

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5500621号
(P5500621)

(45) 発行日 平成26年5月21日(2014.5.21)

(24) 登録日 平成26年3月20日(2014.3.20)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 R 27/02 (2006.01) G O 1 R 27/02 R

請求項の数 3 (全 12 頁)

(21) 出願番号	特願2009-134286 (P2009-134286)	(73) 特許権者	504174135 国立大学法人九州工業大学 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号
(22) 出願日	平成21年6月3日(2009.6.3)	(74) 代理人	100090697 弁理士 中前 富士男
(65) 公開番号	特開2010-281640 (P2010-281640A)	(74) 代理人	100127155 弁理士 来田 義弘
(43) 公開日	平成22年12月16日(2010.12.16)	(72) 発明者	孫 勇 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1 九州工業大学内
審査請求日	平成24年5月29日(2012.5.29)	審査官	吉岡 一也

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体の電気伝導特性の非接触測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

両側にそれぞれ入力電極及び出力電極を備えた平板状の圧電体の表面で該入力電極及び該出力電極の間の領域に対して、隙間を設けて平板状の半導体を該圧電体に平行に配置する第1工程と、

前記半導体の温度を変化させて、各温度毎に前記入力電極に高周波入力電圧を印加して前記圧電体の表面に弾性表面波を発生させ、該弾性表面波に伴って発生する交流電界を前記半導体に印加しながら該弾性表面波を前記出力電極に向けて移動させて、該出力電極で該弾性表面波による高周波出力電圧を測定する第2工程と、

各温度で測定した前記高周波入力電圧の振幅電圧値 $V_{i n}$ 及び前記高周波出力電圧の振幅電圧値 $V_{o u t}$ から、各温度毎に前記弾性表面波が前記入力電極から前記出力電極に移動する際の伝搬率を $V_{o u t} / V_{i n}$ として演算し、該伝搬率を用いて前記半導体の電気伝導率の相対値を求める第3工程とを有し、

前記電気伝導率の前記半導体の温度の逆数に対する温度依存性から前記半導体中の不純物原子の電子の束縛準位を求めることを特徴とする半導体の電気伝導特性の非接触測定方法

。

【請求項2】

請求項1記載の半導体の電気伝導特性の非接触測定方法において、前記高周波入力電圧の前記振幅電圧値 $V_{i n}$ 及び周波数をそれぞれ調整し、前記振幅電圧値 $V_{o u t}$ の最大値を求めることを特徴とする半導体の電気伝導特性の非接触測定方法。

10

20

【請求項3】

請求項1又は2記載の半導体の電気伝導特性の非接触測定方法において、前記圧電体の表面と前記半導体との間に設けられる前記隙間は1～10 μ mであることを特徴とする半導体の電気伝導特性の非接触測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、弾性表面波を用いた半導体の電気伝導特性の非接触測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

不純物がドーパされた半導体の電気伝導特性、例えば電気伝導率を測定することで、半導体の性能、信頼性、劣化等の判定が可能のため、簡便な方法で電気伝導率を高感度かつ高精度で測定する必要があるが生じている。このため、ホール測定法や四探針法等の接触測定法を用いて、半導体の電気伝導率の測定が従来より行なわれている。

一方、半導体の抵抗率（電気伝導率）の非接触測定法として、半導体試料に所定のエネルギー準位に存在するキャリア（電子）を励起するのに適した波長の励起光を照射すると共に電磁波を照射し、半導体試料の表面に発生する渦電流を検知して抵抗率を測定する方法が開示されている（例えば、特許文献1参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2007-212341号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、ホール測定法や四探針法等の接触測定方法では、測定しようとする半導体製品から測定用の試料を作製して電極を取付ける必要があり、測定効率が低く、しかも半導体製品を直接測定することができないという問題がある。更に、電極の取付け作業上の制約から、電極間の距離を小さくすることに限界があり、測定時に試料中に存在する電界の強度を大きくできないことから、半導体中の電子に十分なエネルギーを与えることができず、電気伝導率の測定から不純物準位（半導体中の不純物原子の電子の束縛準位）を測定できないという問題がある。

一方、特許文献1に記載された発明では、特定波長の励起光を発生させるために専用光源を準備したり、分光器で特定波長の光を分光しなければならず、測定装置が複雑になってコストが上昇するという問題が発生すると共に、測定が煩雑になるという問題がある。

【0005】

本発明はかかる事情に鑑みてなされたもので、簡単、低コストで効率的に電気伝導率を測定できると共に、電気伝導率から移動度、不純物準位の特定が可能な弾性表面波を用いた半導体の電気伝導特性の非接触測定方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

前記目的に沿う本発明に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法は、両側にそれぞれ入力電極及び出力電極を備えた平板状の圧電体の表面で該入力電極及び該出力電極の間の領域に対して、隙間を設けて平板状の半導体を該圧電体に平行に配置する第1工程と、前記半導体の温度を変化させて、各温度毎に前記入力電極に高周波入力電圧を印加して前記圧電体の表面に弾性表面波を発生させ、該弾性表面波に伴って発生する交流電界を前記半導体に印加しながら該弾性表面波を前記出力電極に向けて移動させて、該出力電極で該弾性表面波による高周波出力電圧を測定する第2工程と、

