

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6964517号
(P6964517)

(45) 発行日 令和3年11月10日(2021.11.10)

(24) 登録日 令和3年10月21日(2021.10.21)

(51) Int.Cl.		F I			
GO 1 N	21/21	(2006.01)	GO 1 N	21/21	Z
GO 1 B	11/06	(2006.01)	GO 1 B	11/06	G
HO 1 L	21/66	(2006.01)	HO 1 L	21/66	L

請求項の数 24 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2017-509926 (P2017-509926)	(73) 特許権者	000002093
(86) (22) 出願日	平成28年3月25日 (2016. 3. 25)		住友化学株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2016/059699		東京都中央区新川二丁目2 7 番 1 号
(87) 国際公開番号	W02016/158785	(74) 代理人	110000877
(87) 国際公開日	平成28年10月6日 (2016. 10. 6)		龍華国際特許業務法人
審査請求日	平成31年2月12日 (2019. 2. 12)	(74) 代理人	100112520
(31) 優先権主張番号	特願2015-67788 (P2015-67788)		弁理士 林 茂則
(32) 優先日	平成27年3月29日 (2015. 3. 29)	(72) 発明者	山本 大貴
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国 (JP)		茨城県つくば市北原 6 番 住友化学株式会 社内
(31) 優先権主張番号	特願2015-67789 (P2015-67789)	(72) 発明者	笠原 健司
(32) 優先日	平成27年3月29日 (2015. 3. 29)		茨城県つくば市北原 6 番 住友化学株式会 社内
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国 (JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 積層基板の測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ベース基板と、被測定層と、前記ベース基板および前記被測定層の間に位置する吸収層と、を有する積層基板の測定方法であって、

前記被測定層が、単層である被測定単層が複数積層された被測定積層を有し、

前記被測定層が位置する側の前記積層基板の表面に向けて、しきい波長より短波長の光を含む入射光を照射し、前記入射光の前記積層基板からの反射光を測定することにより、前記しきい波長以下の波長における互いに独立な $2n$ (但し、 n は、前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数であり、 2 以上の整数である。) 以上の反射光関連値を取得するステップと、

$2n$ 以上の前記反射光関連値を用いて、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層に関する値を計算するステップと、を有し、

前記しきい波長として、前記吸収層の消衰係数 k を波長 (単位は nm) の関数 $k()$ として表した場合の一回微分 $dk() / d$ の絶対値が消衰微分しきい値以下となる波長範囲の最大波長を用い、

前記計算するステップにおいて、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層の厚さと前記被測定単層に関する値を計算し、

前記解析モデルにおいて、 2 以上の前記被測定単層のうち 1 以上の前記被測定単層が、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルを採用する

積層基板の測定方法。

【請求項 2】

前記取得するステップにおいて、前記入射光の入射角を固定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの偏光成分および反射率から選択された 1 以上の値を、 $2n$ 以上の波長について取得する

請求項 1 に記載の測定方法。

【請求項 3】

前記取得するステップにおいて、前記入射光の入射角を固定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの偏光成分および反射率から選択された 2 以上の値を、 n 以上の波長について取得する

請求項 1 に記載の測定方法。

【請求項 4】

前記取得するステップにおいて、前記入射光の入射角が n 以上の場合について前記反射光を測定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの偏光成分および反射率から選択された 2 以上の値を、前記入射角ごとに取得する

請求項 1 に記載の測定方法。

【請求項 5】

前記取得するステップにおいて、前記入射光の入射角が $2n$ 以上の場合について前記反射光を測定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの偏光成分および反射率から選択された 1 以上の値を、前記入射角ごとに取得する

請求項 1 に記載の測定方法。

【請求項 6】

前記反射光を分光測定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの分光偏光成分および分光反射率から選択された 1 以上の分光値を取得する

請求項 2 から請求項 5 の何れか一項に記載の測定方法。

【請求項 7】

前記入射光として直線偏光を用い、前記反射光の二つの分光偏光成分として、 s 偏光と p 偏光の分光位相差 () および分光反射振幅比角 (\tan) を取得する

請求項 6 に記載の測定方法。

【請求項 8】

前記解析モデルが、クラマース・クローニヒの関係式を満たす誘電関数モデルである

請求項 1 に記載の測定方法。

【請求項 9】

前記誘電関数モデルが、パラメトリック半導体モデルまたは $T a u c - L o r e n z$ モデルを含む

請求項 8 に記載の測定方法。

【請求項 10】

前記解析モデルにおいて、2 以上の前記被測定単層のうち 1 以上の前記被測定単層が、測定波長域で光を全透過する透過モデルを採用する

請求項 1 から請求項 9 の何れか一項に記載の測定方法。

【請求項 11】

前記被測定層に含まれる各被測定単層および前記吸収層が、互いに組成が異なる半導体または誘電体からなる

請求項 1 から請求項 10 の何れか一項に記載の測定方法。

【請求項 12】

前記被測定層が第 1 被測定単層および第 2 被測定単層を含み、前記第 2 被測定単層が、前記第 1 被測定単層より前記吸収層の側に位置し、

前記第 1 被測定単層が、 $I n_{x_1} A l_{x_2} G a_{x_3} N (x_1 + x_2 + x_3 = 1)$ からなり、

前記第 2 被測定単層が、 $I n_{z_1} A l_{z_2} G a_{z_3} N (z_1 + z_2 + z_3 = 1)$ からな

10

20

30

40

50

り、

前記第2被測定単層の禁制帯幅が、前記第1被測定単層の禁制帯幅より大きい
請求項11に記載の測定方法。

【請求項13】

前記第1被測定単層が、 $Al_{x_2}Ga_{x_3}N$ ($x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 \leq 0.5$) からなり、

前記第2被測定単層が、 AlN からなる

請求項12に記載の測定方法。

【請求項14】

前記第2被測定単層が、前記計算するステップにおける前記カーブフィッティングの前記解析モデルとして、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルを採用するものであり、

前記計算するステップにおける前記カーブフィッティングにおいて、前記第1被測定単層と同一の条件で製造した単層を対象とする予備的測定により予め決定した当該単層に関する値を、前記第1被測定単層に関するパラメータの初期値とする

請求項12または請求項13に記載の測定方法。

【請求項15】

前記第2被測定単層が、前記計算するステップにおける前記カーブフィッティングの前記解析モデルとして、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルを採用するものであり、

前記計算するステップにおける前記カーブフィッティングにおいて、前記第1被測定単層および前記第2被測定単層を対象とする予備的カーブフィッティングにより得られた前記第1被測定単層および前記第2被測定単層の厚さを、前記第1被測定単層および前記第2被測定単層に関するパラメータの初期値とする

請求項12から請求項14の何れか一項に記載の測定方法。

【請求項16】

前記被測定層が第1被測定単層および第3被測定単層を含み、前記第1被測定単層が、前記第3被測定単層より前記吸収層の側に位置し、

前記第1被測定単層が、 $In_{x_1}Al_{x_2}Ga_{x_3}N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$) からなり、

前記第3被測定単層が、 $In_{q_1}Al_{q_2}Ga_{q_3}N$ ($q_1 + q_2 + q_3 = 1$) からなり、

前記第3被測定単層の禁制帯幅が、前記第1被測定単層の禁制帯幅より小さい

請求項11から請求項15の何れか一項に記載の測定方法。

【請求項17】

前記第1被測定単層が、 $Al_{x_2}Ga_{x_3}N$ ($x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 \leq 0.5$) からなり、

前記第3被測定単層が、 GaN からなる

請求項16に記載の測定方法。

【請求項18】

前記第3被測定単層が、p型の GaN からなり、

前記第3被測定単層の厚さが、前記第1被測定単層の厚さより大きい

請求項17に記載の測定方法。

【請求項19】

前記被測定層が第1被測定単層および第3被測定単層を含み、前記第1被測定単層が、前記第3被測定単層より前記吸収層の側に位置し、

前記第1被測定単層が、 $In_{x_1}Al_{x_2}Ga_{x_3}N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$) からなり、

前記第3被測定単層が、窒化シリコンからなる

請求項11から請求項15の何れか一項に記載の測定方法。

10

20

30

40

50

【請求項 2 0】

前記計算するステップにおいて、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層の厚さと混晶比を計算する請求項 1 2 から請求項 1 9 の何れか一項に記載の測定方法。

【請求項 2 1】

前記吸収層が、 $In_{y_1}Al_{y_2}Ga_{y_3}N$ ($y_1 + y_2 + y_3 = 1$) からなり、前記吸収層の禁制帯幅が、前記第 1 被測定単層の禁制帯幅より小さい請求項 1 2 から請求項 2 0 の何れか一項に記載の測定方法。

【請求項 2 2】

前記吸収層が、GaN からなり、前記しきい波長が、370 nm である請求項 2 1 に記載の測定方法。

10

【請求項 2 3】

前記吸収層の厚さが、前記吸収層の消衰係数 k を波長 (単位は nm) の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の二回微分 $d^2k(\lambda)/d\lambda^2$ が 0 となる波長での光の侵入深さ以上である

請求項 1 から請求項 2 2 の何れか一項に記載の測定方法。

【請求項 2 4】

前記吸収層が、GaN からなり、GaN からなる前記吸収層の厚さが、240 nm 以上である請求項 2 3 に記載の測定方法。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、積層基板の測定方法、積層基板および測定装置に関する。

【背景技術】

【0002】

基板上に形成された薄膜の組成または厚さを測定する方法として、X線回折法、X線反射法、PL (photoluminescence) 法、TEM (Transmission Electron Microscope) を用いた断面観察法、分光エリプソメトリー等がある。

30

【0003】

分光エリプソメトリーを用いて薄膜の厚さまたは組成を測定する方法として、たとえば、特許文献 1 には、薄膜構造および誘電率の波長依存性を精度よく正確に決定することを目的として、「分光エリプソメータを用いた薄膜計測方法」が開示されている。当該薄膜計測方法として、「 E_{TE} 、 E_{TM} スペクトル測定データ化ステップ 10, 20 は、計測対象の基板表面の薄膜を、入射光の波長を変えて波長 λ_i ごとの入射光と反射光の偏光の変化である測定スペクトル $E_{TE}(\lambda_i)$ と $E_{TM}(\lambda_i)$ を得る。 M_k 、 M_k モデリングスペクトル算出ステップ 21, 22 は、前記基板の ($N_0(n_0, k_0)$)、第 1 層目の ($d_1, N_1(n_1, k_1)$)、第 j 層目の ($d_j, N_j(n_j, k_j)$) を分散式を用いて仮定し、さらに公称入射角 (θ_0) の近傍の k を関数とする複数のモデルをたて、ここからモデリングスペクトル $M_k(\lambda_i)$ と $M_k(\lambda_i)$ を得る。比較評価ステップ 23, 24 は、前記 E_{TE} 、 E_{TM} スペクトルと前記 M_k 、 M_k モデリングスペクトルを比較し、評価基準に達した構造を測定結果と決定する。」との記載がある。

40

【0004】

たとえば、特許文献 2 には、エリプソメータを用いて得たデータから、多結晶化合物半導体の組成を算出することを目的として、「分光エリプソメータを用いた多結晶化合物半導体の組成決定方法」が開示されている。当該組成決定方法として、「スペクトル測定段階 10 は、計測対象の前記多結晶化合物半導体層を、入射光の波長を変えて波長 λ_i ごとの入射光と反射光の偏光の変化である測定スペクトルを得る。解析段階 20, 30 は、複数種類のモデルを得て、モデルごとに化合物半導体の組成比率、混合比、膜厚、分散式等

50

について前記測定スペクトルとのフィッティングを行い、最良のモデルを決定する。計算段階40は、前記選択された最良モデルの各結晶化合物半導体の混合比と前記結晶化合物半導体中の注目原子の組成比率に基づいて多結晶化合物半導体注目原子の濃度を算出する。」との記載がある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2002-340528号公報

【特許文献2】特開2003-315257号公報

【発明の概要】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

化合物半導体層の組成および厚さは、たとえば当該化合物半導体層により形成されるヘテロ界面での二次元電子ガス(2DEG)の濃度に大きく影響する。このため、当該ヘテロ界面をチャネルとする半導体デバイスの性能を適正に管理する観点から、化合物半導体層の組成および厚さを適正に管理する必要があり、管理の前提として、化合物半導体層の組成および厚さを正確かつ効率良く測定することが望まれる。2DEGを生成するヘテロ界面を構成するような化合物半導体層の各層の厚さが通常数十nmであることを考慮すると、厚さの測定精度はnmオーダーである必要があり、生産過程での利用を考慮すると、測定のスループットが高く、ウェハ面内全域でのマッピング測定が可能であることも望まれる。

