

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4777003号  
(P4777003)

(45) 発行日 平成23年9月21日(2011.9.21)

(24) 登録日 平成23年7月8日(2011.7.8)

(51) Int. Cl. F I  
H O 1 L 21/66 (2006.01) H O 1 L 21/66 L

請求項の数 6 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2005-218329 (P2005-218329)	(73) 特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(22) 出願日	平成17年7月28日(2005.7.28)	(74) 代理人	100101454 弁理士 山田 卓二
(65) 公開番号	特開2007-35991 (P2007-35991A)	(74) 代理人	100081422 弁理士 田中 光雄
(43) 公開日	平成19年2月8日(2007.2.8)	(74) 代理人	100100479 弁理士 竹内 三喜夫
審査請求日	平成20年6月6日(2008.6.6)	(72) 発明者	竹内 日出雄 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内
		(72) 発明者	山本 佳嗣 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体層の検査方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板上に形成された半導体層に光を照射するステップと、  
光照射によって半導体層で発生する励起子に特有な反射スペクトルを計測するステップと、

該光学スペクトルのブロードニングファクターを解析することによって、半導体層の表面状態を評価するステップとを含むことを特徴とする半導体層の検査方法。

【請求項 2】

任意の表面状態における屈折率関数を、材料固有の屈折率関数と分布関数との重畳による計算モデルで表現して、前記ブロードニングファクターを定量化することを特徴とする請求項 1 記載の半導体層の検査方法。

【請求項 3】

検査対象となる半導体層は、窒化物半導体で形成されていることを特徴とする請求項 1 または 2 記載の半導体層の検査方法。

【請求項 4】

検査対象となる半導体層が形成された試料を保持するための試料台と、  
半導体層に向けて光を照射するための光源と、  
光照射によって半導体層で発生する励起子に特有な反射スペクトルを計測するためのスペクトル計測装置と、

該光学スペクトルのブロードニングファクターを解析することによって、半導体層の表

面状態を評価するためのスペクトル解析装置とを備えることを特徴とする半導体層の検査装置。

【請求項 5】

試料からの反射光の光路ずれを検出するための光路検出装置と、  
該光路検出装置で検出された光路ずれに基づいて、試料台の位置または角度を調整するための試料台調整機構とを備えることを特徴とする請求項 4 記載の半導体層の検査装置。

【請求項 6】

光路検出装置は、試料からの反射光の一部を取り出すための分割光学素子と、  
分割光学素子によって取り出された光の位置を検出するための光位置検出器とを含むことを特徴とする請求項 5 記載の半導体層の検査装置。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、基板上に形成された半導体層の検査方法および装置に関する。

【背景技術】

【0002】

窒化ガリウム GaN、窒化アルミニウム AlN、窒化インジウム InN など、組成式  $A_{1-x-y}I_nB_xC_yN$  ( $0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$ 、 $x + y < 1$ ) で表現される混晶の総称である窒化物半導体は、一般に機械的に堅牢でかつ化学的にも安定であり、熱伝導率も高く放熱性に優れている。こうした窒化物半導体を用いた半導体素子、例えば、AlGaN 層 / GaN 層を組み合わせた高電子移動度トランジスタ (HEMT: high electron mobility transistor) や InGaN 層 / GaN 層を組み合わせたレーザダイオード (LD: laser diode) は、高出力素子として期待されている。

20

【0003】

一方、窒化物半導体の融点は非常に高い。例えば、AlN の融点は 3273 K (ケルビン)、GaN の融点は 2000 K 以上、InN の融点は 1373 K である (文献: 酒井士郎、III 族窒化物半導体、赤崎勇編、第 1 章、培風館、1999 年)。そのため、高い結晶性を有する窒化物半導体層の成長は比較的困難である。事実、成長条件の微妙な違いによって、窒化物半導体層の表面に nm オーダーのクラックが発生することが知られている。こうしたクラックは、HEMT 素子でのゲートリーク電流の増大やパルス応答特性の劣化をもたらす要因となる。従って、クラック密度の定量的評価は、窒化物半導体素子の製造において極めて重要である。

30

【0004】

従来、クラック密度などの表面状態の定量的評価は、主に原子間力顕微鏡 (AFM: atomic force microscope) を用いて行われてきた。AFM は、カンチレバーの先端に固定された探針と試料表面の原子との間の原子間力に応じてカンチレバーが変位する際、カンチレバーからの反射光を計測することによってカンチレバーの変位を測定する。そして、カンチレバーまたは試料を走査して、探針の変位が一定になるようにカンチレバーまたは試料を上下方向に移動させる。その際の制御信号を画像に変換することによって、試料の表面状態 (凹凸の様子) を原子オーダーで測定することができる。

40

【0005】

こうした AFM には表面状態を直接に評価できるという利点があるが、データ取得時のスループットが低く、AFM 装置自体も極めて高価であり、量産ラインへの導入には不向きである。

【0006】

その他、表面状態を直接に評価できる手法として、走査型トンネル顕微鏡 (STM: scanning tunneling microscope)、ケルビンフォース顕微鏡 (KFM: Kelvin force microscope) が知られているが、いずれも AFM と同じような問題点がある。

【0007】

従って、比較的簡単な構成で、半導体層の表面状態を短時間で敏感に測定できる手法が

50

要望されている。

【 0 0 0 8 】

半導体層で発生するクラックは、表面の結晶性に大きな影響を与える。それゆえ半導体層の物理的パラメータの中で、結晶性に対して比較的敏感なパラメータを測定することによって、半導体層の表面状態を間接的に評価することが可能である。

【 0 0 0 9 】

こうした結晶性に対して敏感なパラメータの中で一般に利用されているパラメータは、X線回折パターンの半値幅である。この半値幅は、半導体層の結晶性が低下するにつれて大きくなる性質があり、測定も比較的容易であることから、種々の半導体層を成膜させる前のバルク結晶の段階で結晶性評価によく利用されている。

10

【 0 0 1 0 】

しかしながら、X線回折パターンは結晶表面だけでなく結晶内部の状態も反映してしまうことから、その半値幅の変化は結晶内部の状態変化に大きく左右され、結晶表面の状態変化に対してそれほど敏感ではない。

【 0 0 1 1 】

【特許文献1】特開平2 - 307046号公報

【特許文献2】特開平7 - 92236号公報

【特許文献3】特開2003 - 224171号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

20

【 0 0 1 2 】

上述のようにX線回折パターンの半値幅は、結晶表面だけでなく結晶内部の状態変化を反映した物理量であることから、結晶表面の状態のみを評価するには不向きである。また、異なる組成を有する複数の半導体層が基板上に積層されている場合、X線回折パターンは全ての半導体層の結晶状態および基板の結晶状態を反映してしまうことから、特定の半導体層に関する情報のみを峻別することが困難である。

【 0 0 1 3 】

本発明の目的は、半導体層の表面状態を短時間で精度良く測定できる半導体層の検査方法および装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

30

【 0 0 1 4 】

本発明に係る半導体層の検査方法は、基板上に形成された半導体層に光を照射するステップと、

光照射によって半導体層で発生する励起子に特有な反射スペクトルを計測するステップと、

該光学スペクトルのブロードニングファクターを解析することによって、半導体層の表面状態を評価するステップとを含むことを特徴とする。

また、本発明に係る半導体層の検査装置は、検査対象となる半導体層が形成された試料を保持するための試料台と、

半導体層に向けて光を照射するための光源と、

40

光照射によって半導体層で発生する励起子に特有な反射スペクトルを計測するためのスペクトル計測装置と、

該光学スペクトルのブロードニングファクターを解析することによって、半導体層の表面状態を評価するためのスペクトル解析装置とを備えることを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 1 5 】

本発明によれば、光照射によって半導体層で発生する励起子に特有な反射スペクトルを計測する。クラック等の結晶欠陥が少ないと、得られる励起子スペクトルが急峻になり、一方、結晶欠陥が多くなると、励起子スペクトルはブロードになる。従って、励起子スペクトルのブロードニングファクターを解析することによって、半導体層の表面状態を評価

50

することができる。

【0016】

従って、本発明は光学スペクトル解析手法を用いることから、従来のAFM観察法やX線回折パターン法と比べて、データ取得時のスループットが高く、検査装置自体も比較的簡単な構成で済み、量産ラインへの導入も容易である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

実施の形態1.

図1は、本発明に係る表面検査方法の一例を示すフローチャートである。ここでは、典型的な検査試料として、図2に示すように、基板1の上に、順次、緩衝層2、アンドープGaN層3、アンドープAlGaN層4が形成されたHEMTエピタキシャル構造を有する窒化物半導体素子を用いた例について説明する。

【0018】

まず、図1のステップa1において、試料の最上層に位置するアンドープAlGaN層4の表面に対してプローブ光を照射する。次に、ステップa2において、光照射によってアンドープAlGaN層4で発生する励起子に特有な光学反射スペクトルを計測する。

【0019】

反射スペクトル計測方法は、a)プローブ光として単色光を使用し、プローブ光の波長を変化させながら、試料からの反射光の強度変化を計測する方法、b)プローブ光として連続スペクトルの光を使用し、試料からの反射光を分光して反射スペクトルを計測する方法、などが採用できる。

【0020】

反射率の較正は、以下の手順で行われる。まず、既知の反射率 $R_{ref}(\lambda)$ を持つ参照試料、例えば、金属コートミラーを用いて、波長 $\lambda$ に関する反射光強度 $I_{ref}(\lambda)$ を測定する。次に、検査試料について、波長 $\lambda$ に関する反射光強度 $I_{sample}(\lambda)$ を測定する。そして、反射率 = (試料表面で反射した光の強度) / (試料表面に入射した光の強度) の定義により、(試料表面に入射した光の強度)は、 $I_{ref}(\lambda) / R_{ref}(\lambda)$ で与えられる。従って、検査試料の反射率 $R_{sample}(\lambda)$ は、次式(1)で表される。

【0021】

【数1】

$$R_{sample}(\lambda) = \frac{R_{ref}(\lambda) \cdot I_{sample}(\lambda)}{I_{ref}(\lambda)} \quad (1)$$

【0022】

ここで、 $R_{ref}(\lambda)$ は既知であり、 $I_{ref}(\lambda)$ および $I_{sample}(\lambda)$ は実測によって得られることから、コンピュータ等を用いた計算により、検査試料の反射率 $R_{sample}(\lambda)$ を得ることができる。