各温度で測定した前記高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} 及び前記高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} から、各温度毎に前記弾性表面波が前記入力電極から前記出力電極に移動

10

20

30

40

50

する際の伝搬率を V_{out} / V_{in} として演算し、該伝搬率を用いて前記半導体の電気伝導率の相対値を求める第3工程とを有し、
前記電気伝導率の前記半導体の温度の逆数に対する温度依存性から前記半導体中の不純物原子の電子の束縛準位を求める。

【0007】

【0008】

本発明に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法において、前記高周波入力電圧の前記振幅電圧値 V_{in} 及び周波数をそれぞれ調整し、前記振幅電圧値 V_{out} の最大値を求めることが好ましい。

【0009】

本発明に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法において、前記圧電体の表面と前記半導体との間に設けられる前記隙間は $1 \sim 10 \mu m$ であることが好ましい。

【0010】

【発明の効果】

【0011】

本発明に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法においては、高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} と高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} から、弾性表面波が入力電極から出力電極に移動するまでの伝搬率を V_{out} / V_{in} として演算し、伝搬率を用いて半導体の電気伝導率の相対値を求めるので、簡便な方法で効率的に半導体の電気伝導率を測定することができる。その結果、例えば、シリコン結晶太陽電池の性能を左右する不純物の影響を電気伝導率の測定から評価することができ、シリコン結晶太陽電池の出荷前の性能検査や、使用中のシリコン結晶太陽電池の劣化判定を効率的かつ安価に行うことができる。

【0012】

電気伝導率の半導体の温度の逆数に対する温度依存性から、半導体中の不純物原子の電子の束縛準位を求めるので、電気伝導率の温度依存性は、束縛準位に束縛されている電子が熱励起されて伝導帯に遷移することに対応しており、束縛準位を容易に決定できると共に、電子（キャリア）の濃度及び移動度の温度依存性を求めることもできる。

【0013】

本発明に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法において、高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} 及び周波数をそれぞれ調整し、振幅電圧値 V_{out} の最大値を求める場合、伝搬率を高感度かつ高精度で測定することができる。

【0014】

本発明に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法において、圧電体の表面と半導体との間に設けられる隙間が $1 \sim 10 \mu m$ である場合、弾性表面波（ひずみ波）が半導体中に侵入するのを防止でき、交流電界による作用の影響だけを取り出すことができる。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】本発明の一実施の形態に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法を適用する非接触測定装置の説明図である。

【図2】同非接触測定装置の弾性表面波発生手段の説明図である。

【図3】弾性表面波発生手段の入力電極の説明図である。

【図4】(A)、(B)は本発明の一実施の形態に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法の説明図である。

【図5】アンチモンをドーブしたシリコンの電気伝導率の温度依存性の説明図である。

【図6】アンチモンをドーブしたゲルマニウムの電気伝導率の温度依存性の説明図である。

。

【図7】ゲルマニウムの電気伝導率の温度依存性を示すグラフである。

【図8】ゲルマニウムの電気伝導率の温度依存性を複数の直線領域で近似した場合の説明図である。

【発明を実施するための形態】

10

20

30

40

50

【 0 0 1 6 】

続いて、添付した図面を参照しつつ、本発明を具体化した実施の形態につき説明し、本発明の理解に供する。

図 1、図 2 に示すように、本発明の一実施の形態に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法を適用する非接触測定装置（以下、単に非接触測定装置という）10 は、両側にそれぞれ入力電極 11 及び出力電極 12 が設けられて水平に配置された平板状の圧電体 13（例えば、LiNbO₃板）を備え、圧電体 13 の表面で入力電極 11 及び出力電極 12 の間の領域に対して隙間 G を設けて平行に配置した平板状の、例えば不純物原子がドナーとしてドーパされた半導体（例えば、シリコン、ゲルマニウム）14 に、入力電極 11 に高周波入力電圧を印加して圧電体 13 の表面に発生した弾性表面波に伴って発生する交流電界を印加しながら弾性表面波を出力電極 12 に向けて移動させる弾性表面波発生手段 15 を有している。

10

【 0 0 1 7 】

また、非接触測定装置 10 は、半導体 14 及び弾性表面波発生手段 15 を収納する測定容器 16 と、測定容器 16 内の半導体 14 の温度を調整する温度調整手段 17 と、高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{i_n} 及び周波数をそれぞれ設定して入力電極 11 に高周波入力電圧を印加する高周波電源 18 と、弾性表面波が出力電極 12 に到達した際に発生する高周波出力電圧を測定し振幅電圧値 V_{o_t} を求める電圧測定手段の一例であるピークボルト計 19 とを有している、更に、非接触測定装置 10 は、高周波電源 18 から入力される振幅電圧値 V_{i_n} 及びピークボルト計 19 から入力される振幅電圧値 V_{o_t} から、弾性表面波が入力電極 11 から出力電極 12 に移動する際の伝搬率を V_{o_t} / V_{i_n} として演算し、伝搬率を用いて半導体 15 の電気伝導率の相対値を求めるデータ処理手段の一例であるパーソナルコンピュータ 20 とを有している。以下詳細に説明する。

