

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4031712号
(P4031712)

(45) 発行日 平成20年1月9日(2008.1.9)

(24) 登録日 平成19年10月26日(2007.10.26)

(51) Int. Cl.			F I		
GO 1 N	21/27	(2006.01)	GO 1 N	21/27	B
GO 1 B	11/06	(2006.01)	GO 1 B	11/06	Z
GO 1 N	21/00	(2006.01)	GO 1 N	21/00	B
GO 1 N	21/64	(2006.01)	GO 1 N	21/64	Z
HO 1 L	21/66	(2006.01)	HO 1 L	21/66	L

請求項の数 5 (全 12 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2003-9515 (P2003-9515)	(73) 特許権者	000006013
(22) 出願日	平成15年1月17日(2003.1.17)		三菱電機株式会社
(65) 公開番号	特開2004-219371 (P2004-219371A)		東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(43) 公開日	平成16年8月5日(2004.8.5)	(74) 代理人	100062144
審査請求日	平成18年1月12日(2006.1.12)		弁理士 青山 稜
		(74) 代理人	100098280
			弁理士 石野 正弘
		(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
		審査官	横尾 雅一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体多層膜の分光計測方法および分光計測装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

発光スペクトル測定時に半導体多層膜の試料を励起する励起光を発生し、反射スペクトル測定時に前記の試料への外部変調光を発生する励起光源と、
 反射スペクトル測定のためのプローブ光を発生する白色光源と、
 発光スペクトル測定時に前記の試料からの発光を分光し、反射スペクトル測定時に白色光源からのプローブ光を分光して試料に入射する分光器と、
 発光スペクトル測定時に前記の分光器から出射された光を検出し電気信号に変換する第1検出器と、
 反射スペクトル測定時に励起光源により外部変調光が照射され前記の分光器により分光されたプローブ光が入射された前記の試料からの反射光を検出し電気信号に変換する第2検出器と、
 発光スペクトル測定時に前記の分光器からの光を第1検出器の方に導き、反射スペクトル測定時に白色光源からの光を前記の分光器の方に導く光軸切り替え部材と、
 反射スペクトル測定時に前記の光軸切り替え部材に白色光源からの光を前記の分光器の方に導かせて、第1検出器により検出された電気信号を収集し、発光スペクトル測定時に前記の光軸切り替え部材に前記の分光器からの光を第1検出器の方に導かせて、第2検出器により検出された電気信号を収集する制御器と
 を備える半導体多層膜の分光計測装置。

【請求項2】

10

20

前記の制御器は、さらに、第2検出器からの電気信号を基に変調反射率の光子エネルギー依存性を計算し記録することを特徴とする請求項1に記載された分光計測装置。

【請求項3】

前記の励起光源は、周期的な断続光に変換する変調器を備え、さらに、断続光の位相に合わせて前記の第1または第2の検出器からの電気信号を増幅するロックインアンプを備えることを特徴とする請求項1または2に記載された分光計測装置。

【請求項4】

半導体多層膜の試料に励起光を照射し、試料からの発光を分光器を通過させて検出し、分光器を掃引して、検出された発光強度を光子エネルギーの関数として記録し、白色光を前記の分光器に入射し、分光器から出射された単色光を前記の試料に入射し、外部変調光を前記の試料に照射した状態で、分光器を掃引して、試料からの反射光を検出し、

検出された反射スペクトルを光子エネルギーの関数として記録する

半導体多層膜の分光計測方法。

【請求項5】

さらに、

検出された反射スペクトルより、反射率変化の光子エネルギー依存性を計算し、その振動パターンの極値から次式

【数式1】

$$\frac{4}{3\pi} (E_m - E_{0,n})^{3/2} = \left(\frac{e^2 \hbar^2 F_{n+1}^2}{2\mu_{n+1}} \right) (m - \delta_n / \pi)$$

(ここで、 E_m は振動パターンの m 番目の極値のエネルギーであり、 $E_{0,n}$ は半導体多層膜の n 番目の層のバンドギャップエネルギーであり、 F_n は n 番目の層の電界強度であり、 e は素電荷であり、 μ_n は n 番目の層の電子・正孔換算質量であり、 δ_n は次式

【数式2】

$$\delta_n = \sum_{j=1}^n 2k_j d_j \cos \theta_j$$

で与えられる量であり、ここで k_j と d_j は j 番目の層における光の波数および膜厚であり、 θ_j は j 番目の層における屈折角である)により電場強度 F と膜厚 d を求めることを特徴とする請求項4に記載された分光計測方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、多層膜構造からなるエピタキシャルウェハーの品質評価/管理に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

半導体素子の原材料として用いられる多層膜構造からなるエピタキシャルウェハーの品質評価/管理は、不良品数の低減および製造コストの削減において欠かすことができない。

これまで主たる対象となってきたエピタキシャルウェハーの品質評価項目は、膜厚および組成である。これらの項目のうち膜厚評価に対しては、電磁波の干渉を応用した赤外線干渉法、X線干渉法、または、入射光と反射光との間での偏光度が変化することを応用した偏光解析法(エリプソメトリー)といった手法が用いられてきた。一方、エピタキシャルウェハーを構成する各層の組成は、励起光(例えばレーザー光)を照射した際に発生する発光(ホトルミネッセンス)を分光測定すること(PL分光法)によって求められるバンドギャップエネルギーを介して評価されてきた(たとえば、非特許文献1参照)。