【0023】

次に、図1のステップa3において、検査試料の反射率スペクトル $R_{sample}(\lambda)$ のブロードニングファクターを解析する。

【0024】

ここで励起子とは、絶縁材料や半導体材料に発生する電子・正孔対の一種であり、特に、窒化物半導体では室温で安定であることが知られている。励起子は、固体内における一種の素励起であり、そのエネルギーに相当するフォトンエネルギー近傍での光学スペクトルにおいて特徴的な構造が見られる。もし試料表面に不均一性が存在すれば、励起子に特有なスペクトルは幅広になり、このスペクトル幅はブロードニングファクターを用いて定量化することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 5 】

試料の不均一性がガウス分布に従うと仮定すれば、アンドープ A l G a N 層 4 の屈折率  $n_{AlGaN}$  ( ) は、現象論的に次式 ( 2 ) で定義することが可能である。

【 0 0 2 6 】

【数 2】

$$n_{AlGaN}(\lambda) \equiv \frac{\int n_{AlGaN}(\lambda') \cdot \exp\left(-(\lambda' - \lambda)^2 / 2\sigma^2\right) d\lambda'}{\int \exp\left(-(\lambda' - \lambda)^2 / 2\sigma^2\right) d\lambda'} \quad (2)$$

【 0 0 2 7 】

この式 ( 2 ) は、任意の表面状態における屈折率関数を、材料固有の屈折率関数 (ここでは、 $n_{AlGaN}$  ( ) に相当) と分布関数 (ここでは、ガウス分布) との重畳による計算モデルで表現したものである。この計算モデルにおいて、ガウス分布の標準偏差  $\sigma$  がブロードニングファクターに相当するパラメータである。

【 0 0 2 8 】

次に、試料の屈折率  $n$  ( ) が与えられれば、例えば、伝達マトリックス法などの種々の反射スペクトル計算モデルを用いて、反射率スペクトル  $R$  ( ) は簡単に求めることができる。簡単な例として、アンドープ G a N 層 3 が十分に厚く、アンドープ A l G a N 層 4 内での干渉効果のみを考慮すれば足りる場合、アンドープ A l G a N 層 4 での励起子エネルギー近傍における反射率スペクトルは、次式 ( 3 ) で表される。

【 0 0 2 9 】

【数 3】

$$R(\lambda) = \left| \frac{n_{Air} - n_{AlGaN}}{n_{Air} + n_{AlGaN}} + \frac{4e^{2i\delta} n_{Air} n_{AlGaN} (n_{AlGaN} - n_{GaN})}{(n_{Air} + n_{AlGaN})^2 (n_{AlGaN} + n_{GaN})} \right|^2 \quad (3)$$

【 0 0 3 0 】

ここで、 $n_{Air}$  ( = 1 ) と  $n_{GaN}$  は、それぞれ空気と G a N の屈折率である。物理量は、干渉を引き起こす 2 つの光、即ち、アンドープ A l G a N 層 4 の最上面で反射した光と A l G a N / G a N 界面で反射した光との間の位相差であり、次式 ( 4 ) で表される。

【 0 0 3 1 】

【数 4】

$$\delta = \frac{4\pi \cdot n_{AlGaN}}{\lambda} \cdot d_{AlGaN} \cdot \cos\theta_{ref} \quad (4)$$

【 0 0 3 2 】

そこで、上記式 ( 2 ) とこれまでに知られている式 ( 3 ) ( 4 ) を用いて、反射スペクトルを解析することにより、ブロードニングファクターを抽出することができる。

【 0 0 3 3 】

次に、図 1 のステップ a 4 において、抽出したブロードニングファクターに基づいて、アンドープ A l G a N 層 4 の表面状態を評価する。式 ( 2 ) の計算モデルを用いた場合、励起子スペクトルが幅広になるほど、ブロードニングファクターとしての標準偏差  $\sigma$  は大きくなり、アンドープ A l G a N 層 4 の表面状態はより不均一であると判断できる。一方、励起子スペクトルが急峻になるほど、ブロードニングファクターとしての標準偏差  $\sigma$  は小さくなり、アンドープ A l G a N 層 4 の表面状態はより均一であると判断できる。

【 0 0 3 4 】

20

30

40

50

図3は、窒化物半導体の反射率スペクトルの一例を示すグラフである。縦軸は反射率(%)で、横軸は波長(nm)である。実線は表面クラック無しの試料を示し、破線は表面クラック有りの試料を示す。

【0035】

励起子スペクトル中心は約320nm付近であり、実線のスペクトルを基準として、破線のスペクトルはより幅広に現れている。各スペクトルのブロードニングファクターは、上述した式(2)~(4)を用いてコンピュータ等で数値計算することが可能である。従って、得られたブロードニングファクターを用いて、試料の表面状態を定量的に評価することが可能である。

【0036】

以上の説明では、検査試料として、窒化物半導体HEMT素子を例示したが、その他の絶縁材料や半導体材料、例えば、Si, Ge, GaAs等を用いたトランジスタ素子、発光素子、受光素子などについても本発明は適用可能である。この場合、材料に固有の励起子スペクトルに応じて、照射する光の波長を適宜選択すればよい。

【0037】

また本発明では、検査試料として、GaN、AlN、InNなど、組成式 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$  ( $0 < x < 1$ ,  $0 < y < 1$ ,  $x + y < 1$ )で表現される混晶の総称である窒化物半導体を用いることが好ましい。その理由は、窒化物半導体はエネルギーバンドギャップが大きく、励起子は室温で安定に存在するため、励起子スペクトルが明瞭となり、表面状態を精度良く評価できるからである。

【0038】

また本実施形態では、試料の励起子スペクトルを反射光学系で計測する方法を説明したが、試料がプローブ光の侵入長に比べ十分薄く、かつ基板がプローブ光に対して透明である場合には、透過光学系を用いて励起子スペクトルを計測することも可能である。

【0039】

実施の形態2.

図4は、本発明に係る表面検査装置の一例を示すブロック図である。表面検査装置は、光源11と、分光器12と、試料台21と、検出器32と、コンピュータ50などで構成される。

【0040】

光源11は、スペクトル計測に必要な波長を含む連続スペクトルの光を発生する。分光器12は、光源11からの連続スペクトルを分光して、単色光のプローブ光を出力する。プローブ光の波長は、コンピュータ50からの制御信号に応じて連続的に変化させることができる。分光器12からのプローブ光は、集光レンズ13によって試料S上で所望のスポット径に集光され、試料Sの計測エリアが規定される。

【0041】

試料台21は、試料Sを保持するものであり、調整機構22によって試料Sの3次元位置(XYZ方向)または3次元角度(ピッチ、ヨー、ロール)が調整可能である。調整機構22は、手動で動作するタイプでもよく、コンピュータ50からの制御信号に応じて動作するタイプでもよい。

【0042】

試料Sからの反射光は、集光レンズ31によって検出器32に集められる。検出器32は、光強度を電気信号に変換する機能を有し、後段の電流アンプ33によって検出器32からの電流信号が電圧信号に変換され、次段の電圧計34によってデジタル化された検出信号に変換される。

【0043】

コンピュータ50は、電圧計34からの検出信号を取り込んで、メモリ等に保存し、必要に応じて、ディスプレイ51上にデータを表示する。

【0044】

こうした表面検査装置は、図1に示したフローチャートに従って動作する。まず、試料

10

20

30

40

50

S、例えば、図2に示す窒化物半導体素子を試料台21に固定する。次に、コンピュータ50は、分光器12に向けて制御信号(例えば、スキャン開始波長、スキャン終了波長、スキャン速度など)を送信して、スペクトル計測を開始する。

【0045】

試料Sでは、プローブ光の波長に応じて光の吸収や反射、干渉などの現象が発生する。本発明では、光照射によって発生する励起子に特有な光学反射スペクトルの変化に着目している。

【0046】

コンピュータ50は、スペクトル計測中に出力される検出信号を取り込んで、メモリ等に保存し、計測終了後、上述した式(3)(4)を用いて、検出信号を反射率スペクトルに変換し、必要に応じてディスプレイ51上に表示する。さらに、式(2)を適用して、試料Sの反射率スペクトルを解析することによって、励起子スペクトルのブロードニングファクターを抽出する。

【0047】

コンピュータ50には、表面状態(例えば、クラック密度)と励起子スペクトルのブロードニングファクターとの関係が既知である標準試料に関するデータが予め保存されている。従って、標準試料のブロードニングファクターを基準として、今回計測した試料Sのブロードニングファクターを比較することによって、試料Sの表面状態を定量的に評価することができる。

【0048】

続いて、試料Sの計測エリアを変更する場合、調整機構22を動作させて試料Sを移動し、プローブ光の照射位置を変更する。そして、上述と同様な手順に従って、スペクトル計測、解析を実施する。こうした試料Sの面内走査とスペクトル計測を繰り返すことによって、試料Sの表面全体での欠陥分布を評価することが可能になる。

【0049】

実施の形態3.