20

【0007】

この点、X線回折法、X線反射法およびTEM断面観察法は測定のスループットが低く、X線反射法およびTEM断面観察法はマッピング測定にも適さない。また、PLでは、化合物半導体層の組成の測定は可能であっても、厚さを測定することはできない。

【0008】

一方、分光エリプソメトリーは、測定のスループットが高く、マッピング測定が可能であり、化合物半導体層の組成および厚さ測定的手法としては有望である。しかし、測定の対象となる化合物半導体層は、通常その下層に多数の層が積層されており、超格子バッファ層等を用いる場合には、積層数が数十層以上に及ぶ場合も多く、このような場合、分光エリプソメトリーにおける解析モデルが複雑になり、フィッティングにおける収束が困難になる場合もある。

30

【0009】

本発明の目的は、複雑な下地層構成を有する場合であっても、高精度かつ高スループットに化合物半導体層の組成および厚さをマッピング測定することが可能な技術を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記課題を解決するために、本発明の第1の態様においては、ベース基板と、被測定層と、前記ベース基板および前記被測定層の間に位置する吸収層と、を有する積層基板の測定方法であって、前記被測定層が、単層である被測定単層または前記被測定単層が複数積層された被測定積層を有し、前記被測定層が位置する側の前記積層基板の表面に向けて、しきい波長より短波長の光を含む入射光を照射し、前記入射光の前記積層基板からの反射光を測定することにより、前記しきい波長以下の波長における互いに独立な $2n$ (但し、 n は、前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数であり、1以上の整数である。)以上の反射光関連値を取得するステップと、 $2n$ 以上の前記反射光関連値を用いて、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層に関する値を計算するステップと、を有し、前記しきい波長として、前記吸収層の消衰係数 k を波長(単位はnm)の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の一回微分 $dk(\lambda)/d\lambda$ の絶対値が消衰微分しきい値以下となる波長範囲の最大波長を用いる積層基板の測定方法を提供する。消衰微分しきい

40

50

値とは消衰係数が急激に変化するところを示すように定められる値をいう。消衰微分しきい値として好ましくは 1×10^{-3} であり、より好ましくは 5×10^{-4} であり、さらに好ましくは 1×10^{-4} である。

【0011】

前記取得するステップにおいて、前記入射光の入射角を固定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの偏光成分および反射率から選択された1以上の値を、 $2n$ 以上の波長について取得してもよい。あるいは、前記取得するステップにおいて、前記入射光の入射角を固定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの偏光成分および反射率から選択された2以上の値を、 n 以上の波長について取得してもよい。あるいは、前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が2以上である場合、前記取得するステップにおいて、前記入射光の入射角が n 以上の場合について前記反射光を測定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの偏光成分および反射率から選択された2以上の値を、前記入射角ごとに取得してもよい。あるいは、前記取得するステップにおいて、前記入射光の入射角が $2n$ 以上の場合について前記反射光を測定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの偏光成分および反射率から選択された1以上の値を、前記入射角ごとに取得してもよい。

10

【0012】

前記反射光を分光測定し、前記反射光関連値として、前記反射光の二つの分光偏光成分および分光反射率から選択された1以上の分光値を取得してもよい。この場合、前記入射光として直線偏光を用い、前記反射光の二つの分光偏光成分として、 s 偏光と p 偏光の分光位相差 () および分光反射振幅比角 (\tan) を取得してもよい。

20

【0013】

前記計算するステップにおいて、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層の厚さと前記被測定単層に関する値を計算してもよい。この場合において前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が2以上である場合、前記解析モデルにおいて、2以上の前記被測定単層のうち1以上の前記被測定単層が、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルを採用してもよい。前記解析モデルが、クラマース・クローニヒの関係式を満たす誘電関数モデルであってもよい。前記誘電関数モデルが、パラメトリック半導体モデルまたは $Ta u c - L o r e n z$ モデルを含んでもよい。前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が2以上である場合、前記解析モデルにおいて、2以上の前記被測定単層のうち1以上の前記被測定単層が、測定波長域で光を全透過する透過モデルを採用してもよい。

30

【0014】

前記被測定層に含まれる各被測定単層および前記吸収層が、互いに組成が異なる半導体または誘電体からなるものであってもよい。半導体として、 $I V$ 族半導体および $I I I - V$ 族化合物半導体を挙げることができる。 $I V$ 族半導体として、 C 、 $S i$ 、 $G e$ および $S n$ から選択された1種類以上の原子を含む半導体、たとえば $C_a S i_b G e_c S n_d$ ($0 \leq a \leq 1$ 、 $0 \leq b \leq 1$ 、 $0 \leq c \leq 1$ 、 $0 \leq d \leq 1$ 、 $a + b + c + d = 1$) が例示できる。 $I I I - V$ 族化合物半導体として、 $I I I$ 族原子である B 、 $A l$ 、 $G a$ および $I n$ から選択された1種類以上の原子を含み、 V 族原子である N 、 P 、 $A s$ および $S b$ から選択された1種類以上の原子を含む化合物半導体、たとえば、 $A l_a G a_b I n_c P_d A s_e S b_f$ ($0 \leq a \leq 1$ 、 $0 \leq b \leq 1$ 、 $0 \leq c \leq 1$ 、 $0 \leq d \leq 1$ 、 $0 \leq e \leq 1$ 、 $0 \leq f \leq 1$ 、 $a + b + c = 1$ 、 $d + e + f = 1$)、 $B_a A l_b G a_c I n_d N$ ($0 \leq a \leq 1$ 、 $0 \leq b \leq 1$ 、 $0 \leq c \leq 1$ 、 $0 \leq d \leq 1$ 、 $a + b + c + d = 1$) が例示できる。誘電体として、 $S i O_2$ 、 $S i_3 N_4$ 、 $S i O N$ 、 $I n O_2$ 、 $S n O_2$ 、 $I n S n O_2$ 、 $Z n O_2$ 、 $T i O_2$ 、 $A l_2 O_3$ が例示できる。

40

【0015】

前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が2以上である場合、前記被測定層が第1被測定単層および第2被測定単層を含み、前記第2被測定単層が、前記第1被測定単層より前記吸収層の側に位置し、前記第1被測定単層が、 $I n_{x_1} A l_{x_2} G a_{x_3} N$ (

50

$x_1 + x_2 + x_3 = 1$) からなり、前記第 2 被測定単層が、 $In_{z_1} Al_{z_2} Ga_{z_3} N$ ($z_1 + z_2 + z_3 = 1$) からなり、前記第 2 被測定単層の禁制帯幅が、前記第 1 被測定単層の禁制帯幅より大きいものであってもよい。前記第 1 被測定単層が、 $Al_{x_2} Ga_{x_3} N$ ($x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 \leq 0.5$) からなり、前記第 2 被測定単層が、 AlN からなるものであってもよい。前記計算するステップにおいて、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層の厚さと前記被測定単層に関する値を計算し、前記第 2 被測定単層が、前記計算するステップにおける前記カーブフィッティングの前記解析モデルとして、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルを採用するものである場合、前記計算するステップにおける前記カーブフィッティングにおいて、前記第 1 被測定単層と同一の条件で製造した単層を対象とする予備的測定により予め決定した当該単層に関する値を、前記第 1 被測定単層に関するパラメータの初期値としてもよい。前記計算するステップにおいて、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層の厚さと前記被測定単層に関する値を計算し、前記第 2 被測定単層が、前記計算するステップにおける前記カーブフィッティングの前記解析モデルとして、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルを採用するものである場合、前記計算するステップにおける前記カーブフィッティングにおいて、前記第 1 被測定単層および前記第 2 被測定単層を対象とする予備的カーブフィッティングにより得られた前記第 1 被測定単層および前記第 2 被測定単層の厚さを、前記第 1 被測定単層および前記第 2 被測定単層に関するパラメータの初期値としてもよい。

10

20

【0016】

前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が 2 以上である場合、前記被測定層が第 1 被測定単層および第 3 被測定単層を含み、前記第 1 被測定単層が、前記第 3 被測定単層より前記吸収層の側に位置し、前記第 1 被測定単層が、 $In_{x_1} Al_{x_2} Ga_{x_3} N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$) からなり、前記第 3 被測定単層が、 $In_{q_1} Al_{q_2} Ga_{q_3} N$ ($q_1 + q_2 + q_3 = 1$) からなり、前記第 3 被測定単層の禁制帯幅が、前記第 1 被測定単層の禁制帯幅より小さいものであってもよい。前記第 1 被測定単層が、 $Al_{x_2} Ga_{x_3} N$ ($x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 \leq 0.5$) からなり、前記第 3 被測定単層が、 GaN からなるものであってもよい。前記第 3 被測定単層が、 p 型の GaN からなるものであってもよく、この場合、前記第 3 被測定単層の厚さが、前記第 1 被測定単層の厚さより大きくてもよい。前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が 2 以上である場合、前記被測定層が第 1 被測定単層および第 3 被測定単層を含み、前記第 1 被測定単層が、前記第 3 被測定単層より前記吸収層の側に位置し、前記第 1 被測定単層が、 $In_{x_1} Al_{x_2} Ga_{x_3} N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$) からなり、前記第 3 被測定単層が、窒化シリコンからなるものであってもよい。前記計算するステップにおいて、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層の厚さと混晶比を計算するものであってもよい。半導体には、不純物がドーピングされていてもよい。前記吸収層が、 $In_{y_1} Al_{y_2} Ga_{y_3} N$ ($y_1 + y_2 + y_3 = 1$) からなり、前記吸収層の禁制帯幅が、前記第 1 被測定単層の禁制帯幅より小さいものであってもよい。

30

40

【0017】

前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が 1 である場合、前記被測定単層が、 $In_{x_1} Al_{x_2} Ga_{x_3} N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$) からなるものであってもよい。前記被測定単層が、 $Al_{x_2} Ga_{x_3} N$ ($x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 \leq 0.5$) からなるものであってもよい。前記計算するステップにおいて、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより、前記被測定単層の厚さと混晶比 (x_1 、 x_2 および x_3 の値) を計算してもよい。半導体には、不純物がドーピングされていてもよい。前記吸収層が、 $In_{y_1} Al_{y_2} Ga_{y_3} N$ ($y_1 + y_2 + y_3 = 1$) からなり、前記吸収層の禁制帯幅が、前記被測定単層の禁制帯幅より小さいものであってもよい。

【0018】

50

前記吸収層が、GaNからなり、前記しきい波長が、370nmであるものであってもよい。前記吸収層の厚さが、前記吸収層の消衰係数 k を波長（単位はnm）の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の二回微分 $d^2k(\lambda)/d\lambda^2$ が0となる波長での光の侵入深さ以上であるものであってもよい。この場合、前記吸収層が、GaNからなり、GaNからなる前記吸収層の厚さが、240nm以上であるものであってもよい。

【0019】

本発明の第2の態様においては、被測定単層または前記被測定単層が複数積層された被測定積層を含む被測定層が位置する側の表面に向けて、しきい波長より短波長の光を含む入射光を照射し、前記入射光の反射光を測定することにより、前記しきい波長以下の波長における互いに独立な2以上の反射光関連値を取得し、 $2n$ （但し、 n は、前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数であり、1以上の整数である。）以上の前記反射光関連値を用いて、前記被測定層に含まれる各被測定単層について、前記被測定単層に関する値を計算する測定方法に適用可能な積層基板であって、前記積層基板が、ベース基板と、前記被測定層と、前記ベース基板および前記被測定層の間に位置する吸収層と、を有し、前記測定方法における前記しきい波長として、前記吸収層の消衰係数 k を波長（単位はnm）の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の一回微分 $dk(\lambda)/d\lambda$ の絶対値が消衰微分しきい値以下となる波長範囲の最大波長を用いる積層基板を提供する。消衰微分しきい値とは消衰係数が急激に変化するところを示すように定められる値をいう。消衰微分しきい値として好ましくは 1×10^{-3} であり、より好ましくは 5×10^{-4} であり、さらに好ましくは 1×10^{-4} である。