20

【 0 0 1 8 】

ここで、圧電体 13 及び半導体 14 の各サイズに制約はないが、本実施の形態では、入力電極 11 と出力電極 12 を結ぶ方向を圧電体 13 の長手方向、長手方向に直交する方向を圧電体 13 の幅方向として、圧電体 13 の幅は 8 ~ 15 mm（例えば 10 mm）、長手方向の長さは 25 ~ 35 mm（例えば 30 mm）、厚さは 0.3 ~ 0.8 mm（例えば 0.5 mm）である。また、圧電体 13 に隙間 G を設けて平行に配置する半導体 14 において、圧電体 13 の長手方向と同じ方向を半導体 14 の長手方向、半導体 14 の長手方向に直交する方向を半導体 14 の幅方向として、半導体 14 の幅は 8 ~ 15 mm（例えば 10 mm）、長さは 8 ~ 15 mm（例えば 10 mm）、厚さは 0.2 ~ 0.8 mm（例えば 0.5 mm）である。

30

【 0 0 1 9 】

図 2、図 3 に示すように、入力電極 11 は、圧電体 13 表面上の一方側において互いに噛み合うように対向して形成された第 1、第 2 の櫛形電極 21、22 を有している。そして、第 1、第 2 の櫛形電極 21、22 は、W の距離を設けて対向して平行に配置された電極基部 23、24 をそれぞれ有している。また、第 1 の櫛形電極 21 には電極基部 23 から電極基部 24 側に直角に突出する第 1 の電極歯状部 25 が、発生させる弾性表面波の波長に相当する距離だけ離れて平行に並べて設けられ、第 2 の櫛形電極 22 には第 1 の櫛形電極 21 の隣合う第 1 の電極歯状部 25 間に電極基部 24 から電極基部 23 側に直角に突出するように第 2 の電極歯状部 26 が W の距離だけ離れて平行に並べて設けられている。なお、電極基部 23、24 の幅は、例えば、0.001 ~ 0.1 mm である。

40

【 0 0 2 0 】

ここで、第 1 の電極歯状部 25 は、幅が $W/8$ 、長さが距離 W の 90 ~ 95 % で、 $W/8$ の間隔を有して平行に配置され基部が電極基部 23 に接続する対となる第 1 の素電極 27、27a を備え、第 2 の電極歯状部 26 は、幅が $W/8$ 、長さが距離 W の 90 ~ 95 % で、 $W/8$ の間隔を有して平行に配置され基部が電極基部 24 に接続する対となる第 2 の素電極 28、28a を備えている。そして、隣り合う第 1 の素電極 27（27a）と第 2 の素電極 28a（28）の間の距離は $W/8$ である。更に、第 1、第 2 の電極歯状部 25、

50

26において、一側に配置される第1、第2の素電極27a、28aの質量は、他側に配置される第1、第2の素電極27、28の質量と異なる(例えば0.5倍以上1倍未満、又は1倍を超え1.5倍以下となる)ように調整されている。そして、電極基部23、24は、第1、第2のリード線29、30を介して高周波電源18の出力部(図示せず)に接続されている。なお、電極基部23、24間の距離Wは、半導体14の幅に応じて設定し、半導体14の幅をMとした場合、例えば、Mの0.5~0.8倍である。

【0021】

出力電極12は、入力電極11と同様の構成となつて、互いに噛み合うように対向して圧電体13表面上の他方側において形成された第1、第2の櫛形電極31、32を有し、第1、第2の櫛形電極31、32は、Wの距離を設けて対向して平行に配置され電極基部33、34をそれぞれ有している。そして、電極基部33、34は、第1、第2のリード線35、36を介してピークボルト計19の信号入力部(図示せず)に接続されている。

10

【0022】

入力電極11において、一側に配置される第1、第2の素電極27a、28aの質量を、他側に配置される第1、第2の素電極27、28の質量より、例えば大きくすることで、第1の素電極27と第2の素電極28a間及び第1の素電極27aと第2の素電極28間で励起された励起波が第1、第2の素電極27a、28aに衝突した際の反射係数を大きくすることができる。これにより、第1の素電極27と第2の素電極28a間及び第1の素電極27aと第2の素電極28間で励起波と反射波との位相差を一方向では同位相に、他方向では逆位相にすることができ、表面弾性波を一方向にのみ励振することができる。また、出力電極12を入力電極11と同様の構成とすることで、出力電極12では、到達した弾性表面波による高周波出力電圧を効果的に測定することができる。

20

【0023】

測定容器16は、半導体14及び弾性表面波発生手段15を収納する密閉容器で、測定時に内部を真空状態に保つ真空ポンプ37が接続されている。また、温度調節手段17は、測定容器16内に設けられ半導体14に当接して半導体14の冷却及び加熱を行うヒータを備えた試料ホルダー38と、試料ホルダー38に冷却媒(例えば、液体窒素、液体水素、液体ヘリウム)を供給する冷却機39と、ヒータに電力を供給して半導体14の温度を制御する温度制御器40とを有している。なお、試料ホルダー38には、図示しない温度センサ(例えば熱電対)が設けられ、温度センサからの信号はパーソナルコンピュータ20に入力され、半導体14の温度が記録される。これによって、半導体14の温度を所定の温度に保つことができ、入力電極11に高周波入力電圧を印加して圧電体13の表面に弾性表面波を発生させると、弾性表面波に伴って発生する交流電界を所定の温度の半導体14に印加しながら弾性表面波を出力電極12に向けて移動させることができる。

