

(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2019-152501

(P2019-152501A)

(43) 公開日 令和1年9月12日(2019.9.12)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 N 21/21 (2006.01)	GO 1 N 21/21 Z	2 G O 5 9
GO 1 J 4/04 (2006.01)	GO 1 J 4/04 Z	
GO 1 N 21/3581 (2014.01)	GO 1 N 21/3581	

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2018-37015 (P2018-37015)
 (22) 出願日 平成30年3月2日 (2018.3.2)

新規性喪失の例外適用申請有り

(71) 出願人 504145320
 国立大学法人福井大学
 福井県福井市文京3丁目9番1号
 (74) 代理人 100110814
 弁理士 高島 敏郎
 (72) 発明者 谷 正彦
 福井県福井市文京三丁目9番1号国立大学
 法人福井大学内
 (72) 発明者 北原 英明
 福井県福井市文京三丁目9番1号国立大学
 法人福井大学内
 (72) 発明者 古屋 岳
 福井県福井市文京三丁目9番1号国立大学
 法人福井大学内

最終頁に続く

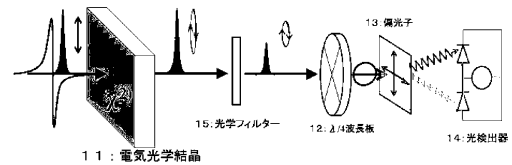
(54) 【発明の名称】 電磁波検出方法及び電磁波検出装置

(57) 【要約】

【課題】 簡単な構成で電磁波検出の感度を高めることのできる電磁波検出装置の提供を目的とする。

【解決手段】 EOサンプリング法を利用して異なる二つの偏光成分の検出光を検出する電磁波検出方法において、前記検出光の偏光状態を表す偏光状態式の一部に係数を挿入することで、前記検出光の強度が $1 / (\dots < 1)$ 倍となる前記偏光状態式の構成部分を求め、当該構成部分に相当する前記偏光成分を 倍に変換するように偏光制御を行うようにした。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

E O サンプリング法を利用して異なる二つの偏光成分の検出光を検出する電磁波検出方法において、

前記検出光の偏光状態を表す偏光状態式の一部に係数を挿入することで、前記検出光の信号強度が $1 / (\sin \theta / \cos \theta)$ 倍となる前記偏光状態式の構成部分を求め、

当該構成部分に相当する前記偏光成分を $\sin \theta / \cos \theta$ 倍に変換するように偏光制御を行うこと、
を特徴とする電磁波検出方法。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の電磁波検出方法において、前記検出光を楕円偏光とした後、前記楕円偏光のうち長軸側の偏光成分を $\sin \theta / \cos \theta$ 倍に偏光制御すること、

を特徴とする電磁波検出方法。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の電磁波検出方法において、前記検出光を直交する二方向の偏光成分とした後、長軸側の偏光成分を減衰させ、和周波発生(SFG)成分および差周波発生(DFG)成分を含んだ短軸側の偏光成分について、前記検出光の信号強度が $1 / (\sin \theta / \cos \theta)$ 倍となるように偏光制御したことを特徴とする電磁波検出方法。

【請求項 4】

前記偏光制御を、光学フィルタを透過させることによって行うことを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載の電磁波検出方法。

【請求項 5】

前記 θ の値が、前記検出光の電界振幅を E_0 としたときの前記検出光の強度 ($|E_0|^2$) がノイズ強度よりも大きいことを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の電磁波検出方法。

【請求項 6】

E O サンプリング法を利用して異なる二つの偏光成分の検出光を検出する請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の電磁波検出方法を用いた電磁波検出装置であって、

前記偏光成分のうち、長軸側の前記偏光成分を減衰させる偏光制御手段を、電気光学結晶の後に配置したこと、

を特徴とする電磁波検出装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電磁波を利用した非破壊検査装置等に用いられる電磁波検出方法及び電磁波検出装置に関する。

【背景技術】

【0002】

電磁波を利用して非破壊的な検査を行う装置や方法が知られている。近年では、X線装置に代わる安全な検査手法として、テラヘルツ (THz) 周波数帯の電磁波を用いた電気光学 (EO) サンプリング法により非破壊的に検査等を行う技術が開発されている (例えば特許文献 1, 2 参照)。

EO サンプリング法としては、例えば、上記した周波数帯の電磁波の電界が電気光学結晶に誘起する複屈折を、フェムト秒レーザーを光源とするプローブ光によりサンプリング検出するものが知られている。

【0003】

図 7 は、EO サンプリング検出を行う電磁波検出装置の一例を示す概略図である。検出対象の電磁波と遅延時間をつけた十分短いレーザーパルス (プローブ光と称する。特に電磁波による変調を受けたあとは検出光と称する) とを同じ直線偏光にし、コリニアに電気光学結晶 11 に照射する。電気光学結晶 11 から出射された楕円偏光の検出光は、 $\lambda / 4$ 波長板 12 に入射されてその位相が 90 度シフト (位相バイアス) される。そして、 $\lambda /$

10

20

30

40

50

4波長板12から出射された偏光状態の検出光を偏光子（例えばWollaston Prism）13に入射することで、当該偏光を長軸側の縦方向の偏光成分と短軸側の横方向の偏光成分に分離し、それぞれの強度を光検出器14で検出する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2013-174513号公報