【0003】

エピタキシャルウェハーの特性には、膜厚および組成以外の項目も数多くあり、例えば内

10

30

40

50

部電場強度が挙げられる。内部電場強度は、エピタキシャルウェハーのドーピング濃度や表面/多層膜界面の状態に依存していることが知られている。さらに最近の研究で、ヘテロ接合バイポーラトランジスタの電流増幅率との間に相関があることが報告されている。それゆえ近年では、内部電場強度がエピタキシャルウェハーの品質評価項目として重要視されている。

【0004】

この内部電場強度は、一般に光変調反射分光法(Photoreflectance(P R)分光法)という測定技術を用いて評価される。このP R分光法とは、ポンプ光と呼ばれる外部変調光(例えばレーザー光)を試料に照射することによって引き起こされた反射率変化 R/R を、プローブ光(検出光)と呼ばれる光を通して測定する分光技術である。P R分光法では、反射率変化 R/R がプローブ光の波長または光子エネルギーの関数として記録される。内部電場を有する試料では、この反射率変化 R/R がフランツ・ケルディッシュ(Franz Keldysh)振動と呼ばれる振動プロファイルを示す(たとえば、非特許文献2参照)。この振動プロファイルの周期は、内部電場の強度によって決定される。従って、フランツ・ケルディッシュ振動の周期を解析することにより、内部電場強度を調べることができる。また、試料からの発光を、分光器を用いずにその積分強度のみを検出する技術が特許文献1に記載されている。

【0005】

【特許文献1】

特開平11-51856号公報

【非特許文献1】

尾関雅志、「半導体評価技術」、第7章、河東田隆編著、産業図書(1989)

【非特許文献2】

"Franz Keldysh oscillations in modulation spectroscopy", H. Shen and M. Dutta, Journal of Applied Physics, vol. 78, pp. 2151-2176(1995)

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

エピタキシャルウェハーの品質評価項目である膜厚、バンドギャップエネルギーおよび内部電場は、従来は、互いに異なる方法で評価されてきた。そのためこれら3種類のエピタキシャルウェハーの品質項目を全て評価する際に、かなりの時間と手間が費やされている。それだけでなく、それぞれの測定方法に個別対応した装置を導入しなければならないため、多大な経費を要する。このことは、厳格な品質管理を行うことに対する妨げとなっている。

【0007】

この発明の目的は、半導体多層膜の内部電場強度、膜厚およびバンドギャップエネルギーの評価を簡便に行えるようにすることである。

【0008】

【課題を解決するための手段】

本発明に係る半導体多層膜の分光計測装置において、励起光源は、発光スペクトル測定時に、試料を励起する励起光を発生し、反射スペクトル測定時には試料への外部変調光を発生し、また、白色光源は、反射スペクトル測定のためのプローブ光を発生する。分光器は、発光スペクトル測定時に前記の試料からの発光を分光し、反射スペクトル測定時に白色光源からのプローブ光を分光して試料に入射する。第1検出器は、発光スペクトル測定時に前記の分光器から出射された光を検出し電気信号に変換する。第2検出器は、反射スペクトル測定時に励起光源により外部変調光が照射され前記の分光器により分光されたプローブ光が入射された前記の試料からの反射光を検出し電気信号に変換する。光軸切り替え部材は、発光スペクトル測定時に前記の分光器からの光を第1検出器の方に導き、反射スペクトル測定時に白色光源からの光を前記の分光器の方に導く。制御器は、反射スペクトル測定時に前記の光軸切り替え部材に白色光源からの光を前記の分光器の方に導かせて、第1検出器により検出された電気信号を収集し、発光スペクトル測定時に前記の光軸切り

替え部材に前記の分光器からの光を第1検出器の方に導かせて、第2検出器により検出された電気信号を収集する。

【0009】

【発明の実施の形態】

以下、添付の図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。

【0010】

エピタキシャルウェハーの品質評価項目である膜厚、バンドギャップエネルギーおよび内部電場は、従来は、互いに異なる方法で評価されてきたが、非破壊で同時かつ精密を簡便に行えるようにすることが望ましい。この問題を解決するためには、1つの測定方法から得られたデータで2つ以上の品質項目を評価できる手法/原理の開発、および、2つ以上の評価方法を行うことが可能な装置の開発が必要であると考えられる。

【0011】

そこでまず、内部電場評価に用いられる光変調反射(PR)分光法とバンドギャップエネルギー評価に用いられる発光(PL)分光法とに着目する。これらはいずれも分光技術に属する方法であるので、お互いに共通の装置が存在する。従って、従来用いられてきた光変調反射(PR)分光計測装置または発光(PL)分光計測装置に改良を加えることで、PRスペクトルとPLスペクトルとを単一の装置で評価できる可能性がある。

