

(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2005-291961
(P2005-291961A)

(43) 公開日 平成17年10月20日(2005.10.20)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
GO 1 N 23/223	GO 1 N 23/223	2 G 0 0 1
GO 1 T 1/17	GO 1 T 1/17	2 G 0 8 8
GO 1 T 1/24	GO 1 T 1/24	

審査請求 有 請求項の数 14 O L (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2004-108316 (P2004-108316)	(71) 出願人	000003078 株式会社東芝 東京都港区芝浦一丁目1番1号
(22) 出願日	平成16年3月31日(2004.3.31)	(74) 代理人	100078765 弁理士 波多野 久
		(74) 代理人	100078802 弁理士 関口 俊三
		(74) 代理人	100077757 弁理士 猿渡 章雄
		(74) 代理人	100122253 弁理士 古川 潤一
		(72) 発明者	泉 幹雄 神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株式会社東芝横浜事業所内

最終頁に続く

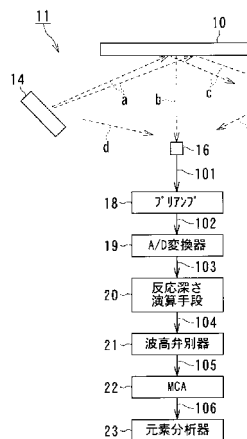
(54) 【発明の名称】 X線分析装置及びその分析方法

(57) 【要約】

【課題】 B G放射線が存在する環境にて、 B G放射線に影響されることなく高い S / N比で分析試料の元素分析及び解析を実施すること。

【解決手段】 B G放射線 d を有する環境にて、 X線源 14 から X線を照射することによって分析試料 10 から放出される蛍光 X線 b を検出する C d T e 半導体検出器 16 と、 この C d T e 半導体検出器 16 から出力された出力パルス 101 を増幅・変換及びデジタル変換して取得する未処理パルス 103 の波形によって C d T e 単結晶における反応深さを演算し未処理パルス 103 から誤パルスを除去する反応深さ演算手段 20 と、 一次処理パルス 104 の波高によって一次処理パルスから誤パルスを除去する波高弁別器 21 とを備えた。 この波高弁別器 21 から出力される二次処理パルス 105 を利用して分析試料 10 の元素分析及び解析を行なう。 また、 C d T e 単結晶は、 B G放射線 d を検出できる厚さを有する。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

バックグラウンド放射線が存在する環境にて、X線源からX線を照射することによって分析試料から放出されるX線を放射線検出器で検出し、この放射線検出器から出力されるパルスを利用して前記分析試料の元素分析及び解析を行なうX線分析装置において、

前記バックグラウンド放射線を検出できる厚さの検出素子を有する放射線検出器と、

前記放射線検出器から出力されたパルスの波形によって検出素子における反応深さを演算し、この反応深さによって、前記パルスから誤パルス除去する反応深さ演算手段とを備えたことを特徴とするX線分析装置。

【請求項 2】

前記パルスの波高によって、前記パルスから誤パルス除去する波高弁別器を備えたことを特徴とする請求項 1 に記載のX線分析装置。

【請求項 3】

前記分析試料から放出されるK-X線のエネルギー領域を測定できる厚さを有する第1放射線検出器と、L-X線のエネルギー領域を測定できる厚さを有する第2放射線検出器と、これら第1及び第2放射線検出器から出力されたパルスから誤パルス除去する反応深さ演算手段とを備え、前記X線源から前記分析試料に照射されるX線のうち所要のエネルギー成分のX線をカットする遮蔽フィルタを設置したことを特徴とする請求項 1 に記載のX線分析装置。

【請求項 4】

前記放射線検出器への蛍光X線の入射側であって前記分析試料から放出される蛍光X線の入射を遮らない位置に、前記バックグラウンド放射線を検出する放射線検出器を設けたことを特徴とする請求項 1 に記載のX線分析装置。

【請求項 5】

前記分析試料から放出される蛍光X線を集光する蛍光X線集光手段と、この蛍光X線集光手段にて発光した光を検出する光検出器とを備えたことを特徴とする請求項 1 に記載のX線分析装置。

【請求項 6】

複数の分析試料を順次運搬する分析試料運搬手段と、前記複数の分析試料から放出される蛍光X線を増強する蛍光X線増強手段と、アレイ化された複数の検出素子を有する半導体群検出器とを備えたことを特徴とする請求項 1 に記載のX線分析装置。

【請求項 7】

前記X線源から照射されるX線及び前記分析試料からコンプトン散乱された散乱X線をそれぞれ案内するX線案内管と、このX線案内管の内部にガスを注入するガス注入器とを備えたことを特徴とする請求項 1 に記載のX線分析装置。

【請求項 8】

バックグラウンド放射線が存在する環境にて、励起された分析試料から放出されるX線を検出することによって出力されるパルスから前記分析試料の元素分析及び解析を行なうX線分析方法において、

前記分析試料から放出されたX線及びバックグラウンド放射線を検出してパルスを出力する第1の工程と、

前記パルスの波形によって前記X線及びバックグラウンド放射線の検出素子における反応深さを演算し、この反応深さによって、前記パルスから前記バックグラウンド放射線の反応に起因する誤パルス除去する第2の工程とを有することを特徴とするX線分析方法。

【請求項 9】

前記パルスの波高によって、前記パルスから前記バックグラウンド放射線の反応に起因する誤パルス除去することを特徴とする請求項 8 に記載のX線分析方法。

【請求項 10】

元素濃度Nの分析試料にてK-X線及びL-X線をそれぞれ検出し、K-X線計数值 D_K

10

20

30

40

50

と、L - X線計数値 D_L と、K - X線及びL - X線が同時計数された場合のKL同時計数値 D_{KL} と、から、

【数1】

$$N = D_K \cdot D_L / D_{KL}$$

によって、前記分析試料の元素濃度Nを演算することを特徴とする請求項8に記載のX線分析方法。

【請求項11】

前記バックグラウンド放射線を検出し、このバックグラウンド放射線の反応に起因する誤パルスに基づく計数禁止信号とほぼ同時に検出された前記パルスが除去されることを特徴とする請求項8に記載のX線分析方法。

10

【請求項12】

前記バックグラウンド放射線を光として検出し、このバックグラウンド放射線の反応に起因する誤パルスに基づく計数禁止信号とほぼ同時に検出された前記パルスが除去されることを特徴とする請求項8に記載のX線分析方法。

【請求項13】

順次運搬される複数の分析試料の元素濃度と、予め設定された判定基準値との比較を実施して、基準値以上の元素濃度が検出された場合、基準値以上の元素濃度の位置を認識・表示することを特徴とする請求項8に記載のX線分析方法。

【請求項14】

前記X線の発生タイミングと、ガス注入タイミングと、前記X線の照射角度と、X線強度分布情報とによって前記分析試料の応力値を算出することを特徴とする請求項8に記載のX線分析方法。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、励起された分析試料から放出されるX線を放射線検出器で検出し、分析試料の元素分析及び解析を行なうX線分析技術に係り、特に、放射線検出器周囲のバックグラウンド放射線及び分析試料自体から放出されるバックグラウンド放射線の影響を低減するX線分析装置及びその分析方法に関する。

【背景技術】

30

【0002】

X線分析装置としてのエネルギー分散型蛍光X線分析装置（以下、「ED-XRF」という。）は、試料にX線を照射するX線源と、試料中の元素から放出される蛍光X線を検出する放射線検出器、例えば半導体検出器と、この半導体検出器からの出力信号を整形する波形整形回路と、この波形整形回路を介してX線検出信号のエネルギースペクトルを得るマルチチャンネルアナライザ（以下、「MCA」という。）と、このMCAの波高分布データに基づき、分析試料の元素分析及び解析を行なう元素分析器とを有している（例えば、特許文献1参照。）。

【0003】

ED-XRFでは、試料中に含まれる元素にX線を照射した場合、励起された元素から特有の蛍光X線が放出される。よって、予め、元素既知である標準試料にX線を照射して、標準試料のエネルギー分布を測定する。そして、元素未知である分析試料にX線を照射して、分析試料中の元素から放出される蛍光X線を半導体検出器にて検出する。この半導体検出器の出力パルスを、アナログ回路にて波高値がエネルギーに比例するような電圧パルスに整形する。パルス波高値をA/D変換し、高さ分布を求めることでX線のエネルギー分布を測定する。標準試料によって予め測定されたエネルギー分布と、分析試料によって測定されたエネルギー分布とを比較することで、分析試料の元素分析及び解析を可能とする。

40

【0004】

ED-XRFによると、分析試料を構成する多数の元素を同時に分析することができる

50

。例えば短時間での定性分析を行なうED-XRFは、電気・電子製品中の鉛フリーはんだと鉛含有はんだ基板を弁別する際に用いられる(例えば、特許文献2参照。)。ED-XRFは、ベルトコンベアによって分析試料を運搬し、運搬される分析試料を順次に分析する構成となっている。

【0005】

図14は、従来のエネルギー分散型X線分析装置であって、Si半導体検出器71と蛍光X線bの反応を示す概略図である。

【0006】

図14は、半導体検出器としての薄型のSi半導体検出器71を示し、このSi半導体検出器71には、陽極72及び陰極73によって挟持された薄膜のSi単結晶74と、このSi単結晶74を支持するための支持基板75とが備えられる。

10

【0007】

Si単結晶74の厚さは、分析試料の元素(図示しない)から放出された蛍光X線bがSi単結晶74内部にて反応して消滅するように選定される。通常、分析試料の元素分析に用いる蛍光X線bは約30keV以下のエネルギーをもつため、Si単結晶74の厚さを、例えば約300 μ mとすることで、約30keV以上の高エネルギーをもつ、分析装置周囲の放射線(以下、「BG(バックグラウンド)放射線」という。)dが検出しにくい構造となっている。

