記法によれば1の逆方向は1の上にバーを記載するところを、便宜上「 - 1」と表記する。

【0073】

基板の結晶方向と、基板上の窒化物半導体層の結晶方向とが異なる場合があるため、基板の結晶軸と窒化物半導体層の結晶軸との関係に注意する必要がある。本明細書においては、基板の結晶方向に「 s u b 」を付記し、窒化物半導体層の結晶方向に「 l a y e r 」を付記するものとする。たとえば、基板がサファイア単結晶である場合には、基板のa (s u b) 軸方向は窒化物半導体層のm (l a y e r) 軸方向と一致し、基板のm (s u b) 軸方向は窒化物半導体層のa (l a y e r) 軸方向と一致する。一方、基板がA l N 単結晶またはG a N 単結晶である場合には、基板のa (s u b) 軸方向は窒化物半導体層のa (l a y e r) 軸方向と一致し、基板のm (s u b) 軸方向は窒化物半導体層のm (l a y e r) 軸方向と一致する。

40

【0074】

< ウエハ >

50

本明細書において、「ウエ八」とは、分割前の基板あるいは分割前の基板に窒化物半導体各層、電極、あるいはその他窒化物半導体素子に必要な要素を形成したものを指すこととする。

【0075】

<反り>

次に、本明細書におけるウエ八の「反り」について定義する。ウエ八の「反り」は、基板と窒化物半導体各層との熱膨張率差による応力に主に起因して生じる。ここで、窒化物半導体層が形成されている側の面をウエ八の上面とし、窒化物半導体層が形成されていない側の面をウエ八の下面とし、ウエ八が上面側に凸に反っている場合と、ウエ八が下面側に凸に反っている場合とを考える。

10

【0076】

ウエ八が上面側に凸に反っている場合、ウエ八の反り量は、ウエ八の上面を上にしてウエ八の下面を平坦面に設置したときの平坦面に垂直な方向におけるウエ八の下面と設置面との間隔（高低差）の最大値で表わされ、その符号は正とされる。

【0077】

一方、ウエ八が下面側に凸に反っている場合、ウエ八の反り量は、ウエ八の上面を上にしてウエ八の下面を平坦面に設置したときの平坦面に垂直な方向におけるウエ八の上面の周縁に接する仮想平面とウエ八上面との間隔（高低差）の最大値で表わされ、その符号は負とされる。

【0078】

なお、ウエ八の反りの大きさはウエ八径にも依存し、ウエ八径が大きくなるほどウエ八反りは大きくなる。特にウエ八径が約4インチ以上の大口径ウエ八では、ウエ八の反りに起因するウエ八の割れが生じ易いため、ウエ八に割れないことも重要である。また、基板上に窒化物半導体各層を成長した後のウエ八の表面にクラックが入らないことが好ましい。

20

【0079】

さらに、ウエ八の反りの大きさは基板の厚みにも依存する。たとえば、4インチ径のサファイア基板の厚みは0.9mmであり、6インチ径のサファイア基板の厚みは1.3mmである。

【0080】

窒化物半導体層が形成されたウエ八の反り量は、フォトリソグラフィ工程あるいは研削・研磨工程などが問題なく行なえる程度に小さいことが好ましい。

30

【0081】

<評価方法>

窒化物半導体層の結晶性は、X線ロックアップカーブの半値幅、例えばGaN(004)面(六方晶表記の(0004)面と等しい)におけるX線ロックアップカーブの半値幅等で評価することができる。X線ロックアップカーブの半値幅が小さい方が単結晶に近くなるため好ましい。本明細書においては、特に断りのない限り、X線ロックアップカーブの半値幅は、ウエ八中心部で測定した値を示すものとする。

【0082】

また、窒化物半導体層の結晶の欠陥は、カソードルミネッセンス(Cathode Luminescence: CL)法またはエッチピット密度(Etch Pit Density: EPD)等で評価することができる。結晶欠陥密度が低い方が結晶性が良好となるため好ましい。

40

【0083】

<実施の形態1-1>

図1に、本発明の窒化物半導体素子の一例である実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子の模式的な断面図を示す。

【0084】

実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子100は、基板1と、基板1の表面に接するようにして設けられた窒化物半導体中間層2と、窒化物半導体中間層2の表面

50

に接するようにして設けられた第1の窒化物半導体下地層4と、窒化物半導体中間層2および第1の窒化物半導体下地層4のそれぞれの表面に接するようにして設けられた第2の窒化物半導体下地層5と、第2の窒化物半導体下地層5の表面に接するようにして設けられたn型窒化物半導体コンタクト層7と、n型窒化物半導体コンタクト層7の表面に接するようにして設けられたn型窒化物半導体クラッド層9と、n型窒化物半導体クラッド層9の表面に接するようにして設けられた窒化物半導体活性層11と、窒化物半導体活性層11の表面に接するようにして設けられたp型窒化物半導体クラッド層13と、p型窒化物半導体クラッド層13の表面に接するようにして設けられたp型窒化物半導体コンタクト層15と、p型窒化物半導体コンタクト層15の表面に接するようにして設けられた透光性電極層19と、を備えている。

10

【0085】

窒化物半導体発光ダイオード素子100は、n型窒化物半導体コンタクト層7の露出表面に接するようにして設けられたn側電極20と、透光性電極層19の表面に接するようにして設けられたp側電極21と、を備えている。

【0086】

透光性電極層19の表面、ならびにp型窒化物半導体コンタクト層15、p型窒化物半導体クラッド層13、窒化物半導体活性層11、n型窒化物半導体クラッド層9およびn型窒化物半導体コンタクト層7のそれぞれの露出端面がSiO₂などの絶縁保護膜23で覆われている。

【0087】

基板1は、三方晶コランダムまたは六方晶の結晶からなり、凹部1bと、凹部1bの間に設けられた凸部1aと、を表面に有している。

20

【0088】

第1の窒化物半導体下地層4は、基板1の凸部1aの外側において、凸部1aを取り囲む第1の斜めファセット面4rを少なくとも6つ有するとともに、上面4cを有している。

【0089】

第2の窒化物半導体下地層5の下面5bは、第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4rに接しており、第2の窒化物半導体下地層5の上面5aは、平坦となっている。本明細書において、「平坦」の概念には、第2の窒化物半導体下地層5の上面5aが完全に平坦となっている場合だけでなく、第2の窒化物半導体下地層5の上面5aが実質的に平坦となっている場合も含まれる。たとえば、平坦である第2の窒化物半導体下地層5の上面5aの表面粗さRa(JIS B 0601:2001)は0.1μm以下となっている。

30

【0090】

以下、実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子100の製造方法の一例について説明する。

【0091】

まず、三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなる基板1を準備する。三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなる基板1としては、たとえば、サファイア(Al₂O₃)単結晶、AlN単結晶またはGaN単結晶などからなる基板を用いることができる。

40

【0092】

また、基板1の主面(凸部1aおよび凹部1bの形成前の表面)は、c面またはc面に対して5°以内の傾斜を有する表面であってもよく、傾斜の方向は、たとえば、m(sub)軸(<1-100>)方向のみであってもよく、a(sub)軸(<11-20>)方向のみであってもよく、あるいは両方向を合成した方向であってもよい。より具体的には、基板1としては、基板1の主面(凸部1aおよび凹部1bの形成前の表面)がc面(法線がc軸の面)から基板のm(sub)軸<1-100>方向に0.15°~0.35°傾斜したものを準備することができる。

【0093】

50

また、基板 1 の口径は特には限定されないが、たとえば 150 mm (約 6 インチ) とすることができる。基板 1 としては、従来は 50 . 8 mm (2 インチ) 程度の口径の基板を用いることが一般的であったが、生産性を高めるためには大口径の基板を用いることが好ましい。しかしながら、大口径の基板 1 を用いた場合には、基板 1 上に窒化物半導体層を形成した後に歪が蓄積するため、基板 1 のワレや窒化物半導体層の表面にクラックが生じやすくなる。本発明は、後述するように、100 mm (約 4 インチ) 以上の大口径の基板 1 を用いた場合にも、基板 1 のワレや窒化物半導体層の表面に発生するクラックを抑制することができる。

【0094】

次に、図 2 の模式的断面図に示すように、基板 1 の表面に、凹部 1 b と、凹部 1 b の間に設けられた凸部 1 a と、を形成する。このような基板 1 の表面の凸部 1 a および凹部 1 b は、たとえば、基板 1 上における凸部 1 a の平面配置を規定するマスクを形成するパターンニング工程と、当該パターンニング工程によって形成したマスクを用いて基板 1 の表面をエッチングして凹部 1 b を形成する工程と、により形成することができる。ここで、パターンニング工程は、一般的なフォトリソグラフィ工程で行なうことができる。エッチング工程は、たとえば、ドライエッチング法やウエットエッチング法で行なうことができる。しかしながら、凸部 1 a の形状が後述する先端部を備える形状とするためには、凸部 1 a の形状を制御しやすいドライエッチング法で行なうことが好ましい。

【0095】

図 3 に、図 2 に示す基板 1 の表面の一例の模式的な拡大平面図を示す。図 3 に示す基板 1 の表面の平面視において、平面形状が円形である凸部 1 a は、たとえば仮想の三角形 1 t の頂点にそれぞれ位置しており、仮想の三角形 1 t の 3 辺のそれぞれの辺の方向に配列されている。本例において、凸部 1 a は、基板 1 の表面の a (s u b) 軸方向 (< 11 - 20 > 方向) に配列されるとともに、基板 1 の表面の a (s u b) 軸方向に対して + 60 ° の傾きを為す方向および基板 1 の表面の a (s u b) 軸方向に対して - 60 ° の傾きを為す方向にそれぞれ配列されている。なお、本明細書において、基板 1 の表面の平面視において、a (s u b) 軸方向に対して + 60 ° の傾きを為す方向および a (s u b) 軸方向に対して - 60 ° の傾きを為す方向をそれぞれ u 方向という。

【0096】

なお、凸部 1 a の平面形状である円形の円の中心は、三角形 1 t の頂点と必ずしも完全に一致している必要はなく、実質的に一致していればよい。具体的には、円の中心がその円の半径以下のズレである場合には、第 1 の窒化物半導体下地層 4 が凸部 1 a の領域上よりも安定して凹部 1 b の領域上に成長を開始する傾向にある。そして、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長がさらに進むと、第 1 の窒化物半導体下地層 4 は、凸部 1 a を中心として凸部 1 a の外側において凸部 1 a を取り囲むように少なくとも 6 つの第 1 の斜めファセット面 4 r を形成できる傾向にある。

【0097】

凸部 1 a の底面における平面形状は、円形に限られるものではなく、たとえば、六角形および/または三角形などの多角形であってもよい。

【0098】

また、基板 1 の表面の平面視において、頂点に凸部 1 a が配置される仮想の三角形 1 t の各内角の角度は 50 ° 以上 70 ° 以下であることが好ましい。この場合には、第 1 の窒化物半導体下地層 4 が凸部 1 a の領域上よりも安定して凹部 1 b の領域上に成長を開始する傾向にある。そして、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長がさらに進むと、第 1 の窒化物半導体下地層 4 は、凸部 1 a を中心として凸部 1 a の外側において凸部 1 a を取り囲むように少なくとも 6 つの第 1 の斜めファセット面 4 r を形成できる傾向にある。

【0099】

また、基板 1 の表面の平面視において、隣り合う凸部 1 a の間隔は 0 . 2 μ m 以上 7 μ m 以下とすることが好ましく、1 μ m 以上 3 μ m 以下とすることがより好ましい。隣り合う凸部 1 a の間隔が 0 . 2 μ m 以上 7 μ m 以下である場合には、プロセス上の問題が少な

10

20

30

40

50

くなる傾向にある。プロセス上の問題としては、たとえば、凸部 1 a の高さを高くするためのドライエッチング時間が長くなることや、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5 a を完全に平坦とするまでに要する成長時間が長くなり過ぎることなどの問題が挙げられる。なお、本明細書において、隣り合う凸部 1 a の間隔は、隣り合う凸部 1 a の間の最短距離を意味する。

【 0 1 0 0 】

また、基板 1 の表面の平面視において、凸部 1 a の円形の円の直径は、隣り合う凸部 1 a の間隔の $1/2$ 以上 $3/4$ 以下とすることが好ましい。たとえば、隣り合う凸部 1 a の間隔が $2\ \mu\text{m}$ である場合には、凸部 1 a の円形の円の直径は $1.2\ \mu\text{m}$ 程度とすることがより好ましい。凸部 1 a の円形の円の直径が隣り合う凸部 1 a の間隔の $1/2$ 以上 $3/4$ 以下である場合、特に $1.2\ \mu\text{m}$ 程度である場合には、第 1 の窒化物半導体下地層 4 が凸部 1 a の領域上よりも安定して凹部 1 b の領域上に成長を開始する傾向にある。そして、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長がさらに進むと、第 1 の窒化物半導体下地層 4 は、凸部 1 a を中心として凸部 1 a の外側において凸部 1 a を取り囲むように少なくとも 6 つの第 1 の斜めファセット面 4 r を形成できる傾向にある。

10

【 0 1 0 1 】

また、凸部 1 a の高さは、凸部 1 a の円形の円の直径の $1/4$ 以上 1 以下とすることが好ましい。たとえば、凸部 1 a の円形の円の直径は $1.2\ \mu\text{m}$ である場合には、凸部 1 a の高さは $0.6\ \mu\text{m}$ 程度とすることがより好ましい。この場合には、第 1 の窒化物半導体下地層 4 が凸部 1 a の領域上よりも安定して凹部 1 b の領域上に成長を開始する傾向にある。そして、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長がさらに進むと、第 1 の窒化物半導体下地層 4 は、凸部 1 a を中心として凸部 1 a の外側において凸部 1 a を取り囲むように少なくとも 6 つの第 1 の斜めファセット面 4 r を形成できる傾向にある。

20

【 0 1 0 2 】

図 4 に、図 3 に示す凸部の中心を通る B - B 線に沿った模式的な拡大断面図を示す。図 4 に示すように、基板 1 の表面の平面視における凸部 1 a の中心を通る断面視において凸部 1 a は先端部 1 c を備える形状であることが好ましい。なお、本明細書において、凸部 1 a が先端部 1 c を備える形状とは、基板 1 の表面の平面視における凸部 1 a の中心を通る断面視において、凸部 1 a の上面が平坦となっていない形状となっていることを意味する。凸部 1 a の上面が平坦である場合には、凹部 1 b だけでなく凸部 1 a の平坦な上面にも後述する第 1 の窒化物半導体下地層 4 が成長することがある。一方、凸部 1 a が先端部 1 c を備える形状である場合には、第 1 の窒化物半導体下地層 4 は凹部 1 b から成長し、引き続き成長する第 2 の窒化物半導体下地層 5 が凸部 1 a の先端部 1 c の上方で会合するため、結晶欠陥が生じる領域が限定され、全体としての欠陥の数を減らせると考えられる。

30

【 0 1 0 3 】

窒化物半導体中間層 2 の形成前に基板 1 の表面の前処理を行なうこともできる。基板 1 の表面の前処理の一例としては、たとえば、RCA 洗浄（希フッ酸水溶液（HF）処理、アンモニア（ NH_4OH ）+過酸化水素（ H_2O_2 ）処理、塩酸（HCl）+過酸化水素（ H_2O_2 ）処理、超純水洗浄を順次行なう洗浄）を行なうことによって、基板 1 の表面を水素終端化する処理が挙げられる。これにより、基板 1 の表面上に良好な結晶性の窒化物半導体中間層 2 を再現性良く積層することができる傾向にある。

40

【 0 1 0 4 】

また、基板 1 の表面の前処理の他の一例としては、基板 1 の表面を窒素ガスのプラズマに曝す処理が挙げられる。これにより、基板 1 の表面に付着した有機物や酸化物などの異物を除去し、基板 1 の表面の状態を整えることができる傾向にある。特に、基板 1 がサファイア基板である場合には、基板 1 の表面を窒素ガスのプラズマに曝すことによって、基板 1 の表面が窒化されて、基板 1 の表面上に積層される窒化物半導体中間層 2 が面内で均一に形成されやすくなる傾向にある。

【 0 1 0 5 】

50

次に、図5の模式的断面図に示すように、基板1の表面上に窒化物半導体中間層2を形成する。ここで、窒化物半導体中間層2は、たとえば、 N_2 とArとの混合雰囲気においてAlターゲットをスパッタする反応性スパッタ法によって形成することができる。

【0106】

窒化物半導体中間層2としては、たとえば $Al_{x_0}Ga_{y_0}N$ ($0 < x_0 < 1$ 、 $0 < y_0 < 1$ 、 $x_0 + y_0 = 1$)の式で表わされる窒化物半導体からなる層を積層することができる。なかでも、窒化物半導体中間層2としては、 AlN (窒化アルミニウム) または $Al_{x_1}Ga_{1-x_1}N$ ($0.5 < x_1 < 1$)の式で表わされる窒化物半導体 (窒化ガリウムアルミニウム) からなる層を積層することが好ましい。この場合には、基板1の表面の法線方向に伸長する結晶粒の揃った柱状結晶の集合体からなる良好な結晶性の窒化物半導体中間層2を得ることができる傾向にある。窒化物半導体中間層2は微量の酸素を含んでいてもよい。

10

【0107】

窒化物半導体中間層2の厚さは5nm以上100nm以下であることが好ましい。窒化物半導体中間層2の厚さが5nm以上である場合には、窒化物半導体中間層2がバッファ層としての機能を十分に発揮する傾向にある。窒化物半導体中間層2の厚さが100nm以下である場合にはバッファ層としての機能が向上するとともに、窒化物半導体中間層2の形成時間を短くすることができる傾向にある。また、窒化物半導体中間層2の厚さを10nm以上50nm以下とすることがより好ましい。この場合には、窒化物半導体中間層2のバッファ層としての機能を面内において均一に発揮させることができる傾向にある。窒化物半導体中間層2の一例として、わずかに酸素を含むAlN膜を約25nmの厚さで形成することができる。

20

【0108】

窒化物半導体中間層2の形成時における基板1の温度は、300℃以上1000℃以下であることが好ましい。窒化物半導体中間層2の形成時における基板1の温度が300℃以上である場合には、窒化物半導体中間層2が基板1の表面の全面を覆う傾向にある。また、窒化物半導体中間層2の積層時における基板1の温度が1000℃以下である場合には、基板1の表面での原料のマイグレーションが活発になりすぎず、柱状結晶の集合体からなる窒化物半導体中間層2が形成されて、窒化物半導体中間層2のバッファ層としての機能が向上する傾向にある。

30

【0109】

次に、図6の模式的断面図に示すように、窒化物半導体中間層2の表面上に第1の窒化物半導体下地層4を形成し、図7の模式的断面図に示すように、第1の窒化物半導体下地層4の表面上に第2の窒化物半導体下地層5を形成する。

【0110】

ここで、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5は、それぞれ、たとえばMOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法によって、窒化物半導体中間層2の表面上に順次形成することができる。第1の窒化物半導体下地層4は第1の斜めファセット面4rが形成されるファセット成長モードで成長され、第2の窒化物半導体下地層5は第1の斜めファセット面4rを埋め込んで平坦な上面5aを形成する埋込成長モードで成長される。これにより、結晶欠陥が少なく結晶性の高い平坦な上面5aを有する第2の窒化物半導体下地層5を形成することができる。なお、図6に示す参照符号4cは、第1の窒化物半導体下地層4の上面を指している。

40

【0111】

図8に、図6に示す第1の窒化物半導体下地層4の表面の一例の模式的な拡大平面図を示す。図8に示すように、第1の窒化物半導体下地層4は、凸部1aの外側において、凸部1aを取り囲む6つの第1の斜めファセット面4rを有している。第1の斜めファセット面4rは、図8に示す平面視において、a(sub)軸方向に2つ現れ、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向(いずれもu方向)にそれぞれ2つずつ現れている(この場合をケー

50

ス1-1とする。)。また、図8のB-Bに沿った線の断面に現れる第1の斜めファセット面4rは、第1の斜めファセット面4rの存在する範囲内では、その断面の奥行き方向においても同様に現れる面である。

【0112】

また、1つの凸部1aを取り囲む第1の斜めファセット面4rと、他の1つの凸部1aを取り囲む第1の斜めファセット面4rと、は、第1の窒化物半導体下地層4の上面4cで連結されている。

【0113】

第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4rは、第1の窒化物半導体下地層4の上面4cから基板1の凸1aに向かって下りながら傾斜している。ここで、6つの第1の斜めファセット面4rのうち、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(sub)軸方向に現れる2つの第1の斜めファセット面4rは、a(sub)軸方向(<11-20>方向)に対して斜め上方に傾斜しており、その傾斜した方向にファセット面が伸長している。また、同様に、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向にそれぞれ2つずつ現れる第1の斜めファセット面4rも、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向に対してそれぞれ斜め上方に傾斜しており、その傾斜した方向にファセット面が伸長している。

【0114】

また、第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4rは、窒化物半導体中間層2上において、凸部1aを中心として、凸部1aの外側において凸部1aを取り囲む6つのファセット面となっている。

【0115】

また、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(sub)軸方向およびu方向に現れる第1の斜めファセット面4r以外のファセット面がほとんど現れないことが好ましい。より具体的には、以下の式(I)で表わされる第1の斜めファセット面4rの面積比率が80%以上であることが好ましく、90%以上であることがより好ましい。第1の斜めファセット面4rの面積比率が80%以上である場合、特に90%以上である場合には、第2の窒化物半導体下地層5の上面5a上に積層される窒化物半導体層の成長中およびそれ以降のプロセス中においてウエハの割れおよびクラックの発生を抑制することができる傾向にある。また、X線ロッキングカーブの半値幅等で表わされる窒化物半導体層の結晶性も向上することができる傾向にある。さらには、カソードルミネッセンス(Cathode Luminescence: CL)法またはエッチピット密度(Etch Pit Density: EPD)等で評価できる欠陥密度も低減する傾向にある。具体的には、GaN下地層の(004)面におけるX線ロッキングカーブの半値幅(arc sec)は、30~40 arc secであった。さらに、CL法により得られた暗点密度(Dark Spot Density)は $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 以下であった。

【0116】

$100 \times (\text{第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において第1の窒化物半導体下地層4の表面を占める第1の斜めファセット面4rの面積}) / (\text{第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において第1の窒化物半導体下地層4の表面を占める第1の斜めファセット面4rおよび上面4c以外の領域の面積}) \dots (I)$

また、第1の窒化物半導体下地層4が成長して厚くなるにつれて第1の斜めファセット面4rが増大するため、第1の窒化物半導体下地層4の表面の全面積に占める上面4cの面積の割合が減少する。第1の窒化物半導体下地層4の表面の全面積に占める上面4cの面積の割合は20%以下であることが好ましく、10%以下であることがさらに好ましい。上記の上面4cの面積の割合が20%以下である場合、特に10%以下である場合には、第2の窒化物半導体下地層5の上面5a上に積層される窒化物半導体層の成長中およびそれ以降のプロセス中においてウエハの割れおよびクラックの発生を抑制することができ

10

20

30

40

50

る傾向にある。また、X線ロックアップカーブの半値幅等で表わされる窒化物半導体層の結晶性も向上することができる。さらには、CL法またはEPD等で評価できる欠陥密度も低減する傾向にある。ただし、第1の窒化物半導体下地層4の上面4cが完全になくなるまでファセット成長モードを続ける必要はない。

【0117】

上記のような第1の斜めファセット面4rが現れる第1の窒化物半導体下地層4のファセット成長モードは、以下の(i-1)、(ii-1)および(iii-1)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすことにより実現することができる。