【0020】

前記被測定層に含まれる各被測定単層および前記吸収層が、互いに組成が異なる半導体または誘電体からなるものであってもよい。前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が2以上である場合、前記被測定層が第1被測定単層および第2被測定単層を含み、前記第2被測定単層が、前記第1被測定単層より前記吸収層の側に位置し、前記第1被測定単層が、 $In_xAl_yGa_zN$ （ $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ ）からなり、前記第2被測定単層が、 $In_zAl_lGa_mN$ （ $z_1 + z_2 + z_3 = 1$ ）からなり、前記第2被測定単層の禁制帯幅が、前記第1被測定単層の禁制帯幅より大きいものであってもよい。前記第1被測定単層が、 Al_xGa_yN （ $x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 \leq 0.5$ ）からなり、前記第2被測定単層が、 AlN からなるものであってもよい。前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が2以上である場合、前記被測定層が第1被測定単層および第3被測定単層を含み、前記第1被測定単層が、前記第3被測定単層より前記吸収層の側に位置し、前記第1被測定単層が、 $In_xAl_yGa_zN$ （ $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ ）からなり、前記第3被測定単層が、 $In_qAl_rGa_sN$ （ $q_1 + q_2 + q_3 = 1$ ）からなり、前記第3被測定単層の禁制帯幅が、前記第1被測定単層の禁制帯幅より小さいものであってもよい。前記第1被測定単層が、 Al_xGa_yN （ $x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 \leq 0.5$ ）からなり、前記第3被測定単層が、GaNからなるものであってもよい。前記第3被測定単層が、p型のGaNからなり、前記第3被測定単層の厚さが、前記第1被測定単層の厚さより大きくてもよい。前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が2以上である場合、前記被測定層が第1被測定単層および第3被測定単層を含み、前記第1被測定単層が、前記第3被測定単層より前記吸収層の側に位置し、前記第1被測定単層が、 $In_xAl_yGa_zN$ （ $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ ）からなり、前記第3被測定単層が、窒化シリコンからなるものであってもよい。前記吸収層が、 $In_yAl_lGa_mN$ （ $y_1 + y_2 + y_3 = 1$ ）からなり、前記吸収層の禁制帯幅が、前記第1被測定単層の禁制帯幅より小さいものであってもよい。

【0021】

前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が1である場合、前記被測定単層が、 $In_xAl_yGa_zN$ （ $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ ）からなるものであってもよい。前記被測定単層が、 Al_xGa_yN （ $x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 \leq 0.5$ ）からなるものであってもよい。前記吸収層が、 $In_yAl_lGa_mN$ （ $y_1 + y_2 + y_3 = 1$ ）

)からなり、前記吸収層の禁制帯幅が、前記被測定単層の禁制帯幅より小さいものであってもよい。

【0022】

前記吸収層が、GaNからなり、前記しきい波長が、370nmであるものであってもよい。前記吸収層の厚さが、前記吸収層の消衰係数 k を波長(単位はnm)の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の二回微分 $d^2k(\lambda)/d\lambda^2$ が0となる波長での光の侵入深さ以上であるものであってもよい。前記吸収層が、GaNからなり、GaNからなる前記吸収層の厚さが、240nm以上であるものであってもよい。

【0023】

前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数 n が2以上である場合、前記被測定層が、第1被測定単層および第2被測定単層を含み、前記第2被測定単層が、前記第1被測定単層より前記吸収層の側に位置し、前記第2被測定単層が、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルに基づくカーブフィッティングにより、当該第2被測定単層に関する値が計算されるものであり、前記カーブフィッティングにより前記第2被測定単層に関する値の一つとして得られた前記吸収モデルにおける吸収端のエネルギー値が、4.4eV以下であってもよい。前記ベース基板が、150mm以上の直径を有するウェハ基板であってもよい。

【0024】

本発明の第3の態様においては、前記した測定方法に適用可能な測定装置であって、前記積層基板を保持する基板保持部と、前記入射光を生成する光源部と、前記反射光を受光し、受光信号を生成する受光信号生成部と、前記基板保持部、前記光源部および前記受光信号生成部の角度を制御する角度制御機構と、前記受光信号生成部で生成した前記受光信号を処理する信号処理部と、を有する測定装置を提供する。

【図面の簡単な説明】

【0025】

【図1】本発明の一実施の形態である測定方法の概要を示すフロー図である。

【図2】測定対象である積層基板110の断面図である。

【図3】積層基板110の表面部分の一例を拡大して示した断面図である。

【図4】積層基板110の表面部分の一例を拡大して示した断面図である。

【図5】積層基板110の表面部分の一例を拡大して示した断面図である。

【図6】積層基板110の表面部分の一例を拡大して示した断面図である。

【図7】サンプル積層基板の全波長域についての分光エリプソデータを示すグラフである。

【図8】図7における波長域aについての分光エリプソデータを示すグラフである。

【図9】解析に用いる分光エリプソデータの波長領域上限を変化させたときのフィッティング結果を示したグラフである。

【図10】解析に用いる分光エリプソデータの波長領域上限を変化させたときのフィッティング結果を示したグラフである。

【図11】解析に用いる分光エリプソデータの波長領域上限を変化させたときのフィッティング結果を示したグラフである。

【図12】吸収層であるGaN層の消衰係数と波長の関係を示したグラフである。

【図13】吸収層であるGaN層の消衰係数を波長で一回微分したグラフである。

【図14】基板面内の位置を変えて測定した例を示すグラフである。

【図15】基板面内の位置を変えて測定した例を示すグラフである。

【図16】被測定層であるAlGaN層のAl組成を変えた場合のMSEの変化を示すグラフである。

【図17】吸収層であるGaN層の厚さを1000nmと200nmにした場合の分光エリプソデータを示すグラフである。

【図18】吸収層であるGaN層の厚さを変えたときのフィッティング結果を示したグラフである。

10

20

30

40

50

【図19】吸収層であるGaN層の厚さを変えたときのフィッティング結果を示したグラフである。

【図20】吸収層であるGaN層の厚さを変えたときのフィッティング結果を示したグラフである。

【図21】吸収層であるGaN層の消衰係数を波長で二回微分したグラフである。

【図22】透明モデルの光学特性を示す。

【図23】吸収モデルの光学特性を示す。

【図24】AlN層の厚さが異なるサンプル積層基板について測定を実施した場合のAlN層の厚さの結果を示す相関図である。

【図25】モデルから計算した理論値と測定した分光エリプソデータとを示すグラフである。

10

【図26】特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルをGaN層に適用した場合の理論値と分光エリプソデータ測定値を示したグラフである。

【図27】基板の中心からの距離に対するAl_{0.25}Ga_{0.75}N層およびGaN層の膜厚をプロットしたグラフである。

【図28】基板の中心からの距離に対するAl_{0.25}Ga_{0.75}N層およびSi_xN層の膜厚をプロットしたグラフである。

【図29】吸収端エネルギー値に対する移動度比の値をプロットしたグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0026】

20

図1は、本実施の形態の測定方法の概要を示すフロー図であり、図2は、測定対象である積層基板110の断面図である。本実施の形態の積層基板の測定方法は、積層基板110の表面に向けて入射光112を照射し、積層基板110からの反射光114を測定して、被測定層106に関する値を計算する。

【0027】

測定対象である積層基板110は、ベース基板102と、被測定層106と、吸収層108とを有する。ベース基板102、被測定層106および吸収層108は、図示しており、ベース基板102、吸収層108、被測定層106の順に配置されている。ベース基板102と吸収層108との間には、中間層120およびバッファ層126が形成されている。

30

【0028】

ベース基板102は、中間層120より上の各層（以下単に「各層」という場合がある。）を支持する基板である。ベース基板102は、各層の形成に必要な機械的強度、化学的安定性、熱的安定性を備えるものであれば、その形状、材質等は特に限定されない。各層がエピタキシャル成長法により形成される半導体結晶層である場合、ベース基板102は、形成される結晶層に適した材料が選択される。各層が窒化ガリウム系の半導体結晶層である場合、ベース基板102として、シリコン基板、サファイア基板、GaN基板、AlN基板、SiC基板等を挙げることができる。

【0029】

ベース基板102は、150mm以上の直径を有するウェハ基板であることが好ましい。150mm以上の直径を有するウェハ基板、たとえば6インチウェハ基板または8インチウェハ基板を用いることで、シリコンウェハに適合した従来の半導体製造装置を利用することが可能になり、積層基板110の製造コストを下げることができる。また、以下に説明する測定方法では、6インチ基板または8インチ基板等、大きな面積を有する基板であっても測定が可能である。

40

【0030】

中間層120およびバッファ層126は、ベース基板102と吸収層108との間の熱膨張係数の相違に起因する応力の緩和または調整等のために設けられる層である。バッファ層126は、組成が異なる第1結晶層122と第2結晶層124が交互に複数回繰り返して積層された超格子構造層であってもよい。中間層120として、たとえばAlN層お

50

よびA l G a N層の積層を例示することができる。バッファ層126として、たとえばA l N層とA l G a N層を交互に多数回繰り返して積層した超格子構造層を例示することができる。

【0031】

吸収層108は、入射光112のうち短波長成分を吸収し、長波長成分を透過する光学特性を有する層である。吸収層108および被測定層106が、たとえばG a N層およびA l G a N層等、組成が異なる化合物半導体層で構成される場合、吸収層108と被測定層106とのヘテロ界面には二次元電子ガス(2DEG)が生成される。当該2DEGをキャリアにして高電子移動度トランジスタ等を形成できる。このような場合、被測定層106の組成および厚さは2DEGのキャリア濃度に大きく影響するので、被測定層106の組成および厚さを高精度かつ簡便に測定する意義は大きい。吸収層108は、単層または積層の何れであってもよく、積層である場合の吸収層108の層構成は任意である。

10

【0032】

図3~図6は、積層基板110の表面部分の一例を拡大して示した断面図である。図3~図6の各図において、被測定層106の異なる構成例を示す。被測定層106は、本実施形態の測定方法の対象であり、複数の被測定単層が積層された被測定積層104または単層の被測定単層105を有する。以下の説明において、被測定層106に含まれる被測定単層の層数をnとする。被測定層106は、n層(但し、nは1以上の整数。)の被測定単層を含む。被測定単層は、光学的に単一層としてみなせる層であり、厚さ方向の組成が必ずしも一定である必要はない。たとえば被測定単層中において光の反射や回折が生じない程度の厚さ方向における組成の変動は許容される。被測定層106に含まれる各被測定単層の間、被測定層106と吸収層108の間、被測定層106の層中、および、吸収層108の層中に、任意の中間層が形成されてもよい。中間層は、半導体層、絶縁層の何れであってもよい。被測定層106は積層構造を有していてもよい。

20

【0033】

図3に示す構成例では、被測定層106は、第1被測定単層104aと第2被測定単層104bとの二層積層構造からなる被測定積層104を含む。第2被測定単層104bは、第1被測定単層104aと吸収層108との間に位置する。図4に示す構成例では、被測定層106は、第1被測定単層104aと第3被測定単層104cとの二層積層構造からなる被測定積層104を含む。第3被測定単層104cは、第1被測定単層104aより表面側に位置する。図5に示す構成例では、被測定層106は、第1被測定単層104aと第2被測定単層104bと第3被測定単層104cとの三層積層構造からなる被測定積層104を含む。第2被測定単層104bは、第1被測定単層104aと吸収層108との間に位置し、第3被測定単層104cは、第1被測定単層104aより表面側に位置する。図6に示す構成例では、被測定層106は、被測定単層105を含む。被測定層106が被測定単層105のみを含む場合、被測定層106は被測定単層105と同一の構成となる。

30

【0034】

吸収層108がたとえばG a N層である場合、第1被測定単層104aとして、吸収層108のヘテロ界面に2DEGを生成するA l G a N層が例示できる。この場合、第2被測定単層104bには、スペーサ層として機能するA l N層が例示できる。また、第3被測定単層104cには、キャップ層として機能するG a N層またはS i N層(窒化シリコン層)が例示できる。第3被測定単層104cがキャップ層として機能する場合、第3被測定単層104cの厚さは可能な限り小さいことが好ましい。第3被測定単層104cは、ノーマリオフ型トランジスタの活性層として機能するp型G a N層としてもよい。第3被測定単層104cがノーマリオフ型トランジスタの活性層として機能する場合、ある程度の厚さが必要であり、たとえば第1被測定単層104aより大きな厚さを例示することができる。A l G a N層がヘテロ界面におけるキャリア濃度に大きく影響することから、第1被測定単層104aの厚さおよび組成を正確に測定する必要があることは勿論、スペーサ層の厚さもキャリア濃度に大きく影響する。このため、第2被測定単層104bの厚

40

50

さおよび組成を正確に測定する意義は大きい。また、本実施形態の測定方法によれば、多数点の測定も容易であり、同一ウェハ基板内での厚さおよび組成の分布を短い時間で測定できることは生産性を高める観点からも意義が大きい。

