(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2004-349582
(P2004-349582A)
(43)公開日　平成16年12月9日(2004.12.9)

(51)Int.Cl.[7]	F I		テーマコード（参考）
H01L 21/66	H01L 21/66	N	2G059
G01N 21/00	G01N 21/00	B	4M106
G01N 21/27	G01N 21/27	A	

審査請求 未請求　請求項の数 8　ＯＬ　（全 12 頁）

(21)出願番号　特願2003-146906(P2003-146906)
(22)出願日　平成15年5月23日(2003.5.23)

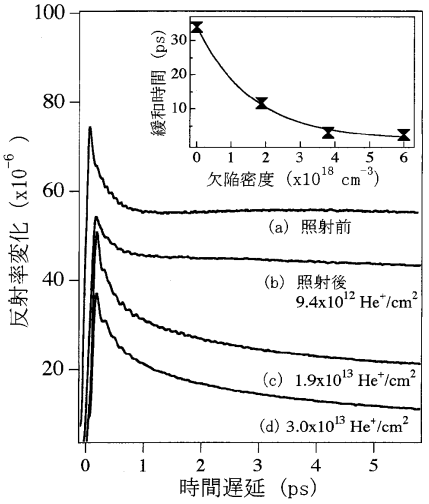
特許法第３０条第１項適用申請有り　２００３年１月３０日　発行の「レーザ学会学術講演会２３回年次大会講演予稿集」に発表

(71)出願人　301023238
独立行政法人物質・材料研究機構
茨城県つくば市千現一丁目２番１号
(71)出願人　899000079
学校法人慶應義塾
東京都港区三田２丁目１５番４５号
(74)代理人　100093230
弁理士　西澤　利夫
(72)発明者　長谷　宗明
茨城県つくば市千現一丁目２番１号　独立行政法人物質・材料研究機構内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】固体中の欠陥測定方法および欠陥測定装置

(57)【要約】
【課題】半導体結晶、半導体ナノ結晶などの固体中に微量に存在する格子欠陥のサイズを求めかつ格子欠陥分布をイメージングでき、デバイスの光応答性能を決める電気伝導特性の評価に適応できる固体中の欠陥測定方法を提供する。
【解決手段】フェムト秒パルスレーザを用いたポンプ＆プローブ分光法により励起されたコヒーレントフォノンあるいは光励起キャリアの緩和時間を測定し、$\tau = 1/N_t \sigma v_{th}$（τはコヒーレントフォノン（光励起キャリア）の緩和時間、N_tは欠陥密度、σは散乱断面積、v_{th}は熱拡散速度）の式を用いて、格子欠陥のサイズを求め、さらにポンプ光とプローブ光を固体試料に集光するレンズとして顕微鏡対物レンズを用い、固体試料をＸ－Ｙステージで二次元走査しながら反射率変化を測定し、反射率変化の振動振幅あるいは信号強度、またはコヒーレントフォノンあるいは光励起キャリアの緩和時間を二次元でプロットする。
【選択図】　図２



【特許請求の範囲】
【請求項１】
フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中に位相が揃った格子振動であるコヒーレントフォノンを励起し、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定することで、その反射率変化における振動振幅の減衰時間に対応する励起されたコヒーレントフォノンの緩和時間を求め、
$\tau_p = 1 / N_t \sigma v_{th}$
（τ_pはコヒーレントフォノンの緩和時間、N_tは欠陥密度、σは散乱断面積、v_{th}は熱拡散速度）
の式を用いて、散乱断面積σを求めることにより格子欠陥のサイズを求めることを特徴とする固体中の欠陥測定方法。
【請求項２】
フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中のキャリアを励起させて光励起キャリアとし、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定することで、その反射率変化における信号強度の減衰時間に対応する光励起キャリアの緩和時間を求め、
$\tau_c = 1 / N_t \sigma v_{th}$
（τ_cは光励起キャリアの緩和時間、N_tは欠陥密度、σは散乱断面積、v_{th}は熱拡散速度）
の式を用いて散乱断面積σを求めることにより格子欠陥のサイズを求めることを特徴とする固体中の欠陥測定方法。
【請求項３】
フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中に位相が揃った格子振動であるコヒーレントフォノンを励起し、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定する際に、ポンプ光とプローブ光を固体試料に集光するレンズとして顕微鏡対物レンズを用い、固体試料をＸ－Ｙステージで二次元走査しながら反射率変化を測定し、得られたコヒーレントフォノンの緩和時間あるいは反射率変化における振動振幅を二次元でプロットすることにより、欠陥密度を反映した二次元イメージを得ることを特徴とする固体中の欠陥測定方法。
【請求項４】
フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中のキャリアを励起して光励起キャリアとし、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定する際に、固体試料にポンプ光とプローブ光を集光するレンズとして顕微鏡対物レンズを用い、固体試料をＸ－Ｙステージで二次元走査しながら反射率変化を測定し、得られた光励起キャリアの緩和時間あるいは反射率変化における信号強度を二次元でプロットすることにより欠陥密度を反映した二次元イメージを得ることを特徴とする固体中の欠陥測定方法。
【請求項５】
請求項４記載の固体中の欠陥測定方法において、所定遅延時間に光学遅延回路を固定して固体試料を二次元で走査しながら反射率変化を測定し、その所定遅延時間での反射率変化における信号強度を二次元でプロットし、多数の各所定遅延時間について同様の操作を繰り返すことにより、欠陥分布に起因した光キャリアの時間分解二次元イメージを得ること