(i-1) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時の成長温度を第2の窒化物半導体下地層5の成長時の成長温度よりも低くする。

(ii-1) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時の圧力を第2の窒化物半導体下地層5の成長時の圧力よりも高くする。

(iii-1) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時に供給されるガスのV/III比(供給ガス中におけるIII族元素に対するV族元素のモル比)を第2の窒化物半導体下地層5の成長時に供給されるガスのV/III比よりも高くする。

【0118】

上記の(i-1)、(ii-1)および(iii-1)のそれぞれの具体的な条件は、たとえば、以下のように示される。

(i-1) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時における基板1の温度1000に対して、第2の窒化物半導体下地層5の成長時における基板1の温度が1080である。

(ii-1) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時における雰囲気圧力66.6kPaに対して、第2の窒化物半導体下地層5の成長時における雰囲気圧力が17.3kPaである。

(iii-1) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時に供給されるガスのV/III比1165に対して、第2の窒化物半導体下地層5の成長時に供給されるガスのV/III比が676である。

【0119】

上記の(i-1)、(ii-1)および(iii-1)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすことにより、ウエハ内において多数形成される半導体発光素子の静電耐圧テスト(ESD(Electrostatic Discharge)テスト)の歩留りを80%以上とすることができる。なお、ESDテストは逆電圧1kVのHBM(ヒューマンボディーモデル)条件にて行なっている。

【0120】

なお、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5の厚さは、それぞれ、上記の基板1の表面の平面視において、隣り合う凸部1aの間隔の0.7倍以上4倍以下であることが好ましい。第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5のそれぞれの厚さが、隣り合う凸部1aの間隔の0.7倍以上である場合には、凸部1aを埋め込むことができる傾向にあり、4倍以下である場合には、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5がそれぞれ結晶欠陥の少ない良好な結晶性を有する膜となる傾向にある。

【0121】

また、第1の窒化物半導体下地層4の厚さは、上記の基板1の表面の平面視において、隣り合う凸部1aの間隔の0.5倍以上2倍以下であることが好ましい。第1の窒化物半導体下地層4の厚さが、隣り合う凸部1aの間隔の0.5倍以上2倍以下である場合には、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5がそれぞれ結晶欠陥の少ない良好な結晶性を有する膜となる傾向にある。

【0122】

一方、第2の窒化物半導体下地層5の厚さは、上記の基板1の表面の平面視において、隣り合う凸部1aの間隔の1倍以上4倍以下であることが好ましい。第2の窒化物半導体下地層5の厚さが、隣り合う凸部1aの間隔の1倍以上である場合には、第2の窒化物半

10

20

30

40

50

導体下地層 5 が凸部 1 a を埋め込んで、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5 a が平坦となる傾向にある。第 2 の窒化物半導体下地層 5 の厚さが、隣り合う凸部 1 a の間隔の 4 倍よりも厚い場合には、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5 a はすでに平坦となっているため、単に第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長時間だけが長くなる傾向にある。

【 0 1 2 3 】

図 9 に、図 6 に示す第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面の他の一例の模式的な拡大平面図を示す。図 9 においては、基板 1 の表面の凸部 1 a が、a (s u b) 軸方向に対して + 3 0 ° 傾斜した方向および a (s u b) 軸方向に対して - 3 0 ° 傾斜した方向にそれぞれに配列している場合 (ケース 1 - 2) の、窒化物半導体下地層 4 の第 1 の斜めファセット面 4 r と上面 4 c との位置関係が示されている。

10

【 0 1 2 4 】

6 つの第 1 の斜めファセット面 4 r が形成されるファセットモードで第 1 の窒化物半導体下地層 4 を成長させる場合には、窒化物半導体下地層 4 の第 1 の斜めファセット面 4 r および上面 4 c は、それぞれ、凸部 1 a の配列の影響を受けやすくなる。

【 0 1 2 5 】

ケース 1 - 2 においては、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面の平面視において、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の上面 4 c の形状が三角形が連なったような形状になり、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長モードである埋込成長モードに切り替えた後に上面 4 c 上に第 2 の窒化物半導体下地層 5 が形成される。上面 4 c はその下地の結晶欠陥を引き継いでいる場合があるため、ケース 1 - 2 の場合の凸部 1 a の配置上の成長の方がその上に形成される窒化物半導体膜において若干結晶欠陥が多くなる傾向にある。

20

【 0 1 2 6 】

ケース 1 - 2 では、ウエハ内において多数形成される半導体発光素子の E S D テストの歩留りは約 2 0 % であった。ただし、E S D テストは逆電圧 1 k V の H B M 条件にて行っている。

【 0 1 2 7 】

図 1 0 に、図 6 に示す第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面の他の一例の模式的な拡大平面図を示す。図 1 0 においては、基板 1 の凸部 1 a の配列は上記のケース 1 - 1 の場合と同様であるが、ケース 1 - 1 の場合とは異なるファセット成長モードで第 1 の窒化物半導体下地層 4 を成長させた場合 (ケース 1 - 3) の第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面が示されている。

30

【 0 1 2 8 】

ケース 1 - 3 の第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長条件は、たとえば、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時における基板 1 の温度が 1 0 0 0 ° であったところを、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長時における基板 1 の温度と同じ 1 0 8 0 ° に上昇させている点にある。

【 0 1 2 9 】

ケース 1 - 3 の第 1 の窒化物半導体下地層 4 は、図 1 0 に示す第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面の平面視において、a (s u b) 軸方向および u 方向にそれぞれ現れる 6 つの第 1 の斜めファセット面 4 r の他に、a (s u b) 軸方向に対して + 3 0 ° に傾斜した方向、a (s u b) 軸方向に対して - 3 0 ° に傾斜した方向、および m (s u b) 軸方向にそれぞれ現れる 6 つの第 1 の斜めファセット面 4 n の 1 2 面のファセット面が形成される。

40

【 0 1 3 0 】

ケース 1 - 3 では、ウエハ内において多数形成される半導体発光素子の E S D テストの歩留りは約 7 0 % であった。ただし、E S D テストは逆電圧 1 k V の H B M 条件にて行っている。

【 0 1 3 1 】

なお、ケース 1 - 3 においては、M O C V D 成長中および以降のプロセス中に、温度変化によるウエハ全体の反りが変動することにより、ウエハ 4 枚中 3 枚が割れてしまい測定

50

できなかった。このように第1の斜めファセット面4rと第1の斜めファセット面4nが共に現れる場合には、ウエハの割れが生じやすくなることがわかった。この現象に対する仮説として、第1の斜めファセット面4r上に成長した膜と第1の斜めファセット面4n上に成長した面との結晶配向が微妙にずれるため両者の界面に線欠陥が生じ、その線同士を連ねた線に沿って膜が割れる結果、その部分に膜と基板1との熱膨張差に伴う歪が集中し、ウエハが割れるのではないかと考えている。

【0132】

図11に、図6に示す第1の窒化物半導体下地層4の表面の他の一例の模式的な拡大平面図を示す。図11においては、ケース1-2と凸部1aの配列が同一であって、ケース1-3と同じ成長条件で第1の窒化物半導体下地層4を成長させた場合(ケース1-4)の窒化物半導体下地層4の表面が示されている。

10

【0133】

ケース1-4の第1の窒化物半導体下地層4は、図11に示す第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(s u b)軸方向およびu方向にそれぞれ現れる6つの第1の斜めファセット面4rの他に、a(s u b)軸方向に対して±30°に傾斜した方向、およびm(s u b)軸方向にそれぞれ現れる6つの第1の斜めファセット面4nの12面のファセット面が形成される。

【0134】

ケース1-4では、ウエハ内において多数形成される半導体発光素子のESDテストの歩留りは約30%であった。ただし、ESDテストは逆電圧1kVのHBM条件にて行っ

20

【0135】

なお、ケース1-4においても、ケース1-3と同様に、MOCVD成長中および以降のプロセス中に、ウエハ4枚中3枚に割れが生じた。

【0136】

以上の結果から、以下の(a-1)~(c-1)の事項が導かれる。
 (a-1)第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4rが支配的に現れ、第1の斜めファセット面4nが現れにくいファセット成長モードが、ウエハのワレが少なく、かつESDテストで高い歩留まりが得られ好適である。
 (b-1)第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、第1の窒化物半導体下地層4の上面4cの面積を小さくすることが、ESDテストで高い歩留まりが得られる点で好適である。
 (c-1)第1の窒化物半導体下地層4の上面4cには第1の窒化物半導体下地層4の下面から上方に延びる線欠陥が多数存在すると考えられ、ファセット面4c上に成長された第2の窒化物半導体下地層5にもその欠陥が引き継がれると考えられる。

30

【0137】

なお、第1の窒化物半導体下地層4としては、たとえば、 $Al_{x_2}Ga_{y_2}In_{z_2}N(0 \leq x_2 \leq 1, 0 \leq y_2 \leq 1, 0 \leq z_2 \leq 1, x_2 + y_2 + z_2 = 1)$ の式で表わされるII族窒化物半導体からなる層を成長させることができる。また、第2の窒化物半導体下地層5としては、たとえば、 $Al_{x_3}Ga_{y_3}In_{z_3}N(0 \leq x_3 \leq 1, 0 \leq y_3 \leq 1, 0 \leq z_3 \leq 1, x_3 + y_3 + z_3 = 1)$ の式で表わされるIII族窒化物半導体からなる層を成長させることができる。

40

【0138】

第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5としては、それぞれ、柱状結晶の集合体からなる窒化物半導体中間層2中の転位などの結晶欠陥を引き継がないようにするために、III族元素としてGaを含む窒化物半導体層を用いることが好ましい。

【0139】

窒化物半導体中間層2中の転位を引き継がないようにするためには窒化物半導体中間層2との界面付近で転位をループさせる必要があるが、第1の窒化物半導体下地層4がGa

50

を含むⅢ族窒化物半導体からなる場合には転位のループが生じやすい。そこで、Gaを含むⅢ族窒化物半導体からなる第1の窒化物半導体下地層4およびGaを含む第2の窒化物半導体下地層5をそれぞれ用いることによって、窒化物半導体中間層2との界面付近で転位をループ化して閉じ込めて、窒化物半導体中間層2から第1の窒化物半導体下地層4に転位が引き継がれるのを抑えることができる傾向にある。

【0140】

たとえば、第1の窒化物半導体下地層4が、 $Al_{x_2}Ga_{y_2}N$ ($0 < x_2 < 1$ 、 $0 < y_2 < 1$)の式で表わされるⅢ族窒化物半導体からなり、第2の窒化物半導体下地層5が $Al_{x_3}Ga_{y_3}N$ ($0 < x_3 < 1$ 、 $0 < y_3 < 1$)の式で表わされるⅢ族窒化物半導体からなる場合、特に第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5がそれぞれGa₂Nからなる場合に、窒化物半導体中間層2との界面付近で転位をループ化して閉じ込めることができるため、転位密度が小さく良好な結晶性を有する第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5が得られる傾向にある。

10

【0141】

また、第1の窒化物半導体下地層4の形成直前の窒化物半導体中間層2の表面に熱処理を行なってもよい。この熱処理によって、窒化物半導体中間層2の表面の清浄化と結晶性の向上とを図ることができる傾向にある。この熱処理は、たとえばMOCVD法が用いられるMOCVD装置内で行なうことができ、熱処理時の雰囲気ガスとしては、たとえば水素ガスや窒素ガスなどを用いることができる。

【0142】

また、上記の熱処理時における窒化物半導体中間層2の分解を防ぐためには、熱処理時の雰囲気ガスにアンモニアガスを混合してもよい。また、上記の熱処理は、たとえば900以上1250以下の温度でたとえば1分間以上60分間以下の時間行なうことができる。

20

【0143】

第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5には、たとえば、n型ドーパントが $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下の範囲でドーピングされていてもよいが、良好な結晶性を維持する観点からは、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5はそれぞれアンドープであることが好ましい。

【0144】

第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5にドーピングされるn型ドーパントとしては、たとえば、シリコン、ゲルマニウムおよび錫からなる群から選択された少なくとも1つなどを用いることができ、なかでもシリコンを用いることが好ましい。n型ドーパントにシリコンを用いる場合、n型ドーピングガスとしてはシランまたはジシランを用いることが好ましい。

30

【0145】

第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5のそれぞれの成長時における基板1の温度は、800以上1250以下であることが好ましく、900以上1150以下であることがより好ましい。第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5のそれぞれの成長時における基板1の温度が800以上1250以下である場合、特に900以上1150以下である場合には、結晶欠陥の少ない結晶性に優れた第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5を成長させることができる傾向にある。

40

【0146】

次に、図12の模式的断面図に示すように、たとえばMOCVD法によって、第2の窒化物半導体下地層5の表面上にn型窒化物半導体コンタクト層7を形成する。

【0147】

n型窒化物半導体コンタクト層7としては、たとえば、 $Al_{x_4}Ga_{y_4}In_{z_4}N$ ($0 < x_4 < 1$ 、 $0 < y_4 < 1$ 、 $0 < z_4 < 1$ 、 $x_4 + y_4 + z_4 = 1$)の式で表わされるⅢ族窒化物半導体からなる層にn型ドーパントをドーピングした層などを形成することがで

50

きる。

【0148】

なかでも、 n 型窒化物半導体コンタクト層7としては、 $Al_{x4}Ga_{1-x4}N$ ($0 < x4 < 1$ 、好ましくは $0 < x4 < 0.5$ 、より好ましくは $0 < x4 < 0.1$)の式で表わされるIII族窒化物半導体に n 型ドーパントとしてシリコンがドーピングされた窒化物半導体層であることが、揮発しやすいInを取り扱わず、成長温度を高くできるため好ましい。

【0149】

n 型窒化物半導体コンタクト層7への n 型ドーパントのドーピング濃度は、 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましい。この場合には、 n 型窒化物半導体コンタクト層7と n 側電極20との良好なオーミック接触を維持し、 n 型窒化物半導体コンタクト層7におけるクラックの発生を抑制し、かつ n 型窒化物半導体コンタクト層7の良好な結晶性を維持することができる傾向にある。

10

【0150】

第1の窒化物半導体下地層4と、第2の窒化物半導体下地層5と、 n 型窒化物半導体コンタクト層7との厚さの合計は、 $4 \mu\text{m}$ 以上 $20 \mu\text{m}$ 以下とすることが好ましく、 $4 \mu\text{m}$ 以上 $15 \mu\text{m}$ 以下とすることがより好ましく、 $6 \mu\text{m}$ 以上 $15 \mu\text{m}$ 以下とすることがさらに好ましい。第1の窒化物半導体下地層4と、第2の窒化物半導体下地層5と、 n 型窒化物半導体コンタクト層7との厚さの合計が $4 \mu\text{m}$ 未満である場合には、これらの層の結晶性が悪化したり、これらの層の表面にピット(pit)が生じるおそれがある。一方、第1の窒化物半導体下地層4と、第2の窒化物半導体下地層5と、 n 型窒化物半導体コンタクト層7との厚さの合計が $15 \mu\text{m}$ を超える場合には、基板1の反りが大きくなって、素子の収率低下を招くおそれがある。また、第1の窒化物半導体下地層4と、第2の窒化物半導体下地層5と、 n 型窒化物半導体コンタクト層7との厚さの合計が $4 \mu\text{m}$ 以上 $15 \mu\text{m}$ 以下である場合、特に $6 \mu\text{m}$ 以上 $15 \mu\text{m}$ 以下である場合には、これらの層の結晶性を良好なものとすることができるとともに、基板1の反りが大きくなって、素子の収率低下を有効に防止することができる傾向にある。なお、これらの層の厚さの合計のうち n 型窒化物半導体コンタクト層7の厚さの上限は特に限定されるものではない。

20

【0151】

次に、図13の模式的断面図に示すように、たとえばMOCVD法によって、 n 型窒化物半導体コンタクト層7の表面上に n 型窒化物半導体クラッド層9を形成する。

30

【0152】

n 型窒化物半導体クラッド層9としては、たとえば、 $Al_{x5}Ga_{y5}In_{z5}N$ の式($0 < x5 < 1$ 、 $0 < y5 < 1$ 、 $0 < z5 < 1$ 、 $x5 + y5 + z5 = 0$)で表わされるIII族窒化物半導体からなる層に n 型ドーパントをドーピングした層などを形成することができる。また、 n 型窒化物半導体クラッド層9は、III族窒化物半導体からなる複数の窒化物半導体層をヘテロ接合した構造や超格子構造であってもよい。

【0153】

n 型窒化物半導体クラッド層9の厚さは特に限定されないが、 $0.005 \mu\text{m}$ 以上 $0.5 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましく、 $0.005 \mu\text{m}$ 以上 $0.1 \mu\text{m}$ 以下であることがより好ましい。

40

【0154】

n 型窒化物半導体クラッド層9への n 型ドーパントのドーピング濃度については、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましく、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることがより好ましい。この場合には、 n 型窒化物半導体クラッド層9の良好な結晶性を維持し、かつ素子の動作電圧を低減することができる傾向にある。

【0155】

次に、図14の模式的断面図に示すように、たとえばMOCVD法によって、 n 型窒化物半導体クラッド層9の表面上に窒化物半導体活性層11を形成する。

【0156】

50

窒化物半導体活性層 11 がたとえば単一量子井戸 (SQW) 構造を有する場合には、窒化物半導体活性層 11 としては、たとえば、 $Ga_{1-z_6}In_{z_6}N$ ($0 < z_6 < 0.4$) の式で表わされる III 族窒化物半導体からなる層を量子井戸層とするものを用いることができる。

【0157】

窒化物半導体活性層 11 の厚さは、特に限定されないが、1 nm 以上 10 nm 以下とすることが好ましく、1 nm 以上 6 nm 以下とすることがより好ましい。窒化物半導体活性層 11 の厚さが 1 nm 以上 10 nm 以下である場合、特に 1 nm 以上 6 nm 以下である場合には、窒化物半導体発光ダイオード素子 100 の発光出力を向上させることができる傾向にある。

10

【0158】

窒化物半導体活性層 11 が、たとえば $Ga_{1-z_6}In_{z_6}N$ ($0 < z_6 < 0.4$) の式で表わされる III 族窒化物半導体からなる層を量子井戸層とする単一量子井戸 (SQW) 構造を有する場合には、窒化物半導体発光ダイオード素子 100 の発光波長が所望の発光波長となるように、窒化物半導体活性層 11 の In 組成や厚さを制御することができる。

【0159】

しかしながら、窒化物半導体活性層 11 の形成時の基板 1 の温度が低いと結晶性が悪化するおそれがある一方で、窒化物半導体活性層 11 の形成時の基板 1 の温度が高いと InN の昇華が顕著になって固相中への In の取り込まれ効率が低減して In 組成が変動するおそれがある。そのため、 $Ga_{1-z_6}In_{z_6}N$ ($0 < z_6 < 0.4$) の式で表わされる III 族窒化物半導体からなる層を井戸層とする単一量子井戸 (SQW) 構造からなる窒化物半導体活性層 11 の形成時の基板 1 の温度は 700 以上 900 以下であることが好ましく、750 以上 850 以下であることがより好ましい。

20

【0160】

また、窒化物半導体活性層 11 としては、たとえば、 $Ga_{1-z_6}In_{z_6}N$ ($0 < z_6 < 0.4$) の式で表わされる III 族窒化物半導体からなる量子井戸層と、量子井戸層よりもバンドギャップの大きい $Al_{x_7}Ga_{y_7}In_{z_7}N$ ($0 < x_7 < 1, 0 < y_7 < 1, 0 < z_7 < 1, x_7 + y_7 + z_7 = 0$) の式で表わされる III 族窒化物半導体からなる量子障壁層と、を交互に 1 層ずつ積層した多重量子井戸 (MQW) 構造を有するものを用いることもできる。なお、上記の量子井戸層および/または量子障壁層には n 型または p 型のドーパントがドーピングされていてもよい。

30

【0161】

次に、図 15 の模式的断面図に示すように、たとえば MOCVD 法によって、窒化物半導体活性層 11 の表面上に p 型窒化物半導体クラッド層 13 を形成する。

【0162】

p 型窒化物半導体クラッド層 13 としては、たとえば、 $Al_{x_8}Ga_{y_8}In_{z_8}N$ ($0 < x_8 < 1, 0 < y_8 < 1, 0 < z_8 < 1, x_8 + y_8 + z_8 = 0$) の式で表わされる III 族窒化物半導体に p 型ドーパントをドーピングした層などを積層することができる。なかでも、p 型窒化物半導体クラッド層 13 としては、 $Al_{x_8}Ga_{1-x_8}N$ ($0 < x_8 < 0.4$ 、好ましくは $0.1 < x_8 < 0.3$) の式で表わされる III 族窒化物半導体に p 型ドーパントをドーピングした層を積層することが好ましい。なお、p 型ドーパントとしては、たとえばマグネシウムなどを用いることができる。

40

【0163】

p 型窒化物半導体クラッド層 13 のバンドギャップは、窒化物半導体活性層 11 への光閉じ込めの観点から、窒化物半導体活性層 11 のバンドギャップよりも大きくすることが好ましい。

【0164】

p 型窒化物半導体クラッド層 13 の厚さは、特に限定されないが、 $0.01 \mu m$ 以上 $0.4 \mu m$ 以下であることが好ましく、 $0.02 \mu m$ 以上 $0.1 \mu m$ 以下であることがより好ましい。

50

【0165】

p型窒化物半導体クラッド層13へのp型ドーパントのドーピング濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましく、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることがより好ましい。p型窒化物半導体クラッド層13へのp型ドーパントのドーピング濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下である場合、特に $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下である場合には、良好な結晶性のp型窒化物半導体クラッド層13を得ることができる傾向にある。

【0166】

次に、図16の模式的断面図に示すように、たとえばMOCVD法によって、p型窒化物半導体クラッド層13の表面上にp型窒化物半導体コンタクト層15を形成する。

10

【0167】

p型窒化物半導体コンタクト層15としては、たとえば、 $\text{Al}_{x9}\text{Ga}_{y9}\text{In}_{z9}\text{N}$ ($0 < x9 < 1$ 、 $0 < y9 < 1$ 、 $0 < z9 < 1$ 、 $x9 + y9 + z9 = 0$)の式で表わされるIII族窒化物半導体にp型ドーパントをドーピングした層などを積層することができる。なかでも、p型窒化物半導体コンタクト層15としては、GaN層にp型ドーパントをドーピングした層を用いることが好ましい。この場合には、p型窒化物半導体コンタクト層15の良好な結晶性を維持し、かつ透光性電極層19と良好なオーミック接触を得ることができる傾向にある。

【0168】

p型窒化物半導体コンタクト層15へのp型ドーパントのドーピング濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましく、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることがより好ましい。p型窒化物半導体コンタクト層15へのp型ドーパントのドーピング濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下である場合、特に $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下である場合には、透光性電極層19との良好なオーミック接触を維持し、p型窒化物半導体コンタクト層15におけるクラックの発生を抑制し、p型窒化物半導体コンタクト層15の良好な結晶性を維持することができる傾向にある。

20

【0169】

p型窒化物半導体コンタクト層15の厚さは、特に限定されるものではないが、 $0.1 \mu\text{m}$ 以上 $0.5 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましく、 $0.05 \mu\text{m}$ 以上 $0.2 \mu\text{m}$ 以下であることがより好ましい。p型窒化物半導体コンタクト層15の厚さが $0.01 \mu\text{m}$ 以上 $0.5 \mu\text{m}$ 以下である場合、特に $0.05 \mu\text{m}$ 以上 $0.2 \mu\text{m}$ 以下である場合には、窒化物半導体発光ダイオード素子100の発光出力を向上させることができる傾向にある。