【0008】

また、図14に示された蛍光X線分析装置の他に、X線のエネルギーを測定し分析する手法として、X線の吸収特性から内部の構造を解析するX線吸収分光法(XAFS)、X線の反射、散乱成分の強度分布より構造解析を行なうX線回析又はX線応力解析等がある。

20

【特許文献1】特開平10-318946号公報(第4頁-第5頁、図1)

【特許文献2】特開2002-310952号公報(第11頁-第16頁、図1)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

図14に示された従来の薄型のSi半導体検出器71を用い、約30keV以上をもつBG放射線dのうち、約100keV以下のBG放射線d1がSi半導体検出器71に入射されたとする。BG放射線d1は、Si単結晶74内部で反応してSi単結晶74から放出されるが、BG放射線d1のエネルギーの一部、例えば20keVがSi単結晶74に付与される。そして、BG放射線d1の一部のエネルギー約20keVに相当する誘導電荷量が出力されて誤パルスとなる。

30

【0010】

加えて、BG放射線dのうち、約100keV以下のBG放射線d2は、支持基板75にて散乱し、その散乱成分がSi単結晶74に入射する。BG放射線d2の散乱成分は、Si単結晶74内部にて反応し、BG放射線d2のエネルギーの一部がSi単結晶74に付与される。そして、BG放射線d2の一部のエネルギーに相当する誘導電荷量が出力されて誤パルスとなる。

40

【0011】

よって、Si半導体検出器71にBG放射線d1, d2が入射された場合、Si単結晶74内部におけるBG放射線d1, d2の反応によって、BG放射線d1, d2のもつエネルギーの一部がSi単結晶74に付与される。したがって、Si半導体検出器71から出力されるパルスには、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d1, d2の反応に起因する誤パルスとが混在しており、BG放射線が存在する環境にて動作するには低いS/N比であった。

【0012】

また、従来のED-XRFは、分析試料である電子基板を順次交換し、なるべく早く分析対象となる元素の含有量を算出し、又は、ある基準値以上であることを検出する必要が

50

ある。よって、強力な X 線源で分析試料を照射することが望まれるが、一方で、照射 X 線に伴う散乱線を低減して検出下限を改善する必要がある。

【0013】

検出下限の改善のために、Si 半導体検出器 71 の周囲からの BG 放射線 d を遮蔽して、Si 半導体検出器 71 に入射する BG 放射線 d を低減することが考えられる。ところが実際には、分析試料を順次交換するため、ベルトコンベア等の分析試料の運搬設備をもつので、分析試料と ED - XRF とを一体として周囲から完全に遮蔽することは実用性に乏しい。よって、X 線分析装置から BG 放射線 d を完全に遮蔽することはできないので、一般的な蛍光 X 線分析よりも BG 放射線の影響が増加するという課題があった。

【0014】

また、特に、原子炉の構造材の応力を測定する場合、構造材が放射化しているので、蛍光 X 線 b の放出と共に、構造材自体から高エネルギー X 線が放出される。このため、構造材自体からの高エネルギー X 線の検出による誤パルスが生じる。

【0015】

さらに、分析試料から放出される蛍光 X 線 b は、原子が励起状態から基底状態に戻る際に、電子のエネルギー順位に差により生じる。ここで、原子の K 殻、L 殻のエネルギー順位に戻る際に発生する X 線を、それぞれ K - X 線、L - X 線と呼ぶ。

【0016】

K - X 線を発生した場合、L 殻の電子が空位となる場合があり、その際、空位を埋めるために同時に L - X 線が放出される。従来、約 30 keV 以下の蛍光 X 線 b によって元素演算を行なっているため、重元素ではエネルギー約 30 keV 以上となる K - X 線は測定できず、L - X 線を用いて元素分析を実施していた。L - X 線を用いた場合、異なる元素の K - X 線と L - X 線とがエネルギースペクトル上で重なることを防止するために、エネルギー分解能の高い測定系、例えば、分光器を用いた測定が必要とされていた。

【0017】

本発明は、上述した事情を考慮してなされたもので、分析装置周囲の BG 放射線の入射を遮蔽する必要がなく、BG 放射線が存在する環境でも、高い S/N 比で分析試料の元素分析及び解析を実施することができる X 線分析装置及びその分析方法を提供することを目的とする。

【0018】

また、本発明の第 2 の目的は、予め濃度既知の標準試料を用いて、複数元素に関する感度を測定する必要がなく、元素濃度の元素分析及び解析の煩雑さを低減できる X 線分析装置及びその分析方法を提供することにある。

【0019】

さらに、本発明の第 3 の目的は、水中に設置される放射化物試料の応力解析を実施することができる X 線分析装置及びその分析方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0020】

本発明に係る X 線分析装置は、上述した課題を解決するために、バックグラウンド放射線が存在する環境にて、X 線源から X 線を照射することによって分析試料から放出される X 線を放射線検出器で検出し、この放射線検出器から出力されるパルスを利用して前記分析試料の元素分析及び解析を行なう X 線分析装置において、前記バックグラウンド放射線を検出できる厚さの検出素子を有する放射線検出器と、前記放射線検出器から出力されたパルスの波形によって検出素子における反応深さを演算し、この反応深さによって、前記パルスから誤パルスを除去する反応深さ演算手段とを備えた。

【0021】

加えて、本発明に係る X 線分析装置は、バックグラウンド放射線が存在する環境にて、励起された分析試料から放出される X 線を検出することによって出力されるパルスから前記分析試料の元素分析及び解析を行なう X 線分析方法において、前記 X 線及びバックグラウンド放射線を検出してパルスを出力する第 1 の工程と、前記パルスの波形によって前記 X

10

20

30

40

50

線及びバックグラウンド放射線の検出素子における反応深さを演算し、この反応深さによって、前記パルスから前記バックグラウンド放射線の反応に起因する誤パルスを除去する第2の工程とを有する。

【発明の効果】

【0022】

本発明に係るX線分析装置及びその分析方法によれば、分析装置周囲のBG放射線の入射を遮蔽する必要がなく、BG放射線が存在する環境でも、高いS/N比で分析試料の元素分析及び解析を実施することができる。

【0023】

また、本発明に係るX線分析装置及びその分析方法によれば、予め濃度既知の標準試料を用いて、複数元素に関する感度を測定する必要がなく、元素濃度の元素分析及び解析の煩雑さを低減できる。

【0024】

さらに、本発明に係るX線分析装置及びその分析方法によれば、水中に設置される放射化物試料の応力解析を実施することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0025】

本発明に係るX線分析装置及びその分析方法の実施形態について添付図面を参照して説明する。

【0026】

なお、添付図面中、同一の構成要素には同一符号を付して重複した説明を省略する。

【0027】

図1は、本発明に係るX線分析装置の第1の実施形態を示す概略図である。

【0028】

図1は、BG(バックグラウンド)放射線が存在する環境に置かれ、分析試料10の元素分析及び解析するためのX線分析装置11を示す。BG放射線には、宇宙線、地中や建材中の放射性物質のような外部線源からの放射線、又は空気や食物中に放射性物質が存在することによる内部線源からの放射線がある。

【0029】

X線分析装置11には、照射X線aを発生させるX線源14と、分析試料10から放出される蛍光X線bを含む放射線を検出する放射線検出器、例えばCdTe半導体検出器16とが備えられる。

【0030】

X線源14は、照射X線aの発生方向を十分に絞ることが可能なものが用いられる。また、照射X線aを集光するために、X線源14の出射側に、例えば図示しないコリメータ、スリット、マイクロキャピラリーレンズ又はゾーンプレート等が設置される。また、照射X線aのエネルギーを単色化するために、X線源14の出射側に回析格子等が設置されてもよい。さらに、X線源14からの特性X線を強調する場合若しくは除去する場合又はエネルギー分布を平坦にする場合、特定のエネルギーのX線を吸収するような適用なフィルタを設置することもある。

【0031】

CdTe半導体検出器16は、X線源14から直接放射される照射X線aと、分析試料10から放出される散乱X線cとによる影響が少ない位置に設置される。分析試料10におけるコンプトン散乱(トムソン散乱を含む)は、照射X線aの入射方向に対して、放出角の方向依存性がある。一方、分析試料10から放出される蛍光X線bはほぼ等方に放出される。例えば、エネルギーが約100keVの照射X線aがX線源14から照射される場合、照射X線aの入射方向に対して、約90度~120度の位置にCdTe半導体検出器16が設置される。一方、例えば、エネルギーが約100keVより低い照射X線aがX線源14から照射される場合、約90度以下の位置にCdTe半導体検出器16が設置される。

10

20

30

40

50

【0032】

なお、放射線検出器として常温半導体検出器であるCdTe半導体検出器16を用いたが、CdTe半導体検出器16に限定されるものではない。放射線検出器は、例えば液体窒素冷却型のGe検出器、シリンドリフト検出器又はCZT等のエネルギー分析可能なX線検出用の検出器でもよい。また、エネルギー分解能を改善するために放射線検出器に冷却装置を具備させ、液体窒素又はペルチェ素子等で冷却できるようにしてもよい。

【0033】

また、分析試料10とCdTe半導体検出器16の間に、コリメータ、スリット、マイクログラビラリーレンズ又はゾンプレート等が挿入される場合もある。

【0034】

図2は、X線分析装置11に備えられるCdTe半導体検出器16を示す拡大図である。

10

【0035】

図2に示されたCdTe半導体検出器16は、図1に示されたX線分析装置11に備えられるCdTe半導体検出器16を示す。このCdTe半導体検出器16には、支持基板25と、陽極27及び陰極28によって挟持されるCdTe単結晶29とが設けられる。このCdTe単結晶29は、支持基板25によって支持される。