【0012】

次に、膜厚評価方法に着目する。従来の膜厚評価法には、多層膜構造に起因する干渉効果を受けたスペクトル形状を解析することによって行なわれるものが多い。特に反射/透過スペクトルの形状は干渉効果に敏感であることが知られており、赤外線干渉法は、これを膜厚評価に応用したものである。ところで内部電場評価に用いられるPR分光法も反射分光法的一种であるから、これを内部電場だけでなく膜厚評価に応用できると考えられる。ところがこれまで多層膜による干渉効果を受けたPRスペクトルの形状解析方法が明らかになっておらず、膜厚評価への応用は行なわれてこなかった。

【0013】

そこで、本発明では、エピタキシャルウェハーの内部電場強度、膜厚およびバンドギャップエネルギーの評価を簡便に行えるようにするために、PRスペクトルからエピタキシャル層の内部電場強度と膜厚とを同時に評価する分光計測方法を提案する。具体的には、この方法では、半導体多層膜のフランツ・ケルディッシュ(FK)振動から内部電場強度と膜厚とを同時に評価する。さらに、この分光計測方法に基づいて精密な評価を行うためのPRスペクトルとPLスペクトルとの両方を測定できる分光計測装置を提供する。PRスペクトルから内部電場強度と膜厚とを評価する分光計測法では、バンドギャップエネルギーをパラメータとして用いる必要がある。以下で述べるように、この分光計測装置は、同一の分光器を使用する。そのためPRスペクトル上のバンドギャップエネルギーとPLスペクトル上でのバンドギャップエネルギーとの間に、原理的に相対誤差が生じない。従ってこの装置は、PR分光法に基づいた膜厚評価を精密に行ううえでも非常に有効である。

【0014】

まず、半導体多層膜のフランツ・ケルディッシュ振動から内部電場強度と膜厚とを同時に評価する方法を説明する。図1は、N層の多層膜からなる半導体多層膜構造からの反射光を模式的に示している。図において、 A_0 は入射光であり、 A_n ($n = 0$) は、 n 番目の層 L_n と $(n+1)$ 番目の層 L_{n+1} との間で形成される界面からの反射光である。このような多層膜構造全体の複素振幅反射率 r は、次式(1)で表される。

【数式3】

$$r = r_0 + (1 - R_0) \sum_{n=1}^N C_n r_{n,n+1} e^{i\delta_n} \quad (1)$$

ここで r_0 と R_0 ($|r_0|^2$)は、それぞれ、表面での複素振幅反射率およびエネルギー反射率であり、 $r_{n,n+1}$ は、 L_n/L_{n+1} 界面の複素振幅反射率であり、 C_n は、透過率に関係した比例定数である。式(1)の δ_n は、位相遅れと呼ばれる量であり、次式で与えられる。

10

20

30

40

50

【数式 4】

$$\delta_n = \sum_{j=1}^n 2k_j d_j \cos \theta_j \quad (2)$$

ここで k_j と d_j は、 j 番目の層における光の波数および膜厚である。また θ_j は j 番目の層における屈折角であり、試料に対する入射光の角度と既知である試料の屈折率とから計算できる。

【0015】

半導体多層膜構造全体のエネルギー反射率 R は、複素振幅反射率の絶対値の 2 乗 $|r|^2$ で与えられる。

【数式 5】

$$R = |r|^2 \approx R_0 + 2(1 - R_0) \sum_{n=1}^M C_n \operatorname{Re}[r_0 r_n] e^{i\delta_n} \quad (3)$$

ここで、 $|r|^2 = r \cdot r^*$ (r^* は r の複素共役) の関係を用いた。さらに、多層膜表面での複素振幅反射率が界面での複素振幅反射率より十分大きいと仮定した。可視光域の場合、一般に r_0 を実数とみなすことができる。このことを利用すると、 L_n / L_{n+1} 界面での変調反射率 R_n は次式で表される。

【数式 6】

$$\Delta R_n = 2r_0(1 - R_0)C_n \operatorname{Re}[\Delta r_{n,n+1} e^{i\delta_n}] \quad (4)$$

ここで、 $r_{n,n+1}$ は、 $(n+1)$ 番目の層における誘電関数の変調成分 $\delta \varepsilon_{n,n+1}^{PR}$ に比例する。すなわち、

【数式 7】

$$\Delta r_{n,n+1} = B_n \delta \varepsilon_{n+1}^{PR} \quad (5)$$

$n=0$ の極限、すなわち表面以外に全く膜が存在しないバルク結晶に相当する場合、式(4)は、セラフィンらによって導かれた次の PR 信号の式(6)に従わなければならない。

【数式 8】

$$\Delta R / R = \alpha \operatorname{Re}[\delta \varepsilon^{PR}] + \beta \operatorname{Im}[\delta \varepsilon^{PR}] \quad (6)$$

式(6)は、比例係数 B_n の実部と虚部がそれぞれセラフィン係数 α と β に相当することを示している。可視光領域では、一般に、 α は β より圧倒的に大きい。そのため B_n も、実数として近似できる。結果として式(4)は、以下の式で表される。

【数式 9】

$$\Delta R_n \propto \operatorname{Re}[\delta \varepsilon_{n+1}^{PR} e^{i\delta_n}] \quad (7)$$