30

【0024】

続いて、本発明の一実施の形態に係る半導体の電気伝導特性の非接触測定方法について説明する。

図4(A)、(B)に示すように、両側にそれぞれ入力電極11及び出力電極12を備えた平板状の圧電体13の表面で入力電極11及び出力電極12の間の領域の幅方向両側に長手方向に沿って絶縁膜41(例えば、4フッ化エチレン樹脂製の膜)を配置する。次いで、試料ホルダー38に取付けられた半導体14の長手方向と圧電体13の長手方向とを一致させて、絶縁膜41を介して半導体14を圧電体13の上方に配置する。これにより、圧電体13の表面で入力電極11及び出力電極12の間の領域に対して隙間Gを設けて半導体14を配置することができる(第1工程)。ここで、絶縁膜41の厚みT、すなわち隙間Gの距離は、1~10 μm 、例えば5 μm である。

40

【0025】

半導体14の配置が終了すると、測定容器16を密閉して真空ポンプ37で測定容器16内を真空にする。そして、冷却機39から試料ホルダー38に冷却媒を供給し温度制御器40でヒータに供給する電力を調整して半導体14の温度を予め設定した測定温度に保持する。次いで、高周波電源18から入力電極11に設定した周波数の高周波入力電圧を印

50

加すると、圧電体 13 が励振して弾性表面波 S A W が発生し出力電極 12 に向けて移動する。このとき、弾性表面波 S A W に伴って交流電界 E が発生する。ここで、半導体 14 は、圧電体 13 の表面で入力電極 11 及び出力電極 12 の間の領域に対して隙間 G を設けて配置されているので、半導体 14 には弾性表面波 S A W は伝達せず、入力電極 11 から出力電極 12 に向けて移動する弾性表面波 S A W に伴う交流電界 E のみが半導体 14 に印加され、弾性表面波 S A W が出力電極 12 に到達すると、出力電極 12 では高周波出力電圧が測定される。そして、半導体 14 を測定温度に保持した際の高周波出力電圧の測定が終了すると、温度制御器 40 で半導体 14 の温度を次の測定温度に向けて変化させ、半導体 14 の温度が測定温度に保持された時点で高周波出力電圧を測定することを繰り返す（第 2 工程）。

10

【 0026 】

弾性表面波 S A W が出力電極 12 に到達すると、出力電極 12 に発生する高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} がピークボルト計 19 で測定され、ピークボルト計 19 から振幅電圧値 V_{out} の値がパーソナルコンピュータ 20 に入力される。一方、パーソナルコンピュータ 20 には、高周波電源 18 から入力電極 11 に印加した高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} が入力されているので、パーソナルコンピュータ 20 では、高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} 及び高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} から、弾性表面波 S A W が入力電極 11 から出力電極 12 に移動する際の伝搬率を V_{out} / V_{in} として演算する。

【 0027 】

圧電現象においては、機械エネルギーと電気エネルギーは相互変換可能で、その変換率は圧電体 13 の特性で決まる電気機械結合係数で規定される。このため、電気エネルギーが減衰すると、機械エネルギーも減衰する関係にある。ここで、半導体 14 に交流電界 E が印加されると、半導体 14 中の伝導電子が印加された交流電界 E の作用で振動し、交流電界 E の電気エネルギーの一部がジュール熱に変換され、電気エネルギーが減衰する。従って、入力電極 11 で発生した弾性表面波 S A W に伴って発生する交流電界 E を半導体 14 に印加しながら弾性表面波 S A W が出力電極 12 に向けて移動する場合、弾性表面波 S A W に伴って発生する交流電界 E の電気エネルギーは弾性表面波 S A W の移動に伴って減衰するため、入力電極 11 で発生した弾性表面波 S A W も出力電極 12 に到達した時点で減衰している。

20

【 0028 】

入力電極 11 で発生する弾性表面波 S A W の機械エネルギーは入力電極 11 に印加した高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} に比例し、出力電極 12 で検出される弾性表面波 S A W の機械エネルギーは出力電極 12 で測定される高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} に比例する。このため、弾性表面波 S A W が入力電極 11 から出力電極 12 に移動した際の減衰は、伝搬率 V_{out} / V_{in} として求まる。一方、弾性表面波 S A W の減衰と電気エネルギーの減衰（ジュール熱の発生）は比例するので、ジュール熱の発生は伝搬率 V_{out} / V_{in} に比例する。一方、発生するジュール熱は、交流電界の二乗と電気伝導率の積に比例するので、伝搬率 V_{out} / V_{in} は電気伝導率に比例する。従って、伝搬率 V_{out} / V_{in} を半導体 14 の電気伝導率の相対値とすることができる。

30

【 0029 】

なお、ピークボルト計 19 で出力電極 12 に発生する高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} を測定する場合、高周波電源 18 で入力電極 11 に印加する高周波入力電圧の周波数及び振幅電圧値 V_{in} を調整し、振幅電圧値 V_{out} の最大値を求めるようにする。これによって、伝搬率 V_{out} / V_{in} を高感度かつ高精度で測定することができる。