30

【0170】

なお、n型窒化物半導体コンタクト層7、n型窒化物半導体クラッド層9、窒化物半導体活性層11、p型窒化物半導体クラッド層13およびp型窒化物半導体コンタクト層15がそれぞれIII族窒化物半導体から構成される場合には、これらの層はそれぞれたとえば以下のガスを用いたMOCVD法によって積層することができる。

【0171】

すなわち、MOCVD装置の反応炉の内部に、たとえばトリメチルガリウム(TMG)、トリメチルアルミニウム(TMA)およびトリメチルインジウム(TMI)からなる群から選択された少なくとも1つのIII族元素の有機金属原料ガスと、たとえばアンモニアなどの窒素原料ガスとを供給して、これらを熱分解し、反応させることによって上記の層をそれぞれ積層することができる。

40

【0172】

また、n型ドーパントであるシリコンをドーピングする場合には、MOCVD装置の反応炉の内部に、たとえばシラン(SiH_4)あるいはジシラン(Si_2H_6)をドーピングガスとして上記の原料ガスに加えて供給することにより、シリコンをドーピングすることが可能である。

【0173】

50

また、p型ドーパントであるマグネシウムをドーピングする場合には、MOCVD装置の反応炉の内部に、たとえばビスシクロペンタジエニルマグネシウム(CP₂Mg)をドーピングガスとして上記の原料ガスに加えて供給することにより、マグネシウムをドーピングすることが可能である。

【0174】

次に、図17の模式的断面図に示すように、p型窒化物半導体コンタクト層15の表面上にたとえばITO(Indium Tin Oxide)からなる透光性電極層19を形成した後に、透光性電極層19の表面上にp側電極21を形成する。p側電極21としては、たとえば、ニッケル層、アルミニウム層、チタン層および金層の積層膜を形成することができる。

10

【0175】

次に、図18の模式的断面図に示すように、p側電極21の形成後の積層体の一部をエッチングにより除去することによって、n型窒化物半導体コンタクト層7の表面の一部を露出させる。

【0176】

次に、図19の模式的断面図に示すように、n型窒化物半導体コンタクト層7の露出した表面上にn側電極20を形成する。n側電極20としては、たとえば、ニッケル層、アルミニウム層、チタン層および金層の積層膜を形成することができる。

【0177】

その後、n側電極20の形成後の積層体の全面にSiO₂などの絶縁保護膜23を形成し、p側電極21およびn側電極20が露出するように絶縁保護膜23に開口部を設け、複数の窒化物半導体発光ダイオード素子100が形成されたウエハを個別の素子に分割することによって、実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子100を作製することができる。

20

【0178】

ここで、ウエハの分割は、たとえば、基板1上に上記の構造を形成したウエハの裏面を研削および研磨してミラー状の面とした後に、ウエハを280μm×550μm角の長方形形状のチップに分割することによって行なうことができる。

【0179】

以上のようにして作製した実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子100においては、基板1の表面の法線方向(垂直方向)に伸長する結晶粒の揃った柱状結晶の集合体からなる良好な結晶性を有する窒化物半導体中間層2の表面上に、第1の窒化物半導体下地層4、第2の窒化物半導体下地層5、n型窒化物半導体コンタクト層7、n型窒化物半導体クラッド層9、窒化物半導体活性層11、p型窒化物半導体クラッド層13およびp型窒化物半導体コンタクト層15がこの順序で積層されている。

30

【0180】

そのため、結晶欠陥が少なく結晶性の高い平坦な第2の窒化物半導体下地層5の上面5a上に積層された、n型窒化物半導体コンタクト層7、n型窒化物半導体クラッド層9、窒化物半導体活性層11、p型窒化物半導体クラッド層13およびp型窒化物半導体コンタクト層15については転位密度が低くなり、優れた結晶性を有している。

40

【0181】

したがって、このような優れた結晶性を有する窒化物半導体層から形成された実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子100は、動作電圧が低く、発光出力の高い素子となる。

【0182】

なお、ケース1-1の条件で作成された窒化物半導体発光ダイオード素子100をベアチップ(後述の樹脂封止を行わない)評価用素子とし、10個の素子に30mAの電流を流したところ、平均して光出力39mW、動作電圧3.0Vおよび発光波長455nmの動作電圧が低く、発光出力の高い素子が得られることが確認された。

【0183】

50

図20に、実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子100を用いた発光装置の一例の模式的な断面図を示す。

【0184】

ここで、発光装置110は、実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子100を第2のリードフレーム31上に設置した構成を有している。そして、窒化物半導体発光ダイオード素子100のp側電極21と第1のリードフレーム30とが第1のワイヤ33で電氣的に接続されているとともに、窒化物半導体発光ダイオード素子100のn側電極20と第2のリードフレーム31とが第2のワイヤ34で電氣的に接続されている。さらに、透明なモールド樹脂35で窒化物半導体発光ダイオード素子100がモールドされていることによって、発光装置110は砲弾型の形状とされている。

10

【0185】

図20に示す構成の発光装置110は、実施の形態1-1の窒化物半導体発光ダイオード素子100を用いていることから、動作電圧が低く、発光出力の高い発光装置とすることができる。

【0186】

<実施の形態1-2>

実施の形態1-2は、実施の形態1-1の窒化物半導体構造(基板1、窒化物半導体中間層2、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5の積層構造)を用いた電子デバイスである窒化物半導体トランジスタ素子であることを特徴としている。

【0187】

図21に、実施の形態1-2の窒化物半導体トランジスタ素子300の模式的な断面図を示す。窒化物半導体トランジスタ素子300は、凸部1aが等価な3つのa(sub)軸方向に配されたc面を主面とするサファイア基板からなる基板1と、基板1の表面上に、順次積層された、AlNなどからなる窒化物半導体中間層2と、アンドープGaNなどからなる第1の窒化物半導体下地層4と、アンドープGaNなどからなる第2の窒化物半導体下地層5と、からなる窒化物半導体構造を有している。

20

【0188】

そして、結晶欠陥の少ない良好な結晶性を有する第2の窒化物半導体下地層5の平坦な表面上にアンドープGaNなどからなる窒化物半導体電子走行層71が積層され、窒化物半導体電子走行層71の表面上にn型AlGaNなどからなるn型窒化物半導体電子供給層73が積層されている。

30

【0189】

n型窒化物半導体電子供給層73の表面上にはゲート電極77が備えられており、ゲート電極77の両側にn型GaNなどからなるソースコンタクト層75Sとドレインコンタクト層75Dとが備えられている。また、ソースコンタクト層75S上にソース電極78Sが備えられており、ドレインコンタクト層75D上にドレイン電極78Dが備えられている。

【0190】

以下、実施の形態1-2の窒化物半導体トランジスタ素子300の製造方法の一例について説明する。まず、実施の形態1-1と同様にして、凸部1aおよび凹部1bを有する基板1の表面上に、反応性スパッタ法によってAlNからなる窒化物半導体中間層2を形成する。

40

【0191】

次に、MOCVD法によって、窒化物半導体中間層2の表面上に、アンドープGaNからなる第1の窒化物半導体下地層4を成長させる。ここで、第1の窒化物半導体下地層4は、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(sub)軸方向に現れる2つの第1の斜めファセット面4rと、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向にそれぞれ2つずつ現れる第1の斜めファセット面4rと、が現れる条件(たとえば、ケース1-1の条件)で成長させる。

50

【0192】

次に、MOCVD法によって、第1の窒化物半導体下地層4の表面上にアンドープGaNからなる第2の窒化物半導体下地層5を成長させる。ここで、第2の窒化物半導体下地層5は、第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4rを埋め込んでほぼ平坦な上面5aが現れる条件で成長させる。

【0193】

次に、MOCVD法によって、第2の窒化物半導体下地層5のほぼ平坦な上面5a上にn型Al_xGa_{1-x}Nからなる窒化物半導体電子走行層71を積層し、窒化物半導体電子走行層71の表面上にn型窒化物半導体電子供給層73を積層する。

【0194】

その後、図21に示すように、n型窒化物半導体電子供給層73の表面上に、ソースコンタクト層75Sおよびドレインコンタクト層75Dを形成した後に、ソース電極78S、ドレイン電極78Dおよびゲート電極77をそれぞれ形成する。以上により、実施の形態1-2の窒化物半導体トランジスタ素子300を作製することができる。

【0195】

実施の形態1-2の窒化物半導体トランジスタ素子300においても、実施の形態1-1と同様に、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(sub)軸方向に現れる2つの第1の斜めファセット面4rと、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向にそれぞれ2つずつ現れる第1の斜めファセット面4rと、が現れる条件で第1の窒化物半導体下地層4を成長させている。これにより、特に、窒化物半導体電子走行層71の最上面の2次元電子走行領域における結晶欠陥が低減するため、電子の移動度を向上させることができる。

【0196】

したがって、実施の形態1-2の窒化物半導体トランジスタ素子300においても、窒化物半導体中間層2の表面上に積層されたそれぞれの層については転位密度が低く結晶性に優れた層とすることができるため、電子移動度などの特性が向上した素子とすることができる。

【0197】

以上のように、本実施の形態によれば、凸部1aおよび凹部1bを有する基板1の表面上に積層される第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5の形状を制御している。これにより、第2の窒化物半導体下地層5の上面5a上に積層される窒化物半導体層のMOCVD法による成長中およびそれ以降のプロセス中においてウエハの割れおよびクラックの発生を抑制しつつ、窒化物半導体層のX線半値幅等で表わされる結晶性を向上することができるとともに、CL法やEPD等で表される欠陥密度を低減することができるため、発光効率および電子移動度等で表されるデバイス特性を向上させた窒化物半導体素子および窒化物半導体素子の下地となる窒化物半導体構造を提供することができる。

【0198】

<実施の形態2-1>

図22に、本発明の窒化物半導体素子の他の一例である実施の形態2-1の窒化物半導体発光ダイオード素子の模式的な断面図を示す。

【0199】

実施の形態2-1の窒化物半導体発光ダイオード素子200は、主に凹部1bにおける窒化物半導体中間層2の表面に接するようにして設けられた第3の窒化物半導体下地層3と、少なくとも第3の窒化物半導体下地層3に接するように設けられた第1の窒化物半導体下地層4と、少なくとも第1の窒化物半導体下地層4の表面に接するようにして設けられた第2の窒化物半導体下地層5(下層5Aおよび上層5Bからなる)と、n型窒化物半導体コンタクト層7の表面上に設けられたn型窒化物半導体超格子層92とを備えていることを特徴としている。

10

20

30

40

50

【0200】

第3の窒化物半導体下地層3は、基板1の凹部1上に設けられて、基板1の凸部1aの外側において凸部1aを取り囲む第3の斜めファセット面3fと、第3の斜めファセット面3fを連結する第3の平坦領域3cとを有している。

【0201】

また、第3の窒化物半導体下地層3の表面においては、第3の斜めファセット面3fの面積割合が、第3の平坦領域3cの面積割合よりも小さくなっている。

【0202】

第1の窒化物半導体下地層4は、基板1の凸部1aの外側において、凸部1aを取り囲む第1の斜めファセット面4rを少なくとも6つ有するとともに、第1の斜めファセット面4rを連結する第1の平坦領域4cを有している。第1の斜めファセット面4rは、六方晶構造をとる窒化物半導体層のm(layer)軸方向に対して傾斜する面を含んでおり、第1の平坦領域4cは、六方晶構造をとる窒化物半導体層のm(layer)軸方向に対して垂直な面である。なお、第1の窒化物半導体下地層4は、その少なくとも一部が第3の窒化物半導体下地層3に接するように設けられていけばよい。

10

【0203】

第2の窒化物半導体下地層5の下面(下層5Aの下面)5Lは、第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4rに接しており、第2の窒化物半導体下地層5の上面(上層5Bの上面)5Uは平坦となっている。また、第2の窒化物半導体下地層5の下層5Aの上面(上層5Bの下面)5Mも平坦となっている。なお、第2の窒化物半導体下地層5は、その少なくとも一部が第1の窒化物半導体下地層4の表面に接するように設けられていけばよい。

20

【0204】

たとえば、第2の窒化物半導体下地層5の下層5Aの上面5M、および第2の窒化物半導体下地層5の上面5Uの表面粗さRa(JIS B 0601:2001)は、それぞれ、0.1μm以下となっている。

【0205】

以下、実施の形態2-1の窒化物半導体発光ダイオード素子200の製造方法の一例について説明する。

【0206】

まず、三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなる基板1を準備する。三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなる基板1としては、たとえば、サファイア(Al₂O₃)単結晶、AlN単結晶またはGaN単結晶などからなる基板を用いることができる。

30

【0207】

また、基板1の口径は特には限定されないが、たとえば150mm(約6インチ)とすることができる。基板1としては、従来は50.8mm(2インチ)程度の比較的小さい口径の基板を用いることが一般的であったが、生産性を高めるためには大口径の基板を用いることが好ましい。しかしながら、大口径の基板1を用いた場合には、基板1と窒化物半導体層との熱膨張率差による応力に主に起因して生じる反りがより大きくなり、その結果、基板1の割れや窒化物半導体層の表面にクラックが生じやすくなるという問題が生じる。本発明は、後述するように、100mm(約4インチ)以上の大口径の基板1を用いた場合にも、基板1の割れや窒化物半導体層の表面に発生するクラックを抑制することができる。

40

【0208】

次に、図2の模式的断面図に示すように、基板1の表面に、凹部1bと、凹部1bの間に設けられた凸部1aと、を形成する。

【0209】

図3に、図2に示す基板1の表面の一例の模式的な拡大平面図を示す。ここで、頂点に凸部1aが配置される仮想の三角形1tの各内角の角度は、基板1の表面の平面視において、50°以上70°以下であることが好ましい。この場合には、第3の窒化物半導体下

50

地層 3 が凹部 1 b の領域上に安定して成長を開始する傾向にある。そして、第 3 の窒化物半導体下地層 3 上に形成した第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長が進むと、第 1 の窒化物半導体下地層 4 は、凸部 1 a を中心として凸部 1 a の外側において凸部 1 a を取り囲むように少なくとも 6 つの第 1 の斜めファセット面 4 r を形成できる傾向にある。

【 0 2 1 0 】

また、隣り合う凸部 1 a の間隔は、基板 1 の表面の平面視において、 $0.2 \mu\text{m}$ 以上 $7 \mu\text{m}$ 以下とすることが好ましく、 $1 \mu\text{m}$ 以上 $3 \mu\text{m}$ 以下とすることがより好ましく、 $2 \mu\text{m}$ 程度とすることがさらに好ましい。隣り合う凸部 1 a の間隔が $0.2 \mu\text{m}$ 以上 $7 \mu\text{m}$ 以下である場合には、プロセス上の問題が少なくなる傾向にある。プロセス上の問題としては、たとえば、凸部 1 a の高さを高くするためのドライエッチング時間が長くなることや、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5 U を完全に平坦とするまでに要する成長時間が長くなり過ぎることなどの問題が挙げられる。なお、本明細書において、隣り合う凸部 1 a の間隔は、隣り合う凸部 1 a の間の最短距離を意味する。

10

【 0 2 1 1 】

また、基板 1 の表面の平面視において、凸部 1 a の円形の円の直径は、隣り合う凸部 1 a の間隔の $1/2$ 以上 $3/4$ 以下とすることが好ましい。たとえば、隣り合う凸部 1 a の間隔が $2 \mu\text{m}$ である場合には、凸部 1 a の円形の円の直径は $1.2 \mu\text{m}$ 程度とすることがより好ましい。凸部 1 a の円形の円の直径が隣り合う凸部 1 a の間隔の $1/2$ 以上 $3/4$ 以下である場合、特に $1.2 \mu\text{m}$ 程度である場合には、第 3 の窒化物半導体下地層 3 が、凸部 1 a の領域上よりも、凹部 1 b の領域上に安定して成長を開始する傾向にある。

20

【 0 2 1 2 】

また、凸部 1 a の高さは、基板 1 の表面の平面視における凸部 1 a の円形の円の直径の $1/4$ 以上 1 以下とすることが好ましい。たとえば、凸部 1 a の円形の円の直径が $1.2 \mu\text{m}$ である場合には、凸部 1 a の高さは $0.6 \mu\text{m}$ 程度とすることがより好ましい。この場合には、第 3 の窒化物半導体下地層 3 が、凸部 1 a の領域上よりも、凹部 1 b の領域上に安定して成長を開始する傾向にある。

【 0 2 1 3 】

また、凸部 1 a の形状は、たとえば、図 3 に示す凸部の中心を通る B - B 線に沿った模式的な拡大断面図である図 4 に示すように、先端部 1 c を備える形状であることが好ましい。凸部 1 a の上面が平坦である場合には、凹部 1 b だけでなく凸部 1 a の平坦な上面にも後述する第 3 の窒化物半導体下地層 3 が成長することがある。一方、凸部 1 a が先端部 1 c を備える形状である場合には、第 3 の窒化物半導体下地層 3 および第 1 の窒化物半導体下地層 4 は凹部 1 b から選択的に成長し、引き続き成長する第 2 の窒化物半導体下地層 5 が凸部 1 a の先端部 1 c の上方で会合するため、結晶欠陥が生じる領域が限定され、全体としての欠陥の数を減らせると考えられる。

30

【 0 2 1 4 】

次に、図 5 の模式的断面図に示すように、基板 1 の表面上に窒化物半導体中間層 2 を形成する。ここで、窒化物半導体中間層 2 は、たとえば、チャンパーに N_2 と Ar とを導入し、 N_2 と Ar との混合雰囲気において Al ターゲットをスパッタする反応性スパッタ法によって形成することができる。Ar は必ずしもチャンパーに導入しなくてもよい。また導入ガスとして微量の O_2 を加えてもよく、微量の O_2 を含む導入ガスを用いることによって、チャンパー内の残留水分を起源とする酸素を含む窒化物半導体中間層 2 よりも良質な膜が得られる。

40

【 0 2 1 5 】

次に、図 2 3 の模式的断面図に示すように、窒化物半導体中間層 2 の表面上に第 3 の窒化物半導体下地層 3 を形成し、図 2 4 の模式的断面図に示すように、第 3 の窒化物半導体下地層 3 の表面上に第 1 の窒化物半導体下地層 4 を形成する。また、図 2 5 の模式的断面図に示すように、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面上に第 2 の窒化物半導体下地層 5 の下層 5 A を形成し、図 2 6 の模式的断面図に示すように、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の下層 5 A の表面上に第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上層 5 B を形成する。

50

【 0 2 1 6 】

ここで、第3の窒化物半導体下地層3、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5（下層5Aおよび上層5B）は、それぞれ、たとえばMOCVD（Metal Organic Chemical Vapor Deposition）法によって、窒化物半導体中間層2の表面上に順次形成することができる。

【 0 2 1 7 】

より具体的には、図27の模式的断面図に示すように、まず、主に凹部1bにおける窒化物半導体中間層2の表面上に第3の窒化物半導体下地層3（例えば、厚さ $t_3 = 300 \text{ nm}$ ）を形成し、次に、少なくとも第3の窒化物半導体下地層3の表面上に第1の窒化物半導体下地層4（例えば、厚さ $t_4 = 1400 \text{ nm}$ ）を形成し、その後、少なくとも第1の窒化物半導体下地層4の表面上に第2の窒化物半導体下地層5を形成する。ここで、第2の窒化物半導体下地層5は、アンドープである下層5A（例えば、厚さ $t_{5A} = 4000 \text{ nm}$ ）と、n型ドーピングである上層5B（例えば、 $t_{5B} =$ 厚さ 3000 nm ）との積層体からなる。

10

【 0 2 1 8 】

次に、図28の模式的断面図を参照して、結晶欠陥が少なく、かつ平坦な上面5Uを有する第2の窒化物半導体下地層5の製造方法、特に成長モードについて説明する。

【 0 2 1 9 】

〔窒化物半導体下地層の成長モード〕

まず、第3の窒化物半導体下地層3、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5（以下、「窒化物半導体下地層の各層」とする。）は、それぞれ、適切な成長モードを選んで成長させる。以下、本明細書においては、下記のように、成長モードを便宜的に定義する。

20

2次元成長モード：平坦な表面が得られやすい成長モード

3次元成長モード：斜めファセット面が形成されやすい成長モード

2.5次元成長モード：2次元成長モードと3次元成長モードとの中間的な成長モード

〔窒化物半導体下地層の成長モードと成長パラメータとの関係〕

次に、窒化物半導体下地層の各層の成長に用いられる成長モードの切り替えは、それぞれ、（A-2）成長温度、（B-2）成長圧力、および（C-2）V/III比の3つの成長パラメータを適切に選択することにより行なうことができる。

30

【 0 2 2 0 】

具体的には、以下の（A-2）、（B-2）および（C-2）の少なくとも1つの成長パラメータあるいはその組合せにより実現することができる。ここで、本発明者が鋭意研究に努めた結果、これら3つのそれぞれの成長パラメータと、窒化物半導体下地層の成長モードとの相関を知り得ることができた。

（A-2）成長温度

成長温度が高いほど2次元成長モードになりやすく、成長温度が低いほど3次元成長モードになりやすい。

（B-2）成長圧力

成長圧力が低いほど2次元成長モードになりやすく、成長圧力が高いほど3次元成長モードになりやすい。

40

（C-2）V/III比

V/III比が小さいほど2次元成長モードになりやすく、V/III比が大きいほど3次元成長モードになりやすい。なお、V/III比は、窒化物半導体下地層の成長時に単位時間あたりに供給されるV族原料ガスのモル量と、単位時間あたりに供給されるIII族原料ガスのモル量との比である。

【 0 2 2 1 】

そこで、結晶欠陥が少なく結晶性の高い平坦な上面5Uを有する第2の窒化物半導体下地層5を形成するためには、まず、第3の窒化物半導体下地層3は、平坦な表面が得られる「2次元成長モード」と斜めファセットの結晶面が優先的に出現する「3次元成長モー

50

ド」との中間的な成長モードである「2.5次元成長モード」で成長させる。

【0222】

これにより、第3の窒化物半導体下地層3の表面は、第3の斜めファセット面3fと、第3の平坦領域3cとを有する。そして、それぞれの第3の窒化物半導体下地層3の表面における第3の斜めファセット面3fの面積割合が第3の平坦領域3cの面積割合よりも小さくなる。

【0223】

第1の窒化物半導体下地層4は、第1の斜めファセット面4rが形成されるように「3次元成長モード」で成長させる。

【0224】

これにより、第1の窒化物半導体下地層4の表面は、第1の斜めファセット面4rと、第1の平坦領域4cとを有する。そして、それぞれの第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視における第1の斜めファセット面4rの面積割合が第1の平坦領域4cの面積割合よりも大きくなる。

【0225】

さらに、第2の窒化物半導体下地層5は、第1の斜めファセット面4rを埋め込んで平坦な上面5Uを形成するために「2次元成長モード」で成長させる。

【0226】

これにより、結晶欠陥が少なく結晶性が良く、かつ平坦な上面5Uを有する第2の窒化物半導体下地層5を形成することができる。

【0227】

すなわち、第3の窒化物半導体下地層3の表面に第3の斜めファセット面3fを設けることによって窒化物半導体層のc(layer)軸方向に伸長する転位を第3の斜めファセット面3fの方向に曲げることにより、その数を低減する。