【0035】

入射光112は、被測定層106が位置する側の積層基板110の表面に向けて入射される光であり、反射光114は、入射光112が積層基板110から反射した光である。

【0036】

本実施の形態の測定方法は、積層基板110の表面に向けて入射光112を照射し、入射光112の積層基板110からの反射光114を測定する(S1)。反射光114の測定データのうち、しきい波長 t_h 以下の波長における互いに独立な $2n$ 以上のデータを抽出し、反射光関連値とする(S2)。そして、反射光関連値を用いて、被測定層106に関する値、つまり被測定層106に含まれる各被測定単層(第1被測定単層104a、第2被測定単層104b、第3被測定単層104c、被測定単層105)に関する値を計算する(S3)。

【0037】

S3の計算では、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより、被測定層106に含まれる各被測定単層の厚さと当該各被測定単層に関する値を計算することができる。具体的には、被測定層106の層構造、つまり各被測定単層ごとのモデルを反映した、被測定積層104または被測定単層105のモデルを選択し(s31)、当該モデルにおけるフィッティングパラメータを選択する(s32)。モデルにおける理論値と測定データとの平均自乗誤差(MSE)が最小になるようフィッティングを実行し(s33)、被測定層106に含まれる各被測定単層の厚さと組成を決定することができる。

【0038】

ここで、しきい波長 t_h は、吸収層108の消衰係数 k を波長 (単位はnm) の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の一回微分 $dk(\lambda)/d\lambda$ の絶対値が消衰微分しきい値以下となる波長範囲の最大波長を用いる。消衰微分しきい値とは消衰係数が急激に変化するところを示すように定められる値をいう。消衰微分しきい値として好ましくは 1×10^{-3} であり、より好ましくは 5×10^{-4} であり、さらに好ましくは 1×10^{-4} である。

【0039】

エリプソメトリー法を用いた通常の膜厚測定では、全波長域、つまり上記しきい波長 t_h を超える波長域における反射光関連値も対象としたフィッティングを実行する。一般に、 t_h を超える長波長域では、層構造からの干渉によるフリンジが発生し、層構造が複雑である場合にはそのような層構造を反映した複雑なフリンジに起因して、フィッティング計算において適正な値に収束させることが困難な場合が多い。しかしながら、本実施形態においては、しきい波長 t_h を上記のように選択し、 t_h 以下の波長におけるデータである反射光関連値を用いて被測定層106に関する値(被測定層106に含まれる各被測定単層に関する値)を計算することにより、積層基板110の表面の情報、つまり吸収層108より表面側に位置する被測定層106の情報を多く含む波長の光を用いてフィッティングを行うことが可能になる。その結果、フィッティングモデルの選択において吸収層108以下の層構造を考慮する必要がなくなり、モデルが簡略化できる。また、フィッティングの実行においても適正な値に集束しやすくなるとともに、集束までの計算時間を短縮して測定のスループットを高めることができる。

【0040】

なお、互いに独立な $2n$ (n は1以上の整数。) 以上の反射光関連値は、以下に列記するような構成として取得することができる。

(1) 入射光112の入射角を固定し、反射光関連値として、反射光114の二つの偏光成分および反射率から選択された1以上の値を、 $2n$ 以上の波長について取得する。

(2) 入射光112の入射角を固定し、反射光関連値として、反射光114の二つの偏光成分および反射率から選択された2以上の値を、 n 以上の波長について取得する。

(3) 入射光112の入射角が n 以上の場合について反射光114を測定し、反射光関連

10

20

30

40

50

値として、反射光 1 1 4 の二つの偏光成分および反射率から選択された 2 以上の値を、入射角ごとに取得する。(ただし本項は、 n が 2 以上の場合についてのみ適用可能。)

(4) 入射光 1 1 2 の入射角が $2n$ 以上の場合について反射光 1 1 4 を測定し、反射光関連値として、反射光 1 1 4 の二つの偏光成分および反射率から選択された 1 以上の値を、入射角ごとに取得する。

【0041】

上記した(1)~(4)の場合($n=1$ の場合は上記した(1)、(2)および(4)の場合)、反射光 1 1 4 を分光測定し、反射光関連値として、反射光 1 1 4 の二つの分光偏光成分および分光反射率から選択された 1 以上の分光値を取得することができる。この場合、入射光 1 1 2 として直線偏光を用い、反射光 1 1 4 の二つの分光偏光成分として、 s 偏光と p 偏光の分光位相差()および分光反射振幅比角(\tan)を取得することができる。なお、ここで「分光値」とは、反射光 1 1 4 を分光した場合の各波長における値(分光要素値)をいうのではなく、分光対象波長領域の全域における分光要素値の全体をいうものとする。

10

【0042】

上記 S 3 の計算で解析モデルに基づくカーブフィッティングを用いる場合、被測定層 1 0 6 に含まれる被測定単層の層数 n が 2 以上である場合には、解析モデルとして、被測定層 1 0 6 に含まれる 2 以上の被測定単層のうち 1 以上の被測定単層が、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルを採用することができる。たとえば、被測定層 1 0 6 が、図 3 または図 5 に示す層構成を有する場合、第 2 被測定単層 1 0 4 b への解析モデルとして前記した吸収モデルを採用できる。

20

【0043】

ここで、特異励起発生波長域とは、被測定層 1 0 6 をモデル化したときの各被測定単層における吸収波長域(消衰係数 k が 0.001 以上となる波長域)であり、被測定単層ごとに相違する。特異励起発生波長域は、被測定単層を構成する物質のバルク結晶における吸収波長域(バルク吸収波長域)とは相違し、相違の度合いは、被測定単層が受ける応力の大きさ、厚さによって異なる場合が多い。被測定単層が引張応力を受けているときは、特異励起発生波長域はバルク吸収波長域より長波長側にシフトし、圧縮応力を受けているときは短波長側にシフトする傾向がある。特異励起発生波長域のバルク吸収波長域からの乖離は、被測定単層の厚さが薄い方が大きい傾向にあり、ある程度の厚さ以上の場合は乖離を無視できる場合がある。

30

【0044】

第 2 被測定単層 1 0 4 b に吸収モデルを採用する場合、上記 S 3 の計算におけるカーブフィッティングにおいて、第 1 被測定単層 1 0 4 a と同一の条件で製造した単層を対象とする予備的測定により予め決定した当該単層に関する値(たとえば当該単層の厚さ、当該単層の屈折率、減衰係数等光学定数)を、第 1 被測定単層 1 0 4 a に関するパラメータの初期値とすることができる。つまり、第 2 被測定単層 1 0 4 b が無い第 1 被測定単層 1 0 4 a のみの予備サンプルを作成し、当該予備サンプルを上記した S 1 ~ S 3 のステップで予備的に測定し、予備サンプルにおける第 1 被測定単層 1 0 4 a の膜厚、光学定数等を決定する。この予備サンプルにおける第 1 被測定単層 1 0 4 a の膜厚、光学定数等の値を、第 2 被測定単層 1 0 4 b が有る場合の測定におけるカーブフィッティングのパラメータ初期値とする。このように、予備的に測定した第 1 被測定単層 1 0 4 a の値を初期値に用いることで、適切な初期値を与えることができ、フィッティング結果の妥当性および精度を向上し、フィッティング計算の収束までの時間を短縮することができる。

40

【0045】

また、第 2 被測定単層 1 0 4 b に吸収モデルを採用する場合、上記 S 3 の計算におけるカーブフィッティングにおいて、第 1 被測定単層 1 0 4 a および第 2 被測定単層 1 0 4 b を対象とする予備的カーブフィッティングにより得られた第 1 被測定単層 1 0 4 a および第 2 被測定単層 1 0 4 b の厚さを、第 1 被測定単層 1 0 4 a および第 2 被測定単層 1 0 4 b に関するパラメータの初期値とすることができる。カーブフィッティングの結果として

50

得られる各被測定単層に関する値のうち、膜厚については、解析モデルの適否に関わらず比較的良好的な収束結果が得られるという経験則から、予備的カーブフィッティングにより大まかな膜厚の値を得てこれを初期値とするものである。このような構成を採用することで、適切な初期値を得ることが可能になり、適切なフィッティング結果を短い計算時間で得ることができる。特に吸収モデルにおけるパラメータの一つである吸収端のエネルギー値が精度よく得られる効果がある。

【0046】

解析モデルとして、クラマース・クローニヒの関係式を満たす誘電関数モデルを例示することができる。誘電関数モデルには、パラメトリック半導体モデル、Tauc-Lorentzモデル、Lorentzモデル、DrudeモデルまたはGaussianモデルを含むことができる。解析モデルには、クラマース・クローニヒの関係式を満たすモデルとともにSellmeierモデルまたはCauchyモデルを用いてもよい。

10

【0047】

上記S3の計算で解析モデルに基づくカーブフィッティングを用いる場合、被測定層106に含まれる被測定単層の層数nが2以上である場合には、解析モデルにおいて、被測定層106に含まれる2以上の被測定単層のうち1以上の被測定単層が、測定波長域で光を全透過する透過モデルを採用してもよい。

【0048】

被測定層106に含まれる被測定単層(第1被測定単層104a、第2被測定単層104b、第3被測定単層104c、被測定単層105)と吸収層108とは、前記したとおり、互いに組成が異なる半導体または誘電体からなるものが例示できる。半導体として、IV族半導体およびIII-V族化合物半導体を挙げるることができる。IV族半導体として、C、Si、GeおよびSnから選択された1種類以上の原子を含む半導体、たとえば $C_a Si_b Ge_c Sn_d$ ($0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1, 0 \leq c \leq 1, 0 \leq d \leq 1, a + b + c + d = 1$)が例示できる。III-V族化合物半導体として、III族原子であるB、Al、GaおよびInから選択された1種類以上の原子を含み、V族原子であるN、P、AsおよびSbから選択された1種類以上の原子を含む化合物半導体、たとえば、 $Al_a Ga_b In_c P_d As_e Sb_f$ ($0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1, 0 \leq c \leq 1, 0 \leq d \leq 1, 0 \leq e \leq 1, 0 \leq f \leq 1, a + b + c = 1, d + e + f = 1$)、 $B_a Al_b Ga_c In_d N$ ($0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1, 0 \leq c \leq 1, 0 \leq d \leq 1, a + b + c + d = 1$)が例示できる。誘電体として、 SiO_2 、 Si_3N_4 、 $SiON$ 、 InO_2 、 SnO_2 、 $InSnO_2$ 、 ZnO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 が例示できる。半導体には、不純物がドーピングされていてもよい。

20

30

【0049】

たとえば、被測定層106が第1被測定単層104aおよび第2被測定単層104bを含み、第2被測定単層104bが、第1被測定単層104aより吸収層108の側に位置し、第1被測定単層104aとして、 $In_{x_1} Al_{x_2} Ga_{x_3} N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$)が例示でき、第2被測定単層104bとして、 $In_{z_1} Al_{z_2} Ga_{z_3} N$ ($z_1 + z_2 + z_3 = 1$)が例示でき、第2被測定単層104bの禁制帯幅が、第1被測定単層104aの禁制帯幅より大きいものが例示できる。当該層構成は、図3に例示した層構成に相当する。

40

【0050】

あるいは、被測定層106が第1被測定単層104aおよび第3被測定単層104cを含み、第1被測定単層104aが、第3被測定単層104cより吸収層108の側に位置し、第1被測定単層104aとして、 $In_{x_1} Al_{x_2} Ga_{x_3} N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$)が例示でき、第3被測定単層104cとして、 $In_{q_1} Al_{q_2} Ga_{q_3} N$ ($q_1 + q_2 + q_3 = 1$)が例示でき、第3被測定単層104cの禁制帯幅が、第1被測定単層104aの禁制帯幅より小さいものが例示できる。当該層構成は、図4に例示した層構成に相当する。なお、前記した図3に相当する層構成と図4に相当する層構成を組み合わせた層構成、つまり図5の層構成に相当する構成も可能である。

50

【0051】

第1被測定単層104aの物質として $Al_{x_2}Ga_{x_3}N$ ($x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 < 0.5$) 例示でき、この場合、第2被測定単層104bの物質として AlN が例示でき、第3被測定単層104cの物質として GaN が例示できる。第3被測定単層104cとしての GaN は、キャップ層として機能する場合とノーマリオフ型トランジスタの活性層として機能するp型 GaN 層の場合を含む。キャップ層として機能する場合の GaN は厚さが小さい方が好ましく、ノーマリオフ型トランジスタ用のp型 GaN 層はある程度の厚さを有することが好ましい。当該ある程度の厚さとして、たとえば第1被測定単層の厚さより大きい厚さを例示することができる。