を特徴とする固体中の欠陥測定方法。
【請求項６】
請求項２、４および５いずれかに記載の固体中の欠陥測定方法において、固体試料が半導体である場合に半導体試料のバンドギャップ以上でかつそのバンドキャップ付近のエネルギーに中心波長を持つフェムト秒パルスレーザを使用することにより、光励起キャリアの緩和過程において、欠陥による緩和時間の短時間化を起こりやすくすることを特徴とする固体中の欠陥測定方法。
【請求項７】
請求項１または２記載の固体中の欠陥測定方法を行う固体中の欠陥測定装置であって、少なくとも、
１）フェムト秒パルスレーザを発振するレーザ光源と、
２）フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光に分岐する光分岐手段と、
３）ポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を所定時間遅延させるための時間遅延回路と、
４）前記フェムト秒パルスレーザを固体試料に集光するためのレンズと、
５）固体試料に照射された後のプローブ光を受光する受光手段と、
６）受光手段で受光したプローブ光の信号を取り込んで増幅する電流増幅手段と、
７）その増幅された信号が記録される記録手段と、
を備えていることを特徴とする固体中の欠陥測定装置。
【請求項８】
請求項３ないし５いずれかに記載の固体中の欠陥測定方法を行う固体中の欠陥測定装置であって、少なくとも、
１）フェムト秒パルスレーザを発振するレーザ光源と、
２）フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光に分岐する光分岐手段と、
３）ポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を所定時間遅延させるための時間遅延回路と、
４）前記フェムト秒パルスレーザを固体試料に集光するための顕微鏡対物レンズと、
５）固体試料を二次元に移動させるＸ－Ｙステージと、
６）固体試料に照射された後のプローブ光を受光する受光手段と、
７）受光手段で受光したプローブ光の信号を取り込んで増幅する電流増幅手段と、
８）その増幅された信号が記録される記録手段と、
を備えていることを特徴とする固体中の欠陥測定装置。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【発明の属する技術分野】
この出願の発明は、固体中の欠陥測定方法および欠陥測定装置に関するものである。さらに詳しくは、この出願の発明は、半導体結晶、半導体ナノ結晶などの固体中に微量に存在する格子欠陥のサイズを求めることができ、さらに格子欠陥分布をイメージングすることができ、デバイスの光応答性能を決める電気伝導特性の評価に適応できる固体中の欠陥測定方法および欠陥測定装置に関するものである。
【０００２】
【従来の技術とその課題】
半導体デバイスの光応答性能を決める電気伝導特性は、デバイスに用いられる半導体材料中の欠陥により左右されることから、その欠陥の状態を正確に検査・検出することは極めて重要なことである。
【０００３】
従来においては、半導体等の固体中の欠陥の検査・検出には非破壊・非接触の手法が用いられており、たとえば光の回折現象を用いた手法や、顕微ラマン分光法を含めた光の散乱現象を用いた手法や、光音響映像法などが知られている。
【０００４】

中でも固体からのラマン散乱光をＣＣＤカメラなどで高速取得する顕微ラマン分光法は１μｍオーダーの欠陥分布をイメージングする手法としてこれまでに産業分野において積極的に利用されてきた。

【０００５】

この顕微ラマン分光法では、通常ビームスプリッタにより二分された励起レーザ光を、対物レンズを用いて試料上の測定点に照射し、それによって発生したラマン散乱光を再び同じ対物レンズを通過させた後、分光器を通してＣＣＤフォトダイオードアレイなどで検出している。このようにして得られるのはラマンスペクトルであり、ラマンスペクトル強度などを各測定点においてプロットすることにより欠陥の密度分布状態が可視化できるのである（特許文献１および特許文献２）。