【特許文献2】特許第3388319号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

ところで、テロ対策強化などの要求から、空港やイベント会場、会議場など人の集まる施設での手荷物検査や全身検査などでは、高精度かつ正確な透視検査が求められているが、現状において主流となっているX線透視検査では精度、正確性及び画像の鮮明性に限界があり、X線透視検査に代わる新たな技術の速やかな開発と普及が切望されている。

E Oサンプリング法は、X線透視検査に代わる新たな電磁波検出技術として注目されているものの、上記した従来の電磁波検出方法及び電磁波検出装置では、高速でスキャンしてマッピングすることが困難で、未だその用途の範囲が限定されているという問題がある。

【0006】

本発明は、E Oサンプリング法の速やかな用途拡大を目的としてなされたもので、簡単かつ安価なコストで従来のE Oサンプリング法による電磁波検出の感度を大幅に高めることができ、高速マッピングにも対応可能な電磁波検出方法及び電磁波検出装置の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記した従来のE Oサンプリング法による電磁波検出装置では、4波長板12によって直交する二つの偏光成分に位相差（光路差）を設けて検出光の偏光状態の変更を行っている。4波長板12から出射される検出光は円偏光に近い状態に変換され、偏光子によって分離される縦方向の偏光成分と横方向の偏光成分を差分検出することで電磁波の電界に比例した信号を得ている。

この従来法によるE Oサンプリングにおける信号強度（検出光の偏光変調度）は、前記二方向の偏光成分における円偏光からのずれによる強度差を I 、前記検出光の総強度を I_0 とすると、 $I = I / I_0$ と表すことができるが、この式は電気光学効果によって誘起される位相変化 $\sigma = I / I_0$ に対応している。

【0008】

具体的には、光検出器で検出される縦方向の偏光成分の光強度を I_v 、同横方向の偏光成分の光強度を I_h としたとき、信号強度は $(I_v - I_h) / (I_v + I_h) = I / I_0 = \sigma$ で表すことができる。電気光学結晶を透過した直後の検出光の縦方向の偏光成分は、横方向の偏光成分よりもかなり大きい。そこで電気光学結晶を透過した直後の横方向の偏光成分と縦方向の偏光成分の比率を制御することができれば、信号強度 I を増大させることができると期待できる。検出光の偏光制御によるE O信号強度 I の変化率を σ としたときのE Oサンプリングにおける信号強度を表す式を以下に示す。

【0009】

【数1】

$$\sigma = \alpha \frac{\Delta I}{I_0}$$

10

20

30

40

50

【0010】

この式から、係数 k が 1 より大きくなるように偏光制御を行えば、信号強度 I を k 倍に増大できることがわかる。

【0011】

具体的に本発明の電磁波検出方法は、請求項 1 に記載するように、EO サンプリグ法を利用して異なる二つの偏光成分の検出光を検出する電磁波検出方法において、前記検出光の偏光状態を表す偏光状態式の一部に係数 k を挿入することで、前記検出光の信号強度が $I = I_0 / k$ ($k < 1$) 倍となる前記偏光状態式の構成部分を求め、当該構成部分に相当する前記偏光成分を振幅で k 倍に変換するように偏光制御を行う構成としてある。

【0012】

電気光学結晶に入射された電磁波は楕円偏光の検出光として出射されるが、このような楕円偏光の検出光の縦方向の偏光成分は横方向の偏光成分よりかなり大きなものとなる。このような楕円偏光においては、請求項 2 に記載するように長軸側の偏光成分を k 倍に変換（減衰）することで、信号強度を $1/k$ 倍に増強することができる。

【0013】

本発明は、検出光に含まれる和周波発生光成分と差周波発生光成分を空間的に分離し、もとの検出光成分との干渉効果を利用して電磁波検出を行うヘテロダイン形の EO サンプリグ検出法にも同様に適用が可能である。すなわち、請求項 3 に記載するように、前記検出光を直交する二方向の偏光成分とした後、長軸側の偏光成分を減衰させ、和周波発生 (SFG) 光成分および差周波発生 (DFG) 光成分を含んだ短軸側の偏光成分について、前記検出光の信号強度が $I = I_0 \sin^2 \theta / \cos^2 \theta$ （ここで θ はあとで示す実施形態において、電気光学結晶に入射する際の検出光（プローブ光）の縦偏光からの傾き角である。）倍となるように偏光制御すればよい。

なお、前記偏光制御は、例えば請求項 4 に記載するように光学フィルタを用いて行うことができる。

前記係数 k の値を小さくするほど信号強度を増強することができる。しかし、前記係数の値が小さすぎるとノイズが大きくなって却って検出精度を低下させることから、請求項 5 に示すように、検出光の電界振幅を E_0 としたときの前記検出光の強度 ($|E_0|^2$) がノイズ強度よりも大きい範囲内で前記係数 k の値を決定するとよい。

【0014】

上記の本発明の電磁波検出方法を利用した電磁波検出装置は、請求項 6 に記載するように、EO サンプリグ法を利用して、異なる二つの偏光成分の検出光を検出する電磁波検出装置において、前記偏光成分のうち、長軸側の前記偏光成分を減衰させる偏光制御手段を、電気光学結晶の後に配置した構成としてある。前記偏光制御手段は、前記電気光学結晶から出射された前記検出光の楕円偏光のうち、長軸側の偏光成分を減衰させるものであってもよい。前記偏光制御手段としては前記長軸側の偏光成分を減衰させる光学フィルタを用いることができる。

