

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7654069号
(P7654069)

(45)発行日 令和7年3月31日(2025.3.31)

(24)登録日 令和7年3月21日(2025.3.21)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 J 5/80 (2022.01) G 0 1 J 5/80

G 0 1 J 5/00 (2022.01) G 0 1 J 5/00 B

G 0 1 J 5/00 1 0 1 C

請求項の数 13 (全16頁)

(21)出願番号	特願2023-520371(P2023-520371)	(73)特許権者	502010251
(86)(22)出願日	令和3年10月5日(2021.10.5)		アイクストロン、エスイー
(65)公表番号	特表2023-546348(P2023-546348 A)		ドイツ国、ヘルツォーゲンラート 5 2
			1 3 4、ドルンカウルストラッセ 2
(43)公表日	令和5年11月2日(2023.11.2)	(74)代理人	100095267
(86)国際出願番号	PCT/EP2021/077333		弁理士 小島 高城郎
(87)国際公開番号	WO2022/073951	(74)代理人	100124176
(87)国際公開日	令和4年4月14日(2022.4.14)		弁理士 河合 典子
審査請求日	令和6年10月1日(2024.10.1)	(74)代理人	100224269
(31)優先権主張番号	102020126597.2		弁理士 小島 佑太
(32)優先日	令和2年10月9日(2020.10.9)	(72)発明者	ロジェク、カルステン
(33)優先権主張国・地域又は機関	ドイツ(DE)		ドイツ国、4 1 0 6 1 メンチェングラ
			ッドバッハ、フェルディナンドシュトラ
			ーセ 1 8
		(72)発明者	ヘイドハウゼン、ダーク
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 放射率補正されたパイロメトリのための方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

多層構造（21）で基板（22）をコーティングする際の放射率補正されたパイロメトリのための方法であって、

前記多層構造（21）の第1部分（18）が第1層（22～28）を含み、かつその上に堆積される第2部分（19）が第2層（30、31）を含み、

前記第2部分（19）の少なくとも1つの前記第2層（30、31）の堆積中に、その表面において少なくとも1つの光学測定装置（10、11）によって、振動する放射率（E）及びそれに対して位相シフトした振動する反射率（R）が、測定されること、

前記基板（22）の広域面の温度の実際の値（ T_c ）が、残余の振動を補正するために予め決定された補正值（ γ ）を用いて放射率（E）及び反射率（R）から計算され、かつ、

加熱装置（5）が、前記基板（22）の前記広域面の温度の目標値（ T_s ）に向けて前記基板（22）の温度を調整するために、前記実際の値（ T_c ）を用いて調整される、前記方法において、

前記第2部分（19）の堆積直前に行われる前記多層構造の堆積中に、その場で（*in situ*）前記第1部分（18）の前記第1層（22、28）の1つの堆積中に、前記補正值（ γ ）が決定され、前記補正值（ γ ）の決定の直前に、前記基板（22）が、時間的に一定に維持された、前記補正值（ γ ）が決定される測定温度（ T_M ）に加熱されることを特徴とする方法。

【請求項2】

前記多層構造（21）の前記第1部分（18）が、多数のバッファ層又は遷移層（23～28）を含むこと、及び／又は、前記多層構造（21）の前記第2部分（19）が少なくとも1つのバリア層（30）を含むことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前記放射率（E）及び／又は前記反射率（R）の前記測定が、800nmと1000nmの間の範囲における波長（ λ ）にて実行されることを特徴とする請求項1又は2に記載の方法。

【請求項4】

前記基板（22）が、前記放射率（E）及び／又は前記反射率（R）が測定された前記波長（ λ ）の光に対して非透過性であり、かつ、

前記第1部分及び前記第2部分（19）の層が、ただし少なくとも前記第2部分（19）の領域における層が、透明又は半透明であることを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載の方法。

【請求項5】

補正值決定フェーズ（17、17'）において前記基板（22）が温度調整なしに一定の熱出力によって加熱されることを特徴とする請求項1～4のいずれかに記載の方法。

【請求項6】

前記多層構造（21）の堆積中に、前記放射率（E）及び前記反射率（R）が周期的に変化し、補正值決定フェーズ（17、17'）の時間的長さが、少なくとも4分の1周期及び／又は最大で半周期又は1周期、及び／又は最大で100秒であることを特徴とする請求項1～5のいずれかに記載の方法。

【請求項7】

前記補正值（ γ ）の決定が、それぞれが間隔を置いて時間的に連続して完了する複数の補正值決定フェーズ（17、17'）において行われ、それぞれにおいて中間補正值が決定され、前記補正值（ γ ）が前記中間補正值を用いて計算され、かつ／又は中間補正值が前記第2部分（19）の堆積中に前記補正值（ γ ）を最適化するために決定されることを特徴とする請求項1～6のいずれかに記載の方法。

【請求項8】

前記基板（22）がシリコン基板であること、及び／又は、前記多層構造（21）がIII族及びV族の元素の層を含むことを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の方法。

【請求項9】

堆積中に前記補正值（ γ ）が決定される1つ以上のバッファ層又は遷移層（23～28）が、ガリウム、窒素、及び／又はアルミニウムを含むことを特徴とする請求項1～8のいずれかに記載の方法。