40

【 0030 】

ここで、半導体 14 の電気伝導率 σ は、電子（キャリアともいう）の電荷を q 、伝導帯の電子（伝導電子）の濃度を n 、電子の移動度を μ とすると、 $\sigma = q n \mu$ となる。すなわち、電気伝導率 σ は、伝導電子の濃度 n 及び移動度 μ によって変化する。なお、伝導電子は、主に、例えば、半導体 14 中にドナーとしてドーパされた不純物原子の束縛準位（不純物準位ともいう）に存在する電子（ドナー電子）がフォノン（半導体 14 を構成している

50

原子の格子振動)のエネルギーを得て伝導帯に遷移したものである。

【0031】

一方、弾性表面波SAWに伴って発生する交流電界Eが半導体14に印加されると、伝導電子は交流電界Eにより振動しエネルギーを得る。そして、交流電界Eの強さは入力電極11に印加する高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} に比例するので、振幅電圧値 V_{in} を調整することで、伝導電子の得るエネルギーを調整できる。このため、半導体14の伝導電子のエネルギーを、半導体14中にドーブした不純物原子の束縛準位中で最も深い準位のエネルギーよりも大きくすると、交流電界でエネルギーを得た伝導電子は、ある確率で束縛準位(不純物ポテンシャル)を透過する可能性がある。そして、伝導電子が束縛準位を透過する際には、共鳴透過(ラムザウアー効果)という現象が起こり、伝導電子は束縛準位に一定時間留まる(トラップされる)ことになる。そして、トラップされた電子は、フォノンのエネルギーを得て、伝導帯に遷移して伝導電子となることができる。従って、共鳴透過が生じると、伝導電子がトラップされる不純物準位にドナー電子が存在することになり、このドナー電子が伝導帯に遷移することで、伝導電子の濃度 n が変化することになる。

10

【0032】

ここで、半導体14の温度(絶対温度) T の逆数に対する半導体14の電気伝導率の温度依存性を考える。今、ボルツマン定数を k として、 $1/kT$ を x とおくとき、電気伝導率の温度依存性 $d\sigma/dx$ は、

$$d\sigma/dx = q \cdot (\mu/x) \cdot n - q \cdot \mu \cdot |dn/x|$$

20

となる。すなわち、 x の変化に対し移動度 μ の変化が緩やかなもので、電子濃度 n は x に対し急激な変化になる。このため、電気伝導率の温度依存性から移動度 μ と電子濃度 n を分離することができる。半導体14の温度(絶対温度) T が低下する($1/kT$ が増加する)のに伴って、半導体14中の不純物原子の束縛準位が深い準位から順に励起されなくなっていくが、ある温度帯域(あるフォノンエネルギー帯域)においては、特定の束縛準位に占有されているドナー電子が励起されて、電気伝導率の温度依存性 $d\sigma/dx$ は $-q \cdot \mu \cdot |dn/x|$ 、すなわち伝導電子の電子濃度 n の変化に支配される。逆に、特定の束縛準位よりもフォノンエネルギーが小さくなると、ドナー電子は励起されず、電気伝導率が減少する。

【0033】

30

このため、半導体14の電気伝導率の温度 T の逆数、例えば $1/kT$ に対する温度依存性を求めると、不純物原子の束縛準位に対応するピーク領域が現れる(図5参照)。そして、ピーク領域の右側部分($1/kT$ が増加する側)の勾配が dn/x に対応し、勾配の値から電子濃度 n の温度依存性が求まり、全てのピーク領域のバックグラウンドの値から移動度 μ の温度依存性が求まる。

【0034】

なお、不純物原子の束縛準位間のエネルギー差が小さい場合、束縛準位に占有されているドナー電子の励起が連続して起こる。このため、半導体14の電気伝導率の半導体14の温度 T の逆数、例えば $1/kT$ に対する温度依存性を求めると、半導体14の電気伝導率は連続的に低下する(図6参照)。

40

【0035】

不純物原子の束縛準位 E_n は、アレニウスプロット法を用い活性化エネルギーから求めた。すなわち、温度 T において、不純物原子の束縛準位 E_n に占有されているドナー電子がフォノンエネルギーによって励起される場合、束縛準位 E_n をドナー電子の活性化エネルギーと言い換えることができ、ドナー電子の励起確率は、ボルツマン定数を k として $e^{-E_n/kT}$ と表せるので、温度 T における電気伝導率は、 σ_0 を係数として、 $\sigma = \sigma_0 \mu(T) e^{-E_n/kT}$ となる。従って、電気伝導率の温度 T の逆数、例えば $1/kT$ に対する温度依存性に現れるピーク領域の形状、又は電気伝導率が連続的に低下する領域に対して $e^{-E_n/kT}$ を当てはめることにより、不純物原子の電子(ドナー電子)の束縛準位 E_n を求めることができる(第3工程)。

50

【実施例】

【0036】

(実施例1)

