

(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2011-75614

(P2011-75614A)

(43) 公開日 平成23年4月14日(2011.4.14)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G02B 6/12 (2006.01)	G02B 6/12	Z
G02B 6/122 (2006.01)	G02B 6/12	A
	G02B 6/12	N
		2H147

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2009-223937 (P2009-223937)	(71) 出願人	503360115 独立行政法人科学技術振興機構 埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(22) 出願日	平成21年9月29日 (2009.9.29)	(74) 代理人	110001069 特許業務法人京都国際特許事務所
		(72) 発明者	野田 進 京都市西京区京都大学桂 国立大学法人京 都大学大学院工学研究科内
		(72) 発明者	石▲崎▼ 賢司 京都市西京区京都大学桂 国立大学法人京 都大学大学院工学研究科内
		Fターム(参考)	2H147 BF04 BF06 BF12 EA12A EA12B EA13A EA13B GA10 GA19

最終頁に続く

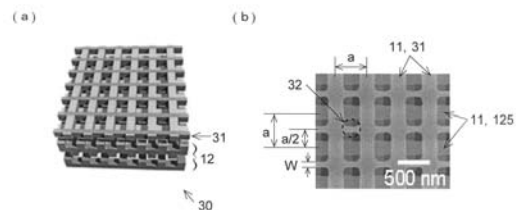
(54) 【発明の名称】 表面効果3次元フォトニック結晶

(57) 【要約】

【課題】外部からのアクセスが容易で、吸収等による光損失の影響のない、光伝搬及び光局在等の制御を可能とする3次元フォトニック結晶を提供する。

【解決手段】本発明に係る表面効果3次元フォトニック結晶30は、ウッドパイル型3次元フォトニック結晶表面に、本来の結晶表面とは構造の異なる表面構造層31を形成したものである。この表面構造層31は、本来、結晶表面に形成されるストライプ層12に対して、同じ層内に、ストライプ層を構成するロッド11と直交する方向に該ロッド11と同じ材料で構成される連結部材32を付加した、直交格子構造の層である。また、この連結部材32は、表面構造層31と最隣接するストライプ層125のロッドと1/2周期ずれた位置に形成される。

【選択図】 図7



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

周期構造を有する 3 次元フォトニック結晶の表面に、該周期構造の周期と所定の関係を有する周期を持つ表面構造層を形成したことを特徴とする表面効果 3 次元フォトニック結晶。

【請求項 2】

前記表面構造層に、点状欠陥から成る光共振器が形成されていることを特徴とする請求項 1 に記載の表面効果 3 次元フォトニック結晶。

【請求項 3】

前記表面構造層に、線状欠陥から成る光導波路が形成されていることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の表面効果 3 次元フォトニック結晶。

10

【請求項 4】

前記 3 次元フォトニック結晶の周期構造が、空気より屈折率の高い誘電体から成るロッドを互いに平行に周期的に配列してなるストライプ層を複数積層したものであって、最隣接のストライプ層のロッド同士が直交し、次隣接のストライプ層のロッド同士が平行且つ半周期ずれた構造を有するウッドパイル型であることを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載の表面効果 3 次元フォトニック結晶。

【請求項 5】

前記表面構造層が、

前記ウッドパイル型 3 次元フォトニック結晶の本来の表面を構成する表面のロッドと、前記表面ロッドと同一層内に設けられ、該表面ロッドと直交する方向に延び、該表面ロッド間を連結し、該層と最隣接するストライプ層を構成するロッドと半周期ずれた位置に形成された、所定の幅を有する、前記誘電体から成る連結部材と、

20

で構成される直交格子構造の層であることを特徴とする請求項 4 に記載の表面効果 3 次元フォトニック結晶。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、外部からのアクセスが容易で、吸収等による光損失の影響のない、光伝搬及び光閉じ込め等の制御を可能とする 3 次元フォトニック結晶に関する。

30

【背景技術】

【0002】

近年、新しい光デバイスとして、フォトニック結晶が注目されている。フォトニック結晶とは周期屈折率分布をもった光機能材料であり、光や電磁波のエネルギーに対してバンド構造を形成する。特に、光や電磁波の伝播が不可能となるエネルギー領域（フォトニックバンドギャップ、略称：PBG）が形成されることが特徴である。