【０００６】

この顕微ラマン分光法を含めたラマン散乱分光法の測定原理は、レーザを照射した固体中の格子振動（フォノン）によるレーザの微弱な散乱光を検出することにある。格子振動は結晶の歪みや格子欠陥に敏感であり、欠陥の存在により散乱光強度の減少あるいはフォノンスペクトルのピーク周波数のシフトに感度良く現れるのである。

【０００７】

しかしながら、ラマン散乱分光では分光器の測定精度の制約から極端にスペクトル幅の狭いピークの検出は困難であり、たとえば、ダブルモノクロメータを使うと、約０．５ｃｍ$^{-1}$（カイザー）程度の分解能を得ることができるが、それ以下の線幅のピークを正確に測定するのは難しかった。また一方で、ラマン散乱分光では通常は固体に照射するレーザには連続発振（ＣＷ）レーザを使用するために、得られる欠陥分布は時間積算したものであり、たとえばイオン照射によって格子欠陥が生成されていく様子といった時間的に変化する現象などを測定することは不可能であった。

【０００８】

【特許文献１】

特開平５－２２３６３７

【特許文献２】

特開２００１－２１５１９３

【０００９】

そこでこの出願の発明は、以上のとおりの事情に鑑みてなされたものであり、従来技術の問題点を解消し、半導体結晶、半導体ナノ結晶などの固体中に微量に存在する格子欠陥のサイズを求めることや格子欠陥分布をイメージングすることができ、半導体デバイスの光応答性能を決める電気伝導特性の評価などに適応することができる固体中の欠陥測定方法および欠陥測定装置を提供することを課題としている。

【００１０】

【課題を解決するための手段】

この出願の発明は、上記の課題を解決するものとして、まず第１には、フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中に位相が揃った格子振動であるコヒーレントフォノンを励起し、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定することで、その反射率変化における振動振幅の減衰時間に対応する励起されたコヒーレントフォノンの緩和時間を求め、$\tau_p = 1/N_t \sigma v_{th}$（$\tau_p$はコヒーレントフォノンの緩和時間、$N_t$は欠陥密度、σは散乱断面積、$v_{th}$は熱拡散速度）の式を用いて、散乱断面積σを求めることにより格子欠陥のサイズを求めることを特徴とする固体中の欠陥測定方法を提供する。

【００１１】

第２には、この出願の発明は、フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中のキャリアを励起

させて光励起キャリアとし、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定することで、その反射率変化における信号強度の減衰時間に対応する光励起キャリアの緩和時間を求め、$\tau_c = 1 / N_t \sigma v_{th}$（$\tau_c$は光励起キャリアの緩和時間、$N_t$は欠陥密度、σは散乱断面積、$v_{th}$は熱拡散速度）の式を用いて散乱断面積σを求めることにより格子欠陥のサイズを求めることを特徴とする固体中の欠陥測定方法を提供する。

【００１２】

さらに、第３には、フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中に位相が揃った格子振動であるコヒーレントフォノンを励起し、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定する際に、ポンプ光とプローブ光を固体試料に集光するレンズとして顕微鏡対物レンズを用い、固体試料をＸ－Ｙステージで二次元走査しながら反射率変化を測定し、得られたコヒーレントフォノンの緩和時間あるいは反射率変化における振動振幅を二次元でプロットすることにより、欠陥密度を反映した二次元イメージを得ることを特徴とする固体中の欠陥測定方法を提供する。

【００１３】

第４には、フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中のキャリアを励起して光励起キャリアとし、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定する際に、固体試料にポンプ光とプローブ光を集光するレンズとして顕微鏡対物レンズを用い、固体試料をＸ－Ｙステージで二次元走査しながら反射率変化を測定し、得られた光励起キャリアの緩和時間あるいは反射率変化における信号強度を二次元でプロットすることにより欠陥密度を反映した二次元イメージを得ることを特徴とする固体中の欠陥測定方法を提供する。

【００１４】

第５には、第４の発明の固体中の欠陥測定方法において、所定遅延時間に光学遅延回路を固定して固体試料を二次元で走査しながら反射率変化を測定し、その所定遅延時間での反射率変化における信号強度を二次元でプロットし、多数の各所定遅延時間について同様の操作を繰り返すことにより、欠陥分布に起因した光キャリアの時間分解二次元イメージを得ることを特徴とする固体中の欠陥測定方法を提供する。