【0015】

本発明の電磁波検出装置は、電磁波を和周波発生光成分と差周波発生光成分を空間的に分離し、もとの検出光（プローブ光）成分との干渉効果を利用して検出を行うヘテロダイン形の EO サンプリグ検出法にも適用が可能で、この場合前記偏光制御手段は、前記電気光学結晶から出射された前記検出光の偏光成分のうち、長軸側の偏光成分を減衰させ、和周波発生 (SFG) 光成分および差周波発生 (DFG) 光成分を含んだ短軸側の偏光成分を透過させるものとすればよい。

なお、本発明において用語「減衰」には、長軸側の偏光成分を完全に除去（カット）する場合も含まれる。

【発明の効果】

【0016】

本発明は上記のように構成されているので、検出光の直交する二方向の偏光成分のうちの一方について、当該偏光成分を相対的に減衰等させる制御を行うだけで感度を高めるこ

10

20

30

40

50

とができる。また、偏光制御手段として光学フィルタを用いることができ、既存の電磁波検出装置に市販の光学フィルタを挿入するだけで電磁波検出の感度を高めることができる。さらに、S/N比との関係で減衰率には一定の制限があるものの、感度を飛躍的に高めることができるため電磁波検出信号の高速マッピングも可能になり、空港やイベント会場、会議場など人の集まる施設での手荷物や入場者の全身の透視検査など、適用範囲を広範に拡げることが可能になる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

以下、本発明の電磁波測定方法の好適な実施形態を詳細に説明する。

[本発明の原理]

電気光学結晶11(図7参照)に電磁波(THz波)とプローブ光(通常100fs程度の幅を持つ可視、近赤外域のパルス光)が入射すると、電磁波による電界が電気光学結晶中に非等方的な屈折率変化(複屈折) n を誘起する。このとき、電気光学結晶11中の伝搬距離を L 、電気光学結晶11から出射される検出光の波長を λ とすると、位相差 $\Delta\Gamma$ は、以下の式で表される。

【0018】

【数2】

$$\Delta\Gamma = 2\pi\Delta n \frac{L}{\lambda}$$

【0019】

この位相差 $\Delta\Gamma$ は通常は非常に小さく、電気光学結晶11から出射される検出光はごくわずかに楕円偏光(長軸は垂直方向)となるが、直線偏光に近い偏光状態である。この状態の検出光が $1/4$ 板を透過すると、検出光はほぼ円偏光となる。

ここで、縦方向の偏光成分の強度を I_v 、横方向の偏光成分の強度を I_h 、偏光を分離する前の検出光の強度を I_0 とすると、それぞれは以下の式で与えられる。

【0020】

【数3】

$$I_v = I_0 \sin^2\left(\frac{\Delta\Gamma + \pi/2}{2}\right) = I_0 \frac{1 - \cos 2(\Delta\Gamma/2 + \pi/4)}{2} = I_0 \frac{1 + \sin \Delta\Gamma}{2} = I_0 \left| \frac{1}{2} + \frac{\Delta\Gamma}{2} \right|$$

【0021】

【数4】

$$I_h = I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\Gamma + \pi/2}{2}\right) = I_0 \frac{1 + \cos 2(\Delta\Gamma/2 + \pi/4)}{2} = I_0 \frac{1 - \sin \Delta\Gamma}{2} = I_0 \left| \frac{1}{2} - \frac{\Delta\Gamma}{2} \right|$$

【0022】

なお式3および式4において、最終項の $\Delta\Gamma/2$ は、 $\Delta\Gamma$ が十分に小さいために、 $\sin \Delta\Gamma/2$ を近似したものである。円偏光からのずれ ΔI は、縦偏光と横偏光の強度 I_v と I_h の差 $I_v - I_h$ で与えられ、式3および式4を用いると

【0023】

【数5】

$$\Delta I = I_0 \Delta\Gamma$$

【0024】

すなわち、

10

20

30

40

50

【 0 0 2 5 】

【 数 6 】

$$\sigma = \frac{\Delta I}{I_0} = \Delta \Gamma$$

【 0 0 2 6 】

を得る。このことから、E O サンプリングの信号強度は、電磁波によって複屈折が誘起された結果生じる、直交する（この場合 + / - 45 度）偏光成分間の位相差 に比例し、検出光の / 2 の位相バイアス後の円偏光からのずれに対応していることがわかる。

10

E O サンプリングの信号強度を高めるには、式 6 の分母の I_0 を減衰させればよい。ただし、 I_0 を減衰させれば I も減衰することになる。そのため、 I の減衰率を I_0 の減衰率よりも小さくして、E O サンプリングの信号強度 I / I_0 を効率よく増強させる必要がある。

【 0 0 2 7 】

そこで本発明の発明者は、電気光学結晶から射出された直後の検出光を減衰させたあとの検出光強度を $I_0' = \beta^2 I_0$ とすることとした。すなわち、検出光の振幅を β 倍（検出光強度で β^2 倍）に減衰させるようにする。このようにすると、 I も減衰するが、その減衰率を s とし、減衰後の I を I' とすると、 $I' = s I$ と表され、このときの E O サンプリングの信号強度を表す式 6 は

