



(21)申請案號：113115479

(22)申請日：中華民國 113 (2024) 年 04 月 25 日

(51)Int. Cl. :

C30B29/16 (2006.01)

C30B13/10 (2006.01)

C30B13/14 (2006.01)

C30B13/16 (2006.01)

C30B13/28 (2006.01)

(30)優先權：2023/06/07 世界智慧財產權組織 PCT/JP2023/021097

(71)申請人：日商住友電氣工業股份有限公司 (日本) SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.
(JP)
日本

(72)發明人：石川幸雄 ISHIKAWA, YUKIO (JP) ； 谷崎圭祐 TANIZAKI, KEISUKE (JP) ； 羽木良明 HAGI, YOSHIAKI (JP)

(74)代理人：陳長文

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：10 項 圖式數：6 共 59 頁

(54)名稱

三氧化二鎢單晶基板、三氧化二鎢單晶之製造方法及三氧化二鎢單晶基板之製造方法

(57)摘要

本發明之三氧化二鎢單晶基板係具有圓形狀之主表面者，並且上述三氧化二鎢單晶基板之直徑為 100 mm 以上，上述三氧化二鎢單晶基板之厚度為 600 μm 以上，上述三氧化二鎢單晶基板包含硼，上述硼之濃度於輝光放電質譜分析中為 4 質量 ppm 以上 200 質量 ppm 以下。

指定代表圖：

符號簡單說明：

10:主表面

11:中心部

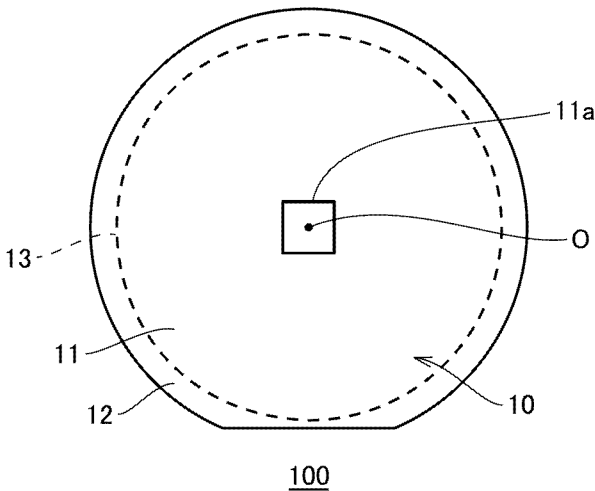
11a:矩形狀切片

12:外周部

13:交界

100:三氧化二鎢單晶基板(Ga₂O₃ 單晶基板)

O:中心



【圖1】

【發明摘要】

【中文發明名稱】

三氧化二鎵單晶基板、三氧化二鎵單晶之製造方法及三氧化二鎵單晶基板之製造方法

【中文】

本發明之三氧化二鎵單晶基板係具有圓形狀之主表面者，並且上述三氧化二鎵單晶基板之直徑為100 mm以上，上述三氧化二鎵單晶基板之厚度為600 μm以上，上述三氧化二鎵單晶基板包含硼，上述硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。

【指定代表圖】

圖1

【代表圖之符號簡單說明】

10:主表面

11:中心部

11a:矩形狀切片

12:外周部

13:交界

100:三氧化二鎵單晶基板(Ga_2O_3 單晶基板)

O:中心

【發明說明書】

【中文發明名稱】

三氧化二鎵單晶基板、三氧化二鎵單晶之製造方法及三氧化二鎵單晶基板之製造方法

【技術領域】

【0001】

本發明係關於一種三氧化二鎵單晶基板、三氧化二鎵單晶之製造方法、及三氧化二鎵單晶基板之製造方法。

【先前技術】

【0002】

日本專利特開2016-079080號公報(專利文獻1)、日本專利特開2017-193466號公報(專利文獻2)、日本專利特開2020-105069號公報(專利文獻3)、日本專利特開2020-011899號公報(專利文獻4)、及日本專利特開2020-059633號公報(專利文獻5)揭示有使用包含鉑銠合金(以下，亦記為「Pt-Rh合金」)之坩堝或包含鉑銱合金(以下，亦記為「Pt-Ir合金」)之坩堝或者模具，並藉由垂直型晶舟法或EFG法(Edge-defined Film-fed Growth Method，限邊饋膜生長法)等使三氧化二鎵單晶(以下，亦記為「Ga₂O₃單晶」)於大氣氛圍下生長。D. Sajuti et al. Mater. Trans., JIM, 34(1993), pp. 1195-1199(非專利文獻1)揭示有將三氧化二鎵(以下，亦記為「Ga₂O₃」)溶解於液體狀態之氧化硼(以下，亦記為「B₂O₃」)中後，將其冷卻，藉此，根據上述B₂O₃與Ga₂O₃之間之溶解度差使Ga₂O₃單晶析出之實現可能性。

[先前技術文獻]

[專利文獻]

【0003】

[專利文獻1]日本專利特開2016-079080號公報

[專利文獻2]日本專利特開2017-193466號公報

[專利文獻3]日本專利特開2020-105069號公報

[專利文獻4]日本專利特開2020-011899號公報

[專利文獻5]日本專利特開2020-059633號公報

[非專利文獻]

【0004】

[非專利文獻1]D. Sajuti et al. Mater. Trans., JIM, 34(1993), pp. 1195-1199

【發明內容】

【0005】

本發明之三氧化二鎵單晶基板係具有圓形狀之主表面之三氧化二鎵單晶基板。上述三氧化二鎵單晶基板之直徑為100 mm以上。上述三氧化二鎵單晶基板之厚度為600 μm以上。上述三氧化二鎵單晶基板包含硼。上述硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。

【圖式簡單說明】

【0006】

圖1係對本實施方式之三氧化二鎵單晶基板之主表面進行說明的說明圖。

圖2係對為了求出奈米壓痕硬度而設定於圖1之三氧化二鎵單晶基板之主表面上之5個部位之測定點進行說明的說明圖。

圖3係對為了測定本實施方式之三氧化二鎵單晶基板中之比電阻、載子濃度及電子遷移率之各特性，使用上述基板之中央部所製作之霍爾測定用樣品進行說明的說明圖。

圖4係表示包含本實施方式之三氧化二鎵單晶之製造方法之三氧化二鎵單晶基板之製造方法之一例的流程圖。

圖5係對本實施方式之三氧化二鎵單晶之製造方法所使用之製造裝置進行說明的模式圖。

圖6係表示實施例中所製作之三氧化二鎵單晶基板中之奈米壓痕硬度與破裂荷重之關係的曲線圖。

【實施方式】

【0007】

[發明所欲解決之問題]

Ga_2O_3 單晶係具有較強之解理性之結晶，於特定方向上容易破裂。因此，於自 Ga_2O_3 單晶獲得三氧化二鎵單晶基板(以下，亦記為「 Ga_2O_3 單晶基板」)之製程中有如下顧慮：於 Ga_2O_3 單晶之切斷時及外周加工時、以及獲得上述基板後之輸送時等情況下，上述基板大部分會破裂而產生不良情況。因此，要求對於上述 Ga_2O_3 單晶基板，抑制產生破裂。另一方面，已知添加有硼(B)作為雜質之砷化鎵單晶之強度提高。於使用上述專利文獻1～5所揭示之坩堝等獲得 Ga_2O_3 單晶之情形時，B以雜質形式混入上述 Ga_2O_3 單晶中之可能性極小。上述非專利文獻1僅談及根據 B_2O_3 與 Ga_2O_3 之間之溶解度差使 Ga_2O_3 單晶析出之實現可能性，關於基於包含B而提高上述 Ga_2O_3 單晶基板之強度之效果、以及抑制上述 Ga_2O_3 單晶基板產生破裂之效果，未作任何提示。

【0008】

鑒於以上情況，本發明之目的在於提供一種能夠抑制產生破裂之三氧化二鎵單晶基板、三氧化二鎵單晶之製造方法、及三氧化二鎵單晶基板之製造方法。

【0009】**[發明之效果]**

根據本發明，提供一種能夠抑制產生破裂之三氧化二鎵單晶基板、三氧化二鎵單晶之製造方法、及三氧化二鎵單晶基板之製造方法。

【0010】**[實施方式之概要]**

以下，對本發明之實施方式之概要進行說明。本發明者等人為了解決上述課題反覆進行努力研究，結果完成了本發明。本發明者等人發現於向 Ga_2O_3 單晶中添加微量B，藉此自上述 Ga_2O_3 單晶獲得 Ga_2O_3 單晶基板之情形時，能夠抑制產生破裂，及能夠抑制上述基板產生破裂之B之適當濃度。尤其是本發明者等人亦發現由於B與鎵(Ga)同族，故不會對上述基板之電特性造成不良影響，從而完成了本發明。

【0011】

繼而，藉由羅列本發明之實施態樣進行說明。

[1]本發明之一態樣之三氧化二鎵單晶基板係具有圓形狀之主表面之三氧化二鎵單晶基板。上述三氧化二鎵單晶基板之直徑為100 mm以上。上述三氧化二鎵單晶基板之厚度為600 μm 以上。上述三氧化二鎵單晶基板包含硼。上述硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。具有此種特徵之三氧化二鎵單晶基板能夠抑制產生破裂。

【0012】

[2]上述硼之濃度於輝光放電質譜分析中較佳為5質量ppm以上100質量ppm以下。藉此，上述三氧化二鎵單晶基板能夠進一步抑制產生破裂。

【0013】

[3]上述主表面較佳為三氧化二鎵單晶之(001)面。上述主表面較佳為具有包含其中心之中心部、及包圍上述中心部之外周部。上述外周部較佳為實施有倒角加工之區域。於上述三氧化二鎵單晶基板中，依據使用三角錐(Berkovich)壓頭之奈米壓痕法，於將最大荷重設為10 mN，且以壓痕之一邊與將上述三氧化二鎵單晶之[100]方向投影至上述主表面之方向之交叉角成為 0° 以上 10° 以下之方式施加荷重的條件下，於上述主表面上之5個部位測得之奈米壓痕硬度較佳為均為14.8 GPa以上22.0 GPa以下。將上述主表面之上述中心至上述中心部與上述外周部之交界之長度設為 r ，將通過上述中心且於上述主表面上相互正交之2條軸設為X軸及Y軸，且將上述Y軸設為上述三氧化二鎵單晶之 b 軸時，由上述X軸及上述Y軸規定之上述5個部位之座標(X, Y)較佳為(0, 0)、($r-5$, 0)、(0, $r-5$)、($-(r-5)$, 0)、及(0, $-(r-5)$)。上述 r 、以及上述座標(X, Y)中之X及Y之單位較佳為mm。藉此，上述三氧化二鎵單晶基板能夠進一步抑制產生破裂。

【0014】

[4]上述三氧化二鎵單晶基板有時包含銻及銨之兩者或任一者。於該情形時，上述銻之濃度及上述銨之濃度較佳為於輝光放電質譜分析中均為0.1質量ppm以下。藉此，於上述三氧化二鎵單晶基板中，能夠防止對電特性造成不良影響。

【0015】

[5]於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之比電阻較佳為 $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 $2.0 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下。於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之載子濃度較佳為 $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下。於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之電子遷移率較佳為 $0.2 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上 $15000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以下。藉此，上述三氧化二鎵單晶基板能夠具備良好之電特性。

【0016】

[6]本發明之一態樣之三氧化二鎵單晶之製造方法係於大氣氛圍下執行。上述製造方法包括如下步驟：準備至少具備圓筒狀之坩堝、及以包圍上述坩堝之外周之方式配置之加熱裝置之單晶生長裝置；將包含上述三氧化二鎵單晶之晶種收容於上述坩堝之底部，且將塊狀或粉末狀之三氧化二鎵多晶、n型摻雜劑、及氧化硼收容於上述坩堝內之較上述晶種靠上部；利用上述加熱裝置對上述坩堝進行加熱，藉此，使上述晶種之一部分熔解，且獲得源自上述晶種之一部分及上述三氧化二鎵多晶之三氧化二鎵以第1濃度、上述n型摻雜劑以第2濃度分別溶解於上述氧化硼中而成之溶液，並且使上述溶液與上述晶種之剩餘部分接觸；及自上述溶液使結晶於上述晶種之剩餘部分上生長，藉此獲得三氧化二鎵單晶。上述坩堝包含鉑。上述三氧化二鎵單晶中之硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。藉由具有此種特徵之三氧化二鎵單晶之製造方法，獲得用於製造能夠抑制產生破裂之三氧化二鎵單晶基板之三氧化二鎵單晶。