【0036】

また、CdTe単結晶29は、陰極28側の入射側エリア29pと、陽極27側の支持基板側エリア29qからなる。入射側エリア29pは、約30keV以下の低エネルギーである蛍光X線bを吸収して消滅させるのに十分な厚さ、例えば約300 μ m厚を有している。そして、入射側エリア29pと支持基板側エリア29qとが一体となったCdTe単結晶29は、約30keV以上の高エネルギーであって約100keV以下のエネルギーをもつBG放射線d、例えばBG放射線d1, d2を消滅させるのに十分な厚さ、例えば約1mm厚を有している。なお、約100keV以上の高エネルギーのBG放射線d、例えばBG放射線d3, d4をCdTe単結晶29にて消滅させるためには、CdTe単結晶29の厚さを約1mm厚以上とするものとする。

20

【0037】

分析試料(図示しない)から放出される蛍光X線bと、種々の入射エネルギー及び入射角度をもつBG放射線dは、電圧印加されたCdTe単結晶29の入射側エリア29p側から入射されるようになっている。

30

【0038】

さらに、図1に示されたX線分析装置11には、CdTe半導体検出器16から出力される出力パルス101をパルス量に比例する電圧パルス102に変換・増幅する電荷有感型の増幅器、例えばプリアンプ18と、電圧パルス102をデジタルデータに変換して未処理パルス103を得るA/D変換器19と、未処理パルス103からCdTe単結晶29における反応深さを演算してこの反応深さの違いによって未処理パルス103から誤パルスを除去して一次処理パルス104を得る反応深さ演算手段20と、パルス波高の違いによって一次処理パルス104から誤パルスを除去して二次処理パルス105を得る波高弁別器21と、二次処理パルス105からエネルギー毎の計数を行ない、波高分布データ106を得るマルチチャンネルアナライザ(以下、「MCA」という。)22と、波高分布データ106から分析試料10の元素分析、応力解析及び構造解析等を行なう元素分析器23とが備えられる。

40

【0039】

次いで、X線分析装置11の処理動作について説明する。

【0040】

図1に示されたX線分析装置11に備えられるX線源14にて発生したX線は、任意に集光された後、照射X線aとして分析試料10に照射される。分析試料10に照射X線aが照射されると、分析試料10から蛍光X線bと、コンプトン散乱(トムソン散乱を含む)した散乱X線cとが放出される。蛍光X線bは、CdTe半導体検出器16に入射し、

50

C d T e 半 導 体 検 出 器 1 6 に よ っ て 検 出 さ れ る。

【 0 0 4 1 】

そして、図 2 に示された C d T e 半 導 体 検 出 器 1 6 の よ う に、陽 極 2 7 及 び 陰 極 2 8 に よ っ て 電 圧 印 加 さ れ た C d T e 単 結 晶 2 9 に、分 析 試 料 1 0 か ら 放 出 さ れ た 蛍 光 X 線 b と、蛍 光 X 線 b よ り 高 い エ ネ ル ギ ー を も つ B G 放 射 線 d と が 入 射 す る。

【 0 0 4 2 】

分 析 試 料 1 0 か ら 放 出 さ れ た 蛍 光 X 線 b は、エ ネ ル ギ ー が 低 く C d T e 単 結 晶 2 9 内 部 の 入 射 側 エ リ ア 2 9 p に て 反 応 し て 消 滅 す る。よ っ て、C d T e 半 導 体 検 出 器 1 6 に 蛍 光 X 線 b が 入 射 す る と、蛍 光 X 線 b の 反 応 に よ っ て 蛍 光 X 線 b の 全 て の エ ネ ル ギ ー が C d T e 単 結 晶 2 9 に 付 与 さ れ る。

10

【 0 0 4 3 】

一 方、約 1 0 0 k e V 以 下 の エ ネ ル ギ ー を も つ B G 放 射 線 d、例 え ば B G 放 射 線 d 1, d 2 は、C d T e 単 結 晶 2 9 内 部 に て 多 重 散 乱 し、C d T e 単 結 晶 2 9 に 全 て の エ ネ ル ギ ー を 付 与 し て 消 滅 す る。ま た、約 1 0 0 k e V 以 上 の エ ネ ル ギ ー を も つ B G 放 射 線 d、例 え ば B G 放 射 線 d 3, d 4 は、C d T e 単 結 晶 2 9 内 部 に て エ ネ ル ギ ー の 一 部 を 付 与 し て C d T e 単 結 晶 2 9 の 外 部 に 放 出 さ れ る。な お、B G 放 射 線 d 1, d 2 は、図 1 4 に 示 さ れ た 薄 型 の S i 半 導 体 検 出 器 7 1 を 用 い た 場 合、エ ネ ル ギ ー の 一 部 を S i 半 導 体 検 出 器 7 1 に 付 与 す る こ と に な る。ま た、B G 放 射 線 d 3, d 4 は、図 1 4 に 示 さ れ た 薄 型 の S i 半 導 体 検 出 器 7 1 を 用 い た 場 合、S i 半 導 体 検 出 器 7 1 に エ ネ ル ギ ー を 全 く 付 与 し な い こ と に な る。

20

【 0 0 4 4 】

蛍 光 X 線 b 及 び B G 放 射 線 d 1, d 2, d 3, d 4 が 付 与 し た エ ネ ル ギ ー に 相 当 す る 波 高 を 有 す る 出 力 パ ル ス 1 0 1 は、C d T e 半 導 体 検 出 器 1 6 の 電 極 か ら 出 力 さ れ る。

【 0 0 4 5 】

図 1 に 示 さ れ た C d T e 半 導 体 検 出 器 1 6 の 電 極 に て 検 出 さ れ た 出 力 パ ル ス 1 0 1 は、プ リ ア ム プ 1 8 に て、パ ル ス 量 に 比 例 す る 電 圧 パ ル ス 1 0 2 に 変 換 ・ 増 幅 さ れ る。変 換 ・ 増 幅 さ れ た 電 圧 パ ル ス 1 0 2 は、A / D 変 換 器 1 9 に て デ ジ タ ル デ ー タ で あ る 未 処 理 パ ル ス 1 0 3 に 変 換 さ れ る。こ の 未 処 理 パ ル ス 1 0 3 は、反 応 深 さ 演 算 手 段 2 0 に 入 力 さ れ る。

【 0 0 4 6 】

こ こ で、未 処 理 パ ル ス 1 0 3 に は、B G 放 射 線 d 3, d 4 の 反 応 に 起 因 す る 誤 パ ル ス が 含 ま れ る が、こ の 誤 パ ル ス は、B G 放 射 線 d 3, d 4 の も つ エ ネ ル ギ ー の 一 部 に 相 当 す る 波 高 を 有 す る。よ っ て、未 処 理 パ ル ス 1 0 3 の う ち、蛍 光 X 線 b の 反 応 に 起 因 す る パ ル ス と、B G 放 射 線 d 3, d 4 の 反 応 に 起 因 す る 誤 パ ル ス と を 波 高 弁 別 器 2 1 に よ っ て 弁 別 す る こ と は 困 難 で あ る。

30

【 0 0 4 7 】

例 え ば 1 0 0 k e V 以 上 の エ ネ ル ギ ー を も つ B G 放 射 線 d 3, d 4 は、C d T e 半 導 体 検 出 器 1 6 に 入 射 し て C d T e 単 結 晶 2 9 内 部 に て 1 次 散 乱 し、C d T e 単 結 晶 2 9 内 部 に エ ネ ル ギ ー の 一 部、例 え ば 2 0 k e V を 付 与 し て C d T e 単 結 晶 2 9 か ら 放 出 さ れ る。B G 放 射 線 d 3, d 4 の 反 応 に 起 因 す る 誤 パ ル ス の 波 高 は 2 0 k e V の エ ネ ル ギ ー に 相 当 す る 高 さ と な る の で、誤 パ ル ス の 波 高 と、約 2 0 k e V 以 下 の エ ネ ル ギ ー で あ る 蛍 光 X 線 b の 反 応 に 起 因 す る 波 高 と か ら パ ル ス を 弁 別 す る こ と は 困 難 で あ る。

40

【 0 0 4 8 】

よ っ て、反 応 深 さ 演 算 手 段 2 0 に よ っ て、C d T e 単 結 晶 2 9 に お け る 反 応 深 さ (陰 極 2 8 か ら 反 応 点 ま で の 距 離) の 演 算 を 行 な い、蛍 光 X 線 b の 反 応 に 起 因 す る パ ル ス と、B G 放 射 線 d 3, d 4 の 反 応 に 起 因 す る 誤 パ ル ス と の 弁 別 を 行 な う。

【 0 0 4 9 】

反 応 深 さ 演 算 手 段 2 0 の 反 応 深 さ 演 算 に つ い て 説 明 す る。

【 0 0 5 0 】

ま ず、図 3 に、C d T e 半 導 体 検 出 器 1 6 の C d T e 単 結 晶 2 9 内 部 に て、蛍 光 X 線 b

50

が反応した場合のキャリアの移動を示す概略図を示す。

【0051】

図3に示されたCdTe半導体検出器16では、CdTe単結晶29の入射側エリア29pにて、蛍光X線bが反応して消滅する。蛍光X線bが入射側エリア29pにて反応して消滅すると、その反応点Oにてキャリア(電子・正孔)が発生する。発生した電子は反応点Oから陽極27へ、正孔は陰極28へそれぞれ移動(ドリフト)して電極にそれぞれ収集される。収集過程では、誘導電流が流れパルスとして出力される。

【0052】

反応点Oから等しい電荷が移動した場合、積算電荷量は、電子及び正孔の収集時の移動距離に比例する。低エネルギーである蛍光X線bは、陰極28側の入射側エリア29pで反応し、電子の移動距離が長くなるので、積算電荷量は、電子の移動による誘導電荷が主成分となる(厳密には、CdTe単結晶29内部に発生した正孔は移動に従って消滅するが、この消滅については説明を省くものとする。)

10

【0053】

CdTe半導体検出器16のCdTe単結晶29内部にて、蛍光X線bが反応して消滅した場合のパルスの波形(積算電荷量 I_1 の時系列変化)を示すグラフを図4に示す。