【００１５】

第６には、第２、４および５いずれかの発明の固体中の欠陥測定方法において、固体試料が半導体である場合に半導体試料のバンドギャップ以上でかつそのバンドキャップ付近のエネルギーに中心波長を持つレーザを光源として使用することにより、光励起キャリアの緩和過程において、欠陥による緩和時間の短時間化を起こりやすくすることを特徴とする固体中の欠陥測定方法を提供する。

【００１６】

第７には、第１または２の発明の固体中の欠陥測定方法を行う固体中の欠陥測定装置であって、少なくとも、１）フェムト秒パルスレーザを発振するレーザ光源と、２）フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光に分岐する光分岐手段と、３）ポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を所定時間遅延させるための時間遅延回路と、４）前記フェムト秒パルスレーザを固体試料に集光するためのレンズと、５）固体試料に照射された後のプローブ光を受光する受光手段と、６）受光手段で受光したプローブ光の信号を取り込んで増幅する電流増幅手段と、７）その増幅された信号が記録される記録手段と、を備えていることを特徴とする固体中の欠陥測定装置を提供する。

【００１７】

第８には、第３ないし５いずれかの発明の固体中の欠陥測定方法を行う固体中の欠陥測定装置であって、少なくとも、１）フェムト秒パルスレーザを発振するレーザ光源と、２）

フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光に分岐する光分岐手段と、３）ポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を所定時間遅延させるための時間遅延回路と、４）前記フェムト秒パルスレーザを固体試料に集光するための顕微鏡対物レンズと、５）固体試料を二次元に移動させるＸ－Ｙステージと、６）固体試料に照射された後のプローブ光を受光する受光手段と、７）受光手段で受光したプローブ光の信号を取り込んで増幅する電流増幅手段と、８）その増幅された信号が記録される記録手段と、を備えていることを特徴とする固体中の欠陥測定装置をも提供する。

【００１８】

【発明の実施の形態】

この出願の発明は上記のとおりの特徴をもつものであるが、以下にその実施の形態について説明する。

【００１９】

この出願の発明では、たとえば特開２００２－２１４１３７に示しているように、フェムト秒（１ｆｓ＝10^{-15}ｓ）パルスレーザをポンプ光（励起光）およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中に位相が揃った格子振動であるコヒーレントフォノンを励起し、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定する、いわゆるポンプ＆プローブ分光法により、反射率変化を測定し、さらにその反射率変化における振動振幅の減衰時間に対応する励起されたコヒーレントフォノンの緩和時間を求め、

$$\tau_p = 1 / N_t \sigma v_{th}$$

（τ_pはコヒーレントフォノンの緩和時間、N_tは欠陥密度、σは散乱断面積、v_{th}は熱拡散速度）

の式を用いて、散乱断面積σを求めることにより格子欠陥のサイズを求めることを大きな特徴としている。

【００２０】

あるいは、コヒーレントフォノンの代わりに光励起キャリアの緩和時間を測定することにより固体中の格子欠陥のサイズを求めることができ、フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中のキャリアである電子あるいは正孔を励起させて光励起キャリアとし、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定する、いわゆるポンプ＆プローブ分光法により、反射率変化を測定し、さらにその反射率変化における信号強度の減衰時間に対応する光励起キャリアの緩和時間を求め、

$$\tau_c = 1 / N_t \sigma v_{th}$$

（τ_cは光励起キャリアの緩和時間、N_tは欠陥密度、σは散乱断面積、v_{th}は熱拡散速度）

の式を用いて散乱断面積σを求めることにより格子欠陥のサイズを求めることも可能である。

【００２１】

上記のように、欠陥密度と光励起キャリアの緩和時間（あるいはコヒーレントフォノンの緩和時間）の間にはＳｈｏｃｋｌｅｙ－Ｒｅａｄ－Ｈａｌｌ（ＳＲＨ）再結合統計と呼ばれる以下の関係式がある。

$$\tau_c = 1 / N_t \sigma v_{th}$$

（τ_cは光励起キャリア（コヒーレントフォノン）の緩和時間、N_tは欠陥密度、σは散乱断面積、v_{th}は熱拡散速度）

なおこの式中の欠陥密度N_tはモンテカルロシミュレーション（Ｊ．Ｆ．Ｚｅｇｌｅｒ，Ｊ．Ｐ．Ｂｉｅｒｓａｃｋ，Ｕ．Ｌｉｔｔｍａｒｋ，ｉｎ Ｔｈｅ Ｓｔｏｐｐｉｎｇ ａｎｄ Ｒａｎｇｅ ｏｆ Ｉｏｎｓ ｉｎ Ｓｏｌｉｄｓ，Ｖｏｌ．１（Ｐｅｒｇａｍｏｎ Ｐｒｅｓｓ，Ｎｅｗ Ｙｏｒｋ，１９８５）参照）でＨｅイオンに