【請求項10】

バリア層（30）がAlGaIn層又はAlInN層であることを特徴とする請求項1～9のいずれかに記載の方法。

【請求項11】

前記第1部分（18）が、組成において前記第2部分（19）の少なくとも1つの層（30）と類似する少なくとも1つの層（23～26）を含むことを特徴とする請求項1～10のいずれかに記載の方法。

【請求項12】

CVDRリアクタのリアクタハウジング（1）において、加熱装置（5）により加熱されるサセプタ（4）上の複数の前記基板（22）が前記多層構造（21）で同時にコーティングされ、個々の補正值（ γ ）が前記基板（22）のそれぞれに対して計算され、かつ前記基板（22）の温度の個々の実際の値（ T_c ）が個々の前記補正值（ γ ）を用いて計算されることを特徴とする請求項1～11のいずれかに記載の方法。

【請求項13】

請求項1～12のいずれかに記載された方法を実行するための装置であって、

リアクタハウジング（１）に配置されたガス入口部材（２）と、
それを通してプロセスチャンバ（８）へと供給されるプロセスガスと、
プロセスチャンバ（８）に面する表面を備えるサセプタ（４）と、を有し、
サセプタが加熱装置によって加熱可能であること、
基板（２２）が前記プロセスチャンバ（８）に面する前記サセプタの表面上に配置可能
であること、並びに、

前記プロセスチャンバ（８）に面した前記基板（２２）の広域面の放射率（ E ）及び反
射率（ R ）を計測するために１つ以上の光学測定装置（１０、１１）を備え、かつ少なく
とも１つの光学測定装置（１０、１１）によって測定された前記放射率（ E ）及び前記反
射率（ R ）を用いて前記基板（２２）の温度を調整するための調整装置を備え、コンピュ
ータデバイス（１５）が補正值（ γ ）を決定し、前記補正值（ γ ）を用いて前記温度の実
際の値（ T_c ）を計算可能である、前記装置において、

10

請求項１～１２のいずれかに記載の方法に従い、第１部分（１８）の第１層（２２、２
８）上の前記多層構造（２１）の前記第２部分（１９）の前記第２層（３０、３１）を堆
積する直前であって、前記基板（２２）上の前記多層構造（２１）の前記第１部分（１８
）の第１層（２２～２８）の堆積中に、前記補正值（ γ ）が決定されるように、前記コン
ピュータデバイス（１５）がプログラムされることを特徴とする装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

20

本発明は、第１部分と第１部分上に堆積される第２部分とを具備する多層構造で基板の
コーティングをするための方法に関する。少なくとも第２部分の堆積中に、層が位置する
基板の広域面における放射率及び反射率が少なくとも１つの光学測定装置によって測定さ
れ、基板の広域面の温度の実際の値が予め決定された補正值を用いて計算され、そして加
熱装置が基板の広域面の温度の目標値に対して基板の温度を制御するために実際の値を用
いて調整される。

【０００２】

本発明はさらにその方法を実行するための装置に関する。第１層の配置上に多層構造の
第２部分を堆積する直前であって、基板上の多層構造の第１部分の堆積中に補正值が決定
されるようにコンピュータデバイスがプログラムされる。

30

【背景技術】

【０００３】

特許文献１は本発明の技術的背景を構成する。そこで開示された放射率補正されたパイ
ロメトリのための方法は、反射率（リフレクティビティ）補正された若しくは反射率（リ
フレクタンス）補正された、又は放射率補完されたパイロメトリとも呼ばれ、測定対象が
未知で連続的に変化する光学特性を具備する際に、薄膜堆積中の非接触の光学的温度測定
に使用される。

非接触の温度測定のためのパイロメトリ方法において、高温の測定対象から放射される
熱放射とその対象の温度との間の関係が使用される。この関係は、よく知られたプランク
の放射式によって記述され、実際にも、対象の放射の度合いを除き、対応する事前の較正
を用いて明確に捕捉される。

40

測定対象は、温度のモニタリング又は調整を目的としかつ光学的にアクセス可能なプロ
セスチャンバ内の任意の表面であってよい。本発明において、測定対象は、特に、ＩＩＩ
族（Ａｌ、Ｇａ、Ｉｎ）及び窒素の異なるほぼ化学量論的化合物を有する半導体層構造が
形成される堆積プロセス中のプロセスチャンバ内の基板の表面又は基板となる。

【０００４】

先行技術は、非特許文献１～３によっても開示されている。

【０００５】

先行技術は特許文献２を含み、複数種類に関連した装置を開示する。

【０００６】

50

放射率補正の既知の方法は、測定対象の表面の反射率を測定することによって、欠いている未知の放射率の度合いを決定することに基づいている。不透明な基板の場合、放射率は、等式 $\varepsilon = 1 - \rho$ を用いたキルヒホッフの法則の助けにより決定される。パイロメータの検出波長は、選択された基板（この場合ではシリコン）が典型的な動作温度（ $T = 600 \sim 1200^\circ\text{C}$ ）での波長に対して不透明となるように、すなわち、 800 nm から 1000 nm までの範囲の値で、選択される。