【0003】

フォトニック結晶の屈折率分布の中に屈折率分布の乱れ（欠陥）を導入することにより、PBG中にこの欠陥によるエネルギー準位（欠陥準位）が形成される。これによって、PBG中の欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光のみが、この欠陥位置において存在可能になる。これにより、フォトニック結晶内に、点状の欠陥から成る光共振器や線状の欠陥から成る光導波路等の光回路素子を設けることができる。1個のフォトニック結晶内にこれらの光回路素子を多数設けて光集積回路を構成することにより、このフォトニック結晶は光IC素子となる。これまでの光通信等の分野においてはディスクリートの光回路素子を個々に接続して用いているが、光IC素子を用いることにより回路を超小型化することができる。

40

【0004】

フォトニック結晶には、2次元フォトニック結晶と3次元フォトニック結晶がある。このうち3次元フォトニック結晶は、2次元フォトニック結晶と比較して、構造的に頑丈であり、全ての光の偏光状態に対応することができるという特長を有する。特許文献1には

50

、空気より屈折率の高い物質から構成されるロッドを互いに平行に周期的に配列してなるストライプ層を複数積層したものであって、最隣接のストライプ層のロッド同士が直交し、次隣接のストライプ層のロッド同士が平行且つ半周期ずれた構造を有するウッドパイル型の3次元フォトニック結晶について記載されている。また、この文献には、この3次元フォトニック結晶の内部において、ロッドの一部に線状の欠陥を設けることにより光導波路を形成することが記載されている。

【0005】

特許文献2には、構造体内部のロッドに点欠陥を設けた3次元フォトニック結晶が記載されている。この点欠陥には、ロッドの一部を欠損させてそこに形状や屈折率等の異なる物体を配置したもの、ロッドを欠損させることなくロッドに部材を取り付けたもの、ロッド自体の形状を変化させた(太くした/細くした)もの、等がある。この点欠陥は、その形状や大きさ、ロッドに対する位置(変位)により定まる所定の周波数の光に共振する光共振器となる。この光共振器は前記のように光IC素子の構成要素になる。また、欠陥部に発光体を導入することにより、光が点欠陥において共振して発光するレーザ光源として用いることもできる。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2001-074955号公報

【特許文献2】特開2004-006567号公報

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

上述のように、従来の3次元フォトニック結晶では、光共振器や光導波路等に用いる欠陥が構造体の内部に形成されている(埋め込まれている)。従って、構造体外部の光を構造体内部に取り入れたり、構造体内部の光を構造体外部に取り出したりといった、内外間の光のアクセスや、構造体内部における光の制御、操作等が、2次元フォトニック結晶に比べて難しいという問題があった。

【0008】

本発明が解決しようとする課題は、外部からのアクセスが容易で、吸収等による光損失の影響のない、光伝搬及び光閉じ込め等の制御を可能とする3次元フォトニック結晶を提供することである。

30

【課題を解決するための手段】

【0009】

本願発明者は、上記の課題を解決するべく研究を重ねた結果、3次元フォトニック結晶の「表面」に着目した。3次元フォトニック結晶の表面は、その一方の側が空気等の自由空間となるため、様々な物質と光を相互作用させることが極めて容易となる。しかしながら、3次元フォトニック結晶の分野では、その表面における光操作はこれまで全く検討されていなかった。

【0010】

40

本願発明者は、まず、この3次元フォトニック結晶の表面に光の局在状態が形成されるかを、理論と実験の双方から検討した。その結果、3次元フォトニック結晶の表面において、光の状態(モード)が形成されることが確認できた。これに基づいて様々な実験を行った結果、3次元フォトニック結晶の表面構造を、その内部構造と所定の関係を保ちつつ変化させることにより、3次元フォトニック結晶表面において光の伝播が不可能となるPBG(以下、これを「表面モードギャップ」と称す)が形成されることを見出した。さらに、表面構造を変化させた層(以下、「表面構造層」と称す)に、点状や線状の欠陥を導入することにより、光共振器や光導波路が形成されることを見出した。