【0228】

そして、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視における第1の平坦領域4cの面積割合よりも大きい面積割合の第1の斜めファセット面4rを設けることによって、窒化物半導体層のc(layer)軸方向に伸長する転位を第1の斜めファセット面4rの方向に曲げて、その数をさらに低減する。

【0229】

このように窒化物半導体層のc(layer)軸方向に伸長する転位の数が低減された第1の窒化物半導体下地層4の表面上に、平坦な表面を有する窒化物半導体層の成長を促進する2次元成長モードで第2の窒化物半導体下地層5を成長させることによって、結晶欠陥が少なく結晶性が良く、かつ平坦な上面5Uを有する第2の窒化物半導体下地層5を形成することができる。

【0230】

なお、第2の窒化物半導体下地層5は、下層5Aと上層5Bとの積層体からなるが、下層5Aはアンドープ層であり、上層5Bは下層5Aと基本的に同じ成長条件のままn型ドーピングを行なうことにより成長させることができる。

【0231】

以上の結果をまとめると、第3の窒化物半導体下地層3および第1の窒化物半導体下地層4を形成する工程は、以下の(i-2)、(ii-2)および(iii-2)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれることが好ましい。これにより、クラックが生じにくく、X線ロックアップの半値幅の狭い窒化物半導体下地層が得られる傾向にある。

(i-2) 第3の窒化物半導体下地層3の成長時の成長温度を第1の窒化物半導体下地層4の成長時の成長温度よりも高くする。

(ii-2) 第3の窒化物半導体下地層3の成長時の圧力を第1の窒化物半導体下地層の成長時の圧力よりも低くする。

(iii-2) 第3の窒化物半導体下地層3の成長時に供給されるガスのV/III比を

10

20

30

40

50

第1の窒化物半導体下地層4の成長時に供給されるガスのV / I I I比よりも低くする。

【0232】

また、第3の窒化物半導体下地層3、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5を形成する工程は、以下の(I - 2)、(I I - 2)および(I I I - 2)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれるとともに、以下の(a - 2)、(b - 2)および(c - 2)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たすように行なわれることが好ましい。これにより、クラックが生じにくく、X線ロッキングカーブの半値幅の狭い窒化物半導体下地層が得られる傾向にある。

(I - 2) 第2の窒化物半導体下地層5の成長時の成長温度を第3の窒化物半導体下地層3の成長時の成長温度よりも高くする。

10

(I I - 2) 第2の窒化物半導体下地層5の成長時の圧力を第3の窒化物半導体下地層3の成長時の圧力よりも低くする。

(I I I - 2) 第2の窒化物半導体下地層5の成長時に供給されるガスのV / I I I比を第3の窒化物半導体下地層3の成長時に供給されるガスのV / I I I比よりも低くする。

(a - 2) 第2の窒化物半導体下地層5の成長時の成長温度を第1の窒化物半導体下地層4の成長時の成長温度よりも高くする。

(b - 2) 第2の窒化物半導体下地層5の成長時の圧力を第1の窒化物半導体下地層4の成長時の圧力よりも低くする。

(c - 2) 第2の窒化物半導体下地層5の成長時に供給されるガスのV / I I I比を第1の窒化物半導体下地層4の成長時に供給されるガスのV / I I I比よりも低くする。

20

【0233】

図29に、第3の窒化物半導体下地層3の表面の一例の模式的な拡大平面図を示す。図29に示すように、第3の窒化物半導体下地層3は、凸部1aの外側において、凸部1aを取り囲む第3の斜めファセット面3fを有している。

【0234】

また、1つの凸部1aを取り囲む第3の斜めファセット面3fと、他の1つの凸部1aを取り囲む第3の斜めファセット面3fとは、第3の窒化物半導体下地層3の第3の平坦領域3cで連結されている。

【0235】

30

第3の窒化物半導体下地層3の第3の斜めファセット面3fは、第3の窒化物半導体下地層3の第3の平坦領域3cから基板1の凸1aに向かって下りながら傾斜している。

【0236】

図30に、第3の窒化物半導体下地層3の表面の他の一例の模式的な拡大平面図を示す。図30に示す例においては、基板1の凹部1bのほぼ全面が第3の窒化物半導体下地層3の第3の平坦領域3cで均一に覆われており、第3の斜めファセット面3fが凸部1aの周囲にわずかに形成されている点を特徴としている。

【0237】

すなわち、図30に示す例においては、図29に示す例と比べて、第3の窒化物半導体下地層3の表面において、第3の平坦領域3cが占める面積割合が、第3の斜めファセット面3fが占める面積割合よりも大きくなっている。

40

【0238】

図31に、図30のB - Bに沿った模式的な断面図を示す。第3の窒化物半導体下地層3は、基板1の凹部1bの上方の領域から選択的に成長が進行する。そして、第3の窒化物半導体下地層3の成長の進行により、基板1の凹部1bの上方の領域のほぼ全面が第3の窒化物半導体下地層3の第3の平坦領域3cで均一に覆われ、第3のファセット面3fが基板1の凸部1aの周囲にわずかに形成される。

【0239】

図32に、第3の窒化物半導体下地層3の表面の他の一例の模式的な拡大平面図を示す。図32に示す例においては、第3の窒化物半導体下地層3の表面に粗面領域3dが形成

50

されていることを特徴としている。ここで、第3の窒化物半導体下地層3が、60nm以上の層厚を有する場合でも、凹部の上方の領域の第3の窒化物半導体下地層3の表面には、第3の平坦領域3cと、第3の平坦領域3cよりも粗い粗面領域3dとが混在する。この場合、この粗面領域3dの表面上に第1の窒化物半導体下地層4を成長すると、第1の窒化物半導体下地層4の表面はさらに大きな粗面になりやすく、さらにその上に成長する第2の窒化物半導体下地層5の表面は平坦化しにくいと問題が生じる。

【0240】

第3の窒化物半導体下地層3は、第3の窒化物半導体下地層3の表面を占める粗面領域3dの面積割合が5%以下となる条件で成長させられることが好ましい。この場合には、第3の窒化物半導体下地層3の表面上に成長する第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5がそれぞれ結晶欠陥が少なく結晶性の良好な膜となる傾向にある。

10

【0241】

図33に、第3の窒化物半導体下地層3の形成後に成長させた第1の窒化物半導体下地層4の表面の一例の模式的な拡大平面図を示す。第1の窒化物半導体下地層4は、基板1の凸部1aの外側において、凸部1aを取り囲む6つの第1の斜めファセット面4rを有している。

【0242】

図33に示す平面視において、第1の斜めファセット面4rは、a(sub)軸方向に2つ現れ、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向(いずれもu方向)にそれぞれ2つずつ現れている(この場合を「ケース2-1」とする。)

20

【0243】

より具体的には、6つの第1の斜めファセット面4rのうち、図33に示す第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(sub)軸方向に現れる2つの第1の斜めファセット面4rは、a(sub)軸方向(<11-20>方向)に対して斜め上方に傾斜しており、その傾斜した方向に第1の斜めファセット面4rが伸長している。

【0244】

また、同様に、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向(いずれもu方向)にそれぞれ2つずつ現れる第1の斜めファセット面4rも、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向に対してそれぞれ斜め上方に傾斜しており、その傾斜した方向に第1の斜めファセット面4rが伸長している。

30

【0245】

図34に、図33のB-Bに沿った模式的な断面図を示す。図34に現れる第1の斜めファセット面4rは、第1の斜めファセット面4rの存在する範囲内では、その断面の奥行き方向においても同様に現れる面である。

【0246】

また、1つの凸部1aを取り囲む第1の斜めファセット面4rと、他の1つの凸部1aを取り囲む第1の斜めファセット面4rとは、第1の窒化物半導体下地層4の上面4cで連結されている。

40

【0247】

ここで、凸部1aの外周を取り囲む6つの第1の斜めファセット面4rは、それぞれ、凸部1aから斜め上方に伸張することによって傾斜している。

【0248】

図35に、第3の窒化物半導体下地層3の形成後に成長させた第1の窒化物半導体下地層4の表面の他の一例の模式的な拡大平面図を示す。図35に示す例においては、基板1の表面の凸部1aがa(sub)軸方向に対して+30°傾斜した方向およびa(sub)軸方向に対して-30°傾斜した方向にそれぞれに配列している場合の第1の窒化物半

50

導体下地層 4 の第 1 の斜めファセット面 4 r と第 1 の平坦領域 4 c との位置関係が示されている（この場合を「ケース 2 - 2」とする。）。

【 0 2 4 9 】

6 つの第 1 の斜めファセット面 4 r が形成される 3 次元成長モードで第 1 の窒化物半導体下地層 4 を成長させる場合には、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の第 1 の斜めファセット面 4 r および第 1 の平坦領域 4 c は、それぞれ、基板 1 の凸部 1 a の配列の影響を受けやすくなる。

【 0 2 5 0 】

ケース 2 - 2 においては、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面の平面視において、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の第 1 の平坦領域 4 c の形状が三角形が連なったような形状になり、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長モードである 2 次元成長モードに切り替えた後に第 1 の平坦領域 4 c 上に第 2 の窒化物半導体下地層 5 が形成される。第 1 の窒化物半導体下地層 4 の第 1 の平坦領域 4 c の結晶欠陥は第 2 の窒化物半導体下地層 5 に引き継がれて伝播する傾向にあるため、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面に占める第 1 の平坦領域 4 c の面積がより小さいケース 2 - 1 の場合の方がケース 2 - 2 の場合と比べて第 2 の窒化物半導体下地層 5 において結晶欠陥の少ない良好な結晶性の膜となる傾向にある。

【 0 2 5 1 】

図 2 7 に示す第 3 の窒化物半導体下地層 3 の厚さ t_3 は、60 nm 以上、凸部 1 a の高さ以下（たとえば凸部 1 a の高さが $0.6 \mu\text{m}$ の場合には 600 nm 以下）であることが好ましい。厚さ t_3 が 60 nm 以上である場合には、凹部 1 b における窒化物半導体中間層 2 の領域全体を第 3 の窒化物半導体下地層 3 が覆うため、その結果、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 がそれぞれ結晶欠陥が少なく結晶性の良好な膜となる傾向にある。厚さ t_3 が凸部 1 a の高さ以下である場合には、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時において第 1 の斜めファセット面 4 r が形成されやすくなるため、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 がそれぞれ結晶欠陥の少ない良好な結晶性を有する膜となりやすい傾向にある。

【 0 2 5 2 】

また、図 2 7 に示す第 3 の窒化物半導体下地層 3 と第 1 の窒化物半導体下地層 4 とを合わせた膜の最も厚い部分の厚さ t_{34} は、基板 1 の表面の平面視において隣り合う凸部 1 a の間隔の 0.5 倍以上 2 倍以下であることが好ましい。たとえば、基板 1 の表面の平面視において隣り合う凸部 1 a の間隔が $2 \mu\text{m}$ である場合には、厚さ t_{34} は $1 \mu\text{m}$ 以上 $4 \mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。厚さ t_{34} が基板 1 の表面の平面視において隣り合う凸部 1 a の間隔の 0.5 倍以上である場合には、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面における第 1 の斜めファセット面 4 r の面積割合が第 1 の平坦領域 4 c の面積割合よりもさらに大きくなるため、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 がそれぞれ結晶欠陥の少ない良好な結晶性を有する膜となりやすい傾向にある。また、厚さ t_{34} が基板 1 の表面の平面視において隣り合う凸部 1 a の間隔の 2 倍以下である場合には、第 1 の斜めファセット 4 r が形成された状態で凸部 1 a を埋め込む傾向が小さくなるため、凸部 1 a の上方に結晶欠陥が残りにくくなる傾向にある。

【 0 2 5 3 】

第 2 の窒化物半導体下地層 5 の厚さ（下層 5 A の厚さ t_{5A} と上層 5 B の厚さ t_{5B} との合計の厚さ）は、凸部 1 a の高さの 2 倍以上であることが好ましい。たとえば、凸部 1 a の高さが $0.6 \mu\text{m}$ である場合には、 $1.2 \mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。第 2 の窒化物半導体下地層 5 の厚さが、凸部 1 a の高さの 2 倍以上である場合には、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の下層 5 A で凸部 1 a を埋め込むことができる傾向が大きくなるため、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の下層 5 A の上面 5 M が平坦となる傾向が大きくなる。

【 0 2 5 4 】

なお、第 3 の窒化物半導体下地層 3 としては、たとえば、 $\text{Al}_{x10}\text{Ga}_{y10}\text{In}_{z10}\text{N}$ ($0 < x < 10$ 、 $0 < y < 10$ 、 $0 < z < 10$ 、 $x + y + z = 10$) の式で表わされる III 族窒化物半導体からなる層を用いることができる。また、第 3 の窒化

10

20

30

40

50

物半導体下地層 3、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 は、材料としては同じ組成とし、成長条件のみを変えることが好ましい。

【 0 2 5 5 】

第 3 の窒化物半導体下地層 3 の成長時における成長モードから第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時における成長モードへの切り替え、ならびに第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時における成長モードから第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長時における成長モードへの切り替え時に、それぞれ、たとえば 2 秒 ~ 6 0 秒程度の成長中断時間を設け、その間に成長条件を変更することが好ましいが、連続的に条件を変化させてもよい。

【 0 2 5 6 】

第 3 の窒化物半導体下地層 3、第 1 の窒化物半導体下地層 4、第 2 の窒化物半導体下地層 5 としては、それぞれ、柱状結晶の集合体からなる窒化物半導体中間層 2 中の転位などの結晶欠陥を引き継がないようにするために、III 族元素として Ga を含む窒化物半導体層を用いることが好ましい。

【 0 2 5 7 】

窒化物半導体中間層 2 中の転位を引き継がないようにするためには窒化物半導体中間層 2 との界面付近で転位をループさせる必要があるが、第 3 の窒化物半導体下地層 3 が Ga を含む III 族窒化物半導体からなる場合には転位のループが生じやすい。そこで、Ga を含む III 族窒化物半導体からなる第 3 の窒化物半導体下地層 3、第 1 の窒化物半導体下地層 4、および第 2 の窒化物半導体下地層 5 をそれぞれ用いることによって、窒化物半導体中間層 2 との界面付近で転位をループ化して閉じ込めて、窒化物半導体中間層 2 から第 1 の窒化物半導体下地層 4 に転位が引き継がれるのを抑えることができる傾向にある。

【 0 2 5 8 】

また、第 3 の窒化物半導体下地層 3 の形成直前の窒化物半導体中間層 2 の表面に熱処理を行なってもよい。この熱処理によって、窒化物半導体中間層 2 の表面の清浄化と結晶性の向上とを図ることができる傾向にある。この熱処理は、たとえば MOCVD 法が用いられる MOCVD 装置内で行なうことができ、熱処理時の雰囲気ガスとしては、たとえば水素ガスや窒素ガスなどを用いることができる。

【 0 2 5 9 】

また、上記の熱処理時における窒化物半導体中間層 2 の分解を防ぐためには、熱処理時の雰囲気ガスにアンモニアガスを混合してもよい。また、上記の熱処理は、たとえば 9 0 0 以上 1 2 5 0 以下の温度でたとえば 1 分間以上 6 0 分間以下の時間行なうことができる。

【 0 2 6 0 】

第 3 の窒化物半導体下地層 3、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 の下層 5 A をそれぞれアンドープとし、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上層 5 B に n 型ドープとすることが好ましいが、第 3 の窒化物半導体下地層 3、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 の下層 5 A をそれぞれ n 型ドープとしてもよい。n 型ドープとする場合には、n 型ドーパントが $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下の範囲でドーピングされていてもよい。

【 0 2 6 1 】

n 型ドーパントとしては、たとえば、シリコン、ゲルマニウムおよび錫からなる群から選択された少なくとも 1 つなどを用いることができ、なかでもシリコンを用いることが好ましい。n 型ドーパントにシリコンを用いる場合には、n 型ドーピングガスとしてはシランガスまたはジシランガスを用いることが好ましい。

【 0 2 6 2 】

第 3 の窒化物半導体下地層 3、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 のそれぞれの成長時における基板 1 の温度は、8 0 0 以上 1 2 5 0 以下であることが好ましく、9 0 0 以上 1 1 5 0 以下であることがより好ましい。第 3 の窒化物半導体下地層 3、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 のそれぞれの成長時における基板 1 の温度が 8 0 0 以上 1 2 5 0 以下である場合、特に 9

10

20

30

40

50

00 以上1150 以下である場合には、結晶欠陥の少ない結晶性に優れた第3の窒化物半導体下地層3、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5を成長させることができる傾向にある。

【0263】

次に、たとえばMOCVD法によって、第2の窒化物半導体下地層5の表面上にn型窒化物半導体コンタクト層7を形成する。なお、n型窒化物半導体コンタクト層7は、その少なくとも一部が第2の窒化物半導体下地層5の表面に接するようにして設けられていればよい。

【0264】

第3の窒化物半導体下地層3と、第1の窒化物半導体下地層4と、第2の窒化物半導体下地層5と、n型窒化物半導体コンタクト層7との厚さの合計は、4 μm 以上20 μm 以下とすることが好ましく、4 μm 以上15 μm 以下とすることがより好ましい。第3の窒化物半導体下地層3と、第1の窒化物半導体下地層4と、第2の窒化物半導体下地層5と、n型窒化物半導体コンタクト層7との厚さの合計が4 μm 以上である場合には、これらの層の結晶性が良好となり、これらの層の表面にピット(pit)が生じにくくなる傾向にある。一方、第3の窒化物半導体下地層3と、第1の窒化物半導体下地層4と、第2の窒化物半導体下地層5と、n型窒化物半導体コンタクト層7との厚さの合計が15 μm 以下である場合には、基板1の反りが大きくなり、ウエハの割れやウエハのフォトリソグラフィ加工における露光ムラが起こりにくくなり、素子の収率が高くなる傾向にある。また、第3の窒化物半導体下地層3と、第1の窒化物半導体下地層4と、第2の窒化物半導体下地層5と、n型窒化物半導体コンタクト層7との厚さの合計が、特に4 μm 以上15 μm 以下である場合には、これらの層の結晶性を良好なものとすることができるとともに、基板1の反りの発生が抑えられて、素子の収率低下を有効に防止することができる傾向がさらに大きくなる。なお、これらの層の厚さの合計のうちn型窒化物半導体コンタクト層7の厚さの上限は特に限定されるものではない。

【0265】

次に、たとえばMOCVD法によって、n型窒化物半導体コンタクト層7の表面上にn型窒化物半導体超格子層92を形成する。n型窒化物半導体超格子層92の主な働きは、n型窒化物半導体コンタクト層7の下から上に伸びる結晶欠陥が窒化物半導体活性層11まで伸びるのを、n型窒化物半導体超格子層92の超格子を構成する各層間の界面を用いて抑制することにある。

【0266】

n型窒化物半導体超格子層92としては、たとえば厚さ2.5nmの $\text{In}_{x11}\text{Ga}_{1-x11}\text{N}$ ($0 < x11 < 1$ 、例えば $x11 = 0.02$)からなる低バンドギャップ層と、たとえば厚さ2.5nmのGaNからなる高バンドギャップ層とを交互に10ペア積層した超格子構造を用いることができるが、低バンドギャップ層と高バンドギャップ層との組成はこれに限られない。低バンドギャップ層は組成に揮発性のInを含んでいるため、n型窒化物半導体超格子層92全体あるいは少なくとも低バンドギャップ層についてはn型窒化物半導体コンタクト層7よりも成長温度を下げるのが好ましい。成長温度は一定でもよいが、例えば低バンドギャップ層では低い温度で、高バンドギャップ層では高い温度で成長してもよい。なお、n型窒化物半導体超格子層92を省略し、n型窒化物半導体コンタクト層7上に窒化物半導体活性層11を形成してもよい。この場合には、素子構造が単純となるため特性のばらつきが低減する傾向にある。

【0267】

n型窒化物半導体超格子層92中の低バンドギャップ層、高バンドギャップ層のいずれか一方あるいは両方に、n型ドーピングをすることが好ましく、n型ドーパントのドーピング濃度については、 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以下であることが好ましく、 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以下であることがより好ましく、 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以下とすることがさらに好ましい。この場合には、n型窒化物半導体超格子層92の良好な結晶性を維持し、かつ素子の動作電圧を低減することができ

10

20

30

40

50

る傾向にある。

【0268】

次に、たとえばMOCVD法によって、n型窒化物半導体超格子層92の表面上に窒化物半導体活性層11、p型窒化物半導体クラッド層13およびp型窒化物半導体コンタクト層15をこの順に形成する。

【0269】

次に、p型窒化物半導体コンタクト層15の表面上にたとえばITO(Indium Tin Oxide)からなる透光性電極層19を形成する。

【0270】

次に、p側電極21の形成後の積層体の一部をエッチングにより除去することによって、n型窒化物半導体コンタクト層7の表面の一部を露出させる。

10

【0271】

次に、透光性電極19の表面上にp側電極21を、n型窒化物半導体コンタクト層7の露出した表面上にn側電極20を同時に形成する。p側電極21およびn側電極20としては、たとえば、ニッケル層、アルミニウム層、チタン層および金層の積層膜を形成することができる。

【0272】

なお、p側電極21およびn側電極20を同時に形成せずに、別に形成してもよく、その場合に両電極の材料を変えることにより、それぞれp側電極21およびn側電極20として最適な材料を選択することができる。

20

【0273】

その後、n側電極20の形成後の積層体の全面にSiO₂などの絶縁保護膜23を形成し、p側電極21およびn側電極20が露出するように絶縁保護膜23に開口部を設け、複数の窒化物半導体発光ダイオード素子200が形成されたウエハを個別の素子に分割することによって、実施の形態2-1の窒化物半導体発光ダイオード素子200を作製することができる。

【0274】

以上のようにして作製した実施の形態2-1の窒化物半導体発光ダイオード素子200においては、基板1の表面に設けられた窒化物半導体中間層2の表面上に、2.5次元成長モードで第3の窒化物半導体下地層3を成長させ、3次元成長モードで第1の窒化物半導体下地層4を成長させ、2次元成長モードで第2の窒化物半導体下地層5を成長させる。これにより得られたX線ロッキングカーブ半値幅の狭い良好な結晶性を有し、かつ平坦な第2の窒化物半導体下地層5の上面5U上に、n型窒化物半導体コンタクト層7、n型窒化物半導体超格子層92、窒化物半導体活性層11、p型窒化物半導体クラッド層13およびp型窒化物半導体コンタクト層15がこの順序で積層される。そのため、窒化物半導体活性層11などの窒化物半導体下地層上の各層については転位密度が低くなり、優れた結晶性を有している。

30

【0275】

したがって、このような優れた結晶性を有する窒化物半導体層から形成された実施の形態2-1の窒化物半導体発光ダイオード素子200は、動作電圧が低く、発光出力の高い素子となる。

40

【0276】

実施の形態2-1の窒化物半導体発光ダイオード素子200をペアチップ(後述の樹脂封止を行わない)評価用素子とし、10個の素子に30mAの電流を流したところ、平均して光出力41mW、動作電圧3.0Vおよび発光波長445nmの動作電圧が低く、発光出力の高い素子が得られることが確認された。

【0277】

図36に、実施の形態2-1の窒化物半導体発光ダイオード素子200を用いた発光装置210の一例の模式的な断面図を示す。

【0278】

50

ここで、発光装置 210 は、実施の形態 2 - 1 の窒化物半導体発光ダイオード素子 200 を第 2 のリードフレーム 31 上に設置した構成を有している。そして、窒化物半導体発光ダイオード素子 200 の p 側電極 21 と第 1 のリードフレーム 30 とが第 1 のワイヤ 33 で電氣的に接続されているとともに、窒化物半導体発光ダイオード素子 200 の n 側電極 20 と第 2 のリードフレーム 31 とが第 2 のワイヤ 34 で電氣的に接続されている。さらに、透明なモールド樹脂 35 で窒化物半導体発光ダイオード素子 200 がモールドされていることによって、発光装置 210 は砲弾型の形状とされている。