弾性表面波発生手段の LiNbO_3 (ニオブ酸リチウム) 板 (長さ 30 mm、幅 10 mm、厚さ 0.5 mm) の表面で入力電極及び出力電極の間の領域の両側に長手方向に沿って長さ 10 mm、幅 3 mm、厚さ 5 μm の 4 フッ化エチレン樹脂膜をそれぞれ配置し、試料ホルダーに取付けられたシリコン板 (長さ 15 mm、幅 8 mm、厚さ 0.5 mm) の長手方向をニオブ酸リチウム板の長手方向と一致させて、4 フッ化エチレン樹脂膜を介してシリコン板をニオブ酸リチウム板の上方に配置する。なお、シリコン板には不純物原子としてアンチモンがドーブされ、抵抗率は $12 \sim 18 \cdot \text{cm}$ (温度 300 K) である。

10

【0037】

次いで、測定容器を密閉して真空ポンプで測定容器内を真空にする。そして、冷却機から試料ステージに冷却媒を供給し温度制御器でヒータに供給する電力を調整してシリコン板の温度を徐々に低下させ、シリコン板の温度が 250 K に到達した時点から、16 K まで 1 K ステップで温度を下げながら、各温度毎に高周波電源から入力電極に 200 MHz の高周波入力電圧を印加して弾性表面波を発生させ、弾性表面波が出力電極に到達した際の高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} を測定した。ここで、高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} を測定する場合、高周波電源で入力電極に印加する高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} を調整し、振幅電圧値の最大値を V_{out} とした。

20

【0038】

次いで、パーソナルコンピュータで、高周波入力電圧の振幅電圧値 V_{in} 及び高周波出力電圧の振幅電圧値 V_{out} から、弾性表面波が入力電極から出力電極に移動する際の伝搬率を V_{out} / V_{in} として演算し、伝搬率 V_{out} / V_{in} をシリコン板の電気伝導率の相対値として、シリコン板の電気伝導率の $1 / kT$ に対する温度依存性を求めた。その結果を図 5 に示す。

【0039】

図 5 では、シリコン板の電気伝導率の $1 / kT$ に対する温度依存性には、A ~ E の 5 つのピーク領域が現れるので、各ピーク領域の形状に対して $e^{-E_n / kT}$ を当てはめることにより、アンチモンの電子の活性化エネルギーを求めた。A ~ E の 5 つのピーク領域から求めたアンチモンの電子の活性化エネルギーの値は、100.4 meV、44.5 meV、32.6 meV、30.2 meV、及び 16.6 meV であった。ここで、A のピーク領域から求めた 100.4 meV はシリコン中の電子の移動度の温度依存性に対応している。一方、B ~ E の各ピーク領域からそれぞれ求めた 44.5 meV、32.6 meV、30.2 meV、16.6 meV の各準位は、それぞれアンチモンの電子の束縛準位の基底準位、2 番目の準位、3 番目の準位、及び 4 番目の準位に対応している。

30

【0040】

なお、アンチモンの電子の束縛準位の基底準位、2 番目の準位、3 番目の準位、及び 4 番目の準位の各文献値は、42.7 meV、32.9 meV、30.5 meV、11.5 meV であり、本方法により、シリコン中のアンチモンの電子の束縛準位が簡便な方法で精度よく求まることが確認できた。また、A ~ E の 5 つのピーク領域の勾配から移動度の温度依存性を求めると、 $T^{3/2}$ と求まった。

40

【0041】

(実施例2)

ゲルマニウム板の電気伝導率の $1 / kT$ に対する温度依存性をシリコン板の場合と同様の方法で求めた。なお、ゲルマニウム板には不純物原子としてアンチモンがドーブされ、抵抗率は $10 \sim 25 \cdot \text{cm}$ (温度 300 K) であり、測定温度領域は 27 ~ 300 K である。また、高周波電源から入力電極に印加する高周波入力電圧の周波数は 50 MHz である。その結果を図 6 に示す。

【0042】

図 6 では、ゲルマニウム板の電気伝導率は、 $1 / kT$ の増加に対して連続的に低下し、

50

シリコン板の電気伝導率 に現れたピーク領域は観察されなかった。このため、ゲルマニウム板の電気伝導率 を自然対数に変換した変換値の $1/kT$ に対する温度依存性を求めた。その結果を図7に示す。そして、図7に現れる各直線の傾き $F \sim I$ に対して $-E_n/kT$ を当てはめることにより、アンチモンの電子の活性化エネルギーを求めた。 $F \sim I$ の4つの直線領域から求めたアンチモンの電子の束縛準位 E_n の値は、 99.2 meV 、 10.3 meV 、 5.1 meV 、及び 2.5 meV であった。ここで、 F の直線領域から求めた 99.2 meV はゲルマニウムの電子の移動度の温度依存性に対応している。一方、 $G \sim I$ の各直線領域からそれぞれ求めた 10.3 meV 、 5.1 meV 、及び 2.5 meV の各準位は、それぞれアンチモンの不純物準位の基底準位、2番目の準位、及び3番目の準位に対応している。なお、アンチモンの電子の束縛準位の基底準位、2番目の準位、及び3番目の準位の各文献値は、 10.32 meV 、 4.74 meV 、及び 2.57 meV であり、本方法により、ゲルマニウム中のアンチモンの不純物準位が簡便な方法で精度よく求まることが確認できた。