【0017】

[7]本發明之一態樣之三氧化二鎵單晶之製造方法係於氮氣氛圍下執行。上述製造方法包括如下步驟：準備至少具備圓筒狀之坩堝、及以包圍上述坩堝之外周之方式配置之加熱裝置之單晶生長裝置；將包含上述三氧化二鎵單晶之晶種收容於上述坩堝之底部，且將塊狀或粉末狀之三氧化二鎵多晶、**n**型摻雜劑、及氧化硼收容於上述坩堝內之較上述晶種靠上部；利用上述加熱裝置對上述坩堝進行加熱，藉此，使上述晶種之一部分熔解，且獲得源自上述晶種之一部分及上述三氧化二鎵多晶之三氧化二鎵以第1濃度、上述**n**型摻雜劑以第2濃度分別溶解於上述氧化硼中而成之溶液，並且使上述溶液與上述晶種之剩餘部分接觸；及自上述溶液使結晶於上述晶種之剩餘部分上生長，藉此獲得三氧化二鎵單晶。上述坩堝包含熱分解氮化硼。上述三氧化二鎵單晶中之硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。藉由具有此種特徵之三氧化二鎵單晶之製造方法，獲得用以製造能夠抑制產生破裂之三氧化二鎵單晶基板之三氧化二鎵單晶。

【0018】

[8]上述單晶生長裝置較佳為具有用以將上述三氧化二鎵多晶及上述**n**型摻雜劑投入至上述坩堝內之管嘴、及用以將上述坩堝密閉之蓋體。上述蓋體較佳為具有供上述管嘴插入之孔。獲得上述三氧化二鎵單晶之步驟較佳為包括如下步驟：通過上述管嘴對經上述蓋體密閉之上述坩堝中之上述溶液進行取樣，藉此，對上述溶液中之源自上述晶種之一部分及上述三氧化二鎵多晶之三氧化二鎵、以及上述**n**型摻雜劑之濃度進行分析；根據關於上述三氧化二鎵之濃度之分析結果，以相對於上述第1濃度成為正負5%以內之濃度之方式，通過上述管嘴向上述坩堝中之上述溶液投入上述三氧

化二鎵多晶；及根據關於上述n型摻雜劑之濃度之分析結果，以相對於上述第2濃度成為正負5%以內之濃度之方式，通過上述管嘴向上述坩堝中之上述溶液投入上述n型摻雜劑。藉此，高良率地獲得用以製造能夠抑制產生破裂之三氧化二鎵單晶基板之三氧化二鎵單晶。

【0019】

[9]本發明之一態樣之三氧化二鎵單晶基板之製造方法包括如下步驟：對藉由上述三氧化二鎵單晶之製造方法所獲得之上述三氧化二鎵單晶進行加工，藉此獲得具有圓形狀之主表面之三氧化二鎵單晶基板。藉由具有此種特徵之製造方法獲得能以抑制產生破裂之三氧化二鎵單晶基板。

【0020】

[10]於上述[2]所記載之三氧化二鎵單晶基板中，上述主表面較佳為三氧化二鎵單晶之(001)面。上述主表面較佳為具有包含其中心之中心部、及包含上述中心部之外周部。上述外周部較佳為實施有倒角加工之區域。於上述三氧化二鎵單晶基板中，依據使用三角錐壓頭之奈米壓痕法，於將最大荷重設為10 mN，且以壓痕之一邊與將上述三氧化二鎵單晶之[100]方向投影至上述主表面之方向之交叉角成為 0° 以上 10° 以下之方式施加荷重的條件下，於上述主表面上之5個部位測得之奈米壓痕硬度較佳為均為14.8 GPa以上22.0 GPa以下。將上述主表面之上述中心至上述中心部與上述外周部之交界之長度設為 r ，將通過上述中心且於上述主表面上相互正交之2條軸設為X軸及Y軸，且將上述Y軸設為上述三氧化二鎵單晶之b軸時，由上述X軸及上述Y軸規定之上述5個部位之座標(X, Y)較佳為(0, 0)、($r-5$, 0)、(0, $r-5$)、($-(r-5)$, 0)、及(0, $-(r-5)$)。上述 r 、以及上述座標(X, Y)中之X及Y之單位較佳為mm。上述三氧化二鎵單晶

基板較佳為包含銻及銱之兩者或任一者。上述銻之濃度及上述銱之濃度較佳為於輝光放電質譜分析中均為0.1質量ppm以下。於上述藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎢單晶基板之比電阻較佳為 $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 $2.0 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下。於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎢單晶基板之載子濃度較佳為 $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下。於上述藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎢單晶基板之電子遷移率較佳為 $0.2 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上15000 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以下。藉此，三氧化二鎢單晶基板能夠進一步抑制產生破裂，亦能夠具備良好之電特性。

【0021】

[實施方式之詳細內容]

以下，對本發明之一實施方式(以下，亦記為「本實施方式」)進而詳細地進行說明，但本發明並不限定於該等。以下，有時一面參照圖式，一面進行說明，但於本說明書及圖式中，對同一或對應要素標註同一符號，且不對其等重複進行相同說明。進而於圖式中，為了便於理解各構成要素，適當調整縮小比例來表示，圖式中所示之各構成要素之縮小比例與實際構成要素之縮小比例未必一致。

【0022】

於本說明書中，「A~B」之形式之表述意指範圍之上限下限(即A以上B以下)，於在A中未記載單位而僅於B中記載有單位之情形時，A之單位與B之單位相同。進而，於本說明書中，於以化學式表示化合物等之情形時，於未特別限定原子比時，上述化合物包含先前公知之所有原子比，未必必須僅限定於化學計量性範圍者。

【0023】

於本說明書中，三氧化二鎵單晶基板之「主表面」意指上述三氧化二鎵單晶基板中之圓形狀之2個面之兩者。上述三氧化二鎵單晶基板於該2個面之至少任一個滿足本發明之申請專利範圍之情形時，屬於本發明之技術性範圍。又，於本說明書中，以「面內」之用語使用之「面」意指「主表面」。進而於記為三氧化二鎵單晶基板之直徑為「100 mm」或者4英吋之情形時，意指上述直徑為100 mm左右(95~105 mm左右)。於記為上述直徑為「150 mm」或者6英吋之情形時，意指上述直徑為150 mm左右(145~155 mm左右)。再者，上述直徑可藉由使用游標卡尺等先前公知之外徑測定器進行測定。

【0024】

於本說明書中，「奈米壓痕硬度」意指藉由進行依據包含奈米壓痕法之作為國際標準之ISO14577之儀錶化壓入試驗而求出之壓入硬度(二軒谷亮、「使用奈米壓痕儀之機械特性評價方法」、分析、561(2021)、pp.457-461)。具體而言，「奈米壓痕硬度」係藉由依據奈米壓痕法，使用三角錐壓頭對三氧化二鎵單晶基板之主面上之規定位置進行壓入試驗，藉此獲得荷重位移曲線，並對該荷重位移曲線進行解析而求出之硬度。上述「奈米壓痕硬度」係藉由將利用三角錐壓頭施加至三氧化二鎵單晶基板之最大荷重(mN)除以施加該最大荷重時，上述三角錐壓頭與上述三氧化二鎵單晶基板接觸之面積(mm²)而求出。上述「奈米壓痕硬度」之單位為帕斯卡(Pa)。

【0025】

於本說明書中之結晶學記載中，單個方位以[]表示，集合方位以<>

表示，單個面以()表示，集合面以{}表示。又，結晶學上之指數為負通常係藉由將“- (杠)”標註於數字之上來表現，但於本說明書中，於數字之前標註負之符號。

【0026】

[三氧化二鎵單晶基板]

本實施方式之三氧化二鎵單晶基板(Ga_2O_3 單晶基板)係具有圓形狀之主表面之 Ga_2O_3 單晶基板。上述 Ga_2O_3 單晶基板之直徑為100 mm以上。上述 Ga_2O_3 單晶基板之厚度為600 μm 以上。上述 Ga_2O_3 單晶基板包含硼。上述硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。具有此種特徵之 Ga_2O_3 單晶基板能夠抑制產生破裂。

【0027】

<直徑及厚度>

上述 Ga_2O_3 單晶基板之直徑如上所述為100 mm以上。尤其是上述 Ga_2O_3 單晶基板之直徑較佳為99.5 mm以上152.5 mm以下。具體而言，此種 Ga_2O_3 單晶基板較佳為直徑為100 mm或150 mm之 Ga_2O_3 單晶基板，換言之直徑為4英吋或6英吋之 Ga_2O_3 單晶基板。藉此，上述 Ga_2O_3 單晶基板能夠具有於大口徑之 Ga_2O_3 單晶基板中不易破裂之特徵。

【0028】

上述 Ga_2O_3 單晶基板之厚度如上所述為600 μm 以上。尤其是上述 Ga_2O_3 單晶基板之厚度較佳為650 μm 以上700 μm 以下。藉此，上述 Ga_2O_3 單晶基板可具有於具有通用厚度之 Ga_2O_3 單晶基板中不易破裂之特徵。即便上述主表面為受定向平面(以下，亦記為「OF」)、標準面(以下，亦記為「IF」)等之影響而不會成為幾何圓形狀之情形時之形狀，上述 Ga_2O_3 單

晶基板之直徑亦可基於形成上述OF、IF等之前之圓形狀求出。又，如上所述， Ga_2O_3 單晶基板之直徑可藉由使用游標卡尺等先前公知之外徑測定器進行測定。 Ga_2O_3 單晶基板之厚度係藉由使用非接觸厚度測定器(商品名(型號)：「TAP-2H-200XY」，KOMS股份有限公司製造)進行測定。該測定器之定位精度為25 μm 。該測定器之顯示分解能力為0.01 μm 。該測定器之重複精度為0.01 μm 。用於測定 Ga_2O_3 單晶基板之厚度之測定器並不限於上述測定器，可使用其他測定器，只要定位精度、顯示分解能力、及重複精度為同等以上即可。於本說明書中，「 Ga_2O_3 單晶基板之厚度」意指 Ga_2O_3 單晶基板之主表面之中心之厚度。

【0029】

<主表面>

(圓形狀)

上述 Ga_2O_3 單晶基板如上所述具有圓形狀之主表面。於本說明書中，表示該主表面之形狀之「圓形狀」除包含幾何圓形狀以外，亦包含如上所述藉由在上述主表面之外周形成凹槽、OF或IF之至少任一者而使主表面未形成幾何圓形狀之情形時之形狀。此處，「主表面未形成幾何圓形狀之情形時之形狀」意指於自主表面之外周上之任意點延伸至上述主表面之中心之線段中，自上述凹槽、OF及IF上之任意點延伸至主表面之中心之線段中長度變短之情形時之形狀。進而「主表面未形成幾何圓形狀之情形時之形狀」亦包含並不限於自主表面之外周上之任意點延伸至上述主表面之中心之所有線段之長度因成為 Ga_2O_3 單晶基板之原料之 Ga_2O_3 單晶之形狀而相同之情形時之形狀。於該情形時，主表面之中心係指重心之位置， Ga_2O_3 單晶基板之直徑係指自 Ga_2O_3 單晶基板之外周上之任意點通過上述

主表面之中心延伸至上述外周上之另一點之線段中最長線段之長度。

【0030】

(Ga₂O₃單晶之(001)面)

上述主表面較佳為Ga₂O₃單晶之(001)面。已知將Ga₂O₃單晶之(001)面作為主表面之Ga₂O₃單晶基板由於上述(001)面一般係具有較強之解理性之面，故容易因外部應力而產生龜裂等，因此容易破裂。即，本實施方式於將Ga₂O₃單晶之(001)面作為主表面之Ga₂O₃單晶基板中，能夠抑制產生破裂。