反射率は、熱放射と正確に同じ波長で測定され、その方法は十分に機能する。このために必要な光は、レーザによって供給されてもよい。実際にパイロメータは急勾配の測定波長をもたず、その代わりに波長間隔（およそ $\pm 10 \text{ nm}$ 、より狭く又は広くてもよい）をもつ。この間隔幅と放射及び反射率測定の重心波長は、可能な限り相互に一致していなければならない。

10

反射率は、センサの位置での定義された波長の光が照射され、ウエハの表面上に垂直入射したうえで反射し、そしてパイロメータの測定と可能な限り同じ範囲で反射させることで、測定される。事前の較正の助けにより反射光の測定された信号強度から反射率が決定される。実際には、対象の熱放射と反射率とを同時に測定することが不可能であるが、交互に、時間的に離間した状態で、測定されることが多く、それにより反射率の測定が熱放射の測定に干渉しない。

【0007】

温度の正確な測定のためには、2つの異なった較正が必要となる。較正の実行が、測定信号から温度を計算する際に組み入れる較正パラメータの決定を可能にする。

20

これは黒体放射源（黒体炉、特別の基準源）を使用した放射測定の較正であり、強度信号と測定温度のリンクを形成する。測定中に、この方法で取得された較正パラメータの使用が、未知の放射率の効果によってまだ補正されていない“原温度”の決定を可能にする。これと独立した較正ステップは較正パラメータの決定のために使用され、間隔 $0 \sim 1$ の放射率がそれぞれの測定された放射率信号に割り当てられる。

この較正ステップは、シリコンのようなよく知られた反射率（不透明な基板の場合放射の度合い）の基板上で、既知の温度と汚染されていない表面での脱離（自然酸化物の除去）のプロセスの直後、層堆積の開始前に、実行される。

【0008】

非特許文献 1～3 に記述されるように、測定プロセスにおける温度は最初に以下のように計算される。

30

【数 1】

$$\frac{1}{T_c} = \tau - \frac{\lambda}{c_2} \ln \left(\frac{E}{1-R} \right) \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{T_{cal}} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \left(\frac{1-R_{cal}}{S_{cal}} \right) \quad (2)$$

40

【0009】

上記の式で示す用語は以下の変数を示す。

T_c : 放射率補正された温度

E : 熱放射測定の較正された信号（測定信号と入射放射との間の線形関係）

R : 反射率測定の較正された信号（測定信号と入射放射との間の線形関係）

T_{cal} 、 S_{cal} : 原温度を決定するための較正パラメータ

R_{cal} : 反射率測定の較正パラメータ

50

λ : パイロメータと反射率測定の変長

C_2 : 第2放射定数

【0010】

次のように式をよりシンプルに立て直すこともできる。

【数2】

$$T_c = \frac{B}{\log E - A + \log(1 - R)} \quad (3)$$

10

A、B : 原温度のための校正パラメータ

【0011】

上述の公知の放射率補正の方法を用いない場合に、一定の成長率での薄膜の堆積中に、正弦曲線で振動する温度測定が観察され、これは、半透明の薄膜における干渉効果（ファブリペロー振動）に関連している。

950℃から1100℃までの範囲の温度でシリコン上にGaN又はAlGaNのMOCVDによる堆積に係る特定の場合において、±30℃まで振動が増加する（図4も参照）。この方法の目的は温度の振動を±2℃未満に、より良くは±1℃未満に抑えることにある。

20

【0012】

仮に非特許文献1～3に記載された先行技術の温度測定方法が開示されている通りに実行されると、後述する多くの誤差が発生する。これらの誤差の原因の全ては、不完全に又は人為的に高められて実行される放射率補正へとつながる。誤った放射率補正は、振幅が所望の誤差の程度よりも大きい持続的な温度振動として現れる。

【0013】

特にシリコン上のGaN（Al-GaN）系材料は、半透明の層と不透明の基板との組み合わせ同様に、層材料とウエハ材料の屈折率の値が、測定された反射率Rに、0に近い値と0.5との間での振動を引き起こすため、特に記述された誤差の原因になりやすい。

【0014】

観察された誤差原因は、以下の誤差である可能性があり、実際にも生じる。

- ー 反射率の校正中に校正対象の反射率の正確な値が未知であるため、校正に使用される反射率の値が物理的な反射率と一致せず、そして放射率補正のために使用される反射率が、不正確であること。
- ー 測定光学系の調整とセットアップに際した誤差。
- ー 半導体層構造における層境界で散乱し、実際に反射した光の一部が検出されない。
- ー プロセスチャンバの壁とウエハ表面上の多重反射により測定ヘッドへ入射する、プロセスチャンバの高温の表面からの散乱した放射。

30

【0015】

電力変換又は高周波増幅のための回路用トランジスタのような電子部品の製造において、測定されたウエハ温度が閉制御ループにおける温度調整のために使用されるため、本発明の基礎とする公知の方法の実施形態によると、堆積プロセスの制御及び正確な再現性並びにウエハごとの使用に適した構成要素の収率が著しく制限される。

40

温度調整は、測定温度が絶えず一定の目標値に一致するように、加熱装置を制御し、そうして物理的な温度が、完全に補正されていない温度振動の持続的な振幅に対応して振動し、それが、測定アーティファクトを示す。