図5は、本発明に係る表面検査装置の他の例を示すブロック図である。表面検査装置は、光源11と、試料台21と、分光器35と、マルチチャンネル検出器36と、コンピュータ50などで構成される。

【0050】

光源11は、スペクトル計測に必要な波長を含む連続スペクトルのプローブ光を発生する。プローブ光は、集光レンズ13によって試料S上で所望のスポット径に集光され、試料Sの計測エリアが規定される。

【0051】

試料台21は、試料Sを保持するものであり、調整機構22によって試料Sの3次元位置(XYZ方向)または3次元角度(ピッチ、ヨー、ロール)が調整可能である。調整機構22は、手動で動作するタイプでもよく、コンピュータ50からの制御信号に応じて動作するタイプでもよい。

【0052】

試料Sからの反射光は、集光レンズ31によって分光器35に集められ、さらにマルチチャンネル検出器36に入力される。分光器35は、回折格子やプリズム等で構成され、連続スペクトル光を波長別に空間的に分解する機能を有する。マルチチャンネル検出器36は、多数の受光面が直線上に配列されたりニアアレイ等で構成され、分光器35によって空間分解された光の強度分布を検出する。従って、マルチチャンネル検出器36を用いた場合、波長スキャンが不要になるため、スペクトル計測の高速化が図られる。

【0053】

コントローラ37は、マルチチャンネル検出器36からの出力信号を処理して、コンピュータ50へ検出信号として出力する。

【0054】

コンピュータ50は、コントローラ37からの検出信号を取り込んで、メモリ等に保存

し、必要に応じて、ディスプレイ 5 1 上にデータを表示する。

【 0 0 5 5 】

こうした表面検査装置は、図 1 に示したフローチャートに従って動作する。まず、試料 S、例えば、図 2 に示す窒化物半導体素子を試料台 2 1 に固定する。次に、光源 1 1 からのプローブ光を試料 S に向けて照射すると、マルチチャンネル検出器 3 6 は、試料 S からの反射スペクトルを出力する。

【 0 0 5 6 】

コンピュータ 5 0 は、マルチチャンネル検出器 3 6 からの検出信号を取り込んで、メモリ等に保存し、計測終了後、上述した式 ( 3 ) ( 4 ) を用いて、検出信号を反射率スペクトルに変換し、必要に応じてディスプレイ 5 1 上に表示する。さらに、式 ( 2 ) を適用して、試料 S の反射率スペクトルを解析することによって、励起子スペクトルのブロードニングファクターを抽出する。

【 0 0 5 7 】

コンピュータ 5 0 には、表面状態 ( 例えば、クラック密度 ) と励起子スペクトルのブロードニングファクターとの関係が既知である標準試料に関するデータが予め保存されている。従って、標準試料のブロードニングファクターを基準として、今回計測した試料 S のブロードニングファクターを比較することによって、試料 S の表面状態を定量的に評価することができる。

【 0 0 5 8 】

続いて、試料 S の計測エリアを変更する場合、調整機構 2 2 を動作させて試料 S を移動し、プローブ光の照射位置を変更する。そして、上述と同様な手順に従って、スペクトル計測、解析を実施する。こうした試料 S の面内走査とスペクトル計測を繰り返すことによって、試料 S の表面全体での欠陥分布を評価することが可能になる。

【 0 0 5 9 】

実施の形態 4 .

図 6 は、反射光の光路補正機構の一例を示す構成図である。この光路補正機構は、図 4 および図 5 に示す表面検査装置に適用可能である。

【 0 0 6 0 】

光路検出装置は、分割光学素子 3 8 と、光位置検出器 3 9 と、差動アンプ 4 0 などで構成される。

【 0 0 6 1 】

分割光学素子 3 8 は、ビームスプリッタ等で構成され、試料 S からの反射光の一部を取り出す機能を有する。光位置検出器 3 9 は、P S D (position sensitive device) や分割型検出器で構成され、分割光学素子 3 8 によって取り出された光の位置を検出する。ここでは、2 つの受光面 A , B が配列した 2 分割型検出器を用いた例を示しているが、4 つの受光面が X Y 方向に配列した 4 分割型検出器でも構わない。

【 0 0 6 2 】

差動アンプ 4 0 は、演算増幅器等で構成され、光位置検出器 3 9 から出力される 2 つの信号 S A , S B を差動増幅して、S A - S B という差分信号を出力する。

【 0 0 6 3 】

こうした光路検出装置を用いることにより、試料 S からの反射光に対してほとんど影響を与えずに、反射光の光路ずれを高い精度で検出することができる。また、試料 S から分割光学素子 3 8 を経由して光位置検出器 3 9 に至るまでの光路長を極力長く設定することが好ましく、反射光の光路ずれに対する感度を高くすることができる。

【 0 0 6 4 】

光路補正機構は、上述した光路検出装置と、光路ずれに対応した差分信号に基づいて、試料台 2 1 の 3 次元位置 ( X Y Z 方向 ) または 3 次元角度 ( ピッチ、ヨー、ロール ) 位置を調整するための調整機構 2 2 などで構成される。

【 0 0 6 5 】

次に光路補正機構のフィードバック動作について説明する。検査試料 S として、半導体

10

20

30

40

50



層が形成されたウエハを用いた場合、ウエハの平坦性を考慮する必要がある。特に、ウエハに反りが生じている場合、面内分布データを測定している際に、反射光の光軸が変動することがある。例えば、図6の一点鎖線で示すように、反射光の本来の光路から、図6の実線で示す光路にずれてしまう。

【0066】

特に、図5に示すマルチチャンネル測光の場合、反射光の光軸が変動すると、分光器35への入射角度が変化して、マルチチャンネル検出器36の受光アレイにおける光強度分布がシフトしてしまい、光学スペクトルの波長ずれが生ずる。

【0067】

この対策として、試料Sの面内走査中に、上述した光路検出装置によって試料Sからの反射光の光路ずれを検出しつつ、調整機構22によって光路ずれを解消するように試料台21の位置または角度を調整することによって、ウエハの反りに起因した計測誤差を低減または解消することができる。

【0068】

図7は、光路補正機構の動作を示すフローチャートである。まずステップb1において、分割光学素子38によって試料Sからの反射光の一部を分割する。次にステップb2において、光位置検出器39は、分割した光を受光して、光の位置を検出する。次にステップb3において、差動アンプ40からの差分信号SA - SBがゼロであるか否かを判定する。差分信号がゼロでない場合、ステップb4に移行して、差分信号がゼロになる方向に、調整機構22が試料台21の位置または角度を調整した後、ステップb2に戻って再び光位置検出と試料台の調整を繰り返す。こうしたフィードバック動作により、差分信号がゼロに収束すると、ステップb3からステップb5に移行して、試料Sのスペクトル計測を開始する。

【0069】

続いて、試料Sの計測エリアを変更する場合、調整機構22を動作させて試料Sを面内で移動し、プローブ光の照射位置を変更する。そして、図7に示す光路補正動作を行って反射光の光路ずれを解消した後、上述と同様な手順に従って、スペクトル計測、解析を実施する。こうした試料Sの面内走査、光路補正動作、スペクトル計測を順次繰り返すことによって、試料Sの表面全体での欠陥分布を評価することが可能になる。

【実施例】

【0070】

図8(a)(b)は、図2に示すAlGaIn/GaNのHEMTエピタキシャル構造をAFMで観察した像をそれぞれ示す写真である。画像の濃淡を示すグレイスケールは、表面の凹凸の高さに対応している。なお、これらのAFM像を取得するのに要した時間は、それぞれ30分であった。

【0071】

図8(a)に示す試料Aは、表面が平坦であり、クラックが存在しておらず、標準試料として使用できる。図8(b)に示す試料Bは、表面に凹凸が現れており、多数のクラックが存在している。

【0072】

図9は、試料A, Bの光学反射スペクトルを示すグラフである。縦軸は反射率(%)で、横軸は光子エネルギー(eV)である。実線は表面クラック無しの試料Aを示し、破線は表面クラック有りの試料Bを示す。これらのスペクトルは、図4に示した表面検査装置を用いて計測した。各スペクトルの計測に要した時間は、AFM観察の1/10に相当する3分であった。

【0073】

励起子スペクトル中心は約3.87 eV (320 nm)であり、クラックが存在している試料Bのスペクトル(実線)は、クラック無しの試料Aのスペクトル(破線)と比べて、より強いブロードニングを示していることが判る。

【0074】

10

20

30

40

50

図10(a)(b)は、図9に示す試料A, Bの光学反射スペクトルをフィッティングした結果をそれぞれ示すグラフである。実線は、図9に示す反射スペクトルの実験値を示し、白丸は、上述した式(2)~(4)を用いてコンピュータ等でフィッティングした計算値である。

【0075】

図10(a)に示す試料Aのフィッティング曲線も、図10(b)に示す試料Bのフィッティング曲線も、励起子スペクトル中心付近において、実験値と非常に良く一致している。これらのフィッティング曲線についてブロードニングファクターを計算した結果、試料Aは25meV、試料Bは45meVとなった。従って、表面のクラック密度が増加するほど、ブロードニングファクターは増加することが判る。

10

【0076】

このように試料の表面状態を検査する場合、励起子スペクトルのブロードニングファクターを計算することによって、従来のAFM観察法と比べて、より短時間で精度良く定量的な評価を行うことができる。

【0077】

実施の形態5.

以上では、反射分光法に基づいた半導体表面の定量的評価方法について述べた。これは、反射スペクトルのブロードニング・ファクターを基準として表面状態を定量化する方法である。言い換えれば、スペクトル形状の鋭さを指標として、表面状態を定量化する方法である。スペクトル形状の鋭さは、その微分信号の強度に対応する。従って、反射スペクトルの微分信号、すなわち変調反射スペクトルを測定すれば、得られたスペクトルの強度を指標として表面状態を定量化できると考えられる。一般に、微分信号は、変化に対して高感度である。従って、通常の反射スペクトルでは得ることの出来ない表面状態に関する情報を抽出することが可能である。以下では、変調反射分光法に基づくこと特徴とする半導体表面の定量的評価方法について述べる。

20

【0078】

変調反射分光法には、様々な種類が存在する。その中でもPR(Photo reflectance)分光法(光変調反射分光法)は、非破壊非接触でかつ最も簡便な手法である。PR分光法の特徴は、反射率を検出するためのプローブ光に加えて励起光を試料表面に照射するという点にある。励起光により生成されたキャリアは、その遮蔽効果により試料の内部電場を微小変化させる。一般に、内部電場変化に伴い、試料の光学定数も変化する。PR分光法は、光学定数における微小変化を変調反射率として計測する分光技術である。検出されるPR信号には、バンド構造が変化しない程度の内部電場しか存在しないという条件の下では、FK(Franz Keldysh)振動と三階微分形状信号の2種類に大別できる。

30

【0079】

ここで、 $e$ を素電荷、 $h$ をプランク定数、 $F$ を内部電場強度、 $\mu$ を電子正孔換算質量として、下記の式(5)で表される電気光学定数とライフタイムブロードニングファクターの二つの指標を用いると、FK振動と三階微分形状信号は、それぞれ式(7)および式(8)の場合に観測される信号である。

【0080】

【数5】

$$\hbar\Omega = \left( \frac{e^2 \hbar^2 F^2}{8\mu} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad (6)$$

$$\hbar\Omega \gg \Gamma \quad (7)$$

$$\hbar\Omega \ll \Gamma \quad (8)$$

40

## 【 0 0 8 1 】

上記 P R 信号を測定するための分光装置の模式図を、図 1 1 および図 1 2 に示す。P R 分光システムは、図 4 に示した反射スペクトル測定装置に対して、励起光源、変調器および変調反射信号を計測するためのロックインアンプを追加した装置形態をとる。