【0031】

於本發明中，上述主表面之結晶面具有±0.5°之精度誤差。例如於上述主表面係Ga₂O₃單晶之「(001)面」之情形時，意指上述主表面可能為(001)精準面，或者上述主表面可能為自(001)面具有-0.5°～+0.5°之偏離角之面。Ga₂O₃單晶基板之主表面中之來自(001)面之偏離角係藉由使用先前公知之結晶方位測定裝置(例如商品名(商品號)：「2991G2」，Rigaku股份有限公司製造)進行測定。

【0032】

(中心部及外周部)

上述主表面較佳為具有包含其中心之中心部、及包圍上述中心部之外周部。上述外周部較佳為實施有倒角加工之區域。圖1係對本實施方式之三氧化二鎵單晶基板之主表面進行說明之說明圖。於例如圖1所示之Ga₂O₃單晶基板100中，主表面10具有包含其中心之中心部11、及包圍中心部11之外周之外周部12。中心部11於Ga₂O₃單晶基板100中，係使用以構成例如電子器件之磊晶層積層之區域。外周部12係實施有倒角加工之區

域。藉由對外周部12進行倒角加工，於對 Ga_2O_3 單晶基板100進行處理時，能夠減少外周部12之外緣破裂、缺損之情況。針對外周部12之倒角加工可使用先前公知之方法。

【0033】

中心部11較佳為具有圓形狀。藉此，主表面10之中心O至中心部11與外周部12之交界13之長度係由可如下所述般代入具體數值之「r」確定。此處，表示中心部11之形狀之「圓形狀」除包含幾何圓形狀以外，亦包含因針對外周部12之倒角加工等而為大致圓形狀等未形成幾何圓形狀之情形時之形狀。於該情形時，主表面10之中心O至中心部11與外周部12之交界13之長度r係指自主表面10之中心O延伸至中心部11與外周部12之交界13之線段中最短線段之長度。中心部11之形狀亦可為三角形、四邊形、六邊形等多邊形狀。

【0034】

外周部12之寬度、即外周部12之外緣至中心部11與外周部12之交界13之長度較佳為2~5 mm。其原因在於：已知 Ga_2O_3 單晶基板100之上述外周部12之寬度之區域可能會殘留倒角加工時之加工變形，此外，於每一基板中錯位數之變動較大，且平坦度亦較差等，通常成為無法用作半導體器件之材料之區域。

【0035】

中心部11與外周部12係藉由其等部位之 Ga_2O_3 單晶基板100之厚度之差異進行區別。外周部12中之 Ga_2O_3 單晶基板100之厚度未達中心部11中之 Ga_2O_3 單晶基板100之厚度之99%。即，外周部12意指如上所述般實施有倒角加工，並且該區域中之上述厚度未達中心部11中之上述厚度之99%

之區域。例如於中心部11中之上述厚度為675 μm 之情形時，外周部12中之上述厚度為668 μm 以下。中心部11及外周部12中之上述厚度分別係藉由使用上述非接觸厚度測定器進行測定。用於測定中心部11及外周部12之厚度之測定器並不限於上述測定器，可使用其他測定器，只要定位精度、顯示分解能力、及重複精度為同等以上即可。於本說明書中，「中心部11中之 Ga_2O_3 單晶基板100之厚度」意指 Ga_2O_3 單晶基板100之主表面10於中心O之厚度。藉此，主表面10之中心O至中心部11與外周部12之交界13之長度即「r」係作為具體數值(單位為mm)而求出。

【0036】

(奈米壓痕硬度)

於上述 Ga_2O_3 單晶基板中，依據使用三角錐壓頭之奈米壓痕法，於將最大荷重設為10 mN，且以壓痕之一邊與將上述三氧化二鎵單晶之[100]方向投影至上述主表面之方向之交叉角成為 0° 以上 10° 以下之方式施加荷重的條件下，於上述主表面上之5個部位測得之奈米壓痕硬度較佳為均為14.8 GPa以上22.0 GPa以下。於將上述主表面之上述中心至上述中心部與上述外周部之交界之長度設為r，將通過上述中心且於上述主表面上相互正交之2條軸設為X軸及Y軸，且將上述Y軸設為上述三氧化二鎵單晶之b軸時，由上述X軸及上述Y軸規定之上述5個部位之座標(X，Y)較佳為(0，0)、(r-5，0)、(0，r-5)、(-(r-5)，0)、及(0，-(r-5))。上述r、以及上述座標(X，Y)中之X及Y之單位較佳為mm。於上述主表面上之5個部位測得之奈米壓痕硬度更佳為均為15.0 GPa以上21.0 GPa以下。

【0037】

圖2係對為了求出奈米壓痕硬度而設定於圖1之三氧化二鎵單晶基板

之主表面上之5個部位之測定點進行說明的說明圖。以下，參照圖2，對依據使用三角錐壓頭之奈米壓痕法於主表面10上之5個部位測得之奈米壓痕硬度之測定方法進行說明。上述測定方法例如係藉由使用奈米壓痕儀(商品名：「Bruker Hysitron TI980 Triboindenter」，Bruker Japan股份有限公司製造)而進行。

【0038】

1) 預測定

首先，對 Ga_2O_3 單晶基板100進行用以能夠以三角錐壓頭之壓痕之一邊與將上述 Ga_2O_3 單晶之[100]方向投影至上述主表面之方向之交叉角成為 0° 以上 10° 以下之方式施加荷重之預測定。首先，將 Ga_2O_3 單晶基板100固定於上述奈米壓痕儀之試樣台。繼而，使用上述奈米壓痕儀所具備之光學系統觀察上述試樣台上之 Ga_2O_3 單晶基板100，藉此，指定例如主表面10上之中心部11之任意位置作為被測定部位。作為該被測定部位，為了有助於下述正式測定，較佳為指定主表面10上之上述5個部位以外(即上述5個部位之座標(X, Y)即(0, 0)、(r-5, 0)、(0, r-5)、(-(r-5), 0)、及(0, -(r-5))之位置以外)。進而，使三角錐壓頭移動至上述被測定部位，以最大荷重10 mN進行壓入試驗後，自上述試樣台取出 Ga_2O_3 單晶基板100。此時於上述被測定部位形成有三角錐壓頭之壓痕，因此，能夠求出該壓痕之一邊與構成 Ga_2O_3 單晶基板100之 Ga_2O_3 單晶之[100]方向之交叉角。此處，上述交叉角係藉由先前公知之方法求出。

【0039】

2) 正式測定

繼而，進行求出奈米壓痕硬度之正式測定。於上述預測定中所求出

之上述交叉角為 0° 以上 10° 以下之情形時，以與上述預試驗時相同之方向將 Ga_2O_3 單晶基板100固定於上述試樣台。於上述預測定中所求出之上述交叉角超過 10° 之情形時，以上述交叉角成為 0° 以上 10° 以下之方式調整 Ga_2O_3 單晶基板100之方向，然後將 Ga_2O_3 單晶基板100固定於上述試樣台。進而，使用上述奈米壓痕儀所具備之光學系統觀察上述試樣台上之 Ga_2O_3 單晶基板100，藉此指定主表面10上之上述5個部位之座標(X，Y)之一(例如(0，0))作為被測定部位。接下來，使三角錐壓頭移動至上述被測定部位(例如(0，0))，以最大荷重10 mN進行壓入試驗後，自上述試樣台取出 Ga_2O_3 單晶基板100。此時於上述被測定部位形成有三角錐壓頭之壓痕。因此，基於上述壓痕，能夠算出施加上述最大荷重10 mN時，上述三角錐壓頭與 Ga_2O_3 單晶基板100接觸之面積(mm^2)，將最大荷重10 mN除以上述面積(mm^2)，藉此求出上述被測定部位(例如(0，0))之奈米壓痕硬度。

【0040】

接下來，分別指定主表面10上之上述5個部位之座標(X，Y)之剩餘部分(例如($r-5$ ，0)、(0， $r-5$)、($-(r-5)$ ，0)、及(0， $-(r-5)$))作為被測定部位。以下，以與指定上述(0，0)作為被測定部位之情形時相同之要點進行壓入試驗，且進行規定之計算，藉此，求出主表面10上之上述5個部位之座標(X，Y)之剩餘部分之奈米壓痕硬度。

【0041】

此處，上述奈米壓痕硬度係藉由以最大荷重10 mN進行壓入試驗而求出之壓入硬度。認為於以最大荷重10 mN進行壓入試驗之情形時，將三角錐壓頭壓入至 Ga_2O_3 單晶基板之相對較深之內部而形成壓痕。因此可掌握

到上述奈米壓痕硬度反映出 Ga_2O_3 單晶基板之內部之壓入硬度。

【0042】

<硼(B)>

上述 Ga_2O_3 單晶基板如上所述包含硼(B)。上述B之濃度於輝光放電質譜分析(Glow Discharge Mass Spectrometry：GDMS)中為4質量ppm以上200質量ppm以下。於上述B之濃度於GDMS中未達4質量ppm之情形時，有藉由包含B所帶來之強度提高效果不足以抵抗加工時及搬運時等附加之外部應力之虞。於上述B之濃度於GDMS中超過200質量ppm之情形時，有於 Ga_2O_3 單晶中B簇聚，或因結晶生長中之熱歷程而導致殘留變形變得過大，因此導致上述 Ga_2O_3 單晶基板容易破裂之虞。上述B之濃度於GDMS中較佳為5質量ppm以上100質量ppm以下。上述B之濃度於GDMS中更佳為50質量ppm以上100質量ppm以下。

【0043】

本發明者等人推定於上述 Ga_2O_3 單晶基板以上述濃度包含硼之情形時，具有適度之硬度而強度提高，以之抑制產生破裂之理由如下。即認為於B以上述濃度包含於 Ga_2O_3 單晶中之情形時，B能夠以孤立置換型存在於構成 Ga_2O_3 單晶之晶格中之Ga位點。於該情形時，期待B之固溶強化作用。尤其是可推定上述 Ga_2O_3 單晶基板藉由使B之濃度為4質量ppm以上，能夠具備基於上述作用足以抵抗加工時及搬運時等附加之外部應力的強度。另一方面，可推定上述 Ga_2O_3 單晶基板藉由使B之濃度為200質量ppm以下，於 Ga_2O_3 單晶中B不會簇聚，或者能夠避免強度變得過高而導致結晶生長中之熱歷程所引起之殘留變形變得過大，從而能夠充分地呈現出B所具有之緩解 Ga_2O_3 單晶基板之破裂容易性之作用。

【0044】

(輝光放電質譜分析(GDMS))

以下，對使用輝光放電質譜分析(GDMS)測定上述 Ga_2O_3 單晶基板中之B之濃度之方法進行說明。GDMS係指於高純度之氬氣氛圍下，使分析試樣作為陰極產生輝光放電電漿，於上述電漿內對上述分析試樣之表面進行濺鍍，藉此，利用質譜儀對經離子化之上述分析試樣中之構成元素進行測定之方法。藉此，進行以上述 Ga_2O_3 單晶基板中所包含之除Ga及O以外之B為代表之雜質元素之定性及定量。作為上述GDMS之離子源，應用平板元件及針狀元件之任一者。針狀元件應用於可將形狀形成為大致2 mm見方且長度20 mm之短條狀之分析試樣。具體而言，於對可藉由解理製作試樣之Si單晶、砷化鎵(GaAs)單晶及磷化銦(InP)單晶等進行分析之情形時使用。平板元件應用於可形成為直徑10 mm左右之圓盤狀之分析試樣，例如可例舉對多晶體等進行分析之情形。無論如何，就避免分析試樣受到來自外部之雜質元素污染之觀點而言，較佳為選擇平板元件及針狀元件之任一者作為上述GDMS之離子源。上述 Ga_2O_3 單晶基板於主表面之面方位為(001)面之情形時，可藉由對一方向進行解理而製作分析試樣，故較佳為自上述 Ga_2O_3 單晶基板製作將長度方向作為解理面之具有針狀元件之形狀之分析試樣，且將其作為GDMS之離子源。

