(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016 年 10 月 6 日(06.10.2016)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2016/158785 A1

(51) 国際特許分類:
*G01N 21/21* (2006.01) *G01N 21/27* (2006.01)
*G01B 11/06* (2006.01) *H01L 21/66* (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2016/059699

(22) 国際出願日: 2016 年 3 月 25 日(25.03.2016)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2015-067788 2015 年 3 月 29 日(29.03.2015) JP
特願 2015-067789 2015 年 3 月 29 日(29.03.2015) JP

(71) 出願人: 住友化学株式会社(SUMITOMO CHEMICAL COMPANY, LIMITED) [JP/JP]; 〒1048260 東京都中央区新川二丁目２７番１号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 山本　大貴(YAMAMOTO Taiki); 〒3003294 茨城県つくば市北原６番　住友化学株式会社内 Ibaraki (JP). 山本　武継(YAMAMOTO Taketsugu); 〒3003294 茨城県つくば市北原６番　住友化学株式会社内 Ibaraki (JP). 笠原　健司(KASAHARA Kenji); 〒3003294 茨城県つくば市北原６番　住友化学株式会社内 Ibaraki (JP).

(74) 代理人: 龍華国際特許業務法人(RYUKA IP LAW FIRM); 〒1631522 東京都新宿区西新宿１－６－１　新宿エルタワー２２階 Tokyo (JP).

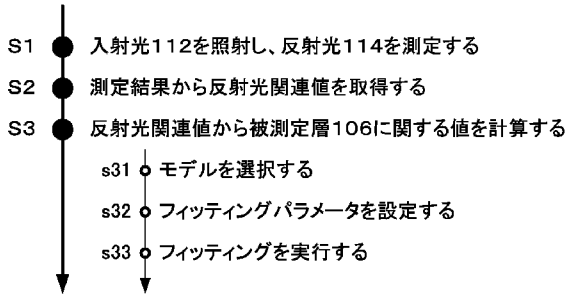
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,

[続葉有]

(54) **Title**: MULTI-LAYER SUBSTRATE MEASUREMENT METHOD, MULTI-LAYER SUBSTRATE, AND MEASUREMENT DEVICE

(54) 発明の名称 : 積層基板の測定方法、積層基板および測定装置




S1 Apply incident light 112, and measure reflected light 114
S2 Acquire reflected-light related values from measurement result
S3 Calculate values relating to layer 106 to be measured, from reflected-light related values
s31 Select model
s32 Set fitting parameter
s33 Execute fitting

(57) **Abstract**: Provided is a measurement method, wherein a multi-layer substrate has a base substrate, an absorption layer, and a layer to be measured in this order, and the layer to be measured has one or a plurality of single layers to be measured, said method comprising: a step for applying incident light, including light with a wavelength shorter than a threshold wavelength, from the side on which the layer to be measured is located, measuring reflected light, and thereby acquiring 2n (where, n is the number of single layers to be measured included in the layer to be measured, and is an integer of 1 or more) or more reflected light-related values independent of each other at wavelengths equal to or shorter than the threshold wavelength; and a step for using the 2n or more reflected-light related values to calculate, with regard to the respective single layers to be measured included in the layer to be measured, values relating to the single layers to be measured. Used as the threshold wavelength is the maximum wavelength in a wavelength range in which the absolute value of a first order differential $dk(\lambda)/d\lambda$ when an extinction coefficient k of the absorption layer is represented as a function $k(\lambda)$ of a wavelength $\lambda$ (in units of nm) becomes an extinction differential threshold value or less.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2016/158785 A1

ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

ベース基板、吸収層および被測定層をこの順に有し、被測定層が単一または複数の被測定単層を有し、被測定層が位置する側からしきい波長より短波長の光を含む入射光を照射し、反射光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２ｎ（ｎは被測定層に含まれる被測定単層の層数であり１以上の整数）以上の反射光関連値を取得するステップと、２ｎ以上の反射光関連値を用いて、被測定層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ステップとを有し、しきい波長として吸収層の消衰係数ｋを波長λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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測定方法を提供する。

# 明　細　書

## 発明の名称 ： 積層基板の測定方法、積層基板および測定装置

## 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。

[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、「$\Psi_E$，$\Delta_E$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$\lambda_i$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$\Psi_E(\lambda_i)$と$\Delta_E(\lambda_i)$を得る。$\Psi_{Mk}$，$\Delta_{Mk}$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（$\phi_0$）の近傍の$\phi_k$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$\Psi_{Mk}(\lambda_i)$と$\Delta_{Mk}(\lambda_i)$を得る。比較評価ステップ２３，２４は、前記$\Psi_E$，$\Delta_E$スペクトルと前記$\Psi_{Mk}$，$\Delta_{Mk}$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。

[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$\lambda_i$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

## 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。

[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の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。

[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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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$１\times１０^{-3}$であり、より好ましくは$５\times１０^{-4}$であり、さらに好ましくは$１\times１０^{-4}$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。

[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（Δ）および分光反射振幅比角（ｔａｎΨ）を取得してもよい。

[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Ｔａｕｃ－Ｌｏｒｅｎｚ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。

[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、ＩＶ族半導体およびＩＩＩ－Ｖ族化合物半導体を挙げることができる。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$C_aSi_bGe_cSn_d$（０≦ａ≦１、０≦ｂ≦１、０≦ｃ≦１、０≦ｄ≦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、$Al_aGa_bIn_cP_dAs_eSb_f$（０≦ａ≦１、０≦ｂ≦１、０≦ｃ≦１、０≦ｄ≦１、０≦ｅ≦１、０≦ｆ≦１、ａ＋ｂ＋ｃ＝１、ｄ＋ｅ＋ｆ＝１）、$B_aAl_bGa_cIn_dN$（０≦ａ≦１、０≦ｂ≦１、０≦ｃ≦１、０≦ｄ≦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。

[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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなり、前記第２被測定単層が、$In_{z1}Al_{z2}Ga_{z3}N$（ｚ１＋ｚ２＋ｚ３＝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、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦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。

[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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなり、前記第３被測定単層が、$In_{q1}Al_{q2}Ga_{q3}N$（ｑ１＋ｑ２＋ｑ３＝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、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝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の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、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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。

[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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなるものであってもよい。前記被測定単層が、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦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（ｘ１、ｘ２およびｘ３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、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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] 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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなり、前記第２被測定単層が、$In_{z1}Al_{z2}Ga_{z3}N$（ｚ１＋ｚ２＋ｚ３＝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、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなり、前記第３被測定単層が、$In_{q1}Al_{q2}Ga_{q3}N$（ｑ１＋ｑ２＋ｑ３＝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、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝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、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなるものであってもよい。前記被測定単層が、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦０．５）からなるものであってもよい。前記吸収層が、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）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λａ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。

[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。

[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] 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、図示するとおり、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。

[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。

[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が交互に多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層およびＡｌＧａＮ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ＡｌＮ層とＡｌＧａＮ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ＧａＮ層およびＡｌＧａＮ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。

[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。

[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。

[0034] 吸収層１０８がたとえばＧａＮ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ＡｌＧａＮ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ＡｌＮ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ＧａＮ層またはＳｉＮ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ＧａＮ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。ＡｌＧａＮ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λｔｈ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λｔｈは、吸収層１０８の消衰係数ｋを波長λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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λｔｈ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、λｔｈ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λｔｈを上記のように選択し、λｔｈ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、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１１２の入射角が２ｎ以上の場合について反射光１１４を測定し、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、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１１４を分光測定し、反射光関連値として、反射光１１４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１１２として直線偏光を用い、反射光１１４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（Δ）および分光反射振幅比角（ｔａｎΨ）を取得することができる。なお、ここで「分光値」とは、反射光１１４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。

[0042] 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、解析モデルとして、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、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１０６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１０４ｂ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。

[0043] ここで、特異励起発生波長域とは、被測定層１０６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。

[0044] 第２被測定単層１０４ｂに吸収モデルを採用する場合、上記Ｓ３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１０４ａ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１０４ａ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１０４ｂが無い第１被測定単層１０４ａ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Ｓ１～Ｓ３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１０４ａ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１０４ａの膜厚、光学定数等の値を、第２被測定単層１０４ｂ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１０４ａ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。

[0045] また、第２被測定単層１０４ｂに吸収モデルを採用する場合、上記Ｓ３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１０４ａおよび第２被測定単層１０４ｂ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１０４ａおよび第２被測定単層１０４ｂの厚さを、第１被測定単層１０４ａおよび第２被測定単層１０４ｂ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－Ｌｏｒｅｎｚ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。

[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$C_aSi_bGe_cSn_d$（０≦ａ≦１、０≦ｂ≦１、０≦ｃ≦１、０≦ｄ≦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、$AlaGabInc PdAseSbf$（０≦ａ≦

１、０≦ｂ≦１、０≦ｃ≦１、０≦ｄ≦１、０≦ｅ≦１、０≦ｆ≦１、ａ＋ｂ＋ｃ＝１、ｄ＋ｅ＋ｆ＝１）、$B_aAl_bGa_cIn_dN$（０≦ａ≦１、０≦ｂ≦１、０≦ｃ≦１、０≦ｄ≦１、ａ＋ｂ＋ｃ＋ｄ＝１）が例示できる。誘電体として、$SiO_2$、$Si_3N_4$、ＳｉＯＮ、$InO_2$、$SnO_2$、ＩｎＳｎ$O_2$、$ZnO_2$、$TiO_2$、$Al_2O_3$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。

[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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）が例示でき、第２被測定単層１０４ｂとして、$In_{z1}Al_{z2}Ga_{z3}N$（ｚ１＋ｚ２＋ｚ３＝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。

[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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）が例示でき、第３被測定単層１０４ｃとして、$In_{q1}Al_{q2}Ga_{q3}N$（ｑ１＋ｑ２＋ｑ３＝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。

[0051] 第１被測定単層１０４ａの物質として$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝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、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなるものであってもよい。被測定単層１０５として、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦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（ｘ１、ｘ２およびｘ３の値）を計算することができる。吸収層１０８として、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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λｔｈは３７０ｎｍ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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）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２４０ｎｍ以上とすることが好ましい。なお、光の侵入深さは、$\lambda_0$を光の波長、$k_0$を$\lambda_0$における消衰係数とした場合、$\lambda_0/4\pi k_0$で表される。吸収層１０８の厚さが小さくなることで、λｔｈ以下の波長の光が吸収層１０８において十分に吸収されず、フリンジが現れることがあり、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ＡｌＧａＮ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ＡｌＧａＮ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ＧａＮ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（λｔｈ）として３７０ｎｍ（吸収層１０８であるＧａＮ層の消衰係数ｋを波長λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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Ψであり、破線が位相差Δである。λｔｈ（約３７０ｎｍ）以上の波長域λｂにおいては、バッファ層以下の複雑な構造を反映して、ΨおよびΔ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λａ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、λｔｈ以下の波長域λａ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ＧａＮ層（吸収層１０８）と、被測定単層１０５であるＡｌ$_x$Ｇａ$_{1-x}$Ｎ層と、Ａｌ$_x$Ｇａ$_{1-x}$Ｎ層の表面のラフネス層を採用した。ラフネス層には、ＡｌＧａＮ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、３７０ｎｍ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、３７０ｎｍ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／ｄλ）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３７０ｎｍ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５．６ｎｍから最大膜厚１１１ｎｍ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１５０ｍｍ（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１０００ｎｍにした場合と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。吸収層１０８の厚さが小さくなることで、λｔｈ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２４０ｎｍ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３６４．６ｎｍであり、図２１より３６４．６ｎｍ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２４２ｎｍ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、バッファ層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、０ｎｍ（ＡｌＮ層なし）０．５ｎｍ、１ｎｍ、２ｎｍ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（λｔｈ）として３７０ｎｍを用いた。ただし、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。

[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１０４ａおよび第２被測定単層１０４ｂ）の厚さおよび組成を各々測定できるはずである。

[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）、０．５ｎｍ、１ｎｍ、２ｎｍ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０ｎｍのとき、$3\sigma = 0.64$となりＡｌＮ層の厚さが１ｎｍのとき$3\sigma = 0.92$となった。モデル２ではＡｌＮ層の

厚さが０ｎｍのとき、３σ＝０．１３となりＡｌＮ層の厚さが１ｎｍのとき３σ＝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。

[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、バッファ層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１０４ａである$Al_{0.25}Ga_{0.75}N$層の上にキャップ層として、厚さ１ｎｍのＧａＮ層（第３被測定単層１０４ｃ）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ＧａＮ層（第３被測定単層１０４ｃ）からなる被測定層１０６を形成した。

[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（λｔｈ）として３７０ｎｍを用いた。ただし、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適用した。

[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１０４ａおよび第３被測定単層１０４ｃ）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で示したキンクが発生する部分で大きく、このようなキンクの発生は、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のキン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９０ｎｍ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（λｔｈ）として３７０ｎｍ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９０ｎｍ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１～９０ｎｍ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２００ｍｍ（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（ＳｉｘＮ）層を形成した。ＳｉｘＮ層の厚さは５ｎｍとした。ＳｉｘＮ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ＳｉｘＮ層についての膜厚、組成を計算した。しきい波長（λｔｈ）として３７０ｎｍを用い、ＳｉｘＮ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、$Al_{0.25}Ga_{0.75}N$層およびＳｉｘＮ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ＳｉｘＮ層の膜厚である。同図から、５ｎｍ程度のＳｉｘＮ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１

２６、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ＡｌＧａＮ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ＡｌＧａＮ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、２０ｎｍ、１．００ｎｍとした。実験例２におけるＡｌＧａＮ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、２０ｎｍ、０．８５ｎｍとした。比較例１におけるＡｌＧａＮ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、２０ｎｍ、１．７０ｎｍ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ＡｌＧａＮ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。

[表1]

| | AlGaN層 | | AlN層 | | | 移動度比 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Al組成 | 膜厚(nm) | 膜厚(nm) | 吸収端エネルギ(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 |

[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、ＡｌＧａＮ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（λｔｈ）として３７０ｎｍ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、ＡｌＧａＮ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ＡｌＧａＮ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、ＡｌＧａＮ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ＡｌＧａＮ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。

[0087] 上記のフィッティングにより得たＡｌＮ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、ＡｌＮ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。

[0088] 図２９は、表１に示した移動度比の値を、吸収端エネルギ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ＡｌＮ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、ＡｌＮ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、吸収端エネルギ値が４．４ｅＶを超える値を示すＡｌＮ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、吸収端エネルギ値が４．４ｅＶ以下の値を示すＡｌＮ層は、移動度を向上する効果を有することがわかる。

[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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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$1\times10^{-3}$であり、より好ましくは$5\times10^{-4}$であり、さらに好ましくは$1\times10^{-4}$である。

[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。

[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、１５０ｍｍ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。

# 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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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。

[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以上であり、

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（Δ）および分光反射振幅比角（ｔａｎΨ）を取得する

請求項６に記載の測定方法。

[請求項8] 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する

請求項１から請求項７の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項9] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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