【0054】

図4に示されたグラフは、図3に示されたCdTe単結晶29の入射側エリア29pにて、約30keV以下の低エネルギーをもつ蛍光X線bが反応した時を時間0として、電子成分(-)に係る誘導電荷量、正孔成分(+)に係る誘導電荷量及び積算電荷量 I_1 の時系列変化をそれぞれ示す。一般に、電荷積分型のプリアンプ18を増幅器として用いた場合、プリアンプ18は、電子成分に係る誘導電荷量及び正孔成分に係る誘導電荷量の積分値を出力する。積算電荷量 I_1 は、電子成分に係る誘導電荷量と正孔成分に係る誘導電荷量との積算の誘導電荷量となる。

20

【0055】

CdTe単結晶29内部における反応直後の積算電荷量 I_1 は、移動距離が長く移動速度の速い電子成分に係る誘導電荷量の増加に従って波高 L_1 まで急激に増加する。一方、電子の移動が尽きると、積算電荷量 I_1 は、移動距離が短く移動速度の遅い正孔成分に係る誘導電荷量の増加に従って波高 M_1 まで緩やかに増加する。特に、電子の移動速度に比べ正孔の移動速度が遅いCdTe半導体検出器16を用いた場合、全ての電荷を収集するのに必要な時間は電子に比べ正孔が長くなる。電子に比べ正孔の移動速度は約1/10以下である。

30

【0056】

蛍光X線bの反応深さが浅く(陰極28に近く)なる程、電子の移動距離が長くなり、積算電荷量 I_1 が増加し、波高 L_1 が高くなる。一方、蛍光X線bの反応深さが深く(支持基板側エリア29qに近く)なる程、正孔の移動距離が長くなり、積算電荷量 I_1 が増加し、波高 L_1 が低くなる。

【0057】

続いて、図5に、CdTe半導体検出器16のCdTe単結晶29内部にて、BG放射線d3が反応してCdTe単結晶29から放出された場合のパルスの波形(積算電荷量 I_2 の時系列変化)を示すグラフを示す。

40

【0058】

図5に示されたグラフは、図2に示されたCdTe単結晶29の支持基板側エリア29qにて、高エネルギーであるBG放射線dのうち約100keV以上のエネルギーをもつBG放射線d3が1次散乱した時を時間0として、電子成分に係る誘導電荷量、正孔成分に係る誘導電荷量及び積算電荷量 I_2 の時系列変化をそれぞれ示す。

【0059】

積算電荷量 I_2 は、移動距離の短い電子成分に係る誘導電荷量の増加に従って波高 L_2 まで急激に増加する。一方、電子成分の移動が尽きると、積算電荷量 I_2 は、移動距離の長い正孔成分に係る誘導電荷量の増加に従って波高 M_2 まで緩やかに増加する。電子の移

50

動速度は正孔の移動速度の約10倍であるから、積算電荷量 I_2 は波高 L_2 まですぐに到達し、波高 L_2 到達後、正孔成分に係る誘導電荷量の増加に従って緩やかに増加する。

【0060】

よって、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d3の反応に起因する誤パルスとを、波高によって弁別することが困難な場合であっても、図4に示されたグラフの波形と、図5に示されたグラフの波形との違いによって、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d3の反応に起因する誤パルスとを弁別できる。

【0061】

続いて、図6に、CdTe半導体検出器16のCdTe単結晶29内部にて、BG放射線d4が数回、例えば2回反応してCdTe単結晶29から放出された場合のパルスの波形(積算電荷量 I_3 の時系列変化)を示すグラフを示す。

10

【0062】

図6に示されたグラフは、図2に示されたCdTe単結晶29の入射側エリア29pと支持基板側エリア29qにて、高エネルギーであるBG放射線dのうち約100keV以上のエネルギーをもつBG放射線d4が1回目に反応した時を時間0として、誘導電荷量 I_3 の時系列変化を示す。

【0063】

BG放射線d4が2回反応してCdTe単結晶29から放出された場合の積算電荷量 I_3 の時系列変化は、積算電荷量 I_1 と、積算電荷量 I_2 との時系列変化を合成したものとなる。そして、電子と正孔の移動距離が等しい位置、つまり、BG放射線d4が2回反応してCdTe単結晶29から放出された場合の時系列変化は、CdTe単結晶29の重心位置で反応して消滅したときの時系列変化とほぼ同じ変化となる。

20

【0064】

また、図1に示された反応深さ演算手段20による反応深さの演算は、分解能を改善するために、2次微分により立ちあがりの変極点を求める手法も適用できる。また、立ち上がりの早い成分つまり電子成分を微分回路で選別し、第1の波高弁別回路で弁別すると共に、正孔成分も含めた信号の波高を第2の波高弁別回路で弁別し、両者の波高を用いて、反応深さを演算することも可能である。

【0065】

図1に示された反応深さ演算手段20にて、パルスの波形の違いによって、未処理パルス103からBG放射線d3, d4の反応に起因する誤パルスを除去し、除去して得られた一次処理パルス104が波高弁別器21に出力される。一次処理パルス104には、高エネルギーであり約100keV以下のBG放射線d1, d2に起因する誤パルスが含まれるが、この誤パルスは、BG放射線d1, d2のもつ全てのエネルギーに相当する波高を有する。よって、波高弁別器21では、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d1, d2の反応に起因する誤パルスとをパルス波高の違いから弁別できる。

30

【0066】

例えば100keVのエネルギーをもつBG放射線dのうちBG放射線d1がCdTe単結晶29の支持基板エリア29q内部にて1回散乱して20keVのエネルギーを支持基板エリア29qに付与したとすると、入射側エリア29pにて残りの80keVのエネルギーを付与して消滅する。また、BG放射線dのうちBG放射線d2が入射側エリア29p内部にて1回散乱して20keVのエネルギーを入射側エリア29pに付与したとすると、支持基板エリア29qにて残りの80keVのエネルギーを付与して消滅する。よって、厚膜のCdTe単結晶29を有する厚型のCdTe半導体検出器16にBG放射線d1, d2が入射すると、BG放射線d1, d2の反応によって合計100keVのエネルギーがCdTe単結晶29に付与される。

40

【0067】

BG放射線d1, d2の反応によってBG放射線d1, d2のもつ全てのエネルギーを積極的に検出することで、蛍光X線bの反応に起因するパルスの波高と、BG放射線d1, d2の反応に起因する誤パルスの波高との違いから、蛍光X線bの反応に起因するパル

50

スト、BG放射線d1, d2の反応に起因する誤パルスとを弁別できる。また、波高弁別器21では、一次処理パルス104から、所要の波高値(閾値)に満たない波高をもつ回路ノイズを除去することもできる。

【0068】

図1に示された波高弁別器21にて弁別され、BG放射線d1, d2の反応に起因する誤パルスが除去されることで二次処理パルス105となり、この二次処理パルス105がMCA22に出力される。

【0069】

MCA22では、二次処理パルス105からエネルギー毎の計数が行なわれ、波高分布データ106が取得される。MCA22では、BG放射線dの反応に起因する誤パルスの影響を除外でき、測定対象である蛍光X線bのみの波高分布データ106を取得できる。

【0070】

MCA22から元素分析器23に、所要の時間幅の波高分布データ106が出力される。元素分析器23では、分析試料10を構成する元素の含有量比を時系列に連続的に表示する。つまり、各元素に相当するエネルギー幅での計数値を時系列にフィルタ処理を行ない、元素の連続的な含有率の変化を表示する。このフィルタの時定数は、必要精度に応じて可変とする。

【0071】

X線分析装置11のように、厚型のCdTe半導体検出器16を用いると、蛍光X線bの反応に起因するパルスと共に、BG放射線d1~d4の反応に起因する誤パルスを取得することができる。さらに、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d3, d4の反応に起因する誤パルスとは、パルスの波形の違いによって弁別することができる。また、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d1, d2の反応に起因する誤パルスとは、パルスの波高の違いによって弁別できる。したがって、パルス信号処理によって誤パルスを除去できるので、分析装置周囲のBG放射線dの入射を遮蔽する必要がなく、BG放射線dが存在する環境でも、高いS/N比で分析試料10の元素分析及び解析を実施することができる。

【0072】

なお、X線源14からCdTe半導体検出器16にX線が直接照射されると、CdTe半導体検出器16の構成材から特性X線が放出される。この特性X線の影響を補正するために、予め分析試料10を設置していない条件にてブランク測定を実施する。そして、分析試料10を設置して元素分析する際に、ブランク測定で得られたブランク成分を差し引きながら分析試料10の分析を実施する。

【0073】

例えば、CdTe半導体検出器16を用いる場合、CdTe単結晶29のCdから放出される特性X線のエネルギーは、K₁: 23.2 keV、K₁: 26.1 keV、L₁: 3.1 keV、L₁: 3.3 keVである。また、Te自体から放出される蛍光X線bは、K₁: 27.4 keV、K₁: 31.0 keV、L₁: 3.8 keV、L₁: 4.0 keVである。

【0074】

よって、測定対象範囲である約30 keV以下のエネルギーに、CdTe単結晶29から放出される特性X線が重なることになる。よって、X線源14からX線が直接にCdTe半導体検出器16に到達しないように、X線源14の放出角の選定と、遮蔽を実施するとよい。

【0075】

また、分析試料10が原子炉の構造材であり構造材の応力を測定する場合、分析試料10の構造材が放射化している。よって、構造材から約30 keV以上のエネルギーをもつ線が放出されているので、蛍光X線bの測定には、線が測定のBG放射線dとなる。BG放射線dの影響を低減するためには、予めX線分析装置11にて、X線源14からの照射X線aを発生しない条件で測定したデータを取得する。そして、図1に示されたX線