## 【 0 0 8 2 】

プローブ光光学系は、白色光源 1 1 1 と、集光レンズ 1 1 2 と、分光器 1 1 3 と、集光レンズ 1 1 4 など構成される。白色光源 1 1 1 は、例えばランプなどで構成され、スペクトル計測に必要な波長を含む連続スペクトルの光を発生する。分光器 1 1 3 は、白色光源 1 1 1 からの連続スペクトルを分光して、単色光のプローブ光を出力する。プローブ光の波長は、コンピュータ 1 4 0 からの制御信号に応じて連続的に変化させることができる。分光器 1 1 2 からのプローブ光は、集光レンズ 1 1 4 によって試料 S 上で所望のスポット径に集光され、試料 S の計測エリアが規定される。

## 【 0 0 8 3 】

励起光光学系は、励起光源 1 2 1 と、励起光安定器 1 2 2 と、励起光フィルタ 1 2 3 と、変調器 1 2 4 と、集光レンズ 1 2 5 など構成される。励起光源 1 2 1 は、例えばレーザー光源などで構成され、試料 S でフリーキャリア吸収が発生するように、試料 S のバンドギャップ波長より短い波長の励起光を発生する。励起光安定器 1 2 2 は、励起光源 1 2 1 からの励起光パワーを安定化させる。励起光フィルタ 1 2 3 は、励起光波長のみを通過させ、ノイズ光をカットするバンドパスフィルタである。変調器 1 2 4 は、所定の参照周波数信号に基づいて励起光強度を変調する。変調器 1 2 4 を通過した光は、集光レンズ 1 2 5 によってプローブ光の照射エリアとほぼ一致するように、試料 S 上で所望のスポット径に集光される。

## 【 0 0 8 4 】

検出光学系は、集光レンズ 1 3 1 と、光学フィルタ 1 3 2 と、信号検出器 1 3 3 など構成される。試料 S からの反射光は、集光レンズ 1 3 1 によって信号検出器 1 3 3 に集められる。途中の光学フィルタ 1 3 2 は、励起光を遮蔽し、プローブ光のみを通過させるロングパスフィルタであり、必要に応じて取り外し可能である。

## 【 0 0 8 5 】

信号処理系は、図 1 2 に示すように、電流 / 電圧変換器 1 3 4 と、バンドパスフィルタ回路 1 3 5 と、直流電圧計 1 3 6 と、ロックインアンプ 1 3 7 と、コンピュータ 1 4 0 と、ディスプレイ 1 4 1 など構成される。信号検出器 1 3 3 は、光強度を電気信号に変換する機能を有し、後段の電流 / 電圧変換器 1 3 4 によって検出器 3 2 からの電流信号が電圧信号に変換される。バンドパスフィルタ回路 1 3 5 は、検出信号から、反射率 R に相当する直流成分と変調反射率 R に相当する交流成分とを抽出する。直流電圧計 1 3 6 は、検出信号の直流成分の電圧を測定し、デジタル信号に変換してコンピュータ 1 4 0 へ出力する。ロックインアンプ 1 3 7 は、変調器 1 2 4 からの参照周波数を用いて、検出信号の交流成分の中から該参照周波数と一致する周波数成分を取り出して、デジタル信号に変換してコンピュータ 1 4 0 へ出力する。コンピュータ 1 4 0 は、直流電圧計 1 3 6 からの反射率信号 R およびロックインアンプ 1 3 7 からの変調反射率信号 R を取り込んで、メモリ等に保存し、必要に応じて、ディスプレイ 1 4 1 上にデータを表示する。

## 【 0 0 8 6 】

P R スペクトルは、図 1 3 に示されるフローチャートに従って測定される。以下、図 1 3 に示されたフローチャートに従い、P R 分光測定手順の詳細な説明を行う。

## 【 0 0 8 7 】

試料 S の反射率を検出するためのプローブ光は、白色光源 1 1 1 からの光を分光器 1 1 3 に導入し、単色化することによって得られる。単色化されたプローブ光は、集光レンズ 1 1 4 を通して、試料 S に照射される (ステップ c 1)。一方、励起光は、変調器 1 2 4 により強度が周期的に時間変化する励起光に変換された後、試料 S に照射される (ステップ c 2)。

## 【 0 0 8 8 】

10

20

30

40

50

P R 信号を検出するロックインアンプ 1 3 7 については、位相調整が必要である。位相調整を行うため、検出器前の光学フィルタ 1 3 2 を光軸から外して、試料 S 上で散乱された励起光が信号検出器 1 3 3 に入る状態にする。この状態で検出された信号に対して、変調器 1 2 4 から送られてきた参照周波数信号と同期するように、ロックインアンプ 1 3 7 の位相調整を行う（ステップ c 3）。位相調整後は、光学フィルタ 1 3 2 を光軸に挿入することにより散乱した励起光を遮蔽し、信号検出器 1 3 3 にはプローブ光のみが入るようにする（ステップ c 4）。

#### 【 0 0 8 9 】

上記セッティングの後、データの測定に移行する。まず分光器 1 1 3 を掃引し、試料 S から反射されたプローブ光を信号検出器 1 3 3 で電気信号に変換する（ステップ c 5）。得られた信号は、バンドパスフィルタ回路 1 3 5 を通して、反射率 R に相当する直流成分と変調反射率 R に相当する交流成分に分け（ステップ c 6）、それぞれ直流電圧計 1 3 6 とロックインアンプ 1 3 7 で計測する（ステップ c 7）。コンピュータ 1 4 0 は、各計測値を用いて  $R/R$  を計算し、フォトンエネルギーあるいは波長の関数としてプロットすることにより P R スペクトルを得る（ステップ c 8）。

#### 【 0 0 9 0 】

このようにして得られた P R スペクトルから欠陥密度を求めるためのフローチャートを、図 1 4 に示す。まず、上述のようにして P R スペクトルを測定した後（ステップ d 1）、得られたスペクトルから着目している層に起因する三階微分形状信号あるいは F K 振動の振幅を読み取る（ステップ d 2）。F K 振動は、一般に、複数の振動からなる形状を示す。解析の際には、最も信号対雑音比の良い振動、通常、最も大きい振幅を示す振動を選ぶことで、解析から得られた値の精度を確保することができる。振幅が最大となる振動は、着目層のバンドギャップエネルギー近傍の振動である。従って、この振動から振幅を読み取るのが最適である。この F K 振動および三階微分形状信号の振幅を、以下では特に断らない限り、単に P R 信号強度と呼ぶことにする。

#### 【 0 0 9 1 】

最後に、得られた P R 信号強度から、欠陥密度を求める手順に移る（ステップ d 3）。前にも述べたように得られたスペクトルは、着目層の状態（結晶性、等）に依存して、着目層に起因する F K 振動の振幅が変化する。そこでまずあらかじめ欠陥密度の分かっている標準試料の P R 測定を行い、横軸を欠陥密度、縦軸を P R 信号強度とした換算曲線（図 1 5）を準備しておく。この換算曲線を基にして、評価の対象となっている試料の P R 信号強度と検量線とを比較することにより、欠陥密度を求めることができる。

#### 【 0 0 9 2 】

実施の形態 6 .

上で述べた P R 分光法は、変調反射分光法の中でも最も広く利用されている。しかしながら、実際には、P R 分光法を適用できない場合も存在する。例えば、試料を励起できる光源がないというケースである。加えて、励起光照射により試料が強い発光特性を示す場合、発光成分が外乱成分として働いたため、本来の P R スペクトルを得られない。こうした場合に適用できる変調反射分光法として、C E R (Contactless electroreflectance) 分光法（非接触電場変調反射分光法）が存在する。C E R 分光測定装置の概略図を図 1 6 に示す。なお、信号処理系は、図 1 2 に示した構成がそのまま使用できるため、図示を省略している。

#### 【 0 0 9 3 】

プローブ光光学系は、白色光源 2 1 1 と、集光レンズ 2 1 2 と、分光器 2 1 3 と、集光レンズ 2 1 4 などによって構成される。白色光源 2 1 1 は、例えばランプなどで構成され、スペクトル計測に必要な波長を含む連続スペクトルの光を発生する。分光器 2 1 3 は、白色光源 2 1 1 からの連続スペクトルを分光して、単色光のプローブ光を出力する。プローブ光の波長は、図 1 2 に示したコンピュータ 1 4 0 からの制御信号に応じて連続的に変化させることができる。分光器 1 1 2 からのプローブ光は、集光レンズ 2 1 4 によって試料 S 上で所望のスポット径に集光され、試料 S の計測エリアが規定される。

## 【 0 0 9 4 】

電場印加回路は、所定の参照周波数を持つ交流電圧を発生する交流電源 2 2 1 と、試料 S を挟むように配置された一対の電極 2 2 2 , 2 2 3 などによって構成される。試料 S の光入射側に配置された電極 2 2 2 は、一般には透明電極と呼ばれ、プローブ光を透過可能な電極材料で形成されており、交流電源 2 2 1 の一方の端子に電気接続される。交流電源 2 2 1 の他方の端子は接地される。試料 S の裏面に配置された電極 2 2 3 も試料台を通じて接地される。

## 【 0 0 9 5 】

検出光学系は、集光レンズ 2 3 1 と、信号検出器 2 3 2 などによって構成される。試料 S から反射光は、集光レンズ 2 3 1 によって信号検出器 2 3 2 に集められる。信号検出器 2 3 2 から検出信号は、図 1 2 に示した信号処理系に送られる。

## 【 0 0 9 6 】

C E R 分光測定の際、試料 S を挟む二つの電極 2 2 2 , 2 2 3 の間に交流電場を印加すると、試料 S の内部に電場変調が引き起こされる。この電場変調によって生じる光学反射率変調は、プローブ光を介して検出される。得られる変調反射率は、P R 信号と等価なため、C E R スペクトルの解析・欠陥密度の算出フローは、図 1 4 のフローチャートと同様であり、これを図 1 7 に示す。

## 【 0 0 9 7 】

まず C E R 分光測定の手順に関して、試料 S の反射率を検出するためのプローブ光は、白色光源 2 1 1 から分光器 2 1 3 に導入し、単色化することによって得られる。単色化されたプローブ光は、集光レンズ 2 1 4 を通じて、試料 S に照射される。一方、試料 S には、一対の電極 2 2 2 , 2 2 3 を介して交流電場が印加され、試料 S から反射光が変調される。この状態で信号検出器 2 3 2 から検出信号に対して、交流電源 2 2 1 から送られてきた参照周波数信号と同期するように、ロックインアンプ 1 3 7 の位相調整を行う。