請求項８に記載の測定方法。

[請求項10] 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８または請求項９に記載の測定方法。

[請求項11] 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Ｔａｕｃ－Ｌｏｒｅｎｚモデルを含む

請求項１０に記載の測定方法。

[請求項12] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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８から請求項１１の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項13] 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１２の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項14] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなり、

前記第２被測定単層が、$In_{z1}Al_{z2}Ga_{z3}N$（ｚ１＋ｚ２＋ｚ３＝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

請求項１３に記載の測定方法。

[請求項15] 前記第１被測定単層が、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦０．５）からなり、

前記第２被測定単層が、ＡｌＮからなる

請求項１４に記載の測定方法。

[請求項16] 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１４または請求項１５に記載の測定方法。

[請求項17] 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１４から請求項１６の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項18] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなり、

前記第３被測定単層が、$In_{q1}Al_{q2}Ga_{q3}N$（ｑ１＋ｑ２＋ｑ３＝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１３から請求項１７の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項19] 前記第１被測定単層が、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦０．５）からなり、

前記第３被測定単層が、ＧａＮからなる

請求項１８に記載の測定方法。

[請求項20] 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１９に記載の測定方法。

[請求項21] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝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１３から請求項１７の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項22] 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１４から請求項２１の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項23] 前記吸収層が、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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１４から請求項２２の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項24] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが１であり、

前記被測定単層が、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなる

請求項１３に記載の測定方法。

[請求項25] 前記被測定単層が、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦０．５）からなる

請求項２４に記載の測定方法。

[請求項26] 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（ｘ１、ｘ２およびｘ３の値）を計算する

請求項２４または請求項２５に記載の測定方法。

[請求項27] 前記吸収層が、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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

請求項２４から請求項２６の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項28] 前記吸収層が、ＧａＮからなり、

前記しきい波長が、３７０ｎｍである

請求項２３または請求項２７に記載の測定方法。

[請求項29] 前記吸収層の厚さが、前記吸収層の消衰係数ｋを波長λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）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２８の何れか一項に記載の測定方法。

[請求項30] 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

請求項２９に記載の測定方法。

[請求項31] 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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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。

[請求項32] 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３１に記載の積層基板。

[請求項33] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなり、

前記第２被測定単層が、$In_{z1}Al_{z2}Ga_{z3}N$（ｚ１＋ｚ２＋ｚ３＝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

請求項３２に記載の積層基板。

[請求項34] 前記第１被測定単層が、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦０．５）からなり、

前記第２被測定単層が、ＡｌＮからなる

請求項３３に記載の積層基板。

[請求項35] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなり、

前記第３被測定単層が、$In_{q1}Al_{q2}Ga_{q3}N$（ｑ１＋ｑ２＋ｑ３＝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３２または請求項３３に記載の積層基板。

[請求項36] 前記第１被測定単層が、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦０．５）からなり、

前記第３被測定単層が、ＧａＮからなる

請求項３５に記載の積層基板。

[請求項37] 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３５または請求項３６に記載の積層基板。

[請求項38] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝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３２から請求項３４の何れか一項に記載の積層基板。

[請求項39] 前記吸収層が、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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３３から請求項３８の何れか一項に記載の積層基板。

[請求項40] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが１であり、

前記被測定単層が、$In_{x1}Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ１＋ｘ２＋ｘ３＝１）からなる

請求項３２に記載の積層基板。

[請求項41] 前記被測定単層が、$Al_{x2}Ga_{x3}N$（ｘ２＋ｘ３＝１、０＜ｘ２≦０．５）からなる

請求項４０に記載の積層基板。

[請求項42] 前記吸収層が、$In_{y1}Al_{y2}Ga_{y3}N$（ｙ１＋ｙ２＋ｙ３＝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

請求項４０または請求項４１に記載の積層基板。

[請求項43] 前記吸収層が、ＧａＮからなり、

前記しきい波長が、３７０ｎｍである

請求項３９または請求項４２に記載の積層基板。

[請求項44] 前記吸収層の厚さが、前記吸収層の消衰係数ｋを波長λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）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３１から請求項４３の何れか一項に記載の積層基板。

[請求項45] 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

請求項４４に記載の積層基板。

[請求項46] 前記被測定層に含まれる前記被測定単層の層数ｎが２以上であり、

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値が、４．４ｅＶ以下である

請求項３１から請求項４５の何れか一項に記載の積層基板。

[請求項47] 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る

請求項３１から請求項４６の何れか一項に記載の積層基板。

[請求項48] 請求項１から請求項３０の何れか一項に記載の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、

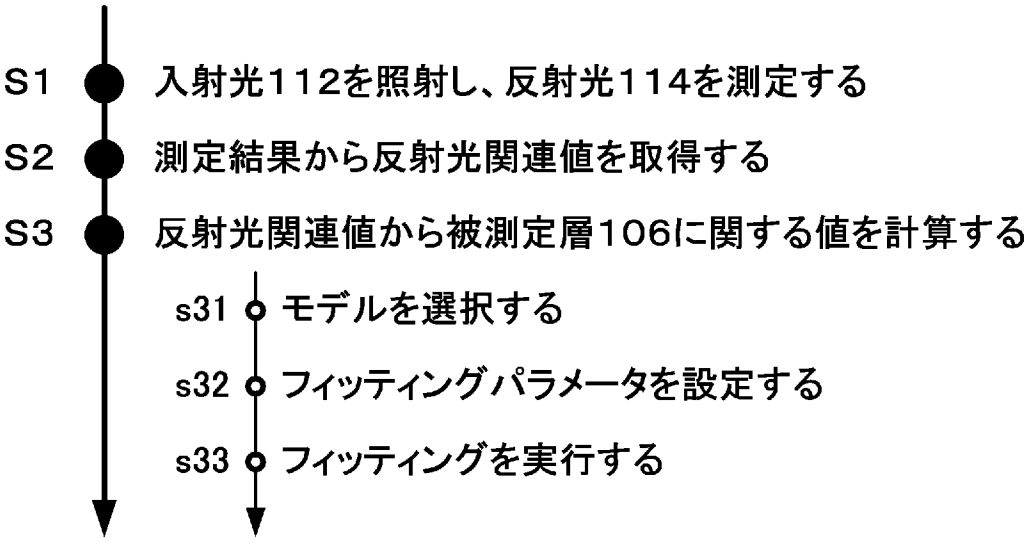
前記反射光を受光し、受光信号を生成する受光信号生成部と、

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、

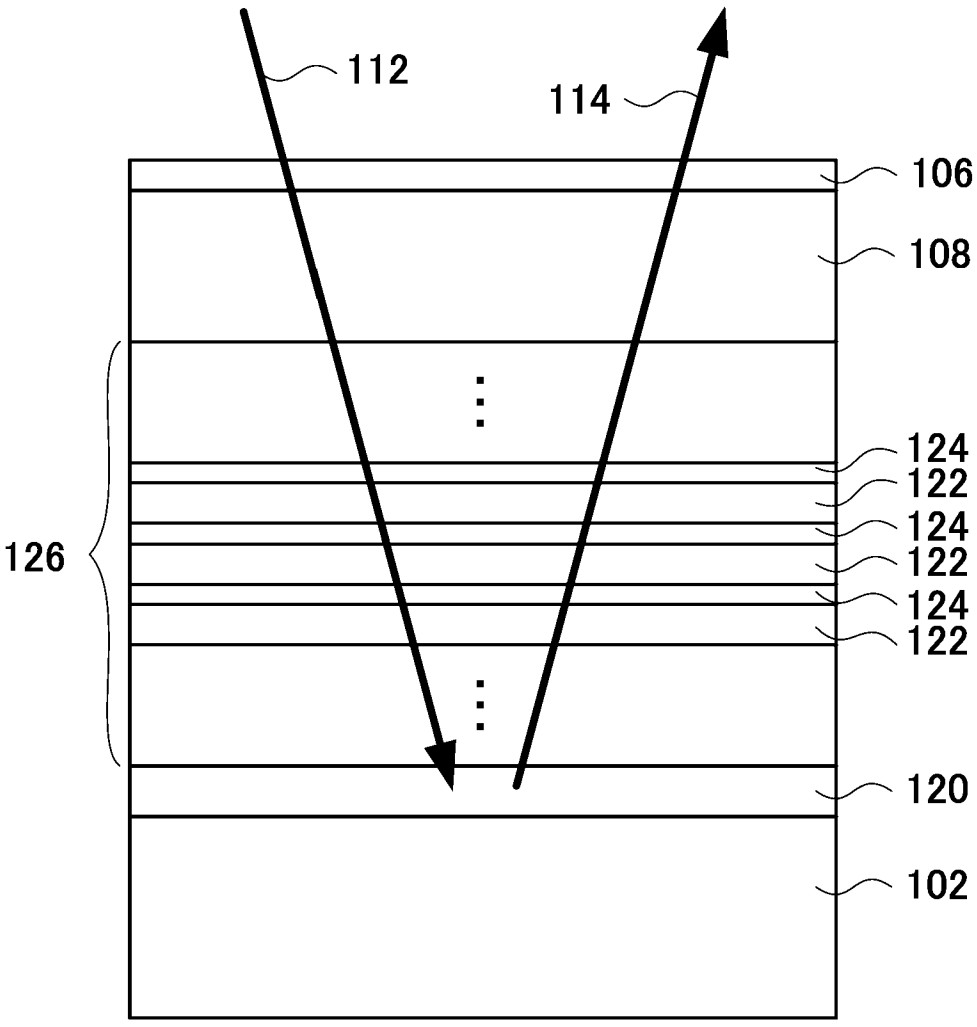
前記受光信号生成部で生成した前記受光信号を処理する信号処理部と、

を有する測定装置。

[図1]

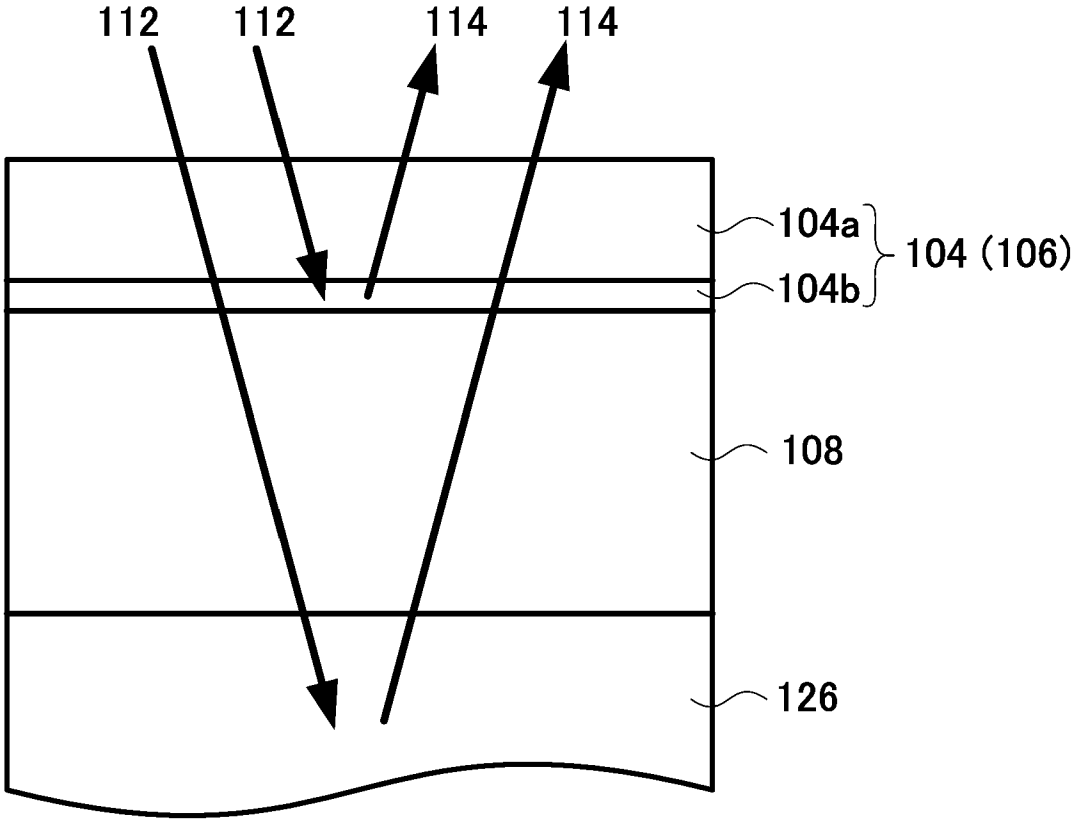

S1
入射光112を照射し、反射光114を測定する
S2
測定結果から反射光関連値を取得する
S3
反射光関連値から被測定層106に関する値を計算する
s31
モデルを選択する
s32
フィッティングパラメータを設定する
s33
フィッティングを実行する

[図2]