光変調反射測定の場合、 $\delta \varepsilon_{n,n+1}^{PR}$ は、ポンプ光照射によって引き起こされる F に由来し、ポンプ光照射下での誘電関数 $\varepsilon_n^{\text{on}}$ と暗中の誘電関数 $\varepsilon_n^{\text{off}}$ との差によって与えられる。すなわち、

【数式 10】

$$\begin{aligned} \delta \varepsilon_n^{PR}(\hbar\omega) &\equiv \varepsilon_n^{\text{on}} - \varepsilon_n^{\text{off}} \\ &= -2ik_n \int_0^{W_n - \Delta W_n} e^{2ik_n z} \Delta \varepsilon_n(\hbar\omega, F_n^{\text{on}}(z)) dz \\ &\quad + 2ik_n \int_0^{W_n} e^{2ik_n z} \Delta \varepsilon_n(\hbar\omega, F_n^{\text{off}}(z)) dz \end{aligned} \quad (8a)$$

【数式 11】

$$\Delta \varepsilon_n(\hbar\omega, F_n) = \varepsilon_n(\hbar\omega, F_n) - \varepsilon_n(\hbar\omega, 0) \quad (8b)$$

ここで W_n と ΔW_n は空乏層の厚さと、ポンプ光照射によって生成されたキャリアによる空乏層厚の変化であり、 $\varepsilon_n(\hbar\omega, F_n)$ は、電場 F_n によって摂動を受けた誘

10

20

30

50

電関数である。ここに、 $(\hbar/2)$ はプランク定数であり、 $(\hbar/2)$ はフォトンエネルギーである。 $F_n^{\text{on}}(z)$ と $F_n^{\text{off}}(z)$ とは、ポンプ光照射下での電場強度とポンプ光が照射されていない状態での電場強度であり、それぞれ次式(9 a)と(9 b)で与えられる。

【数式 1 2】

$$F_n^{\text{off}}(z) = F_n(z) \equiv \frac{F_{0,n}}{W_n}(W_n - z) \quad (9 a)$$

【数式 1 3】

$$F_n^{\text{on}}(z) = \frac{F_{0,n}}{W_n}(W_n - \Delta W_n - z) = F_n(z + \Delta W_n) \quad (9 b)$$

ここで $F_{0,n}$ は、ポンプ光が照射されていない状態での界面電場強度である。

【0 0 1 6】

これらの式より W_n と W_n が $F_{0,n}$ と F_n の間で、以下の関係にあることは明らかである。

【数式 1 4】

$$\Delta W_n / W_n = \Delta F_n / F_{0,n} \quad (1 0)$$

ここで、 $F_n \ll F_{0,n}$ かつ $k_n W_n \ll 1$ と仮定すると、式(8 a)は次のように表すことができる。

【数式 1 5】

$$\delta \varepsilon_n^{\text{PR}}(\hbar\omega) \approx 2ik_n \int_0^{W_n} \Phi_n(z) dz - 2ik_n \left\{ \int_0^{W_n} \Phi_n(z + \Delta W_n) dz - \Phi_n(W_n + \Delta W_n) \Delta W_n \right\} \quad (1 1 a)$$

20

【数式 1 6】

$$\Phi_n(z) \equiv e^{2ik_n z} \Delta \varepsilon_n(\hbar\omega, F_n(z)) \quad (1 1 b)$$

さらに、 $\Phi_n(z + W_n) - \Phi_n(z) = (d\Phi_n(z)/dz) W_n$ と近似して、 $(W_n)^2$ より高次の項を無視することにより、 $\delta \varepsilon_n^{\text{PR}}$ は、以下のように表される。

30

【数式 1 7】

$$\delta \varepsilon_n^{\text{PR}}(\hbar\omega) = 2ik_n \Delta \varepsilon_n(\hbar\omega, F_{0,n}) \Delta W_n \quad (1 2)$$

ここに、 M_0 特異点における $(\hbar/2, F)$ は、次のように表される。

【数式 1 8】

$$\Delta \varepsilon(\hbar\omega, F) \propto \frac{(\hbar\Theta)^{1/2}}{(\hbar\omega)^2} (g(-\eta) + if(-\eta)) \quad (1 3 a)$$

【数式 1 9】

$$\eta \equiv \frac{\hbar\omega - E_0}{\hbar\Theta} \quad (1 3 b)$$

式(1 3 a)における $g(-)$ および $f(-)$ はそれぞれ電気光学関数と呼ばれる関数であり、バンドギャップエネルギーより高エネルギー領域におけるそれらの漸近解は、次式で表される。

【数式 2 0】

$$\hat{g}(-\eta) = \frac{1}{4} \eta^{-1} \sin\left(\frac{4}{3} \eta^{3/2}\right) \quad (1 4 a)$$

【数式 2 1】

$$\hat{f}(-\eta) \approx -\frac{1}{4} \eta^{-1} \cos\left(\frac{4}{3} \eta^{3/2}\right) \quad (1 4 b)$$

