

(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2018-31896
(P2018-31896A)

(43) 公開日 平成30年3月1日(2018.3.1)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
GO2B 6/122 (2006.01)	GO2B 6/122	2H147
GO2B 6/12 (2006.01)	GO2B 6/12 371	
GO2B 6/13 (2006.01)	GO2B 6/13	

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2016-164148 (P2016-164148)
(22) 出願日 平成28年8月24日 (2016.8.24)

(出願人による申告)平成28年度、国立研究開発法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業(CREST)、「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス基盤技術」、「磁性-金属-半導体異種材料集積による待機電力ゼロ型フォトニックルータの開発」、「待機電力ゼロ型フォトニックルータに向けた各要素デバイスと異種材料集積チップの開発」、産業技術力強化法第19条の適用を受ける出願

(71) 出願人 304021417
国立大学法人東京工業大学
東京都目黒区大岡山2丁目12番1号
(74) 代理人 110001807
特許業務法人磯野国際特許商標事務所
(72) 発明者 雨宮 智宏
東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内
(72) 発明者 庄司 雄哉
東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内
(72) 発明者 荒井 滋久
東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内

最終頁に続く

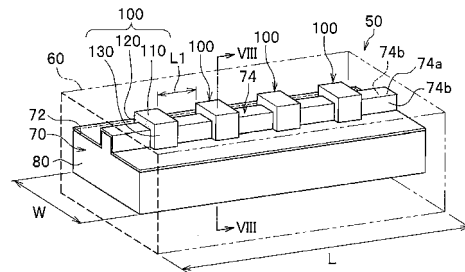
(54) 【発明の名称】光バッファ素子構造、その製造方法、およびその解析方法

(57) 【要約】

【課題】既存のシリコン系集積素子との整合性が良好な光バッファ素子構造、その製造方法、およびその解析方法を提供する。

【解決手段】クラッド60に囲まれて光を伝搬するシリコンコア70を有する光導波路80を備えている光素子50である。光素子50の光導波路80は、シリコンコア70の上面部72に凸部74を有している。そして、凸部74に隣接して、負のグースヘンシェンシフトを示すメタマテリアル100を備えている。

【選択図】図7



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

クラッドに囲まれて光を伝搬するシリコンコアを有する光導波路を備え、
前記光導波路は、前記シリコンコアの上面部に凸部を有して、
前記凸部に隣接して、負のグースヘンシェンシフトを示すメタ材料を備えたことを特徴とする光バッファ素子構造。

【請求項 2】

前記メタ材料は、光の進行方向に垂直な平面で形成され、光の進行方向に1つ以上配置されていることを特徴とする請求項 1 に記載の光バッファ素子構造。

【請求項 3】

前記凸部は伝搬する光の波長より小さな幅および高さを有することにより、前記メタ材料は、前記光導波路内を伝搬する光を遅延させることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光バッファ素子構造。

【請求項 4】

前記伝搬する光の遅延は、前記光導波路外から与えられる電気または光の外部信号により前記光導波路内のキャリアを励起して、前記メタ材料の共振を制御することにより、当該遅延の時間が操作されることを特徴とする請求項 3 に記載の光バッファ素子構造。

【請求項 5】

前記シリコンコアの幅寸法は、集積体の上に配置されるシリコン導波路の幅寸法と同寸法であることを特徴とする請求項 1 ~ 4 の何れか一項に記載の光バッファ素子構造。

【請求項 6】

前記上面部には、酸化膜が形成されていることを特徴とする請求項 1 ~ 5 の何れか一項に記載の光バッファ素子構造。

【請求項 7】

前記シリコンコアの上面に、前記凸部を形成する工程と、
前記凸部にメタ材料を蒸着させる工程と、
前記光導波路をクラッドにて取囲む工程とを備えることを特徴とする請求項 1 ~ 6 の何れか一項に記載の光バッファ素子構造の製造方法。

【請求項 8】

前記凸部を形成する工程は、集積体の上に配置されるシリコンコアの上面部を凸状に削って、シリコンコアの上部に導波路を形成することを特徴とする請求項 7 に記載の光バッファ素子構造の製造方法。

【請求項 9】

前記シリコンコアのうち、前記メタ材料が配設された凸部の散乱パラメータを導出する工程と、

前記散乱パラメータから前記メタ材料の誘電率および透磁率の周波数依存性を演算する工程と、

前記誘電率および前記透磁率の周波数依存性を用いて、前記光導波路を均質とする工程と、

均質化された光導波路の波長分散を解析する均質化モード解析を行う工程とを備えることを特徴とする請求項 1 ~ 6 の何れか一項に記載の光バッファ素子構造の解析方法。

【請求項 10】

前記均質とする工程は、前記光導波路を前記凸部を有していない断面矩形状とする単純化を有し、

前記均質化モード解析を行う工程は、該単純化された光導波路を含む素子全体の波長分散の解析を有することを特徴とする請求項 9 に記載の光バッファ素子構造の解析方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

20

30

40

50

本発明は、光バッファ素子構造、その製造方法、およびその解析方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、負のグースヘンシェンシフト (Goos-Hanchen shift) による光トラップ効果により、光遅延を行う光素子が知られている (例えば、特許文献1等参照)。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2011-164577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、このような従来の光バッファ素子構造では、光導波路層と反射層との界面にライン状の凹凸を周期的に形成している。凹凸の溝方向は、光の方向と直交して多数形成しなければならぬ。このため、作成が容易ではない上、既存の他のシリコン系集積素子と同一製造工程を経て作成しないので、シリコン系集積素子の製造工程との整合性が良好ではなかった。

【0005】

そこで、本発明は、既存のシリコン系集積素子との整合性が良好な光バッファ素子構造、その製造方法、およびその解析方法を提供することを課題としている。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明に係る光バッファ素子構造は、クラッドに囲まれて光を伝搬するシリコンコアを有する光導波路を備え、光導波路は、シリコンコアの上面部に凸部を有して、凸部に隣接して、負のグースヘンシェンシフトを示すメタ材料を備えたことを特徴としている。

【0007】

このような構成によれば、メタ材料の負のグースヘンシェンシフトによって光導波路の内部を伝搬する光が遅延する。

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、既存のシリコンコアを備えるシリコン系集積素子と組み合わせて利用する際の整合性が良好な光バッファ素子構造、その製造方法、およびその解析方法が提供される。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】通信ネットワークにて光ネットワークと、電気的データネットワークとが混在している様子を示す模式図である。