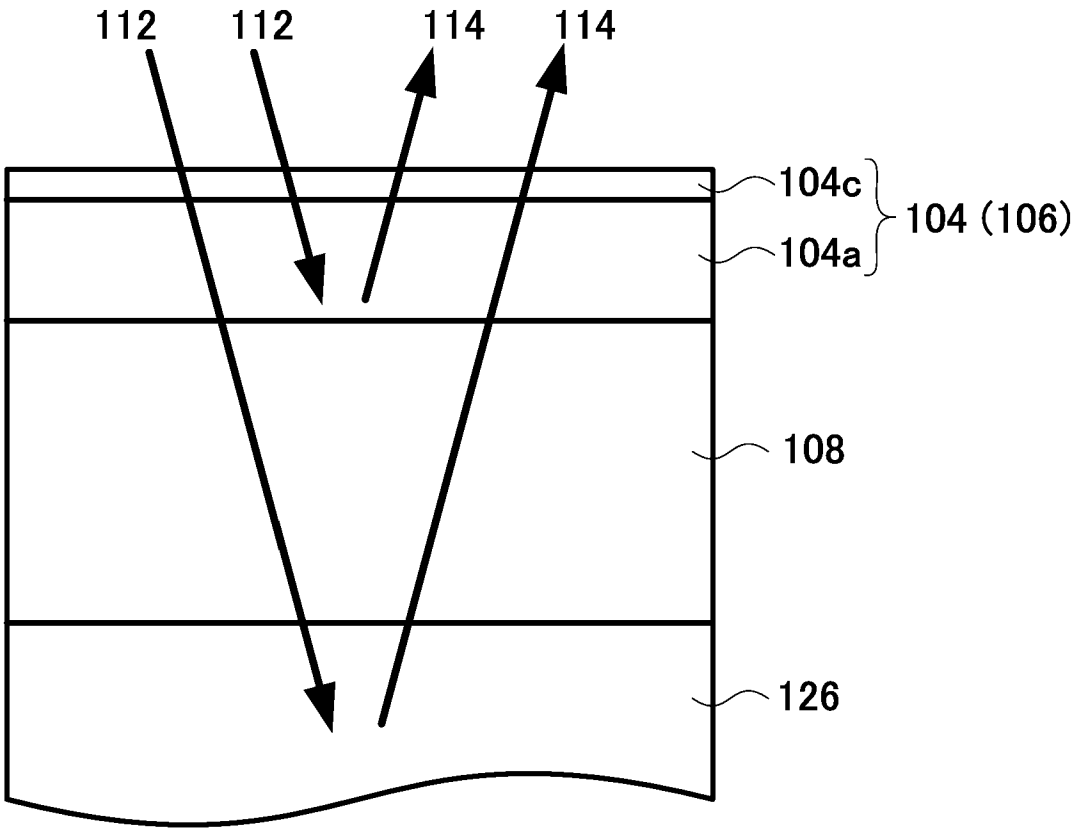

112
114
106
108
126
124
122
124
122
124
122
120
102

110

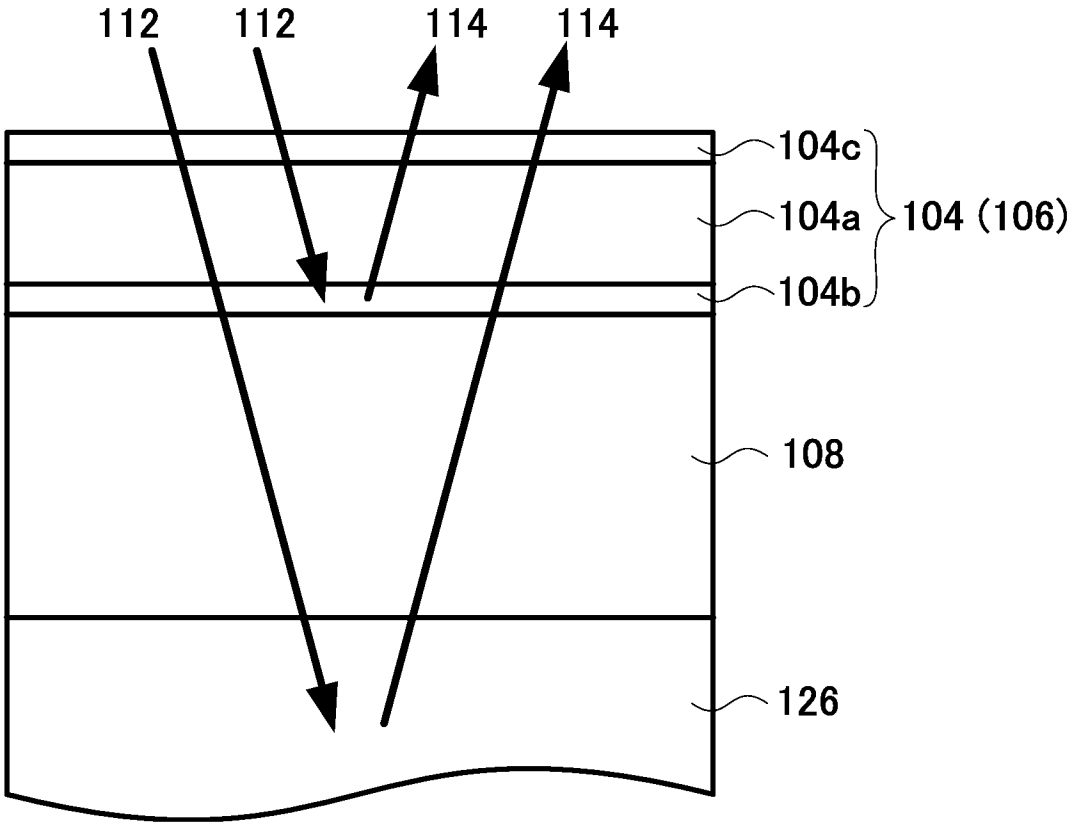
[図3]


112
112
114
114
104a
104b
104 (106)
108
126

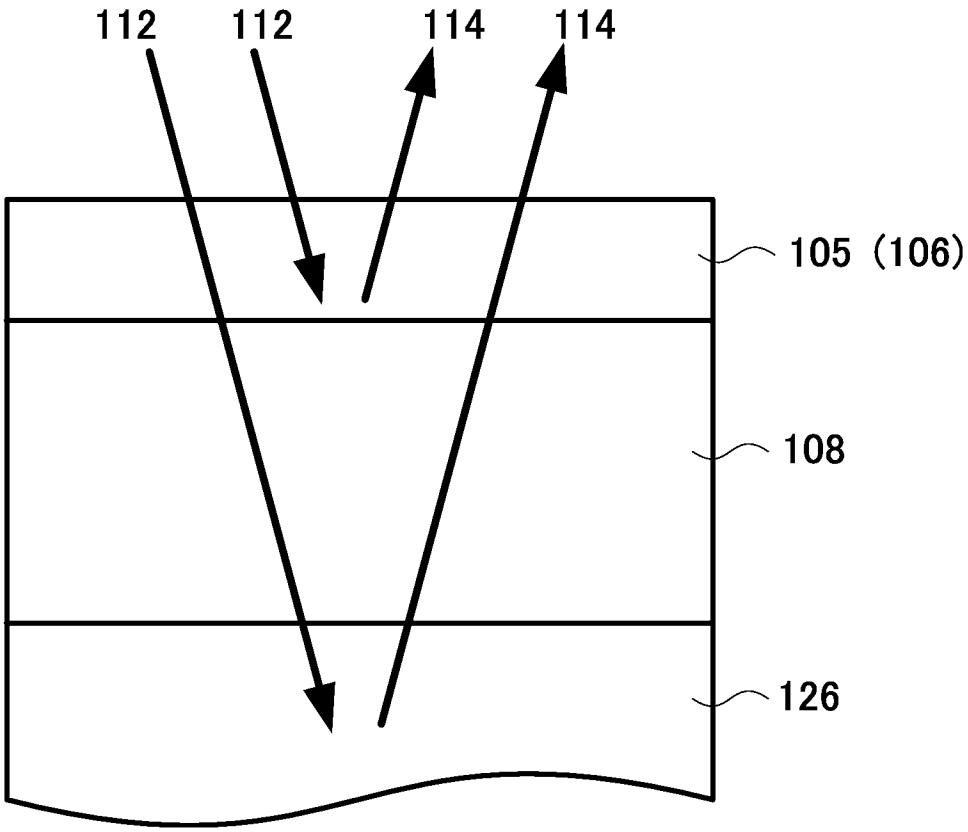
[図4]


112
112
114
114
104c
104a
104 (106)
108
126

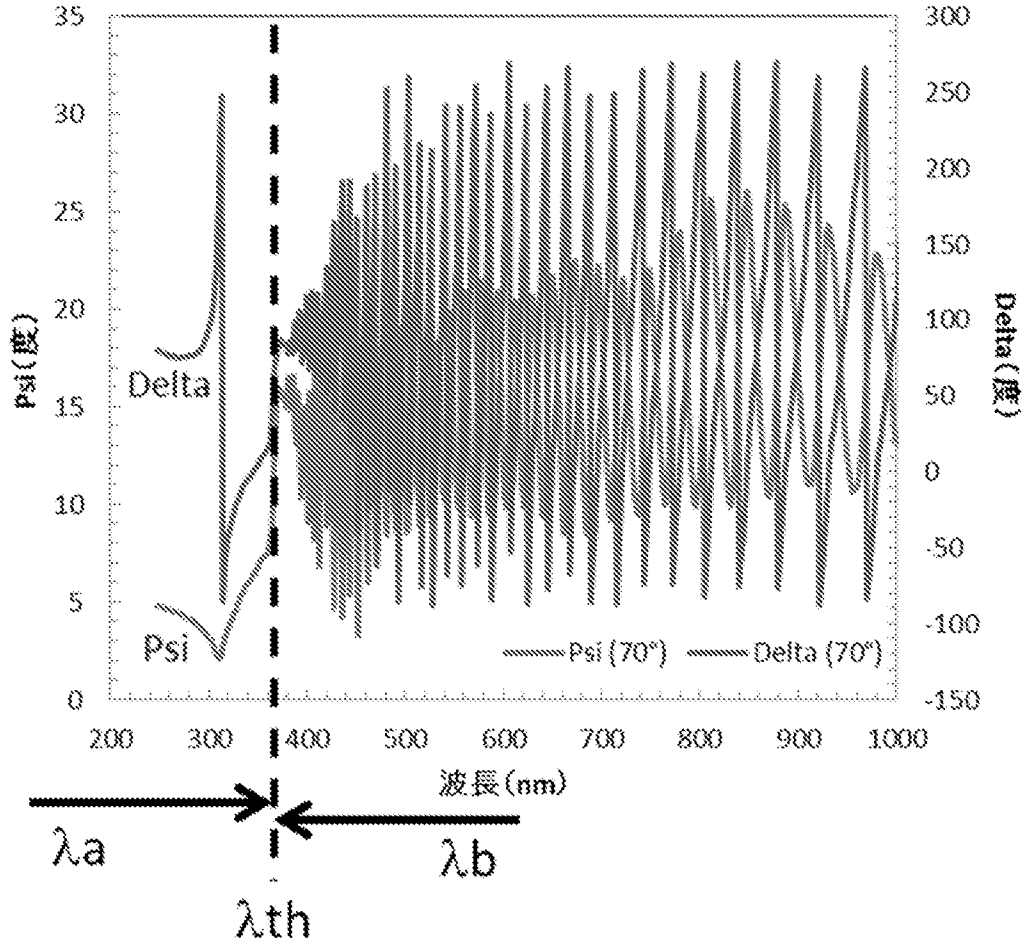
[図5]


112
112
114
114
104c
104a
104b
104 (106)
108
126

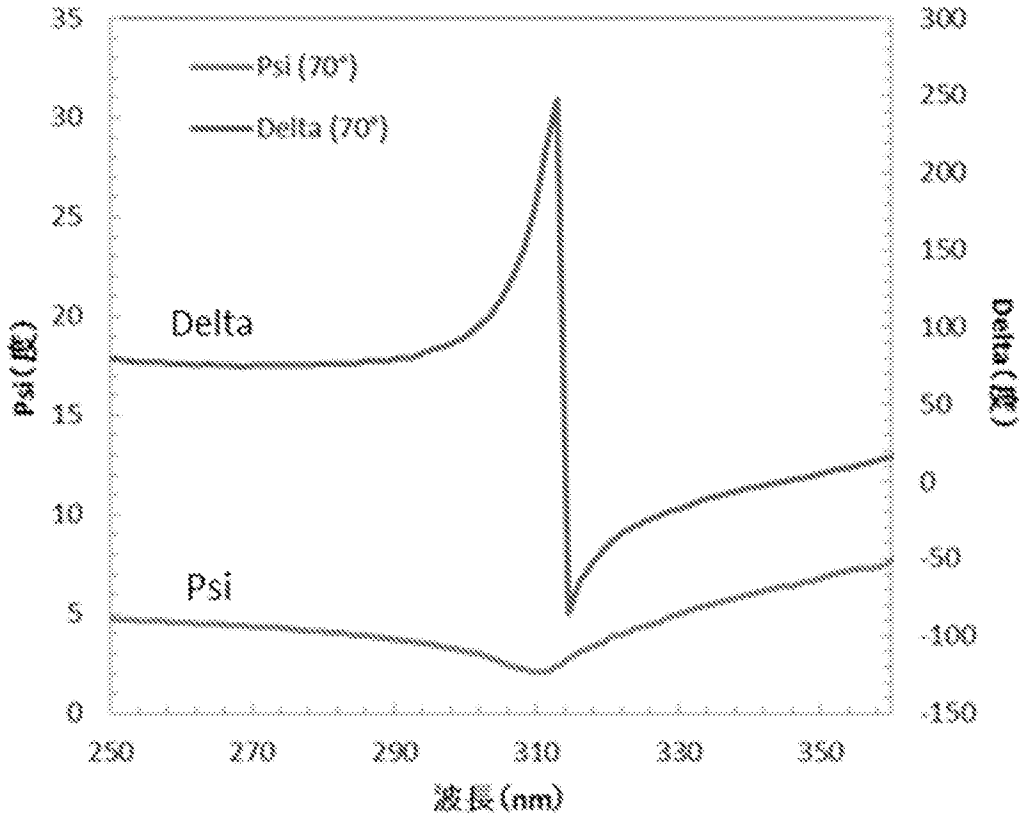
[図6]


112
112
114
114
105 (106)
108
126

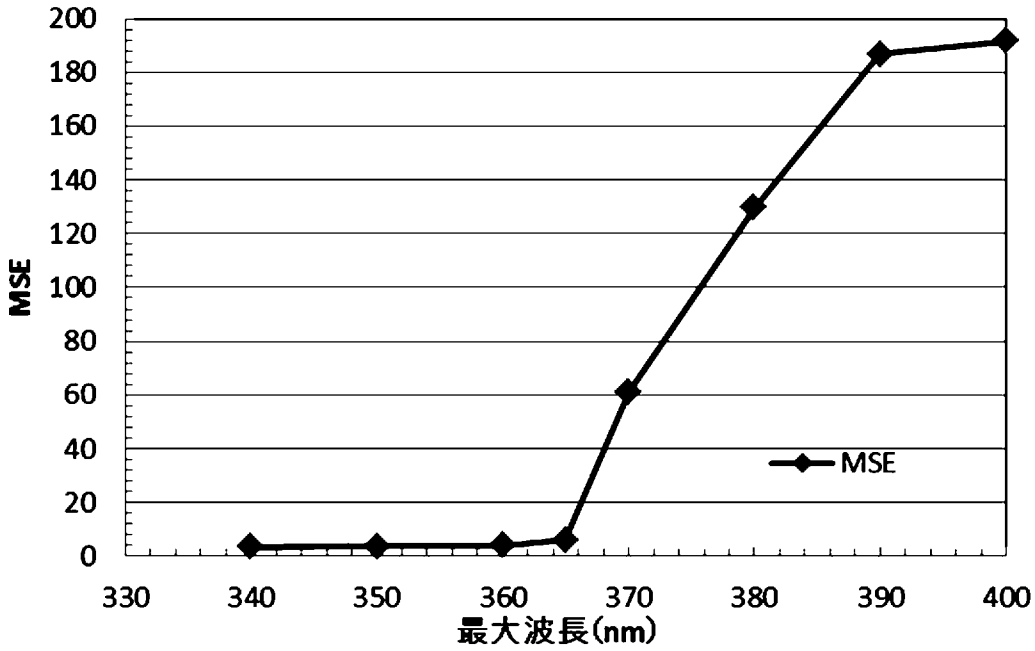
[図7]