## 【 0 0 9 8 】

上記セッティングの後、データの測定に移行する。まず分光器 2 1 3 を掃引し、試料 S から反射されたプローブ光を信号検出器 2 3 2 で電気信号に変換する。得られた信号は、バンドパスフィルタ回路 1 3 5 を通じて、反射率 R に相当する直流成分と変調反射率 R に相当する交流成分に分け、それぞれ直流電圧計 1 3 6 とロックインアンプ 1 3 7 で計測する。コンピュータ 1 4 0 は、各計測値を用いて  $R / R$  を計算し、フォトンエネルギーあるいは波長の関数としてプロットすることにより C E R スペクトルを得る。

## 【 0 0 9 9 】

次に、上述のようにして C E R スペクトルを測定した後 (ステップ e 1 )、得られたスペクトルから着目している層に起因する三階微分形状信号あるいは F K 振動の振幅を読み取る (ステップ e 2 )。F K 振動は、一般に、複数の振動からなる形状を示す。解析の際には、最も信号対雑音比の良い振動、通常、最も大きい振幅を示す振動を選ぶことで、解析から得られた値の精度を確保することができる。振幅が最大となる振動は、着目層のバンドギャップエネルギー近傍の振動である。従って、この振動から振幅を読み取るのが最適である。この F K 振動および三階微分形状信号の振幅を、以下では特に断らない限り、単に C E R 信号強度と呼ぶことにする。

## 【 0 1 0 0 】

最後に、得られた C E R 信号強度から、欠陥密度を求める手順に移る (ステップ e 3 )。前にも述べたように得られたスペクトルは、着目層の状態 (結晶性、等) に依存して、着目層に起因する F K 振動の振幅が変化する。そこでまずあらかじめ欠陥密度の分かっている標準試料の C E R 測定を行い、横軸を欠陥密度、縦軸を C E R 信号強度とした換算曲線を準備しておく。この換算曲線を基にして、評価の対象となっている試料の C E R 信号強度と検量線とを比較することにより、欠陥密度を求めることができる。

## 【 0 1 0 1 】

実施の形態 7 .

上記 C E R 分光法では、測定に用いるプローブ光に対して透明な電極が必須となる。ところが紫外光領域では、透明電極を得られない場合が存在する。実用的な電子デバイス用透明導電膜として最も普及している  $\text{In}_2\text{O}_3$  系透明導電膜の一種である I T O (  $\text{In}_2\text{O}_3 : \text{Sn}$  ) は、母体結晶のバンドギャップエネルギーが室温で  $3.75 \text{ eV}$  であり、可視光域でのみ透過性を有する。同様に  $\text{ZnO}$  系および  $\text{SnO}_2$  系透明導電膜の場合、それぞれの母体結晶のバンドギャップエネルギーは  $3.44 \text{ eV}$  および  $3.70 \text{ eV}$  である。従って、上記透明電極より大きいバンドギャップエネルギーをもつ物質で構成される多層膜構造に対しては、C E R 分光法を適用できない。

#### 【 0 1 0 2 】

C E R 分光法および P R 分光法が適用できない試料であっても、それらが圧電性物質で構成されている場合、P Z R (piezoreflectance) 分光法 ( ピエゾ変調反射分光法 ) と呼ばれる応力 / 電場変調反射分光法の一つを適用することにより変調反射スペクトルを測定することができる。

#### 【 0 1 0 3 】

P Z R 分光装置の概略図を図 1 8 に示す。なお、信号処理系は、図 1 2 に示した構成がそのまま使用できるため、図示を省略している。

#### 【 0 1 0 4 】

プローブ光光学系は、白色光源 3 1 1 と、集光レンズ 3 1 2 と、分光器 3 1 3 と、集光レンズ 3 1 4 など構成される。白色光源 3 1 1 は、例えばランプなどで構成され、スペクトル計測に必要な波長を含む連続スペクトルの光を発生する。分光器 3 1 3 は、白色光源 3 1 1 からの連続スペクトルを分光して、単色光のプローブ光を出力する。プローブ光の波長は、図 1 2 に示したコンピュータ 1 4 0 からの制御信号に応じて連続的に変化させることができる。分光器 3 1 2 からのプローブ光は、集光レンズ 3 1 4 によって試料 S 上で所望のスポット径に集光され、試料 S の計測エリアが規定される。

#### 【 0 1 0 5 】

応力印加回路は、所定の参照周波数を持つ交流電圧を発生する交流電源 3 2 1 と、この交流電圧によって駆動される圧電素子 3 2 2 など構成される。

#### 【 0 1 0 6 】

検出光学系は、集光レンズ 3 3 1 と、信号検出器 3 3 2 など構成される。試料 S からの反射光は、集光レンズ 3 3 1 によって信号検出器 3 3 2 に集められる。信号検出器 3 3 2 から検出信号は、図 1 2 に示した信号処理系に送られる。

#### 【 0 1 0 7 】

P Z R 分光法では、試料 S の裏面に取り付けられた圧電素子 3 2 2 によりストレスを発生させ、試料 S に周期的な内部歪を誘起する。圧電性試料の場合、この周期的なストレスに応じて、ピエゾ電場が発生し、内部電場変調が生じる。この電場変調によって生じる光学反射率変調は、上記変調反射分光法と同様に、プローブ光を介して検出される。C E R 分光法と同じく、得られる変調反射率は、P R 信号と等価なため、P Z R スペクトルの解析・欠陥密度の算出フローは、図 1 4 のフローチャートと同様であり、これを図 1 9 に示す。

#### 【 0 1 0 8 】

まず P Z R 分光測定の手順に関して、試料 S の反射率を検出するためのプローブ光は、白色光源 3 1 1 からの光を分光器 3 1 3 に導入し、単色化することによって得られる。単色化されたプローブ光は、集光レンズ 3 1 4 を通して、試料 S に照射される。一方、試料 S には、圧電素子 3 2 2 によって周期的な応力が印加され、試料 S からの反射光が変調される。この状態で信号検出器 3 3 2 から検出信号に対して、交流電源 3 2 1 から送られてきた参照周波数信号と同期するように、ロックインアンプ 1 3 7 の位相調整を行う。

#### 【 0 1 0 9 】

上記セッティングの後、データの測定に移行する。まず分光器 3 1 3 を掃引し、試料 S から反射されたプローブ光を信号検出器 3 3 2 で電気信号に変換する。得られた信号は、バンドパスフィルタ回路 1 3 5 を通して、反射率 R に相当する直流成分と変調反射率 R

に相当する交流成分に分け、それぞれ直流電圧計 1 3 6 とロックインアンプ 1 3 7 で計測する。コンピュータ 1 4 0 は、各計測値を用いて  $R/R$  を計算し、フォトンエネルギーあるいは波長の関数としてプロットすることにより P Z R スペクトルを得る。

【 0 1 1 0 】

次に、上述のようにして P Z R スペクトルを測定した後（ステップ f 1 ）、得られたスペクトルから着目している層に起因する三階微分形状信号あるいは F K 振動の振幅を読み取る（ステップ f 2 ）。F K 振動は、一般に、複数の振動からなる形状を示す。解析の際には、最も信号対雑音比の良い振動、通常、最も大きい振幅を示す振動を選ぶことで、解析から得られた値の精度を確保することができる。振幅が最大となる振動は、着目層のバンドギャップエネルギー近傍の振動である。従って、この振動から振幅を読み取るのが最適である。この F K 振動および三階微分形状信号の振幅を、以下では特に断らない限り、単に P Z R 信号強度と呼ぶことにする。

【 0 1 1 1 】

最後に、得られた P Z R 信号強度から、欠陥密度を求める手順に移る（ステップ f 3 ）。前にも述べたように得られたスペクトルは、着目層の状態（結晶性、等）に依存して、着目層に起因する F K 振動の振幅が変化する。そこでまずあらかじめ欠陥密度の分かっている標準試料の P Z R 測定を行い、横軸を欠陥密度、縦軸を P Z R 信号強度とした換算曲線を準備しておく。この換算曲線を基にして、評価の対象となっている試料の P Z R 信号強度と検量線とを比較することにより、欠陥密度を求めることができる。

【 0 1 1 2 】

次に、以上で述べた変調反射分光法の表面モフォロジー解析への適用可否を議論する。ここでは P R 分光法を用いた欠陥密度推定の実施例を示す。図 2 0 ( a ) ~ 図 2 0 ( c ) は、評価対象とした 3 種類のサファイア基板上にそれぞれ成長した  $A l_{0.2} G a_{0.8} N / G a N$  ヘテロ構造を持つ試料 A , B , C を観察した表面 A F M 像を示す。なお、A l G a N 層および G a N 層の各厚さは全ての試料で同じである。

【 0 1 1 3 】

図 2 0 ( a ) に示す試料 A の A F M 像は、A l G a N 表面に多数のクラックが存在していることが判る。こうしたクラックは、図 2 0 ( b ) に示す試料 B および図 2 0 ( c ) に示す C ではほとんど観測されていない。ただし、試料 B の A F M 像では、多数のピットが検出されている。一般に、このピットは、貫通転位を伴っており、その形成の際には、貫通転位周辺に集まった不純物が引き金になっていると考えられている。

【 0 1 1 4 】

図 2 1 は、室温で測定した試料 A , B , C の P R スペクトルを示している。縦軸は変調反射率  $R$  を反射率  $R$  で除算した  $R/R$  であり、横軸はフォトンエネルギーである。フォトンエネルギー 3 . 4 e V に現れている特徴的なスペクトル構造は、その位置が G a N のバンドギャップエネルギーとほぼ等しいので、G a N 層に起因する信号に帰属される。従って、フォトンエネルギー 3 . 8 e V から連なる振動構造は、A l G a N 層の F K 振動に帰属される。

【 0 1 1 5 】

A l G a N 層に起因する F K 振動の振幅は、試料 C , B , A の順に縮小するが、これは図 2 0 に示した表面モフォロジーの劣化と対応している。従って、F K 振動の振幅解析を、表面モフォロジー定量化の一手段として適用可能であると結論できる。

【 0 1 1 6 】

なお、先に述べた反射分光測定による表面モフォロジー解析では、A l G a N 層表面におけるピットの有無に対する有意な差は小さかったが、P R 分光法を用いた表面モフォロジー解析は、通常の反射スペクトル測定より高感度な評価方法であることが判る。欠陥密度があらかじめ分かっている複数の標準試料に対して P R 分光測定を行い、P R 信号強度を欠陥密度に対してプロットすることによって得られる換算曲線を準備すれば、評価対象としている試料の P R 信号強度から欠陥密度を推定することが可能となるのは明らかである。