10

20

30

40

50

分析装置 11 によって、X線源 14 から照射 X線 a を発生したときのデータを測定し、予め取得したデータ分を補正する。

【0076】

図 7 は、本発明に係る X線分析装置の第 2 の実施形態を示す概略図である。

【0077】

図 7 は、BG放射線が存在する環境に置かれ、分析試料 10 を分析するための X線分析装置 11 A を示す。

【0078】

図 7 に示された X線分析装置 11 A には、分析試料 10 から放出される約 30 keV 以上のエネルギーをもつ K-X線を含む放射線を検出する第 1 放射線検出器 (図 1 に示す放射線検出器)、例えば CdTe 半導体検出器 16 と、約 30 keV 以下のエネルギーをもつ L-X線を含む放射線を検出する第 2 放射線検出器、例えば CdTe 半導体検出器 16 a とが備えられる。なお、第 2 放射線検出器は、L-X線を検出するものなので、図 14 に示された薄型の Si 半導体検出器 71 でもよい。

【0079】

また、X線分析装置 11 A には、CdTe 半導体検出器 16 a から出力される出力パルス 101 a をパルス量に比例する電圧パルス 102 a に変換・増幅する電荷有感型の増幅器、例えばプリアンプ 18 a と、電圧パルス 102 a をデジタルデータに変換して未処理パルス 103 a を得る A/D 変換器 19 a と、未処理パルス 103 a の波形によって反応深さを演算しこの反応深さの違いによって未処理パルス 103 a から誤パルス除去して一次処理パルス 104 a を得る反応深さ演算手段 20 a と、パルス波高の違いによって一次処理パルス 104 a から誤パルス除去して二次処理パルス 105 a を得る波高弁別器 21 a と、二次処理パルス 105 a からエネルギー毎の計数を行ない、波高分布データ 106 a を得る MCA 22 a とが備えられる。この MCA 22 a の波高分布データ 106 a は、分析試料 10 の元素分析、応力解析及び構造解析等を行なう元素分析器 23 に出力できるようにになっている。

【0080】

また、X線源 14 から分析試料 10 に照射される照射 X線 a のうち低エネルギー成分の X線をカットする遮蔽フィルタ 51 が設置される。特に、蛍光 X線 b が約 30 keV 以上のエネルギーをもつ場合、X線源 14 からの直接の X線が BG放射線 d の主成分となるため、遮蔽フィルタ 51 による X線の遮蔽を行なう。

【0081】

図 8 は、K-X線及び L-X線のエネルギースペクトルを示すグラフである。

【0082】

図 8 に示されたグラフは、分析試料 10、例えば鉛 (Pb) を分析処理したときのエネルギースペクトルである。K-X線として 75, 85 keV にエネルギーピークが観測される一方、L-X線として 10-12 keV にエネルギーピークが観測される。K-X線及び L-X線のエネルギーピークを共に測定することで、分析試料 10 の元素分析精度、BG放射線 d の低減を図る。

【0083】

続いて、X線分析装置 11 A の処理動作について説明する。

【0084】

X線源 14 から分析試料 10 に照射 X線 a を照射する。分析試料 10 から放出される蛍光 X線 b は、原子が励起状態から基底状態に戻る際に、電子のエネルギー順位に差によって発生する。ここで、電子が原子の K殻及び L殻のエネルギー順位に戻る際、K-X線及び L-X線がそれぞれ発生する。

【0085】

K-X線を含む放射線は CdTe 半導体検出器 16 にて検出され、この CdTe 半導体検出器 16 から出力される。出力パルス 101 はプリアンプ 18 にて変換・増幅され、A/D 変換器 19 にてデジタルデータに変換される。デジタル変換された未処理パルス 10

10

20

30

40

50

3は反応深さ演算手段20に入力され、この反応深さ演算手段20にて、反応深さの違いによって未処理パルス103からBG放射線dの反応に起因する誤パルスを除去して一次処理パルス104を得る。

【0086】

一次処理パルス104は、波高弁別器21に入力され、パルス波高の違いによって一次処理パルス104からL-X線の反応に起因する誤パルスを除去してK-X線の反応に起因する二次処理パルス105を得る。この二次処理パルス105はMCA22に入力され、MCA22では、二次処理パルス105からエネルギー毎の計数が行なわれ、波高分布データ106が取得される。元素分析器23では、波高分布データ106から、約30keV以上であり約100keV以下のK-X線のK-X線計数値 D_K が求められる。

10

【0087】

一方、L-X線を含む放射線はCdTe半導体検出器16aにて検出され、このCdTe半導体検出器16aから出力される。出力パルス101aはプリアンプ18aにて変換・増幅され、A/D変換器19aにてデジタルデータに変換される。デジタル変換された未処理パルス103aは、反応深さ演算手段20aに入力され、この反応深さ演算手段20aにて、反応深さの違いによって未処理パルス103aからBG放射線dに起因する誤パルスを除去して一次処理パルス104aを得る。

【0088】

一次処理パルス104aは、波高弁別器21aに入力され、パルス波高の違いによって一次処理パルス104aからK-Xの反応に起因する誤パルスを除去してL-X線の反応に起因する二次処理パルス105aを得る。この二次処理パルス105aはMCA22に入力され、MCA22では、二次処理パルス105aからエネルギー毎の計数が行なわれ、波高分布データ106aが取得される。元素分析器23では、波高分布データ106aから、約30keV以下のエネルギーをもつL-X線のL-X線計数値 D_L が求められる。

20

【0089】

また、元素分析器23では、波高分布データ106, 106aから、K-X線及びL-X線のKL同時計数値 D_{KL} が求められる。

【0090】

ここで、分析試料10の元素濃度をNとすると、X線分析装置11AにてBD放射線d

30

が十分に低減された条件では、

[数2]

$$D_K = S_K \cdot N \quad \dots (1)$$

$$D_L = S_L \cdot N \quad \dots (2)$$

$$D_{KL} = S_K \cdot S_L \cdot N \quad \dots (3)$$

)と表すことができる。さらに、式(1)、(2)、(3)から、分析試料10の元素濃度Nが、

[数3]

$$N = D_K \cdot D_L / D_{KL} \quad \dots (4)$$

40

)によって演算できる。

【0091】

X線分析装置11Aのように、厚型のCdTe半導体検出器16, 16aを用いると、K-X線の反応に起因するパルスと、L-X線の反応に起因するパルスとをそれぞれ取得できる。さらに、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d3, d4の反応に起因する誤パルスとは、パルスの波形の違いによって弁別することができる。また、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d1, d2の反応に起因する誤パルスとは、パルスの波高の違いによって弁別できる。したがって、パルス信号処理によって誤パルスを除去できるので、周囲のBG放射線dの入射を遮蔽する必要がなく、BG放射線dが

50

存在する環境でも、高いS/N比で分析試料10の元素分析及び解析を実施することができる。

【0092】

また、X線分析装置11Aを用いると、予め濃度既知の標準試料を用いて、複数元素に関する感度を測定する必要がなく、元素濃度Nの元素分析及び解析の煩雑さを低減できる。

【0093】

なお、予め、濃度既知の標準試料にて、X線源14又は遮蔽フィルタ51毎にK-X線を計数するK-X線検出感度 S_K と、L-X線を計数するL-X線検出感度 S_L と、K-X線及びL-X線を同時計数するKL同時検出感度 S_{KL} をそれぞれ測定して、分析試料10の元素濃度Nを推定もよい。

【0094】

図9は、本発明に係るX線分析装置の第3の実施形態を示す概略図である。

【0095】

図9は、BG放射線が存在する環境に置かれ、分析試料10を分析するためのX線分析装置11Bを示し、図1に示されたX線分析装置11に備えられるCdTe半導体検出器16周辺から入射するBG放射線dを低減させるものである。

【0096】

X線分析装置11には、CdTe半導体検出器16への蛍光X線bの入射側であって蛍光X線bの入射を遮らない位置に、BG放射線を検出するタイミング検出器としてのBG放射線検出器、例えばシンチレーション検出器36が備えられる。

【0097】

BG放射線検出器は、シンチレーション検出器36の他に、図1に示された放射線検出器と同じものを用いても構わない。また、BG放射線検出器はエネルギー情報の検出を必要としないため、比例計数管又はGM計数管等の一般的な放射線検出器が使用できる。

【0098】

図10は、X線分析装置11Bに備えられるCdTe半導体検出器16とシンチレーション検出器36の位置関係を示す拡大図である。

【0099】

図10に示されたCdTe半導体検出器16は、図9に示されたCdTe半導体検出器16を示し、このCdTe半導体検出器16の周囲から、約30keV以上の高エネルギーをもつBG放射線d、例えば図2に示されたBD放射線d1~d4が直接入射するのを低減するように、2個のシンチレーション検出器36が備えられる。よって、CdTe半導体検出器16には、蛍光X線bと、CdTe半導体検出器16に直接入射する微量のBG放射線d1~d4と、シンチレーション検出器36にて散乱したBG放射線d、例えばBG放射線d5とがそれぞれ入射する。なお、シンチレーション検出器36は2個に限定されない。

【0100】

さらに、図9に示されたX線分析装置11Bには、シンチレーション検出器36からの出力パルス111をパルス量に比例する電圧パルス112に変換・増幅する電荷有感型の増幅器、例えばプリアンプ38と、電圧パルス112の波形をデジタルデータに変換して未処理パルス113を得るA/D変換器39と、未処理パルス113から所要の波高値に満たない波高をもつ回路ノイズを除去して計数禁止信号118を発する波高弁別器41とが備えられる。計数禁止信号118は、MCA22に出力できるようになっている。

【0101】

次いで、X線分析装置11Bの処理動作について説明する。

【0102】

図9に示されたX線分析装置11Bに備えられるX線源14から分析試料10に照射X線aが入射される。分析試料10からは、蛍光X線bとコンプトン散乱した散乱X線cとが放出される。

10

20

30

40

50

【0103】

そして、図10に示されたCdTe半導体検出器16のように、電圧印加されたCdTe半導体検出器16に、分析試料10からの蛍光X線bと、BG放射線d1~d4と、BG放射線d5とがそれぞれ入射する。蛍光X線b、BG放射線d1~d4及びBG放射線d5は、CdTe半導体検出器16に入射し、CdTe半導体検出器16によってそれぞれ検出される。