【0011】

即ち、本発明に係る3次元フォトニック結晶は、

50

周期構造を有する 3 次元フォトニック結晶の表面に、該周期構造の周期と所定の関係を有する周期を持つ表面構造層を形成したことを特徴とする。

【0012】

さらに、上記の 3 次元フォトニック結晶は、該表面構造層に点状欠陥や線状欠陥を導入することにより、光共振器や光導波路を形成することができる。

【0013】

なお、前記表面構造層は、3 次元フォトニック結晶の最表面の一層だけでも良く、最表面を含む表面近傍の複数の層から構成されていても良い。

【発明の効果】

【0014】

本発明に係る 3 次元フォトニック結晶は、その内部構造の周期性と所定の関係を有する表面構造層を設けることにより、該表面構造層において P B G を形成することができる。この表面構造層は、従来の 2 次元及び 3 次元フォトニック結晶と同様に、点状や線状等の欠陥を導入することにより光共振器や光導波路などを形成することができるため、3 次元フォトニック結晶表面における光制御や光操作が可能となる。また、光共振器や光導波路が構造体表面に形成されるため、外部との光のアクセスが従来の 3 次元フォトニック結晶より高効率で実現できる。さらに、3 次元フォトニック結晶の表面において吸収等の影響を受けない光閉じ込めが可能であることから、光損失のない、高感度かつ高度な光 - 物質相互作用を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図 1】3 次元フォトニック結晶の構造の一例を示した斜視図。

【図 2】表面を持たない無限の大きさを有する 3 次元フォトニック結晶のフォトニックバンドの計算結果を示した図(a)、及び表面を有する 3 次元フォトニック結晶のフォトニックバンドの計算結果を示した図(b)。

【図 3】3 次元フォトニック結晶表面の Γ -M 方向における光の状態の計算結果を示した図。

【図 4】3 次元フォトニック結晶表面における光の局在状態を調べるための実験系を示す概略構成図。

【図 5】入射角が $\theta = 52.3^\circ$ である場合の各波長（周波数）に対する反射率の測定結果の一例を示した図(a)、及び 3 次元フォトニック結晶表面におけるフォトニックバンドの測定結果を示した図(b)。

【図 6】3 次元フォトニック結晶表面における光の伝播を示した図。

【図 7】本発明に係る表面効果 3 次元フォトニック結晶の一実施例を示す斜視図(a)、及び表面構造層の電子顕微鏡写真(b)。

【図 8】従来の表面構造に対するバンド図(a)、ロッド間隔 $a(=0.5 \mu\text{m})$ に対して表面構造層の誘電体の幅を $0.16a(=0.08 \mu\text{m})$ とした場合のバンド図(b)、及び表面構造層の誘電体の幅を $0.4a(=0.2 \mu\text{m})$ とした場合のバンド図(c)。

【図 9】点状の表面欠陥を形成した表面構造層の電子顕微鏡写真。

【図 10】表面欠陥における光局在の計算結果を示した図(a)、及び表面構造層の誘電体の幅を $0.4a(=0.2 \mu\text{m})$ 、表面欠陥の幅を $0.55a(=0.275 \mu\text{m})$ とした場合の測定結果を示した図。

【図 11】表面欠陥の長さを変化させた場合の共振スペクトルの測定結果を示した図。

【図 12】表面欠陥の長さとの Q 値の変化を示した図。

【図 13】線状の表面欠陥を設けることにより導波路が形成された表面構造層を示した上面図。

【図 14】表面構造層に形成した導波路の導波モードを示したバンド図。

【図 15】導波路の幅を $0.52a$ とした場合の、導波モードを示したバンド図。

【図 16】導波路の幅を $0.52a$ とした場合の、導波路の周囲における電界分布を示した図

【発明を実施するための形態】

【0016】

本願発明者は、3次元フォトニック結晶の表面における光操作が可能であるかについて、まず結晶表面の光の状態を理論及び実験の双方から検証した。これを図1～図6を用いて説明する。

【0017】

図1は、3次元フォトニック結晶の構造の一例の斜視図である。この斜視図の3次元フォトニック結晶10はウッドパイル型と呼ばれるものであり、SiやGaAs等の誘電体から成るロッド11が周期aで略平行に並んだストライプ層12を有し、ストライプ層12が積層した構造をとっている。ストライプ層12は4層周期で同じ構造になるように積層されており、4n番目(nは整数、以下同様)のストライプ層121のロッド11と(4n+2)番目のストライプ層123のロッド11は略平行且つ1/2周期ずつずれるように並んでいる。(4n+1)番目のストライプ層122のロッド11と(4n+3)番目のストライプ層124のロッド11の関係も同様である。そして、最隣接のストライプ層12同士では、ロッド11は略直交するように配置されている。