【0052】

また、第1被測定単層104aが、 $In_{x_1}Al_{x_2}Ga_{x_3}N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$) からなる場合、第3被測定単層104cの物質として窒化シリコンが例示できる。窒化シリコン層はキャップ層として機能し、キャップ層として機能する場合の GaN 層と同様、厚さは小さい方が好ましい。キャップ層として機能する GaN 層および窒化シリコン層は、製膜後期における第1被測定単層104aのエッチングを防止する効果を有する。

【0053】

解析モデルに基づくカーブフィッティングにおいては、被測定層106に含まれる各被測定単層の混晶比を計算することができる。吸収層108として、 $In_{y_1}Al_{y_2}Ga_{y_3}N$ ($y_1 + y_2 + y_3 = 1$) からなり、吸収層108の禁制帯幅が第1被測定単層104aの禁制帯幅より小さいものが例示できる。

【0054】

被測定層106に含まれる被測定単層の層数 n が1である場合、つまり、被測定層106に被測定単層105以外の被測定単層が含まれない場合、被測定単層105は、 $In_{x_1}Al_{x_2}Ga_{x_3}N$ ($x_1 + x_2 + x_3 = 1$) からなるものであってもよい。被測定単層105として、 $Al_{x_2}Ga_{x_3}N$ ($x_2 + x_3 = 1$ 、 $0 < x_2 < 0.5$) からなるものが例示できる。これらの場合、解析モデルに基づくカーブフィッティングにより被測定単層105の混晶比 (x_1 、 x_2 および x_3 の値) を計算することができる。吸収層108として、 $In_{y_1}Al_{y_2}Ga_{y_3}N$ ($y_1 + y_2 + y_3 = 1$) からなり、吸収層108の禁制帯幅が被測定単層105の禁制帯幅より小さいものが例示できる。

【0055】

具体的な吸収層108として、 GaN からなるものを例示することができる。この場合、しきい波長 t_h は 370 nm とすることができる。吸収層108の厚さは、吸収層108の消衰係数 k を波長 (単位は nm) の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の二回微分 $d^2k(\lambda)/d\lambda^2$ が0となる波長での光の侵入深さ以上であることが好ましい。吸収層108が GaN からなる場合、吸収層108の厚さは 240 nm 以上とすることが好ましい。なお、光の侵入深さは、 λ_0 を光の波長、 k_0 を λ_0 における消衰係数とした場合、 $\lambda_0/4k_0$ で表される。吸収層108の厚さが小さくなることで、 t_h 以下の波長の光が吸収層108において十分に吸収されず、フリッジが現れることがあり、フリッジが現れるとフィッティングの平均自乗誤差 (MSE) が大きくなり、正常なフィッティング結果が得られなくなる場合がある。よって、吸収層108の厚さはある程度以上必要であり、そのような観点から、本実施形態においては、吸収層108の好ましい厚さの一例として、上記条件 ($d^2k(\lambda)/d\lambda^2$ が0となる波長での光の侵入深さ以上) を提示している。

【0056】

上記した積層基板110の測定方法によれば、吸収層108より基板側の層構成が複雑な場合であっても、簡単な解析モデルを適用することが可能になり、被測定層106に含まれる被測定単層 (第1被測定単層104a、第2被測定単層104b、第3被測定単層104c、被測定単層105) について、厚さおよび組成を正確かつ迅速に測定することができる。また、上記した測定方法では、入射光112を狭い領域に絞り込むことが可能であり、積層基板110のマッピング測定も容易に実施できる。これらの結果、積層

10

20

30

40

50

基板 110 が複雑な下地層構成を有する場合であっても、積層基板 110 の表面近傍に位置する被測定層 106 の高精度かつ高スループットなマッピング測定が可能になる。また、上記した測定方法では、基板ステージ等適切な基板移動機構を設けることで、150mm以上の直径を有するウェハ基板、たとえば6インチ基板や8インチ基板等の測定にも容易に対応することが可能である。

【0057】

(実施例1)

実施例1は、被測定層106に含まれる被測定単層の層数 n が1の場合を説明する。測定用のサンプル基板として、図2および図6に示す積層基板110と同様のサンプル積層基板を作成した。ベース基板102としてSi(111)基板を用い、中間層120としてAlN層およびAlGa_{0.25}N層を形成した。バッファ層126として、5nm厚さのAlN層と25nm厚さのAlGa_{0.75}N層を100回繰り返して積層し、超格子バッファを形成した。吸収層108として、1000nm厚さのGa_{0.25}N層を形成した。被測定単層105(被測定層106)として、単層のAl_{0.25}Ga_{0.75}N層を形成した。Al_{0.25}Ga_{0.75}N層の厚さは25nm(設計値)とした。なお、Al_{0.25}Ga_{0.75}N層のAl組成0.25は設計値である。

【0058】

作成した測定用のサンプル積層基板に対し、被測定単層105(被測定層106)であるAl_{0.25}Ga_{0.75}N層が位置する側のサンプル積層基板(積層基板110)の表面に向けて、しきい波長より短波長の光を含む入射光112を照射し、入射光112のサンプル積層基板(積層基板110)からの反射光114を測定することにより、しきい波長以下の波長における互いに独立な2(本実施例1において n は1であるゆえ、 $2n=2$ となる)以上の分光エリプソデータ(反射光関連値)を取得した。その後、当該分光エリプソデータ(反射光関連値)を用いて、Al_{0.25}Ga_{0.75}N層(被測定層106に含まれる被測定単層105)についての膜厚、組成(被測定単層105に関する値)を計算した。しきい波長(t_h)として370nm(吸収層108であるGa_{0.25}N層の消衰係数 k を波長(単位はnm)の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の一回微分 $dk/d\lambda$ の絶対値が消衰微分しきい値以下となる波長範囲の最大波長)を用いた。

【0059】

図7は、サンプル積層基板の全波長域についての分光エリプソデータを示すグラフである。実線がp偏光およびs偏光の反射振幅比角であり、破線が位相差である。 t_h (約370nm)以上の波長域 b においては、バッファ層以下の複雑な構造を反映して、 θ_p および θ_s の周期的な変動(フリンジ)が現れる。このような複雑な分光データを用いてフィッティングを行うには複雑な解析モデルが必要であり、解析は困難になる。

【0060】

図8は、図7における波長域 a についての分光エリプソデータを示すグラフである。本発明においては、 t_h 以下の波長域 a での分光データのみを用いて解析を行う。このため、解析モデルが簡略化でき、解析を容易にすることができる。解析モデルの層構成として、十分に厚いGa_{0.25}N層(吸収層108)と、被測定単層105であるAl_xGa_{1-x}N層と、Al_xGa_{1-x}N層の表面のラフネス層を採用した。ラフネス層には、AlGa_{0.25}Nと空気が0.5:0.5の割合で混在する有効媒質近似モデルを採用し、被測定単層105には、Al組成 x が異なるリファレンスをもとにデータ間を補間して作成したアロイモデルを採用し、個々の光学モデルとして、パラメトリック半導体モデルおよびTauc-Lorenzモデルを採用した。

【0061】

図9~図11は、解析に用いる分光エリプソデータの波長領域上限を変化させたときのフィッティング結果を示したグラフであり、図9は平均自乗誤差(MSE)を、図10は被測定単層105の膜厚を、図11は、被測定単層105のAl組成 x を示す。370nmを超える波長領域のデータを用いてフィッティングした場合のMSEが100を超え、膜厚、組成ともに実際の厚さ、組成から大きく外れる解析結果を示す。これに対し、37

10

20

30

40

50

0 nm以下のデータを用いてフィッティングした場合は、MSEが小さく、膜厚、組成ともに実際の膜厚および組成に近い値を示しており、解析が成功していることがわかる。以上の結果から、370 nm以下の分光エリプソデータを用いたフィッティングにより、被測定単層105の厚さおよび組成が正確に測定できることがわかった。

【0062】

図12は吸収層108であるGaN層の消衰係数 k と波長 λ の関係を示すグラフであり、図13は消衰係数 k を波長 λ で一回微分した結果($dk/d\lambda$)を示したグラフである。消衰係数が -1×10^{-4} 以下となる波長が370 nmであり、しきい波長と一致することがわかった。

【0063】

図14および図15は、被測定単層105であるAlGaN層の厚さが基板面内で大きく異なる、つまり膜厚分布の大きなサンプルを、基板面内の位置を変えて測定した例を示すグラフである。図14および図15に示す二つ例を総合すると、最小膜厚5.6 nmから最大膜厚111 nmの範囲で、膜厚が正確に測定できていることがわかる。また、図14および図15の横軸から読み取れるとおり、直径が約150 mm(約6インチ)の範囲で測定が正確に行われていることがわかる。

【0064】

図16は、被測定単層105であるAlGaN層のAl組成を変えた場合のMSEの変化を示すグラフである。Al組成が0.08から0.402の範囲で変動しても正確に測定できていることがわかる。

【0065】

図17は、吸収層108であるGaN層の厚さを1000 nmにした場合と200 nmにした場合の分光エリプソデータを示すグラフである。吸収層108の厚さが小さくなることで、 $\lambda < t_h$ 以下の波長の光が吸収層において吸収しきれず、フリンジが現れることがわかる。フリンジが現れるとフィッティングの平均自乗誤差(MSE)が大きくなり、正常なフィッティング結果が得られなくなるので、吸収層108の厚さはある程度以上必要であることがわかる。

【0066】

図18~図20は、吸収層であるGaN層の厚さを変えたときのフィッティング結果を示したグラフであり、図18は平均自乗誤差(MSE)を、図19は被測定単層105の膜厚を、図20は、被測定単層105のAl組成 x を示す。図18~図20の結果から、GaN層の厚さは240 nm以上必要であることがわかる。

【0067】

図21は吸収層であるGaN層の消衰係数 k を波長 λ で2回微分した結果($d^2k/d\lambda^2$)のグラフである。2回微分がゼロになる波長は364.6 nmであり、図21より364.6 nmにおける消衰係数は0.12となる。この波長における光の侵入深さは計算の結果242 nmとなりGaN層の必要膜厚と一致する。

【0068】

(実施例2)

実施例2は、被測定層106に含まれる被測定単層の層数 n が2の場合を説明する。実施例2の測定用のサンプル基板として、図2および図3に示す積層基板110と同様のサンプル積層基板を作成した。ベース基板102、中間層120、パツファ層126および吸収層108については実施例1と同様である。実施例2では、吸収層108であるGaN層と第1被測定単層104aであるAl_{0.25}Ga_{0.75}N層の間に、スペーサ層として第2被測定単層104bであるAlN層を形成した。すなわち、Al_{0.25}Ga_{0.75}N層(第1被測定単層104a)およびAlN層(第2被測定単層104b)からなる被測定層106を形成した。AlN層の厚さは、0 nm(AlN層なし)0.5 nm、1 nm、2 nmのものを作成した。

【0069】

実施例2のサンプル積層基板の測定は、実施例1の場合と同様に、入射光112を照射

10

20

30

40

50

し、反射光 114 から分光エリプソデータを取得し、分光エリプソデータを用いて、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層および AlN 層（被測定層 106 に含まれる各被測定単層）についての膜厚、組成を計算した。しきい波長（ λ_c ）として 370 nm を用いた。ただし、 AlN 層（第 2 被測定単層 104 b）のフィッティングにおける解析モデルには吸収モデルを適用した。

【0070】

実施例 2 のサンプル積層基板を解析する場合、実施例 1 の解析モデルにおいて AlN 層に対応するアロイモデルを追加すれば、実施例 1 と同様なフィッティングを実施して、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層および AlN 層（第 1 被測定単層 104 a および第 2 被測定単層 104 b）の厚さおよび組成を各々測定できるはずである。

10

【0071】

しかし、 AlN 層の光学モデルとして図 22 に示すような光学特性を持つ透明モデルを採用すると誤差が大きくなった。そこで、バルクの AlN では本来吸収が発生しない波長領域においても吸収が発生する吸収モデル（特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデル）を採用し、解析を行った。吸収モデルにおける光学特性を図 23 に示す。