10

【0043】

また、図6の電気伝導率 の温度依存性を、図8に示すように、複数の直線領域 a 、 b 、 c で近似し、各直線領域の勾配 d/dx を用いて移動度の温度依存性を求めると、 $T^{-1.3/2}$ と求まった。

【0044】

以上、本発明を、実施の形態を参照して説明してきたが、本発明は何ら上記した実施の形態に記載した構成に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載されている事項の範囲内で考えられるその他の実施の形態や変形例も含むものである。

20

例えば、不純物原子としてアンチモンをドーブしたが、リン等の5族元素、アルミニウム等の3族元素をドーブしてもよい。

【産業上の利用可能性】

【0045】

弾性表面波に伴って発生する交流電界を半導体に印加することで、伝導電子が不純物ポテンシャルを共鳴透過するラムザウアー効果が観察されるので、弾性表面波を用いて半導体中の不純物原子の束縛準位に占有された電子に関する量子情報（例えば、束縛準位の電子の波動関数に関する情報）の読み取りや書き込みが可能になると考えられる。このため、量子情報を制御することで、例えば、量子コンピュータを実現することが可能になる。

30

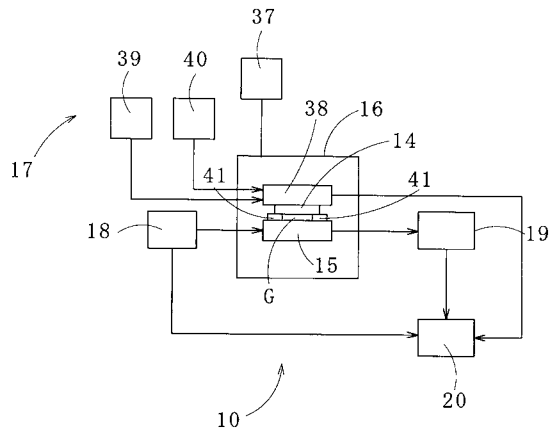
【符号の説明】

【0046】

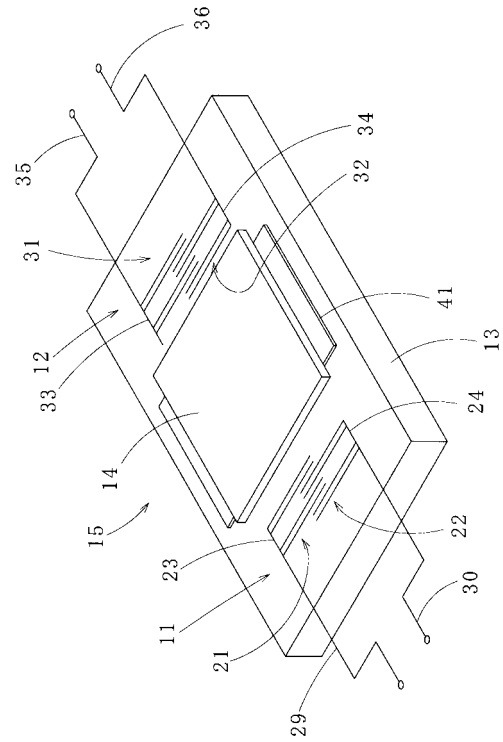
10：非接触測定装置、11：入力電極、12：出力電極、13：圧電体、14：半導体、15：弾性表面波発生手段、16：測定容器、17：温度調整手段、18：高周波電源、19：ピークボルト計、20：パーソナルコンピュータ、21：第1の楕形電極、22：第2の楕形電極、23、24：電極基部、25：第1の電極歯状部、26：第2の電極歯状部、27、27a：第1の素電極、28、28a：第2の素電極、29：第1のリード線、30：第2のリード線、31：第1の楕形電極、32：第2の楕形電極、33、34：電極基部、35：第1のリード線、36：第2のリード線、37：真空ポンプ、38：試料ホルダー、39：冷却機、40：温度制御器、41：絶縁膜