10

【0018】

図2は、上記のウッドパイル型3次元フォトニック結晶10に対し、3次元時間領域差分法によりフォトニックバンドを計算した結果を示している。なお、図2(a)は、3次元フォトニック結晶10に表面が存在しない(大きさが無限である)と仮定した場合のバンド図であり、図2(b)は、表面が存在する(ストライプ層12の積層数が有限である)とした場合のバンド図である。

20

【0019】

図2(a)に示すように、3次元フォトニック結晶10の大きさが無限である場合、周波数0.29～0.34(c/a)近傍では光の状態が存在しないPBGが形成されるため、このエネルギー領域の波長の光は結晶中に存在することができない。一方、表面を有する3次元フォトニック結晶では、図2(a)でPBGが形成されていた周波数域において、破線で示される光のモード13が形成されていることが分かる(図2(b))。また、図3に、図2(b)で用いた3次元フォトニック結晶の表面の-M方向における計算結果を示す。この図から、-M方向の3次元フォトニック結晶の表面において、電界が強く局在していることが分かる。これは、-M方向の3次元フォトニック結晶の表面において光が存在していることを示している。

30

【0020】

上記の結果を実証するため、3次元フォトニック結晶表面に光の局在状態が形成されるかどうかを実験により検証した。この実験に用いた実験系の概略構成を図4に示す。図4の実験系は、3次元フォトニック結晶10の表面の極近傍(～0.5μm)に、プリズム20を配置したものである。

【0021】

図4のプリズム20の内部に光を入射すると、この入射した光はプリズム20の底面21に角度θで入射する。底面に入射した光は入射角と同じ角度θで反射され、そのままプリズム20の外部に出射されるが、一方で底面21には僅かに光が染み出した状態(減衰波)ができる。フォトニック結晶10の表面に光の状態が存在する場合、この染み出した光はフォトニック結晶の表面に結合するため、プリズムからの反射光強度が減少する。

40

【0022】

この実験の結果を図5に示す。図5(a)は、プリズム20の底面21における入射角をθ=52.3°とした場合の測定結果の一例を示した、波長と反射率(入射光強度と反射光強度の比率)の関係を示す図である。この図の結果では、0.36c/a近傍の周波数の入射光に対して、反射率が減少する現象が見られた。この結果から、3次元フォトニック結晶10の表面に光が結合したことが分かる。一方、上記の実験系に対して、入射光の周波数及び入射角θを変化させることにより得られたフォトニックバンドの測定結果を、図5(b)に示す。この図の結果は、図2(b)のものと良く一致している。従って、理論と実験の双方

50

から、フォトニック結晶表面に光の状態（モード）が形成される（光が局在する）ことが分かった。

【0023】

また、図6に、3次元フォトニック結晶10の表面にレーザ光を照射した実験の結果を示す。ここで、図6(a)はレーザ光を照射する前の、図6(b)は図6(a)の点線で囲った領域に入射角を $\theta=45.7^\circ$ とし波長1430nmのレーザ光を照射した後の、3次元フォトニック結晶表面における光の状態の測定結果を示した図である。この図から、表面におけるフォトニックバンドと対応する波長のレーザ光を照射した場合には、照射した領域以外にも3次元フォトニック結晶10の表面に光が伝播している様子をはっきりと見て取ることができる。

10

【0024】

上記の理論及び実験の結果から、3次元フォトニック結晶表面において光のモードが存在すること、及び光が該表面上を伝播することが分かった。しかしながら、この光は結晶表面上を拡散してしまうため、このままでは3次元フォトニック結晶表面において自在に光を制御することができない。これに対し、本願発明者は、まず3次元フォトニック結晶10の表面に光のモードが存在しない「表面モードギャップ」を形成させることを考えた。そして、様々な実験の結果、3次元フォトニック結晶の表面に、内部構造の周期性と所定の関係を有する周期性を持った表面構造層を形成させることにより、該表面に表面モードギャップが形成されることを見出した。以下に、本発明の実施例を示す。