10

20

30

40

50

## 【0117】

最後に、本明細書で述べた光学的反射およびPRスペクトル測定が、従来用いられてきた結晶評価技術と比較して、表面モフォロジーに対しより高感度であることを説明する。

## 【0118】

図22は、 $\text{GaN}(0004)$ 反射のブラッグ角近傍における試料A, B, Cの $-2$ のX線回折スペクトルを示している。縦軸はX線回折強度(対数表示、任意単位)であり、横軸は回折角 $2(\text{arcsec})$ である。破線の位置は、計算によって求められた $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}(0004)$ 反射のブラッグ角に相当する。なお、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}(0004)$ 反射のブラッグ角の計算では、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 層が $\text{GaN}$ 層に対して擬似格子整合(pseudomorphic)に成長していると仮定した。

10

## 【0119】

破線の位置とX線回折パターンとの比較から、 $3100(\text{arcsec})$ 近傍のピーク構造は、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}(0004)$ 反射に帰属される。 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}(0004)$ 反射のピーク位置は、試料によって若干異なる。これは各試料の $\text{AlGaN}$ 層組成比がお互いわずかにずれていることを示している。このピーク位置の違いを除き、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}(0004)$ 反射X線回折パターンは、反射およびPRスペクトルの場合と異なり、その形状が $\text{AlGaN}$ 表面モフォロジーに対してほとんど依存しない。このことから反射スペクトル測定およびPRスペクトル測定の方が表面モフォロジーの評価に対してより適していると結論付けることができる。

## 【図面の簡単な説明】

20

## 【0120】

【図1】本発明に係る表面検査方法の一例を示すフローチャートである。

【図2】典型的な検査試料を示す断面図である。

【図3】窒化物半導体の反射率スペクトルの一例を示すグラフである。

【図4】本発明に係る表面検査装置の一例を示すブロック図である。

【図5】本発明に係る表面検査装置の他の例を示すブロック図である。

【図6】反射光の光路補正機構の一例を示す構成図である。

【図7】光路補正機構の動作を示すフローチャートである。

【図8】図8(a)(b)は、図2に示す $\text{AlGaN}/\text{GaN}$ のHEMTエピタキシャル構造をAFMで観察した像をそれぞれ示す写真である。

30

【図9】試料A, Bの光学反射スペクトルを示すグラフである。

【図10】図10(a)(b)は、図9に示す試料A, Bの光学反射スペクトルをフィッティングした結果をそれぞれ示すグラフである。

【図11】PR分光法装置の一例を示す構成図である。

【図12】PR分光法装置の一例を示す構成図である。

【図13】PR分光測定手順の一例を示すフローチャートである。

【図14】PRスペクトルから欠陥密度を求める手順の一例を示すフローチャートである。

【図15】欠陥密度とPR信号強度の関係を示す換算曲線である。

【図16】CER分光測定装置の一例を示す構成図である。

40

【図17】CERスペクトルから欠陥密度を求める手順の一例を示すフローチャートである。

【図18】PZR分光装置の一例を示す構成図である。

【図19】PZRスペクトルから欠陥密度を求める手順の一例を示すフローチャートである。

【図20】3種類のサファイア基板にそれぞれ成長した $\text{AlGaN}/\text{GaN}$ ヘテロ構造を持つ試料A, B, Cを観察した表面AFM像である。

【図21】図20(a)~図20(c)に示す試料A, B, CのPRスペクトルである。

【図22】図20(a)~図20(c)に示す試料A, B, Cの $-2$ のX線回折スペクトルである。

50

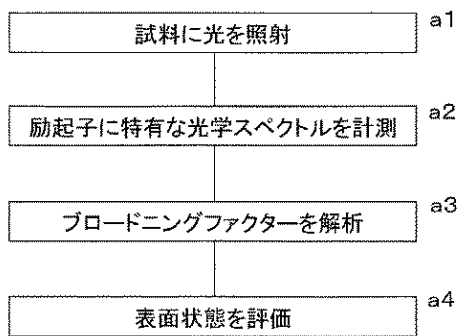


## 【符号の説明】

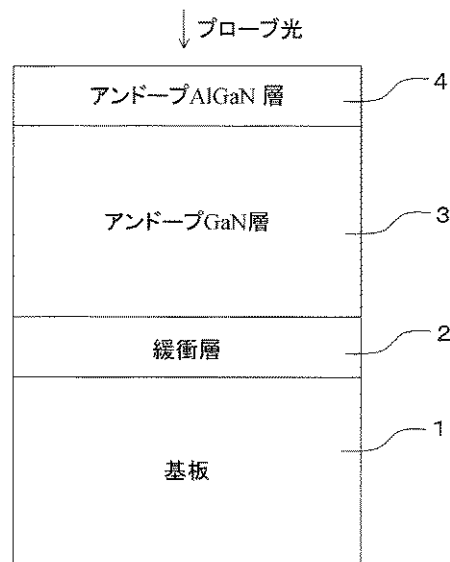
## 【0121】

11 光源、 12 分光器、 13 集光レンズ、 21 試料台、  
 22 調整機構、 31 集光レンズ、 32 検出器、 33 電流アンプ、  
 34 電圧計、 35 分光器、 36 マルチチャンネル検出器、  
 37 コントローラ、 38 分割光学素子、 39 光位置検出器、  
 40 差動アンプ、 50 コンピュータ、 51 ディスプレイ、  
 111, 211, 311 白色光源、 112, 114, 125, 131, 212, 2  
 14, 231, 312, 314, 331 集光レンズ、  
 113, 213, 313 分光器、 121 励起光源、 122 励起光安定器、 10  
 123 励起光フィルタ、 124 変調器、 132 光学フィルタ、  
 133, 232, 332 信号検出器、 134 電流/電圧変換器、  
 135 バンドパスフィルタ回路、 136 直流電圧計、  
 137 ロックインアンプ、 140 コンピュータ、 141 ディスプレイ、  
 221, 321 交流電源、 222, 223 電極、 322 圧電素子。