Psi (度)
Delta (度)
Delta
Psi
Psi (70°)
Delta (70°)
波長 (nm)
λa
λb
λth

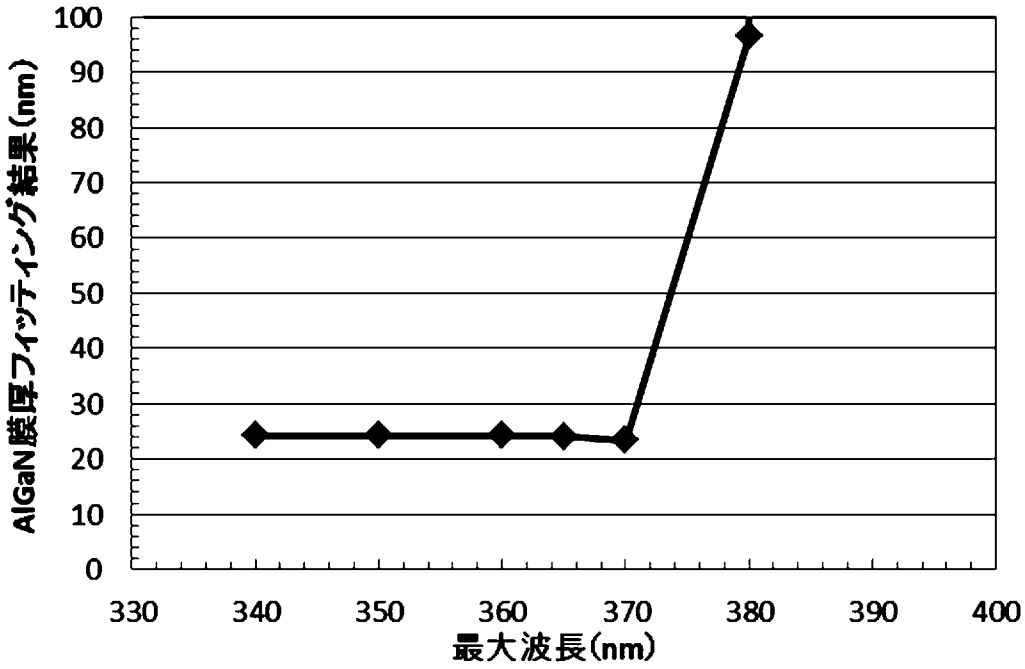
[図8]


Psi (70°)
Delta (70°)
Delta
Psi
Psi (度)
Delta (度)
波長 (nm)

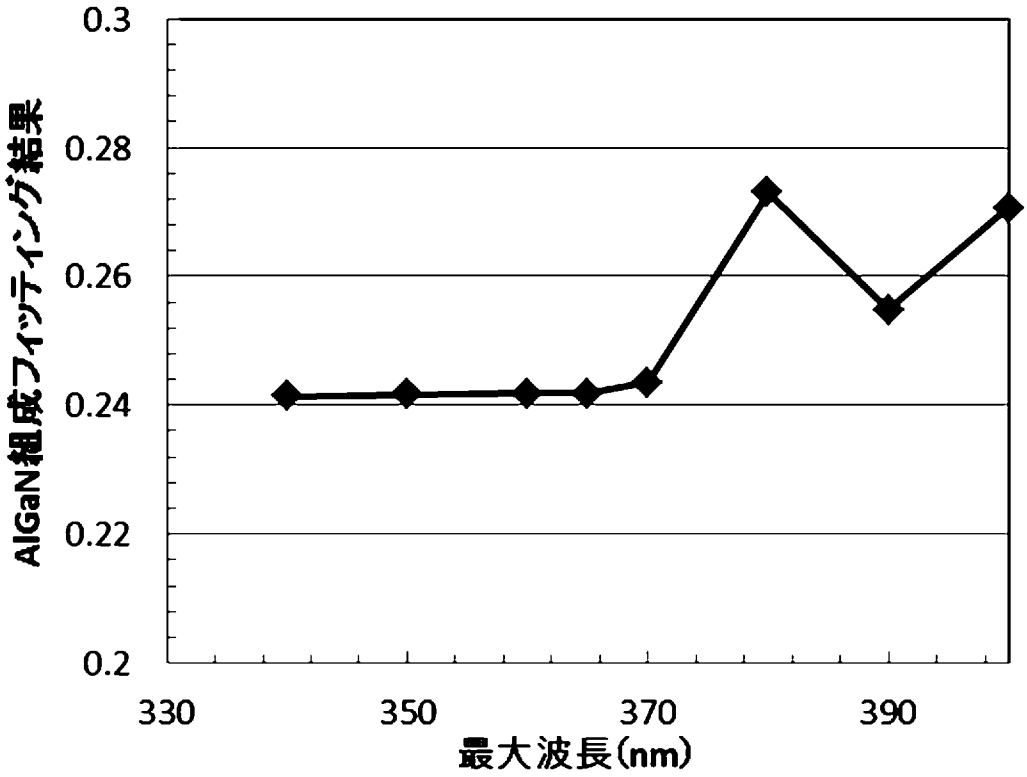
[図9]


200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
MSE
MSE
330
340
350
360
370
380
390
400
最大波長(nm)

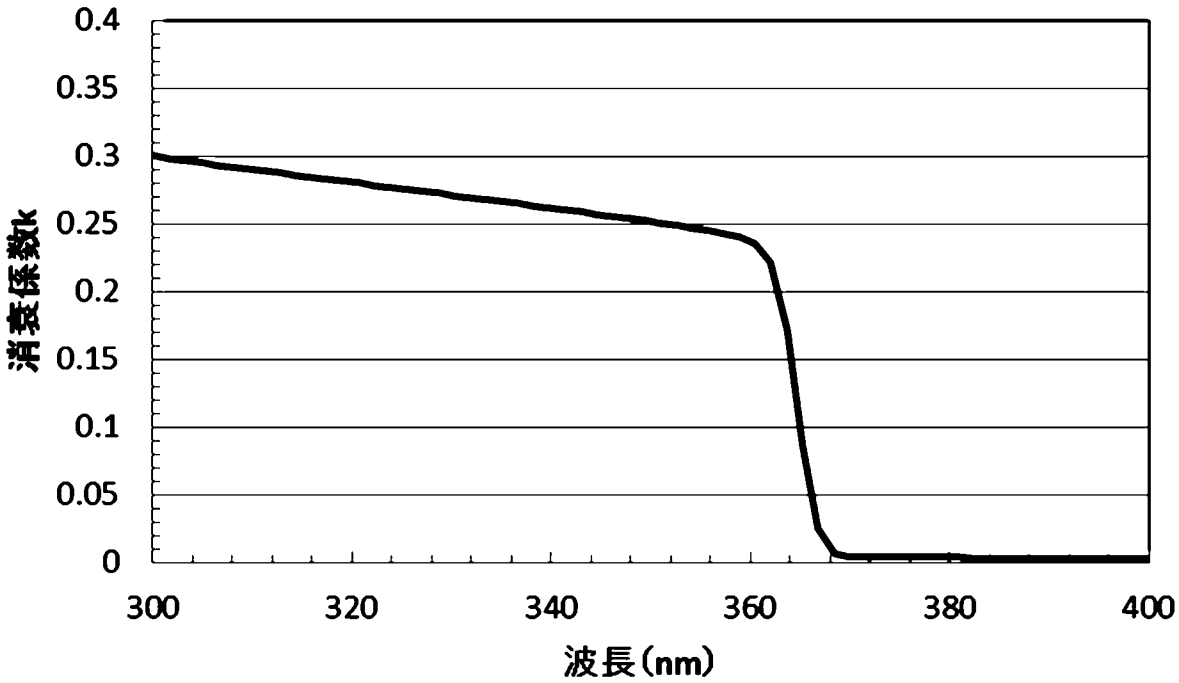
[図10]


100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
AlGaN膜厚フィッティング結果(nm)
330
340
350
360
370
380
390
400
最大波長(nm)

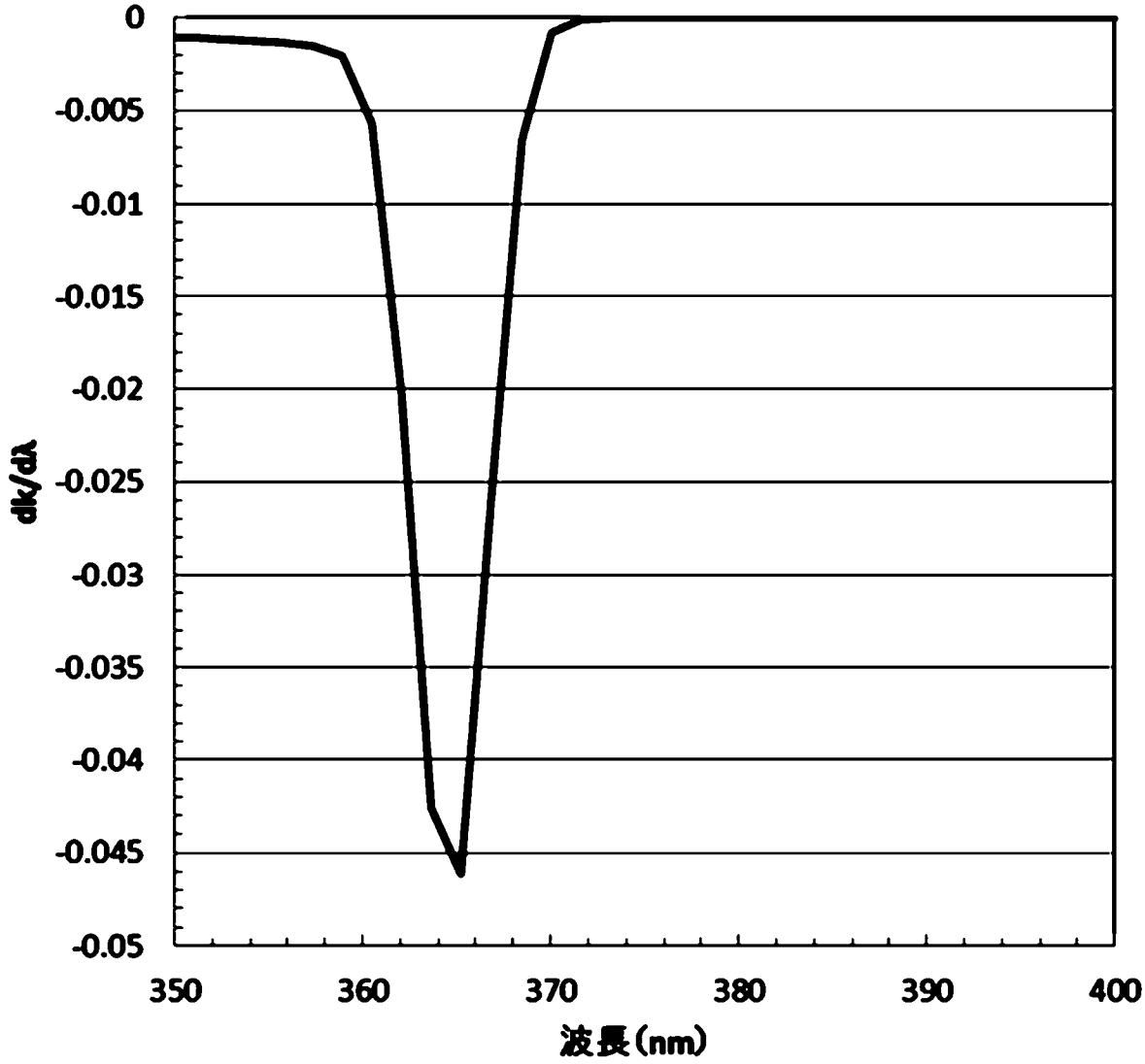
[図11]


0.3
0.28
0.26
0.24
0.22
0.2
AlGaN組成フィッティング結果
330
350
370
390
最大波長(nm)

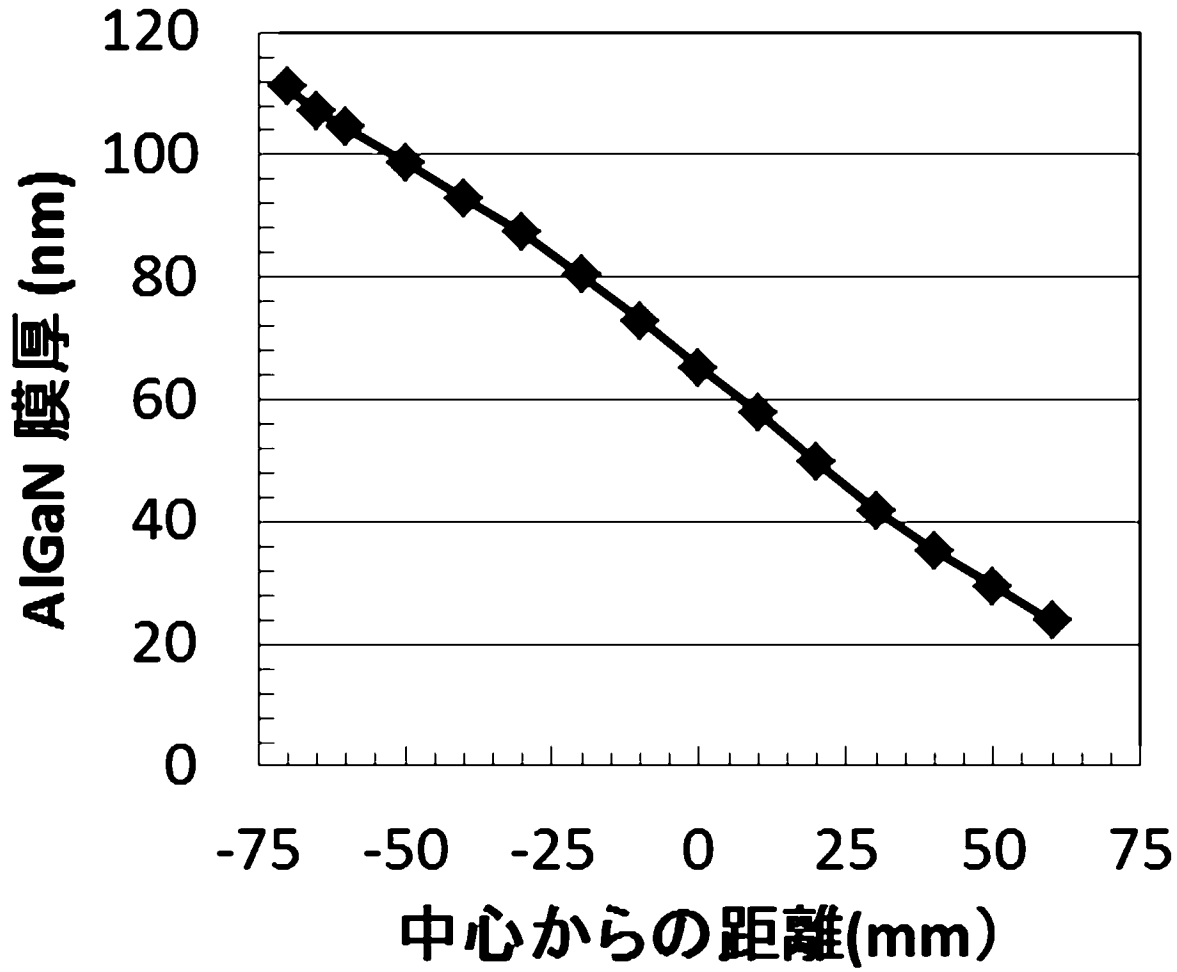
[図12]