【図2】光ルータが複数のデータ列を干渉させることなく合流させる様子を示す概念図である。

【図3】メタ材料を用いた光バッファの特性を他の光バッファと比較した表である。

【図4】光導波路で光の伝搬を説明する光バッファ素子構造の模式図である。

【図5】負のグースヘンシェンシフトを説明する光バッファ素子構造の模式図である。

【図6】比較例の光導波路の構成を説明する斜視図である。

【図7】実施形態の光バッファ素子構造で、要部の構造を説明する模式的な斜視図である。

【図8】実施形態の光バッファ素子構造で、図7中VIIII-VIIII線に沿った位置での要部の断面図である。

【図9】実施形態の光バッファ素子構造で、設定される寸法関係を用いて要部の構造を説

10

20

30

40

50

明する模式的な斜視図である。

【図 1 0】実施形態の光バッファ素子構造で、要部の周囲の磁界を示し、図 9 中矢視 X 方向から見た模式図である。

【図 1 1】実施形態の光バッファ素子構造で、要部の周囲の電界を示し、図 9 中 X I - X I 線に沿った位置での模式図である。

【図 1 2】実施形態の光バッファ素子構造で、周波数に依存するメタ材料の寸法について説明する図である。

【図 1 3】実施形態の光バッファ素子構造で、光がトラップされた様子を示す分散曲線の図である。

【図 1 4】実施形態の光バッファ素子構造で、光がトラップされた様子を拡大して示す図である。

【図 1 5】実施形態の光バッファ素子構造で、光がトラップされた際の損失を示す図である。

【図 1 6】実施形態の光バッファ素子構造の製造方法を示し、(a) は、積層された二酸化ケイ素層およびシリコン層の様子を示す模式的な断面図である。(b) は、ドライエッチングされた様子を示す模式的な断面図である。(c) は、酸化アルミ膜層が形成された様子を示す模式的な断面図である。(d) は、メタ材料が蒸着された様子を示す模式的な断面図である。(e) は、シリコン層がエッチングされた様子を示す模式的な断面図である。(f) は、周囲に二酸化ケイ素層が被覆された様子を示す模式的な断面図である。

【図 1 7】実施形態の光バッファ素子構造の解析方法で、解析される光バッファ素子構造を示す模式的な断面図である。

【図 1 8】実施形態の光バッファ素子構造の解析方法で、単純化の工程を説明する模式的な断面図である。

【図 1 9】実施形態の光バッファ素子構造の解析方法で、単純化の工程を含む解析の工程を説明するフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0010】

本発明の実施形態について、図 1 乃至図 1 9 を参照して詳細に示す。説明において、同一の要素には同一の番号を付し、重複する説明は省略する。

【0011】

図 1 は、通信ネットワーク 1 にて、光通信ネットワーク 2 と電氣的データネットワーク 3 とが混在している様子を示す模式図である。

光通信等において、光パケット信号の円滑な通信を確保するため、各ネットワーク間に介挿されるルータには、データのバッファリング機能やルーティング（経路制御）機能が設けられている。

【0012】

具体的には、一般的に光・電気変換（光 光検出器 電気 メモリ 半導体レーザー 光）機能を備えたルータが光から変換された電氣の状態データでデータをバッファリングして、再度、光に戻す信号処理を実施している。

しかしながら、高速の光通信では、1 T b p s 程度の切り替え速度が必要で、従来手法では、通信速度が低下してしまう。

また、光・電気変換を行う際に消費電気が大きいといった問題もあった。

【0013】

このため、光信号を光のままに信号処理することにより、速度の低下が少なく消費電力を減少させることができる光ルータ 1 0 の開発が近年進められてきている。

【0014】

図 2 は、光ルータ 1 0 が複数の回線 Ch . 1、Ch . 2（図 1 参照）を流れるデータ列 A、B を干渉させることなく合流させて、回線 Ch . 3 にデータ列 C を流す様子を示す概念図である。

10

20

30

40

50

このようなものでは、光ファイバ 11 を介して回線 Ch . 1 からデータ列 A がまた、光ファイバ 12 を介して回線 Ch . 2 からデータ列 B が光ルータ 10 に入射する。

入射前のタイミング t_1 では、Ch . 1 のデータ列 A のデータの存在しない箇所に Ch . 2 のデータ列 B のデータを合成する。これにより、光ルータ 10 の Ch . 3 に出力されるデータ列 C を、干渉する箇所のない 1 つのデータ列 C にまとめることができる（タイミング t_4 参照）。

【0015】

しかしながら、タイミング t_2 , t_3 では、データ列 A のデータとデータ列 B のデータとをそのまま合成すると、干渉してしまう。このため、光ルータ 10 では、データ列 A のデータがない部分にデータ列 B のデータが来るように光バッファ等でバッファリング（遅延）させる必要がある。

光ルータ 10 では、バッファリングによりデータ列 B のタイミングを遅らせてから合成すると、データ列 A のデータとデータ列 B のデータとは干渉しなくなる（タイミング t_5 , t_6 参照）。

【0016】

一般的に光バッファとしては、ファイバ遅延バッファ、PhC（フォトリソニッククリスタル）バッファ、メタ材料バッファが知られている。

図 3 は、メタ材料を用いた光バッファの特性を他の光バッファと比較した表である。

ファイバ遅延バッファは、長尺（数 km ~ 数十 km）の光ファイバケーブルを通過させて、光を遅延させるものである。

しかしながら、このようなファイバ遅延バッファでは、バッファ装置そのものが大型化してしまうといった問題があった。

【0017】

また、たとえば、PhC バッファは、フォトリソニック結晶を用いたスローライトの効果によりある程度まで小型化することが可能となる。

しかしながら、光の遅延時間を連続的に制御することができず、バッファリングが可能な時間も固定されてしまうことから、全ての干渉を取り除くことができなかつた。

そこで、メタ材料バッファと呼ばれ、負のグースヘンシェンシフトによって光トラップ効果を発揮させて、シリコンコアの内部を伝搬する光を遅延させるメタ材料を備えた光バッファ素子構造が提案されている。

【0018】

まず、メタ材料の負のグースヘンシェンシフトによる光トラップの原理について簡単に説明する。

図 4 は、光導波路で光の伝搬を説明する光バッファ素子構造の模式図である。

ここで、光導波路を構成するシリコンコア 20 の一面側には、二酸化ケイ素層 21 が設けられている。二酸化ケイ素層 21 は、シリコンコア 20 の一面側を熱で酸化させて形成される。そして、この二酸化ケイ素層 21 は、シリコンコア 20 の屈折率 3.5 よりも低い屈折率 1.5 を有していて、界面で光を反射させてシリコンコア 20 内に閉じ込めることができる。

【0019】

シリコンコア 20 の他面側には、メタ材料 31 にて構成されるメタ材料層 30 が設けられている。この実施形態のメタ材料 31 は、金 (Au) によって構成されていて、メタ材料層 30 の誘電率 (ϵ) および透磁率 (μ) は、双方とも正である ($\epsilon > 0$, $\mu > 0$) 。

この状態では、input 側から導入された光は、シリコンコア 20 によって構成される光導波路内を伝播する際、二酸化ケイ素層 21 およびメタ材料層 30 との各界面にて反射されながら output 側から放出される。