【0072】

図 24 は、 AlN 層の厚さが 0（ AlN 層なし）、0.5 nm、1 nm、2 nm と異なるサンプル積層基板について上記測定を実施した場合の AlN 層の厚さの結果を示す相関図である。横軸が設計値、縦軸が測定値である。菱形プロットは AlN 層に透明モデルを適用した場合（モデル 1）、四角プロットは AlN 層に吸収モデルを適用した場合（モデル 2）の結果である。モデル 1 では AlN 層の厚さが 0 nm のとき、 $R = 0.64$ となり AlN 層の厚さが 1 nm のとき $R = 0.92$ となった。モデル 2 では AlN 層の厚さが 0 nm のとき、 $R = 0.13$ となり AlN 層の厚さが 1 nm のとき $R = 0.32$ となった。図 24 に示す結果から、吸収モデルを採用した方が、誤差が小さいことが明らかである。

20

【0073】

（実施例 3）

実施例 3 は、被測定層 106 に含まれる被測定単層の層数 n が 2 の場合を説明する。実施例 3 の測定用のサンプル基板として、図 2 および図 4 に示す積層基板 110 と同様のサンプル積層基板を作成した。ベース基板 102、中間層 120、パツファ層 126 および吸収層 108 については実施例 1 と同様である。実施例 3 では、第 1 被測定単層 104 a である $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層の上にキャップ層として、厚さ 1 nm の GaN 層（第 3 被測定単層 104 c）を形成した。すなわち、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層（第 1 被測定単層 104 a）および GaN 層（第 3 被測定単層 104 c）からなる被測定層 106 を形成した。

30

【0074】

実施例 3 のサンプル積層基板の測定は、実施例 1 の場合と同様に、入射光 112 を照射し、反射光 114 から分光エリプソデータを取得し、分光エリプソデータを用いて、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層および GaN 層（被測定層 106 に含まれる各被測定単層）についての膜厚、組成を計算した。しきい波長（ λ_c ）として 370 nm を用いた。ただし、 GaN 層（第 3 被測定単層 104 c）のフィッティングにおける解析モデルには吸収モデルを適用した。

40

【0075】

実施例 3 のサンプル積層基板を解析する場合、実施例 1 の解析モデルにおいて GaN 層に対応するアロイモデルを追加すれば、実施例 1 と同様に分光エリプソデータの取得およびフィッティングを実施して、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層および GaN 層（第 1 被測定単層 104 a および第 3 被測定単層 104 c）の厚さおよび組成を各々測定できるはずである。

【0076】

しかし、 GaN 層の光学モデルとして、バルクの GaN で発生すると同様な吸収モデル

50

を採用すると、図 25 に示すように、モデルから計算した理論値と測定した分光エリプソデータとの間に不一致が発生する。当該不一致は、図中 A で示したキックが発生する部分で大きく、このようなキックの発生は、吸収係数 k に変化があることを示している。

【0077】

そこで、バルクの GaN で本来吸収が発生する波長領域には吸収がなく、別の波長領域で吸収が発生する吸収モデル（特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデル）を採用し、解析を行った。図 26 は、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルを GaN 層に適用した場合の理論値と分光エリプソデータ測定値を示したグラフであり、図中 A のキックが発生する部分でも良く一致していることがわかる。

【0078】

（実施例 4）

実施例 4 は、被測定層 106 に含まれる被測定単層の層数 n が 2 の場合を説明する。実施例 4 の測定用のサンプル基板として、実施例 3 と同様なサンプル積層基板を作成した。ベース基板 102、中間層 120、バッファ層 126、吸収層 108、第 1 被測定単層 104a および第 3 被測定単層 104c については実施例 3 と同様である。ただし、実施例 4 における GaN 層（第 3 被測定単層 104c）は、 p 型 GaN 層であり、厚さを 90 nm とした。このような GaN 層は、ノーマリオフ型トランジスタの活性層に適用できる。また、実施例 4 におけるベース基板 102 は、直径 8 インチのシリコンウェハ基板とした。

【0079】

実施例 4 のサンプル積層基板の測定は、実施例 3 と同様に、入射光 112 を照射し、反射光 114 から分光エリプソデータを取得し、分光エリプソデータを用いて、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層および GaN 層についての膜厚、組成を計算した。しきい波長 (λ_{th}) として 370 nm を用い、GaN 層（第 3 被測定単層 104c）のフィッティングにおける解析モデルには吸収モデルを採用した。

【0080】

図 27 は、中心からの距離（位置）を横軸にして、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層および GaN 層の膜厚をプロットしたグラフである。丸印が $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層の膜厚であり、菱形印が GaN 層の膜厚である。同図から、GaN 層の厚さが約 90 nm と大きい場合であっても、良好に測定されていることがわかる。実施例 3 の結果と併せて考察すれば、第 3 被測定単層 104c として形成した GaN 層が、少なくとも 1 ~ 90 nm の範囲で良好に測定できたことがわかる。また、同図の横軸から読み取れるとおり約 200 mm（8 インチ）の範囲で測定が正確に行われていることがわかる。

【0081】

（実施例 5）

実施例 5 は、被測定層 106 に含まれる被測定単層の層数 n が 2 の場合を説明する。実施例 5 の測定用のサンプル基板として、実施例 3 と同様なサンプル積層基板を作成した。ベース基板 102、中間層 120、バッファ層 126、吸収層 108 および第 1 被測定単層 104a については実施例 3 と同様である。ただし、実施例 5 における第 3 被測定単層 104c として窒化シリコン (Si_xN) 層を形成した。 Si_xN 層の厚さは 5 nm とした。 Si_xN 層は第 1 被測定単層 104a のキャップ層として機能する。ベース基板 102 には、直径 6 インチのシリコンウェハ基板を用いた。

【0082】

実施例 5 のサンプル積層基板の測定は、実施例 3 と同様に、入射光 112 を照射し、反射光 114 から分光エリプソデータを取得し、分光エリプソデータを用いて、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層および Si_xN 層についての膜厚、組成を計算した。しきい波長 (λ_{th}) として 370 nm を用い、 Si_xN 層（第 3 被測定単層 104c）のフィッティングにおける解析モデルには吸収モデルを採用した。

【0083】

図 28 は、中心からの距離（位置）を横軸にして、 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 層およ

10

20

30

40

50

びSi x N層の膜厚をプロットしたグラフである。丸印がAl_{0.25}Ga_{0.75}N層の膜厚であり、菱形印がSi x N層の膜厚である。同図から、5 nm程度のSi x N層の厚さが、6インチ基板の全域に渡り、良好に測定されていることがわかる。

【0084】

(実施例6)

実施例6は、被測定層106に含まれる被測定単層の層数nが2の場合を説明する。実施例6の測定用のサンプル基板として、実施例2と同様のサンプル積層基板を作成した。ベース基板102、中間層120、バッファ層126、吸収層108、第1被測定単層104aおよび第2被測定単層104bについて実施例2と同様である。ただし、本実施例6では、実験例1、2および比較例1として3種類のサンプル積層基板を作成した。実験例1、2および比較例1におけるAlGa_N層(第1被測定単層104a)の組成および膜厚の設計値、AlN層(第2被測定単層104b)の膜厚の設計値は表1に示す通りである。すなわち、実験例1におけるAlGa_N層の組成および膜厚、AlN層の膜厚の各設計値は、それぞれ0.17、20 nm、1.00 nmとした。実験例2におけるAlGa_N層の組成および膜厚、AlN層の膜厚の各設計値は、それぞれ0.15、20 nm、0.85 nmとした。比較例1におけるAlGa_N層の組成および膜厚、AlN層の膜厚の各設計値は、それぞれ0.26、20 nm、1.70 nmとした。また、実験例1、2および比較例1のそれぞれについて、AlN層がないAlGa_N層のみを被測定層106とする参照サンプルも作成した。当該参照サンプルは、後に説明するフィッティングパラメータの初期値として用いるため、あるいは、移動度比を算出するための参照移動度を得るためのサンプルとして用いた。

10

20

【表1】

	AlGa _N 層		AlN層			移動度比
	Al組成	膜厚(nm)	膜厚(nm)	吸収端エネルギー(eV)	吸収端波長(nm)	
実験例1	0.17	20	1.00	4.156	298.4	1.200
実験例2	0.15	20	0.85	3.973	312.1	1.309
比較例1	0.26	20	1.70	4.423	280.4	0.995

30

【0085】

実施例6のサンプル積層基板の測定は、実施例2の場合と同様に、入射光112を照射し、反射光114から分光エリプソデータを取得し、分光エリプソデータを用いて、AlGa_N層およびAlN層(被測定層106に含まれる各被測定単層)についての膜厚、組成を計算した。しきい波長(λ_{th})として370 nmを用いた。AlN層(第2被測定単層104b)のフィッティングにおける解析モデルには吸収モデルを適用した。

【0086】

なお、サンプル積層基板の測定に先立ち、参照サンプルについての測定を行い、AlGa_N層についての膜厚および光学定数を予め得ておき、サンプル積層基板のフィッティングにおいて、当該参照サンプルにおけるAlGa_N層について得た膜厚および光学定数を、パラメータの初期値に用いた。また、サンプル積層基板のフィッティングでは、AlGa_N層およびAlN層についてのパラメータのうち、膜厚についての値を予備的フィッティングで得ておき、当該予備的フィッティングで得た膜厚の値を、サンプル積層基板のフィッティングにおけるパラメータの初期値に用いた。このように、別途参照サンプルとして形成したAlGa_N層のフィッティングで得た値や予備的フィッティングで得た膜厚値を、フィッティングパラメータの初期値に用いることにより、フィッティングを適切な極小点に収束させ、フィッティング結果の精度を高めることができる。また、フィッティングの計算を早く収束させることができる。

40

50

【0087】

上記のフィッティングにより得たA1N層に関する値のうち、吸収モデルにおけるパラメータの一つである吸収端の値を、実験例1、2および比較例1のそれぞれについて表1に示す。吸収端の値としてエネルギー値および波長を示すが、両値は表現が異なるだけであり、物理的意味は同じである。また、実験例1、2および比較例1のそれぞれについて、GaN層（吸収層108）とAlGaN層（第1被測定単層104a）の界面に形成される2DEGチャンネルにおける移動度を測定した。移動度は、実験例1、2および比較例1のそれぞれについて、A1N層が無い場合の対応する参照サンプルにおける移動度を基準として規格化し、移動度比として評価した。実験例1、2および比較例1のそれぞれの移動度比を表1に示す。

10

【0088】

図29は、表1に示した移動度比の値を、吸収端エネルギー値を横軸にしてプロットしたグラフである。表1から明らかに、実験例1、2においてはA1N層（第2被測定単層104b）をGaN層（吸収層108）とAlGaN層（第1被測定単層104a）の間に形成することで移動度が向上する（移動度比が1を超える）が、比較例1においては、A1N層を形成することで逆に移動度が低下する（移動度比が1を下回る）。これを図29について見ると、吸収端エネルギー値が4.4eVを超える値を示すA1N層にあっては、移動度向上の効果は見られない、または移動度向上の阻害要因となる一方、吸収端エネルギー値が4.4eV以下の値を示すA1N層は、移動度を向上する効果を有することがわかる。

20

【0089】

以上、本実施の形態においては、発明を積層基板の測定方法として説明したが、本願発明は、当該測定方法に適した積層基板としても把握することが可能である。すなわち、被測定単層105または被測定単層が複数積層された被測定積層104を含む被測定層106が位置する側の表面に向けて、しきい波長より短波長の光を含む入射光112を照射し、入射光112の反射光114を測定することにより、しきい波長以下の波長における互いに独立な2以上の反射光関連値を取得し、 $2n$ （但し、 n は、被測定層106に含まれる被測定単層の層数であり、1以上の整数である。）以上の反射光関連値を用いて、被測定層106に含まれる各被測定単層について、被測定単層に関する値を計算する測定方法に適用可能な積層基板110であって、積層基板110が、ベース基板102と、被測定層106と、ベース基板102および被測定層106の間に位置する吸収層108と、を有し、測定方法におけるしきい波長として、吸収層の消衰係数 k を波長（単位はnm）の関数 $k(\lambda)$ として表した場合の一回微分 $dk(\lambda)/d\lambda$ の絶対値が消衰微分しきい値以下となる波長範囲の最大波長を用いるもの、とすることができる。消衰微分しきい値とは消衰係数が急激に変化するところを示すように定められる値をいう。消衰微分しきい値として好ましくは 1×10^{-3} であり、より好ましくは 5×10^{-4} であり、さらに好ましくは 1×10^{-4} である。

30

【0090】

被測定層106に含まれる各被測定単層および吸収層108が互いに組成が異なる半導体または誘電体からなっても良い点、被測定層106および吸収層108の構成、具体的な物質、厚さの規定等は、前記した実施の形態に記載の通りである。