20

【 0 0 2 8 】

【 数 7 】

$$\sigma = \frac{\Delta I'}{I_0'} = \frac{s \Delta I}{\beta^2 I_0} = \alpha \frac{\Delta I}{I_0} = \alpha \Delta \Gamma \quad (\alpha > 1)$$

【 0 0 2 9 】

と書き換えることができる。ここで $\alpha = s / \beta^2$ とすると、 $\alpha > 1$ であれば信号強度は増強されることになる。この条件を満たすためには $s > \beta^2$ ($0 < \beta < 1$) であればよく、このとき分母 I_0 を減衰させても分子 I は分母 I_0 ほどには減衰しないことになる。

30

このように検出光の偏光状態を制御することで、上記の式 7 を導出することができれば、E O サンプリングの信号強度を高めることができることになる。

【 0 0 3 0 】

この予測に基づき、電気光学結晶を透過した直後の検出光の偏光状態をどのように制御すれば、すなわち、偏光状態式のどの部分に係数 を挿入すれば式 7 のような結果を得ることができるかを求める。

電気光学結晶を透過した直後の検出光の偏光状態の式は、複屈折の長軸、短軸の方向がそれぞれ + 45 度、- 45 度であり、それぞれの位相差が + / 2、- / 2 となることから、振幅を E として以下の式で表すことができる。

【 0 0 3 1 】

【 数 8 】

$$\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_0 \exp(-i\omega t) \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) + E_0 i \mathbf{e}_{90} \exp(-i\omega t) \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right)$$

40

【 0 0 3 2 】

なお、式 8 において添え字は偏光成分の方向を示していて、添え字 0 は縦方向を、添え字 90 は横方向を示している。この式 8 から時間因子 ($\exp(-i\omega t)$) を省略して書き換えると、

【 0 0 3 3 】

50

【数 9】

$$\mathbf{E} = E_0 \mathbf{e}_0 \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) + E_0 i \mathbf{e}_{90} \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right)$$

【0034】

となる。この式 9 では、縦方向の振幅が $E_0 \cos(\quad / 2)$ 、横方向の振幅が $E_0 \sin(\quad / 2)$ で、後者の位相が 90 度遅れて振動する楕円偏光であることを示している。

ここで今、式 9 の楕円偏光成分のうち、一方の構成部分（以下の例では長軸側である縦方向の偏光成分（添え字 0 の偏光成分））に係数 β を挿入してみる。係数 β の挿入により式 9 は以下のように書き換えることができる。 10

【0035】

【数 10】

$$\mathbf{E}' = E_0 \mathbf{e}_0 \beta \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) + E_0 i \mathbf{e}_{90} \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right)$$

$$= E_0 \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{-45} \left\{ \beta \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) \right\} + E_0 \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{-45} \left\{ \beta \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) - i \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) \right\}$$

20

【0036】

ここで \mathbf{e}_{+45} と \mathbf{e}_{-45} は縦（鉛直）方向からそれぞれ +45 度、-45 度傾いた方向の単位ベクトルで \mathbf{e}_0 と \mathbf{e}_{90} の間には以下の関係がある。

【数 11】

$$\mathbf{e}_{+45} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_0 + \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{90}, \quad \mathbf{e}_{-45} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_0 - \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{90}$$

$$\mathbf{e}_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{+45} + \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{-45}, \quad \mathbf{e}_{90} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{+45} - \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{-45}$$

30

【0037】

式 10 に β / 2 の位相バイアスを加え、-45 度の偏光成分の位相を 90 度ずらすと、

【0038】

【数 12】

$$\mathbf{E}'' = E_0 \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{+45} \left\{ \beta \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) \right\} + E_0 \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{e}_{-45} \left\{ i \beta \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) + \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) \right\}$$

$$= E_0 \frac{1}{2} \mathbf{e}_0 (1+i) \left\{ \beta \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) + \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) \right\} + E_0 \frac{1}{2} \mathbf{e}_{90} (1-i) \left\{ \beta \cos\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) - \sin\left(\frac{\Delta\Gamma}{2}\right) \right\}$$

【0039】

よって、

40

【0040】

【数 13】

$$I_v = E_0^2 \frac{(1-i)(1+i)}{4} \left(\beta^2 \cos^2 \frac{\Delta\Gamma}{2} + 2\beta \cos \frac{\Delta\Gamma}{2} \sin \frac{\Delta\Gamma}{2} + \sin^2 \frac{\Delta\Gamma}{2} \right)$$

$$\cong \frac{E_0^2}{2} (\beta^2 + \beta \Delta\Gamma)$$

【0041】

50

【数 1 4】

$$I_h = \frac{E_0^2}{2} \left(\beta^2 \cos^2 \frac{\Delta\Gamma}{2} - 2\beta \cos \frac{\Delta\Gamma}{2} \sin \frac{\Delta\Gamma}{2} + \sin^2 \frac{\Delta\Gamma}{2} \right)$$

$$\cong \frac{E_0^2}{2} (\beta^2 - \beta\Delta\Gamma)$$

【0042】

10

【数 1 5】

$$\Delta I' = I_v - I_h = E_0^2 \beta \Delta\Gamma$$

【0043】

となる。これより、 I の減衰率 $s =$ となることが分かる。検出光の強度は $I_0 = E_0^2$ から、

$$I_0' \cong \beta^2 E_0^2$$

20

となるので、EOサンプリング信号は、

【0044】

【数 1 6】

$$\frac{\Delta I'}{I_0'} = \frac{E_0^2 \beta \Delta\Gamma}{E_0^2 \beta^2} = \frac{\Delta\Gamma}{\beta}$$