【実施例】

20

【0025】

本発明に係る表面効果3次元フォトニック結晶の一実施例を図7～図16を用いて説明する。

図7(a)は、本実施例の表面効果3次元フォトニック結晶30の斜視図を示している。また、図7(b)は3次元フォトニック結晶30の表面構造層31の電子顕微鏡写真である。この表面効果3次元フォトニック結晶30は、ウッドパイル型3次元フォトニック結晶表面に、本来の結晶表面とは構造の異なる表面構造層31を形成したものである。この表面構造層31は、本来、結晶表面に形成されるストライプ層12に対して、同じ層内に、ストライプ層を構成するロッド11と直交する方向に該ロッド11と同じ材料で構成される連結部材32を付加した、直交格子構造の層である。また、この連結部材32は、表面構造層31と最隣接するストライプ層125のロッド11と1/2周期ずれた位置に形成される。なお、本実施例の表面効果3次元フォトニック結晶における積層数は、表面構造層を含めて8である。

30

【0026】

図8に、連結部材32の幅 W を変化させた場合の、3次元フォトニック結晶30表面におけるフォトニックバンドの測定結果を示す。図8(a)は、連結部材32を付加しなかった($W=0$)、従来表面構造に対するバンド図であり、図8(b)及び(c)はそれぞれ $W=0.16a(=0.08\mu\text{m})$ 、 $0.4a(=0.2\mu\text{m})$ の場合のバンド図である。なお、ロッド11及び連結部材32の周期は $a=0.5\mu\text{m}$ 、ロッド幅は $0.4a(=0.2\mu\text{m})$ とした。

図8(a)のバンド図は、図5(b)と同様に、全ての周波数域（波長域）に対して表面モードが存在している。一方、図8(b)のように $W=0.16a$ の連結部材32を付加すると、波長 $1.3\sim 1.4\mu\text{m}$ 域に表面モードギャップが形成されることが分かった。また、図8(c)のように $W=0.4a$ の連結部材32を付加すると、波長 $1.4\sim 1.5\mu\text{m}$ 域に表面モードギャップが形成された。

40

【0027】

次に、表面構造層31の構造の一部を乱すことにより、点状の「表面欠陥」を形成した場合の結果を示す。図9は、長さ L_d の領域において連結部材32の幅を W から W_d とした表面欠陥321を形成した表面構造層31Aの電子顕微鏡写真である。この表面構造層31Aを用いた3次元フォトニック結晶30に対して数値計算を行ったところ、図10(a)に示すように、幅 W_d を増加させた部分にのみ光が点状に局在することが分かった。この結果

50

を踏まえて、連結部材 3 2 の幅を $W=0.4a$ とし、表面欠陥 3 2 1 の幅を $W_d=0.55a(=0.275 \mu\text{m})$ として、実際に実験を行った。図 1 0 (b) に、この表面欠陥 3 2 1 を中心とした領域において光の局在状態を測定した結果を示す。この図に示すように、僅か数 μm 以下の非常に狭い欠陥領域にのみ、光が局在していることが分かる。

【 0 0 2 8 】

さらに、図 1 1 に、表面欠陥 3 2 1 の長さ L_d を変化させた場合の共振スペクトルの測定結果を示す。図 1 1 から、表面欠陥 3 2 1 の長さ L_d に依存して、異なる波長の光が表面欠陥に蓄えられることが分かった。また、図 1 2 に、様々な表面局在モードの Q 値の測定結果を示す。この図から分かるように、 $L_d=6a$ において Q 値は最大で 9000 以上にも達した。この値は、3 次元フォトニック結晶としては実現されている中で世界最大である。この Q 値は、積層数を増やしていくことで、指数関数的に増大していくことが期待される。

10

【 0 0 2 9 】

さらに、表面構造層 3 1 に線状欠陥を設けることにより、「導波路」を形成した場合の結果を示す。図 1 3 は、幅 W_d の表面欠陥を十分な長さを有する領域に形成することにより、導波路 3 2 2 を形成した表面構造層 3 1 B の上面図である。この表面構造層 3 1 B を用いた 3 次元フォトニック結晶 3 0 に対して数値計算を行ったところ、図 1 4 のフォトニックバンド図に示すように、モードギャップ（グラフ内の白の領域の部分）の周波数域内に導波モードを形成することができた。また、導波路 3 2 2 の欠陥幅 W_d を変えることにより、導波帯域を制御することができることが示された。この導波路 3 2 2 は、欠陥幅 W_d が $0.40a$ 以上、 $0.60a$ 未満の範囲内で、単一モードの導波路となった。さらに、欠陥幅 W_d を $0.60a$ 以上にすると、高周波数側に高次のモードが形成された。