よりＧａＡｓ中に生成する欠陥深さ分布（通常はガウス分布）を求め、それが１つのＨｅイオン当たりの欠陥生成効率に相当することから欠陥深さ分布の全面積から欠陥生成効率の深さ方向の平均値および欠陥分布の深さを求め、

N_t＝（イオン照射面密度）×（欠陥生成効率の平均値）÷（欠陥分布の深さ）

により求められる。またv_{th}は物質固有の定数でありフォノンやキャリアが熱拡散する際の平均速度である。

【００２２】

したがって上記のＳＲＨの式に、実験で得られた光励起キャリアの緩和時間あるいはコヒーレントフォノンの緩和時間およびN_tとv_{th}を用い、最小二乗フィッティングすることにより散乱断面積σを求めることができ、これから直ちに$\sigma = \pi R^2$の関係を用いて欠陥中心の直径（２Ｒ）を確定することができるのである。

【００２３】

そして上記のように、この出願の発明の固体中の欠陥測定方法を用いることによって、固体試料中の格子欠陥のサイズを正確に求めることができることから、この出願の固体中の欠陥測定方法を半導体結晶、半導体ナノ結晶などの結晶性の評価に適用することができ、半導体デバイス中の電気伝導性などの評価をその場で行うことが可能となるのである。

【００２４】

また、フェムト秒パルスレーザをポンプ光およびプローブ光として用い、それらポンプ光およびプローブ光の少なくとも一方を光学遅延回路で時間遅延し、固体試料へのレンズでの集光によるポンプ光照射によって固体試料中に位相が揃った格子振動であるコヒーレントフォノンを励起し、その固体試料への前記レンズでの集光によるプローブ光照射で固体試料の反射率変化を測定する際に、固体試料にポンプ光とプローブ光を集光するレンズとして顕微鏡対物レンズを用い、固体試料をＸ－Ｙステージで二次元走査しながら反射率変化を測定し、得られたコヒーレントフォノンの緩和時間あるいは反射率変化における振動振幅を二次元でプロットすることにより、欠陥密度を反映した二次元イメージを得ることができる。

【００２５】

また同様にポンプ＆プローブ分光法により反射率変化を測定する際に、固定試料にポンプ光とプローブ光を集光するレンズとして顕微鏡対物レンズを用い、試料をＸ－Ｙステージで二次元走査しながら反射率変化を測定し、得られた光キャリアの緩和時間あるいは反射率変化における信号強度を二次元でプロットすることにより、欠陥密度を反映した二次元イメージを得ることもできる。さらに、所定遅延時間（たとえば１ｐｓ）に光学遅延回路を固定して試料をＸ－Ｙステージで二次元走査しながら反射率変化を測定し、その所定遅延時間での反射率変化における信号強度を二次元でプロットし、さらに多数の各所定遅延時間について同様の操作を繰り返すことにより、欠陥分布に起因した光キャリアの時間分解二次元イメージを得ることもできるのである。

【００２６】

すなわち、欠陥密度のイメージングについては、ポンプ＆プローブ分光法により、コヒーレントフォノンあるいは光励起キャリアの緩和時間を測定する際に、顕微鏡対物レンズ下で測定試料をＸ－Ｙ軸マイクロステージなどのＸ－Ｙステージで二次元走査することによって得ることができ、たとえばある１点で反射率変化を測定し、次にＸ－Ｙ軸マイクロステージを、たとえば１μｍだけ動かし、またその点で反射率変化の測定を行う。この動作を測定試料のある領域（たとえば１ｃｍ×１ｃｍの領域）にわたって繰り返すことにより約１μｍの分解能で得られた反射率変化における振動振幅あるいは信号強度のマッピング、もしくはコヒーレントフォノンあるいは光励起キャリアの緩和時間のマッピングを得ることができるのである。

【００２７】

したがって、この出願の発明の固体中の欠陥測定方法においてはフェムト秒パルスレーザを用いたポンプ＆プローブ分光法により固体試料中にコヒーレントフォノンあるいは光励起キャリアを励起し、そのコヒーレントフォノンの緩和時間あるいは光励起キャリアの緩

和時間の変化、すなわち固体試料中の反射率変化から格子欠陥のサイズの見積もりができ、またコヒーレントフォノンあるいは光励起キャリアの緩和時間あるいは反射率変化における振動振幅・信号強度を測定することで、格子欠陥密度の二次元イメージを正確に得ることができるだけでなく、さらには欠陥分布に起因した光キャリアの時間分解二次元イメージも正確に得ることができるのである。