【0020】

図 5 は、負のグースヘンシェンシフトによって光がトラップされる様子を説明する光バ

10

20

30

40

50

ツファ素子構造の模式図である。

メタ材料 31 は、金属微細構造によって、与えられる光または電圧による電磁界の共振にて、比透磁率を変化させることにより、負の屈折率を有することができる。

ここで、メタ材料層 30 の誘電率 (ϵ) および透磁率 (μ) が負である ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$) と、シリコンコア 20 とメタ材料層 30 との界面で、シリコンコア 20 の内部を伝搬する光は、負のグースヘンシェンシフトによって、トラップされて遅延する。

このように、output 側から放出される光は、input 側から導入された際の光信号のデータ列を維持したまま、遅延する。遅延量は、与えられる光または電圧を調整することによって制御できる。このためメタ材料 31 の負のグースヘンシェンシフトによる光トラップを用いれば、遅延量を可変して制御することが可能な遅延バッファを得ることができる。

10

【0021】

図 6 は、比較例の光ルータ 10 に用いられる光導波路の構成を説明する斜視図である。

比較例のメタ材料 15 は、金属微細構造が具現化された一例である。

すなわち、比較例の光ルータ 10 は、光を閉じ込めて導波するシリコンコア 14 の上面部 14a に、複数のメタ材料 15 を整列し配置している。メタ材料 15 は、負のグースヘンシェンシフトにより光トラップ効果を発揮する光バッファとしての役割を担う。

各メタ材料 15 は、略同一の厚さで平面視略 C 字状のリングであり、上面部 14a に平坦面を沿わせて倒された状態で、リングの方向が揃うように配列されることにより、負のグースヘンシェンシフト効果を発揮する。

20

【0022】

このように構成された比較例のメタ材料 15 は、隣接するシリコンコア 14 のシリコン材料内のキャリアを励起する。そして、与えられる光または電圧を調整することにより、メタ材料 15 のキャパシタ特性を変動させると、キャリアプラズマ効果によってキャリアの生成と消滅とが交互に行なわれる。このように、メタ材料 15 の特性の変化を誘起して、光導波路内を伝播する光の速度を動的制御することができる。

【0023】

すなわち、光励起または電圧の印加が停止している状態では、キャリアは消滅して光導波路内を伝播する光は、光トラップされて遅延する。

30

そして、光励起または電圧の印加により、キャリアが生成されて光導波路内を伝搬する光は、トラップされることなく、遅延しない。

このため、与えられる光または電圧のスイッチング制御を行うことにより、メタ材料の特性に変調を与え、キャリアの生成と消滅時間との比率を調整して、可変して制御することが可能な遅延バッファとして遅延時間を制御することができる。

【0024】

しかしながら、図 6 に示すように、平面視略 C 字状のメタ材料 15 は、上面部 14a に沿って倒された状態で配設される。また、メタ材料 15 のリングの直径は、約百 nm 程度と微細である。このような寸法のメタ材料 15 は、所望の形状に形成しにくい。さらに金属蒸着工程後のリフトオフプロセス中に、メタ材料 15 の面外方向 C へ剥離させる方向の力が加わりやすい。

40

【0025】

このため、メタ材料 15 に部分的な浮き上がりが生じたり、メタ材料 15 の形状が変形する。さらに、配置される位置も所定位置からずれてしまう虞がある。

したがって、シリコン系集積素子と同じ製造工程で、同一形状を保ちながら、複数のメタ材料 15 を所望の位置に整列させることは困難であった。

特にメタ材料 15 に負のグースヘンシェンシフトによる光トラップ効果を発揮させるためには、平面視略 C 字状の形状を高い寸法精度にて形成することが要求される。

【0026】

50

そこで、本実施形態は、既存のシリコンコアを備えるシリコン系集積素子と組み合わせる際の整合性が良好で、負のグースヘンシェンシフトによる光トラップ効果を発揮させることが可能な光バッファ素子構造を提供するものである。

【0027】

図7は、本発明の実施形態の光バッファ素子構造で、要部の構造を説明する模式的な斜視図である。

この実施形態の光素子50は、クラッド60に囲まれて光を伝搬するシリコンコア70を有するシリコン導波路としての光導波路80を備えている。

光導波路80は、シリコンコア70の上面部72に凸部74を一体に有している。この実施形態の凸部74は、伝搬する光の波長と比較して小さな幅寸法wおよび高さ寸法hを有している(図9参照)。そして、凸部74は、光導波路80の延設方向に沿って、ほぼ同じ断面をもって直線状に連続してシリコンコア70に一体となるように形成されている。

【0028】

また、この凸部74に隣接して、負のグースヘンシェンシフトを示す複数のメタマテリアル100...が備えられている。このメタマテリアル100は、金(Au)およびチタン(Ti)を有して構成されていて、凸部74側にチタン層を設けることにより、蒸着による金属の接着力を向上させている。そして、このメタマテリアル100は、負のグースヘンシェンシフトによる光トラップ効果を発揮させて、光導波路80内を伝搬する光を遅延させる。

【0029】

さらに、この実施形態のメタマテリアル100は、光の進行方向に平行な三枚の平面としての上面部110、および側面部120、130を有している。

これらの上面部110および側面部120、120は、凸部74の上方から凸部74の外側面に密着するようにメタマテリアル100を蒸着させることにより、出隅部が略直角に屈曲された状態で連続して、かつ各面は平坦に形成されている。

このため、これらの上面部110および側面部120、120によって構成される三枚の平面は、面延設方向を光の進行方向に平行に沿わせてそれぞれ凸部74に密着されて、かつ凸部74に垂直な断面においては、起立した略コ字状を呈して、略コ字状の開放端をシリコンコア70に向けてこれらの上面部110および側面部120、120が一体となるように凸部74に嵌合されている。

【0030】

光素子50には、光の進行方向に垂直な平面を有して形成された複数のメタマテリアル100が凸部74の延設方向に沿って一定間隔L1(たとえば、100nm)を空けて、配置されている。実施形態では、1つのメタマテリアル100を1ユニットとして捉え、直列に4つのメタマテリアル100を配置した4ユニットから構成される光素子50が示されている。

そして、この光素子50の長手方向の寸法Lが約0.6~1μm以下となるように構成されている。

しかしながら、特にこれに限らず、1つのメタマテリアル100にて構成される1ユニットの全長を約15~20nmとしてもよい。そして、メタマテリアル100の個数は、特に限定されるものではなく、単数またはいずれの複数個であってもよい。

【0031】

図8は、実施形態の光バッファ素子構造で、図7中VIII-VIII線に沿った位置での要部の断面図である。

この実施形態の光導波路80を形成するシリコンコア70の周囲には、酸化膜としての酸化アルミニウム(Al₂O₃)の被膜部76が設けられている。また、被膜部76の周囲に酸化ケイ素(SiO₂)にて構成されるクラッド60が設けられている。