【0045】

上述GDMS例如係藉由如下要點進行。首先，藉由下述製造方法獲得 Ga_2O_3 單晶基板。進而，對上述 Ga_2O_3 單晶基板進行解理，藉此製成2 mm見方且長度20 mm之短條狀之 Ga_2O_3 分析試樣。上述 Ga_2O_3 單晶基板之不進行解理之方向係使用精密手動研磨機等公知之設備切斷。將其配置於

下述裝置所附帶之試樣配置部。此處，較佳為依據常規方法將上述試樣配置部洗淨，以防止異物混入及將異物去除，且進行60分鐘之預濺鍍。

【0046】

繼而，藉由如下條件對配置於上述試樣配置面之上述 Ga_2O_3 分析試樣進行GDMS。再者，作為 Ga_2O_3 分析試樣中之構成元素中除Ga及O以外之元素之B係利用相對感度係數(RSF)對Ga與B之離子強度比進行修正，藉此算出半定量值。再者，上述相對感度係數使用內置於下述裝置所附帶之軟體中之值。

裝置：輝光放電質譜裝置(商品名(商品號)：VG-9000，VG Elemental公司製造)

離子源：針狀元件(分析時利用液氮冷卻)

放電面積：直徑10 mm

放電氣體：高純度氬氣(6 N等級)

放電條件：2 mA、1 kV(定電流模式)

檢測器：法拉第杯及多層化器

質量分解能力：4000以上之 $m/\Delta m$ (高分解能力模式)。

【0047】

以如上方式進行上述 Ga_2O_3 分析試樣之分析，藉此進行上述 Ga_2O_3 單晶基板中所包含之B之定性及定量。本GDMS之檢測下限濃度較佳為.01質量ppm。

【0048】

<銻(Rh)及銱(Ir)>

上述 Ga_2O_3 單晶基板有時包含銻(Rh)及銱(Ir)之兩者或任一者。於該

情形時，上述Rh之濃度及上述Ir之濃度較佳為於GDMS中均為0.1質量ppm以下。上述Rh之濃度及上述Ir之濃度更佳為於GDMS中均為0.01質量ppm以下。上述Rh之濃度及上述Ir之濃度之下限於GDMS中均未檢測到。上述Ga₂O₃單晶基板只要上述Rh及上述Ir為上述濃度範圍，便能夠防止對電特性造成不良影響。

【0049】

已知上述Rh及上述Ir係可能包含於上述Ga₂O₃單晶基板中之元素。另一方面，於使用下述Ga₂O₃單晶基板之製造方法製造上述Ga₂O₃單晶基板之情形時，藉由使坩堝之材質為鉑或熱分解氮化硼，可容易地使上述Rh之濃度及上述Ir之濃度於GDMS中均為0.1質量ppm以下。上述Ga₂O₃單晶基板能夠抑制產生破裂，且基於上述Rh及上述Ir為低濃度，可具有良好之電特性。

【0050】

(比電阻)

於本實施方式之Ga₂O₃單晶基板中，於藉由范德堡法之霍爾測定中於25℃下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之比電阻較佳為 $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 $2.0 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下。具體而言，將上述Ga₂O₃單晶基板之中心作為測定對象，於藉由范德堡法之霍爾測定中於25℃下求出之比電阻較佳為顯示出 $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 $2.0 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下之值。藉此，上述Ga₂O₃單晶基板可具有作為n型(推電子型)之Ga₂O₃單晶基板而言良好之電特性，因此，可有助於形成電子器件。於上述Ga₂O₃單晶基板中，於上述比電阻未達 $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 之情形時，有於使用上述Ga₂O₃單晶基板製作肖特基勢壘二極體時等，逆方向電流變大，耐壓變差而導致熱失控之虞。於上述比電阻超過

2.0 $\Omega \cdot \text{cm}$ 之情形時，有正向電壓變高而效率降低之虞。上述比電阻較佳為 $5.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 $1.0 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下。

【0051】

以下，參照圖1及圖3對求出上述比電阻之程序具體進行說明。圖3係對用以測定本實施方式之三氧化二鎵單晶基板中之比電阻、載子濃度及電子遷移率之各特性之使用上述基板之中央部所製作之霍爾測定用樣品進行說明的說明圖。首先，如圖1所示，對基於例如下述製造方法而獲得之 Ga_2O_3 單晶應用先前公知之加工方法，藉此獲得作為測定對象之1片 Ga_2O_3 單晶基板100。自該1片 Ga_2O_3 單晶基板100之中央部製作將其中心(例如主表面10之中心)作為中心O之長10 mm×寬10 mm尺寸之矩形狀切片11a(例如厚度600 μm)。接下來，如圖3所示，於該矩形狀切片11a(被測定面)之4個角形成包含金之電極21，因此獲得霍爾測定用樣品。此處，上述電極21之形狀並不限定於圖示之矩形，可為扇形，亦可為圓形。對具備此種電極21之矩形狀切片11a，於25°C之氛圍下應用藉由范德堡法之霍爾測定，藉此求出比電阻。再者，於本說明書中，將基於將上述矩形狀切片作為測定對象而獲得之比電阻定義為於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述 Ga_2O_3 單晶基板之比電阻。

【0052】

(載子濃度及電子遷移率)

於本實施方式中，於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述 Ga_2O_3 單晶基板之載子濃度較佳為 $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下。於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述 Ga_2O_3 單晶基板之電子遷移率較佳為0.2 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上15000 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以下。同時，上述

Ga₂O₃單晶基板於上述載子濃度未達 $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 之情形時，有使用上述Ga₂O₃單晶基板製作肖特基勢壘二極體時損耗變大之虞。於上述載子濃度超過 $1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 之情形時，有自上述Ga₂O₃單晶基板製作肖特基勢壘二極體時等，逆方向電流變大，耐壓變差而導致熱失控之虞。上述Ga₂O₃單晶基板藉由將載子濃度及電子遷移率分別控制在上述範圍，可獲得上述範圍之較佳之比電阻。

【0053】

尤其是上述載子濃度更佳為 $4.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $4.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下。上述電子遷移率更佳為 $10 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上 $1500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以下。藉此，上述n型之Ga₂O₃單晶基板可具備能夠通用於各種電子器件之良好之電特性。上述載子濃度及電子遷移率均可藉由與上述比電阻之測定方法相同之方法求出。

【0054】

<用途>

由於本實施方式之Ga₂O₃單晶基板具備上述特性，故可用作用以形成光學器件及電子器件之基板。尤其是由於Ga₂O₃單晶基板具備良好之電特性，故較佳為用作用以形成電子器件之基板。

【0055】

[三氧化二鎵單晶之製造方法]

本實施方式之三氧化二鎵單晶(Ga₂O₃單晶)之製造方法例如較佳為構成上述具有圓形狀之主表面之Ga₂O₃單晶基板的Ga₂O₃單晶之製造方法。例如上述Ga₂O₃單晶之製造方法可於大氣氛圍下執行，且包括如下步驟。即上述製造方法包括如下步驟：準備至少具備圓筒狀之坩堝、及以包圍上

述坩堝之外周之方式配置之加熱裝置之單晶生長裝置(以下，亦記為「Ga₂O₃單晶生長裝置」)；將包含上述Ga₂O₃單晶之晶種收容於上述坩堝之底部，且將塊狀或粉末狀之三氧化二鎵多晶(Ga₂O₃多晶)、n型摻雜劑、及氧化硼(B₂O₃)收容於上述坩堝內之較上述晶種靠上部；利用上述加熱裝置對上述坩堝進行加熱，藉此，使上述晶種之一部分熔解，且獲得源自上述晶種之一部分及上述Ga₂O₃多晶之Ga₂O₃以第1濃度、上述n型摻雜劑以第2濃度分別溶解於上述B₂O₃中而成之溶液，並且使上述溶液與上述晶種之剩餘部分接觸；及自上述溶液使結晶於上述晶種之剩餘部分上生長，藉此獲得Ga₂O₃單晶。上述坩堝包含鉑。上述三氧化二鎵單晶中之硼之濃度於GDMS中為4質量ppm以上200質量ppm以下。藉由具有此種特徵之Ga₂O₃單晶之製造方法，獲得用以製造能夠抑制產生破裂之Ga₂O₃單晶基板之Ga₂O₃單晶。

【0056】

進而，上述Ga₂O₃單晶之製造方法之上述步驟可於氮氣氛圍下執行。即上述Ga₂O₃單晶之製造方法可於氮氣氛圍下執行，且包括如下步驟。上述製造方法包括如下步驟：準備至少具備圓筒狀之坩堝、及以包圍上述坩堝之外周之方式配置之加熱裝置之單晶生長裝置(以下，亦記為「Ga₂O₃單晶生長裝置」)；將包含上述Ga₂O₃單晶之晶種收容於上述坩堝之底部，且將塊狀或粉末狀之Ga₂O₃多晶、n型摻雜劑、及氧化硼(B₂O₃)收容於上述坩堝內之較上述晶種靠上部；利用上述加熱裝置對上述坩堝進行加熱，藉此，使上述晶種之一部分熔解，且獲得源自上述晶種之一部分及上述Ga₂O₃多晶之Ga₂O₃以第1濃度、上述n型摻雜劑以第2濃度分別溶解於上述B₂O₃中而成之溶液，並且使上述溶液與上述晶種之剩餘部分接觸；及自

上述溶液使結晶於上述晶種之剩餘部分上生長，藉此獲得 Ga_2O_3 單晶。該態樣中之上述坩堝包含熱分解氮化硼(pBN)。上述三氧化二鎵單晶中之硼之濃度於GDMS中為4質量ppm以上200質量ppm以下。即便為具有此種特徵之 Ga_2O_3 單晶之製造方法，亦獲得用以製造能夠抑制產生破裂之 Ga_2O_3 單晶基板之 Ga_2O_3 單晶。

【0057】

圖4係表示包含本實施方式之三氧化二鎵單晶之製造方法的三氧化二鎵單晶基板之製造方法之一例的流程圖。本實施方式之 Ga_2O_3 單晶之製造方法較佳為作為例如圖4之流程圖所示之 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100包含於 Ga_2O_3 單晶基板之製造方法中。根據圖4，本實施方式之 Ga_2O_3 單晶基板之製造方法包括 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100、及 Ga_2O_3 單晶基板製造步驟S200。其中， Ga_2O_3 單晶製造步驟S100包括準備至少具備圓筒狀之坩堝、及以包圍上述坩堝之外周之方式配置之加熱裝置之 Ga_2O_3 單晶生長裝置的步驟(第1步驟：準備步驟S110)。於準備步驟S110中，較佳為除上述 Ga_2O_3 單晶生長裝置以外，亦準備包含上述 Ga_2O_3 單晶之晶種、塊狀或粉末狀之 Ga_2O_3 多晶、n型摻雜劑、及固體之 B_2O_3 。 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100包括將上述晶種收容於上述坩堝之底部，且將上述 Ga_2O_3 多晶、上述n型摻雜劑、及上述 B_2O_3 收容於上述坩堝內之較上述晶種靠上部之步驟(第2步驟：原材料收容步驟S120)。 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100包括利用上述加熱裝置對上述坩堝進行加熱，藉此，使上述晶種之一部分熔解，且獲得源自上述晶種之一部分及上述 Ga_2O_3 多晶之 Ga_2O_3 以第1濃度、上述n型摻雜劑以第2濃度分別溶解於上述 B_2O_3 中而成之溶液，並且使上述溶液與上述晶種之剩餘部分接觸之步驟(第3步驟：原材料熔融步驟S130)。進而，

Ga₂O₃單晶製造步驟S100包括自上述溶液使結晶於上述晶種之剩餘部分上生長，藉此獲得Ga₂O₃單晶之步驟(第4步驟：Ga₂O₃單晶生長步驟S140)。執行Ga₂O₃單晶生長步驟S140之氛圍根據坩堝之材質設為氮氣氛圍或大氣氛圍。