ここで、電気光学関数に対する電子/正孔の有限寿命の効果を無視できると仮定した。

【0017】

これらの漸近解を用いることにより $R_n(\hbar\omega/2)$ すなわちフランツ・ケルディシュ (FK) 振動の形状は、以下の式で表される。

【数式22】

$$\Delta R_n(\hbar\omega) \propto \frac{1}{4} \left(\frac{\hbar\omega - E_{0,n+1}}{\hbar\Theta_{n+1}} \right)^{-1} \cos \left[\frac{4}{3} \left(\frac{\hbar\omega - E_{0,n+1}}{\hbar\Theta_{n+1}} \right)^{3/2} + \delta_n \right] \quad (15)$$

ここで $E_{0,n+1}$ は、 $(n+1)$ 番目の層のバンドギャップエネルギーである。また $(\hbar/2)\Theta_{n+1}$ は、電気光学エネルギーと呼ばれる物理量であり、次式で表される。

【数式23】

$$(\hbar\Theta_{n+1})^3 \equiv \frac{e^2 \hbar^2 F_{n+1}^2}{2\mu_{n+1}} \quad (16)$$

ここで e と μ_{n+1} は、それぞれ素電荷および電子・正孔換算質量である。

【0018】

図2は、Al_{0.3}Ga_{0.7}As (膜厚 d nm)/GaAs ヘテロ接合構造の膜について実験的に得られたフランツ・ケルディシュ振動のスペクトル(実線)と、式(15)を用いて数値計算によって得られたフランツ・ケルディシュ振動のスペクトル(破線)とを、2つの膜厚 d の試料について示す。フランツ・ケルディシュ振動は規格化されて示される。ここで「×5」は縦軸の目盛りを5倍にしたデータを意味する。実線と破線とを比較すると、数々の近似・仮定を行っているにもかかわらず、数値計算によって得られたフランツ・ケルディシュ振動の位相と、実験的に得られたフランツ・ケルディシュ振動の位相とは、ほぼ一致している。そのため、フランツ・ケルディシュ振動が極大・極小となる時のフォトンエネルギーは、式(15)が極大・極小をとる際のフォトンエネルギーと一致すると考えられる。式(15)においてバンドギャップエネルギー $E_{0,n}$ から m 番目のフランツ・ケルディシュ振動の極値のフォトンエネルギーは、次式(17)に従う。

【数式24】

$$\frac{4}{3\pi} (E_m - E_{0,n})^{3/2} = (\hbar\Theta_{n+1})^3 (m - \delta_n/\pi) \quad (17)$$

式(17)に従ってフランツ・ケルディシュ振動の極値をプロットすれば、プロットの形状は直線に従う。そしてその直線の傾きは電気光学エネルギー $(\hbar/2)\Theta_{n+1}$ を与え、この値から式(16)を用いて電場強度 $F_{0,n+1}$ を計算することができる。一方、縦軸との切片は、位相の遅れ δ_n を与える。このプロットを各界面からのフランツ・ケルディシュ振動に対して行い、位相遅れ δ_n を求める。 δ_n の定義(式(2))より、得られた δ_n と δ_{n-1} との差が次式に従う。

【数式25】

$$\delta_n - \delta_{n-1} = 2k_n d_n \cos \theta_n \quad (18)$$

この式より n 番目の層厚 d_n を知ることができる。こうして、フランツ・ケルディシュ振動から半導体多層膜の内部電場強度と膜厚とを同時に評価できる。

【0019】

なお従来技術では、フランツ・ケルディシュ振動の極値のプロットによって傾きから電場強度を得られることが知られていた。しかし縦軸との切片に関しては、その物理的背景が不明であった。本発明で提案するプロットは、縦軸との切片から位相遅れが分かり、それを手がかりに膜厚が得られるという点に特徴がある。

【0020】

次に、図3と図4とに、この原理を用いてPR/PLスペクトルを測定する分光計測装置を示す。図3は、その光学測定系の部分を模式的に示し、図4は、光学測定系により検出されたPR信号およびPL信号を処理する信号処理系を示す。図3に示す分光計測装置は、光軸切り替えミラー14により、光路を切り替えることにより、PRスペクトルまたはPLスペクトルを測定する。なお、いずれの場合も、光学測定系により得られた測定信号

は図4の信号処理系で処理される。

【0021】

測定装置内における光学系において、白色光源1は、プローブ光の光源であり、例えば、ランプなどが用いられる。PRスペクトル測定時には、光軸切り替えミラー14は、白色光源1からの光を分光器3の方に反射する。集光レンズ2は、プローブ光を生成するために、ランプ光を分光器3に集光する。分光器3は、ランプ光を単色化し、反射率Rと変調反射率Rとを検出するためのプローブ光を生成する。集光レンズ4は、分光器3で生成されたプローブ光を試料5の表面に集光する。

【0022】

また、励起光源9は、例えば、レーザーなどであり、PRスペクトル測定時には、外部変調光を生成するための光源である。励起光源パワー安定器10は、励起光源のパワーを安定化させる。励起光源用フィルター11は、励起光の強度を調整するためのフィルター、例えばニュートラルデンシティー・フィルターである。変調器12は、励起光を連続光から周期的な断続光に変換する装置、例えば光学チョッパーである。集光レンズ13は、試料表面のプローブ光が照射されている領域に外部変調光を集光する。