【0045】

30

となる。

この式 1 6 は、EOサンプリングの信号強度を高めるための式 7 と比較すると $= 1 /$ であることが分かる。このことから、電気光学結晶から出射された楕円偏光の検出光の偏光状態を表す偏光状態式のうち、一方の偏光成分を表す構成部分に係数 を挿入すれば、EOサンプリング信号の強度を増強できることがわかる。

ここで、EOサンプリング信号の強度を増強するには、係数 を 1 より小さく (< 1) する必要がある。すなわち式 1 0 の例に従えば、係数 を挿入する構成部分に相当するのは長軸側である縦方向の偏光成分であるから、縦方向の偏光成分を減衰させることで、EOサンプリング信号の強度を増強することができる。増強できる大きさは式 7 及び式 1 5 から $1 /$ 倍である。

40

【0046】

なお、係数 を小さくすればするほど式 1 5 において $/$ の値は大きくなるが、実際には係数 を一定以下に小さくすると光強度が小さくなりすぎて、ノイズ成分が相対的に大きくなる。光学フィルタ等で減衰させたあとの検出光の強度 $|E_0^2 - \beta^2|$ がノイズ強度より小さくなると SN 比が劣化するので、電磁波照射部から出射された直後の検出光の強度、周波数、電気光学結晶の特性、 $/ 4$ 波長板及び光学フィルタ等の性能などを総合的に勘案した上で、係数 の値を適切に選択する必要がある。

【0047】

以下、この原理に基づく本発明の好適な実施形態を、図面を参照しながら詳細に説明する。

50

図1は、本発明の電磁波検出装置の具体的な装置構成を示す概略図、図2はその主要部の詳細を説明する概略図である。

図1に示すように、この実施形態の電磁波検出装置は、プローブ光を射出するフェムト秒レーザー装置24とプローブ光の偏光状態を制御する光学系23とを備えたプローブ光照射部と、プローブ光を射出するフェムト秒レーザー装置21(通常24と同一)とエミッタ22とを備えた、30GHzより大きく30THzより小さい周波数の電磁波を照射する電磁波照射部を有する。前記プローブ光照射部から照射されたプローブ光及び電磁波照射部から照射された電磁波(例えばTHz光)は、反射鏡25、凹面鏡27a、凹面鏡27bを経て光変調手段である電気光学結晶11に入射される。

なお、電気光学結晶11に入射される電磁波は、前記プローブ光照射部から照射されたプローブ光と電磁波照射部から照射されたTHz波などの電磁波とが結合されたものである。また電気光学結晶中で電気光学効果による変調を受け、電気光学結晶11から出射されたプローブ光を、変調前のものと区別するため「検出光」と称するものとする。

【0048】

上記の式10に基づき、図2に示すように、入射された電磁波を楕円偏光の検出光として出射する電気光学結晶11の直後であって、 $\lambda/4$ 波長板12の手前に、前記楕円偏光のうち長軸側の偏光成分を減衰させる偏光制御手段としての光学フィルタ15を配置する。この光学フィルタ15は、長軸側の偏光成分(この実施形態では縦方向の偏光成分)を係数 k だけ減衰させ、これと直交する短軸側の偏光成分についてはそのまま透過させるものである。

この光学フィルタ15を利用して、長軸側の偏光成分の振幅を例えば $1/10$ (係数 $k=1/10$)に減衰させると、式16にしたがって光検出器14で検出されるEOサンプリングの信号の強度は約10倍に増強されることになる。

但し、係数 k を小さくしすぎるとプローブ光の強度が小さくなりすぎて、ノイズ成分が相対的に大きくなる。すなわち、縦方向の偏光成分を減衰したあとの電磁波の強度 $|E_0|^2$ がノイズ強度より小さくなるとSN比が劣化するので、 $|E_0|^2$ がノイズ強度以下にならないように係数 k を選択するのが好ましい。係数 k は $1/100 \sim 50/100$ を目安とすることができる。

【0049】

[実験1]

本発明の効果を実証するべく、本発明の発明者は電気光学結晶11として厚さ1mmの(001)面カットZnTe結晶を用い、周波数帯30GHz~4THz、検出光の強度減衰率 $k^2=5\%$ ($k=0.22$)として図1の装置で実験を行った。その結果を図3のグラフに示す。

図3(a)は信号強度のプローブ光の遅延時間を変化させたときの変位、すなわちTHz波の時間波形を示すグラフ、(b)はそれをフーリエ変換した信号強度と周波数との関係、すなわちパワースペクトルを示すグラフである。

図3(a)(b)のグラフでは、光学フィルタ15を設ける前を破線で、設けた後を実線で表している。図3(a)のグラフから、信号強度は光学フィルタ15を設ける前後で約2.5倍に増強されていることがわかる(なお、理論から期待される増強率は約4.5倍である)。また、図3(b)のグラフから、実験を行った周波数帯の全範囲で信号の増強が確認できた。

実験で用いた電磁波の周波数帯は30GHz~4THzの範囲であるが、本発明は30THz程度の周波数までは好適に適用することができる。

【0050】

[他の実施形態]