【００２８】

またこの出願の発明においては、コヒーレントフォノンまたは光励起キャリアの緩和時間を反射率変化の振動振幅または信号強度の減衰時間として直接測定することが可能であるため、特に緩和時間の長い（ラマンでは線幅の狭い）コヒーレントフォノンまたは光励起キャリアに対しては感度が優れており、液体ヘリウム温度などの極低温の状態でフォノンの寿命が延びた場合にも適用することができる。

【００２９】

さらにこの出願の発明の固体中の欠陥測定方法は時間分解能を持つことから、コヒーレントフォノンの緩和時間と光励起キャリアの緩和時間の両方からデバイスなどにおける時間とともに変化する電子（フォノン）の欠陥による散乱現象などの評価をその場で測定することができる。

【００３０】

そして固体試料が半導体の場合、半導体試料のバンドギャップ（たとえばＧａＡｓの場合室温で１．４ｅＶ）以上でかつそのバンドキャップ付近のエネルギーに中心波長を持つレーザを光源として使用することにより（ＧａＡｓの場合波長８５０ｎｍ付近に中心波長を持つレーザ光源）、光励起キャリアの緩和過程において、欠陥による緩和時間の短時間化を起こり易くすることができ、欠陥密度の二次元イメージのＳ／Ｎ比を飛躍的に向上させることができるのである。

【００３１】

次にこの出願の発明の固体中の欠陥測定方法を行うための固体中の欠陥測定装置の一例を図１に示す。

【００３２】

フェムト秒パルスレーザ光源（１）を光源とし、そこから発振されたフェムト秒パルスレーザはミラー（２）で反射され、光分岐手段であるビームスプリッタ（３）によりプローブ光（５）とポンプ光（励起光）（６）に分岐される。なおプローブ光（５）とポンプ光（６）の時間遅延は光学遅延回路（７）により与えられ、そのときのステッピングモータのステップ間隔は１μｍ～３μｍ程度が望ましいが、それ以上またはそれ以下でもあっても実施可能である。ポンプ光（６）は光変調器（８）によって約２ｋＨｚ程度の周波数で変調される。なお（４）は１／２波長板である。

【００３３】

そして、時間分解反射率測定の試料前集光部において、ポンプ光（６）およびプローブ光（５）に相当するビームを一つの対物レンズ（９）で集光し固体試料（１０）に照射している。

【００３４】

なおこの出願の発明の方法により一様に分布した欠陥のサイズを求める場合には、対物レンズ（９）を通常の単レンズに変えても実施可能である。

【００３５】

プローブ光（５）は固体試料（１０）によって反射した後、再び対物レンズ（９）を通過してビームスプリッタ（３）で反射されてレンズ（１１）に集光されて、受光手段であるＳｉ－ＰＩＮフォトディテクタ（１２）に取り込まれる。このＳｉ－ＰＩＮフォトディテクタ（１２）からの光電流信号を電流増幅器（電流増幅手段）（１３）に入力してここで10^5～10^7倍程度に信号を増幅する。この電流増幅器（１３）としては、例えば米国のＳｔａｎｆｏｒｄ　Ｒｅｓｅａｒｃｈ　Ｓｙｓｔｅｍｓ社製のＳＲ５３０などを用いるのが好ましい。またこの場合、増幅する信号にはバンドパスフィルターをかけることが望ましく、例えば、１ｋＨｚ－３ｋＨｚのバンドパスフィルターを用いることにより、低周