【0058】

本發明者等人關於用以使構成具備上述特性之Ga₂O₃單晶基板之Ga₂O₃單晶結晶生長之方法，著眼於在坩堝內使Ga₂O₃溶解於液體狀態之B₂O₃中後，將其冷卻，藉此，可藉由上述B₂O₃與Ga₂O₃之間之溶解度差使Ga₂O₃單晶析出。於該情形時，發現B₂O₃略微被納入至所析出之Ga₂O₃單晶中。進而，本發明者等人發現，於自以規定濃度包含B之Ga₂O₃單晶獲得Ga₂O₃單晶基板之情形時，可抑制於該Ga₂O₃單晶基板中產生破裂，從而完成本實施方式之Ga₂O₃單晶之製造方法。

【0059】

於本說明書中，「n型摻雜劑」係指作為摻雜劑包含於Ga₂O₃單晶基板中，藉此，能夠對Ga₂O₃單晶基板賦予作為導電型之n型(推電子型)之特性之元素之氧化物。作為能夠對上述Ga₂O₃單晶基板賦予n型(推電子型)之特性之元素，可例示錫(Sn)、矽(Si)或鍺(Ge)。

【0060】

以下，藉由參照圖4及圖5分別對上述Ga₂O₃單晶生長裝置之概要及Ga₂O₃單晶製造步驟S100進行說明。圖5係對本實施方式之三氧化二鎵單晶之製造方法所使用之製造裝置進行說明的模式圖。於本實施方式之Ga₂O₃單晶之製造方法(Ga₂O₃單晶製造步驟S100)中，例如使用圖5所示之Ga₂O₃單晶生長裝置。

【0061】**< Ga₂O₃單晶生長裝置 >**

如圖5所示，Ga₂O₃單晶生長裝置具備上述坩堝2、保持坩堝2之坩堝保持用台8、支持坩堝2及坩堝保持用台8之下軸9、及對坩堝2進行加熱之加熱裝置1。進而，Ga₂O₃單晶生長裝置具有用以將坩堝2密閉之蓋體3。蓋體3具有如下功能：於Ga₂O₃單晶生長步驟S140中，防止因加熱而導致B₂O₃自使Ga₂O₃及n型摻雜劑溶解於坩堝2內之B₂O₃中而成之溶液52(以下，亦記為「B₂O₃-Ga₂O₃溶液52」)中向外部蒸散。Ga₂O₃單晶生長裝置具有用以向坩堝2內投入Ga₂O₃多晶及n型摻雜劑之管嘴。上述管嘴包含第1管嘴41及第2管嘴42，分別自外部貫通蓋體3，藉此，使前端位於坩堝2內。第1管嘴41係作為用以自外部向坩堝2內供給Ga₂O₃多晶之供給路徑發揮功能。第2管嘴42係作為用以自外部向坩堝2內供給n型摻雜劑之供給路徑發揮功能。

【0062】

本實施方式之Ga₂O₃單晶之製造方法除準備上述Ga₂O₃單晶生長裝置以外，有時為了使執行Ga₂O₃單晶生長步驟S140之氛圍成為氮氣氛圍，亦準備能夠收容坩堝2、蓋體3、第1管嘴41及第2管嘴42、坩堝保持用台8、下軸9、以及加熱裝置1之腔室，但省略了圖示。腔室之尺寸及材質等並無特別限制，只要具有能夠收容Ga₂O₃單晶生長裝置等且能夠使內部之氛圍成為氮氣氛圍之大小及材質等即可。進而，腔室於其側壁之熱透過率良好之情形時，可將上述Ga₂O₃單晶生長裝置中之加熱裝置配置於腔室之外側。

【0063】

(加熱裝置)

如圖5所示，於 Ga_2O_3 單晶生長裝置中，為了對坩堝2進行加熱，將加熱裝置1以包圍坩堝2之外周之方式配置。加熱裝置1例如採用先前公知之電氣式加熱器(以下，亦簡記為「加熱器」)。上述加熱器例如設為2台，該2台係以包圍坩堝2之外周之方式配置。有時於每1台中獨立地控制加熱器之輸出。尤其是如圖5所示，有時將每1台加熱器於相對於坩堝2之軸垂直之方向上分割成複數個部分，藉此構成為多段。於該情形時，較佳為於構成為多段之每一個部分獨立地控制加熱器之輸出。藉此，將坩堝2內之內容物之溫度沿著坩堝2之軸方向詳細地進行調整。例如藉由在構成為多段之每一個部分獨立地控制加熱器之輸出，於坩堝2內生長之 Ga_2O_3 單晶之生長速度穩定。

【0064】

(坩堝)

如圖5所示，於 Ga_2O_3 單晶生長裝置中，坩堝2係圓筒狀。坩堝2於其底部收容有包含 Ga_2O_3 單晶之晶種51。進而，於晶種51上收容有塊狀或粉末狀之 Ga_2O_3 多晶、n型摻雜劑、及固體之 B_2O_3 。即，坩堝2具有保持晶種51、 Ga_2O_3 多晶、n型摻雜劑、及 B_2O_3 之功能。此外，坩堝2具有如下功能：於其內部，藉由如下所述使 Ga_2O_3 單晶自 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中析出，而使 Ga_2O_3 單晶於晶種51上生長。

【0065】

作為坩堝2，使用可耐受 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52之溫度之各種材料。例如作為坩堝2之材料，可採用包含鉑、銻或銨之鉑合金、pBN等。尤其是於執行 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140之氛圍為大氣氛圍之情形時，坩堝2包含

鉬。藉此，於藉由上述製造方法所獲得之 Ga_2O_3 單晶中，使銻之濃度及鉍之濃度為零或濃度極低(例如0.1質量ppm以下)。進而於執行 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140之氛圍為氮氣氛圍之情形時，坩堝2包含pBN。於該情形時， Ga_2O_3 單晶生長裝置之製造成本降低。於藉由上述製造方法所獲得之 Ga_2O_3 單晶中，亦使銻之濃度及鉍之濃度為零或濃度極低(例如0.1質量ppm以下)。坩堝2之內徑亦取決於欲製造之 Ga_2O_3 單晶之直徑，例如設為90 mm以上165 mm以下。

【0066】

再者，雖省略圖示，但 Ga_2O_3 單晶生長裝置可具備能夠測量藉由加熱裝置1而加熱之坩堝2之溫度的熱電偶。熱電偶有時於坩堝2之外側且沿著軸向配置有複數個。熱電偶例如採用公知之溫度監控器。

【0067】

(蓋體)

蓋體3並無特別限定，有時包含例如pBN、氧化鈣(CaO)穩定氧化鋯等。蓋體3配置於坩堝2之上部，以防止於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中，坩堝2內之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之 B_2O_3 因加熱而向外部蒸散。蓋體3具有供管嘴(第1管嘴41及第2管嘴42)插入之孔。

【0068】

(第1管嘴及第2管嘴)

第1管嘴41及第2管嘴42並無特別限定，有時包含例如pBN塗覆碳、藍寶石等。第1管嘴41及第2管嘴42通過上述孔貫通蓋體3而使其前端位於坩堝2內，藉此將坩堝2之內外連接。藉此，第1管嘴41可作為用以自外部向坩堝2內供給 Ga_2O_3 之供給路徑發揮功能。第2管嘴42可作為用以自外部

向坩堝2內供給n型摻雜劑之供給路徑發揮功能。通過第1管嘴41及第2管嘴42將 Ga_2O_3 多晶或n型摻雜劑供給至坩堝2內之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中，藉此，可使 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之 Ga_2O_3 多晶及n型摻雜劑之濃度始終固定。

【0069】

(坩堝保持用台)

Ga_2O_3 單晶生長裝置具備保持坩堝2之坩堝保持用台8。坩堝保持用台8與坩堝2之底部相接而保持坩堝2。坩堝保持用台8有時具有圓筒形之外觀。作為坩堝保持用台8之材料，並無特別限定，例如可採用石英、氧化鋁或碳化矽等。坩堝保持用台8之外徑亦取決所支持之坩堝2之直徑，例如為75 mm以上200 mm以下。

【0070】

(下軸)

下軸9自下方支持坩堝保持用台8，藉此，能夠支持坩堝2及坩堝保持用台8。下軸9例如製成水平剖視圓形或水平剖視矩形之棒狀。作為下軸9之材料，例如採用鉬、碳或碳化矽等。以下，對上述 Ga_2O_3 單晶之製造方法(Ga_2O_3 單晶製造步驟S100)中所包含之各步驟進行說明。此處，首先對在大氣氛圍下執行之 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100進行說明。

【0071】

< Ga_2O_3 單晶製造步驟S100 >

(第1步驟：準備步驟S110)

如圖4所示，首先於 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100中執行準備步驟S110。準備步驟S110係準備至少具備圓筒狀之坩堝、及以包圍上述坩堝之外周

之方式配置之加熱裝置之Ga₂O₃單晶生長裝置的步驟。於準備步驟S110中，較佳為除上述Ga₂O₃單晶生長裝置以外，亦分別準備晶種51、塊狀或粉末狀之Ga₂O₃多晶、n型摻雜劑、及固體之B₂O₃。晶種51如上所述包含Ga₂O₃單晶。n型摻雜劑較佳為作為例如氧化錫(SnO₂)、氧化矽(SiO₂)等來準備。晶種51、塊狀或粉末狀之Ga₂O₃多晶、n型摻雜劑、及固體之B₂O₃亦可藉由購買市售品來準備。構成Ga₂O₃單晶生長裝置之坩堝2包含鉑。

【0072】

(第2步驟：原材料收容步驟S120)

繼而於Ga₂O₃單晶製造步驟S100中執行原材料收容步驟S120。原材料收容步驟S120係將上述晶種收容於上述坩堝之底部，且將上述Ga₂O₃多晶、上述n型摻雜劑、及上述B₂O₃收容於上述坩堝內之較上述晶種靠上部之步驟。原材料收容步驟S120之目的在於將用以使用Ga₂O₃單晶生長裝置進行結晶生長之各種原材料收容於坩堝2內。於原材料收容步驟S120中，首先將包含Ga₂O₃單晶之晶種51收容於坩堝2之底部。繼而將複數個塊狀或粉末狀之Ga₂O₃多晶收容、重疊於收容於坩堝2中之晶種51上。進而收容n型摻雜劑、及固體之B₂O₃。收容於坩堝2中之n型摻雜劑之量較佳為以使欲生長之Ga₂O₃單晶中之摻雜劑濃度變得合適之方式預先確定。藉此，自藉由Ga₂O₃單晶製造步驟S100所獲得之Ga₂O₃單晶獲得n型之Ga₂O₃單晶基板。收容於坩堝2中之上述n型摻雜劑之量例如較佳為以作為摻雜劑之Sn、Si或Ge之原子濃度於Ga₂O₃單晶基板中成為 $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下(例如 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下)之方式調整。

【0073】

(第3步驟：原材料熔融步驟S130)

繼而於Ga₂O₃單晶製造步驟S100中執行原材料熔融步驟S130。原材料熔融步驟S130係利用上述加熱裝置對上述坩堝進行加熱，藉此，使上述晶種之一部分熔解，且獲得源自上述晶種之一部分及上述Ga₂O₃多晶之Ga₂O₃以第1濃度、上述n型摻雜劑以第2濃度分別溶解於上述B₂O₃中而成之溶液，並且使上述溶液與上述晶種之剩餘部分接觸之步驟。原材料熔融步驟S130之目的在於使用Ga₂O₃單晶生長裝置進行結晶生長時，利用加熱裝置1對坩堝2進行加熱，藉此使晶種51之一部分熔解，並且獲得源自晶種51之一部分及上述Ga₂O₃多晶之Ga₂O₃以第1濃度且上述n型摻雜劑以第2濃度分別溶解於B₂O₃中而成之B₂O₃-Ga₂O₃溶液52。進而，原材料熔融步驟S130之目的在於使B₂O₃-Ga₂O₃溶液52與晶種51之剩餘部分接觸。藉此，於作為後續步驟之Ga₂O₃單晶生長步驟S140中，可使Ga₂O₃單晶於晶種51之剩餘部分上結晶生長。具體而言，於原材料熔融步驟S130中，將收容有晶種51、上述Ga₂O₃多晶、上述n型摻雜劑、及上述B₂O₃之坩堝2支持於坩堝保持用台8。其後，向加熱裝置1供給電流而對坩堝2進行加熱。藉此，使固體之B₂O₃熔融而成為液體之B₂O₃，進而使B₂O₃成為規定溫度(約1000°C)以上，藉此使Ga₂O₃多晶緩緩溶解於B₂O₃中。n型摻雜劑亦溶解於B₂O₃中。接下來，晶種51之一部分亦熔解並溶解於B₂O₃中。藉由以上，晶種51之剩餘部分與B₂O₃-Ga₂O₃溶液52接觸。