構成要素は、基板上に堆積された多層構造を備え、第1部分と第2部分を備える。第1部分において、遷移層、特にAlGaN、及びバッファ層、特にGaNが堆積される。2次元電子ガスがGaN層とAlGaNバリア層との間の層境界の領域に形成されるように、AlGaNバリア層がGaNバッファ層上に堆積される。

50

再現性に関するネガティブな効果は、とりわけ構成要素の構造が典型的にはS i 基板上の薄いA l Nシード層、遷移層シーケンス、厚いG a Nバッファ層シーケンス、及びA l G a N又はA l I n Nの相対的に薄い温度感受性バリア層からなる機能的ブロックの連続から組み立てていることに、原因がある。

バッファ層の終端における物理的な温度の目標値からの偏差は、持続的な測定温度の振動のランダムな位相位置に依存して実行ごとに又はウエハごとに異なる値となり、それが、例えば構成要素の機能にとって重要であるバリア層の組成に関する異なる値へと変換される。

【0016】

概説した誤差原因に対する補正のために、この測定方法のための以下の理論的な補正が、非特許文献1～3で開示されている。このアプローチの出発点は、一連の誤差原因の効果を1つの追加的な補正值 γ を用いて効率的に補正することができるという数学的に導出可能な事実であり、それによって持続的な振動が理論的にゼロに近づく値にまで減少し得る。

10

【0017】

補正は、次のように行われる：

【数3】

$$\frac{1}{T_c} = \tau - \frac{\lambda}{c_2} \ln \left(\frac{E}{1 - R + \gamma} \right) \quad (4)$$

20

$$\tau = \frac{1}{T_{cal}} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \left(\frac{1 - R_{cal} + \gamma}{S_{cal}} \right)$$

【0018】

上述した発生する誤差原因を補正するためにパラメータ γ を導入した補正に関する数学的等価性は、一般的な形式で示され得る。これに関連して、 γ はRに線形的に依存し得る。 γ のオフセットは、測定光学系内での光源の反射のみに依存する。そのオフセットは追加的な較正ステップで補われる。全ての残りの部分はRに線形的に依存する。 $\gamma = \gamma(R)$ を用いて簡略化した表現では、上の式は、以下のように立て直し得る。

30

【数4】

$$T_c = \frac{B}{\log E - A + \log(1 - \gamma \cdot R)} \quad (5)$$

40

【0019】

特許文献1及び非特許文献1～3において、追加の較正パラメータ γ を計算するために、可能な限り最も大きな振動が発生する、特定の半導体構造、具体的にはDBR構造（DBR=Distributed Bragg Reflector）のための完全なコーティングの実行を行うこと、及びその実行の終了後に振動が可能な限り低減されるようにパラメータ γ を調整することが提案されている。パラメータ γ は、手動又は最適化タスク（最小分散方法）によって又は線形回帰によって決定し得る。

【0020】

50

公知の方法は、実際の生産環境において多くの欠点を有する。

- － 別途の較正の実行に伴う対応する生産の中断時間。
- － パラメータ γ を計算する際に自動温度制御を停止する必要がある。
- － 特殊な構造で較正の実行を行う際に、リアクタ固有のパラメータ γ のみが計算され、個々の層のための又は異なるタイプの構成要素の構造のための補正パラメータ γ が決定されない。振動最小化パラメータ γ が構成要素の構造における異なる個々の層で異なり得ることが観察されている。
- － 頻繁に必要なパラメータの再決定の結果としての相当な人的拘束。
- － 手動で決定する場合におけるパラメータ間の適切なマッチングに関する主観的な評価。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0021】

【文献】米国特許第6,398,406号明細書

【文献】独国特許出願公開第10 2018 106 481号明細書

【非特許文献】

【0022】

【文献】W.G. Breiland, Technical Report SAND2003-1868, June 2003.

【文献】インターネット<URL : <https://www.osti.gov/biblio/820889>>

【文献】インターネット<URL : <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2003/031868.pdf>>

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0023】

本発明の課題は、実際の値を計算する際に、実際に発生し、振動する温度の値につながる誤差及び測定アーティファクトを補正することであり、少なくとも、1つ以上の活性領域を有する多層構造の第2部分の堆積中に、最小限で振動する計算された変数が、調整のために利用できるようにすることであり、特に補正值の決定のための分離した堆積プロセスは省略されてもよい。

【0024】

請求項に記載された発明によって課題が解決され、従属項が独立項の有利なさらなる展開を示すだけでなく、それら自身のメリットが課題の解決策でもある。

【0025】

まず、基本的に、公知の方法において、放射率及び反射率は基板の表面で測定される。放射率及び反射率は同時に測定されてもよい。しかしながら、2つの直に連続した測定において、決定することも可能である。上記の式、特に式(5)及び本願の開示内容に含まれる非特許文献1～3の詳細な記述により、放射率補正された実際の温度が決定されてもよい。この目的のために、第1部分と第1部分上に堆積される第2部分を含む多層構造で基板をコーティングする際に、第1部分の堆積中に補正值が決定される。この補正值は第2部分の堆積中に基板温度の実際の温度の計算のために使用される。