本発明は、ヘテロダインEOサンプリング検出系にも同様に適用が可能である。

ヘテロダインEOサンプリング法は、THz波等の電磁波とプローブ光の電気光学結晶11内での非線形相互作用により生じた和周波発生(SFG)光および差周波発生(DFG)光が、もとのプローブ光と光波干渉することで検出光の強度変調を直接的に検出する手法

10

20

30

40

50

である。

【0051】

ヘテロダインEOサンプリングで、電磁波照射部から照射された電磁波はプローブ光照射部から照射されたプローブ光に対して非共軸に電気光学結晶11に入射し、波数ベクトルの位相整合条件の違いから、和周波発生(SFG)光と差周波発生(DFG)光が、検出光(電気光学結晶11から出射され光検出器14で検出される電磁波を「検出光」と記載する)の中心軸に対して互いに反対方向に電気光学結晶11から出射される。またSFG光とDFG光の位相は反転しており、もとのプローブ光との干渉による強度変調は、互いに極性が反転する。この性質を利用して、SFG光とDFG光のヘテロダインEOサンプリングによる検出光の変調を検出器14で検出する。

10

電気光学結晶11に入射させるプローブ光は縦偏光からわずかに偏光方向に傾け(傾斜させる角度 θ としては $0.5 \sim 5^\circ$ 程度が目安である)、縦方向の偏光成分 $E_0 \cos \theta$ (主たる偏光成分)とごく小さな横方向の偏光成分 $E_0 \sin \theta$ を持たせるようにする。

ここで、入射検出光の振幅を E_0 、その強度を $I_0 = |E_0|^2$ 、電磁波(THz光)とプローブ光の相互作用で発生するSFG光およびDFG光の振幅を $E_{SFG/DFG}$ とすると、ヘテロダインEOサンプリング信号は次の式であらわされる。

【0052】

【数17】

$$\frac{\Delta I_{hetero}}{I_0} = \frac{2 \operatorname{Re}[E_{SFG/DFG}]}{E_0} = \frac{n_{opt}^3 r_{ij} \omega_{opt} L}{c} E_{THz} \operatorname{Im}[g(\Delta kL)]$$

20

【0053】

式17において、 n_{opt} はEO結晶の検出光に対する屈折率、 r_{ij} はEO係数、 ω_{opt} は電磁波の角周波数、 L は相互作用長(EO結晶の厚さ)、 E_{THz} は電磁波の振幅、 $\operatorname{Im}[g(\Delta kL)]$ は位相不整合因子である。

この実施形態では、式17の右辺の分母に $\sin \theta$ 、分子に $\cos \theta$ を挿入する。これは電気光学結晶に入射するプローブ光を縦偏光から θ だけ傾けたことにより、分母のSFG光およびDFG光と干渉するプローブ光の横偏光振幅が $\cos \theta$ 倍、SFG光およびDFG光の振幅が $\sin \theta$ 倍されることに対応する。この結果、式17は、

30

【0054】

【数18】

$$\frac{\Delta I'_{hetero}}{I'_0} = \frac{n_{opt}^3 r_{ij} \omega_{opt} L \cos \theta}{c \sin \theta} E_{THz} \operatorname{Im}[g(\Delta kL)]$$

【0055】

となり、この式18の右辺を、 $\beta = \sin \theta / \cos \theta$ として書き換えると、

【0056】

【数19】

$$\frac{\Delta I'_{hetero}}{I'_0} = \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \frac{\Delta I_{hetero}}{I_0} = \frac{1}{\beta} \frac{\Delta I_{hetero}}{I_0}$$

40

【0057】

となる。この式19は、先の実施形態の式16と同じ形となり、プローブ光の偏光制御に対応した係数 β を挿入する前と後では、EOサンプリング信号の強度が $1/\beta$ ($\beta < 1$)

50

倍だけ増強されることになる。

図4は、本発明の第二の実施形態にかかる電磁波検出装置の具体的な装置構成を示す概略図、図5は図4の装置の主要部の詳細を説明する概略図である。

この実施形態のヘテロダインEOサンプリング検出系では、プローブ光をわずかな角度だけ傾ける光学フィルタ(例えば $\lambda/2$ 波長板)16を、電気光学結晶11の前に配置する。そして、電気光学結晶11から出射された検出光の偏光成分のうち縦方向の偏光成分をカットする光学フィルタ15を電気光学結晶11の直後に配置する。これにより残った横方向の偏光成分は、SFG光およびDFG光と干渉して変調される。

【0058】

ヘテロダインEOサンプリングにおいては、偏光制御により検出光の縦偏光からの傾きを小さくすればするほど、 $1/\sin^2\theta$ の値が大きくなり、信号の増倍率は上がることになる。

しかし、 θ を小さくしすぎると縦偏光成分をカットされたあとのプローブ光強度が小さくなりすぎて、相対的にノイズ成分が大きくなる。したがって、縦方向の偏光成分をカットしたあとの検出光の強度 $|E_0|^2 \cos^2\theta$ (ただし $\cos^2\theta = 1$ のとき $\sin^2\theta = 0$ であるから、この式は $|E_0|^2 \sin^2\theta$ と等価) がノイズ強度より小さくなると、SN比が劣化するので、 θ は、横方向の偏光成分の強度 $|E_0|^2 \sin^2\theta$ がノイズ強度と同程度になる値以下には小さくしないことが好ましい。