0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
消衰係数k
300
320
340
360
380
400
波長(nm)

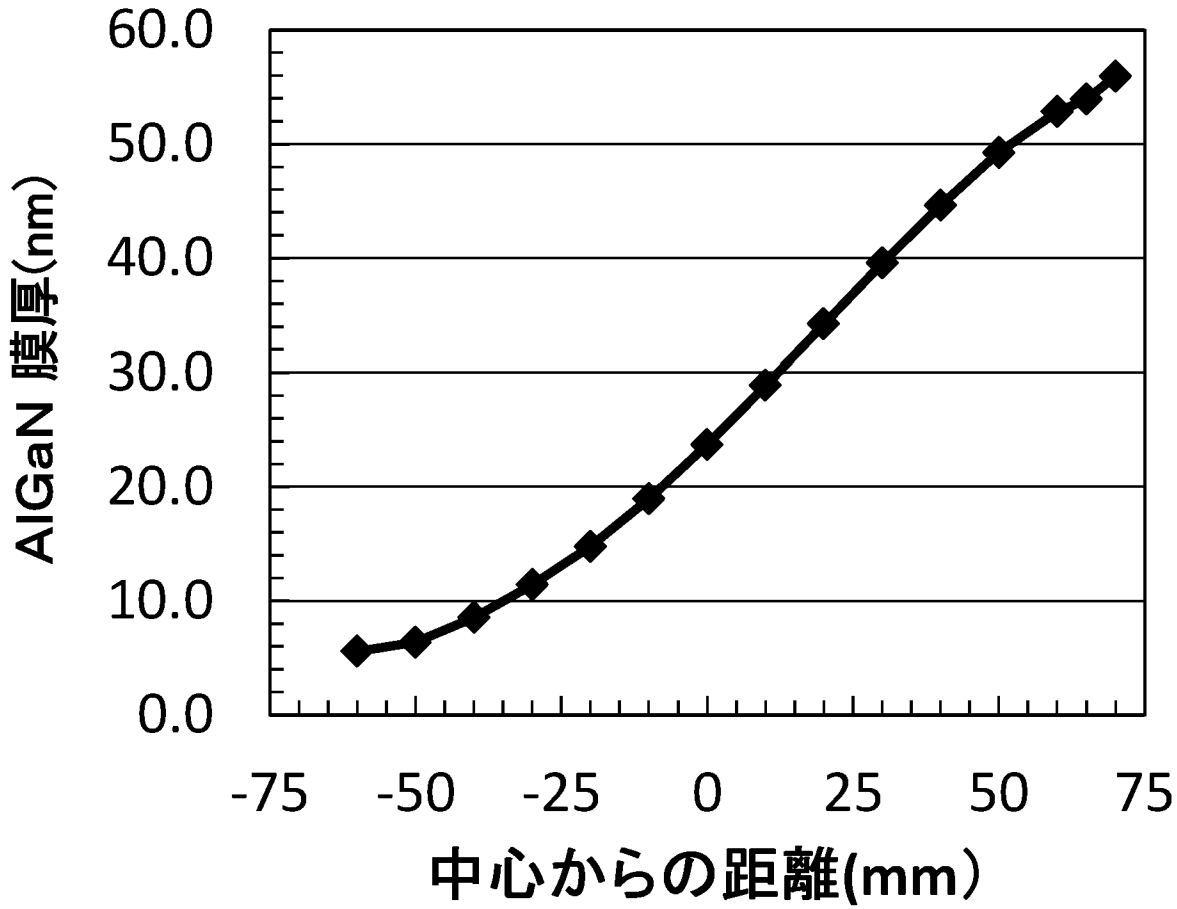
[図13]


0
-0.005
-0.01
-0.015
-0.02
-0.025
-0.03
-0.035
-0.04
-0.045
-0.05
dk/dλ
350
360
370
380
390
400
波長(nm)

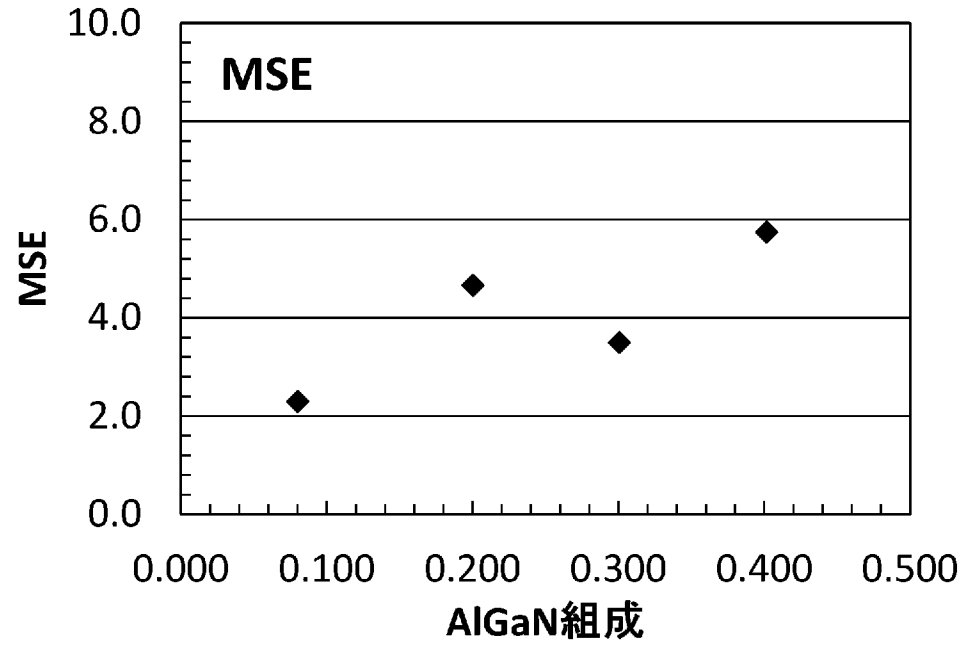
[図14]



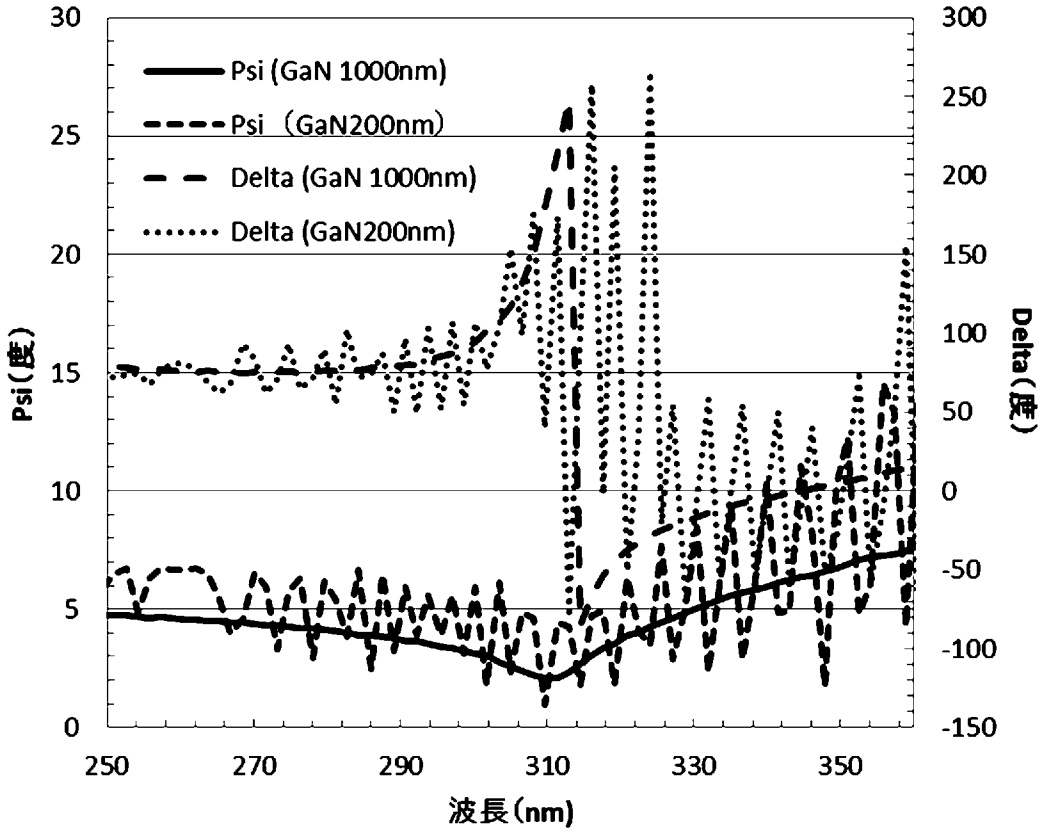
[図15]


60.0
50.0
40.0
30.0
20.0
10.0
0.0
AlGaN 膜厚(nm)
-75
-50
-25
0
25
50
75
中心からの距離(mm)

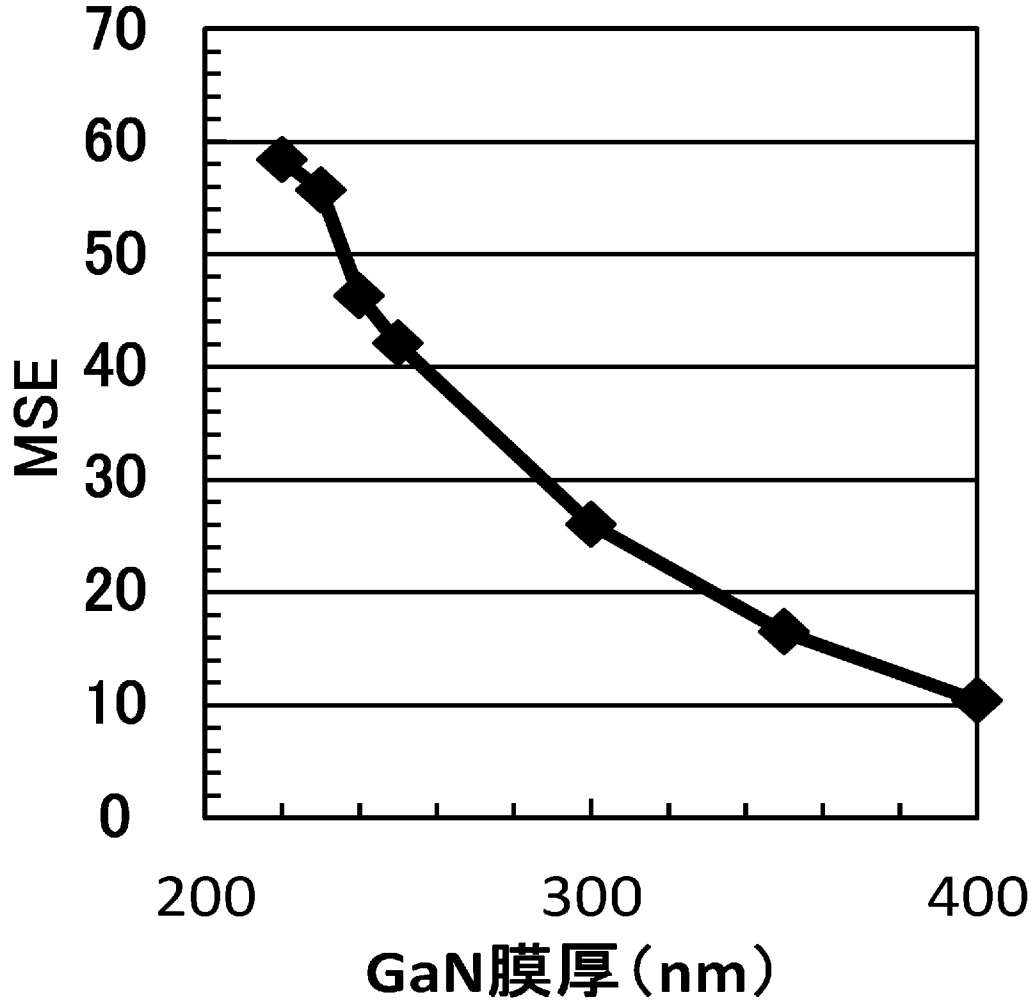
[図16]


MSE
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
MSE
0.000
0.100
0.200
0.300
0.400
0.500
AlGaN組成

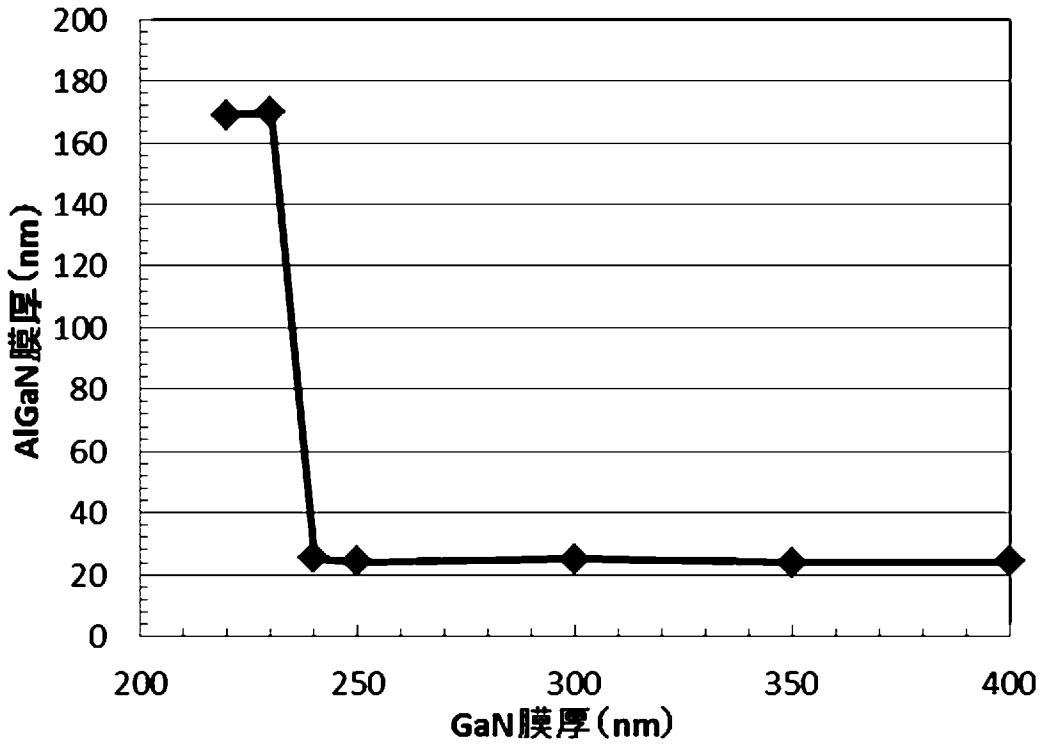
[図17]