【0279】

図 36 に示す構成の発光装置 210 は、実施の形態 2 - 1 の窒化物半導体発光ダイオード素子 200 を用いていることから、動作電圧が低く、発光出力の高い発光装置とすることができる。

10

【0280】

<実施の形態 2 - 2 >

実施の形態 2 は、実施の形態 1 の窒化物半導体構造（基板 1、窒化物半導体中間層 2、第 3 の窒化物半導体下地層 3、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 の積層構造）を用いた電子デバイスである窒化物半導体トランジスタ素子であることを特徴としている。

【0281】

図 37 に、実施の形態 2 - 2 の窒化物半導体トランジスタ素子 400 の模式的な断面図を示す。窒化物半導体トランジスタ素子 400 は、凸部 1a が等価な 3 つの a (s u b) 軸方向に配された c 面を主面とするサファイア基板からなる基板 1 と、基板 1 の表面上に、順次積層された、AlN などからなる窒化物半導体中間層 2 と、アンドープ GaN などからなる第 3 の窒化物半導体下地層 3 と、アンドープ GaN などからなる第 1 の窒化物半導体下地層 4 と、アンドープ GaN などからなる第 2 の窒化物半導体下地層 5 と、からなる窒化物半導体構造を有している。

20

【0282】

そして、結晶欠陥の少ない良好な結晶性を有する第 2 の窒化物半導体下地層 5 の平坦な表面 5U 上にアンドープ GaN などからなる窒化物半導体電子走行層 71 が積層され、窒化物半導体電子走行層 71 の表面上に n 型 AlGaIn などからなる n 型窒化物半導体電子供給層 73 が積層されている。

30

【0283】

n 型窒化物半導体電子供給層 73 の表面上にはゲート電極 77 が備えられており、ゲート電極 77 の両側に n 型 GaN などからなるソースコンタクト層 75S とドレインコンタクト層 75D とが備えられている。また、ソースコンタクト層 75S 上にソース電極 78S が備えられており、ドレインコンタクト層 75D 上にドレイン電極 78D が備えられている。

【0284】

以下、実施の形態 2 - 2 の窒化物半導体トランジスタ素子 400 の製造方法の一例について説明する。まず、実施の形態 2 - 1 と同様にして、凸部 1a および凹部 1b を有する基板 1 の表面上に、反応性スパッタ法によって AlN からなる窒化物半導体中間層 2 を形成する。

40

【0285】

次に、MOCVD 法によって、窒化物半導体中間層 2 の表面上に、第 3 の斜めファセット面 3f と第 3 の平坦領域 3c とが現れる 2 . 5 次元成長モードでアンドープ GaN からなる第 3 の窒化物半導体下地層 3 を成長させ、3 次元成長モードでアンドープ GaN からなる第 1 の窒化物半導体下地層 4 を成長させる。

【0286】

ここで、第 1 の窒化物半導体下地層 4 は、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面の平面視において、a (s u b) 軸方向に現れる 2 つの第 1 の斜めファセット面 4r と、a (s u b) 軸方向に対して + 60 ° の角度で傾いた方向および a (s u b) 軸方向に対して - 6

50

0°の角度で傾いた方向にそれぞれ2つずつ現れる第1の斜めファセット面4rと、が現れる条件で成長させる。

【0287】

次に、MOCVD法によって、第1の窒化物半導体下地層4の表面上にアンドープGaNからなる第2の窒化物半導体下地層5を2次元成長モードで成長させる。ここで、第2の窒化物半導体下地層5は、第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4rを埋め込んで平坦な上面5Uが現れる条件で成長させる。

【0288】

次に、MOCVD法によって、第2の窒化物半導体下地層5の平坦な上面5U上にn型Al_xGa_{1-x}Nからなる窒化物半導体電子走行層71を積層し、窒化物半導体電子走行層71の表面上にn型窒化物半導体電子供給層73を積層する。

10

【0289】

その後、図37に示すように、n型窒化物半導体電子供給層73の表面上に、ソースコンタクト層75Sおよびドレインコンタクト層75Dを形成した後に、ソース電極78S、ドレイン電極78Dおよびゲート電極77をそれぞれ形成する。以上により、実施の形態2-2の窒化物半導体トランジスタ素子400を作製することができる。

【0290】

実施の形態2-2の窒化物半導体トランジスタ素子400においては、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a(sub)軸方向に現れる2つの第1の斜めファセット面4rと、a(sub)軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa(sub)軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向にそれぞれ2つずつ現れる第1の斜めファセット面4rと、が現れる条件で第1の窒化物半導体下地層4を成長させている。これにより、特に、窒化物半導体電子走行層71の最上面の2次元電子走行領域における結晶欠陥が低減するため、電子の移動度を向上させることができる。

20

【0291】

したがって、実施の形態2-2の窒化物半導体トランジスタ素子400においても、窒化物半導体中間層2の表面上に積層されたそれぞれの層については転位密度が低く結晶性に優れた層とすることができるため、電子移動度などの特性が向上した素子とすることができる。

【0292】

30

以上のように、本実施の形態によれば、凸部1aおよび凹部1bを有する基板1の表面上に、まず、第3の窒化物半導体下地層3を2.5次元成長モードで成長させ、次に、第1の窒化物半導体下地層4を3次元成長モードで成長させ、その後、第2の窒化物半導体下地層5を2次元成長モードで成長させて、第2の窒化物半導体下地層5を転位密度が低減して結晶性が良好な下地層としている。

【0293】

これにより、第2の窒化物半導体下地層5の上面5U上に積層される窒化物半導体層のMOCVD法による成長中およびそれ以降のプロセス中においてウエハの割れおよびクラックの発生を抑制しつつ、窒化物半導体層のX線ロックアップの半値幅等で表わされる結晶性を向上することができるとともに、CL法やEPD等で表される欠陥密度を低減することができるため、発光効率および電子移動度等で表されるデバイス特性を向上させた窒化物半導体素子および窒化物半導体素子の下地となる窒化物半導体構造を提供することができる。

40

【0294】

なお、窒化物半導体中間層2としてはスパッタ法により形成したもののみ記載したが、この方法に限られるものではなく、たとえばMOCVD法を用い低温で形成したいわゆる低温パuffers層としてもよい。また、基板1としてGaN基板を用いる場合には窒化物半導体中間層2を省略することもできる。

【0295】

なお、実施の形態2-1および2-2における上記以外の説明は、実施の形態1-1お

50

よび 1 - 2 と同様であるため、その説明については省略する。

【 0 2 9 6 】

< 実施の形態 3 - 1 >

以下、実施の形態 3 - 1 の窒化物半導体構造の製造方法について説明する。実施の形態 3 - 1 の窒化物半導体構造の製造方法は、基板を回転させながら、水素ガスを含むキャリアガスを用いた縦型 MOCVD 装置による MOCVD 法によって第 1 の窒化物半導体下地層を成長させ、基板の単位時間当たりの回転数およびキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比を限定した点に特徴を有している。また、本実施の形態の窒化物半導体構造の製造方法においては、後述する各工程間に他の工程が含まれていてもよいことは言うまでもない。

10

【 0 2 9 7 】

まず、図 3 8 の模式的断面図に示すように、基板 1 を準備する工程を行なう。ここで、基板 1 としては、たとえば、三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなる基板 1 を準備することができる。三方晶コランダムあるいは六方晶の結晶からなる基板 1 としては、たとえば、サファイア (Al_2O_3) 単結晶、 AlN 単結晶または GaN 単結晶などからなる基板を用いることができる。

【 0 2 9 8 】

また、基板 1 の表面 4 0 は、c 面または c 面に対して 5° 以内の傾斜を有する表面であってもよく、傾斜の方向は、たとえば、 $m(sub)$ 軸 ($< 1 - 1 0 0 >$) 方向のみであってもよく、 $a(sub)$ 軸 ($< 1 1 - 2 0 >$) 方向のみであってもよく、あるいは両方向を合成した方向であってもよい。より具体的には、基板 1 としては、基板 1 の表面 4 0 が c 面 (法線が c 軸の面) から基板の $m(sub)$ 軸 $< 1 - 1 0 0 >$ 方向に $0.15^\circ \sim 0.35^\circ$ 傾斜したものを準備することができる。

20

【 0 2 9 9 】

次に、図 3 9 の模式的断面図に示すように、基板 1 の表面 4 0 に、凹部 1 b と、凹部 1 b の間に設けられた凸部 1 a と、を形成する。このような基板 1 の表面の凸部 1 a および凹部 1 b は、たとえば、基板 1 の表面 4 0 上に凸部 1 a の平面配置を規定するマスクを形成するパターンニング工程と、当該パターンニング工程によって形成したマスクを用いて基板 1 の表面 4 0 をエッチングして凹部 1 b を形成する工程とを含む工程により形成することができる。ここで、パターンニング工程は、一般的なフォトリソグラフィ工程で行なうことができる。エッチング工程は、たとえば、ドライエッチング法やウエットエッチング法で行なうことができる。しかしながら、凸部 1 a の形状が後述する先端部を備える形状とするためには、凸部 1 a の形状を制御しやすいドライエッチング法で行なうことが好ましい。

30

【 0 3 0 0 】

次に、図 5 の模式的断面図に示すように、基板 1 の表面上に窒化物半導体中間層 2 を形成する。

【 0 3 0 1 】

次に、図 6 の模式的断面図に示すように、窒化物半導体中間層 2 の表面上に第 1 の窒化物半導体下地層 4 を形成し、図 7 の模式的断面図に示すように、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面上に第 2 の窒化物半導体下地層 5 を形成する。

40

【 0 3 0 2 】

ここで、第 1 の窒化物半導体下地層 4 および第 2 の窒化物半導体下地層 5 は、それぞれ、たとえば、窒化物半導体中間層 2 の形成後の基板 1 を回転させながら、水素ガスを含むキャリアガスと、III 族原料ガスと V 族原料ガスとを含む原料ガスとを供給し、縦型 MOCVD 装置を用いた MOCVD 法によって、窒化物半導体中間層 2 の表面上に順次形成することができる。

【 0 3 0 3 】

第 1 の窒化物半導体下地層 4 は第 1 の斜めファセット面 4 r が形成されるファセット成長モードで成長され、第 2 の窒化物半導体下地層 5 は第 1 の斜めファセット面 4 r と下面

50

5 bが接するように第1の斜めファセット面4 rを埋め込んで平坦な上面5 aを形成する埋込成長モードで成長される。これにより、結晶欠陥が少なく結晶性の高い平坦な上面5 aを有する第2の窒化物半導体下地層5を形成することができる。

【0304】

図8に、図6に示す第1の窒化物半導体下地層4の表面の一例の模式的な拡大平面図を示す。図8に示すように、第1の窒化物半導体下地層4は、凸部1 aの外側において、凸部1 aを取り囲む6つの第1の斜めファセット面4 rを有している。第1の斜めファセット面4 rは、図8に示す平面視において、a (s u b) 軸方向に2つ現れ、a (s u b) 軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa (s u b) 軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向(いずれもu方向)にそれぞれ2つずつ現れている(この場合をケース3-1とする。)。また、図8のB-Bに沿った線の断面に現れる第1の斜めファセット面4 rは、第1の斜めファセット面4 rの存在する範囲内では、その断面の奥行き方向においても同様に現れる面である。

10

【0305】

また、1つの凸部1 aを取り囲む第1の斜めファセット面4 rと、他の1つの凸部1 aを取り囲む第1の斜めファセット面4 rとは、第1の窒化物半導体下地層4の上面4 cで連結されている。

【0306】

第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4 rは、第1の窒化物半導体下地層4の上面4 cから基板1の凸1 aに向かって下りながら傾斜している。ここで、6つの第1の斜めファセット面4 rのうち、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a (s u b) 軸方向に現れる2つの第1の斜めファセット面4 rは、a (s u b) 軸方向(<11-20>方向)に対して斜め上方に傾斜しており、その傾斜した方向にファセット面が伸長している。また、同様に、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a (s u b) 軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa (s u b) 軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向にそれぞれ2つずつ現れる第1の斜めファセット面4 rも、a (s u b) 軸方向に対して+60°の角度で傾いた方向およびa (s u b) 軸方向に対して-60°の角度で傾いた方向に対してそれぞれ斜め上方に傾斜しており、その傾斜した方向にファセット面が伸長している。

20

【0307】

また、第1の窒化物半導体下地層4の第1の斜めファセット面4 rは、窒化物半導体中間層2上において、凸部1 aを中心として、凸部1 aの外側において凸部1 aを取り囲む6つのファセット面となっている。

30

【0308】

また、第1の窒化物半導体下地層4の表面の平面視において、a (s u b) 軸方向およびu方向に現れる第1の斜めファセット面4 r以外のファセット面がほとんど現れないことが好ましい。より具体的には、上記の式(I)で表わされる第1の斜めファセット面4 rの面積比率が80%以上であることが好ましく、90%以上であることがより好ましい。第1の斜めファセット面4 rの面積比率が80%以上である場合、特に90%以上である場合には、第2の窒化物半導体下地層5の上面5 a上に積層される窒化物半導体層の成長中およびそれ以降のプロセス中においてウエハの割れおよびクラックの発生を抑制することができる傾向にある。また、X線ロッキングカーブの半値幅等で表わされる窒化物半導体層の結晶性も向上することができる傾向にある。さらには、カソードルミネッセンス法またはエッチピット密度等で評価できる欠陥密度も低減する傾向にある。具体的には、GaN下地層の(004)面におけるX線ロッキングカーブの半値幅(arc sec)を30~40 arc secとすることができる。また、CL法により得られる暗点密度を $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 以下とすることができる。

40

【0309】

上記のような第1の斜めファセット面4 rが現れる第1の窒化物半導体下地層4のファセット成長モードは、縦型MOCVD装置を用いたMOCVD法による第1の窒化物半導

50

体下地層 4 の成長時における基板 1 の単位時間当たりの回転数を 400 RPM 以上 1000 RPM 以下とし、かつ第 1 の窒化物半導体下地層 4 の MOCVD 法による成長時に供給されるキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比を 0.7 以上 1 以下とすることにより実現することができる。

【0310】

これは、本発明者が鋭意検討した結果、凸部と凹部とを有する基板 1 の表面上に形成された窒化物半導体中間層 2 上に第 1 の窒化物半導体下地層 4 を縦型 MOCVD 装置を用いた MOCVD 法により成長させる際に、基板 1 の単位時間当たりの回転数を 400 RPM 以上 1000 RPM 以下とし、かつ第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時に供給されるキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比を 0.7 以上 1 以下とすることによって、第 1 の窒化物半導体下地層 4 を均一性の高い表面が連なる連続膜とすることができることを見い出したことによるものである。

10

【0311】

このような連続膜である第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面上に第 2 の窒化物半導体下地層 5 を MOCVD 法により成長させた場合には、結晶欠陥が少なく高い結晶性を有し、かつ高い平坦性を有する第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5a を得ることができる。そのため、本実施の形態においては、このような高い結晶性および高い平坦性を有する第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5a 上に、優れた結晶性を有する窒化物層を再現性良く形成することができる。

20

【0312】

なお、「RPM」は、“Rotation Per Minute”の略であり、1 分間当たりの基板 1 の回転数である。また、「縦型 MOCVD 装置」は、原料ガスを基板面に対して実質的に垂直な方向に供給する反応炉である。

【0313】

上記のような第 1 の斜めファセット面 4r が現れる第 1 の窒化物半導体下地層 4 のファセット成長モード、および第 1 の斜めファセット面 4r を埋め込んで平坦性の高い上面 5a を形成する第 2 の窒化物半導体下地層 5 の埋込成長モードは、それぞれ、以下の (i-3)、(ii-3)、(iii-3)、(iv-3) および (v-3) からなる群から選択された少なくとも 1 つの条件を満たすように行なわれることが好ましく、以下の (i-3)、(ii-3)、(iii-3)、(iv-3) および (v-3) のすべての条件を満たすように行なわれることがさらに好ましい。第 1 の窒化物半導体下地層 4 のファセット成長モードおよび第 2 の窒化物半導体下地層 5 の埋込成長モードが、以下の (i-3) ~ (v-3) の少なくとも 1 つを満たす条件で行なわれる場合、特に (i-3) ~ (v-3) のすべてを満たす条件で行なわれる場合には、さらに高い結晶性および平坦性を有する第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5a を得ることができるため、その上方に、さらに優れた結晶性を有する窒化物層をさらに再現性良く形成することができる傾向にある。

30

【0314】

(i-3) 第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時の成長温度を第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長時の成長温度よりも低くする。

【0315】

(ii-3) 第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時の圧力を第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長時の圧力よりも高くする。

40

【0316】

(iii-3) 第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時に供給される原料ガスの V / III 比 (原料ガス中における III 族元素に対する V 族元素のモル比) を第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長時に供給される原料ガスの V / III 比よりも高くする。

【0317】

(iv-3) 第 1 の窒化物半導体下地層 4 の成長時の基板 1 の単位時間当たりの回転数を、第 2 の窒化物半導体下地層 5 の成長時の基板 1 の単位時間当たりの回転数よりも小さくする。

50

【0318】

(v-3) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比を、第2の窒化物半導体下地層5の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比以上とする。

【0319】

上記の(i-3)、(ii-3)、(iii-3)、(iv-3)および(v-3)のそれぞれの具体的な条件は、たとえば、以下のように示される。

【0320】

(i-3) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時における基板1の温度1000 に対して、第2の窒化物半導体下地層5の成長時における基板1の温度が1080 である。 10

【0321】

(ii-3) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時における雰囲気圧力66.6 kPa に対して、第2の窒化物半導体下地層5の成長時における雰囲気圧力が17.3 kPa である。

【0322】

(iii-3) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時に供給される原料ガスのV/III比1165 に対して、第2の窒化物半導体下地層5の成長時に供給される原料ガスのV/III比が676 である。

【0323】

(iv-3) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時の基板1の単位時間当たりの回転数600 RPM に対して、第2の窒化物半導体下地層5の成長時の基板1の単位時間当たりの回転数1200 RPM である。 20

【0324】

(v-3) 第1の窒化物半導体下地層4の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比 $(\text{水素ガスの体積}) / (\text{キャリアガスの全体積})$ 1 に対して、第2の窒化物半導体下地層5の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比0.7 以上1 以下である。

【0325】

ここで、縦型MOCVD法を用いたMOCVD法による第1の窒化物半導体下地層4の成長時における基板1の単位時間当たりの回転数を400 RPM 以上1000 RPM 以下とし、かつ第1の窒化物半導体下地層4の成長時に供給されるキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比を0.7 以上1 以下にするとともに、(i-3)、(ii-3)、(iii-3)、(iv-3)および(v-3)からなる群から選択された少なくとも1つの条件を満たした場合には、第1の窒化物半導体下地層4の静電耐圧テスト(ESDテスト)の歩留りをより高くすることができる傾向にある。なお、ESDテストは逆電圧1 kVのHBM(ヒューマンボディーモデル)条件にて行なうものとする。 30

【0326】

以下、図12~図18を参照して、実施の形態3-1の窒化物半導体素子の製造方法について説明する。なお、以下においても、後述する工程間に他の工程が含まれていてもよいことは言うまでもない。 40

【0327】

まず、図12に示すように、たとえばMOCVD法によって、上記のようにして作製した第2の窒化物半導体下地層5の上面5a上にn型窒化物半導体コンタクト層7を形成する。

【0328】

次に、図13に示すように、たとえばMOCVD法によって、n型窒化物半導体コンタクト層7の表面上にn型窒化物半導体クラッド層9を形成する。

【0329】

次に、図14に示すように、たとえばMOCVD法によって、n型窒化物半導体クラッド層9の表面上に窒化物半導体活性層11を形成する。 50

【0330】

次に、図15に示すように、たとえばMOCVD法によって、窒化物半導体活性層11の表面上にp型窒化物半導体クラッド層13を形成する。

【0331】

なお、p型窒化物半導体クラッド層13としては、上述のように、たとえば、 $Al_{x8}Ga_{y8}In_{z8}N(0 < x8 < 1, 0 < y8 < 1, 0 < z8 < 1, x8 + y8 + z8 = 0)$ の式で表わされるIII族窒化物半導体にp型ドーパントをドーピングした層などを用いることができるが、 $Al_{x8a}Ga_{1-x8a}N(0 < x8a < 0.4, \text{好ましくは} 0.1 < x8a < 0.3)$ の式で表わされるIII族窒化物半導体からなる層(A層)と、A層よりもバンドギャップの小さい $Al_{x8b}Ga_{y8b}In_{z8b}N(0 < x8b < 1, 0 < y8b < 1, 0 < z8b < 1, x8b + y8b + z8b = 0)$ の式で表わされるIII族窒化物半導体からなる層(B層)とを交互に1層ずつ積層した超格子構造を有する層を用いることもできる。なお、当該超格子構造においては、A層およびB層のそれぞれにp型ドーパントがドーピングされていてもよく、A層またはB層の一方のみにp型ドーパントがドーピングされていてもよい。

10

【0332】

次に、図16に示すように、たとえばMOCVD法によって、p型窒化物半導体クラッド層13の表面上にp型窒化物半導体コンタクト層15を形成する。

【0333】

次に、図17に示すように、p型窒化物半導体コンタクト層15の表面上にたとえばITO(Indium Tin Oxide)からなる透光性電極層19を形成した後に、透光性電極層19の表面上にp側電極21を形成する。

20

【0334】

次に、図18に示すように、p側電極21の形成後の積層体の一部をエッチングにより除去することによって、n型窒化物半導体コンタクト層7の表面の一部を露出させる。

【0335】

次に、図19に示すように、n型窒化物半導体コンタクト層7の露出した表面上にn側電極20を形成する。

【0336】

その後、図40の模式的断面図に示すように、n側電極20の形成後の積層体の全面に SiO_2 などの絶縁保護膜23を形成し、p側電極21およびn側電極20が露出するように絶縁保護膜23に開口部を設け、複数の窒化物半導体発光ダイオード素子500が形成されたウエハを個別の素子に分割することによって、図40に示される実施の形態3-1の窒化物半導体発光ダイオード素子500を作製することができる。

30

【0337】

以上のようにして作製した実施の形態3-1の窒化物半導体発光ダイオード素子500においては、均一性の高い表面が連なる連続膜である第1の窒化物半導体下地層4の表面上の高い結晶性および高い平坦性を有する第2の窒化物半導体下地層5の上面5a上に、n型窒化物半導体コンタクト層7、n型窒化物半導体クラッド層9、窒化物半導体活性層11、p型窒化物半導体クラッド層13およびp型窒化物半導体コンタクト層15がこの順序で積層されている。

40

【0338】

そのため、結晶欠陥が少なく結晶性の高い平坦な第2の窒化物半導体下地層5の上面5a上に積層された、n型窒化物半導体コンタクト層7、n型窒化物半導体クラッド層9、窒化物半導体活性層11、p型窒化物半導体クラッド層13およびp型窒化物半導体コンタクト層15については転位密度が低くなり、優れた結晶性を有している。

【0339】

したがって、このような優れた結晶性を有する窒化物半導体層から形成された実施の形態3-1の窒化物半導体発光ダイオード素子500は、動作電圧が低く、発光出力の高い素子となる。