【0104】

つまり、CdTe半導体検出器16から出力される出力パルス101には、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d1~d4の反応に起因する誤パルスと、シンチレーション検出器36にて散乱したBG放射線d5の反応に起因する誤パルスとが含まれている。

10

【0105】

出力パルス101は、反応深さ演算手段20にてBG放射線d3, d4が除去され一次処理パルス104に変換され、この一次処理パルス104は、波高弁別器21にてBG放射線d1, d2が除去され二次処理パルス105に変換される。

【0106】

一方、シンチレーション検出器36は、BG放射線d5を検出する。シンチレーション検出器36の電極(図示しない)にて検出された出力パルス111は、プリアンプ38にて、パルス量に比例する電圧パルス112に変換・増幅される。変換・増幅された電圧パルス112の波形は、A/D変換器39にて未処理パルス113に波形変換される。未処理パルス113は、波高弁別器41に入力される。この波高弁別器41にて、所要の波高値に満たない波高をもつ回路ノイズが除去される。回路ノイズが除去されたパルス波高によって、計数禁止信号118がMCA22に出力される。

20

【0107】

ここで、二次処理パルス105には、BG放射線d5の反応に起因する誤パルスが含まれている。BG放射線d5は、CdTe半導体検出器16にて検出されるとほぼ同時にシンチレーション検出器36にて検出されている。よって、波高弁別器41から計数禁止信号118が出力されていない時に、波高弁別器21から入力される二次処理パルス105は、蛍光X線bに起因するパルス信号であると判断され、MCA22に出力される。

【0108】

MCA22では、二次処理パルス105からエネルギー毎の計数が行なわれ、波高分布データ106が取得される。MCA22では、BG放射線dの反応に起因する誤パルスの影響を除外でき、測定対象である蛍光X線bのみの波高分布データ106を取得できる。

30

【0109】

MCA22から元素分析器23に、所要の時間幅の波高分布データ106が出力される。元素分析器23では、分析試料10を構成する元素の含有量比を時系列に連続的に表示する。つまり、各元素に相当するエネルギー幅での計数値を時系列にフィルタ処理を行ない、元素の連続的な含有率の変化を表示する。このフィルタの時定数は、必要精度に応じて可変とする。

【0110】

X線分析装置11Bのように、厚型のCdTe半導体検出器16を用いると、蛍光X線bの反応に起因するパルスと共に、BG放射線d1~d4の反応に起因する誤パルスを取得することができる。さらに、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d3, d4の反応に起因する誤パルスとは、パルスの波形の違いによって弁別することができる。また、蛍光X線bの反応に起因するパルスと、BG放射線d1, d2の反応に起因する誤パルスとは、パルスの波高の違いによって弁別できる。したがって、パルス信号処理によって誤パルスを除去できるので、分析装置周囲のBG放射線dの入射を遮蔽する必要がなく、BG放射線dが存在する環境でも、高いS/N比で分析試料10の元素分析及び解析を実施することができる。

40

【0111】

50

また、X線分析装置11Bのように、シンチレーション検出器36を用いると、BG放射線d1～d4の反応に起因する誤パルスが低減できる。さらに、BG放射線d5の反応に起因する未処理パルス113に基づいて計数禁止信号118を発することで、BG放射線dが存在する環境でも、高いS/N比で分析試料10の元素分析及び解析を実施することができる。

【0112】

さらに、図9に示されたX線分析装置11Bでは、BG放射線検出器としてシンチレーション検出器36を用いたが、BG放射線検出器として、例えば図14に示された薄膜のSi半導体検出器71を用いる。Si半導体検出器71を用いると、Si半導体検出器71にて散乱してCdTe半導体検出器16に入射するBG放射線d5を低減できるので、計数禁止信号118を低減できる。

10

【0113】

図11は、本発明に係るX線分析装置の第4の実施形態を示す概略図である。

【0114】

図11は、BG放射線として自然放射線が存在する放射線環境にて、分析試料10を分析するX線分析装置11Cを示す。

【0115】

X線分析装置11Cには、CdTe半導体検出器16の蛍光X線bの入射側に、蛍光X線bを有効に集光できる蛍光X線集光手段、例えばマルチキャピラリーレンズ45と、このマルチキャピラリーレンズ45にて発光するシンチレーション光eを検出するタイミング検出器としての光検出器46とが備えられる。なお、マルチキャピラリーレンズ45の蛍光X線bの出口側端面を監視する場合と、シリカガラス等の透明なマルチキャピラリーレンズ45を使用する場合とは、マルチキャピラリーレンズ45の外部に光検出器46を備えるが、外部光を光検出器46にて検出することを防止するために、外部光を遮光する手段を設けてもよい。

20

【0116】

また、X線分析装置11CのCdTe半導体検出器16から出力される出力パルス101は、図9に示されたX線分析装置11Bのプリアンプ18に入力される。また、X線分析装置11Cの光検出器46から出力される出力パルス111は、図9に示されたX線分析装置11Bのプリアンプ38に入力される。

30

【0117】

続いて、X線分析装置11Cの処理動作について説明する。

【0118】

マルチキャピラリーレンズ45内部に蛍光X線bが入射すると、蛍光X線bは、マルチキャピラリーレンズ45内壁面にて全反射を繰り返しCdTe半導体検出器16に導かれる。

【0119】

また、BG放射線dは、マルチキャピラリーレンズ45内部に進入し、マルチキャピラリーレンズ45内部でコンプトン散乱又は光電吸収する。そして、所定の角度でマルチキャピラリーレンズ45内面に入射したBG放射線dは、マルチキャピラリーレンズ45内壁面にて全反射を繰り返しCdTe半導体検出器16にて検出される。

40

【0120】

ここで、BG放射線dが、マルチキャピラリーレンズ45内壁面にてコンプトン散乱又は光電吸収すると、コンプトン散乱又は光電吸収が生じた地点にて、コンプトン散乱又は光電吸収が生じると同時に光、例えばシンチレーション光eを発光する。このシンチレーション光eは光検出器46にて検出される。

【0121】

ここで、二次処理パルス105には、BG放射線dの反応に起因する誤パルスが含まれている。BG放射線dは、CdTe半導体検出器16にて検出されるとほぼ同時に光検出器46にて光が検出されている。よって、図9に示された波高弁別器41から計数禁止信

50

号 1 1 8 が出力されていない時に、波高弁別器 2 1 から入力される二次処理パルス 1 0 5 は、蛍光 X 線 b に起因するパルス信号であると判断され、M C A 2 2 に出力される。

【 0 1 2 2 】

M C A 2 2 では、二次処理パルス 1 0 5 からエネルギー毎の計数が行なわれ、波高分布データ 1 0 6 が取得される。M C A 2 2 では、B G 放射線 d の反応に起因する誤パルスの影響を除外でき、測定対象である蛍光 X 線 b のみの波高分布データ 1 0 6 を取得できる。

【 0 1 2 3 】

M C A 2 2 から元素分析器 2 3 に、所要の時間幅の波高分布データ 1 0 6 が出力される。元素分析器 2 3 では、分析試料 1 0 を構成する元素の含有量比を時系列に連続的に表示する。つまり、各元素に相当するエネルギー幅での計数値を時系列にフィルタ処理を行ない、元素の連続的な含有率の変化を表示する。このフィルタの時定数は、必要精度に応じて可変とする。

【 0 1 2 4 】

X 線分析装置 1 1 C のように、厚型の C d T e 半導体検出器 1 6 を用いると、蛍光 X 線 b の反応に起因するパルスと共に、B G 放射線 d の反応に起因する誤パルスを取得することができる。さらに、蛍光 X 線 b の反応に起因するパルスと、B G 放射線 d を弁別できる。したがって、パルス信号処理によって誤パルスを除去できるので、分析装置周囲の B G 放射線 d の入射を遮蔽する必要がなく、B G 放射線 d が存在する環境でも、高い S / N 比で分析試料 1 0 の元素分析及び解析を実施することができる。

【 0 1 2 5 】

また、X 線分析装置 1 1 C のように、光検出器 4 6 を用いると、B G 放射線 d の反応に起因する未処理パルス 1 1 3 に基づいて計数禁止信号 1 1 8 を発することで、B G 放射線 d が存在する環境でも、高い S / N 比で分析試料 1 0 の元素分析及び解析を実施することができる。

【 0 1 2 6 】

図 1 2 は、本発明に係る X 線分析装置の第 5 の実施形態を示す概略図である。

【 0 1 2 7 】

図 1 2 は、B G 放射線として自然放射線が存在する放射線環境にて、分析試料 1 0 を分析する X 線分析装置 1 1 D を示す。

【 0 1 2 8 】

X 線分析装置 1 1 D には、複数の分析試料 1 0 を運搬する分析試料運搬手段、例えばベルトコンベア 5 5 と、複数の分析試料 1 0 から放出される蛍光 X 線 b を集光及び増幅して増強する蛍光 X 線増強手段、例えばコリメータ 5 6 と、複数の検出素子を有する放射線検出器、例えば C d T e 半導体群検出器 5 7 とが備えられる。

【 0 1 2 9 】

C d T e 半導体群検出器 5 7 は、支持基板 2 5 と、支持基板 2 5 上に設けられる C d T e 単結晶群 5 8 とから構成される。C d T e 単結晶群 5 8 は、アレイ化された複数の C d T e 単結晶、例えば 8 個の C d T e 単結晶 2 9 a ~ 2 9 h を有する。なお、C d T e 単結晶 2 9 a ~ 2 9 h は一対の電極（図示しない）に挟持されているものとする。

【 0 1 3 0 】

また、X 線分析装置 1 1 D には、C d T e 半導体群検出器 5 7 からの出力パルス 1 0 1 をパルス量に比例する電圧パルス 1 0 2 に変換・増幅するプリアンプ群 5 9 と、電圧パルス 1 0 2 の波形をデジタルデータに変換して未処理パルス 1 0 3 を得る A / D 変換器群 6 0 とが備えられる。A / D 変換器群 6 0 群からの信号である未処理パルス 1 0 3 は、反応深さ演算手段 2 0 に入力できるようになっている。