その方法は、導入部で記述した方法に従って補正值が最初に計算されるコンピュータデバイスを含む装置において実行される。本発明によれば、これが、AlGaNの遷移層及び／又はGaNのバッファ層を含んでもよい多層構造における第1部分の堆積と同時に実行される。

多層構造の第2部分の堆積直前に計算される補正值は、基板温度の調整のための第2部分の堆積中に、基板温度の実際の値を決定するために使用される。多層構造の第2部分は好ましくは多層構造の活性層又は層領域を含む。例えば、第2部分が、GaNのバッファ領域の上端領域を含んでもよく、バッファ層上に堆積される少なくともAlGaNバリア又はAlInNバリアの下端領域を含んでもよい。多層構造の第2部分は、特に直に隣接する層の領域を含み、それがそれらの境界の領域において2次元電子ガスを形成し得、それにより多層構造を電界効果トランジスタの製造に使用することができる。

10

20

30

40

50

【0026】

本発明による公知の方法のさらなる発展により、多層構造の実際の堆積プロセスを実行する前に、補正値を決定するための別途の堆積プロセスを実行する必要はもはやない。補正値が多層構造の堆積中に、実際に多層構造の活性領域の堆積前に、ある程度その場で (in situ) 決定される。さらに、多層構造の堆積中に、各基板のための個々の補正値を決定することも可能である。

【0027】

方法の好ましい変形例は、特に、多層構造の第1部分が複数のバッファ層又は遷移層の多層構造を備えることを含む。多層構造の第2部分は好ましくは少なくとも1つのバリア層を含む。放射率及び／又は反射率の測定は800nmと1000nmの間の範囲の波長において実行されることが好ましい。基板はこの波長の光に不透明であってもよい。少なくとも1つの領域、好ましくは第1及び第2部分の層は、この波長の光に対して透明である。

【0028】

補正値は、好ましくは、時間的に一定に維持された基板の温度で計算される。この目的のために、基板は一定の熱出力でかつ基板温度の調整なしに加熱されてもよい。基板は、補正値決定フェーズに先立って、制御された方法で目標温度とされるよう設けられてもよい。上記の理由により、測定された基板温度は、このプロセス中に振動し得る。調整は、基板が一定の熱出力によってのみ加熱されることによって中断される。

一定時間後、その間に基板の温度が定常状態に達し、非特許文献1～3及び特許文献1の導入部において記載された方法により、補正値が決定され、補正値決定フェーズにおいて、その間に基板の温度が一定に保たれる。補正値の決定は単一のステップで行ってもよい。しかしながら、多層構造の第1部分の堆積中に、それぞれで中間補正値を決定するために、基板の温度を複数のステップで一定に保つことも可能である。

このようにして、上記の式(1～5)、とりわけ式(5)を用いて、反射率に依存する補正値が、式(5)により計算されたものとして記述された実際の温度 T_c が最小限の振動を示すように、例えば線形回帰である数値最適化によって決定される。補正値決定フェーズ又は中間補正値決定のためのフェーズのための時間的な長さは、少なくとも振動の周期の4分の1及び／又は少なくとも40秒、典型的には約100秒である。

【0029】

補正値の計算は、多層構造の第1部分の堆積中にのみ実行されるものでなくともよい。補正値のさらなる計算は、とりわけ、第1部分の堆積中に得られた補正値を最適化するために、第2部分の堆積中に実行されてもよい。

【0030】

その後、第2部分の堆積中に、そこでの温度測定は、多層構造の第1部分の堆積中に、1つ以上のステップにおいて得られた補正値を用いて補正されてもよい。

次に、補正値とその後の温度の実際の値との両方の計算は、測定装置のプログラムによって又はコンピュータデバイスのプログラムによって実行されてもよい。これは自動的に実行され得る。補正値の計算は多層構造の第1部分の堆積中に連続的に最適化されてもよい。好ましくは補正値の計算は、基板の表面温度を可能な限り一定の値で維持する自動温度調整が層構造に有害な影響がないようにスイッチオフされ得る構成要素構造の堆積のフェーズにおいて生じる。実際の温度の計算のためのパラメータ決定は、好ましくは調整がスイッチオフしている間に行われてもよい。遷移層シーケンスがシード層とバッファ層との間に堆積されるコーティングプロセスの時間帯が、この点で特に適していることが証明された。バッファ層の堆積の開始時もパラメータ決定及び補正値の決定に適している。

このように実際の物理的溫度が十分一定に保たれるため、層構造の堆積中における補正値の連続した計算は有利である。振動の時間帯の品質次第で、全部の振動期間の一部分は、補正値の計算をするのにすでに十分である。この計算が制御ループの一部となり、計算誤差の決定は、自動化された計算が次の部分のために使用されるか否かに関わらず、有利に使用され得る。

10

20

30

40

50

【0031】

堆積プロセスで計算された補正值及び／又は前記プロセス中に計算されたその他のパラメータを使用して、当初記載した堆積プロセスに続く別の堆積プロセスにおいて基板温度の実際の値を決定してもよい。