【0074】

此處，第1濃度、即B₂O₃-Ga₂O₃溶液52中之B₂O₃中之Ga₂O₃之濃度較佳為20～40質量%。可溶解於B₂O₃中之Ga₂O₃之濃度依存於B₂O₃之溫度。因此，於原材料熔融步驟S130中，B₂O₃-Ga₂O₃溶液52較佳為加熱至1200～1500°C。於該情形時，第2濃度、即B₂O₃-Ga₂O₃溶液52中之B₂O₃中之n

型摻雜劑之濃度只要為先前公知之 Ga_2O_3 單晶之製造方法中所應用之濃度即可，例如較佳為2～300質量ppm。第1濃度及第2濃度之測定係藉由與下述分析步驟中進行之 Ga_2O_3 濃度及n型摻雜劑濃度之測定相同之要點進行。

【0075】

(第4步驟： Ga_2O_3 單晶生長步驟S140)

繼而，於 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100中執行 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140。 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140係自上述溶液使結晶生長於上述晶種之剩餘部分上，藉此獲得 Ga_2O_3 單晶之步驟。 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140例如相對於加熱裝置1，使坩堝2沿著其軸向下(坩堝2之底部側)緩慢降低，藉此，於坩堝2中形成晶種51側之溫度降低、 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52側之溫度提高之溫度梯度。藉此，於 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之與晶種51接觸之部分，藉由上述 B_2O_3 與 Ga_2O_3 之間之溶解度差使 Ga_2O_3 單晶析出，藉此可使 Ga_2O_3 單晶連續地結晶生長。於該情形時，為了以晶格連續之單晶之晶錠之形式獲得 Ga_2O_3 單晶，使坩堝2沿著其軸向下下降之速度例如較佳為1～3 mm/小時。 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之與晶種51接觸之部分(以下，亦記為「晶種部」)之溫度較佳為1150～1430℃，更佳為1200～1388℃。

【0076】

於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中，藉由上述 B_2O_3 與 Ga_2O_3 之間之溶解度差使 Ga_2O_3 單晶自 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中析出，因此，隨著步驟進行， B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之 Ga_2O_3 濃度及n型摻雜劑濃度降低。因此， Ga_2O_3 單晶生長步驟S140較佳為具有通過上述管嘴對藉由上述蓋體密閉之上述坩堝中之上述溶液進行取樣，藉此，對上述溶液中之源自上述晶種之一部

分及上述 Ga_2O_3 多晶之 Ga_2O_3 、及上述n型摻雜劑之濃度進行分析之步驟(以下，亦記為「分析步驟」)。進而， Ga_2O_3 單晶生長步驟S140較佳為具有根據關於上述 Ga_2O_3 之濃度之分析結果，以相對於上述第1濃度成為正負5%以內之濃度之方式，通過上述管嘴向上述坩堝中之上述溶液投入上述 Ga_2O_3 多晶之步驟(以下，亦記為「 Ga_2O_3 濃度調整步驟」)。 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140較佳為包括根據關於上述n型摻雜劑之濃度之分析結果，以相對於上述第2濃度成為正負5%以內之濃度之方式，通過上述管嘴向上述坩堝中之上述溶液投入上述n型摻雜劑之步驟(以下，亦記為「n型摻雜劑濃度調整步驟」)。上述製造方法藉由具有該等步驟，能夠使 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之 Ga_2O_3 及n型摻雜劑之濃度自 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140之初期至結束為止維持為固定。藉此，獲得 Ga_2O_3 單晶中之B之濃度於單晶之各部均勻之 Ga_2O_3 單晶，因此，高良率地獲得用以製造能夠抑制產生破裂之 Ga_2O_3 單晶基板之 Ga_2O_3 單晶。

【0077】

具體而言，於上述分析步驟中，於執行 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140之過程中，藉由適當之方法每隔規定時間(例如每2小時)，通過第1管嘴41或第2管嘴42對藉由蓋體3而密閉之坩堝2中之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52進行取樣。取樣例如係藉由使用與管嘴相同材質之管，通過第1管嘴41或第2管嘴42採集0.5 g左右之坩堝2中之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52而進行。進而，對於該0.5 g左右之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52，利用公知之方法進行酸溶解後，使用高頻電感耦合電漿(Inductively Coupled Plasma：ICP)發光質譜法或者ICP-質譜法，藉此，分別對 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之 Ga_2O_3 、及上述n型摻雜劑之濃度進行分析。

【0078】

於上述 Ga_2O_3 濃度調整步驟中，根據與由每隔規定時間進行之上述分析步驟獲得之 Ga_2O_3 之濃度相關之分析結果，以相對於上述第1濃度成為正負5%以內之濃度之方式，通過第1管嘴41向坩堝2之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中投入 Ga_2O_3 多晶。再者，於上述 Ga_2O_3 濃度調整步驟中，若 Ga_2O_3 濃度之上述分析結果係相對於第1濃度為正負5%以內之濃度，則不投入 Ga_2O_3 多晶。

【0079】

進而，於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中，隨著上述 Ga_2O_3 單晶之析出， B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之n型摻雜劑濃度亦降低。因此，於上述n型摻雜劑濃度調整步驟中，根據與由每隔規定時間進行之上述分析步驟獲得之 Ga_2O_3 之濃度相關之分析結果，以相對於上述第2濃度成為正負5%以內之濃度之方式，通過第2管嘴42向坩堝2之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中投入n型摻雜劑。再者，於上述n型摻雜劑濃度調整步驟中，若n型摻雜劑濃度之上述分析結果係相對於第2濃度為正負5%以內之濃度，則不投入n型摻雜劑。

【0080】

於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中，伴隨著上述 Ga_2O_3 單晶之析出，有時 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之 B_2O_3 被納入 Ga_2O_3 單晶中，同時因昇華而損失。因此，於 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之 B_2O_3 之濃度降得過低之情形時，可使用第1管嘴41追加 B_2O_3 ，藉此調整 B_2O_3 之濃度。

【0081】

於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中，相對於加熱裝置1，使坩堝2沿著其軸以上述速度向下下降，藉此，於坩堝2內， Ga_2O_3 單晶自 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶

液52中連續析出，作為晶錠而使厚度增加，並且 Ga_2O_3 單晶與 $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 溶液52之界面向蓋體3側上升。 Ga_2O_3 單晶之結晶生長持續至 Ga_2O_3 單晶之晶錠之厚度成為所需厚度為止。藉由以上獲得 Ga_2O_3 單晶。上述 Ga_2O_3 單晶中之硼之濃度於GDMS中為4質量ppm以上200質量ppm以下。上述 Ga_2O_3 單晶中之硼之濃度於GDMS中較佳為5質量ppm以上100質量ppm以下。針對上述 Ga_2O_3 單晶之GDMS係藉由與上述針對上述 Ga_2O_3 單晶基板之GDMS相同之要點進行。

【0082】

此處，上述 Ga_2O_3 單晶之製造方法可於氮氣氛圍下執行上述一系列步驟。於此種態樣中，構成 Ga_2O_3 單晶生長裝置之坩堝2包含pBN。進而，為了於氮氣氛圍下執行上述一系列步驟，將上述 Ga_2O_3 單晶生長裝置收容於內部經氮氣填滿之腔室內。即便為具有此種特徵之 Ga_2O_3 單晶之製造方法，亦可獲得用以製造能夠抑制產生破裂之 Ga_2O_3 單晶基板之 Ga_2O_3 單晶。

【0083】

[三氧化二鎵單晶基板之製造方法]

< Ga_2O_3 單晶基板製造步驟S200 >

本實施方式之 Ga_2O_3 單晶基板之製造方法包括對藉由上述 Ga_2O_3 單晶之製造方法所獲得之 Ga_2O_3 單晶進行加工，藉此獲得具有圓形狀之主表面之 Ga_2O_3 單晶基板之步驟。如圖4所示，上述 Ga_2O_3 單晶基板之製造方法包括 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100及 Ga_2O_3 單晶基板製造步驟S200。 Ga_2O_3 單晶基板製造步驟S200之目的在於對藉由 Ga_2O_3 單晶製造步驟S100所獲得之 Ga_2O_3 單晶進行加工，藉此獲得 Ga_2O_3 單晶基板。 Ga_2O_3 單晶基板製造步驟

S200包括如下切斷步驟、外周研削步驟、及研磨步驟，藉由依序執行該等步驟而獲得Ga₂O₃單晶基板。

【0084】

切斷步驟係為了由自坩堝2取出之Ga₂O₃單晶之晶錠獲得Ga₂O₃單晶基板，以使上述晶錠成為具有規定厚度之晶圓之方式進行切割之步驟。進而，外周研削步驟係對上述晶圓之外周進行研削，藉此，獲得具有包含中心部及包圍上述中心部之外周之外周部之主表面之晶圓的步驟。外周研削步驟具體而言，係實施倒角加工之步驟。因此，藉由上述外周研削步驟，獲得具有實施有倒角加工之區域作為外周部之主表面。作為切斷步驟及外周研削步驟，可使用先前公知之切斷方法及外周研削方法。進而，研磨步驟係使上述主表面之中心部鏡面化之步驟。作為研磨步驟，可使用先前公知之研磨方法。藉由研磨步驟，使上述中心部之例如JIS B 0681-2：2018所規定之表面粗糙度Ra成為20 nm以下。

【0085】

[作用效果]

藉由執行上述各步驟，製造本實施方式之Ga₂O₃單晶基板。上述Ga₂O₃單晶之製造方法於尤其是Ga₂O₃單晶生長步驟S140中，於所析出之Ga₂O₃單晶中略微納入了B₂O₃之Ga₂O₃單晶結晶生長。藉此，自包含B之上述Ga₂O₃單晶獲得能夠抑制產生破裂之具有適當強度的Ga₂O₃單晶基板。

[實施例]

【0086】

以下，列舉實施例對本發明更詳細地進行說明，但本發明並不限定

於該等。於本實施例中，使用如圖5所示之 Ga_2O_3 單晶製造裝置，依據圖4所示之流程圖製造 Ga_2O_3 單晶基板。於以下說明中，試樣11～試樣19為實施例，試樣a～試樣c為比較例。

【0087】

[Ga_2O_3 單晶基板之製造]

<試樣a>

依據上述專利文獻1所揭示之方法，使用垂直布氏(VB：Vertical Bridgeman)法，藉此，獲得 Ga_2O_3 單晶。於獲得上述 Ga_2O_3 單晶時，適量添加作為n型摻雜劑之氧化錫(SnO_2)。進而，對 Ga_2O_3 單晶依序執行上述切斷步驟、外周研削步驟、及研磨步驟，獲得試樣a之 Ga_2O_3 單晶基板。試樣a之 Ga_2O_3 單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm 。

【0088】

<試樣b>

(Ga_2O_3 單晶製造步驟S100中之準備步驟S110)

首先，藉由先前公知之方法或者藉由購買市售品來準備上述 Ga_2O_3 單晶生長裝置、包含 Ga_2O_3 單晶之晶種51、塊狀之 Ga_2O_3 多晶、作為n型摻雜劑之 SnO_2 、及固體之 B_2O_3 。作為構成 Ga_2O_3 單晶生長裝置之坩堝2，使用內徑為105 mm且包含鉑者。