【 0 1 3 1 】

プリアンプ群 5 9 には、C d T e 単結晶 2 9 a ~ 2 9 h に対応するように、プリアンプ 1 8 a ~ 1 8 h がそれぞれ設けられ、さらに、A / D 変換器群 6 0 には、プリアンプ 1 8 a ~ 1 8 h に対応するように、A / D 変換器 1 9 a ~ 1 9 h がそれぞれ設けられる。

【 0 1 3 2 】

10

20

30

40

50

元素分析器 23 は、一定の判定基準との比較を順次実施し、ある規定値濃度以上の元素が検出された場合、検出位置と濃度を出力する機能を有する。

【0133】

続いて、X線分析装置 11D の処理動作について説明する。

【0134】

図 12 に示された X線分析装置 11D に備えられる X線源 14 から分析試料 10 に照射 X線 a が入射される。分析試料 10 からは、蛍光 X線 b とコンプトン散乱した散乱 X線 c とが放出される。

【0135】

そして、電圧印加された CdTe 半導体群検出器 57 に、分析試料 10 からの蛍光 X線 b 及び BG放射線 d がそれぞれ入射する。蛍光 X線 b 及び BG放射線 d は、CdTe 半導体群検出器 57 に入射し、CdTe 単結晶 29a ~ 29h によってそれぞれ検出される。 10

【0136】

つまり、CdTe 半導体群検出器 57 から出力される出力パルス 101 には、蛍光 X線 b の反応に起因するパルスと、BG放射線 d の反応に起因する誤パルスとが含まれている。

【0137】

出力パルス 101 は、反応深さ演算手段 20 及び波高弁別器 21 にて BG放射線 d が除去され二次処理パルス 105 に変換される。

【0138】

ここで、CdTe 単結晶 29a ~ 29h にて蛍光 X線 b 及び BG放射線 d を検出する際、例えば CdTe 単結晶 29a は、蛍光 X線 b の検出を行なうと共に、隣り合う CdTe 単結晶 29b の BG放射線検出器としての役割をもたせることもできる。すなわち、図 9 に示された X線分析装置 11B にて説明したように、CdTe 単結晶 29a にて検出して得られる未処理パルス 103 は、隣り合う CdTe 単結晶 29b の計数禁止信号 118 としての役割も果たす。よって、A/D変換器 19a から計数禁止信号 118 が出力されていない時に、A/D変換器 19b から入力される未処理パルス 103 は、蛍光 X線 b に起因するパルス信号であると判断され、反応深さ演算手段 20 に出力される。なお、CdTe 単結晶 29a にて検出して得られる未処理パルス 103 は、一定の距離の範囲内にある CdTe 単結晶 29c ~ 29h の計数禁止信号 118 としての役割も果たす。 30

【0139】

さらに、元素分析器 23 において、順次運搬される分析試料 10 の元素濃度と所要の判定基準値との比較を実施する。分析試料 10 において基準値以上の濃度の元素が検出された場合、分析試料 10 のうち、基準値以上の濃度の元素の位置を認識・表示し、分析試料 10 中に含まれる管理すべき元素と位置とを迅速に弁別することができる。

【0140】

X線分析装置 11D のように、複数の CdTe 単結晶 29 を有する CdTe 半導体群検出器 57 を用いると、蛍光 X線 b の反応に起因するパルスと共に、BG放射線 d の反応に起因する誤パルスを取得することができる。さらに、蛍光 X線 b の反応に起因するパルスと、BG放射線 d とを弁別できる。したがって、パルス信号処理によって誤パルスを除去 40 できるので、分析装置周囲の BG放射線 d の入射を遮蔽する必要がなく、BG放射線 d が存在する環境でも、高い S/N 比で分析試料 10 の元素分析及び解析を実施することができる。

【0141】

また、X線分析装置 11D のように、隣り合う CdTe 単結晶を BG放射線検出器として用いると、BG放射線 d の反応に起因する未処理パルス 113 に基づいて計数禁止信号 118 を発することで、BG放射線 d が存在する環境でも、高い S/N 比で分析試料 10 の元素分析及び解析を実施することができる。

【0142】

図 13 は、本発明に係る X線分析装置の第 6 の実施形態を示す概略図である。 50

【0143】

図13は、BG放射線として自然放射線が存在する放射線環境にて、分析試料10、例えば放射化物試料10aを分析するX線分析装置11Eを示す。X線分析装置11Eは、水中において放射化物試料10aの応力を解析する装置である。

【0144】

X線分析装置11Eには、X線出射信号120を出力するタイミング調整装置60と、X線出射信号120を受けて単色のX線を照射するX線源14と、このX線源14から射出された照射X線aを案内するX線案内管61aと、放射化物試料10aからコンプトン散乱された散乱X線cを案内するX線案内管61bと、散乱X線cを検出するCdTe半導体検出器16と、CdTe半導体検出器16からの出力パルス101によって強度分析を行ない出力パルス101からエネルギー及びBG放射線dの除去を行なう強度分析装置62と、この強度分析装置62からのX線強度情報122によって応力値を算出する応力評価装置63とが備えられる。

10

【0145】

また、X線出射信号120を受けてガスを供給できるガス注入器65と、このガス注入器65からガスを案内するガス案内手段66とが設けられ、このガス案内手段66のガス供給側からX線案内管61a、61bの内部にそれぞれガスが供給できるようになっている。X線案内管61a、61bの内部に照射X線aが照射されるときのみX線案内管61a、61bの内部にガスを注入し、照射X線a、散乱X線cの透過ラインを設けるものである。ガスの種類としては、例えば、空気を用いるが、ヘリウム等の不活性・軽元素のガスをを用いた方が、低エネルギーX線の減衰を低減できるため有効である。

20

【0146】

また、X線分析装置11Eには、照射X線aの照射角と散乱X線cの入射角とを調整するために、X線源14とCdTe半導体検出器16との位置を誘導する位置調整装置68が備えられる。

【0147】

さらに、タイミング調整装置60からのX線出射信号120は、応力評価装置63に出力できるようになっている。

【0148】

続いて、X線分析装置11Eの処理動作について説明する。

30

【0149】

位置調整装置68によって、X線源14とCdTe半導体検出器16との位置を所要の位置に設定する。

【0150】

タイミング調整装置60からX線出射信号120をX線源14、ガス注入器65及び応力評価装置63に出力する。X線出射信号120によって、ガス注入器65からガス案内手段66を介してX線案内管61a、61bの内部にガスが注入され、X線源14から放射化物試料10aにX線案内管61aを介して照射X線aが照射される。そして、放射化物試料10aからコンプトン散乱される散乱X線cがX線案内管61bを介してCdTe半導体検出器16にて検出される。

40

【0151】

CdTe半導体検出器16から出力される出力パルス101は、強度分析装置62によって、エネルギー及びBG放射線dの除去が行われる。また、CdTe半導体検出器16は、図12に示されたCdTe半導体群検出器57であってもよい。その際、例えばCdTe半導体群検出器57のCdTe単結晶29aは、散乱X線cの検出を行なうと共に、隣り合ったCdTe単結晶29bのBG放射線検出器としての役割も果たす。

【0152】

そして、強度分析装置62にて、出力パルス101を波形処理することによってBG放射線dを低減して、X線強度分布を算出する。

【0153】

50

強度分析装置 6 2 からの X 線強度情報 1 2 2 が応力評価装置 6 3 に入力される。この応力評価装置 6 3 では、X 線出射信号 1 2 0 を受けて、X 線源 1 4 及び C d T e 半導体検出器 1 6 の位置関係と、強度情報 1 2 2 とから放射化物試料 1 0 a の応力を評価する。

【0154】

X 線分析装置 1 1 E のように、厚型 C d T e 半導体検出器 1 6 を用いると、散乱 X 線 c の反応に起因するパルスと共に、B G 放射線 d の反応に起因する誤パルスを取得することができる。さらに、散乱 X 線 c の反応に起因するパルスと、B G 放射線 d の反応に起因する誤パルスとを弁別できる。したがって、パルス信号処理によって誤パルスを除去できるので、B G 放射線 d の環境に影響されることなく高い S / N 比で放射化物試料 1 0 a の応力解析を実施することができる。