そして、光導波路80外に設けられた図示省略の制御装置からは、電気または光による外部信号90が与えられる。酸化アルミニウムの被膜部76は、ゲート酸化膜として電圧

10

20

30

40

50

が印加された際にキャリアを生成させる。これにより、メタマテリアルの特性に変調を与え、遅延時間を制御することができる。

【0032】

図9は、実施形態の光バッファ素子構造で、設定される寸法関係を用いて要部の構造を説明する模式的な斜視図である。

シリコンコア70の凸部74は、光導波路80の延設方向Lに対して直交する方向において、幅寸法wおよび高さ寸法hを有して、シリコンコア70の幅方向略中央に、光の進行方向に直交する略正方形の断面形状となるように形成されている。

【0033】

また、凸部74に被せられるメタマテリアル100の厚さ寸法を一定寸法a（たとえば、 $a = \text{約} 15 \sim 20 \text{ nm}$ ）とするとともに、光導波路80の延設方向Lに沿った奥行き寸法を一定寸法d（たとえば、 $d = \text{約} 50 \text{ nm}$ ）、幅寸法w（たとえば、 $w = \text{約} 50 \text{ nm}$ ）および高さ寸法h（たとえば、 $h = \text{約} 50 \text{ nm}$ ）を有している。

このため、光の波長を $\lambda = 1550 \text{ nm}$ とすると、凸部74は伝搬する光の波長と比較して、充分小さな幅寸法wおよび高さ寸法hを有することとなる。したがって、メタマテリアル100は、負のグースヘンシェンシフトによって光導波路80内を伝搬する光を遅延させることができる。

【0034】

図10は、実施形態の光バッファ素子構造で、要部の周囲の磁界を示し、図9中矢視X方向から見た模式図である。

また、図11は、実施形態の光バッファ素子構造で、要部の周囲の電界を示し、図9中XI-XI線に沿った位置での模式図である。

シリコンコア70内の磁界および電界は、メタマテリアル100のキャパシタ特性の変動によるキャリアプラズマ効果を生じさせて、光トラップを行うキャリアの生成と消滅とに影響を与える。

【0035】

特に負のグースヘンシェンシフトによる光トラップ効果を発揮させるためには、メタマテリアル100の幅寸法wおよび高さ寸法hに高い寸法精度が要求される。

図12は、実施形態の光バッファ素子構造で、周波数に依存するメタマテリアルの寸法について説明する図である。

図12では、縦軸にメタマテリアルの高さ寸法hを、横軸にメタマテリアルの幅寸法wをそれぞれ表している。破線で示す等高線は、どの周波数でメタマテリアルが光トラップ効果を発揮するように動作するかを示している。

メタマテリアルは、光の周波数に依存して負のグースヘンシェンシフトによる光トラップ効果が起こる寸法が相違する。

実施形態では、点線Bで示す光通信に用いる周波数 193 THz によって動作するように、この点線Bに近い寸法関係である高さ寸法 $h = 50 \text{ nm}$ 、幅寸法 $w = 50 \text{ nm}$ のメタマテリアル100が採用された。

【0036】

図13は、実施形態の光バッファ素子構造で、光がトラップされた様子を示す分散曲線の図である。

ここでは、横軸は、伝搬乗数 ($\text{real} = \text{実部}$) を示している。また、縦軸は、光の波長 $\lambda / c (\mu\text{m}^{-1})$ を示している。そして、分散曲線の傾きは、遅延すなわち反射率を示し、傾き角度が0に近接するほど光がトラップされていることを示している。

【0037】

また、比較のために真空中の光を示すライトラインC (Light line) が示されている。

そして、このライトラインCと比較して傾きが緩やかなデバイスカーブD (Device curve: $\sim 1550 \text{ nm}$) は、実施形態の光素子50の光導波路80内を伝搬する光を示している。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 8 】

図 1 4 は、実施形態の光バッファ素子構造で、光がトラップされた様子を示す図 1 3 中 A 部の拡大図である。

光素子 5 0 の凸部 7 4 の寸法が高さ寸法 $h = 50 \text{ nm}$ 、幅寸法 $w = 50 \text{ nm}$ であるメタ材料 1 0 0 によって、光導波路 8 0 内の光がトラップされると、 $\beta / c (\mu \text{m}^{-1}) = \text{約} 4$ 付近では、光バッファとして利用可能な十分な遅延が生じることを確認できた。

【 0 0 3 9 】

図 1 5 は、実施形態の光バッファ素子構造で、光がトラップされた際の損失を示す図である。

横軸は、伝搬乗数 ($\text{imag} = \text{虚部}$) を示している。メタ材料 1 0 0 によって光導波路 8 0 内の光がトラップされる、 $\beta / c (\mu \text{m}^{-1}) = \text{約} 4$ 付近では、損失が大きくなっていることがわかる (図 3 参照)。このように損失と遅延とは、相関関係が存在し、 $\beta / c (\mu \text{m}^{-1}) = \text{約} 4$ 付近でメタ材料 1 0 0 が強く相互作用を及ぼして光を遅延させていることがわかる。

10

【 0 0 4 0 】

[光バッファ素子構造の製造方法]

図 1 6 は、実施形態の光バッファの素子構造の製造方法を説明するものである。

ここでは、図 7 を参照しつつ、メタ材料を有する光バッファ素子構造の製造方法を、製造工程に沿って説明する。

図 1 6 (a) は、積層されたシリコン層 1 7 0 および二酸化ケイ素層 1 6 0 の様子を示す模式的な断面図である。

20

【 0 0 4 1 】

このシリコン層 1 7 0 および二酸化ケイ素層 1 6 0 を有する構造素材 1 5 0 は、他の光導波路を形成する素子と同じ構成の構造素材 1 5 0 が用いられている。また、以下に記載する本実施形態の光バッファとなる光素子 5 0 の製造工程についても、他の光導波路を有する素子と同様の工程で行われる。

【 0 0 4 2 】

まず、構造素材 1 5 0 のシリコン層 1 7 0 側の上面部 1 7 0 a がドライエッチングされる。ドライエッチングは、フッ素系のガス等を用いてもよい。

【 0 0 4 3 】

図 1 6 (b) は、構造素材 1 5 0 がドライエッチングされた様子を示す模式的な断面図である。

30

ドライエッチングにより、削り取られた上面部 7 2 の幅方向の中央部に凸部 7 4 が形成される。

ドライエッチングは、微細加工が可能である。このため、凸部 7 4 の寸法精度が高いものが得られる。

【 0 0 4 4 】

図 1 6 (c) は、酸化アルミ膜層 1 7 2 が形成された様子を示す模式的な断面図である。

酸化アルミの蒸着によりシリコン層 1 7 0 側の上面部 1 7 0 a は、酸化アルミ膜層 1 7 2 で覆われる。酸化アルミ膜層 1 7 2 によって、キャリアの生成と消滅とが円滑に行なわれる。