20

【 0 0 3 0 】

導波路 3 2 2 の幅 W_d を $0.52a$ とした場合のバンド図を図 1 5 に示す。この図に示すように、欠陥幅を $W_d=0.52a$ とすることで、モードギャップの周波数帯域のほぼ全域において導波帯域を得ることができる。また、この場合の導波路周辺における光電界分布を図 1 6 に示す。この図から、光が導波路 3 2 2 の近傍に局在すると共に、導波路 3 2 2 を伝播していることが分かる。

【 符号の説明 】

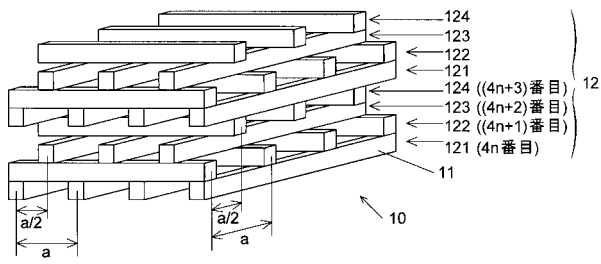
【 0 0 3 1 】

- 1 0 ... 3 次元フォトニック結晶
- 1 1 ... ロッド
- 1 2、1 2 1、1 2 2、1 2 3、1 2 4 ... ストライプ層
- 1 2 5 ... 表面構造層に最隣接するストライプ層
- 1 3 ... 光のモード
- 2 0 ... プリズム
- 2 1 ... プリズムの底面
- 3 0 ... 表面構造層を形成した 3 次元フォトニック結晶
- 3 1、3 1 A、3 1 B ... 表面構造層
- 3 2 ... 連結部材
- 3 2 1 ... 表面欠陥（点状欠陥）
- 3 2 2 ... 導波路