50

【0340】

なお、ケース3-1の条件で作成された窒化物半導体発光ダイオード素子500をペアチップ（後述の樹脂封止を行わない）評価用素子とし、10個の素子に30mAの電流を流したところ、平均して光出力39mW、動作電圧3.0Vおよび発光波長455nmの動作電圧が低く、発光出力の高い素子が得られることが確認された。

【0341】

また、実施の形態3-1の窒化物半導体発光ダイオード素子500を用いて、図4-1に示す構成の実施の形態3-1の発光装置510を製造してもよい。

【0342】

ここで、実施の形態3-1の発光装置510は、たとえば、実施の形態3-1の窒化物半導体発光ダイオード素子500を第2のリードフレーム31上に設置し、窒化物半導体発光ダイオード素子500のp側電極21と第1のリードフレーム30とを第1のワイヤ33で電氣的に接続するとともに、窒化物半導体発光ダイオード素子500のn側電極20と第2のリードフレーム31とを第2のワイヤ34で電氣的に接続する。そして、透明なモールド樹脂35で窒化物半導体発光ダイオード素子500をモールドすることによって、砲弾型の形状の発光装置510を製造することができる。

10

【0343】

図4-1に示す構成の実施の形態3-1の発光装置510は、実施の形態3-1の窒化物半導体発光ダイオード素子500を用いていることから、動作電圧が低く、発光出力の高い発光装置とすることができる。

20

【0344】

<実施の形態3-2>

実施の形態3-2は、実施の形態3-1により製造された窒化物半導体構造（基板1、窒化物半導体中間層2、第1の窒化物半導体下地層4および第2の窒化物半導体下地層5の積層構造）を用いた電子デバイスである窒化物半導体トランジスタ素子であることを特徴としている。

【0345】

図4-2に、実施の形態3-2の窒化物半導体トランジスタ素子600の模式的な断面図を示す。窒化物半導体トランジスタ素子600は、凸部1aが等価な3つのa(sub)軸方向に配されたc面を主面とするサファイア基板からなる基板1と、基板1の表面上に、順次積層された、AlNなどからなる窒化物半導体中間層2と、アンドープGaNなどからなる第1の窒化物半導体下地層4と、アンドープGaNなどからなる第2の窒化物半導体下地層5と、からなる窒化物半導体構造を有している。

30

【0346】

そして、結晶欠陥の少ない良好な結晶性を有する第2の窒化物半導体下地層5の平坦な上面5a上にアンドープGaNなどからなる窒化物半導体電子走行層71が積層され、窒化物半導体電子走行層71の表面上にn型AlGaNなどからなるn型窒化物半導体電子供給層73が積層されている。

【0347】

n型窒化物半導体電子供給層73の表面上にはゲート電極77が備えられており、ゲート電極77の両側にn型GaNなどからなるソースコンタクト層75Sとドレインコンタクト層75Dとが備えられている。また、ソースコンタクト層75S上にソース電極78Sが備えられており、ドレインコンタクト層75D上にドレイン電極78Dが備えられている。

40

【0348】

以下、実施の形態3-2の窒化物半導体トランジスタ素子600の製造方法の一例について説明する。まず、実施の形態3-1と同様にして、凸部1aおよび凹部1bを有する基板1の表面上に、反応性スパッタ法によってAlNからなる窒化物半導体中間層2を形成する。

【0349】

50

次に、実施の形態 3 - 1 と同様の条件の MOCVD 法によって、窒化物半導体中間層 2 の表面上に、アンドープ GaN からなる第 1 の窒化物半導体下地層 4 を成長させる。ここで、第 1 の窒化物半導体下地層 4 は、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面の平面視において、a (sub) 軸方向に現れる 2 つの第 1 の斜めファセット面 4 r と、a (sub) 軸方向に対して +60° の角度で傾いた方向および a (sub) 軸方向に対して -60° の角度で傾いた方向にそれぞれ 2 つずつ現れる第 1 の斜めファセット面 4 r と、が現れる条件 (たとえば、ケース 3 - 1 の条件) で成長させる。

【0350】

次に、実施の形態 1 と同様の条件の MOCVD 法によって、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面上にアンドープ GaN からなる第 2 の窒化物半導体下地層 5 を成長させる。ここで、第 2 の窒化物半導体下地層 5 は、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の第 1 の斜めファセット面 4 r を埋め込んでほぼ平坦な上面 5 a が現れる条件で成長させる。

10

【0351】

次に、MOCVD 法によって、第 2 の窒化物半導体下地層 5 のほぼ平坦な上面 5 a 上に n 型 $Al_xGa_{1-x}N$ からなる窒化物半導体電子走行層 7 1 を積層し、窒化物半導体電子走行層 7 1 の表面上に n 型窒化物半導体電子供給層 7 3 を積層する。

【0352】

その後、図 4 2 に示すように、n 型窒化物半導体電子供給層 7 3 の表面上に、ソースコンタクト層 7 5 S およびドレインコンタクト層 7 5 D を形成した後に、ソース電極 7 8 S、ドレイン電極 7 8 D およびゲート電極 7 7 をそれぞれ形成する。以上により、実施の形態 3 - 2 の窒化物半導体トランジスタ素子 6 0 0 を作製することができる。

20

【0353】

実施の形態 3 - 2 の窒化物半導体トランジスタ素子 6 0 0 においても、実施の形態 3 - 1 と同様に、均一性の高い表面が連なる連続膜である第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面上の高い結晶性および高い平坦性を有する第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5 a 上に窒化物半導体電子走行層 7 1 および n 型窒化物半導体電子供給層 7 3 などの窒化物半導体層を積層している。これにより、特に、窒化物半導体電子走行層 7 1 の最上面の 2 次元電子走行領域における結晶欠陥が低減するため、電子の移動度を向上させることができる。

【0354】

したがって、実施の形態 3 - 2 の窒化物半導体トランジスタ素子 6 0 0 においても、窒化物半導体中間層 2 の表面上に積層されたそれぞれの層については転位密度が低く結晶性に優れた層とすることができるため、電子移動度などの特性が向上した素子とすることができる。

30

【0355】

以上のように、本実施の形態によれば、凸部 1 a および凹部 1 b を有する基板 1 上に均一性の高い表面が連なる連続膜である第 1 の窒化物半導体下地層 4 の表面を形成することによって、高い結晶性および高い平坦性を有する第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5 a を得ている。このような第 2 の窒化物半導体下地層 5 の上面 5 a 上に積層される窒化物半導体層の MOCVD 法による成長中およびそれ以降のプロセス中においてウエハの割れおよびクラックの発生を抑制しつつ、窒化物半導体層の X 線半値幅等で表わされる結晶性を向上することができるとともに、CL 法や EPD 等で表される欠陥密度を低減することができるため、発光効率および電子移動度等で表されるデバイス特性を向上させた窒化物半導体素子および窒化物半導体素子の下地となる窒化物半導体構造を提供することができる。

40

【0356】

なお、実施の形態 3 - 1 および 3 - 2 における上記以外の説明は、実施の形態 1 - 1、1 - 2、2 - 1 および 2 - 2 と同様であるため、その説明については省略する。

【実施例】

【0357】

[実験例 1]

50

まず、口径4インチで厚さ0.9mmのサファイア単結晶からなる基板を準備した。次に、その基板上に図3に示す凸部の平面配置を規定するマスクを形成し、当該マスクを用いて基板の表面をドライエッチングして図3に示す平面配置に凹部を形成した。

【0358】

これにより、基板の表面の凸部は、基板の表面のa(s u b)軸方向($\langle 11 - 20 \rangle$ 方向)に配列されるとともに、基板の表面のa(s u b)軸方向に対して $+60^\circ$ の傾きを為す方向および基板の表面のa(s u b)軸方向に対して -60° の傾きを為す方向(いずれもu方向)にそれぞれ配列されていた。ここで、凸部は、基板の表面の平面視において、図3に示す仮想の三角形1tの頂点にそれぞれ位置しており、仮想の三角形の3辺のそれぞれの辺の方向に周期的に配列されていた。さらに、凸部の底面における平面形状は円形であった。また、基板の表面の平面視において、隣り合う凸部の間隔は $2\mu\text{m}$ であって、凸部の底面における平面形状である円形の円の直径は $1.2\mu\text{m}$ 程度であり、凸部の高さは $0.6\mu\text{m}$ 程度であった。さらに、基板の表面の凸部および凹部はそれぞれ図4に示す断面を有しており、凸部は先端部を有していた。

10

【0359】

次に、凸部および凹部の形成後の基板の表面のRCA洗浄を行なった。そして、チャンバーに上記のRCA洗浄後の基板を設置し、 N_2 とArとを導入し、基板を 650°C に加熱して、 N_2 とArとの混合雰囲気においてAlターゲットをスパッタする反応性スパッタ法により、凸部および凹部を有する基板の表面上に、基板の表面の法線方向に伸長する結晶粒の揃った柱状結晶の集合体からなるAlN結晶からなる厚さ 25nm の窒化物半導体中間層を形成した。

20

【0360】

上記のようにして窒化物半導体中間層までを形成したウエハを6つ用意して、それぞれサンプル1~6のウエハとした。そして、サンプル1~6のウエハをそれぞれMOCVD装置内に設置し、MOCVD装置内にV族原料ガスとしてアンモニアガスを供給するとともに、III族原料ガスとしてTMG(トリメチルガリウム)を供給して、以下の表1に示す成長温度(成長時の基板温度)、成長時間、成長圧力(成長時のMOCVD装置内の圧力)およびV/III比(単位時間あたりに供給されるV族原料ガスのモル数/単位時間あたりに供給されるIII族原料ガスのモル数)の条件でMOCVD法によりアンドープGaN結晶からなる厚さ 300nm の第3の窒化物半導体下地層を成長させた。ここで、TMGは、第3の窒化物半導体下地層の成長速度がおよそ $2\sim 3\mu\text{m}/\text{h}$ となるようにMOCVD装置内に供給された。

30

【0361】

そして、サンプル1~6のウエハの表面上に成長させた第3の窒化物半導体下地層の表面をそれぞれSEM(Scanning Electron Microscope:走査型電子顕微鏡)により観察した。図43~図48にそれぞれサンプル1~6のウエハの表面上の第3の窒化物半導体下地層のSEM像を示す。

【0362】

第3の窒化物半導体下地層の成長モードを支配する成長パラメータは、成長温度、成長圧力およびV/III比などが挙げられるが、それらの中でも主に成長モードを支配する成長パラメータは成長温度であると考えられる。したがって、以下に、第3の窒化物半導体下地層の成長温度を変化させたときの第3の窒化物半導体下地層の成長モードの変化についてより詳細に説明する。

40

【0363】

【表 1】

	成長温度[°C]	成長時間[分]	成長圧力[KPa]	V/III比	SEM像
サンプル1	960	1	66.7	1165	図 43
サンプル2	960	5	66.7	1165	図 44
サンプル3	1050	1	66.7	1165	図 45
サンプル4	1050	5	66.7	1165	図 46
サンプル5	1100	1	66.7	1165	図 47
サンプル6	1100	5	66.7	1165	図 48

10

20

30

【0364】

(1) 成長温度が960 の場合

最初に、成長温度が960 である場合の第3の窒化物半導体下地層の成長モードについて、検討した。

40

【0365】

まず、成長時間が1分間の場合、基板の表面の凹部の上方の領域に均一な第3の窒化物半導体層を形成しやすいのは、成長温度が最も低温である960 の場合であることが、図43と、図45および図47との比較からわかる。

【0366】

次に、成長時間が5分間の場合、基板の凸部の外周を取り囲むように第3の窒化物半導体下地層の第3の斜めファセット面が形成されることが、図44から明らかである。

【0367】

図43および図44に示すように、基板の凹部は、第3の窒化物半導体下地層の第3の平坦領域と、第3の窒化物半導体下地層の第3の斜めファセット面とで覆われており、第

50

3の窒化物半導体下地層の表面における第3の平坦領域の面積割合が第1の斜めファセット面の面積割合よりも大きいことが確認された。また、図43および図44に示すように、基板の凸部には第3の窒化物半導体下地層がほとんど形成されていないことも確認された。

【0368】

以上により、サンプル1および2のウエハの表面上の第3の窒化物半導体下地層の成長モードは、3次元成長モードであることが確認された。

【0369】

その後、図43および図44にそれぞれ示される第3の窒化物半導体下地層の表面上に3次元成長モードでアンドープGaN結晶からなる厚さ1400nmの第1の窒化物半導体下地層を成長させた後に、第1の窒化物半導体下地層の表面上に2次元成長モードでアンドープGaN結晶からなる厚さ4000nmの下層とSiドープn型GaN結晶からなる厚さ3000nmの上層とからなる第2の窒化物半導体下地層を成長させた。なお、上層の成長時に用いられたn型ドーパントガスとしては、シランガスを用いた。

【0370】

なお、第3の窒化物半導体下地層、第1の窒化物半導体下地層および第2の窒化物半導体下地層のそれぞれの成長時における成長温度、成長圧力およびV/III比の関係は以下のとおりとした。

成長温度：第2の窒化物半導体下地層 > 第3の窒化物半導体下地層 > 第1の窒化物半導体下地層

成長圧力：第2の窒化物半導体下地層 < 第3の窒化物半導体下地層 < 第1の窒化物半導体下地層

V/III比：第2の窒化物半導体下地層 < 第3の窒化物半導体下地層 < 第1の窒化物半導体下地層

上記のようにして成長させた第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶性をX線ロックイングカーブ(XRC)の半値幅を測定することによって評価した。具体的には、第2の窒化物半導体下地層の上面のGaN(004)面におけるXRCの半値幅(arcsec)は30~40arcsecであり、GaN(102)面におけるXRCの半値幅は110~120arcsecであって、従来よりも結晶性が向上することが確認できた。

【0371】

また、第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶欠陥密度をCL法またはEPD等で評価し、従来よりも欠陥密度が低減することも確認できた。具体的には、第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶欠陥密度を示すCL法より得られた暗点密度は $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 以下であった。

【0372】

(2)成長温度が1050の場合

次に、成長温度が1050である場合の第3の窒化物半導体下地層の成長モードについて、検討した。

【0373】

まず、成長時間が1分間の場合には、図45に示すように、基板の表面の凹部の上方の領域の第3の窒化物半導体下地層の表面に、第3の平坦領域と、ピットが多い荒れた面(粗面領域)とが混在することがわかる。

【0374】

次に、成長時間が5分間の場合には、図46に示すように、基板の凹部のほぼ全面が第3の窒化物半導体下地層の第3の平坦領域で均一に覆われており、第3の斜めファセット面は基板の凸部の周囲にわずかに形成されていることがわかる。

【0375】

ここで、第3の窒化物半導体下地層は、基板の凹部から選択的に成長が進行し、第3の窒化物半導体下地層の成長開始から5分を経過した時点で基板の凹部の上方の領域のほぼ全部が第3の窒化物半導体下地層の第3の平坦領域で均一に覆われ、第3の斜めファセッ

10

20

30

40

50

ト面が基板の凸部の周囲にわずかに形成されていることがわかる。

【0376】

上記のようにして成長させた第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶性をXRCの半値幅を測定することによって評価した。具体的には、第2の窒化物半導体下地層の上面のGaN(004)面におけるXRCの半値幅(arcsec)は30~40arcsecであり、GaN(102)面におけるXRCの半値幅は110~120arcsecであって、従来よりも結晶性が向上することが確認できた。

【0377】

また、第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶欠陥密度をCL法またはEPD等で評価し、従来よりも欠陥密度が低減することも確認できた。具体的には、第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶欠陥密度を示すCL法より得られた暗点密度は $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 以下であった。

10

【0378】

さらに、第3の窒化物半導体下地層の形成後のウエハの反りは、約100~110 μm であり、第2の窒化物半導体下地層5までウエハ表面にクラックが生じることはなかった。

【0379】

(3)成長温度が1100の場合

さらに、成長温度が1100である場合の第3の窒化物半導体下地層の成長モードについて、検討した。

20

【0380】

まず、成長時間が1分間の場合には、図47に示すように、基板の表面の凹部の上方の領域の第3の窒化物半導体下地層の表面には、第3の平坦領域と、ピットが多い荒れた面(粗面領域)とが混在することがわかる。

【0381】

次に、成長時間が5分間の場合にも、図48に示すように、成長時間が1分間である図47と同様に、基板の表面の凹部の上方の領域の第3の窒化物半導体下地層の表面には、第3の平坦領域と、ピットが多い荒れた面(粗面領域)とが混在することがわかる。

【0382】

上記のようにして成長させた第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶性をXRCの半値幅を測定することによって評価した。具体的には、第2の窒化物半導体下地層の上面のGaN(004)面におけるXRCの半値幅(arcsec)は40~50arcsecであり、GaN(102)面におけるXRCの半値幅は110~120arcsecであった。

30

【0383】

また、第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶欠陥密度をCL法またはEPD等で評価し、従来よりも欠陥密度が低減することも確認できた。具体的には、第2の窒化物半導体下地層の上面の結晶欠陥密度を示すCL法より得られた暗点密度は $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 以下であった。

【0384】

さらに、第3の窒化物半導体下地層の形成後のウエハの反りは、約120 μm であった。

40

【0385】

(4)第2の窒化物半導体下地層

図46に示す第1の窒化物半導体下地層の表面上に、3次元成長モードで第2の窒化物半導体下地層を成長させた。

【0386】

第1の窒化物半導体下地層の表面を観察したところ、第1の窒化物半導体下地層は、基板の凸部の外側において、凸部を取り囲む6つの第1の斜めファセット面を有していた。ここで、第1の斜めファセット面は、図33に示す平面視のように、a(sub)軸方向

50

に2つ現れ、 $a(sub)$ 軸方向に対して $+60^\circ$ の角度で傾いた方向および $a(sub)$ 軸方向に対して -60° の角度で傾いた方向(いずれも u 方向)にそれぞれ2つずつ現れていた。

【0387】

また、第1の斜めファセット面は、図34に示すような断面を有しており、第1の斜めファセット面が存在する範囲内では、図34に示す断面の奥行き方向においても同様に現れる面であった。また、1つの凸部を取り囲む第1の斜めファセット面と、他の1つの凸部を取り囲む第1の斜めファセット面と、は、第1の窒化物半導体下地層の第1の平坦領域で連結されていた。

【0388】

ここで、凸部の外周において凸部を取り囲む6つの第1の斜めファセット面の傾斜方向は、それぞれ凸部の外周面から斜め上方に向かって伸張していた。

【0389】

具体的には、6つの第1の斜めファセット面のうち、第1の窒化物半導体下地層の表面の平面視において、 $a(sub)$ 軸方向に現れる2つの第1の斜めファセット面は、 $a(sub)$ 軸方向($<11-20>$ 方向)に対して斜め上方に傾斜しており、その傾斜した方向にファセット面が伸長していた。

【0390】

また、同様に、第1の窒化物半導体下地層の表面の平面視において、 $a(sub)$ 軸方向に対して $+60^\circ$ の角度で傾いた方向および $a(sub)$ 軸方向に対して -60° の角度で傾いた方向にそれぞれ2つずつ現れる第1の斜めファセット面も、 $a(sub)$ 軸方向に対して $+60^\circ$ の角度で傾いた方向および $a(sub)$ 軸方向に対して -60° の角度で傾いた方向に対してそれぞれ斜め上方に傾斜しており、その傾斜した方向にファセット面が伸長していた。

【0391】

(5) 第3の窒化物半導体下地層

さらに、上記の第1の窒化物半導体下地層の表面上に、2次元成長モードでアンドープ GaN 結晶からなる厚さ 4000nm の下層と Si ドープ n 型 GaN 結晶からなる厚さ 3000nm の上層とからなる第2の窒化物半導体下地層を成長させた。なお、上層の成長時に用いられた n 型ドーパントガスとしては、シランガスを用いた。

【0392】

そして、第3の窒化物半導体下地層の成長温度を T_1 とし、第2の窒化物半導体下地層の特性との関係を調査した。

【0393】

図49に、 T_1 と第2の窒化物半導体下地層の上面の $GaN(004)$ 面における XRC の半値幅($arcsec$)との関係を示す。図49の横軸が $T_1()$ を示し、図49の縦軸が第2の窒化物半導体下地層の上面の $GaN(004)$ 面における XRC の半値幅($arcsec$)を示している。

【0394】

図50に、 $T_1()$ と、第2の窒化物半導体下地層の成長時のウエハの反り(μm)との関係を示す。ここで、成長時のウエハ反りとは、第2の窒化物半導体下地層の成長が終了する直前のウエハの反りである。図50の横軸が $T_1()$ を示し、図50の縦軸がウエハの反り(μm)を示している。

【0395】

図49および図50に示すように、 T_1 が 940 と小さい場合には、ウエハ表面の膜にクラックが入ることがあった。図49および図50の「クラック」と記載されたデータがそれに相当する。一方、 T_1 が 1100 と大きい場合には、成長中、または成長終了後に、ウエハが割れることがあった。図49および図50の「割れ」と記載されたデータがそれに相当する。

【0396】

10

20

30

40

50

また、図49に示すように、 T_1 が小さくなるとXRCの半値幅が低減し、結晶欠陥の少ない良好な表面を有する第2の窒化物半導体下地層が得られる傾向が認められる。

【0397】

また、図50に示すように、 T_1 が小さくなり過ぎると第2の窒化物半導体下地層の成長時の反りが増大する。これが、第2の窒化物半導体下地層にクラックが入る原因であると推定される。一方、 T_1 が大きくなり過ぎると、図15に示すように、凹部の上方の領域の第3の窒化物半導体下地層3の表面には、第3の平坦領域3cと、第3の平坦領域3cよりも粗い粗面領域3dとが混在しやすい。そのため、この粗面領域3dの表面上に第1の窒化物半導体下地層4を成長すると、第1の窒化物半導体下地層4の表面はさらに大きな粗面になりやすく、さらにその上に成長する第2の窒化物半導体下地層5は基板面内

10

【0398】

したがって、 T_1 をウエハにクラックが入らない程度に設定することにより、第2の窒化物半導体下地層については、XRCの半値幅で表わされる結晶性に優れた良質な膜が得られる。

【0399】

T_1 を例えば1050 程度の適当な値に設定し、第1の窒化物半導体下地層の成長温度 T_2 を例えば1000 程度の適当な値に設定することは、上述のように第3の窒化物半導体下地層の成長モードである「2.5次元成長モード」から、第1の窒化物半導体下地層の成長モードを「3次元成長モード」に切り替えていることに相当する。そのため、成長温度以外のパラメータである成長圧力およびV/III比を変化させることによって

20

【0400】

以下に、第3の窒化物半導体下地層、第1の窒化物半導体下地層および第2の窒化物半導体下地層のそれぞれの成長時における()成長温度、()成長圧力および()V/III比のそれぞれの成長パラメータの一例について示す。そして、表2に、成長パラメータの設定値と、窒化物半導体下地層の成長モードとの関係を示す。

【0401】

()成長温度：第3の窒化物半導体下地層を、平坦な表面である第3の平坦領域と第3の斜めファセット面とが同時に出現する2.5次元成長モード、例えば1050 の成長温度で成長させる。次に、第1の窒化物半導体下地層を第1の斜めファセット面が主に出現する3次元成長モード、例えば960 と成長温度を低くして成長させる。さらに、第2の窒化物半導体下地層が第1の斜めファセット面を埋め込んで、平坦な上面が現れる2次元成長モード、例えば1080 と成長温度を高くして成長させる。