40

【 0 0 4 5 】

図 1 6 (d) は、凸部 7 4 にメタ材料 1 0 0 が蒸着された様子を示す模式的な断面図である。

凸部 7 4 には、チタンおよび金が蒸着される。蒸着を行う際、凸部 7 4 には、所定間隔を置いて所望の位置にエッチングにより窓が形成される。そして、この窓から薄板状にチタンおよび金が凸部 7 4 の上面側と左、右両側面側とに跨るように蒸着される。

凸部 7 4 は、延在方向に垂直な断面形状を同様な断面形状を有するように構成されている。

50

これにより、これらの凸部 74 の上面側および左、右両側面側に、蒸着されるメタマテリアル 100 は、窓に沿ってセルフアライメントされながら、同一形状をもって延在方向に所定の間隔を置いて形成される（図 7 参照）。

【0046】

さらに、この実施形態のメタマテリアル 100 は、上面部 110 および側面部 120, 130 が光の進行方向に延びる平行な平面をそれぞれ有している。これらの上面部 110 および側面部 120, 130 は、凸部 74 の三面の外側面に内側面を圧着させることにより、凸部 74 を上方および左、右方向から覆うように被せられて嵌めこまれている。

このため、金属蒸着工程後にリフトオフプロセスが実行されても、メタマテリアル 100 は、凸部 74 から剥離したり上方または側方へ移動したりしない。したがって、メタマテリアル 100 の形状安定性が良好で、光トラップ効果を発揮することができる。

10

【0047】

図 16 (e) は、シリコン層 170 の左、右側面 170b, 170b がエッチングされた様子を示す模式的な断面図である。シリコン層 170 の左、右側面 170b, 170b には、エッチングにより取り除かれる除去部 173, 173 が仮想線で示されている。

【0048】

図 16 (f) は、凸部 74 の周囲に二酸化ケイ素のクラッド 60 が被覆された様子を示す模式的な断面図である。シリコンコア 70 および凸部 74 は、クラッド 60 (図 9 参照) を構成する二酸化ケイ素によって周囲が被覆されて光導波路 80 を形成する。

これらのシリコン層 170 に対するドライエッチング、蒸着、エッチング等の工程は、他の光導波路を有する素子を製造する工程と同じ工程を有している。

20

これにより、従来の光導波路を有する素子と同様の工程で、凸部 74 にメタマテリアル 100 が蒸着された光導波路 80 をクラッド 60 にて取囲み、光バッファとなる光素子 50 を製造することができる。そのため、製造設備の変更がほとんど必要とされない。

【0049】

図 16 (b) にて、メタマテリアル 100 を蒸着する前工程で、凸部 74 は、ドライエッチングによって高精度、かつ長手方向に同じまたは同様な断面形状となるように微細加工されている。

このため、凸部 74 に沿って被せられる複数のメタマテリアル 100 の内側の寸法は正確に確定する。

30

【0050】

また、図 16 (d) にて、この凸部 74 に形成されるメタマテリアル 100 の薄板状の上面部 110 および側面部 120, 120 の内側には、凸部 74 の外側面に密着するように光の進行方向に平行に沿う平面が設けられている。メタマテリアル 100 は、この内側の平面によって比較的広い面積で密着する。

また、上面部 110 とは、面外方向を約 90 度異ならせた側面部 120, 120 の内側に位置する平面が型脱方向と直交する方向にて凸部 74 の外側面に密着している。

このため、リフトオフプロセス時にも所望の位置から移動しない。よって、セルフアライメントによる正確な寸法、位置精度が維持されて形状も安定する。

したがって、比較例で示した平面視略 C 字状のリングのように寝かせた場合（図 6 参照）と比較してメタマテリアル 100 の移動や変形が発生することがない。このため、この実施形態のメタマテリアル 100 は、正確な寸法精度を要求される光トラップ効果を確実に発揮させることができる。

40

【0051】

[光バッファ素子構造の解析方法]

図 17 は、実施形態の光バッファ素子構造の解析方法で、解析される素子構造を示す模式的な断面図、また、図 18 は、単純化の工程を説明する模式的な断面図である。

そして、図 19 は、実施形態の光バッファ素子構造の解析方法で、単純化の工程を含む解析の工程を説明するフローチャートである。

図 17 に示すように、この実施形態の光素子 50 は、断面略方形状のシリコンコア 70

50

の上面部 7 2 の中央の一部から凸部 7 4 が一体に突設されていて、この凸部 7 4 にのみ、メタマテリアル 1 0 0 が設けられている複雑な構造を有している。

このため、全体の構造を一般的に用いられている導波路解析手法 (F D T D (Finite-difference time-domain method)) など、解析装置に入力して、光素子 5 0 の特性を導き出す手法では、計算時間が多大なものになってしまう。また、解析を行う対象部分には、金属も含まれているため、導波路の解析を行うことは容易ではない。

【 0 0 5 2 】

そこで、この実施形態では、メタマテリアルの電磁場計算を行いながら、金属を含む導波路のモード解析を行う手法として、均質化モード解析を行う。そして、この均質化モード解析により、導波路の解析を容易なものとする。以下、光バッファ素子構造の均質化モード解析の方法について説明する。

10

【 0 0 5 3 】

図 1 7 , 図 1 8 を参照しつつ、図 1 9 に示すフローチャートに沿って均質化モード解析を説明する。均質化モード解析を開始すると、ステップ S 1 0 0 では、メタマテリアル 1 0 0 の周辺 M 内のみをある誘電率 () および透磁率 (μ) を持った均質な空間としてみなして、電磁界分布として散乱パラメータ S を計算する。

この際、メタマテリアル 1 0 0 の周辺 M の物質を均一とみなし、周辺 M 内をある誘電率 () および透磁率 (μ) を有する均質な空間としてシリコンコア 7 0 から分離する。

これにより、凸部 7 4 の周辺 M の散乱パラメータが導出される。

20

【 0 0 5 4 】

ステップ S 1 0 1 では、導出された散乱パラメータ S からメタマテリアル 1 0 0 の誘電率 および透磁率 μ の周波数依存性が演算される。

ステップ S 1 0 2 では、演算された周波数依存性を用いて光導波路 8 0 が単純化される。

このとき、光導波路 8 0 を凸部 7 4 を有していない断面矩形状とする単純化が行われる (図 1 8 参照) 。たとえばここで、光導波路 8 0 を単純化すると、上面部 7 2 は、 $= (1 . 7) ^ 2$ 、シリコンコア 7 0 は、 $= (3 . 4 5) ^ 2$ 、クラッド 6 0 は $= (1 . 5) ^ 2$ 、として表される。