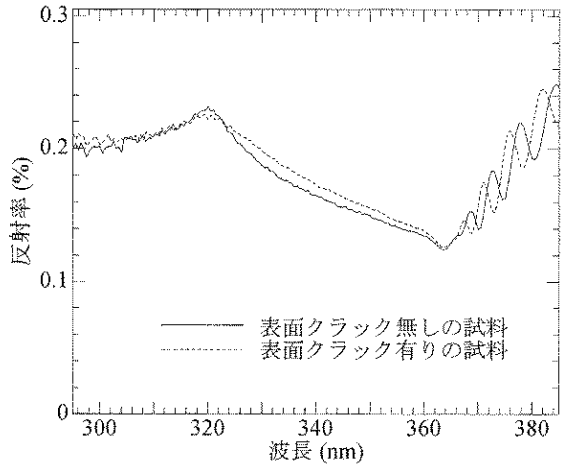
【図1】



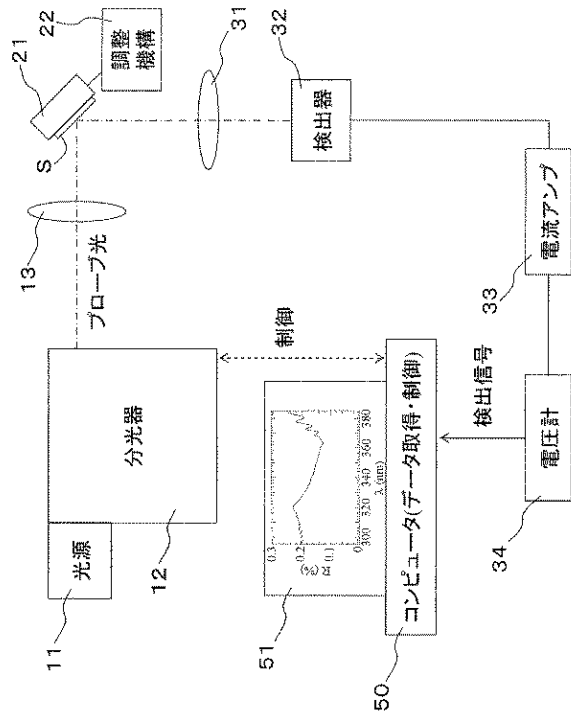
【図2】



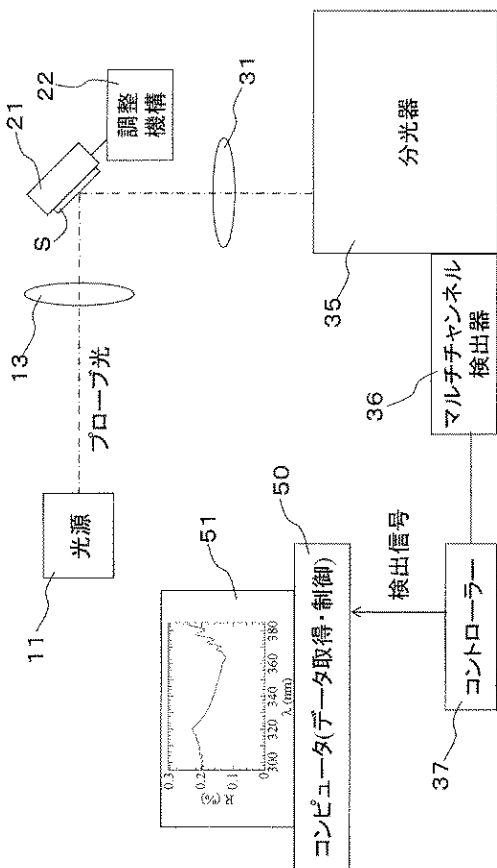
【図3】



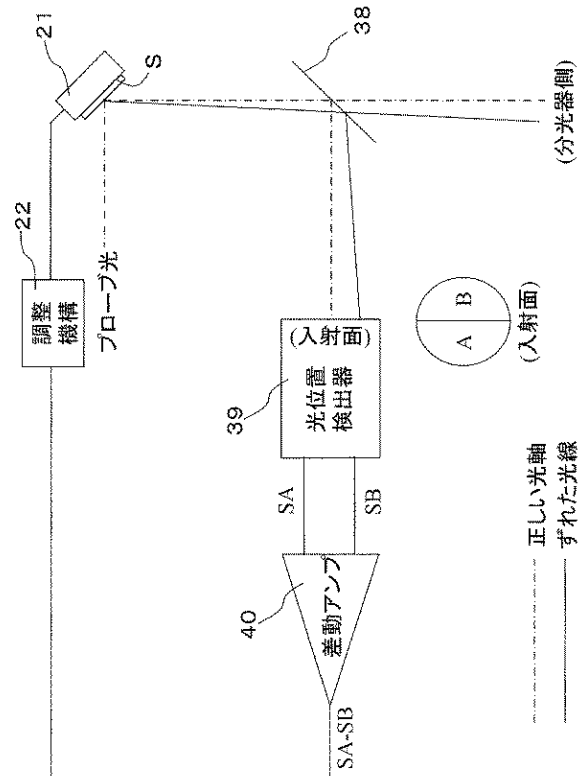
【図4】



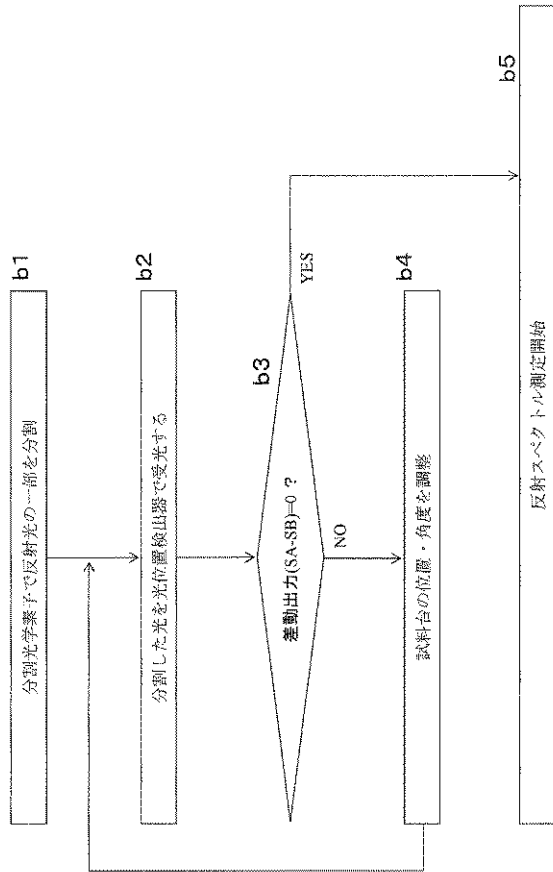
【図5】



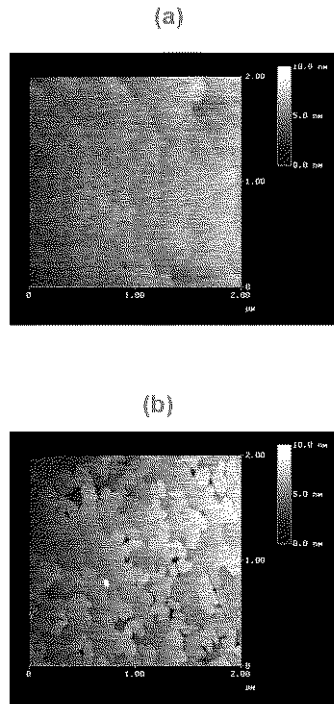
【図6】



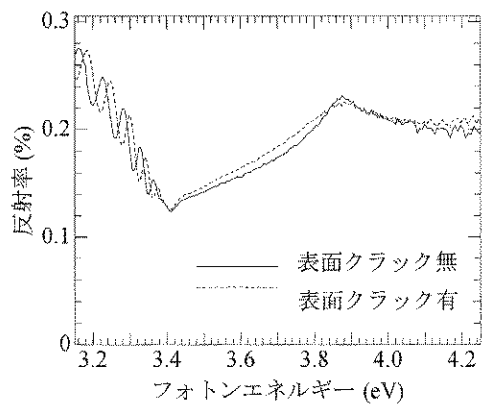
【図7】



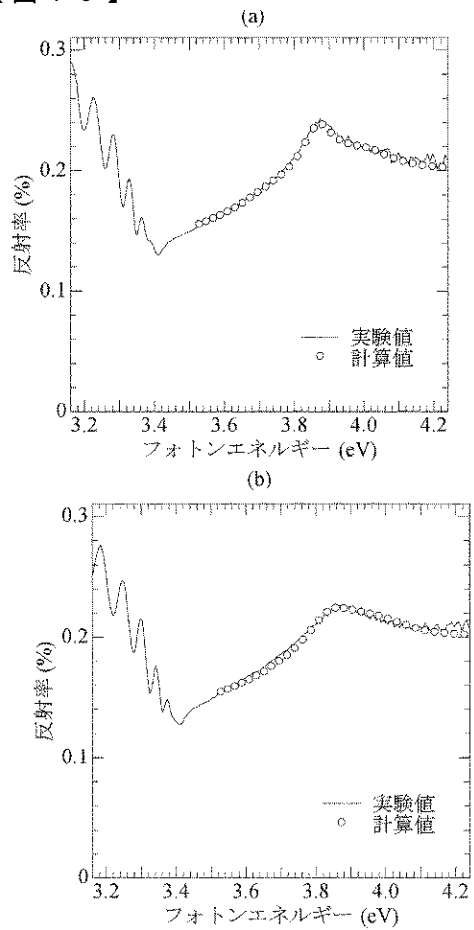
【図8】



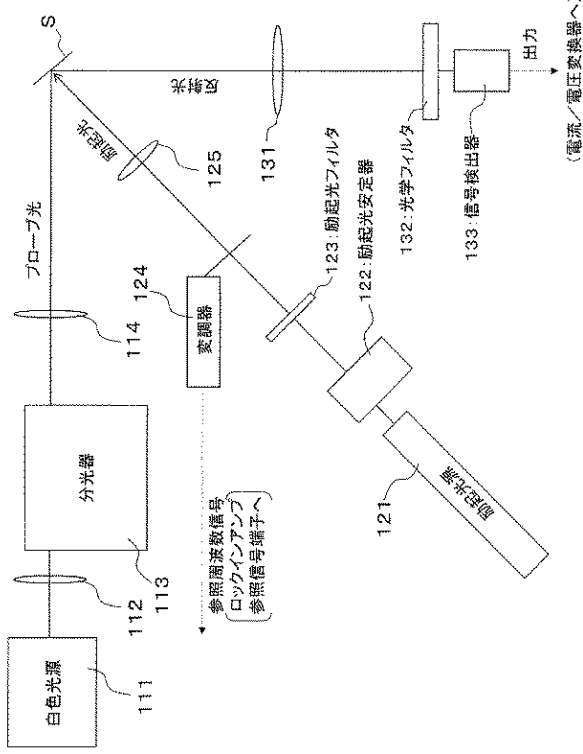
【図9】



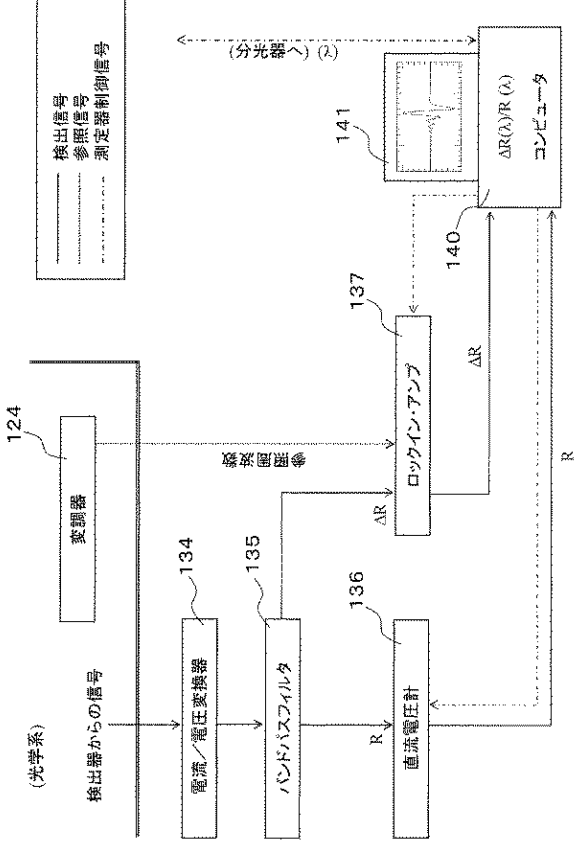
【図10】



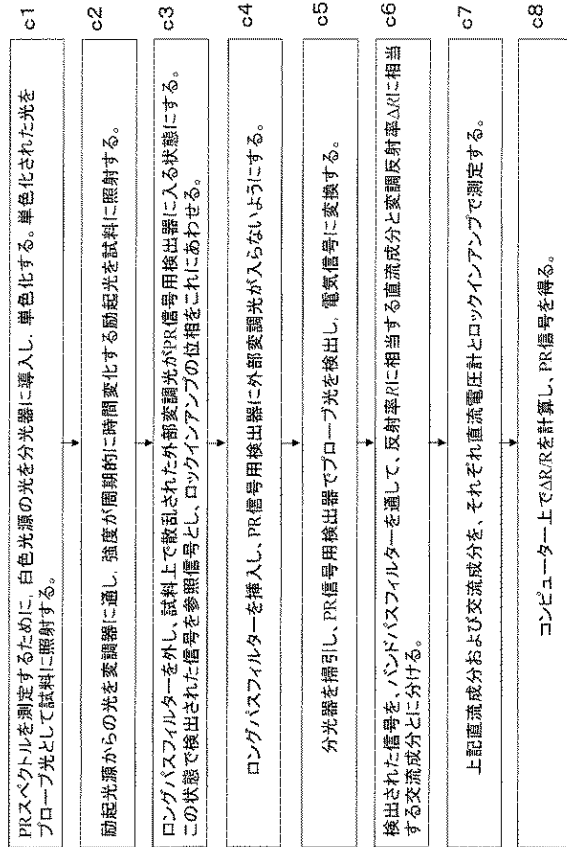
【図 1 1】



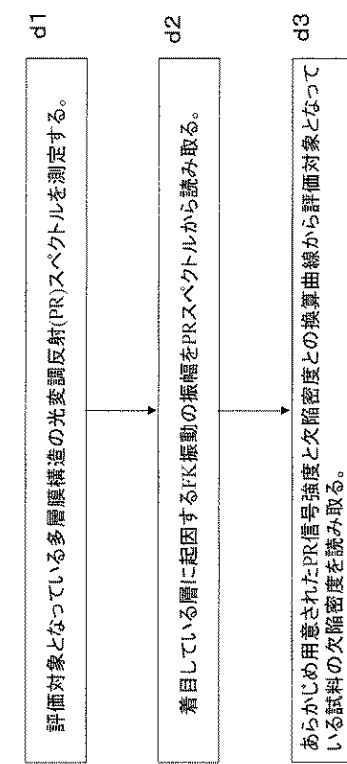
【図 1 2】



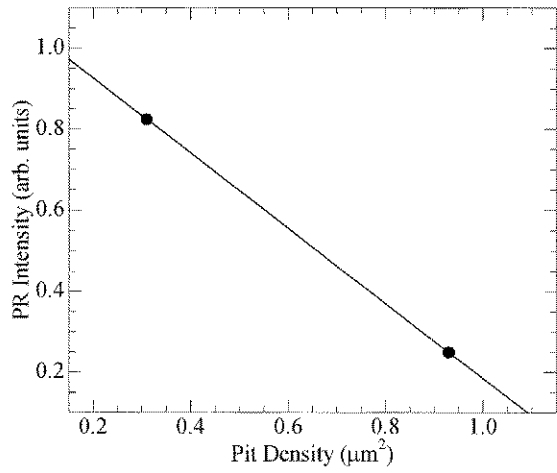
【図 1 3】



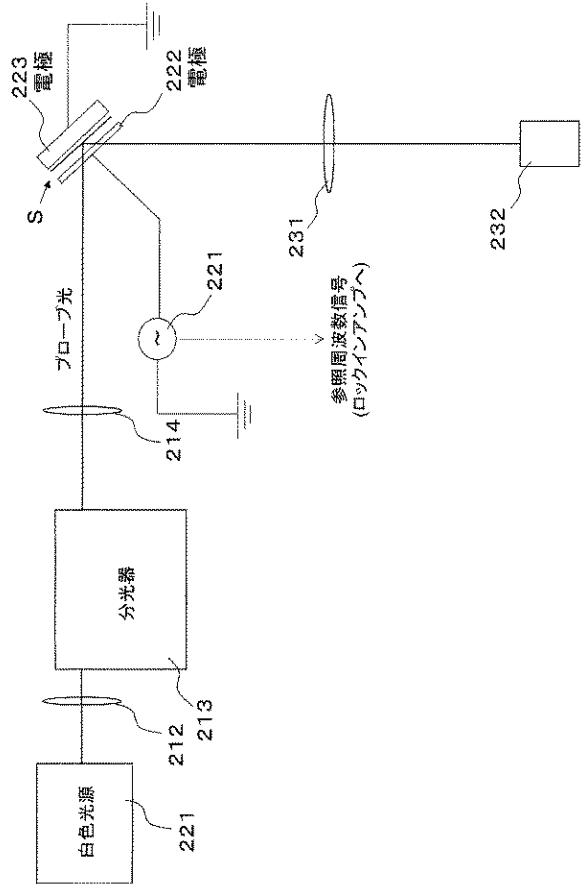
【図 1 4】



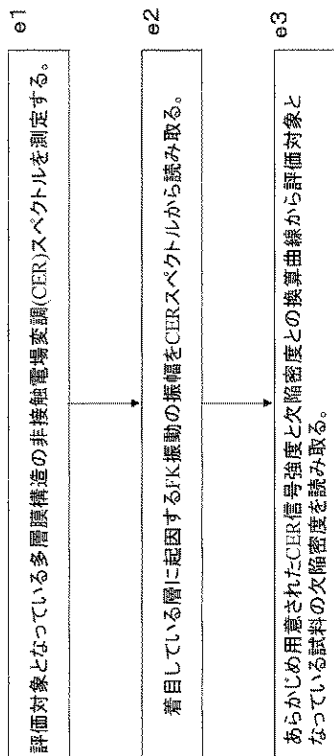
【図 15】



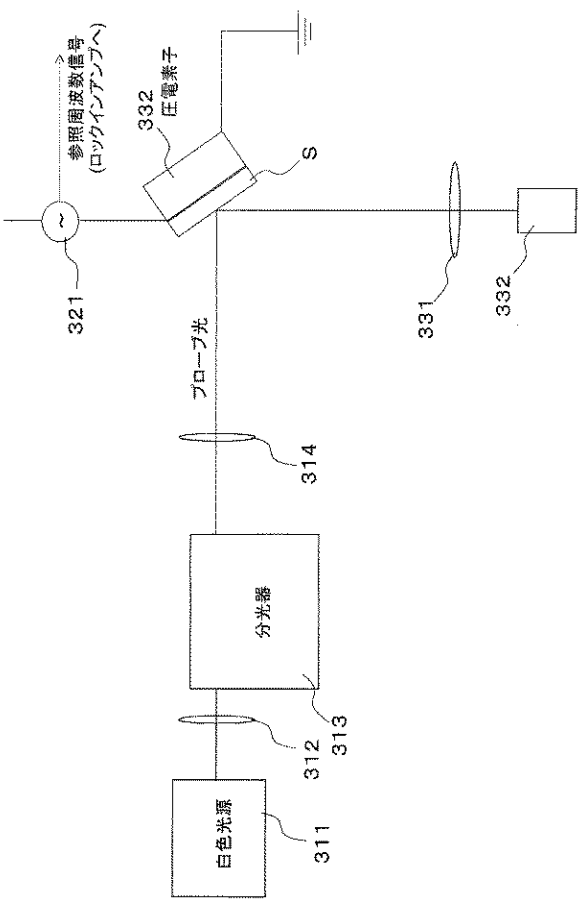
【図 16】



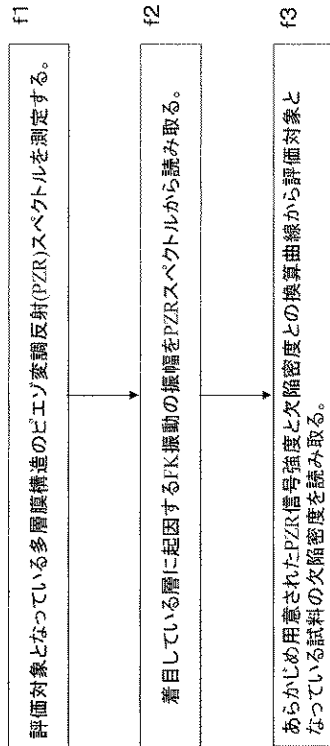
【図 17】



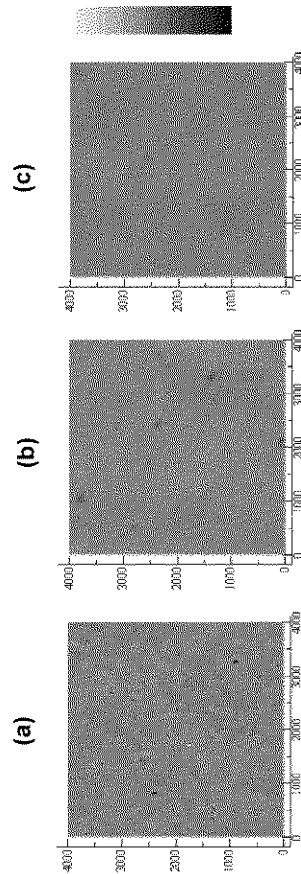
【図 18】



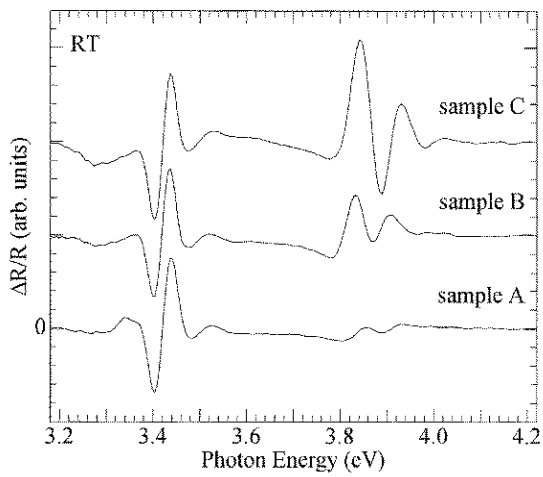
【 図 1 9 】