30

【0402】

()成長圧力：第3の窒化物半導体下地層を、平坦な表面である第3の平坦領域と第3の斜めファセット面とが同時に出現する2.5次元成長モード、例えば350 Torr (46.7 kPa) の成長圧力で成長させる。次に、第1の窒化物半導体下地層を第1の斜めファセット面が主に出現する3次元成長モード、例えば圧力500 Torr (66.7 kPa) と成長圧力を高くして成長させる。さらに、第2の窒化物半導体下地層が第1の斜めファセット面を埋め込んで、平坦な上面が現れる2次元成長モード、例えば圧力200 Torr (26.7 kPa) と成長圧力を低くして成長させる。

40

【0403】

()V/III比：第3の窒化物半導体下地層を、平坦な表面である第3の平坦領域と第3の斜めファセット面とが同時に出現する2.5次元成長モード、例えば920のV/III比で成長させる。次に、第1の窒化物半導体下地層を第1の斜めファセット面が主に出現する3次元成長モード、例えばV/III比を1165と高くして成長させる。さらに、第2の窒化物半導体下地層が第1の斜めファセット面を埋め込んで、平坦な上面が現れる2次元成長モード、例えばV/III比を676と低くして成長させる。

50

【 0 4 0 4 】

【 表 2 】

成長パラメータ	第3の窒化物半導体下地層	第1の窒化物半導体下地層	第2の窒化物半導体下地層
成長温度 [°C]	1050	960	1080
成長圧力 [kPa]	46.7	66.7	26.7
V/III比	920	1165	676
成長モード	2. 5次元成長モード	3次元成長モード	2次元成長モード

10

20

30

40

【 0 4 0 5 】

上述の成長パラメータと成長モードとの関係は一例であり、各条件の組合せおよび装置依存性によって成長モードが異なる場合がある。

【 0 4 0 6 】

[実験例 2]

< 実施例 1 >

まず、口径4インチで厚さ0.9mmのサファイア単結晶からなる基板を準備した。次に、その基板の上に図3に示す凸部の平面配置を規定するマスクを形成し、当該マスクを用いて基板の表面をドライエッチングして図3に示す平面配置に凹部を形成した。

【 0 4 0 7 】

50

これにより、基板の表面の凸部は、基板の表面の a ($s u b$) 軸方向 ($< 1 1 - 2 0 >$ 方向) に配列されるとともに、基板の表面の a ($s u b$) 軸方向に対して $+ 6 0 ^{\circ}$ の傾きを為す方向および基板の表面の a ($s u b$) 軸方向に対して $- 6 0 ^{\circ}$ の傾きを為す方向 (いずれも u 方向) にそれぞれ配列されていた。ここで、凸部は、基板の表面の平面視において、図 3 に示す仮想の三角形 $1 t$ の頂点にそれぞれ位置しており、仮想の三角形の 3 辺のそれぞれの辺の方向に周期的に配列されていた。さらに、凸部の底面における平面形状は円形であった。また、基板の表面の平面視において、隣り合う凸部の間隔は $2 \mu m$ であって、凸部の底面における平面形状である円形の円の直径は $1.2 \mu m$ 程度であり、凸部の高さは $0.6 \mu m$ 程度であった。さらに、基板の表面の凸部および凹部はそれぞれ図 4 に示す断面を有しており、凸部は先端部を有していた。

10

【 0 4 0 8 】

次に、凸部および凹部の形成後の基板の表面の R C A 洗浄を行なった。そして、チャンバーに上記の R C A 洗浄後の基板を設置し、 N_2 と $A r$ とを導入し、基板を 650 に加熱して、 N_2 と $A r$ との混合雰囲気において $A l$ ターゲットをスパッタする反応性スパッタ法により、凸部および凹部を有する基板の表面上に、基板の表面の法線方向に伸長する結晶粒の揃った柱状結晶の集合体からなる $A l N$ 結晶からなる厚さ $25 n m$ の窒化物半導体中間層を形成した。

【 0 4 0 9 】

上記のようにして窒化物半導体中間層までを形成したウエハを縦型 M O C V D 装置内に設置し、ウエハの基板の温度を 1000 に加熱しながら、ウエハの基板を回転数 600 R P M で回転させ、縦型 M O C V D 装置内の雰囲気の高圧力を $66.6 k P a$ とした状態で、縦型 M O C V D 装置内に、原料ガスとして V 族原料ガスであるアンモニアガスと I I I 族原料ガスである T M G (トリメチルガリウム) との混合ガスを供給するとともに、キャリアガスとして水素ガスのみ (流量 : $129 s l m$) を供給することによって、M O C V D 法により、アンドープ G a N 結晶を 25 分間成長させて、厚さ $60 n m$ の実施例 1 の第 1 の窒化物半導体下地層を形成した。

20

【 0 4 1 0 】

ここで、原料ガスは、原料ガスの V / I I I 比が 1165 となるようにして供給した。なお、キャリアガスとしては水素ガスのみ供給されていることから、第 1 の窒化物半導体下地層の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比が 1 であることは明らかである。

30

【 0 4 1 1 】

そして、実施例 1 の第 1 の窒化物半導体下地層の表面を S E M (Scanning Electron Microscope : 走査型電子顕微鏡) により観察した。図 5 1 に、厚さ $60 n m$ の実施例 1 の第 1 の窒化物半導体下地層の表面の S E M 像を示す。

【 0 4 1 2 】

その後、引き続き、上記と同一の条件で、アンドープ G a N 結晶をさらに成長させて、厚さ $300 n m$ の実施例 1 の第 1 の窒化物半導体下地層を形成した。

【 0 4 1 3 】

そして、実施例 1 の第 2 の窒化物半導体下地層の表面を S E M により観察した。図 5 2 に、厚さ $300 n m$ の実施例 1 の第 2 の窒化物半導体下地層の表面の S E M 像を示す。

40

【 0 4 1 4 】

< 実施例 2 >

縦型 M O C V D 装置内にキャリアガスとして水素ガス (流量 : $129 s l m$) と窒素ガス (流量 : $27 s l m$) との混合ガスを供給したこと以外は、実施例 1 と同様にして、厚さ $60 n m$ の実施例 2 の第 1 の窒化物半導体下地層を成長させた。ここで、実施例 2 の第 1 の窒化物半導体下地層の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比は 0.83 とされた。

【 0 4 1 5 】

そして、厚さ $60 n m$ の実施例 2 の第 1 の窒化物半導体下地層の表面を S E M により観

50

察した。その結果、厚さ60nmの実施例2の第1の窒化物半導体下地層の表面においても、図51に示す厚さ60nmの実施例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像と同様のSEM像が得られた。

【0416】

その後、引き続き、上記と同一の条件で、アンドープGaN結晶をさらに成長させて、厚さ300nmの実施例2の第1の窒化物半導体下地層を形成した。

【0417】

そして、厚さ300nmの実施例2の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。その結果、厚さ300nmの実施例2の第1の窒化物半導体下地層の表面においても、図52に示す厚さ300nmの実施例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像と同様のSEM像が得られた。

10

【0418】

<実施例3>

縦型MOCVD装置内にキャリアガスとして水素ガス(流量:129slm)と窒素ガス(流量:54slm)との混合ガスを供給したこと以外は、実施例1と同様にして、厚さ60nmの実施例3の第1の窒化物半導体下地層を成長させた。ここで、実施例3の第1の窒化物半導体下地層の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比は0.7とされた。

【0419】

そして、厚さ60nmの実施例3の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。その結果、厚さ60nmの実施例3の第1の窒化物半導体下地層の表面においても、図51に示す厚さ60nmの実施例3の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像と同様のSEM像が得られた。

20

【0420】

その後、引き続き、上記と同一の条件で、アンドープGaN結晶をさらに成長させて、厚さ300nmの実施例3の第1の窒化物半導体下地層を形成した。

【0421】

そして、厚さ300nmの実施例3の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。その結果、厚さ300nmの実施例3の第1の窒化物半導体下地層の表面においても、図52に示す厚さ300nmの実施例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像と同様のSEM像が得られた。

30

【0422】

<実施例4>

基板の回転数を400RPMとしたこと以外は、実施例1と同様にして、厚さ60nmの実施例4の第1の窒化物半導体下地層を成長させた。

【0423】

そして、厚さ60nmの実施例4の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。その結果、厚さ60nmの実施例4の第1の窒化物半導体下地層の表面においても、図51に示す厚さ60nmの実施例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像と同様のSEM像が得られた。

40

【0424】

その後、引き続き、上記と同一の条件で、アンドープGaN結晶をさらに成長させて、厚さ300nmの実施例4の第1の窒化物半導体下地層を形成した。

【0425】

そして、厚さ300nmの実施例4の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。その結果、厚さ300nmの実施例4の第1の窒化物半導体下地層の表面においても、図52に示す厚さ300nmの実施例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像と同様のSEM像が得られた。

【0426】

<実施例5>

50

基板の回転数を1000RPMとしたこと以外は、実施例1と同様にして、厚さ60nmの実施例5の第1の窒化物半導体下地層を成長させた。

【0427】

そして、厚さ60nmの実施例5の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。その結果、厚さ60nmの実施例5の第1の窒化物半導体下地層の表面においても、図51に示す厚さ60nmの実施例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像と同様のSEM像が得られた。

【0428】

その後、引き続き、上記と同一の条件で、アンドープGaN結晶をさらに成長させて、厚さ300nmの実施例5の第1の窒化物半導体下地層を形成した。

10

【0429】

そして、厚さ300nmの実施例5の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。その結果、厚さ300nmの実施例5の第1の窒化物半導体下地層の表面においても、図52に示す厚さ300nmの実施例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像と同様のSEM像が得られた。

【0430】

<比較例1>

縦型MOCVD装置内にキャリアガスとして水素ガス(流量:129slm)と窒素ガス(流量:78slm)との混合ガスを供給したこと以外は、実施例1と同様にして、厚さ60nmの比較例1の第1の窒化物半導体下地層を成長させた。ここで、厚さ60nmの比較例1の第1の窒化物半導体下地層の成長時のキャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比は0.62とされた。

20

【0431】

そして、厚さ60nmの比較例1の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。図53に、厚さ60nmの比較例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像を示す。

【0432】

その後、引き続き、上記と同一の条件で、アンドープGaN結晶をさらに成長させて、厚さ300nmの比較例1の第1の窒化物半導体下地層を形成した。

【0433】

30

そして、厚さ300nmの比較例1の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。図54に、厚さ300nmの比較例1の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像を示す。

【0434】

<比較例2>

基板の回転数を1200RPMとしたこと以外は、実施例1と同様にして、厚さ300nmの比較例2の第1の窒化物半導体下地層を成長させた。

【0435】

そして、厚さ300nmの比較例2の第1の窒化物半導体下地層の表面をSEMにより観察した。図55に、厚さ300nmの比較例2の第1の窒化物半導体下地層の表面のSEM像を示す。

40

【0436】

<評価>

(成長初期)

(1)第1の斜めファセット面

図51および図52に示すように、実施例1~5および比較例1においては、第1の窒化物半導体下地層の成長初期(厚さ60nm)において、第1の窒化物半導体下地層の表面は、r面の第1の斜めファセット面だけで形成されていた。

【0437】

なお、r面は、たとえば図8に示すように、a(sub)軸方向に2つ現れ、a(su

50

b) 軸方向に対して + 60° の角度で傾いた方向および a (s u b) 軸方向に対して - 60° の角度で傾いた方向 (いずれも u 方向) にそれぞれ 2 つずつ現れる第 1 の斜めファセット面である。

【 0 4 3 8 】

(2) 表面状態

図 5 1 に示すように、実施例 1 ~ 5 の厚さ 60 nm の第 1 の窒化物半導体下地層は、均一性の高い表面が連なる連続膜であることが確認された。一方、図 5 3 に示すように、比較例 1 の厚さ 60 nm の第 1 の窒化物半導体下地層は、不均一な表面を有する不連続膜であることが確認された。

【 0 4 3 9 】

(3) E S D 歩留り

さらに、実施例 1 ~ 5 および比較例 1 の厚さ 60 nm の第 1 の窒化物半導体下地層の E S D テストを行なった。その結果、実施例 1 ~ 5 の第 1 の窒化物半導体下地層の E S D テストの歩留りは 90% 以上であった。一方、比較例 1 の第 1 の窒化物半導体下地層の E S D テストの歩留りは 20% であった。なお、E S D テストは逆電圧 1 k V の H B M 条件にて行なった。

【 0 4 4 0 】

このように、比較例 1 の E S D テストの歩留りが低くなっている理由としては、以下の理由が考えられる。すなわち、比較例 1 の成長初期の第 1 の窒化物半導体下地層が不連続膜である場合には、その後の G a N 結晶の成長において、膜が不連続となる箇所では、結晶欠陥が発生する。この結晶欠陥は、窒化物半導体発光ダイオード素子を駆動する際に、電流リークの起源になることが確認されている。その結果、E S D テストにおいては、この結晶欠陥の近傍に電流が集中してしまい、E S D 歩留まりを低下させる原因になっていると考えられる。このような結晶欠陥は、マイクロパイプと呼ばれる G a N 結晶の成長面に垂直に伝播する結晶欠陥であると考えられる。

【 0 4 4 1 】

(成長後)

(1) 第 1 の斜めファセット面

図 5 2 および図 5 4 に示すように、実施例 1 ~ 5 および比較例 1 においては、第 1 の窒化物半導体下地層の成長後 (厚さ 300 nm) の第 1 の斜めファセット面は、r 面だけで形成されていた。一方、図 5 5 に示すように、比較例 2 においては、第 1 の窒化物半導体下地層の成長後 (厚さ 300 nm) の第 1 の斜めファセット面には、r 面、n 面および c 面が混在していた。

【 0 4 4 2 】

なお、n 面は、a (s u b) 軸方向に対して + 30° に傾斜した方向、a (s u b) 軸方向に対して - 30° に傾斜した方向、および m (s u b) 軸方向にそれぞれ 2 つずつ現れる第 1 の斜めファセット面である。また、c 面は、第 1 の窒化物半導体下地層 4 の上面である。

【 0 4 4 3 】

(2) 基板の割れ

実施例 1 ~ 5 および比較例 1 においては、厚さ 300 nm の第 1 の窒化物半導体下地層の成長後に基板に割れが生じていなかった。一方、比較例 2 においては、厚さ 300 nm の第 1 の窒化物半導体下地層の成長後に基板に割れが生じていた。

【 0 4 4 4 】

比較例 2 の第 1 の窒化物半導体下地層の成長初期 (厚さ 60 nm) においては、第 1 の斜めファセット面に、r 面のほか、n 面と c 面も混在していた。このように、r 面と n 面の第 1 の斜めファセット面が共に現れる場合には、成長後 (厚さ 300 nm) に基板に割れが生じやすくなることがわかった。

【 0 4 4 5 】

この現象に対する仮説として、第 1 の斜めファセット面である r 面上に成長した膜と、

10

20

30

40

50

第1の斜めファセット面であるn面上に成長した膜との結晶配向が微妙にずれるため、これらの膜の界面に線欠陥が生じる。そして、その線欠陥同士を連ねた線に沿って膜が割れる結果、その部分に膜と基板との熱膨張差に伴う歪が集中し、基板が割れるのではないかと考えられる。

【0446】

(3) XRCの半値幅

実施例1～5の厚さ300nmの第1の窒化物半導体下地層の結晶性をX線ロックイングカーブ(XRC)の半値幅を測定することによって評価した。その結果、具体的には、実施例1～5の厚さ300nmの第1の窒化物半導体下地層の表面のGaN(004)面およびGaN(102)面のそれぞれのXRCの半値幅は狭くなっており、高い結晶性を有することが確認された。

10

【0447】

これにより、実施例1～5の厚さ300nmの第1の窒化物半導体下地層の結晶性は、比較例1の厚さ300nmの第1の窒化物半導体下地層の結晶性よりも高いことが確認された。

【0448】

(4) ESD歩留り

さらに、実施例1～5および比較例1の厚さ300nmの第1の窒化物半導体下地層のESDテストを行なった。その結果、実施例1～5の第1の窒化物半導体下地層のESDテストの歩留りは90%以上であった。一方、比較例1の厚さ300nmの第1の窒化物半導体下地層のESDテストの歩留りは20%であった。なお、ESDテストは逆電圧1kVのHBM条件にて行なった。

20

【0449】

<結果>

以上の結果から、基板を400RPM以上1000RPM以下の単位時間当たりの回転数で回転させながら、キャリアガスの全体積に対する水素ガスの体積比を0.7以上1以下とした水素ガスを含むキャリアガスを用いた縦型MOCVD装置によるMOCVD法によって第1の窒化物半導体下地層を成長させた場合には、実施例1～5に示すように、均一な表面を有する連続膜であって、第1の斜めファセット面であるr面のみからなる第1の窒化物半導体下地層の表面が得られる。

30

【0450】

したがって、実施例1～5のような良質の第1の窒化物半導体下地層の表面上には高い結晶性と高い平坦性の上面を有する第2の窒化物半導体下地層を埋め込み成長モードによって成長させることができ、このような第2の窒化物半導体下地層の表面上には、優れた結晶性を有する窒化物層をその上方に再現性良く形成することができると考えられる。

【0451】

その結果、実施例1～5の第1の窒化物半導体下地層を有する、窒化物半導体発光ダイオード素子、窒化物半導体レーザー素子および窒化物半導体トランジスタ素子などの窒化物半導体素子は、優れた特性を有するものと考えられる。

【0452】

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

40

【産業上の利用可能性】

【0453】

本発明は、窒化物半導体構造、窒化物半導体発光素子、窒化物半導体トランジスタ素子、窒化物半導体構造の製造方法および窒化物半導体素子の製造方法に利用することができる。

【0454】

50

特に、本発明は、照明用、液晶バックライト用および表示用などに用いられる窒化物半導体発光ダイオード素子、光ディスク用およびプロジェクタ用などに用いられる窒化物半導体レーザ素子、ならびに携帯電話、超高速光通信および電力制御用などに用いられる窒化物半導体トランジスタ素子などに好適に利用することができる。

【符号の説明】

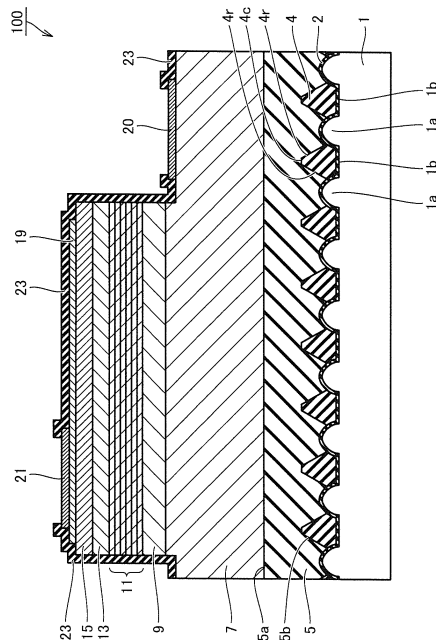
【0455】

1 基板、1 a 凸部、1 b 凹部、1 c 先端部、1 t 三角形、2 窒化物半導体中間層、3 第3の窒化物半導体下地層、3 c 第3の平坦領域、3 f 第3の斜めファセット面、4 第1の窒化物半導体下地層、4 c 上面、4 n, 4 r 第1の斜めファセット面、5 第2の窒化物半導体下地層、5 A 下層、5 B 上層、5 L 下面、5 M, 5 U 上面、5 a 上面、5 b 下面、7 n型窒化物半導体コンタクト層、9 n型窒化物半導体クラッド層、11 窒化物半導体活性層、13 p型窒化物半導体クラッド層、15 p型窒化物半導体コンタクト層、19 透光性電極層、20 n側電極、21 p側電極、23 絶縁保護膜、30 第1のリードフレーム、31 第2のリードフレーム、33 第1のワイヤ、34 第2のワイヤ、35 モールド樹脂、40 表面、71 窒化物半導体電子走行層、73 n型窒化物半導体電子供給層、75 S ソースコンタクト層、75 D ドレインコンタクト層、77 ゲート電極、78 S ソース電極、78 D ドレイン電極、92 n型窒化物半導体超格子層、100, 200, 500 窒化物半導体発光ダイオード素子、110, 210, 510 発光装置、300, 400, 600 窒化物半導体トランジスタ素子。