【 0 0 5 5 】

ステップ S 1 0 3 では、光素子 5 0 全体の波長分散特性の解析が行われる。

30

この実施形態の均質化モード解析を行う工程は、メタマテリアル 1 0 0 の周辺 M の物質を均一とみなし、単純化された光導波路 8 0 を含む光素子 5 0 全体の波長分散の解析を有している。波長分散特性は、物質の誘電率 () および透磁率 (μ) が均質であれば、容易かつ迅速に解析できることが知られている。

このため、この実施形態の光バッファ素子構造の均質化モード解析は、単純化された光導波路 8 0 に予め演算されたメタマテリアル 1 0 0 の周辺 M のみの散乱パラメータ S を当てはめて演算することにより、断面矩形で誘電率 と透磁率 μ とが均質な物質として解析している。

したがって、迅速かつ正確にメタマテリアル 1 0 0 を有する光素子 5 0 の導波路解析が行なえて、光導波路 8 0 の波長分散特性を求めることができる。

40

【 0 0 5 6 】

上述してきたように、実施形態の光バッファ素子構造、その製造方法、およびその解析方法では、以下のような作用効果を奏する。

すなわち、メタマテリアル 1 0 0 の負のグースヘンシェンシフトによってシリコンコア 7 0 の内部を伝搬する光が遅延する。

【 0 0 5 7 】

この実施形態によれば、凸部 7 4 を良好な精度で形成することにより、隣接して設けられる微細なメタマテリアル 1 0 0 の形状の安定性が向上する。

また、既存のシリコンコアを備えるシリコン系集積素子と同じ生産工程によって、同じシリコンコアの構造素材 1 5 0 (図 1 6 参照) から製造可能であり、他のシリコン系集積

50

素子と組み合わせて利用する際の整合性が良好である。

【0058】

さらに、メタ材料100は、光の進行方向に平行な平面を凸部74に嵌合させて形成されている。このため、凸部74の平坦な上面部74aおよび側面部74b, 74b(図7参照)に良好な接着力で固定される。このため、メタ材料100の凸部74への取付安定性を向上させることができる。

【0059】

また、メタ材料100を構成する三枚の平面は、光の進行方向に平行に沿うように嵌合されて、凸部74の延在方向と垂直な形状では略コ字状に起立している。このため、TEモードの光導波路80内の光は、上面部110の上方からの制御信号による入射電場にて一对のキャパシタとなる側面部120, 120間でも励起されて、効果的に光トラップ効果を生じさせることができる。

10

【0060】

そして、凸部74は、伝搬する光の波長より小さな幅寸法 w および高さ寸法 h を有する。メタ材料100の内側寸法を規定する凸部74の大きさを、負のグースヘンシェンシフトによる光トラップ効果が起こる寸法(ここでは、高さ寸法 $h = 50 \text{ nm}$ 、幅寸法 $w = 50 \text{ nm}$ 、図12参照)としている。

メタ材料100は、凸部74の上面部74aおよび側面部74b, 74bの外側に対して、光の進行方向に平行となるように各上面部74aおよび側面部74b, 74bを高い寸法精度にて、配置している。また、メタ材料100は、凸部74の上面部74aおよび側面部74b, 74bの外側面によって内側面から凸部74の上面部74aおよび側面部74b, 74bを密着させて支持している。

20

このため、メタ材料100の形状安定性は良好であり負のグースヘンシェンシフトによって光導波路80内を伝搬する光を確実にトラップして遅延させることができる。

【0061】

さらに、図8に示すように、光導波路80外から与えられる電気または光の外部信号によって、光導波路80内のキャリアを励起して、メタ材料100の共振を制御し、自在に光をトラップし遅延させることができる。

このため、制御部は、光素子50に与える電気または光の外部信号を制御することによって、光導波路80内の光信号を光のまま、遅延させることができる。

30

光素子50によりバッファリングされて遅延した光は、複数の回線を通るデータ列を干渉させずに合流させることが出来(図2参照)、ルータとして使用した信号処理が可能となる。したがって、電気信号に変換する必要があるルータに比べて、速度の低下が少なく消費電力を減少させた光ルータ10を提供することができる。また、外部信号が与えられるまでの待機電力をゼロとすることが可能となる。

【0062】

さらに、シリコンコア70の幅寸法 w は、集積体の上に配置される光導波路80の幅寸法 w ($w = \text{約} 500 \text{ nm}$)と同寸法である(図7参照)。このため、図16(e)に示すように除去部173, 173が削られて、光素子50に用いられるシリコン系集積素子を他のシリコン系集積素子と共通化することができる。

40

【0063】

また、シリコン層170に一体に形成される凸部74の大きさは、負のグースヘンシェンシフトによる光トラップ効果が起こる寸法に合わせて、任意の大きさに上面部72を切削して形成することができる。このため、シリコンコア70の幅寸法 w は、他のシリコン系集積素子に用いるシリコンコアと同一の寸法のものが使用できる。

このため、光素子50は、他のシリコン系集積素子と同じ生産設備を用いて製造を行える。したがって、特別な製造ラインを必要とせず、製造コストの増大が抑制される。

【0064】

そして、シリコンコア70の周囲に設けられた酸化膜としての酸化アルミニウム(Al_2O_3)の被膜部76(図8参照)によってキャリアの生成と消滅とを伴う制御が円滑に

50

行なわれる。

このため、光素子 50 を用いた遅延時間の操作性を向上させることができる。

【0065】

以上、本実施形態に係る光バッファ素子構造、その製造方法、およびその解析方法について詳述してきたが、本発明はこれらの実施形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更可能であることは言うまでもない。

【0066】

例えば、本実施形態では、凸部 74 がシリコンコア 70 の上面部 72 の中央部に一つ設けられているものを示して説明してきたが、特にこれに限らず、上面部 72 に複数設けられているものであってもよい。

10

【0067】

また、凸部 74 の形状も特にこれに限らず、たとえば断面半円形状、断面多角形状、断面略三角形形状等、上面部 72 に設けられる凸部であればよく、メタマテリアル 100 の一部がシリコンコア 70 に埋没されていてもよい。

【0068】

さらに、実施形態では、凸部 74 が光導波路 80 の延設方向に沿って直線状に連続して形成されているものを示して説明してきたが特にこれに限らない。すなわち、メタマテリアル 100 が隣接されて配置されていれば、凸部が部分的に断続して形成されていてもよく、また、凸部の数量は、単数に限らず、複数であってもよい。

20

【0069】

そして、実施形態では、メタマテリアル 100 の構成金属として、金およびチタンが例示されているが金またはチタンのうち、何れか一方のみであってもよい。また、金またはチタンとともに、または代えて、他の金属、たとえば、白金、銀、アルミニウム、タンゲーステン、クロム等、どのような金属をメタマテリアルとして用いてもよく、これらの金属を一部または全部に用いる物質であればよい。