40

【0091】

また、被測定層106に含まれる被測定単層の層数 n が2以上であり、被測定層106が、第1被測定単層104aおよび第2被測定単層104bを含み、第2被測定単層104bが、第1被測定単層104aより吸収層108の側に位置し、第2被測定単層104bが、特異励起発生波長域において光を吸収する吸収モデルに基づくカーブフィッティングにより、当該第2被測定単層104bに関する値が計算されるものである場合、カーブフィッティングにより第2被測定単層104bに関する値の一つとして得られた吸収モデルにおける吸収端のエネルギー値が、4.4eV以下、さらに好ましくは4.2eV以下である積層基板として把握することも可能である。さらに、ベース基板102が、150m

50

m以上の直径を有するウェハ基板である積層基板として把握することも可能である。

【0092】

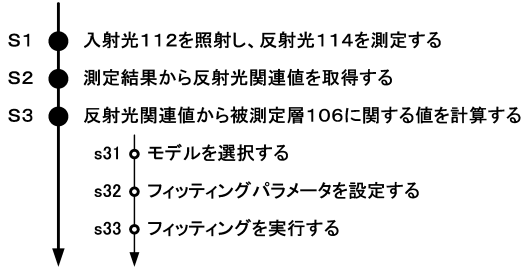
また、本願発明は、当該測定方法に適用可能な測定装置として把握することも可能である。すなわち、上記実施の形態に記載の測定方法に適用可能な測定装置であって、積層基板110を保持する基板保持部と、入射光112を生成する光源部と、反射光114を受光し、受光信号を生成する受光信号生成部と、基板保持部、光源部および受光信号生成部の角度を制御する角度制御機構と、受光信号生成部で生成した受光信号を処理する信号処理部と、を有する測定装置として把握することもできる。

【符号の説明】

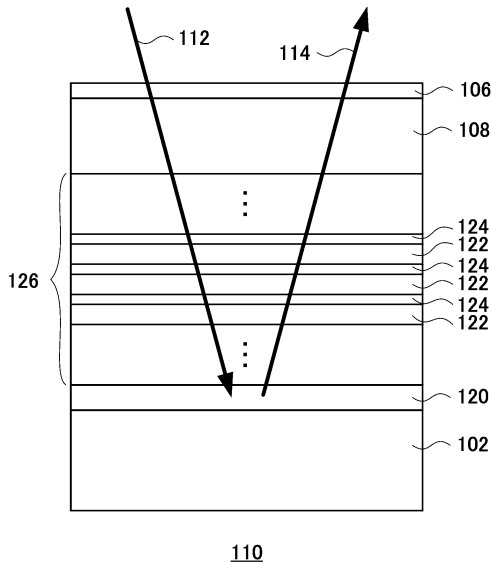
【0093】

102...ベース基板、104...被測定積層、104a...第1被測定単層 104b...第2被測定単層 104c...第3被測定単層、105...被測定単層、106...被測定層、108...吸収層、110...積層基板、112...入射光、114...反射光、120...中間層、122...第1結晶層、124...第2結晶層、126...バッファ層。