波ノイズと高周波ノイズを低減させることができる。
【００３６】
そして電流増幅器（１３）から出力した信号はロックイン増幅器（１４）に入力される。ここで光変調器（８）からのトリガー信号により周波数同調された信号のみを１０倍程度増幅し、コンピュータ（記録手段）（１５）で記録する。
【００３７】
このような装置を用いることによって前述したようなこの出願の発明の固体中の欠陥測定方法を実施することができるのである。
【００３８】
以下、添付した図面に沿って実施例を示し、この出願の発明の実施の形態についてさらに詳しく説明する。もちろん、この発明は以下の例に限定されるものではなく、細部については様々な態様が可能であることは言うまでもない。
【００３９】
【実施例】
＜実施例１＞
まずこの出願の発明の固体中の欠陥測定方法の一実施形態により、固体試料としてイオン照射した半導体ＧａＡｓを用い、その半導体ＧａＡｓの欠陥のサイズを求めた。
【００４０】
図２に、図１の固体中の欠陥測定装置を用いて、イオン照射した半導体ＧａＡｓにおいて得られた時間分解反射率信号の一例を示す。ただし、固体試料前のポンプ光とプローブ光を集光するためのレンズとしては、欠陥のサイズを求めるため顕微鏡対物レンズではなく焦点距離１０ｃｍの単レンズを用いている。またイオン照射は５ｅＶで加速した加速したHeイオンを用いて10^{-9}Ｔｏｒｒの超高真空チャンバー中で行い、図２（ａ）はイオン照射前の固体試料の反射率変化を示すグラフであり、（ｂ）～（ｄ）はHeイオンを固体試料に照射した後の固体試料の反射率変化を示すグラフであり、それぞれの照射密度は（ｂ）9.4×10^{12} He^{+}/cm^{2}、（ｃ）1.9×10^{13} He^{+}/cm^{2}、（ｄ）3.0×10^{13} He^{+}/cm^{2}であった。遅延時間ゼロで急激に立ち上がってゆっくりと減衰する信号成分は半導体をバンドギャップ以上の光で励起した際に生じた光励起キャリアの緩和を表し、このキャリア信号の数％程度の強度の振動成分（振動振幅）は位相の揃った格子振動であるコヒーレントフォノンに対応する。振動モードはＧａＡｓの縦波光学（ＬＯ）フォノンに対応し、この周波数は約８．８ＴＨｚであり、これは時間周期に変換して約１１４ｆｓになる。コヒーレントフォノンの緩和時間（振動振幅の減衰時間）から欠陥のサイズを同定することも可能であるが、ここではキャリアの緩和時間（信号強度の減衰時間）から欠陥のサイズを求めた。図２の挿入図はキャリアの緩和時間を欠陥密度に対してプロットしたものである。ここで欠陥密度はモンテカルロシミュレーションを用いて上記の照射条件について計算した。この関係をＳＲＨの式、
$\tau_c = 1/N_t \sigma v_{th}$
（τ_cは光励起キャリアの緩和時間、N_tは欠陥密度、σは散乱断面積、v_{th}は熱拡散速度）
を用いて最小二乗フィッティングすることにより散乱断面積$\sigma = 6.2\times10^{-16}$ cm^{2}を求めることができた。これから、直ちにＧａＡｓの欠陥のサイズが２．８Åであることが分かった。
＜実施例２＞
次に欠陥分布のイメージングを行った例を図３に示す。図３は図２と同じＧａＡｓ試料のイオン照射領域とイオン非照射領域の境界付近において図１に示す固体中の欠陥測定装置を用いて所定遅延時間（１ｐｓ）に光学遅延回路を固定して固体試料を二次元で走査しながら反射率変化を測定し、その１ｐｓの遅延時間での反射率変化における信号強度を二次元でプロットし、多数の各所定遅延時間について同様の操作を繰り返すことにより得た、欠陥分布に起因した光キャリアの時間分解二次元イメージを示している。
【００４１】

なお試料へのＨｅイオン照射密度は１．９×１０^{12}Ｈｅ$^{+}$／ｃｍ^{2}で試料走査の空間分解能は１０μｍとした。なお、図３の明るい領域は反射率変化の信号強度が大きく、暗い領域は反射率変化の信号強度が小さい。

【００４２】

図３よりイオン照射領域とイオン非照射領域の境界がはっきりと現れているのが分かる。よってこの出願の発明により半導体ＧａＡｓのイオン照射によって生じた欠陥分布のイメージが可能であることが分かった。

【００４３】

【発明の効果】

以上詳しく説明したとおり、この出願の発明によって、半導体結晶、半導体ナノ結晶などの固体中に微量に存在する格子欠陥のサイズを求めることや格子欠陥分布をイメージングすることができ、デバイスの光応答性能を決める電気伝導特性の評価に適応できる固体中の欠陥測定方法が提供され、さらに顕微鏡とコンパクトなレーザおよび光学系を組み合わせることによって、コヒーレントフォノンの緩和測定あるいはキャリアの緩和測定装置を製品として設計することが可能となる。

【００４４】

また従来の顕微ラマン分光法では半導体デバイス中の電気伝導ダイナミクスの評価は不可能であったが、この出願の発明の固体中の欠陥測定方法は時間分解能を持つことから、コヒーレントフォノンの緩和とキャリアの緩和の両方からデバイス中の電気伝導性などの評価をその場で測定することができるのである。