【符号の説明】

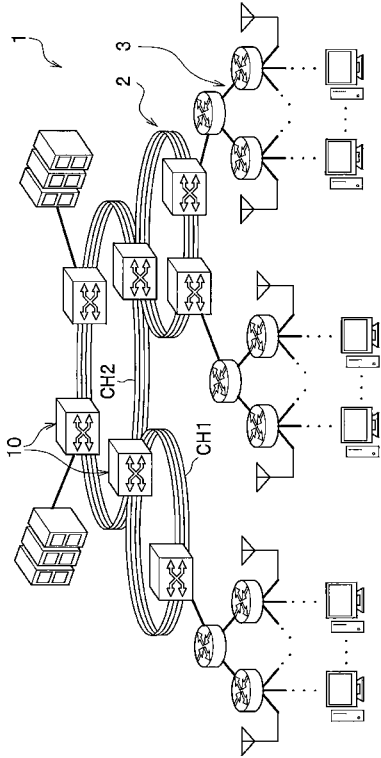
【0070】

- 1 通信ネットワーク
- 2 光通信ネットワーク
- 3 電氣的データネットワーク
- 10 光ルータ
- 11 光ファイバ
- 50 光素子
- 60 クラッド
- 70 シリコンコア
- 72 上面部
- 74 凸部
- 74 a 上面部
- 74 b 側面部
- 76 被膜部
- 80 光導波路
- 90 外部信号
- 100 メタマテリアル
- 110 上面部（平面の一つ）
- 120 側面部（平面の一つ）

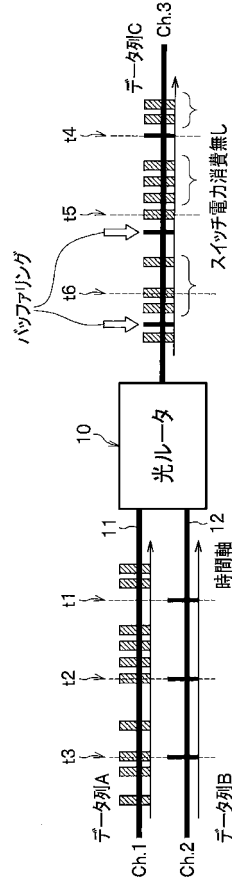
30

40

【 図 1 】



【 図 2 】

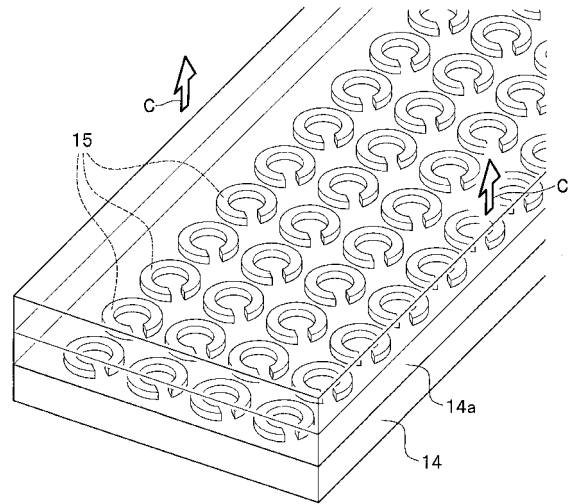


【 図 3 】

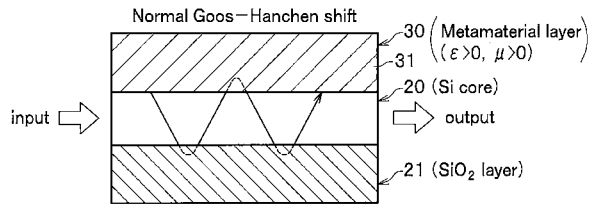
	保持時間	サイズ	他素子との集積性	損失	制御
ファイバ遅延バッファ	---	×	×	○	—
PhCバッファ	<10ns	○	△	△	光励起/電流電圧
メタマテリアルバッファ	<10ns	○	○	×	光励起/電圧