Psi (GaN 1000nm)
Psi （GaN200nm）
Delta (GaN 1000nm)
Delta (GaN200nm)
Psi（度）
Delta（度）
波長（nm）
30
25
20
15
10
5
0
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
250
270
290
310
330
350

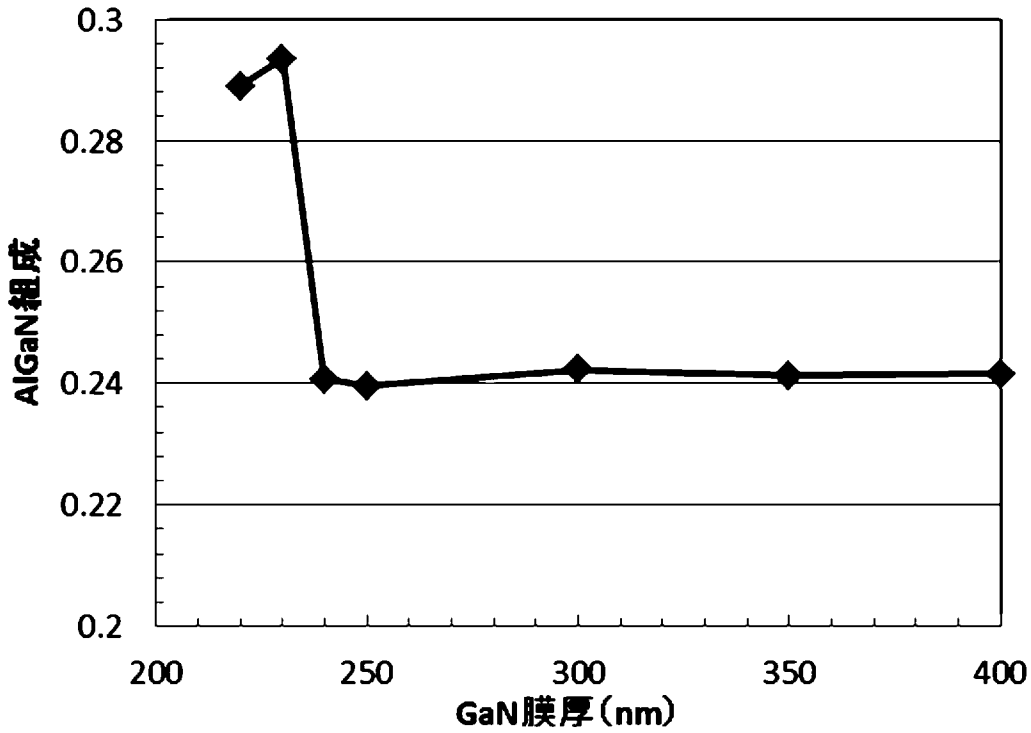
[図18]


70
60
50
40
30
20
10
0
MSE
200
300
400
GaN膜厚（nm）

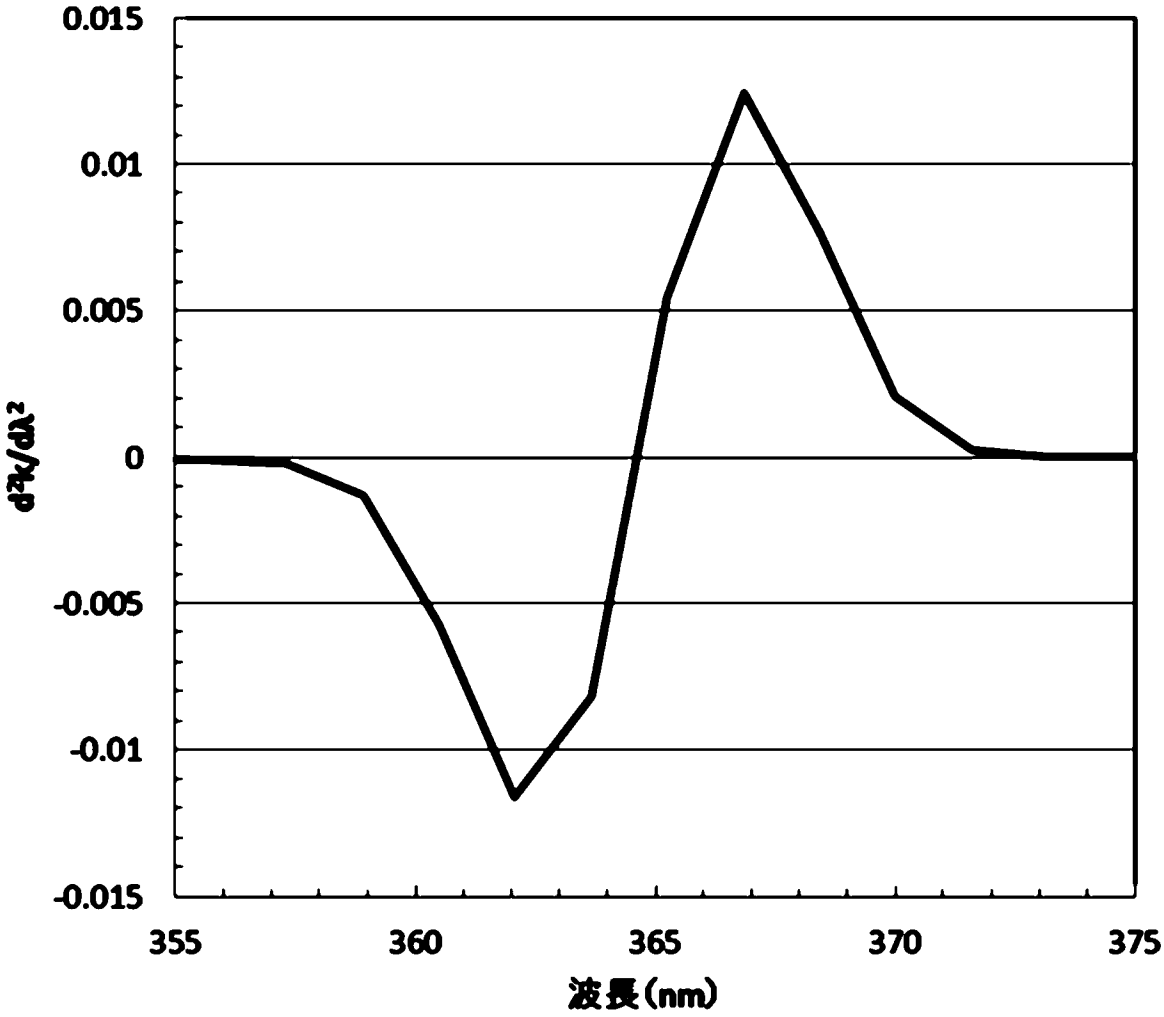
[図19]


200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
AlGaN膜厚（nm）
200
250
300
350
400
GaN膜厚（nm）

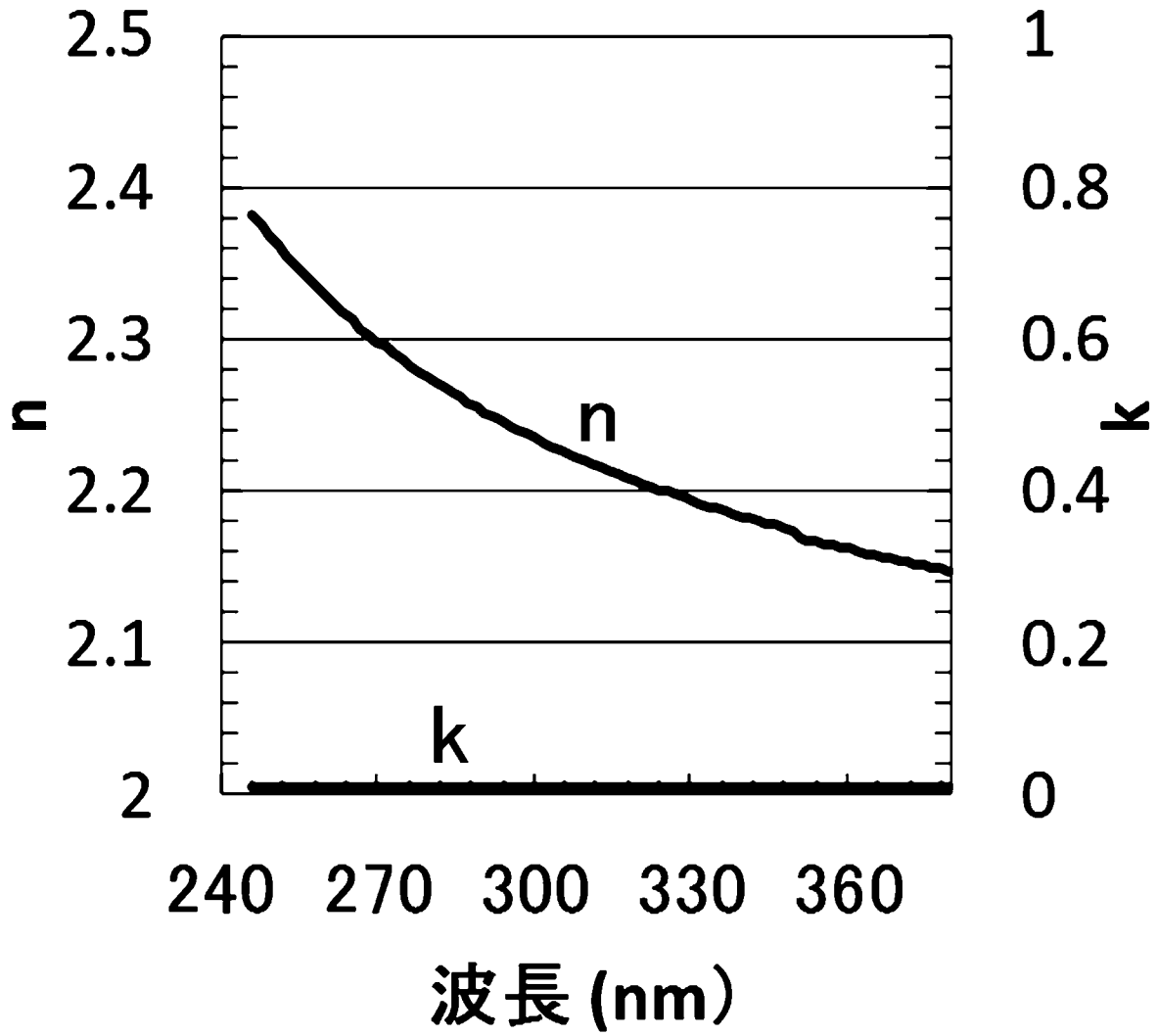
[図20]


0.3
0.28
0.26
0.24
0.22
0.2
AlGaN組成
200
250
300
350
400
GaN膜厚(nm)

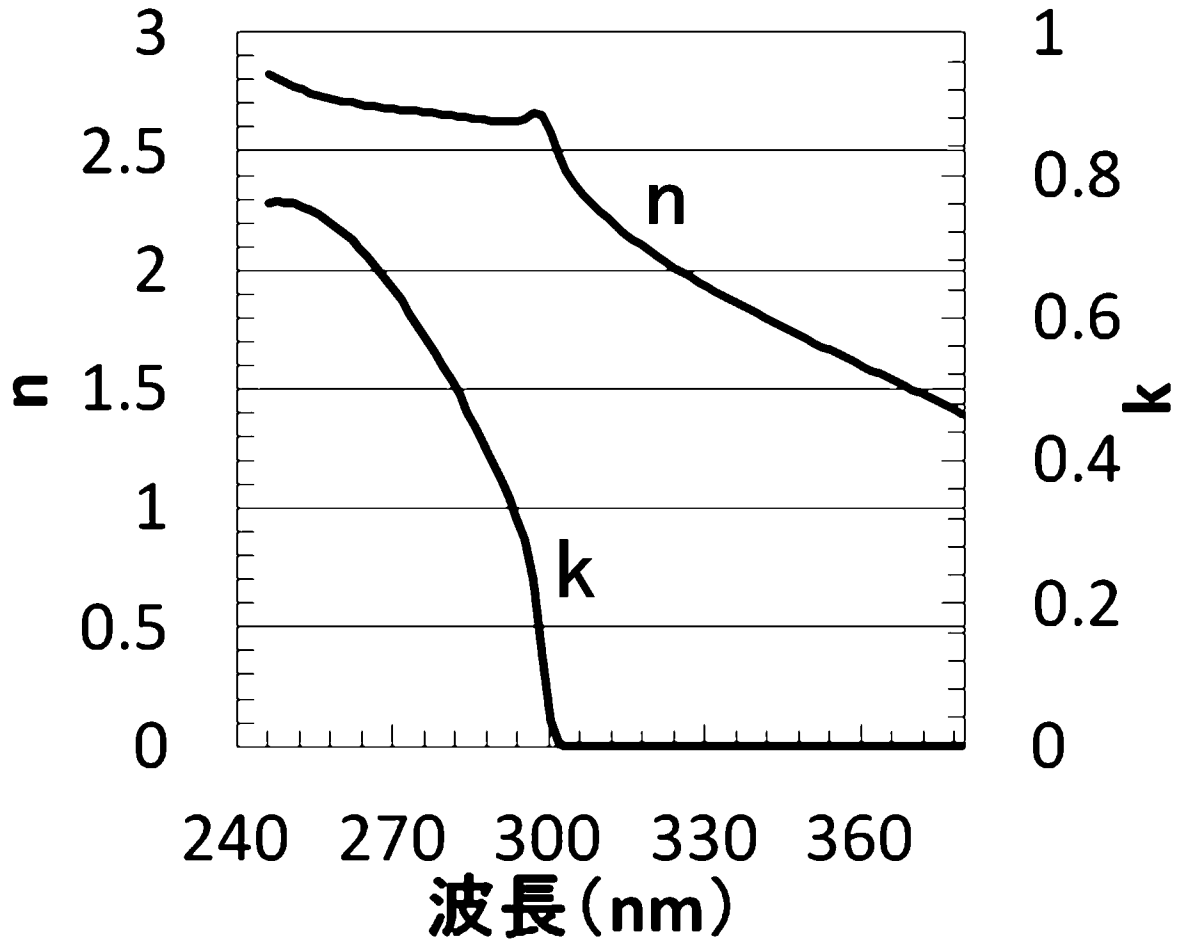
[図21]


0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
-0.015
d²k/dλ²
355
360
365
370
375
波長(nm)