【0023】

励起光源(例えばレーザー光)9は、PLスペクトル測定時には、試料の励起光(PRスペクトル測定用の外部変調光)としての役割を果たす。分光器3は、ランプ光源1の光を反射率Rと変調反射率Rとを検出するためのプローブ光として用いるために単色化する役割を担っている。また、分光器3は、PLスペクトル測定時には、試料からの発光を分光するのにも用いられる。

【0024】

集光レンズ6は、試料5から反射されたプローブ光をPR測定用検出器8に集光する。ロングパスフィルター7は、試料5から散乱された外部変調光を取り除く。PR測定用検出器8は、例えばフォトダイオードなどであり、試料5からの反射光信号を電気的信号に変換する。

【0025】

一方、PLスペクトル測定時には、励起光源9は、試料5の励起光としての役割を果たす。破線で示される試料5からの発光は、集光レンズ4を分光器3に集光する。分光器3は、試料5からの発光を分光する。集光レンズ2は、分光器3からの発光スペクトルを検出器15に送る。この際、光軸切り替えミラー14は、分光器3からの発光スペクトルをそのまま検出器15に通す。

【0026】

図4は、図3の測定系で検出器によって検出された信号の処理系を模式的に示す。この検出信号処理系において、電流/電圧変換器21は、検出器8または15からの電流信号を電圧信号に変換する。バンドパスフィルター22は、電圧信号に含まれる交流成分(R信号に相当)と直流成分(R信号)とに分離するための周波数フィルターである。直流電圧計23は、直流成分を計測するための機器である。ロックインアンプ24は、交流成分を位相検出(ロックイン検出)するための機器であり、参照周波数は、光学測定系の変調器12より送られる。ポンプ光が断続光となっている場合はロックインアンプ24で、連続光となっている場合は直流電圧計23で、発光用検出器15から得られる信号を測定する。コンピューター25は、前述の各計測機器の制御および全ての信号の収集、信号間の演算を行う。ここで、コンピューター25は、分光器3を掃引し、直流電圧計23またはロックインアンプ24からの入力信号を記録する。たとえば、光変調反射スペクトルの場合、検出器15の信号を基に反射率変化 R/R を光子エネルギー($h\nu/2$)の関数として計算し記録する。これにより、スペクトル測定時に反射率変化 R/R を光子エネルギー($h\nu/2$)の関数として記録できる。これを基に、前述の半導体多層膜のフランチ・ケルディシュ振動を導出しプロットをすることにより、フランチ・ケルディシュ振動から内部電場強度と膜厚とを同時に評価する。

【0027】

10

20

30

40

50

次にこの分光計測装置を用いた測定手順を示す。

(1) エピタキシャルウェハー(試料5)のPLスペクトルを測定するために、光軸切り替え用ミラー14を切り替えて、試料5からの発光が発光用検出器15に入るようにする。なおPLスペクトル測定の際、白色光源1は不要であるため、切っておくのが望ましい。

(2) 試料5に励起光(例えばレーザー光)を照射する。この励起光は、変調器12で断続光にしても、変調器12を通さずに連続光にしても良い。ただし試料5からの発光が極度に弱い場合はS/N比を向上させる必要があるため、変調器12で断続光にして、試料5からの発光を断続光の位相に同調させたロックインアンプ24で検出したほうがよい。この場合、ロックインアンプ24の位相を断続光に合わせる手続きは、以下の手続きで行なわれる。まず試料5で散乱された励起光を、集光レンズ4で分光器3に集光する。そして分光器3を通過した光を発光用検出器15で検出し、検出された信号に対してロックインアンプ24の位相を合わせる。

(3) レンズ4を用いて試料5からの発光を、分光器3のスリットに照射する。

(4) 分光器3から出射された光を、集光レンズ2を用いて発光用検出器15に集光し、光学的信号を電気的信号が検出される。

(5) ポンプ光が断続光となっている場合はロックインアンプ24で、連続光となっている場合は直流電圧計23で、発光用検出器15から得られる信号を測定する。

(6) 分光器3を掃引し、発光強度を波長 λ または光子エネルギー $(h\nu)$ の関数として記録して、図5のような発光スペクトルを得る。

(7) 観測された発光スペクトルのピークより、バンドギャップエネルギーを求める。ピーク的位置は、各層のバンドギャップエネルギーに相当する。

【0028】

(8) 引き続きエピタキシャルウェハーのPRスペクトルを測定するために、光軸切り替え用ミラー14を切り替え、白色光源(例えばランプ)1の光が分光器3に入る状態にする。この状態で分光器3から出射される光がプローブ光である。

(9) 励起光源9からの外部変調光(例えばレーザー光)を試料5に照射する。

(10) ロングパスフィルター7を外し、試料5上で散乱された外部変調光がPR信号用検出器8に入る状態にする。この状態で検出された信号を参照信号とし、ロックインアンプ24の位相をこれに合わせる。