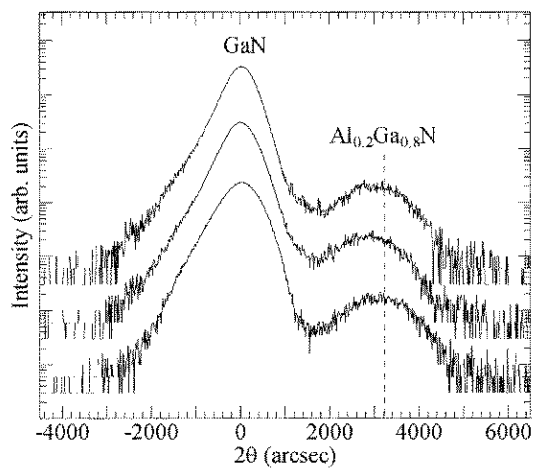
【 図 2 0 】



【 図 2 1 】



【 図 2 2 】



---

フロントページの続き

審査官 滝谷 亮一

(56)参考文献 特開 2 0 0 4 - 2 1 9 3 7 1 ( J P , A )

米国特許第 0 5 7 9 6 4 8 4 ( U S , A )

特開 2 0 0 4 - 2 8 9 0 1 3 ( J P , A )

特開 2 0 0 1 - 2 3 7 2 8 8 ( J P , A )

特開 2 0 0 3 - 2 2 4 1 7 1 ( J P , A )

Hideo Takeuchi, Yoshitsugu Yamamoto , Nondestructive determination of layers producing Franz Keldysh oscillations appearing in photoreflectance spectra of heterojunction bipolar transistor structures based on their line shape analysis , Journal of Applied Physics , 米国 , American Institute of Physics , 2 0 0 4 年 8 月 1 5 日 , Vol.96, No.4 , P.1967 1974

Hideo Wada, Masashi Agata , Photoreflectance characterization of the plasma induced damage in Si substrate , Journal of Applied Physics , 米国 , American Institute of Physics , 2 0 0 0 年 9 月 1 日 , Vol.88, No.5 , P.2336 2341

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H 0 1 L 2 1 / 6 6