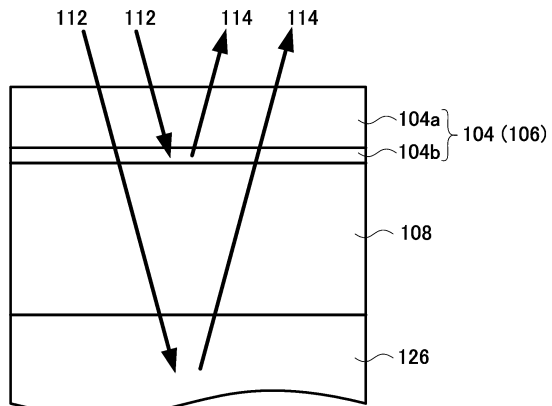
【図1】



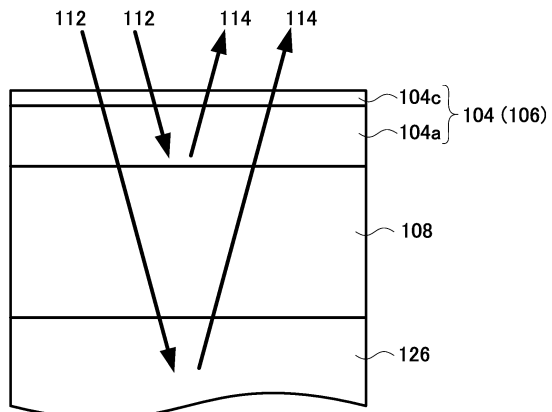
【図2】



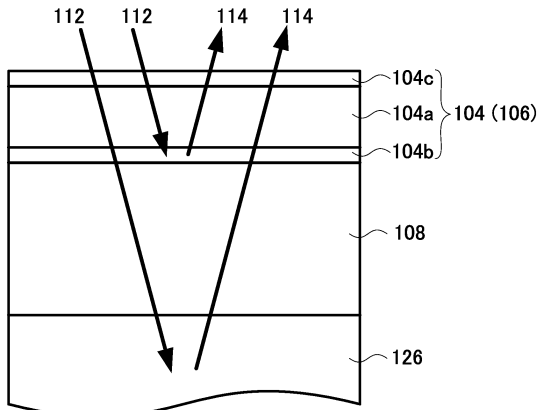
【図3】



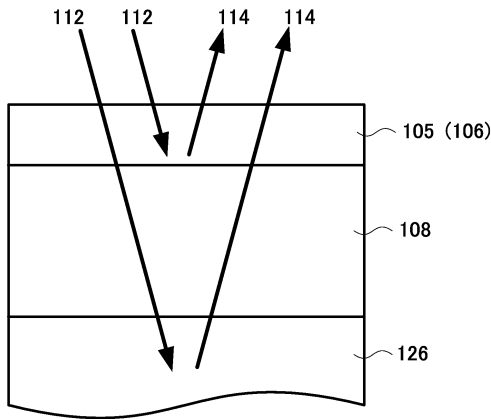
【図4】



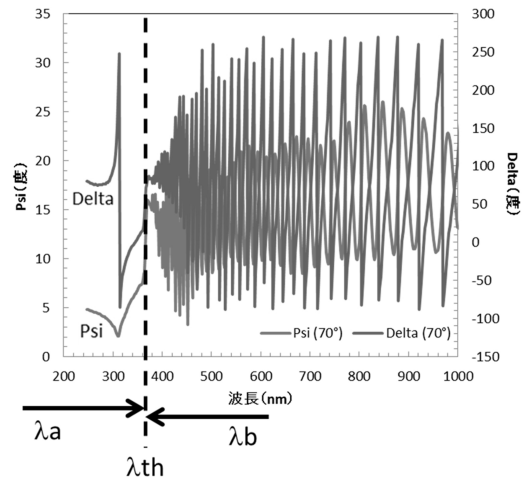
【 図 5 】



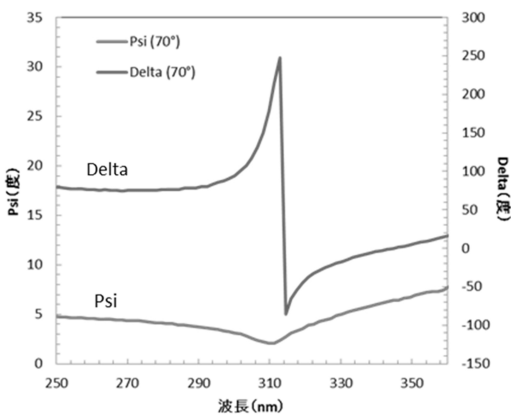
【 図 6 】



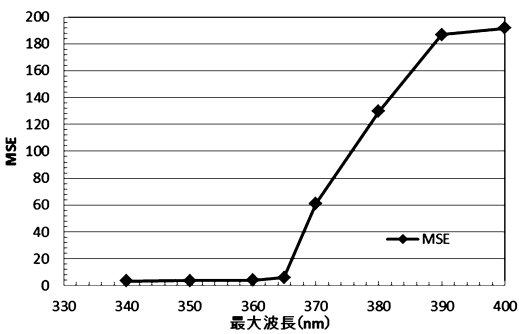
【 図 7 】



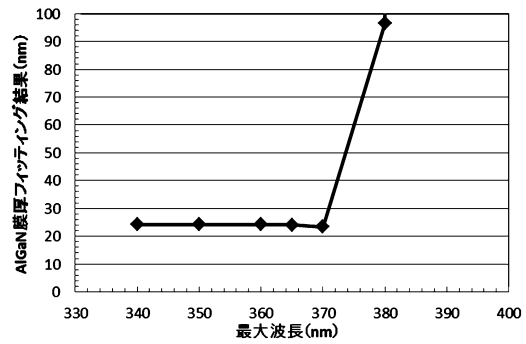
【 図 8 】



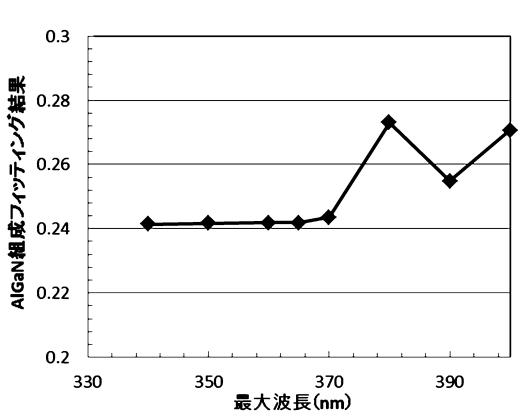
【 図 9 】



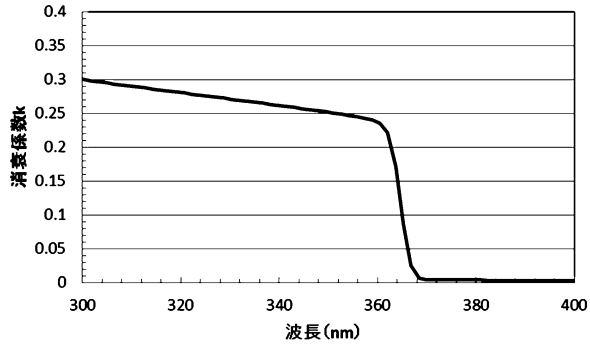
【 図 10 】



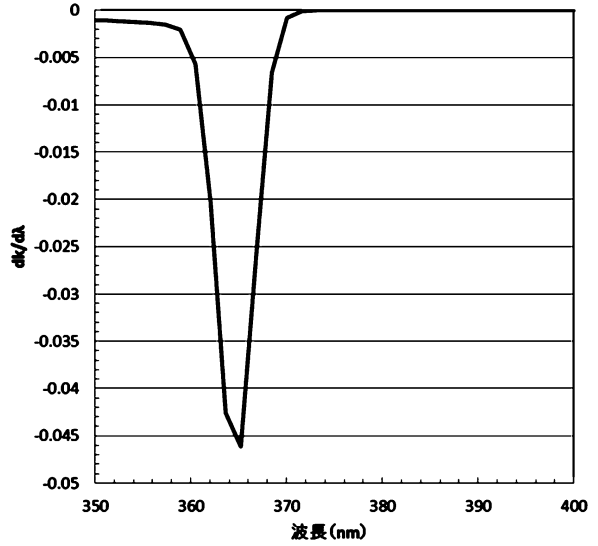
【 図 11 】



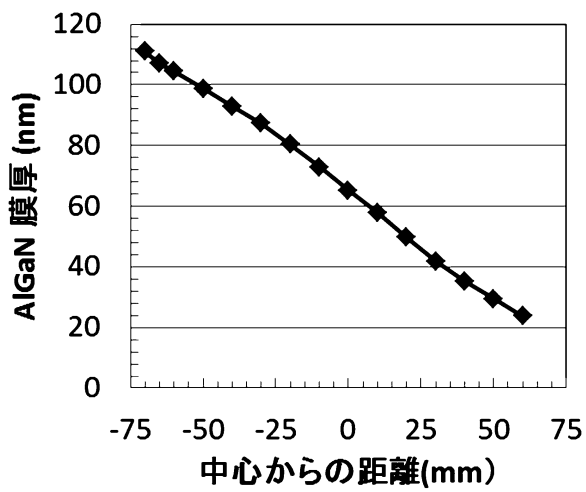
【 図 1 2 】



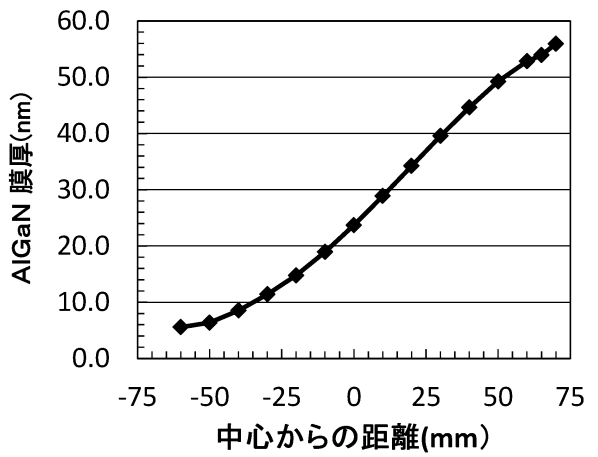
【 図 1 3 】



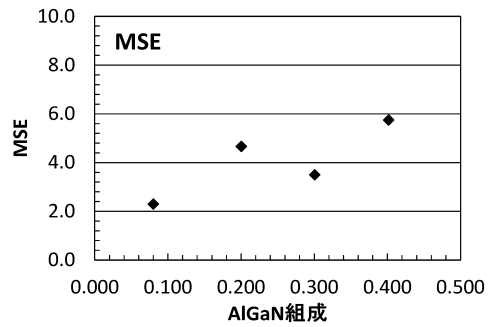
【 図 1 4 】



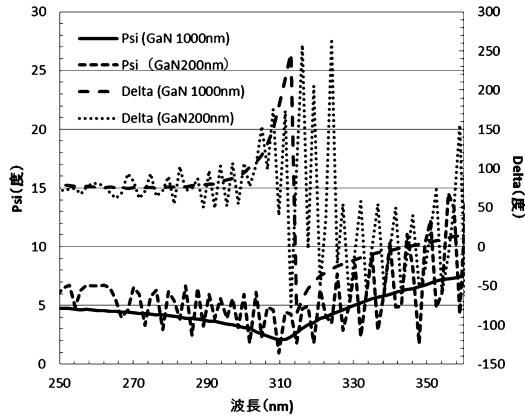
【 図 1 5 】



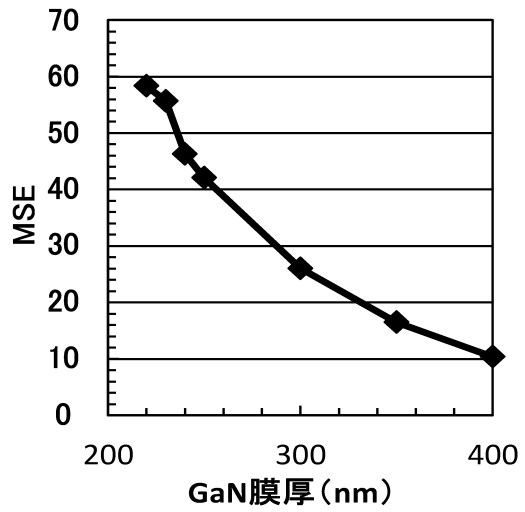
【 図 1 6 】



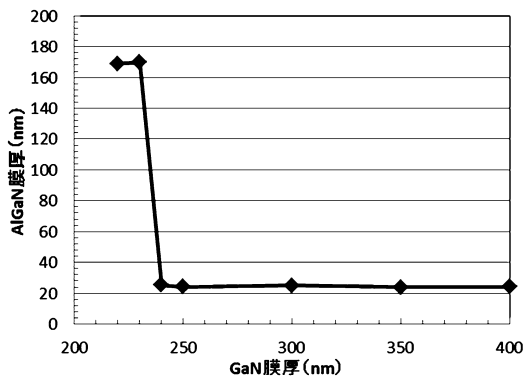
【 図 17 】



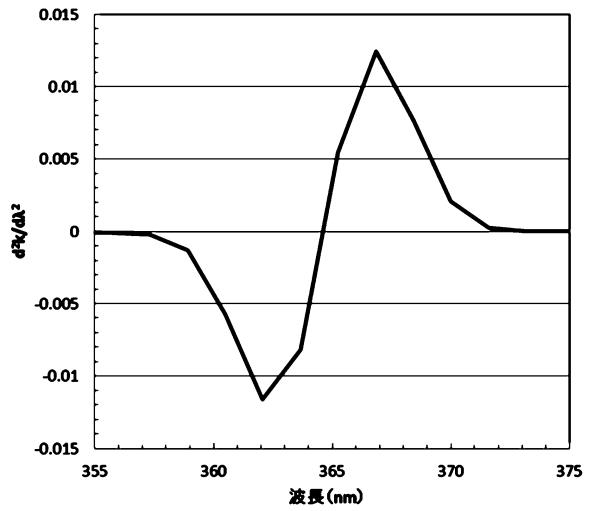
【 図 18 】



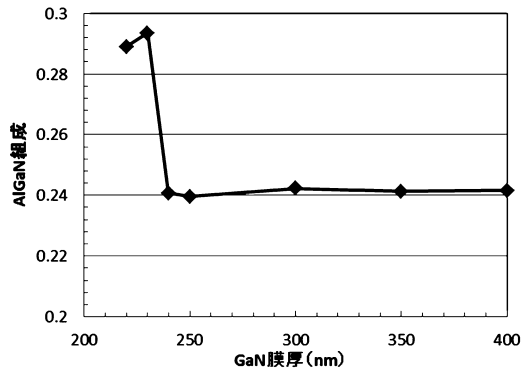
【 図 19 】



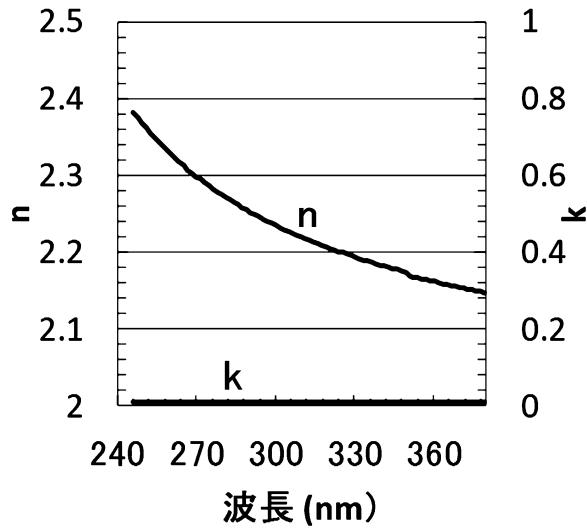
【 図 21 】



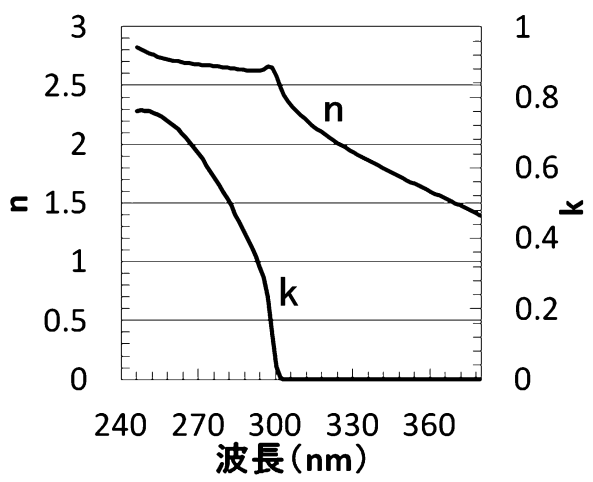
【 図 20 】



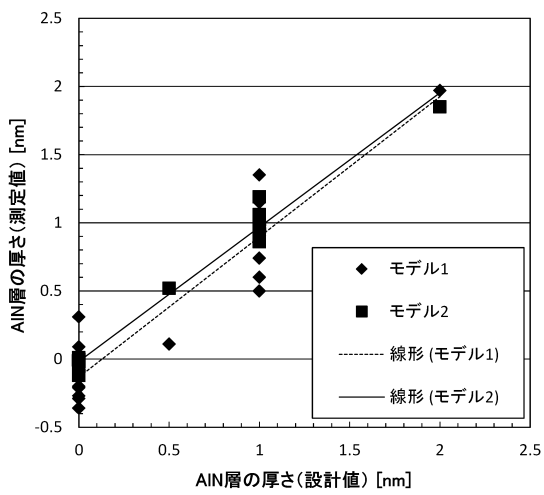
【図 2 2】



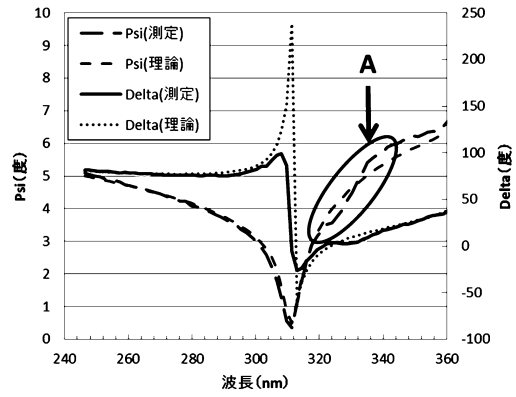
【図 2 3】



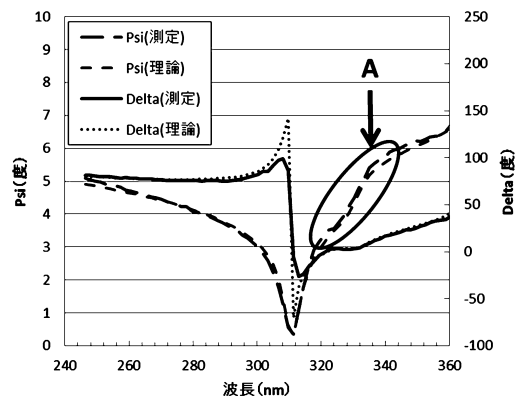
【図 2 4】



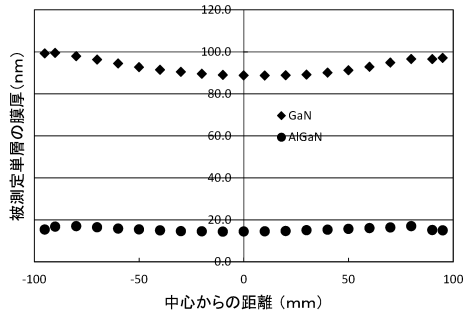
【図 2 5】



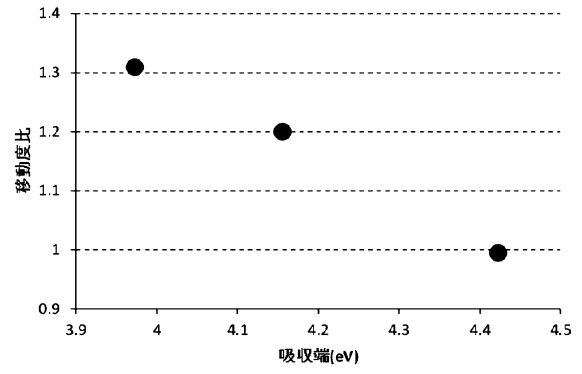
【図 2 6】



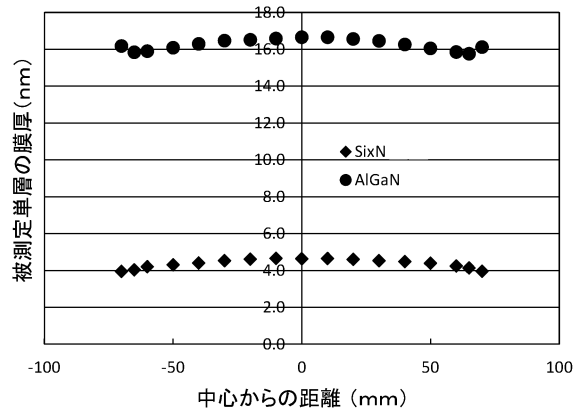
【図 27】



【図 29】



【図 28】



フロントページの続き

(72)発明者 山本 武継
茨城県つくば市北原6番 住友化学株式会社内

審査官 田中 洋介

(56)参考文献 特開2003-090710(JP,A)
特開2006-349374(JP,A)
特開2014-063982(JP,A)
特開2014-090033(JP,A)
国際公開第2014/024310(WO,A1)
特開2013-207274(JP,A)
特開2014-110311(JP,A)
特開2014-140024(JP,A)
特開2014-236017(JP,A)
米国特許第06392756(US,B1)
特開2006-093633(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01N21/00 - G01N21/61
JSTPlus(JDreamIII)