(11) ロングパスフィルター7を挿入し、PR信号用検出器に外部変調光が入らないようにする。

(12) 分光器3を掃引し、PR信号用検出器8でプローブ光を検出する。

(13) 検出された信号を、バンドパスフィルター22を通して、反射率Rに相当する直流成分と変調反射率 R_m に相当する交流成分とに分ける。

(14) 上記直流成分および交流成分を、それぞれ直流電圧計23とロックインアンプ24とで測定する。

(15) コンピューター25上で R_m/R を計算し、PR信号を得る。

(16) 前述の(12)~(15)の手順を繰り返し、PRスペクトル R_m/R を、波長 λ または光子エネルギー $(h\nu)$ の関数として記録する。

【0029】

(17) PRスペクトルに現れるフランツ・ケルディシュ振動パターンの極値に対して、図6のように E_0 からより高エネルギー側の順に番号付けを行う。図6に示される指数 $(m = 1, 2, 3, \dots)$ は、反射率強度(PR)のフランツ・ケルディシュ振動の極値の指数であり、矢印は、バンドギャップエネルギー E_g の位置を示す。なお、図6において、指数6以降については縦軸の目盛りを5倍にして表示している。

(18) 得られた極値を、式(17)に従ってプロットする。図7の例に示されるように、は指数 m に比例している。

(19) 式(17)で $(h\nu)$ と m とをパラメータとしたフィッティングを行う。

10

20

30

40

50

(20) 得られた $(h/2)$ から式(16)を用いて電場強度を求め、 n から式(18)を用いて膜厚を求める。

【0030】

【発明の効果】

半導体多層膜の内部電場、バンドギャップエネルギー及び膜厚を1つの装置で測定できる。

また、半導体多層膜についてPRスペクトルとPLスペクトルの両方を同時に測定して、内部電場、バンドギャップエネルギー及び膜厚を非破壊で決定できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 N層の膜から構成される半導体多層膜における反射光の模式的に示す図

10

【図2】 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (膜厚 d nm)/GaAsヘテロ接合構造のフランツ・ケルディシュ振動のグラフ

【図3】 PL/PR測定装置の光学測定系の図

【図4】 PL/PR測定装置の検出信号処理系の図

【図5】 図3の光学測定系を用いて観測される典型的なPLスペクトルのグラフ

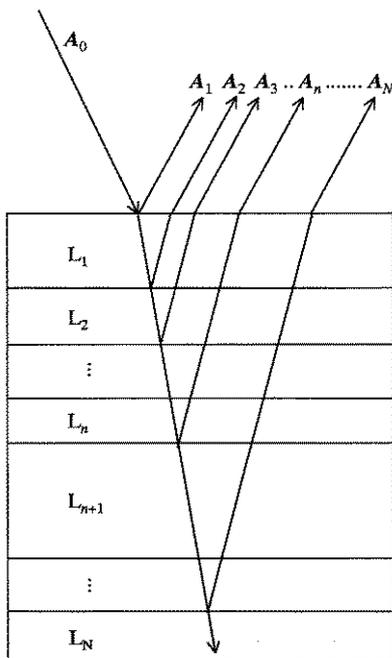
【図6】 図3の光学測定系を用いて観測される典型的なPRスペクトルのグラフ

【図7】 式(17)に従ってフランツ・ケルディシュ振動の極値のエネルギーを、その指数の関数としてプロットしたグラフ

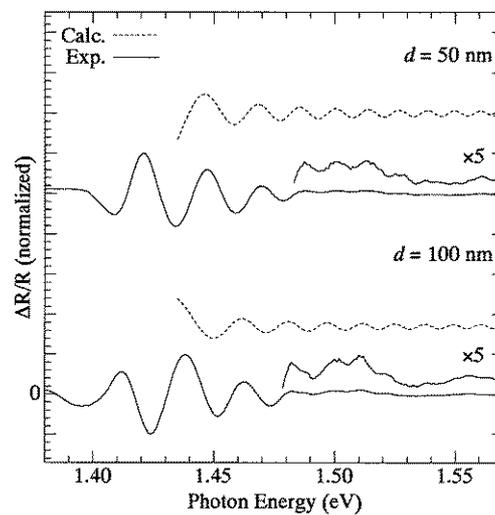
【符号の説明】

1 白色光源、 3 分光器、 5 試料、 8 PR測定用検出器、 9 励起光源、 14 光軸切り替えミラー、 15 検出器、 21 電流/電圧変換器、 22 バンドパスフィルター、 23 直流電圧計、 24 ロックインアンプ、 25 コンピューター。