40

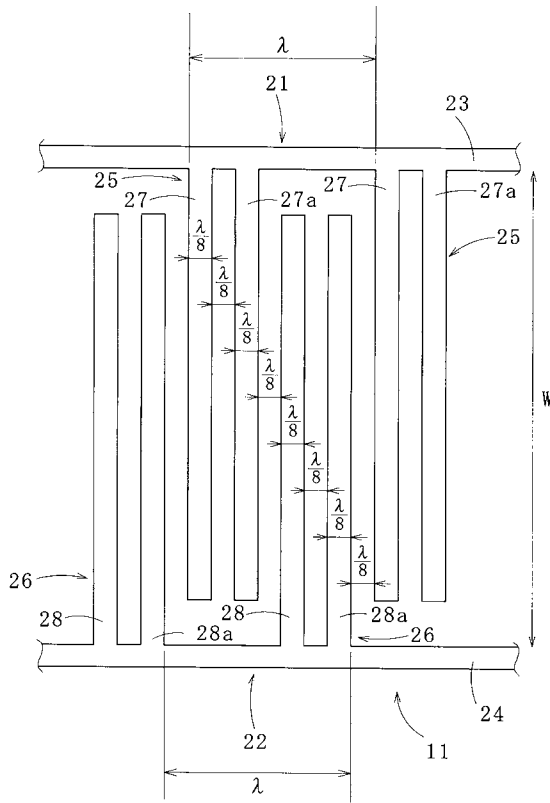
【図 1】



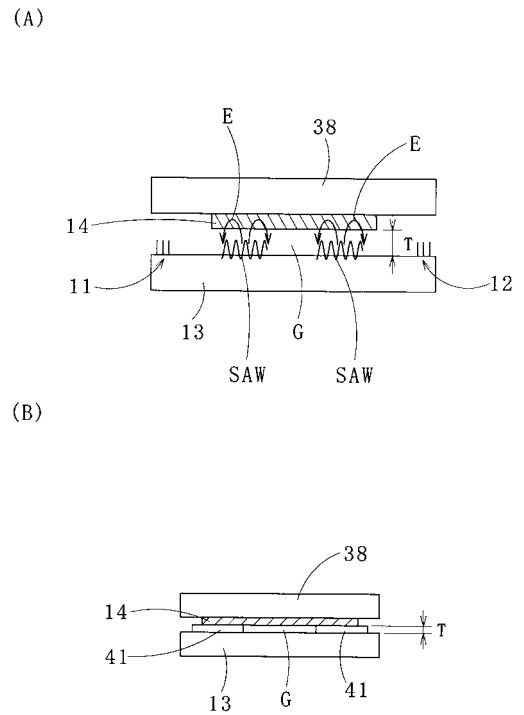
【図 2】



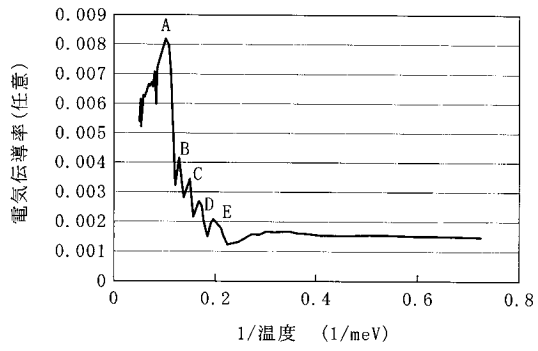
【図 3】



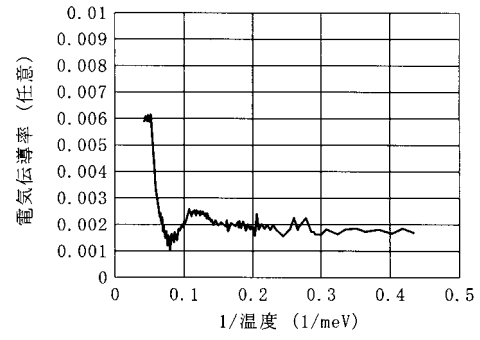
【図 4】



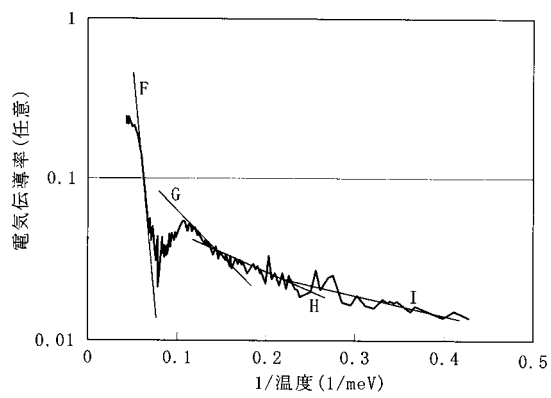
【 図 5 】



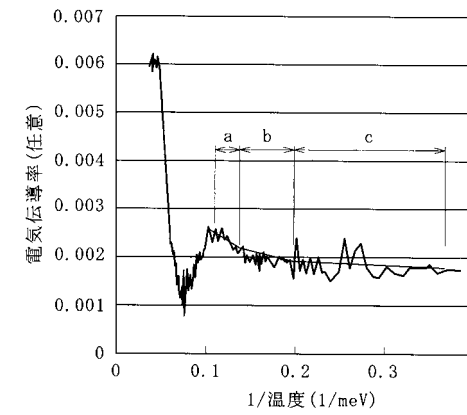
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



フロントページの続き

(56)参考文献 実開昭55-059347(JP,U)

特開2003-139746(JP,A)

特開平06-273477(JP,A)

特開2006-064537(JP,A)

国際公開第2009/069660(WO,A1)

P. Das, M.K. Roy, R.T. Webstar and K. Varahramyan, NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF Si WAFERS USING SAW, Proc Ultrason Symp, 米国, IEEE, 1979年, 278-283

P. DAS, R.T. Webstar and H. ESTRADA-VAZQUEZ, CONTACTLESS SEMICONDUCTOR SURFACE CHARACTERIZATION USING SURFACE ACOUSTIC WAVES, Surface Science, NL, North-Holland Publishing Company, 1979年, 86, 848-857

波多江政明、寺司英昭、孫勇、高温超伝導体YBa₂Cu₃O₇表面におけるガス吸着効果、平成19年度応用物理学会九州支部学術講演会、日本、応用物理学会九州支部事務局、2007年12月1日、94

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01R 27/02