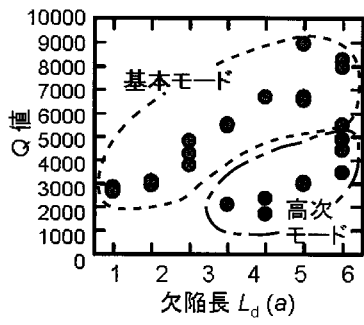
30

40

【 図 1 】

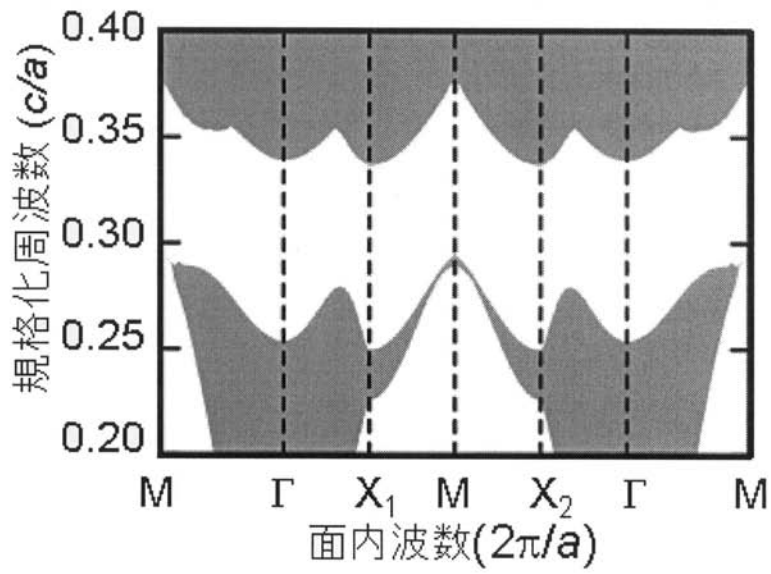


【 図 1 2 】

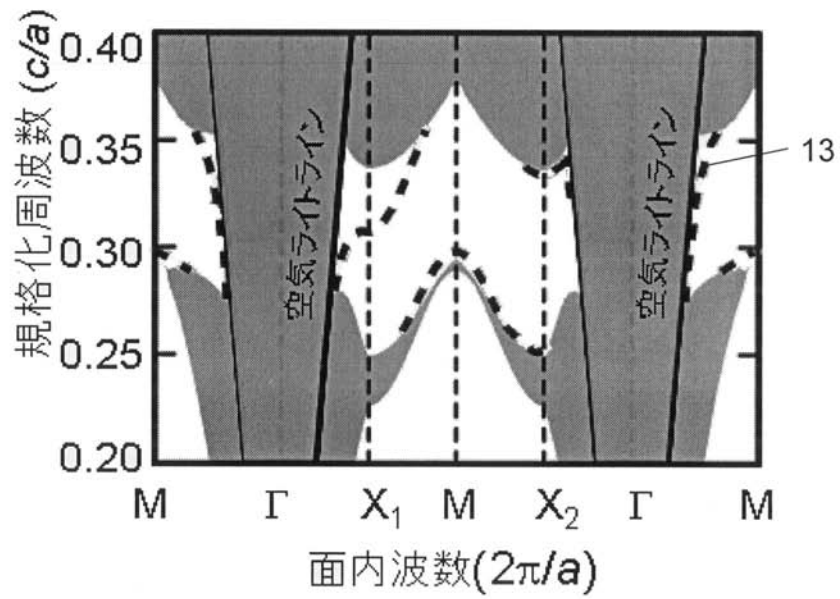


【 図 2 】

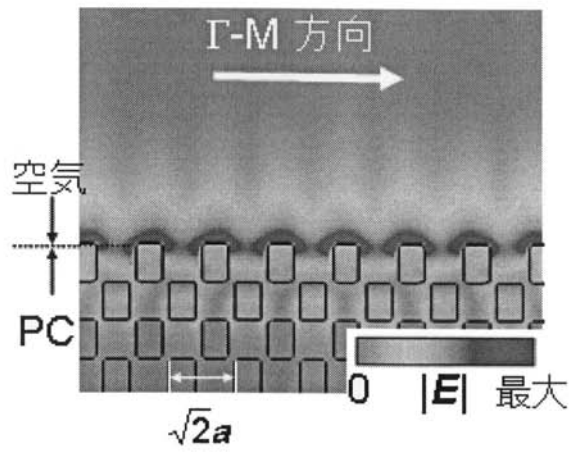
(a)



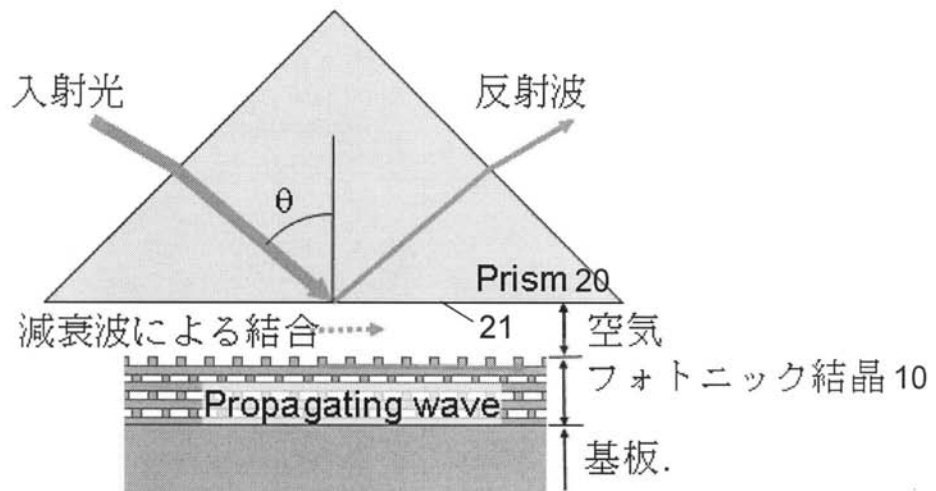
(b)