【0089】

(Ga_2O_3 單晶製造步驟S100中之原材料收容步驟S120)

繼而，藉由先前公知之方法，將晶種51收容於坩堝2之底部，且將塊狀之 Ga_2O_3 多晶、 SnO_2 、及固體之 B_2O_3 依序收容於較該晶種51靠上部。具體而言，收容複數個塊狀之 Ga_2O_3 多晶並重疊。接下來，於上述 Ga_2O_3

多晶上添加 SnO_2 ，且配置固體之 B_2O_3 。 SnO_2 之添加量設為於 Ga_2O_3 單晶基板中Sn之原子濃度成為 $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 之量。

【0090】

(Ga_2O_3 單晶製造步驟S100中之原材料熔融步驟S130)

繼而，利用坩堝保持用台8支持內部收容有晶種51、塊狀之 Ga_2O_3 多晶、 SnO_2 、及固體之 B_2O_3 之坩堝2。其後，對加熱裝置1供給電流而對坩堝2進行加熱，使固體之 B_2O_3 熔融而成為液體之 B_2O_3 ，並且使 Ga_2O_3 多晶及晶種51之一部分、以及 SnO_2 分別溶解於上述 B_2O_3 中，藉此製備 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52。 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之 B_2O_3 中之 Ga_2O_3 之濃度即第1濃度設為20質量%。上述 B_2O_3 中之 SnO_2 之濃度即第2濃度設為100質量ppm。繼而，晶種51之剩餘部分與 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52於其界面接觸。

【0091】

(Ga_2O_3 單晶製造步驟S100中之 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140)

繼而，相對於加熱裝置1，坩堝2沿著其軸向下(底部側)緩緩下降，藉此，於坩堝2中製成晶種51側之溫度降低、 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52側之溫度提高之溫度梯度。藉此，於 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之與晶種51接觸之部分即晶種部，藉由上述 B_2O_3 與 Ga_2O_3 之間之溶解度差使 Ga_2O_3 單晶析出並連續地結晶生長。進而，將該操作持續進行直至 Ga_2O_3 單晶之厚度成為30 mm為止。晶種部之溫度設為 1100°C 。坩堝2沿著其軸向下下降之速度設為2 mm/小時。藉由以上獲得 Ga_2O_3 單晶之晶錠。

【0092】

於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中，執行上述分析步驟、 Ga_2O_3 濃度調整步驟、及n型摻雜劑濃度調整步驟。藉此，將 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之

Ga_2O_3 及n型摻雜劑之濃度自 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140之初期至結束為止控制為正負5%以內之濃度。

【0093】

(Ga_2O_3 單晶基板製造步驟S200)

最後，將於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中所獲得之 Ga_2O_3 單晶之晶錠於切斷步驟、外周研削步驟、及研磨步驟之各步驟中進行加工，藉此獲得 Ga_2O_3 單晶基板。首先，於切斷步驟中，使用先前公知之方法，以使上述晶錠成為具有700 μm 之厚度之晶圓之方式進行切割。於外周研削步驟中，使用先前公知之方法，以對上述晶圓之外周實施倒角加工之方式進行研削，藉此獲得具有包含中心部及包圍上述中心部之外周之外周部之主表面的晶圓。進而，於研磨步驟中，使用先前公知之研磨方法對上述中心部進行研磨，於上述中心部，例如JIS B0681-2：2018所規定之表面粗糙度Ra設為0.2 nm。

【0094】

藉由以上製造試樣b之 Ga_2O_3 單晶基板。試樣b之 Ga_2O_3 單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm 。

【0095】

<試樣c>

將於原材料熔融步驟S130中製備之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之第1濃度設為25質量%，於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為1500°C，除此以外，設為與試樣b相同之要點，藉此製造試樣c之 Ga_2O_3 單晶基板。試樣c之 Ga_2O_3 單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm 。

【0096】

< 試樣11 >

將於原材料熔融步驟S130中製備之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之第1濃度設為20質量%，於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為 $1200^{\circ}C$ ，除此以外，設為與試樣b相同之要點，藉此製造試樣11之 Ga_2O_3 單晶基板。試樣11之 Ga_2O_3 單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm 。

【0097】

< 試樣12 >

於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為 $1273^{\circ}C$ ，除此以外，設為與試樣11相同之要點，藉此製造試樣12之 Ga_2O_3 單晶基板。試樣12之 Ga_2O_3 單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm 。

【0098】

< 試樣13 >

將於原材料熔融步驟S130中製備之 B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液52中之第1濃度設為25質量%，於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為 $1323^{\circ}C$ ，除此以外，設為與試樣11相同之要點，藉此製造試樣13之 Ga_2O_3 單晶基板。試樣13之 Ga_2O_3 單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm 。

【0099】

< 試樣14 >

於準備步驟S110中準備收容單晶生長裝置之腔室、及包含pBN之坩堝2，於氮氣氛圍下執行原材料熔融步驟S130及 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140，以及於 Ga_2O_3 單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為 $1348^{\circ}C$ ，除此以外，設為與試樣13相同之要點，藉此製造試樣14之 Ga_2O_3 單晶基板。試樣14之 Ga_2O_3 單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm 。

【0100】

<試樣15>

於Ga₂O₃單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為1368℃，除此以外，設為與試樣13相同之要點，藉此製造試樣15之Ga₂O₃單晶基板。試樣15之Ga₂O₃單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm。

【0101】

<試樣16>

於Ga₂O₃單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為1388℃，除此以外，設為與試樣13相同之要點，藉此製造試樣16之Ga₂O₃單晶基板。試樣16之Ga₂O₃單晶基板之直徑為100 mm，厚度為650 μm。

【0102】

<試樣17>

於準備步驟S110中準備內徑為160 mm之坩堝2，於Ga₂O₃單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為1273℃，除此以外，設為與試樣13相同之要點，藉此製造試樣17之Ga₂O₃單晶基板。試樣17之Ga₂O₃單晶基板之直徑為150 mm，厚度為680 μm。

【0103】

<試樣18>

於Ga₂O₃單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為1323℃，除此以外，設為與試樣17相同之要點，藉此製造試樣18之Ga₂O₃單晶基板。試樣18之Ga₂O₃單晶基板之直徑為150 mm，厚度為680 μm。

【0104】

<試樣19>

於準備步驟S110中準備收容單晶生長裝置之腔室、及包含pBN之坩堝2，於氮氣氛圍下執行原材料熔融步驟S130及Ga₂O₃單晶生長步驟S140，於Ga₂O₃單晶生長步驟S140中將晶種部之溫度設為1388℃，除此以外，設為與試樣17相同之要點，藉此製造試樣19之Ga₂O₃單晶基板。試樣19之Ga₂O₃單晶基板之直徑為150 mm，厚度為680 μm。

【0105】

[藉由GDMS之組成分析]

對試樣a～試樣c、及試樣11～試樣19之Ga₂O₃單晶基板執行上述使用GDMS之組成分析方法，藉此，測定上述Ga₂O₃單晶基板中所包含之硼(B)之濃度。將結果示於表1中。表1所示之各元素之濃度之單位為質量ppm。又，表1中之「<0.3」意指未達0.3質量ppm。

【0106】

[奈米壓痕硬度之測定]

對試樣a～試樣c、及試樣11～試樣19之Ga₂O₃單晶基板執行上述測定方法，藉此，分別求出主表面上之規定之5個部位之奈米壓痕硬度。用於執行上述測定方法之測定裝置及測定條件如下。

【0107】

使用裝置：奈米壓痕儀(商品名：「Bruker Hysitron TI980 Triboindenter」，Bruker Japan股份有限公司製造)

使用壓頭：三角錐壓頭

最大荷重：10 mN

測定氛圍：大氣

測定溫度：室溫(25℃)

壓頭稜線之至少一邊與將Ga₂O₃單晶之[100]方向投影至上述主表面之方向之交叉角：0～10°。

【0108】

將於同一基板對同一部位測定3次而求出之3個測定值之平均值設為奈米壓痕硬度，於主表面上之規定之5個部位分別求出奈米壓痕硬度。進而，根據於上述5個部位求出之合計5個奈米壓痕硬度求出其平均值(單位GPa)。亦求出主表面上之規定之5個部位之各部位之奈米壓痕硬度之最大值與最小值之差量(於表1中記為「最大最小差」)。上述規定之5個部位係指以下主表面上之位置。即，將上述主表面之中心至上述中心部與上述外周部之交界之長度設為r，將通過上述中心且於上述主表面上相互正交之2條軸設為X軸及Y軸，且將上述Y軸設為上述Ga₂O₃單晶之b軸時，上述9個部位之上述X軸及上述Y軸之座標(X，Y)為(0，0)、(r－5，0)、(0，r－5)、(-(r－5)，0)、及(0，-(r－5))。上述r、以及上述座標(X，Y)中之X及Y之單位為mm。試樣a、試樣b、試樣c、及試樣11～試樣16之上述r為48 mm。試樣17～試樣19之上述r為74 mm。將結果示於表1中。

【0109】

[破裂荷重測試]

對於試樣a～試樣c、及試樣11～試樣19之Ga₂O₃單晶基板，使用測力計對主表面之中心施加荷重，藉此確認上述基板破裂之荷重。將結果示於表1中。所測得之荷重越大，評價為越不易破裂。用於執行上述破裂荷重測試之測力計及附件如下。

測力計：「PS-200N(型號)」，IMADA股份有限公司製造，最大荷重200 N

附件：圓錐形(S-3)。

【0110】

[比電阻、載子濃度、及電子遷移率]

對於試樣a～試樣c、及試樣11～試樣19之Ga₂O₃單晶基板，使用上述基板之中央部製作霍爾測定用樣品，對各霍爾測定用樣品執行上述測定方法，藉此求出各試樣中之比電阻、載子濃度、及電子遷移率。將結果示於表2中。

【0111】

[表1]

表1

	直徑 (mm)	Ga ₂ O ₃ 濃度 (質量%)	晶種部溫度 (°C)	B濃度 (質量ppm)	奈米壓痕硬度		破裂荷重 (N)
					平均值 (GPa)	最大最小差 (GPa)	
試樣a	100	-	-	<0.3	14.0	3.0	80
試樣b	100	20	1100	1	14.1	3.0	80
試樣c	100	25	1500	1000	25.0	4.0	82
試樣11	100	20	1200	4	14.9	2.5	96
試樣12	100	20	1273	5	15.0	2.4	102
試樣13	100	25	1323	50	17.1	1.0	115
試樣14	100	25	1348	100	18.4	1.5	120
試樣15	100	25	1368	150	19.4	2.0	110
試樣16	100	25	1388	200	20.2	2.5	100
試樣17	150	25	1273	4	15.0	2.5	90
試樣18	150	25	1323	5	17.4	1.0	120
試樣19	150	25	1388	200	21.0	2.5	95

【0112】

[表2]

表2

	比電阻 (Ω·cm)	載子濃度 (cm ⁻³)	電子遷移率 (cm ² /V·s)
試樣a	0.024	3.8×10 ¹⁸	69
試樣b	0.024	3.9×10 ¹⁸	67
試樣c	0.014	5.0×10 ¹⁸	89
試樣11	0.028	3.6×10 ¹⁸	62
試樣12	0.028	3.6×10 ¹⁸	62
試樣13	0.027	3.6×10 ¹⁸	64
試樣14	0.029	3.6×10 ¹⁸	60
試樣15	0.030	3.6×10 ¹⁸	58
試樣16	0.029	3.6×10 ¹⁸	60
試樣17	0.010	5.0×10 ¹⁷	1250
試樣18	0.010	5.0×10 ¹⁷	1250
試樣19	0.012	4.8×10 ¹⁷	1085

【0113】

[探討]

根據表1及表2，試樣11～試樣19之Ga₂O₃單晶基板於GDMS中，B之濃度均為4質量ppm以上200質量ppm以下。於該情形時，奈米壓痕硬度之平均值均為14.8 GPa以上22.0 GPa以下，並且破裂荷重顯示90 N以上。相對於此，試樣a～試樣c之Ga₂O₃單晶基板於GDMS中，B之濃度均未達4質量ppm或超過200質量ppm。於該情形時，奈米壓痕硬度之平均值未達14.8 GPa或者超過22.0 GPa，破裂荷重顯示未達90 N。因此，提示試樣11～試樣19之Ga₂O₃單晶基板抑制產生破裂。