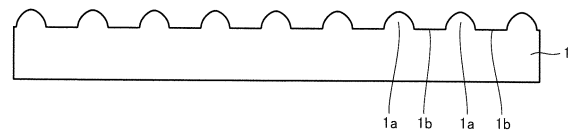
10

20

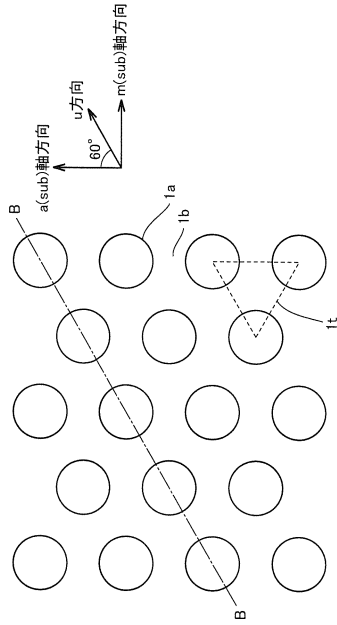
【図1】



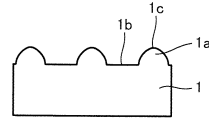
【図2】



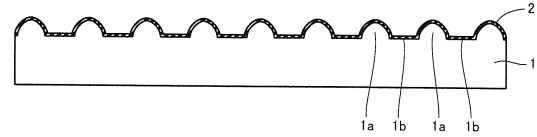
【 図 3 】



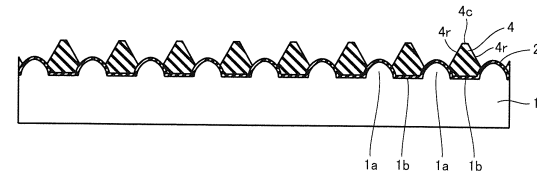
【 図 4 】



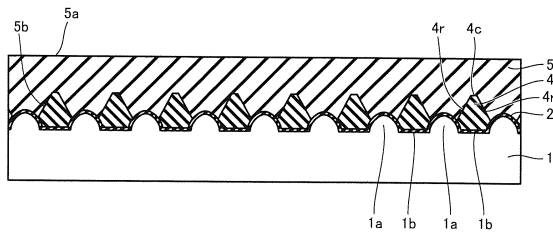
【 図 5 】



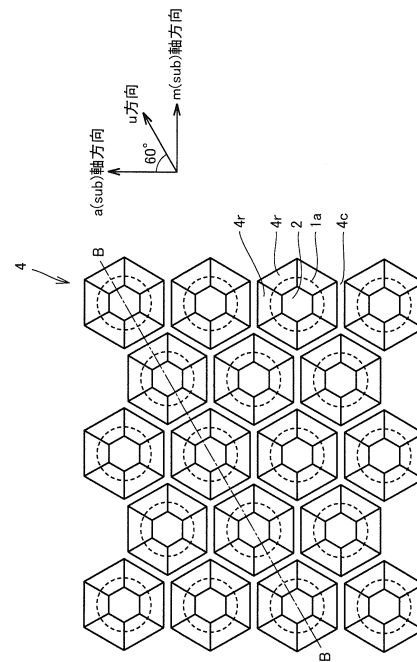
【 図 6 】



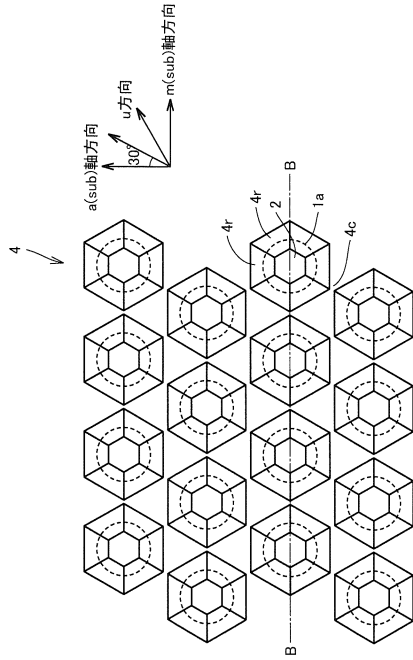
【 図 7 】



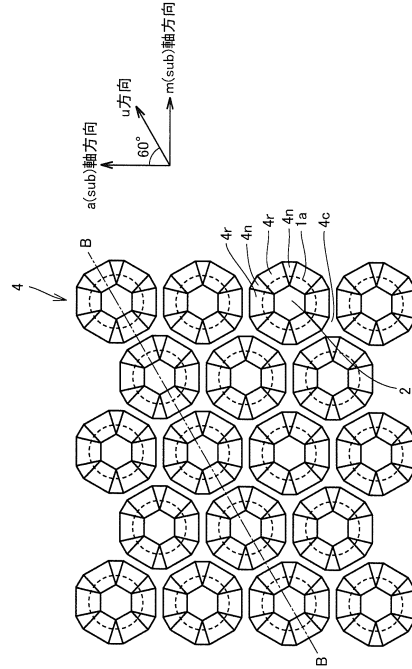
【 図 8 】



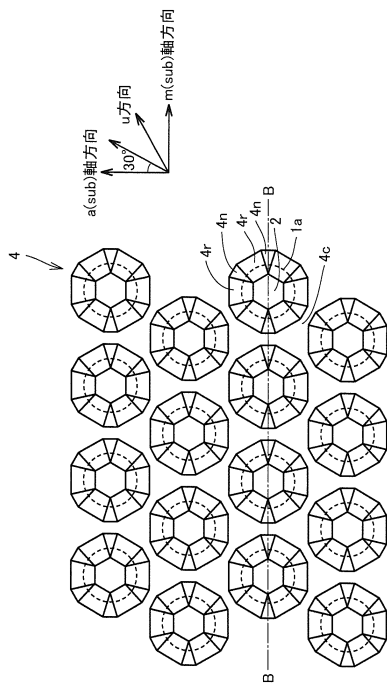
【 図 9 】



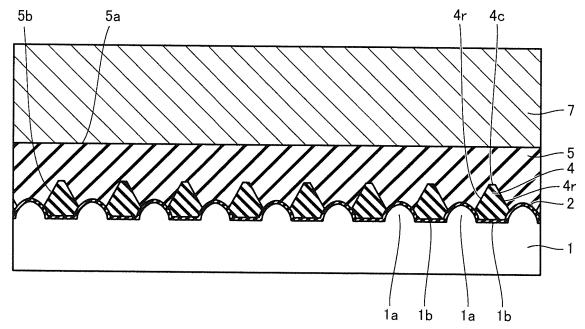
【 図 10 】



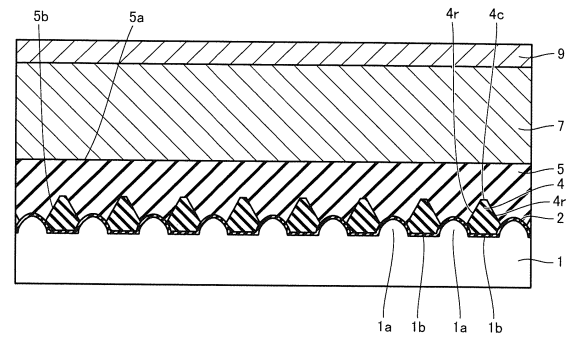
【 図 11 】



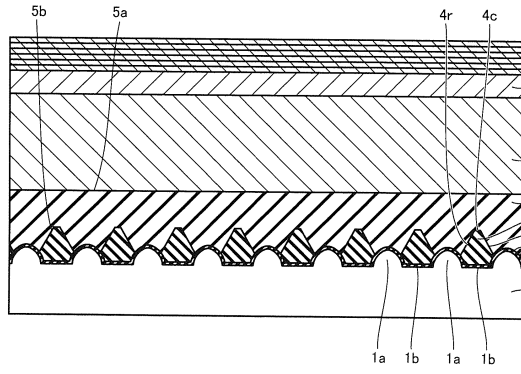
【 図 12 】



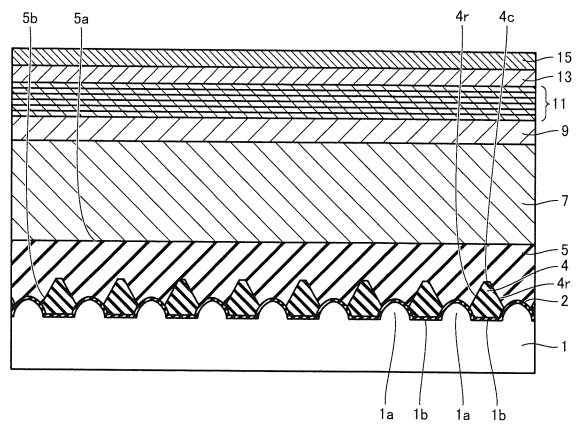
【 図 13 】



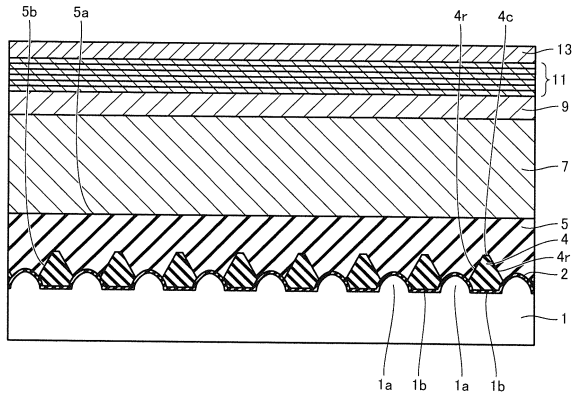
【図14】



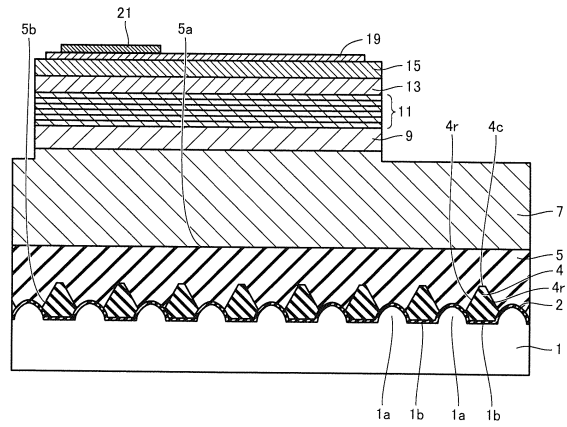
【図16】



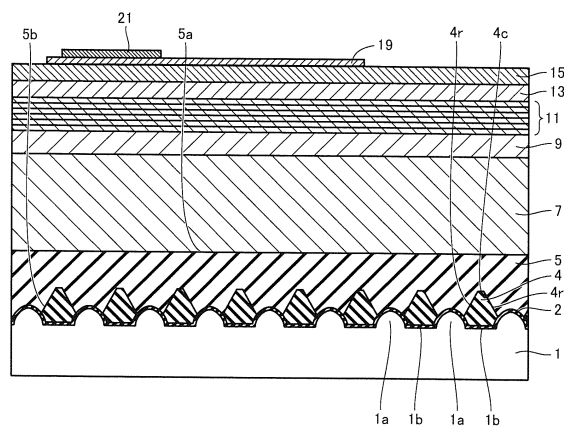
【図15】



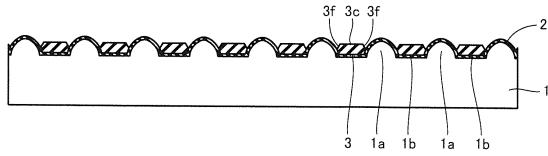
【図18】



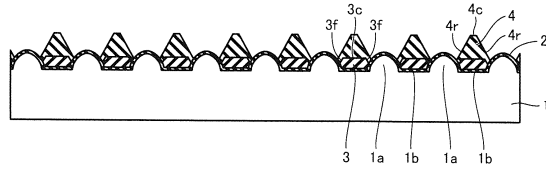
【図17】



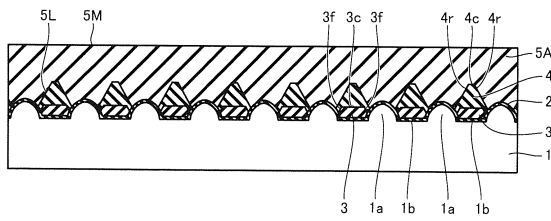
【図 23】



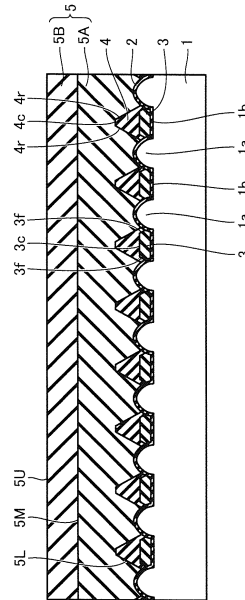
【図 24】



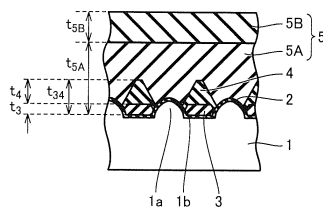
【図 25】



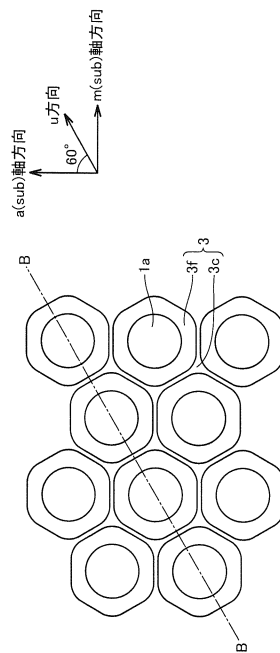
【図 26】



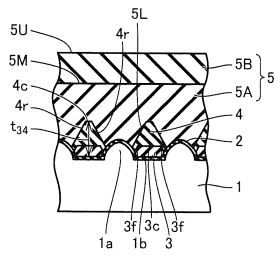
【図 27】



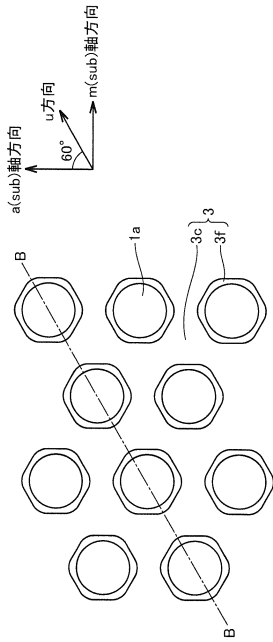
【図 29】



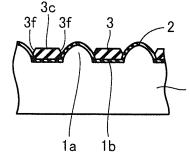
【図 28】



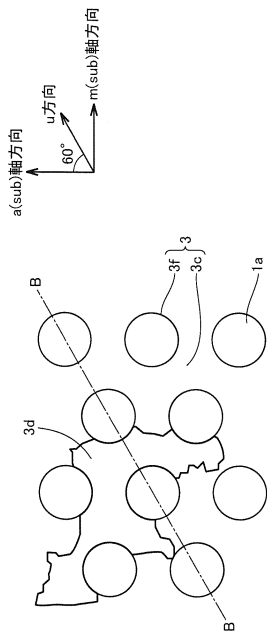
【 図 3 0 】



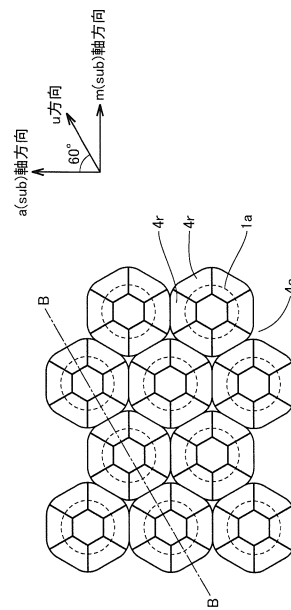
【 図 3 1 】



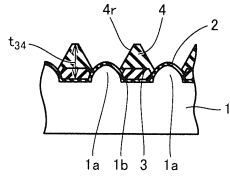
【 図 3 2 】



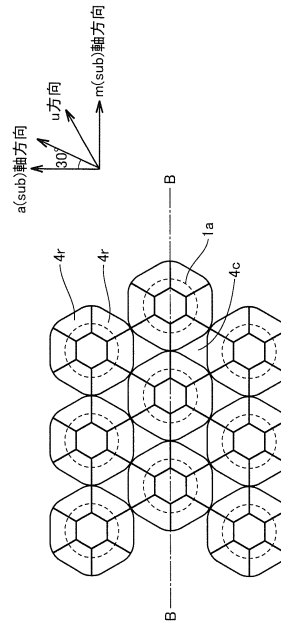
【 図 3 3 】



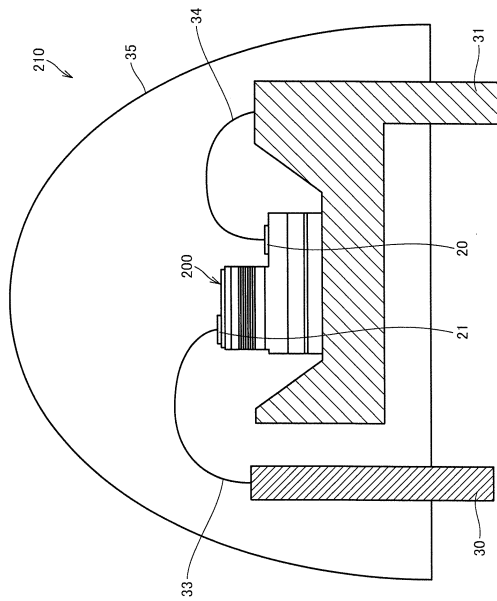
【 図 3 4 】



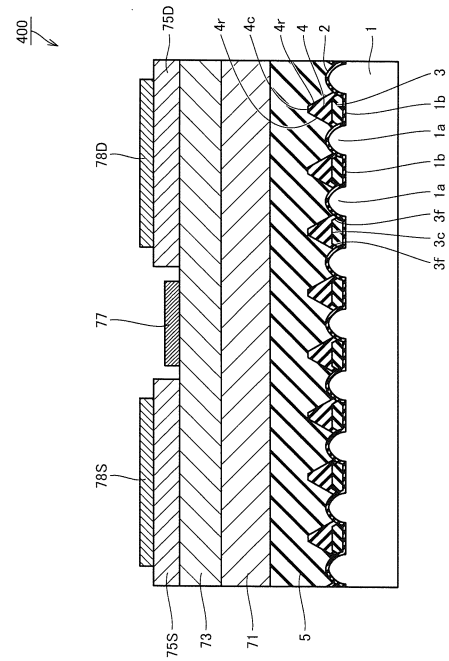
【 図 3 5 】



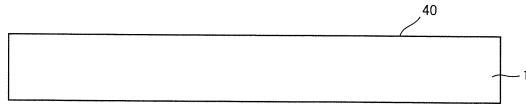
【 図 3 6 】



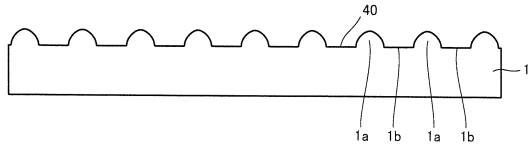
【 図 3 7 】



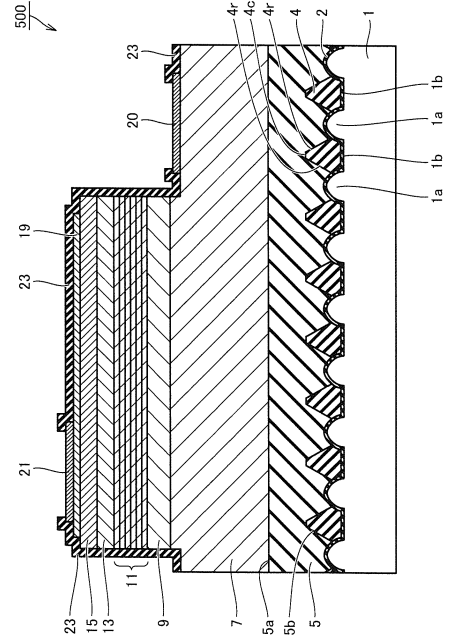
【図38】



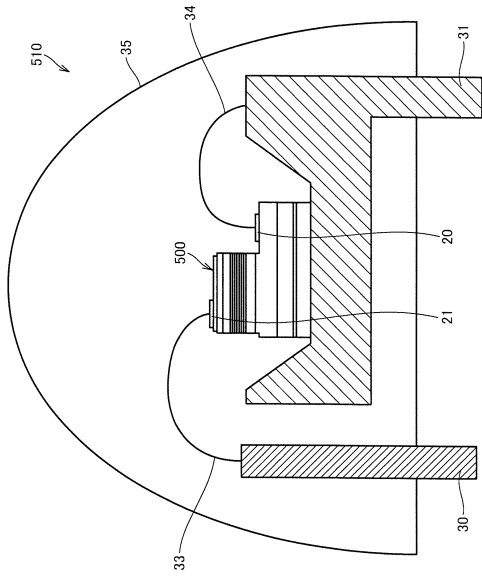
【図39】



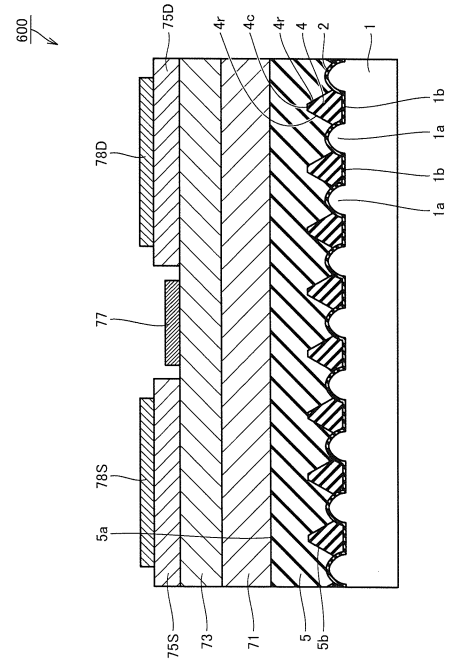
【図40】



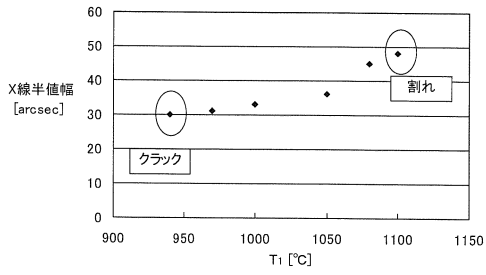
【図41】



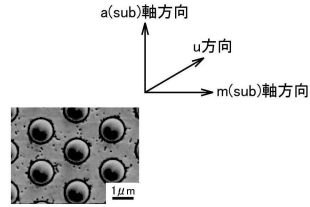
【図42】



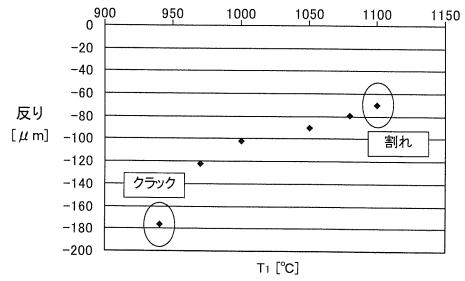
【 図 4 9 】



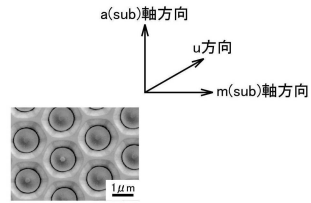
【 図 4 3 】



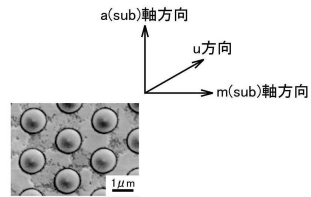
【 図 5 0 】



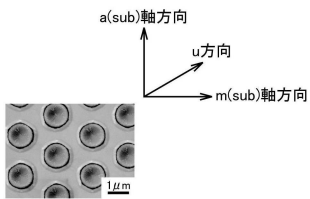
【 図 4 4 】



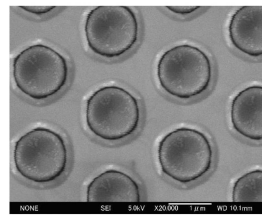
【 図 4 5 】



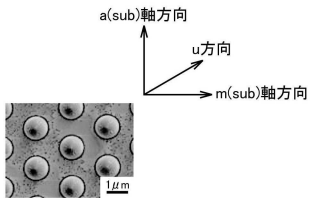
【 図 4 6 】



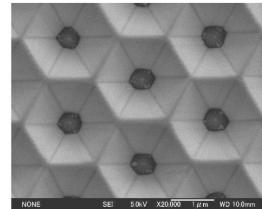
【 図 5 1 】



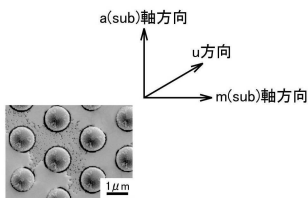
【 図 4 7 】



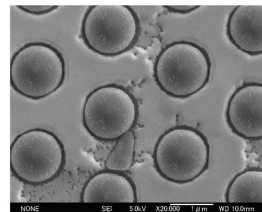
【 図 5 2 】



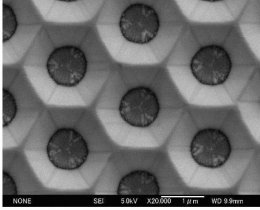
【 図 4 8 】



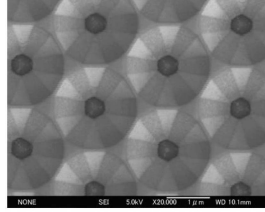
【 図 5 3 】



【 5 4 】



【 5 5 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 L 29/778 (2006.01) H 0 1 L 21/205
H 0 1 L 29/812 (2006.01)
H 0 1 L 21/205 (2006.01)

(72)発明者 小河 淳
大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号 シャープ株式会社内
(72)発明者 木下 多賀雄
大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号 シャープ株式会社内
(72)発明者 村田 徹
大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号 シャープ株式会社内
(72)発明者 船木 毅
大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号 シャープ株式会社内
(72)発明者 布袋田 暢行
大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号 シャープ株式会社内

審査官 正山 旭

(56)参考文献 特開2008-153634(JP,A)
特開2010-161354(JP,A)
特開2010-168273(JP,A)
特開2010-219269(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H 0 1 L 3 3 / 2 2
H 0 1 L 2 1 / 2 0 5
H 0 1 L 2 1 / 3 3 8
H 0 1 L 2 9 / 7 7 8
H 0 1 L 2 9 / 8 1 2
H 0 1 L 3 3 / 3 4
H 0 1 L 3 3 / 5 2
H 0 1 L 3 3 / 6 2