【0032】

本方法を実行するための装置は、リアクタハウジングと、そこに配置されたガス入口部材を備え、ガス入口部材を用いてV主族の元素の水素化物及びIII主族の元素から構成される有機金属化合物を含み得るプロセスガスを供給し得る。V主族の元素は、窒素、ヒ素、リン、又はテルルであってもよい。III主族の元素はアルミニウム、ガリウム、又はリンであってもよい。プロセスガスは例えば窒素である不活性ガスと共にプロセスチャンバへと供給される。

10

プロセスチャンバの底は、サセプタによって形成され得る。基板はサセプタ上に支持され得る。ただしサセプタが、特にサセプタの中心周りに円弧上に配置され、少なくとも1つの基板が載置される、1つ以上の基板キャリアを含むように設けられてもよい。ガス入口部材はプロセスチャンバの中心に配置されてもよい。プロセスチャンバはプロセスチャンバ天井によって上方に境界が定まる。

プロセスチャンバは、例えば光学測定装置、パイロメータ、レーザ、又は複数のパイロメータのビーム経路が通過する開口を有していてもよい。ビーム経路は測定ポイントで基板に当たり、それによって基板の表面又は基板上で堆積した層の表面の反射率及び放射率を1つ又は複数のパイロメータを用いて測定することができる。導入部で記載した方法により、温度は反射率及び放射率から決定されてもよい。

20

実際の温度の計算のために使用され、一定の層成長の結果としての層厚の変化を原因として生じる測定値の振動ゆえに、上述の方法を用いた補正は必要である。これは、本装置のコンピュータデバイスを用いて実行される。これは補正值が多層構造の第1部分の堆積中に計算され、かつ多層構造の第2部分の堆積中に使用されるようにプログラムされる。

【図面の簡単な説明】

【0033】

以下にて、図を参照し、本発明に係る例示的实施形態を説明する。

【図1】図1は、方法の実行のための装置の概略的断面図を示す。

【図2】図2は、図1におけるI-Iラインに沿った概略的断面図である。

30

【図3】図3は、シリコン基板22上に堆積した多層構造21の例示的实施形態である。

【図4】図4は、補正值決定フェーズ中の反射率Rと放射率Eの時間曲線と、補正無しにそこから計算された温度を概略的に示す。

【図5】図5は、図4に従った表示の態様で、補正を用いた多層構造の活性領域の堆積中における、反射率R、放射率E、及びそこから計算される補正された温度を示す。ここでは温度が微弱に振動している様子が示されている。理想的には、温度の時間曲線は変動がないか、より小さな変動であって、すなわち図では直線となる。

【発明を実施するための形態】

【0034】

図1及び図2に示すCVDリアクタは、リアクタハウジング1、そこに配置された加熱装置5、加熱装置5の上方に配置されたサセプタ、並びに例えばTMGa、TMA1、NH₃、AsH₃、PH₃、及びH₂、を供給するためのガス入口部材2と、を有する。サセプタ4は回転駆動装置14を用いて垂直回転軸a周りを回転させられる。この目的のために駆動シャフト9は、回転駆動装置14とサセプタ4の下面との両方に接続される。

40

【0035】

基板7は加熱装置5から離れた方に面したサセプタ4の水平面上に位置する。基板ホルダ6が設けられ、その上に基板7が載置される。基板7は、回転軸aの半径方向外側に位置し、基板の収容によって所定位置に保持される。

【0036】

2つの測定装置が設けられてもよい。放射率測定装置10がパイロメータの方式であっ

50

てもよい。入力ビームを2つの測定装置10、11へと分離させることができるビームスプリッタ12が設けられてもよい。ビーム経路は測定ポイント13で基板に当たる。図2は、サセプタ4の回転中に測定ポイント13が全ての基板上を通過することを示す。

【0037】

図3は、コーティングプロセスにおいて複数の連続するコーティングステップで順に堆積される多層構造を示す。まず、AlN又はInNの核生成層23がシリコン基板22上に堆積される。次に第1AlGaN層24が核生成層23上に堆積され、続いて第2AlGaN層25及びその上に第3AlGaN層26が堆積される。3つのAlGaN層24～26が遷移層を構成する。遷移層のアルミニウム含有量は段階的に減少させてもよい。

【0038】

次に、GaNの第1バッファ層27が遷移層24～26上に堆積される。その層はCドーピングされてもよい。次に、ドーピングされていなくともよい、同じくGaNの第2バッファ層28が第1バッファ層27上に堆積される。

【0039】

核生成層23から始まり第2バッファ層28の上端の領域まで延在する多層構造21の領域は、多層構造21の第1部分と呼ばれる。第1部分に属さないバッファ層の上端の領域が約100nmの最小厚を有する。

【0040】

AlGaN又はAlInNのバリア層30が第2バッファ層28上に堆積される。厚みが第2バッファ層28の厚みの約10分の1であってもよい少なくともバリア層30の下端領域が、第2バッファ層28の上端領域と同様に、多層構造21の第2部分と呼ばれる。

【0041】

図3において、補正値が計算される、符号17、17'で表された2つの領域が示される。図3に係る図示において、これらの補正値決定フェーズ17、17'は相互にかつ第2部分19と空間的に分離される。多層構造の堆積中に、補正値決定フェーズ17、17'は、相互にかつ第2部分19の堆積の開始から時間的に分離される。補正値の任意の最適化は第2部分19の堆積の時間中に、すなわち補正値が使用されている時に、なおも実行されてもよい。