【0059】

[実験2]

この第二の実施形態について、実験1と同様に実験を行った。 θ を 2.8° 及び $\theta = 0.87^\circ$ とし、周波数帯 $30\text{GHz} \sim 4\text{THz}$ として、図4の装置で実験を行った。その結果を図6のグラフに示す。

図6(a)は信号強度のプローブ光の遅延時間を変化させたときの位相、すなわちTHz波の時間波形を示すグラフ、(b)はそれをフーリエ変換した信号強度と周波数との関係、すなわちパワースペクトルを示すグラフである。

図6(a)(b)のグラフでは、光学フィルタ15を設ける前を破線で、設けた後を実線($\theta = 2.8^\circ$)及び一点鎖線($\theta = 0.87^\circ$)で表している。

図6(a)のグラフから、信号強度は光学フィルタ15を設ける前後でそれぞれ約20倍($\theta = 2.8^\circ$)及び66倍($\theta = 0.87^\circ$)に増強されていることがわかる。また

、図6(b)のグラフから、実験を行った周波数帯の全範囲で信号の増強が確認できた。しかし、 $\theta = 0.87^\circ$ (一点鎖線)の場合はSN比が劣化し、実用的な結果は得られなかった。

【0060】

本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明は上記の説明に限定されるものではない。

例えば、上記の説明で偏光制御手段の一例として光学フィルタ15を挙げたが、同様の作用を奏するのであれば他の手段を用いてもよい。

また、検出光の偏光状態を示す偏光状態式(例えば式10)においては、一つの構成部分に係数 k_1 を挿入し、他の構成部分には係数「1」を挿入していると解釈することができる。すなわち、係数 k_1 は他の構成部分の係数との関係で相対的なものであり、他の構成部分に1以外の係数(k_2, k_3, \dots)を挿入することも可能である。例えば、上記の実施形態に従えば、式12の偏光状態式において短軸側の構成部分に係数 k_1 (> 1) を挿入して横方向の偏光成分を増幅すれば、相対的に長軸側の縦方向の偏光成分が減衰されることになり、式17と同じ結果を得ることができる。このように、他の構成部分に別の係数 k_2, k_3, \dots を挿入する場合は、これら係数 k_1, k_2, \dots との関係で相対的に $k_1 < 1$ となる係数 k_2, k_3, \dots 及び係数 k_1 を選択すればよい。

【産業上の利用可能性】

【0061】

本発明の電磁波検出装置及び電磁波検出方法は、ミリ波帯やギガヘルツ波帯の周波数帯

10

20

30

40

50

でも適用が可能であるが、特に周波数 30 GHz ~ 30 THz (波長 10 mm ~ 10 μm) のテラヘルツ波帯での適用が好ましく、原理的には 30 THz を越える周波数帯の電磁波検出にも適用が可能である。

また、本発明の電磁波検出装置及び電磁波検出方法は、各種センシング装置やイメージング装置などに適用が可能である。

【図面の簡単な説明】

【0062】

【図1】本発明の電磁波検出装置の具体的な装置構成を示す概略図である。

【図2】図1の装置の主要部の詳細を説明する概略図である。

【図3】第一の実施形態の電磁波検出装置の効果を説明するグラフで、図3(a)は信号強度のプローブ光の遅延時間を変化させたときの変位、すなわち THz 波の時間波形を示すグラフ、(b)はそれをフーリエ変換した信号強度と周波数との関係、すなわちパワースペクトルを示すグラフである。

10

【図4】本発明の第二の実施形態にかかる電磁波検出装置の具体的な装置構成を示す概略図である。

【図5】図4の装置の主要部の詳細を説明する概略図である。

【図6】第二の実施形態の電磁波検出装置の効果を説明するグラフで、図6(a)は信号強度のプローブ光の遅延時間を変化させたときの変位、すなわち THz 波の時間波形を示すグラフ、(b)はそれをフーリエ変換した信号強度と周波数との関係、すなわちパワースペクトルを示すグラフである。

20

【図7】本発明の従来例にかかり、EOサンプリング検出を行う電磁波検出装置の一例を示す概略図である。

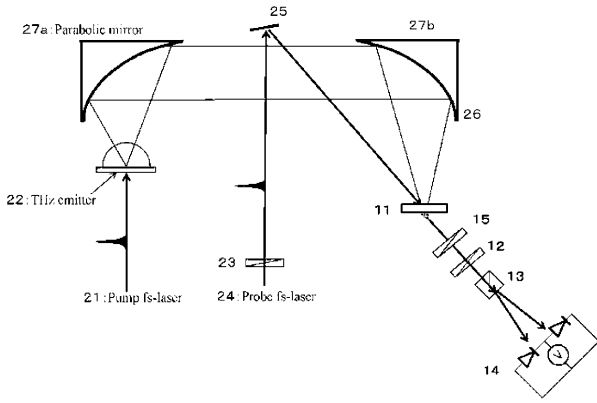
【符号の説明】

【0063】

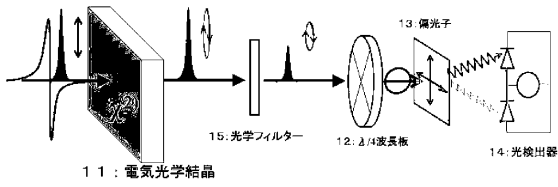
- 1 1 電気光学結晶
- 1 2 / 4 波長板
- 1 3 偏光子
- 1 4 光検出器
- 1 5 光学フィルタ
- 1 6 光学フィルタ (/ 2 波長板)
- 2 1 フェムト秒レーザー装置
- 2 2 エミッタ
- 2 3 レンズ
- 2 4 フェムト秒レーザー装置
- 2 5 反射鏡