10

【0155】

また、水中に設置される放射化物試料 1 0 a の応力解析を実施することができる。

【図面の簡単な説明】

【0156】

【図 1】本発明に係る X 線分析装置の第 1 の実施形態を示す概略図。

【図 2】X 線分析装置に備えられる C d T e 半導体検出器を示す拡大図。

【図 3】蛍光 X 線が反応した場合のキャリアの移動を示す概略図。

【図 4】蛍光 X 線が反応して消滅した場合のパルスの波形を示すグラフ。

【図 5】B G 放射線が反応して外部に放出された場合のパルスの波形を示すグラフ。

【図 6】B G 放射線が数回反応して消滅した場合のパルスの波形を示すグラフ。

20

【図 7】本発明に係る X 線分析装置の第 2 の実施形態を示す概略図。

【図 8】K - X 線及び L - X 線のエネルギースペクトルを示すグラフ。

【図 9】本発明に係る X 線分析装置の第 3 の実施形態を示す概略図。

【図 10】X 線分析装置に備えられる C d T e 半導体検出器とシンチレーション検出器の位置関係を示す拡大図。

【図 11】本発明に係る X 線分析装置の第 4 の実施形態を示す概略図。

【図 12】本発明に係る X 線分析装置の第 5 の実施形態を示す概略図。

【図 13】本発明に係る X 線分析装置の第 6 の実施形態を示す概略図。

【図 14】従来 of X 線分析装置であって、S i 半導体検出器と蛍光 X 線の反応を示す概略図。

30

【符号の説明】

【0157】

1 0 分析試料

1 1 , 1 1 A , 1 1 B , 1 1 C , 1 1 D , 1 1 E X 線分析装置

1 4 X 線源

2 0 , 2 0 a 反応深さ演算手段

2 1 , 2 1 a , 4 1 波高分析器

2 9 C d T e 単結晶

3 6 シンチレーション検出器

4 5 マルチキャピラリーレンズ

40

4 6 光検出器

5 1 遮蔽フィルタ

5 5 ベルトコンベア

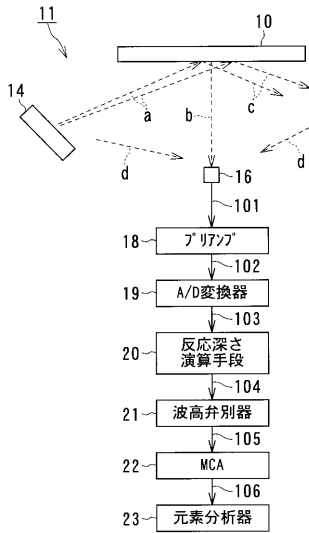
5 6 コリメータ

5 7 C d T e 半導体群検出器

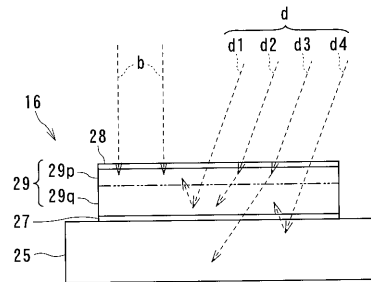
6 1 a , 6 1 b X 線案内管

6 5 ガス注入器

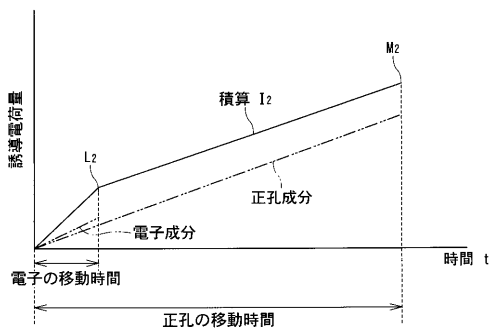
【図1】



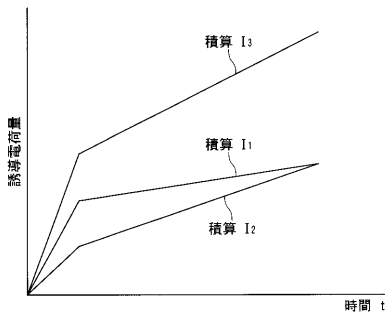
【図2】



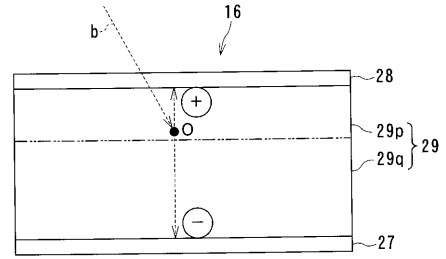
【図5】



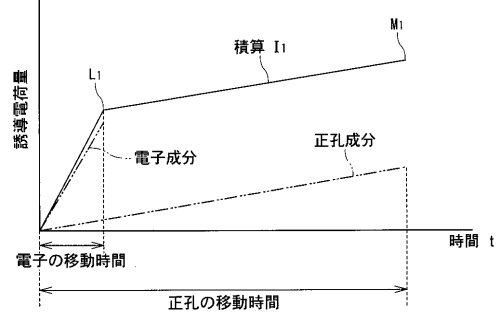
【図6】



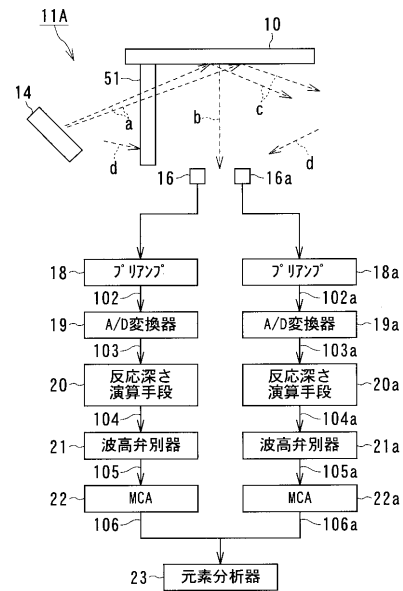
【図3】



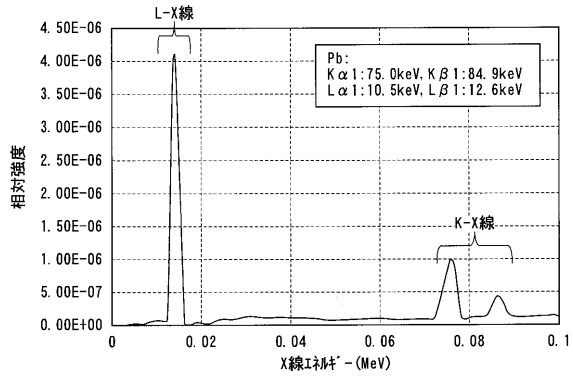
【図4】



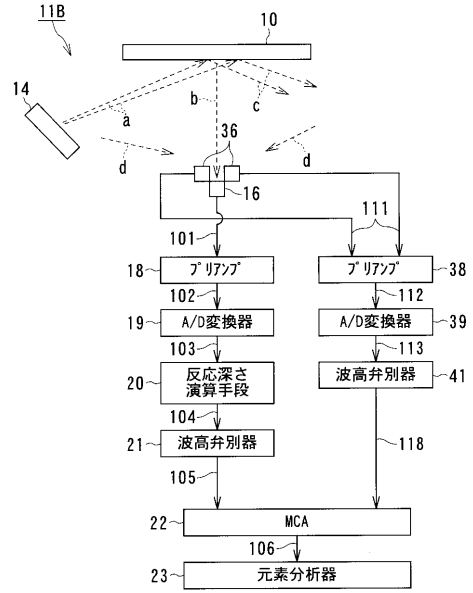
【図7】



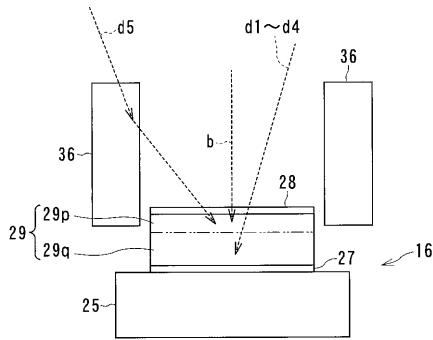
【 図 8 】



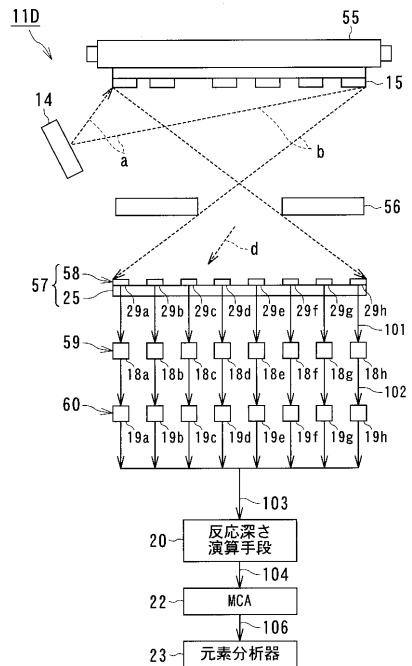
【 図 9 】



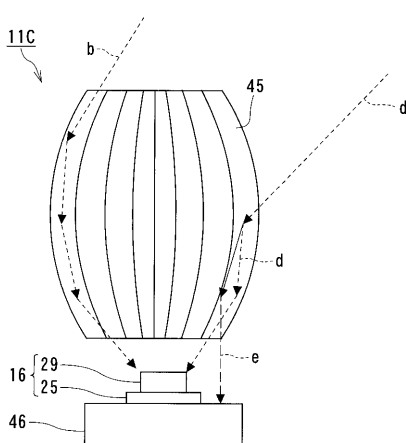
【 図 10 】



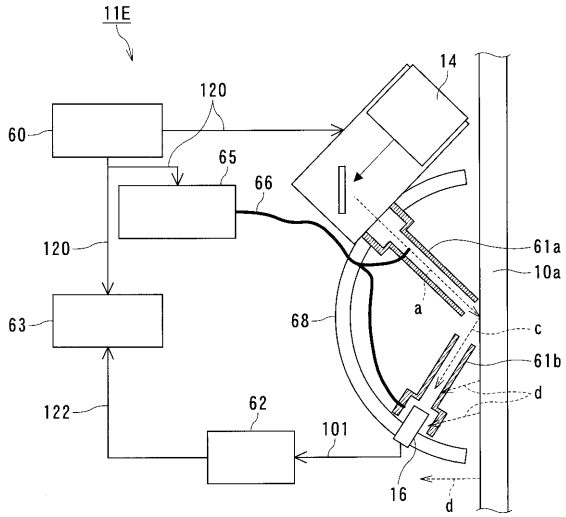
【 図 12 】



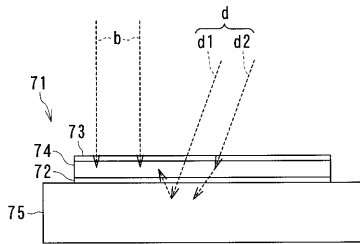
【 図 11 】



【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



フロントページの続き

(72)発明者 内藤 晋
神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株式会社東芝横浜事業所内

(72)発明者 前川 立行
神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株式会社東芝横浜事業所内

(72)発明者 河合 昭雄
神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株式会社東芝横浜事業所内

(72)発明者 森本 総一郎
神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株式会社東芝横浜事業所内

Fターム(参考) 2G001 AA01 BA04 CA01 DA01 DA02 DA10 EA03 KA01
2G088 EE30 FF02 FF03 FF15 GG17 GG21 KK01 KK02 KK15 LL02
LL06