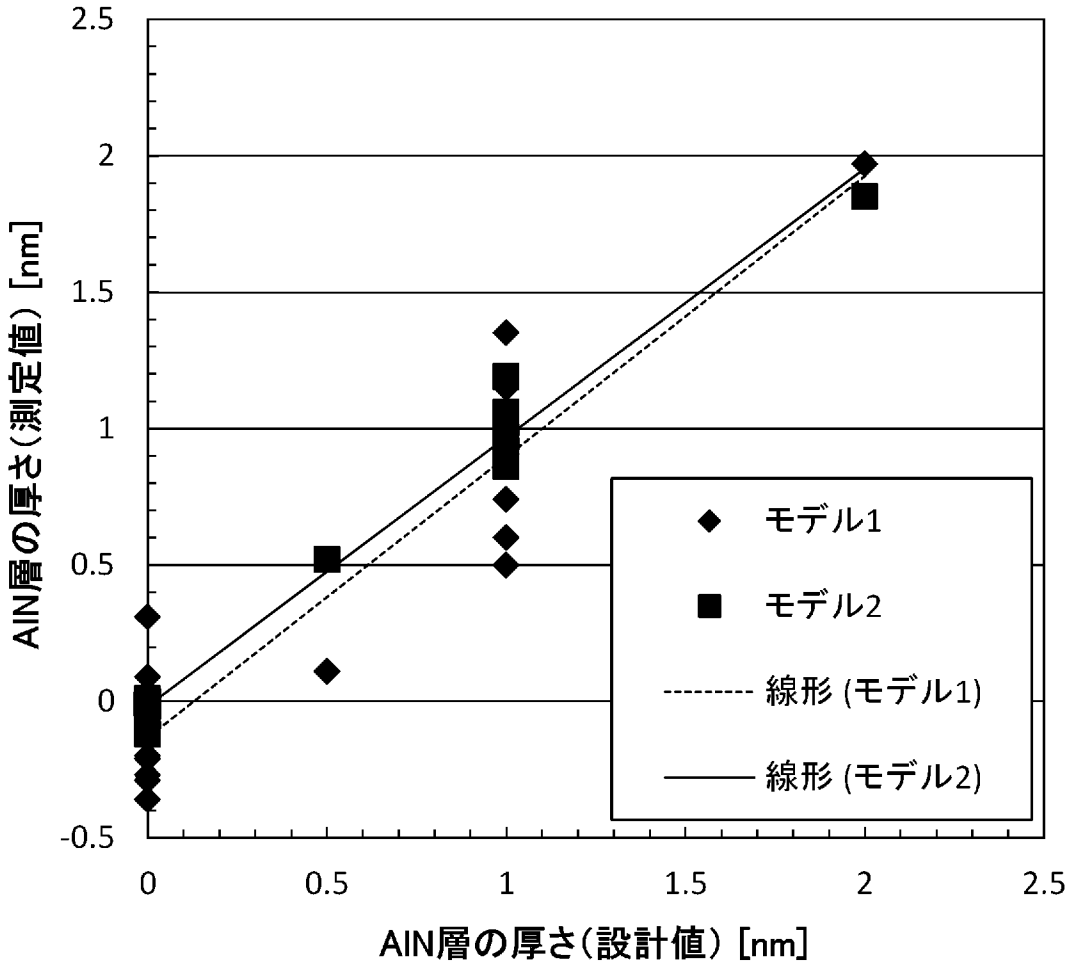
[図22]



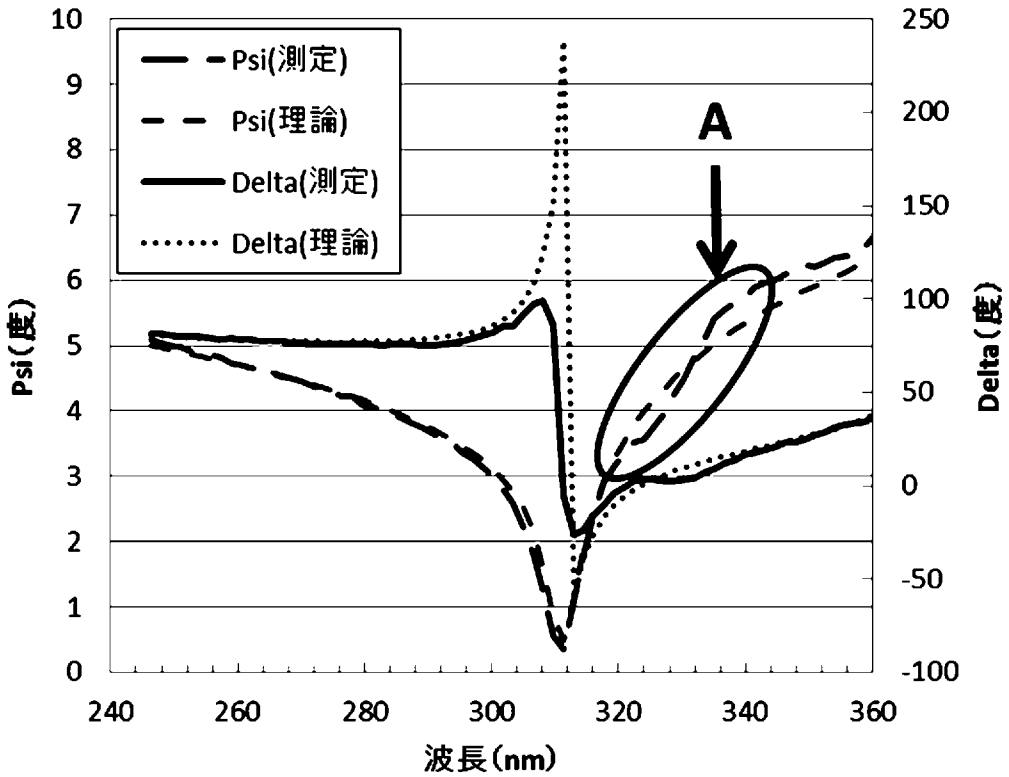
[図23]



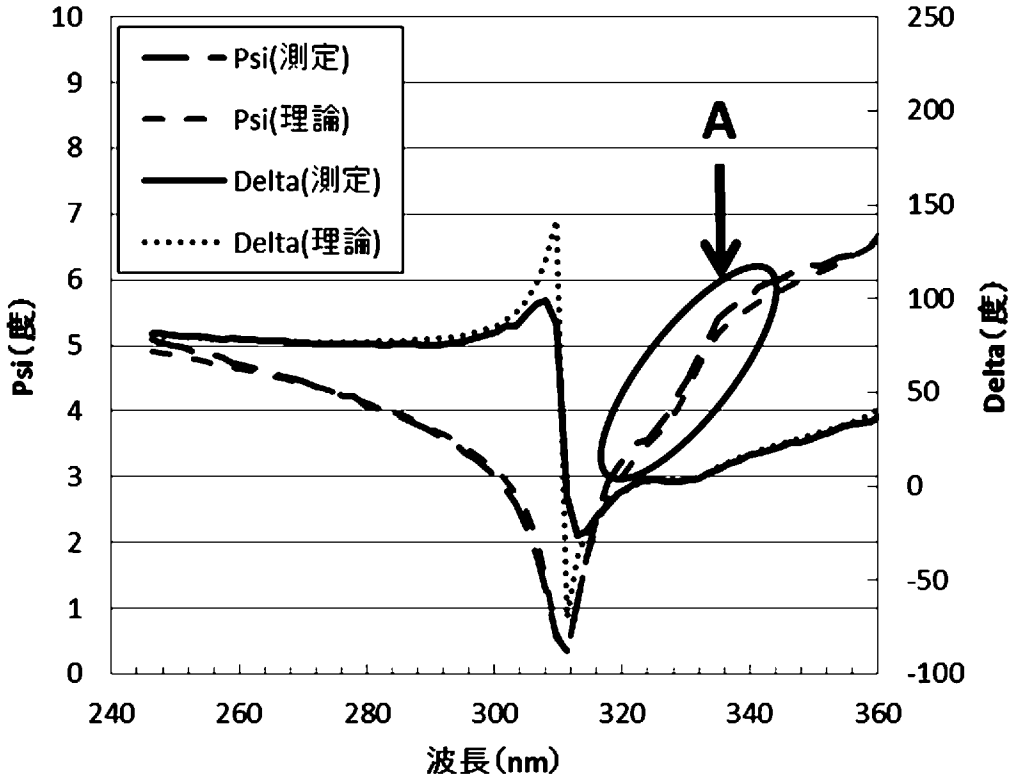
[図24]


2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5
AlN層の厚さ(測定値) [nm]
AlN層の厚さ(設計値) [nm]
モデル1
モデル2
線形 (モデル1)
線形 (モデル2)

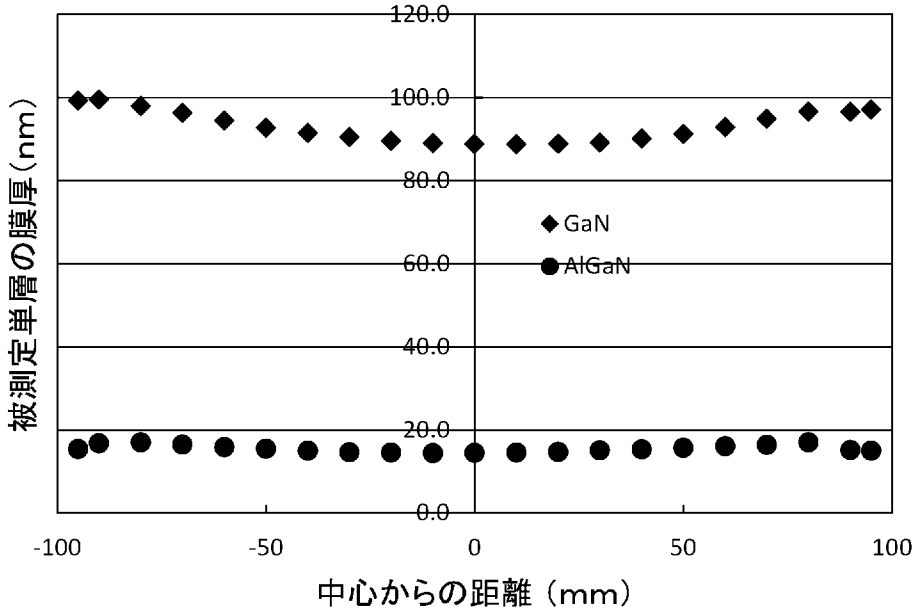
[図25]


Psi(測定)
Psi(理論)
Delta(測定)
Delta(理論)
A
Psi(度)
Delta(度)
波長(nm)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
250
200
150
100
50
0
-50
-100
240
260
280
300
320
340
360

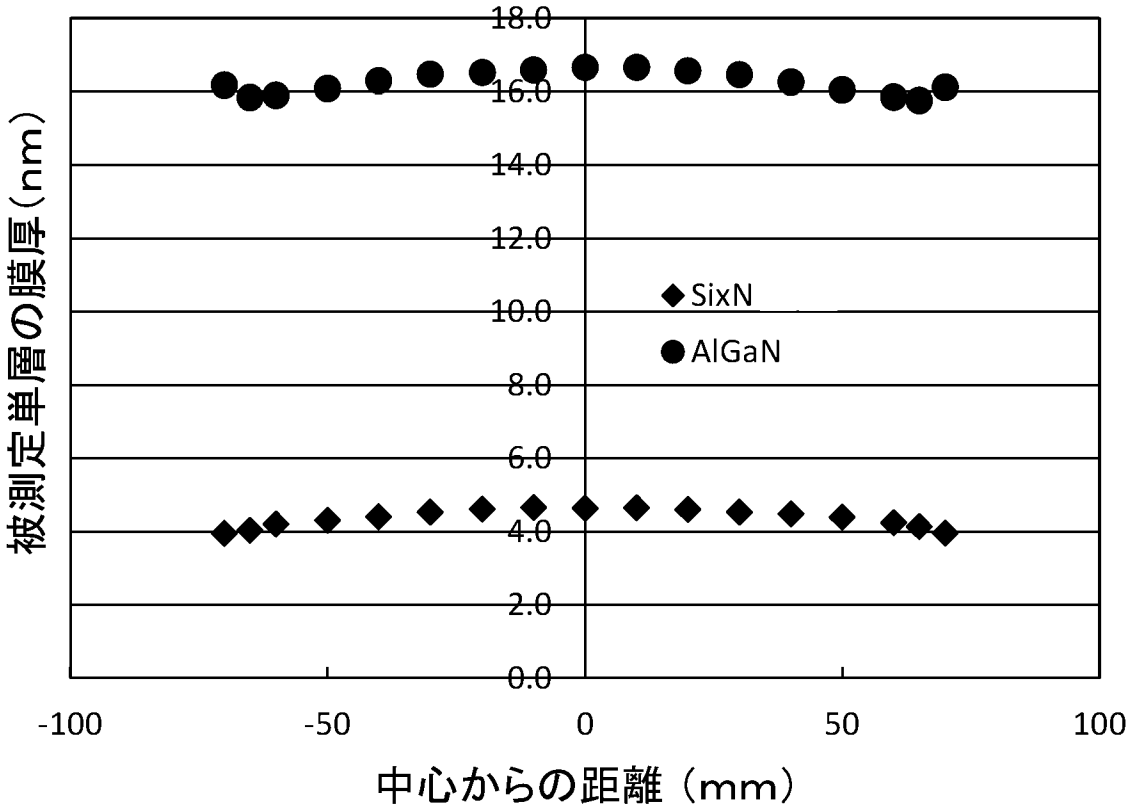
[図26]


Psi(測定)
Psi(理論)
Delta(測定)
Delta(理論)
A
Psi(度)
Delta(度)
波長(nm)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
250
200
150
100
50
0
-50
-100
240
260
280
300
320
340
360

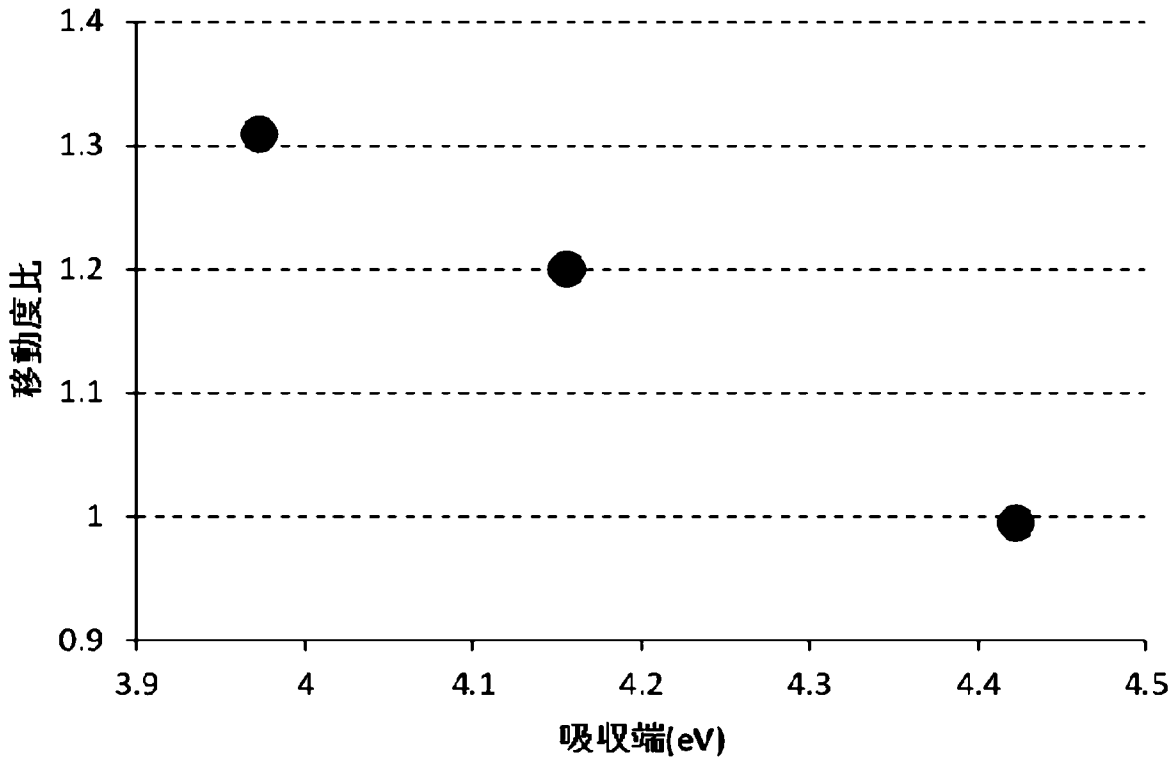
[図27]