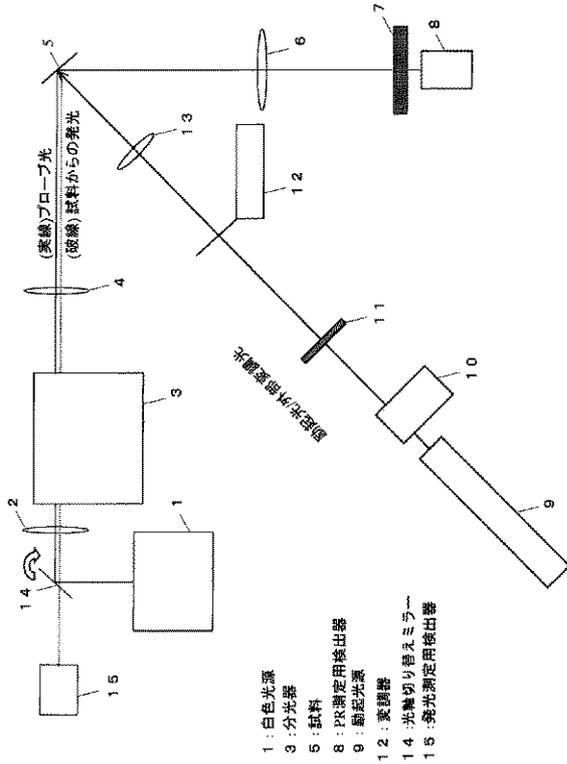
【図1】



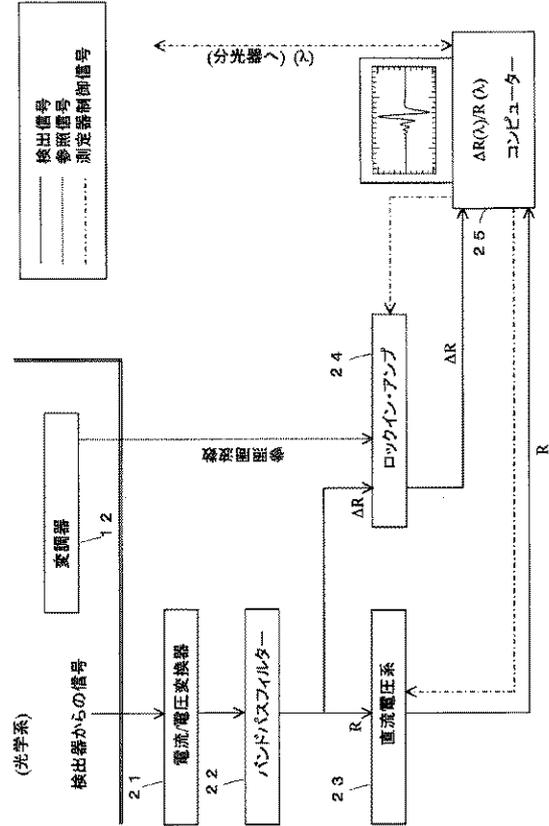
【図2】



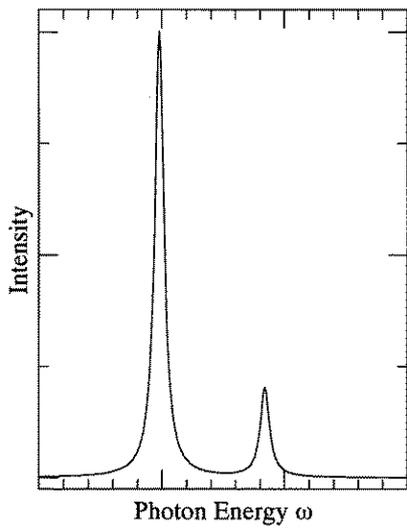
【図3】



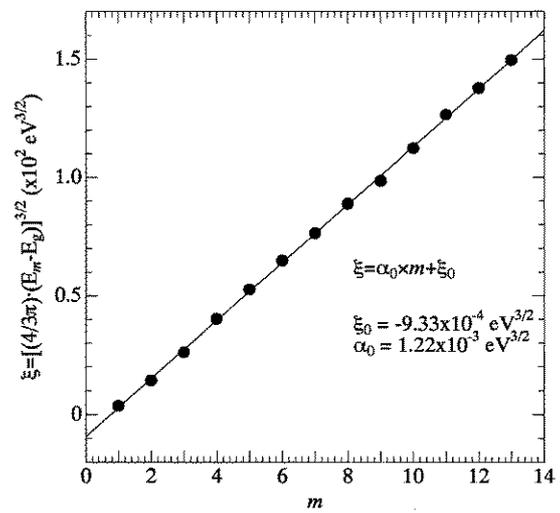
【図4】



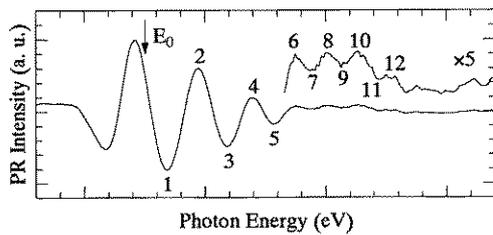
【図5】



【図7】



【図6】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.

F I

H 0 1 L 21/66

P

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

特開平 1 1 - 0 5 1 8 5 6 (J P , A)

特開平 0 3 - 1 7 5 3 4 0 (J P , A)

H.Shen, M.Dutta, Franz Keldysh oscillation in modulation spectroscopy, Journal of Applied Physics, 1995年 8月15日, Vol.78, No.4, p.2151-2176

H.E.Scheibler, et.al., Fourier Resolution of Surface and Interface Contributions to Photoreflectance Spectra of Multilayered Structures, Physica Status Solidi. A. Applied Research, 1995年11月16日, Vol.152, No.1, p.113-122

(58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)

G01N21/00 21/74

JSTPlus(JDream2)