30

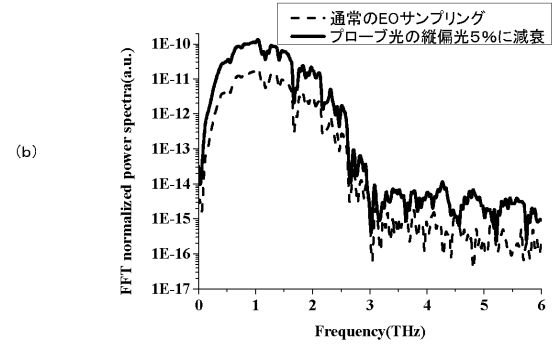
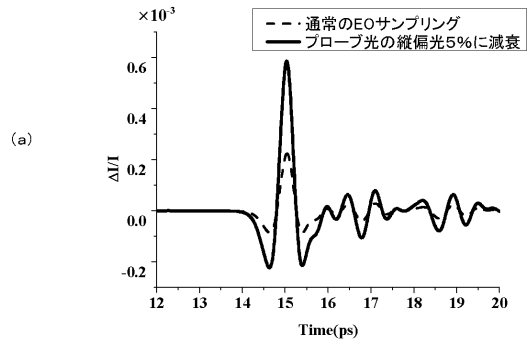
【 図 1 】



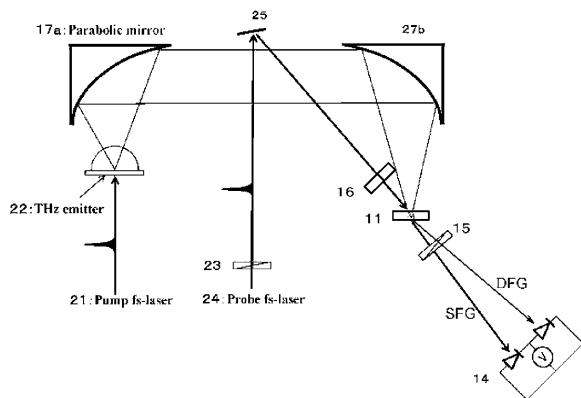
【 図 2 】



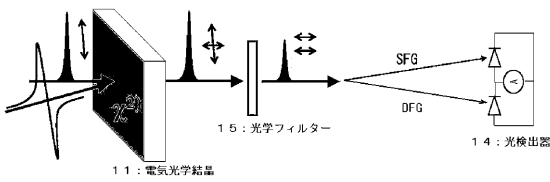
【 図 3 】



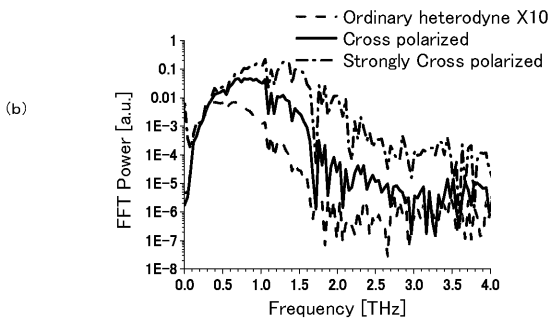
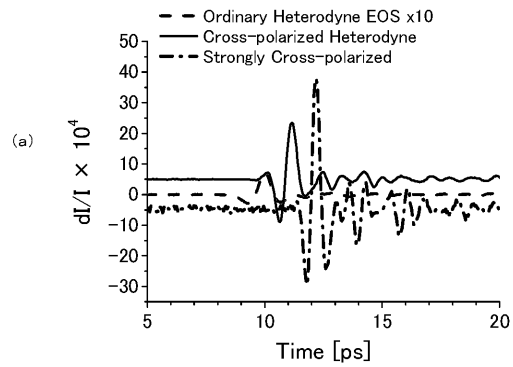
【 図 4 】



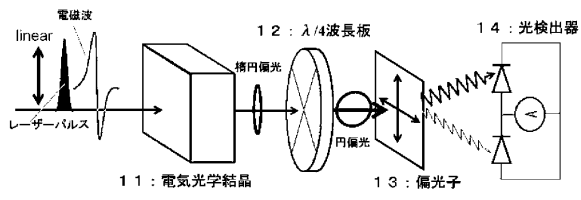
【 図 5 】



【 図 6 】



【 図 7 】



フロントページの続き

(72)発明者 山本 晃司
福井県福井市文京三丁目9番1号国立大学法人福井大学内

(72)発明者 安本 拓朗
福井県福井市文京三丁目9番1号国立大学法人福井大学内

(72)発明者 後藤 大輝
福井県福井市文京三丁目9番1号国立大学法人福井大学内

(72)発明者 加藤 博之
福井県福井市文京三丁目9番1号国立大学法人福井大学内

Fターム(参考) 2G059 AA02 BB20 CC20 EE01 EE05 FF04 HH01 HH05 JJ19 JJ20