PhC=Photonic Crystal

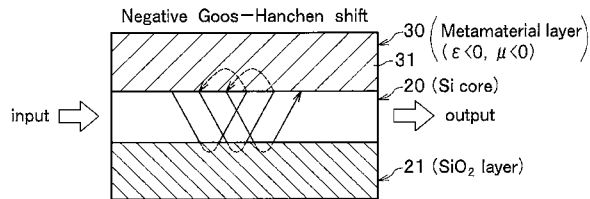
【 図 6 】



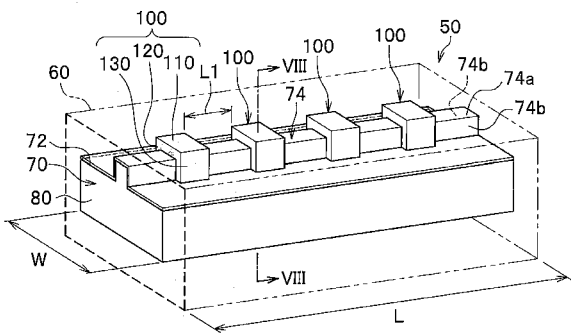
【 図 4 】



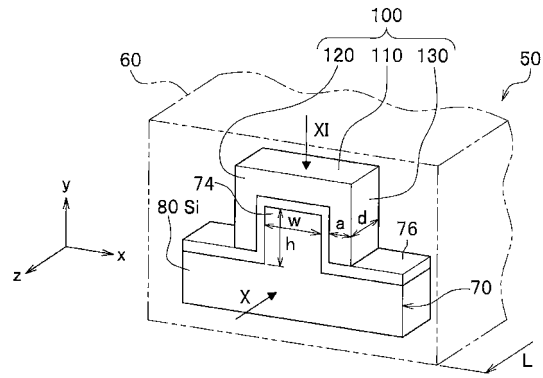
【 図 5 】



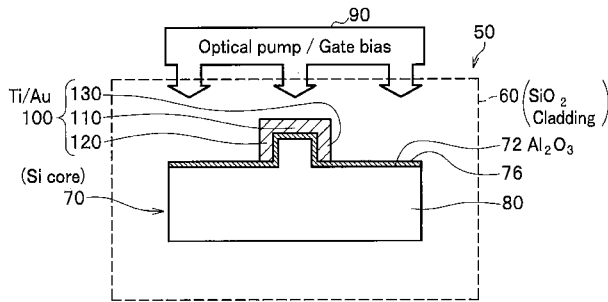
【 図 7 】



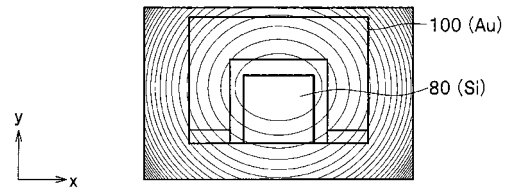
【 図 9 】



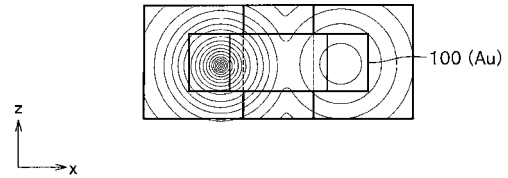
【 図 8 】



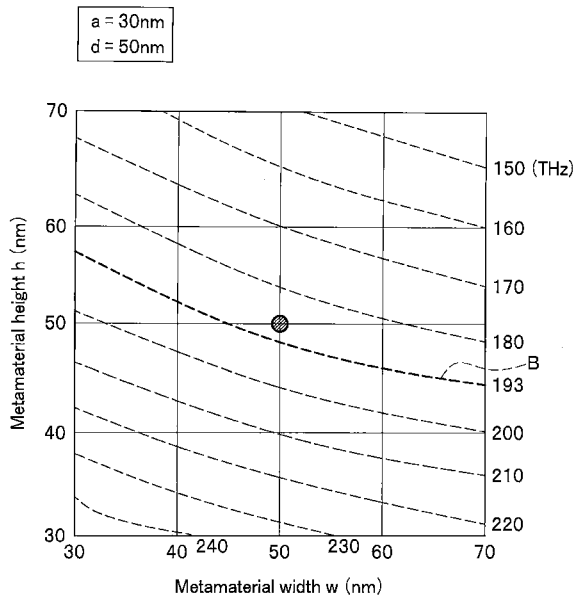
【 図 10 】



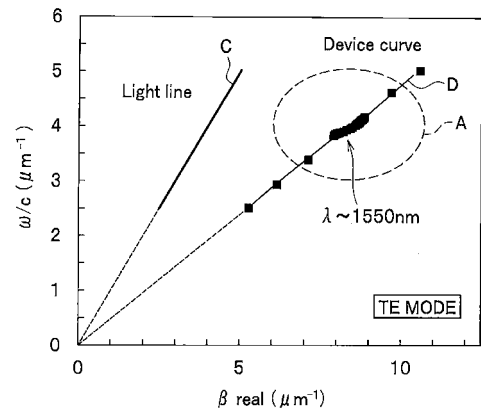
【 図 11 】



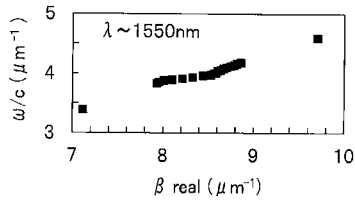
【 図 12 】



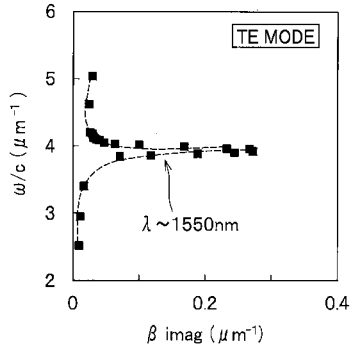
【 図 13 】



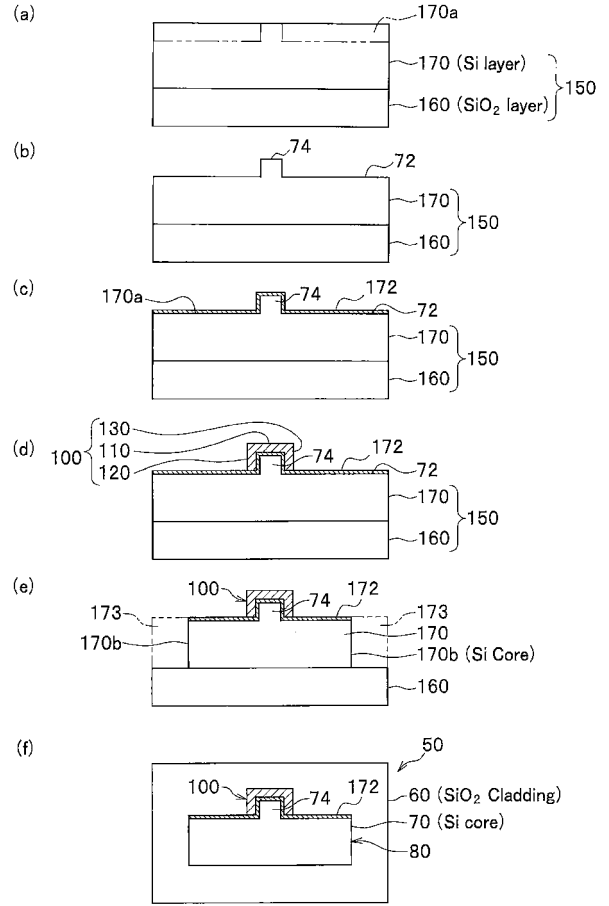
【図14】



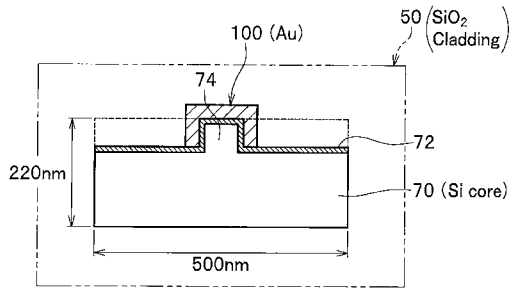
【図15】



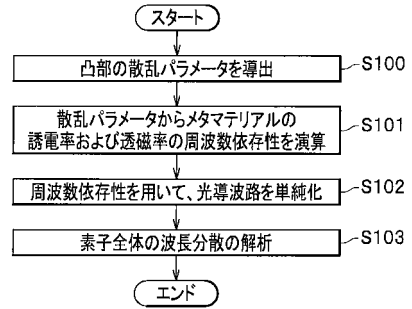
【図16】



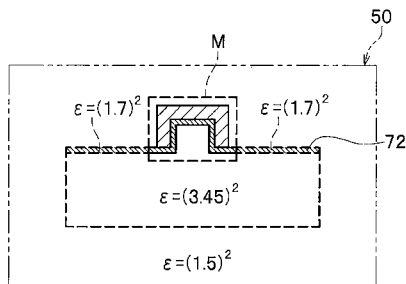
【図17】



【図19】



【図18】



フロントページの続き

(72)発明者 金澤 徹

東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 番 1 号 国立大学法人東京工業大学内

(72)発明者 西山 伸彦

東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 番 1 号 国立大学法人東京工業大学内

(72)発明者 水本 哲弥

東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 番 1 号 国立大学法人東京工業大学内

F ターム(参考) 2H147 AB11 AC01 AC17 BA05 EA10B EA10D EA13A EA14B EA15B EA15D

FA06 FC03 FC06 FD20