【0042】

次に、PドーピングされたGaNのカバー層がバリア層30上に堆積される。しかしながら、カバー層31及び第2バッファ層28は多層構造21の第2部分の一部として含めてもよい。

【0043】

基板温度の実際の値 T_c は、第1部分の堆積中に計算される。これが以下の式に従って行われてもよい。

【数5】

$$T_c = \frac{B}{\log E - A + \log(1 - R)} \quad (3)$$

【0044】

しかしながら、実際の値は以下の式に従って計算されてもよい。

【数6】

10

20

30

40

50

$$T_c = \frac{B}{\log E - A + \log(1 - \gamma \cdot R)} \quad (5)$$

上記式における用語は、以下の変数を示す。

T_c ：放射率補正された温度

E ：熱放射の測定の較正された信号（測定信号と入射放射との間の線形関係）

R ：反射率測定の較正された信号（測定信号と入射放射との間の線形関係）

T_{cal} 、 S_{cal} ：原温度を決定するための較正パラメータ

R_{cal} ：反射率測定の較正パラメータ

λ ：パイロメータと反射率測定の波長

C_2 ：第2放射定数

【0045】

補正值 γ 同様にパラメータ A 及び B は適合されるか計算される。

【0046】

層の反射率は放射率測定装置10を用いて測定される。連続的に層が成長し反射率及び層厚が変化するために、図4にて概略的に示すように放射率 E が振動する推移を有する。反射率測定装置11を用いて測定される反射率 R は同じ理由から振動する推移を有する。実際の値 T_c は目標値 T_s に対して基板温度を調整するために使用される。これが、図4に示される基板の物理的な温度も振動する推移を有する理由となる。振動曲線の周期は、波長が950nm、屈折率 n が約3で、約100から200である。

【0047】

第1部分の堆積中における1つ以上の補正值決定フェーズ17、17'において、補正值 γ 又は複数の中間補正值 γ が計算される。補正值決定フェーズ17、17'の時間は、少なくとも周期の4分の1の時間に等しい。基板表面の温度 T は、補正值決定フェーズ17、17'の前に目標値に対して調整される。放射率 E 及び反射率 R の振動により、図4に示すように、温度が振動する。物理的な基板温度 T が、調整を中断することによって補正值決定フェーズ17、17'の直前で一定に保たれる。温度 T は定常状態に達する。補正值決定フェーズ17、17'において、加熱装置は調整されず、しかし一定の出力が印加される。放射率 E 及び反射率 R の測定値は振動する。しかし温度 T は一定のままである。コンピュータデバイス15を用いることで、特に式(5)の適用において、計算された温度 T_c ができる限り小さくなるように、補正值 γ が変えられる。この文脈で、較正パラメータ A 及び B が同時に決定される。

【0048】

補正值 γ の計算は補正值決定フェーズ17、17'の後に行われてもよい。重要な点は、その計算を実行することのできる補正值決定フェーズにおいて測定値が記録されることである。

【0049】

複数の補正值決定フェーズ17、17'が設けられている場合には、補正值を段階的に最適化することができる。

【0050】

上端のバッファ層28とその上に位置するバリア層30との間における境界層29の堆積のために、多層構造19の第2部分において、そして補正フェーズにおいて、基板温度の実際の値が式(5)に従って計算される。そうして基板表面の物理的な温度 T がおおむね図5に示すように推移する。振動は図4に示された温度の曲線よりも小さな振幅になる。理想的にはその温度の曲線はそれ以上に振動しない。従って基板表面の温度の実際の値を決定するためにバッファ層28及びバリア層30の堆積中に放射率補正されたパイロメ

トリが、特に実行されるよう設けられ、同じ堆積プロセス中に直前に補正值 γ が得られる。

【0051】

図2では全部で6枚の基板が示される。各基板のために個々に割り当てられた補正值 γ が計算され、そして多層構造の第2部分の堆積中に使用される。

【0052】

上述は、本願の範囲全体に収まる発明の説明に資するように意図し、それは少なくとも後述の特徴の組み合わせを通して関連技術をそれぞれ独立して進展もさせ、前記特徴の組み合わせのうち、2つ、複数、又は全てもまた組み合わせ得る。

【0053】

第2部分19の堆積直前に行われる第1部分の堆積中に補正值 γ が決定されることを特徴とする方法。

【0054】

多層構造21の第1部分18が複数のバッファ層又は遷移層23～28を含むこと、及び／又は多層構造21の第2部分19が少なくとも1つのバリア層30を備えることを特徴とする方法。

【0055】

放射率E及び／又は反射率Rの測定が800nmと1000nmの間の範囲における波長 λ にて実行されること、及び／又は、放射率E及び／又は反射率Rが測定される波長 λ の光に対して基板22が不透明であり、かつ第1部分と第2部分の層、ただし第1部分及び第2部分19の領域における少なくともいくつかの層が透明又は半透明であることを特徴とする方法。