【図面の簡単な説明】

【図１】この出願の発明の固体中の欠陥測定方法に用いられる装置を例示した図である。

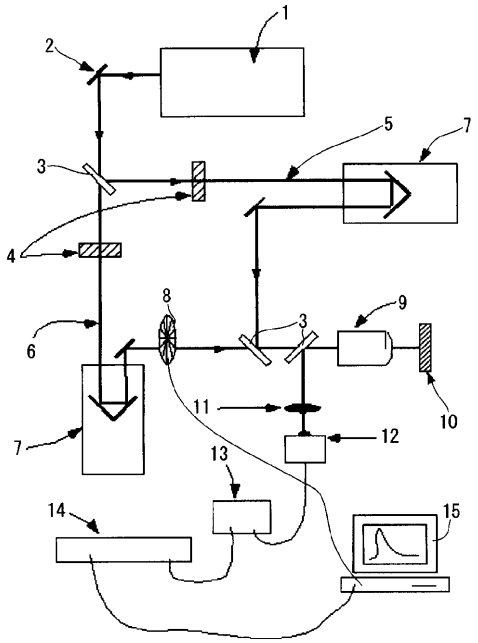
【図２】この出願の発明の固体中の欠陥測定方法によりＧａＡｓの欠陥のサイズを求めた際の遅延時間と時間分解反射率の関係を示すグラフである。

【図３】この出願の発明の固体中の欠陥測定方法によりＧａＡｓの欠陥分布を求めた際の二次元イメージである。

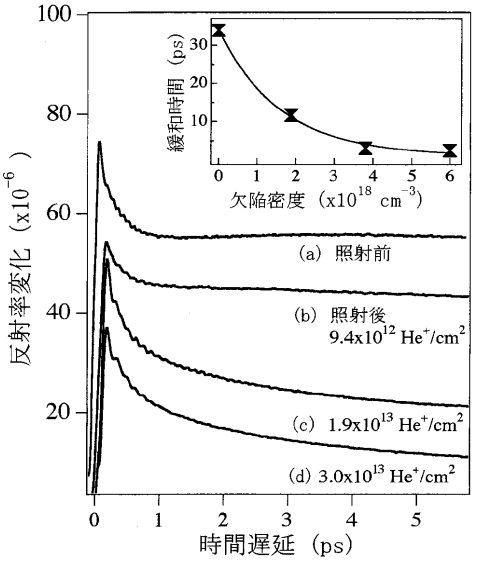
【符号の説明】

１　フェムト秒パルスレーザ光源
２　ミラー
３　ビームスプリッタ
４　１／２波長板
５　プローブ光
６　ポンプ光
７　光学遅延回路
８　光変調器
９　対物レンズ
１０　固体試料
１１　レンズ
１２　Ｓｉ－ＰＩＮフォトディテクタ
１３　電流増幅器
１４　ロックイン増幅器
１５　コンピュータ

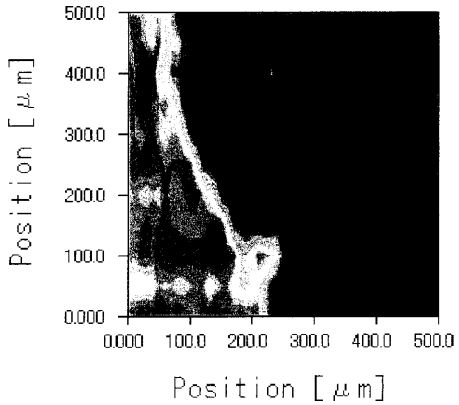
【図１】


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

【図２】


反射率変化（x10^{-6}）
時間遅延（ps）
緩和時間（ps）
欠陥密度（x10^{18} cm^{-3}）
(a) 照射前
(b) 照射後
9.4x10^{12} He^{+}/cm^{2}
(c) 1.9x10^{13} He^{+}/cm^{2}
(d) 3.0x10^{13} He^{+}/cm^{2}

【図３】


Position [μm]
Position [μm]
0.000
100.0
200.0
300.0
400.0
500.0

フロントページの続き

(72)発明者　北島　正弘
茨城県つくば市千現一丁目２番１号　独立行政法人物質・材料研究機構内
(72)発明者　石岡　邦江
茨城県つくば市千現一丁目２番１号　独立行政法人物質・材料研究機構内
(72)発明者　神成　文彦
神奈川県横浜市港北区日吉３－１４－１　慶應義塾大学理工学部内
(72)発明者　藤井　康隆
神奈川県横浜市港北区日吉３－１４－１　慶應義塾大学理工学部内

Ｆターム(参考) 2G059 AA05 BB16 DD13 EE02 FF01 GG01 GG06 GG08 JJ11 JJ13
JJ20 JJ22 KK01 MM03 MM08 MM10 PP04
4M106 AA01 BA05 CB19 DB09 DH38