【0114】

圖6係表示實施例中所製作之三氧化二鎵單晶基板中之奈米壓痕硬度

與破裂荷重之關係的曲線圖。尤其是根據圖6可以理解，Ga₂O₃單晶基板於奈米壓痕硬度處於14.8 GPa以上22.0 GPa以下之範圍時，破裂荷重顯示90 N以上。

【0115】

以如上方式對本發明之實施方式及實施例進行了說明，但自最初開始亦預定將上述各實施方式及實施例之構成適當組合。

【0116】

應該認為本次所揭示之實施方式及實施例之所有方面均為例示，而非限制性者。本發明之範圍並非由上述實施方式及實施例表示，而是由申請專利範圍表示，意圖包含與申請專利範圍均等之含義、及範圍內之所有變更。

【符號說明】

【0117】

- 1:加熱裝置
- 2:坩堝
- 3:蓋體
- 8:坩堝保持用台
- 9:下軸
- 10:主表面
- 11:中心部
- 11a:矩形狀切片
- 12:外周部
- 13:交界

21:電極

41:第1管嘴

42:第2管嘴

51:晶種

52: B_2O_3 - Ga_2O_3 溶液

100:三氧化二鎵單晶基板(Ga_2O_3 單晶基板)

O:中心

r:主表面之中心至中心部與外周部之交界之長度

S100: Ga_2O_3 單晶製造步驟

S110:準備步驟

S120:原材料收容步驟

S130:原材料熔融步驟

S140: Ga_2O_3 單晶生長步驟

S200: Ga_2O_3 單晶基板製造步驟

【發明申請專利範圍】

【請求項1】

一種三氧化二鎵單晶基板，其係具有圓形狀之主表面者，

上述三氧化二鎵單晶基板之直徑為100 mm以上，

上述三氧化二鎵單晶基板之厚度為600 μm 以上，

上述三氧化二鎵單晶基板包含硼，

上述硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。

【請求項2】

如請求項1之三氧化二鎵單晶基板，其中上述硼之濃度於輝光放電質譜分析中為5質量ppm以上100質量ppm以下。

【請求項3】

如請求項1或2之三氧化二鎵單晶基板，其中上述主表面係三氧化二鎵單晶之(001)面，

上述主表面具有包含其中心之中心部、及包圍上述中心部之外周部，

上述外周部係實施有倒角加工之區域，

依據使用三角錐壓頭之奈米壓痕法，於將最大荷重設為10 mN，且以壓痕之一邊與將上述三氧化二鎵單晶之[100]方向投影至上述主表面之方向之交叉角成為 0° 以上 10° 以下之方式施加荷重的條件下，於上述主表面上之5個部位測得之奈米壓痕硬度均為14.8 GPa以上22.0 GPa以下，

將上述主表面之上述中心至上述中心部與上述外周部之交界之長度設為 r ，將通過上述中心且於上述主表面上相互正交之2條軸設為X軸及Y

軸，且將上述Y軸設為上述三氧化二鎵單晶之b軸時，由上述X軸及上述Y軸規定之上述5個部位之座標(X，Y)為(0，0)、(r-5，0)、(0，r-5)、(-(r-5)，0)、及(0，-(r-5))，上述r、以及上述座標(X，Y)中之X及Y之單位為mm。

【請求項4】

如請求項1或2之三氧化二鎵單晶基板，其中上述三氧化二鎵單晶基板包含銻及銨之兩者或任一者，

上述銻之濃度及上述銨之濃度於輝光放電質譜分析中均為0.1質量ppm以下。

【請求項5】

如請求項1或2之三氧化二鎵單晶基板，其中於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之比電阻為 $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 $2.0 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下，

於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之載子濃度為 $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下，

於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之電子遷移率為 $0.2 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上 $15000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以下。

【請求項6】

一種三氧化二鎵單晶之製造方法，上述製造方法係於大氣氛圍下執行，且包括如下步驟：

準備至少具備圓筒狀之坩堝、及以包圍上述坩堝之外周之方式配置之加熱裝置之單晶生長裝置；

將包含上述三氧化二鎵單晶之晶種收容於上述坩堝之底部，且將塊

狀或粉末狀之三氧化二鎵多晶、**n**型摻雜劑、及氧化硼收容於上述坩堝內之較上述晶種靠上部；

利用上述加熱裝置對上述坩堝進行加熱，藉此，使上述晶種之一部分溶解，且獲得源自上述晶種之一部分及上述三氧化二鎵多晶之三氧化二鎵以第1濃度、上述**n**型摻雜劑以第2濃度分別溶解於上述氧化硼中而成之溶液，並且使上述溶液與上述晶種之剩餘部分接觸；及

自上述溶液使結晶於上述晶種之剩餘部分上生長，藉此獲得三氧化二鎵單晶；

上述坩堝包含鉑，

上述三氧化二鎵單晶中之硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。

【請求項7】

一種三氧化二鎵單晶之製造方法，上述製造方法係於氮氣氛圍下執行，且包括如下步驟：

準備至少具備圓筒狀之坩堝、及以包圍上述坩堝之外周之方式配置之加熱裝置之單晶生長裝置；

將包含上述三氧化二鎵單晶之晶種收容於上述坩堝之底部，且將塊狀或粉末狀之三氧化二鎵多晶、**n**型摻雜劑、及氧化硼收容於上述坩堝內之較上述晶種靠上部；

利用上述加熱裝置對上述坩堝進行加熱，藉此，使上述晶種之一部分溶解，且獲得源自上述晶種之一部分及上述三氧化二鎵多晶之三氧化二鎵以第1濃度、上述**n**型摻雜劑以第2濃度分別溶解於上述氧化硼中而成之溶液，並且使上述溶液與上述晶種之剩餘部分接觸；及

自上述溶液使結晶於上述晶種之剩餘部分上生長，藉此獲得三氧化二鎵單晶；

上述坩堝包含熱分解氮化硼，

上述三氧化二鎵單晶中之硼之濃度於輝光放電質譜分析中為4質量ppm以上200質量ppm以下。

【請求項8】

如請求項6或7之三氧化二鎵單晶之製造方法，其中上述單晶生長裝置具有用以向上述坩堝內投入上述三氧化二鎵多晶及上述n型摻雜劑之管嘴、及用以將上述坩堝密閉之蓋體，

上述蓋體具有供上述管嘴插入之孔，

獲得上述三氧化二鎵單晶之步驟包括如下步驟：

通過上述管嘴對經上述蓋體密閉之上述坩堝中之上述溶液進行取樣，藉此，對上述溶液中之源自上述晶種之一部分及上述三氧化二鎵多晶之三氧化二鎵、以及上述n型摻雜劑之濃度進行分析；

根據關於上述三氧化二鎵之濃度之分析結果，以相對於上述第1濃度成為正負5%以內之濃度之方式，通過上述管嘴向上述坩堝中之上述溶液投入上述三氧化二鎵多晶；及

根據關於上述n型摻雜劑之濃度之分析結果，以相對於上述第2濃度成為正負5%以內之濃度之方式，通過上述管嘴向上述坩堝中之上述溶液投入上述n型摻雜劑。

【請求項9】

一種三氧化二鎵單晶基板之製造方法，其包括如下步驟：

對藉由如請求項6或7之三氧化二鎵單晶之製造方法所獲得之上述三

氧化二鎵單晶進行加工，藉此獲得具有圓形狀之主表面之三氧化二鎵單晶基板。

【請求項10】

如請求項2之三氧化二鎵單晶基板，其中上述主表面係三氧化二鎵單晶之(001)面，

上述主表面具有包含其中心之中心部、及包圍上述中心部之外周部，

上述外周部係實施有倒角加工之區域，

依據使用三角錐壓頭之奈米壓痕法，於將最大荷重設為10 mN，且以壓痕之一邊與將上述三氧化二鎵單晶之[100]方向投影至上述主表面之方向之交叉角成為 0° 以上 10° 以下之方式施加荷重的條件下，於上述主表面上之5個部位測得之奈米壓痕硬度均為14.8 GPa以上22.0 GPa以下，

將上述主表面之上述中心至上述中心部與上述外周部之交界之長度設為 r ，將通過上述中心且於上述主表面上相互正交之2條軸設為X軸及Y軸，且將上述Y軸設為上述三氧化二鎵單晶之b軸時，由上述X軸及上述Y軸規定之上述5個部位之座標(X，Y)為(0，0)、($r-5$ ，0)、(0， $r-5$)、(-($r-5$)，0)、及(0，-($r-5$))，上述 r 、以及上述座標(X，Y)中之X及Y之單位為mm，

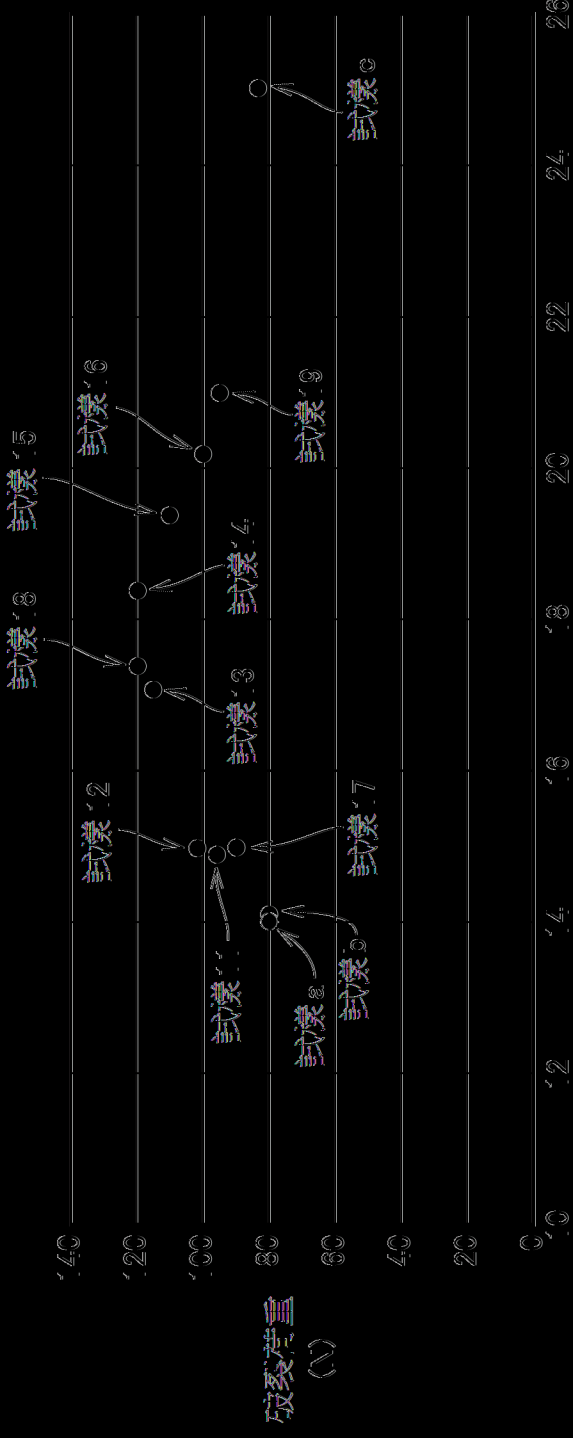
上述三氧化二鎵單晶基板包含銻及銱之兩者或任一者，

上述銻之濃度及上述銱之濃度於輝光放電質譜分析中均為0.1質量ppm以下，

於藉由范德堡法之霍爾測定中於 25°C 下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之比電阻為 $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上 $2.0 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下，

於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之載子濃度為 $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下，

於藉由范德堡法之霍爾測定中於25°C下測得之上述三氧化二鎵單晶基板之電子遷移率為 $0.2 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上 $15000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以下。



終末壓強度 (GPa)

[圖6]