被測定単層の膜厚(nm)
GaN
AlGaN
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
-100
-50
0
50
100
中心からの距離 (mm)

[図28]


18.0
16.0
14.0
12.0
10.0
8.0
6.0
4.0
2.0
0.0
SixN
AlGaN
被測定単層の膜厚（nm）
-100
-50
0
50
100
中心からの距離（mm）

[図29]


1.4
1.3
1.2
1.1
1
0.9
移動度比
3.9
4
4.1
4.2
4.3
4.4
4.5
吸収端(eV)

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2016/059699

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
*G01N21/21*(2006.01)i, *G01B11/06*(2006.01)i, *G01N21/27*(2006.01)i, *H01L21/66*(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01N21/00-G01N21/01, G01J3/00-G01J4/04, G01N21/17-G01N21/61, G01J7/00-G01J9/04, G01B11/00-G01B11/30, H01L21/64-H01L21/66

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

| | | | |
|---|---|---|---|
| Jitsuyo Shinan Koho | 1922-1996 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2016 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2016 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2016 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JSTPlus(JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| X<br>A | JP 2014-90033 A (Fujitsu Ltd.),<br>15 May 2014 (15.05.2014),<br>paragraphs [0019], [0025]; fig. 3<br>(Family: none) | 31-32,35-39,<br>43-47<br>1-30 |
| X<br>A | WO 2014/024310 A1 (NGK Insulators, Ltd.),<br>13 February 2014 (13.02.2014),<br>paragraphs [0038] to [0048]; fig. 1<br>& US 2014/0042451 A1<br>paragraphs [0043] to [0053]; fig. 1<br>& EP 2720257 A1 | 31-33,35,39,<br>43-47<br>1-30 |
| X<br>A | JP 2013-207274 A (Fujitsu Ltd.),<br>07 October 2013 (07.10.2013),<br>paragraph [0023]; fig. 3<br>& US 2013/0256686 A1<br>paragraph [0047]; fig. 3 | 31-32,40-45,<br>47<br>1-30 |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

| Date of the actual completion of the international search | Date of mailing of the international search report |
|---|---|
| 02 June 2016 (02.06.16) | 14 June 2016 (14.06.16) |

| Name and mailing address of the ISA/ | Authorized officer |
|---|---|
| Japan Patent Office<br>3-4-3,Kasumigaseki,Chiyoda-ku,<br>Tokyo 100-8915,Japan | Telephone No. |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.
PCT/JP2016/059699

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages | Relevant to claim No. |
|---|---|---|
| X<br>A | JP 2014-110311 A (The Furukawa Electric Co., Ltd.),<br>12 June 2014 (12.06.2014),<br>paragraphs [0024] to [0025], [0045]; fig. 1<br>(Family: none) | 31-32,40-45,<br>47<br>1-30 |
| X<br>A | JP 2014-140024 A (Nichia Chemical Industries, Ltd.),<br>31 July 2014 (31.07.2014),<br>paragraphs [0043], [0057]; fig. 1<br>& US 2014/0175455 A1<br>paragraphs [0088], [0115]; fig. 1<br>& EP 2747145 A2 | 31-37,39,<br>43-47<br>1-30 |
| X<br>A | JP 2014-236017 A (The Furukawa Electric Co., Ltd.),<br>15 December 2014 (15.12.2014),<br>paragraphs [0025], [0067]; fig. 1<br>(Family: none) | 31-33,35-39,<br>46-47<br>1-30 |
| X<br>A | JP 2006-349374 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.),<br>28 December 2006 (28.12.2006),<br>fig. 2<br>& US 2006/0281201 A1<br>fig. 2<br>& EP 1734357 A2 | 48<br>1-30 |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.
PCT/JP2016/059699

**Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)**

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

**Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)**

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:
See extra sheet.

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☒ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:

4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

**Remark on Protest**

☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.

☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.

☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

Continuation of Box No.III of continuation of first sheet(2)

(Invention 1) claims 1-30

Claims 1-30 have a special technical feature of "comprising: a step for applying incident light including light with a wavelength shorter than a threshold wavelength to the surface of a multilayer substrate on the side on which a layer to be measured is located, measuring reflected light from the multilayer substrate of the incident light, and thereby acquiring 2n (where n is the number of the single layers to be measured included in the layer to be measured, and an integer of 1 or more) or more reflected light-related values independent of each other at wavelengths shorter than the threshold wavelength; and a step for, using the 2n or more reflected light-related values, calculating, regarding the respective single layers to be measured included in the layer to be measured, values relating to the single layers to be measured, wherein used as the threshold wavelength is a maximum wavelength in a wavelength range in which the absolute value of a first order differential $dk(\lambda)/d\lambda$ when an extinction coefficient k of the absorption layer is represented as a function $k(\lambda)$ of a wavelength $\lambda$ (the unit thereof is nm) becomes an extinction differential threshold value or less". Therefore, claims 1-30 are classified as Invention 1.

(Invention 2) claims 31-47

Claims 31-47 share, with claim 1 classified as invention 1, a common technical feature of "a multilayer substrate comprising a base substrate, a layer to be measured, and an absorption layer located between the base substrate and the layer to be measured".

However, the above-said technical feature cannot be considered to be a special technical feature, since the technical feature does not make a contribution over the prior art in the light of the contents disclosed in the document 1 and so on.

Further, these inventions additionally include a formally common statement "… applicable to a measurement method for applying incident light including light with a wavelength shorter than a threshold wavelength to the surface thereof on the side on which a layer to be measured including a single layer to be measured or a laminated layer to be measured in which a plurality of single layers to be measured are laminated is located, measuring reflected light of the incident light, and thereby acquiring two or more reflected light-related values independent of each other at wavelengths shorter than the threshold wavelength, using 2n (where n is the number of the single layers to be measured included in the layer to be measured, and an integer of 1 or more) or more reflected light-related values, calculating, regarding the respective single layers to be measured included in the layer to be measured, values relating to the signal layers to be measured, wherein …, and used as the threshold wavelength in the measurement method is a maximum wavelength in a wavelength range in which the absolute value of a first order differential $dk(\lambda)/d\lambda$ when an extinction coefficient k of the absorption layer is represented as a function $k(\lambda)$ of a wavelength $\lambda$ (the unit thereof is nm) becomes an extinction differential threshold value or less".

However, the structure, function, and the like of the "multilayer substrate" in claims 31-47 are not specified at all by the above statement, and this statement has no meaning for specifying the "multilayer substrate" and cannot be considered as a special technical feature that is the same as or corresponding to claim 1.

Further, claims 31-47 are not dependent on claim 1.

(Continued to next extra sheet)

Further, claims 31-47 have no relationship such that these claims are substantially same as or equivalent to any claim classified into Invention 1.

Consequently, claims 31-47 cannot be classified into Invention 1.

Accordingly, claims 31-47 are classified into Invention 2.

(Invention 3) claim 48

Claim 48 shares with claim 1 classified as invention 1 a common technical feature of "measuring a multilayer substrate by reflected light".

However, the above-said technical feature cannot be considered to be a special technical feature, since the technical feature does not make a contribution over the prior art in the light of the contents disclosed in the document 7.

Further, claim 48 includes the statement "applicable to a measurement method set forth in any one of claim 1 to claim 30". However, the structure, function, and the like of the "measurement device" are not specified at all by the above statement, and this statement has no meaning for specifying the "measurement device", and cannot be considered as a special technical feature that is the same as or corresponding to claim 1.

Further, there is no same or corresponding special technical feature between claim 48 and claim 31 classified into Invention 2.

In addition, claim 48 is not dependent on claims 1 and 31.

Further, claim 48 has no relationship such that said claim 48 is substantially same as or equivalent to any claim classified into Invention 1 or 2.

Consequently, claim 48 cannot be classified into either Invention 1 or Invention 2.

Accordingly, claim 48 is classified into Invention 3.

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１６／０５９６９９

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01N21/21(2006.01)i, G01B11/06(2006.01)i, G01N21/27(2006.01)i, H01L21/66(2006.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01N21/00-G01N21/01, G01J 3/00-G01J 4/04,
G01N21/17-G01N21/61, G01J 7/00-G01J 9/04,
G01B11/00-G01B11/30, H01L21/64-H01L21/66

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

| | |
|---|---|
| 日本国実用新案公報 | １９２２－１９９６年 |
| 日本国公開実用新案公報 | １９７１－２０１６年 |
| 日本国実用新案登録公報 | １９９６－２０１６年 |
| 日本国登録実用新案公報 | １９９４－２０１６年 |

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus（JDreamIII）

Ｃ．　関連すると認められる文献

| 引用文献のカテゴリー＊ | 引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する請求項の番号 |
|---|---|---|
| X | JP 2014-90033 A（富士通株式会社）2014.05.15, ［００１９］,［００２５］, 図３（ファミリーなし） | 31-32,35-39,43-47 |
| A | | 1-30 |
| X | WO 2014/024310 A1（日本碍子株式会社）2014.02.13, ［００３８］－［００４８］, 図１ & US 2014/0042451 A1, ［００４３］－［００５３］, 図１ & EP 2720257 A1 | 31-33,35,39,43-47 |
| A | | 1-30 |

☑　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。　　☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

| 国際調査を完了した日 | 国際調査報告の発送日 |
|---|---|
| ０２．０６．２０１６ | １４．０６．２０１６ |

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
郵便番号１００－８９１５
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

特許庁審査官（権限のある職員）　2W　４００５
比嘉　翔一
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２５８

Ｃ（続き）．　関連すると認められる文献

| 引用文献のカテゴリー＊ | 引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示 | 関連する請求項の番号 |
|---|---|---|
| X | JP 2013-207274 A（富士通株式会社）2013.10.07, ［００２３］, 図３ & US 2013/0256686 A1, ［００４７］, 図３ | 31-32,40-45,47 |
| A | | 1-30 |
| X | JP 2014-110311 A（古河電気工業株式会社）2014.06.12, ［００２４］－［００２５］,［００４５］, 図１（ファミリーなし） | 31-32,40-45,47 |
| A | | 1-30 |
| X | JP 2014-140024 A（日亜化学工業株式会社）2014.07.31, ［００４３］,［００５７］, 図１ & US 2014/0175455 A1, ［００８８］,［０１１５］, 図１ & EP 2747145 A2 | 31-37,39,43-47 |
| A | | 1-30 |
| X | JP 2014-236017 A（古河電気工業株式会社）2014.12.15, ［００２５］,［００６７］, 図１（ファミリーなし） | 31-33,35-39,46-47 |
| A | | 1-30 |
| X | JP 2006-349374 A（住友電気工業株式会社）2006.12.28, 図２ & US 2006/0281201 A1, 図２ & EP 1734357 A2 | 48 |
| A | | 1-30 |

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１６／０５９６９９

第Ⅱ欄　請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第１ページの２の続き）

法第8条第3項（ＰＣＴ17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

１．☐ 請求項 ＿＿＿＿＿＿＿＿ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。
つまり、

２．☐ 請求項 ＿＿＿＿＿＿＿＿ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、

３．☐ 請求項 ＿＿＿＿＿＿＿＿ は、従属請求の範囲であってＰＣＴ規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第Ⅲ欄　発明の単一性が欠如しているときの意見（第１ページの３の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるとこの国際調査機関は認めた。
特別ページ参照。

１．☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求項について作成した。

２．☑ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求項について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。

３．☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求項のみについて作成した。

４．☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったので、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求項について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

☐ 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。

☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。

☐ 追加調査手数料の納付はあったが、異議申立てはなかった。

（発明１）請求項１－３０
請求項１－３０は、「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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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」ことという特別な技術的特徴を有しているので、発明１に区分する。

（発明２）請求項３１－４７
請求項３１－４７は、発明１に区分された請求項１と、「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」という共通の技術的特徴を有している。しかしながら、当該技術的特徴は、文献１等の開示内容に照らして、先行技術に対する貢献をもたらすものではないから、当該技術的特徴は、特別な技術的特徴であるとはいえない。また、これらの発明の間には、他に「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…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λ（単位はｎｍ）の関数ｋ（λ）として表した場合の一回微分ｄｋ（λ）／ｄλ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」という形式的に共通の記載があるが、当該記載によって請求項３１－４７の「積層基板」の構造、機能等が何ら特定されるものではなく、上記記載は「積層基板」を特定するための意味を有さず、請求項１と同一の又は対応する特別な技術的特徴とはいえない。
さらに、請求項３１－４７は、請求項１の従属請求項ではない。また、請求項３１－４７は、発明１に区分されたいずれの請求項に対しても実質同一又はそれに準ずる関係にはない。
したがって、請求項３１－４７は発明１に区分できない。
そこで、請求項３１－４７は、発明２に区分する。

（発明３）請求項４８
請求項４８は、発明１に区分された請求項１と「積層基板を反射光により測定する」という共通の技術的特徴を有している。しかしながら、当該技術的特徴は、文献７の開示内容に照らして、先行技術に対する貢献をもたらすものではないから、当該技術的特徴は、特別な技術的特徴であるとはいえない。また、請求項４８には、「請求項１から請求項３０の何れか一項に記載の測定方法に適用可能」との記載があるが当該記載によって「測定装置」の構造、機能等が何ら特定されるものではなく、上記記載は「測定装置」を特定するための意味を有さず、請求項１と同一の又は対応する特別な技術的特徴とはいえない。また、発明２に区分された請求項３１との間で同一の又は対応する特別な技術的特徴は存在しない。
さらに、請求項４８は、請求項１及び３１の従属請求項ではない。また、請求項４８は、発明１又は２に区分されたいずれの請求項に対しても実質同一又はそれに準ずる関係にはない。
したがって、請求項４８は発明１又は２のいずれにも区分できない。
そこで、請求項４８は、発明３に区分する。