【0056】

補正值の決定直前に基板22が、時間的に一定に維持される、補正值 γ が決定される測定温度 T_M に加熱され、及び／又は、基板22が補正值決定フェーズ17、17'中に一定の熱出力を用い、温度制御することなく加熱されることを特徴とする方法。

【0057】

放射率E及び反射率Rが多層構造21の堆積中に周期的に変化し、補正值決定フェーズ17、17'の時間的長さが少なくともその周期の4分の1及び／又は最大で2分の1又は1周期及び／又は最大で100秒に等しいことを特徴とする方法。

【0058】

補正值 γ の決定が複数の補正值決定フェーズ17、17'で実行され、それぞれが間隔を置いて時間的に連続して完了し、中間補正值がそれぞれにおいて決定され、補正值 γ が中間補正值を用いて計算され、及び／又は中間補正值が第2部分の堆積中に補正值 γ を最適化するために決定されることを特徴とする方法。

【0059】

基板22がシリコン基板であること、及び／又は、多層構造21がIII族及びV主族の元素の層を含むこと、及び／又は、堆積中に補正值が決定される1つ以上のバッファ層又は遷移層23～28がガリウム、窒素、若しくは／又はアルミニウムを含むこと、及び／又は、バリア層10がAlGaN層又はAlInN層であること、及び／又は、第1部分18が組成において第2部分29の少なくとも1つの層30と類似する少なくとも1つの層23～26を含むことを特徴とする方法。

【0060】

CVDリアクタのリアクタハウジングにおいて、加熱装置5によって加熱されるサセプタ4上の複数の基板が多層構造21で同時にコーティングされ、個々の補正值 γ が基板22のそれぞれに対して計算され、かつ、基板温度の個々の実際の値 T_C が個々の補正值 γ を用いて計算されることを特徴とする方法。

【0061】

請求項1～12のいずれかに記載された方法に従って、第1層上の多層構造21の第2部分19の堆積の直前に、基板22上の多層構造21の第1部分18の堆積中に補正值 γ が決定されるようにコンピュータデバイス15がプログラムされていることを特徴とする

10

20

30

40

50

装置。

【0062】

開示された全ての特徴は、（それ自体のために、また互いに組み合わせられて）本発明に不可欠である。ここでの出願の開示は、関連する／添付された優先権書類（写し及び先の出願）の開示内容をその内容全体に含み、それはこれらの書類の特徴を本願の請求項に組み込む目的でもある。従属請求項は、特にこれらの請求項に基づいて分割出願を行うために、引用される請求項の特徴がなくても、先行技術の独立した発明性のあるさらなる発展を特徴とする。各請求項で特定された発明は、前述の説明で特定された、特に参照符号が付与された、及び／又は符号の説明で特定された、1つ以上の機能を追加で有することができる。本発明はまた、特に、それらがそれぞれの使用目的に明らかに不要であるか、又は技術的に同じ効果を有する他の手段で置き換えることができる限り、前述の説明で述べた特徴の個々のものが実装されない実施形態に関する。

10

【符号の説明】

【0063】

- 1 リアクタハウジング
- 2 ガス入口部材
- 3 ガス供給ライン
- 4 サセプタ
- 5 加熱装置
- 6 基板ホルダ
- 7 基板
- 8 プロセスチャンバ
- 9 回転軸
- 10 放射率測定装置
- 11 反射率測定装置
- 12 ビームスプリッタ
- 13 測定ポイント
- 14 回転駆動装置
- 15 コンピュータデバイス
- 17 補正值決定フェーズ
- 18 多層構造の第1部分
- 19 補正フェーズ、多層構造の第2部分
- 20 決定フェーズ
- 21 多層構造
- 22 基板
- 23 核生成層
- 24 遷移層
- 25 遷移層
- 26 遷移層
- 27 バッファ層
- 28 バッファ層
- 29 境界層、2次元電子ガス
- 30 バリア層
- 31 カバー層
- γ 補正值
- λ 波長
- a 回転軸
- A 較正パラメータ
- B 較正パラメータ
- E 放射率

20

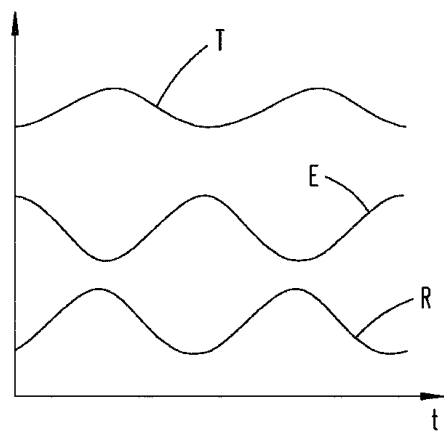
30

40

50

【図 5】

Fig. 5



10

20

30

40

50

フロントページの続き

ドイツ国、52080 アーヘン、ヘレンベルクシュトラッセ 12

審査官 井上 徹

- (56)参考文献 米国特許第6349270 (US, B1)
特開2018-166204 (JP, A)
米国特許第6398406 (US, B1)
特開2019-106462 (JP, A)
特表2008-518472 (JP, A)
国際公開第97/004292 (WO, A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G01J 5/00-5/90
C23C 16/00-16/56
H01L 21/205
H01L 21/31
H01L 21/365
H01L 21/469
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)