【 図 3 】

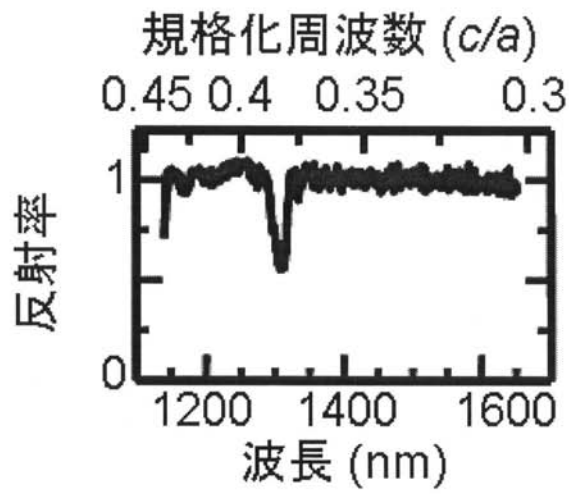


【 図 4 】

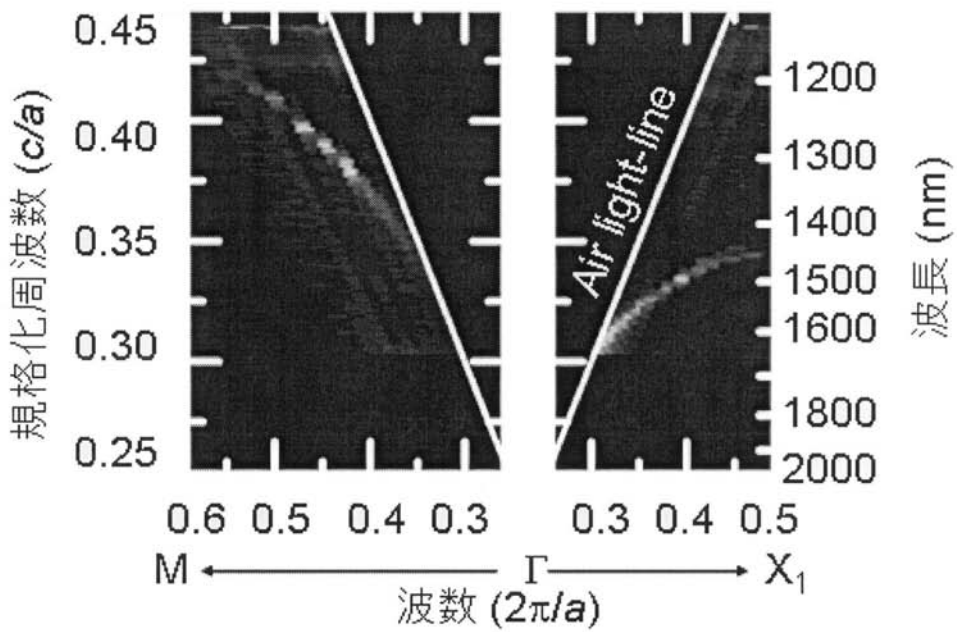


【 図 5 】

(a)

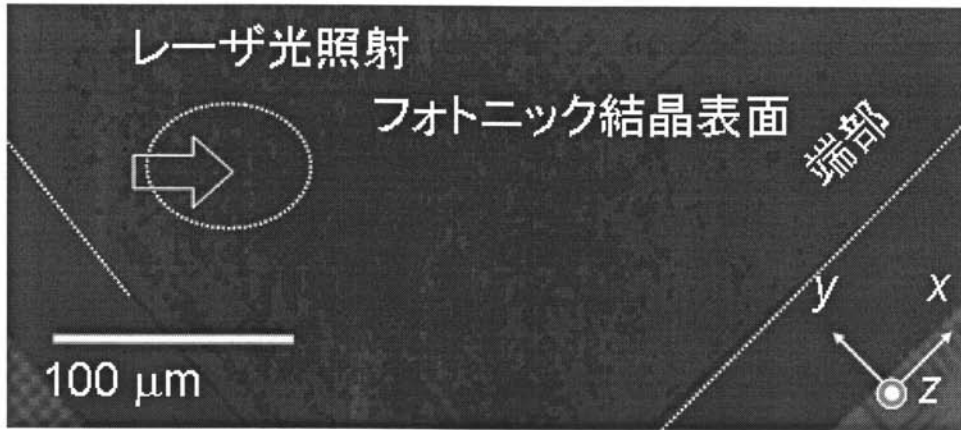


(b)

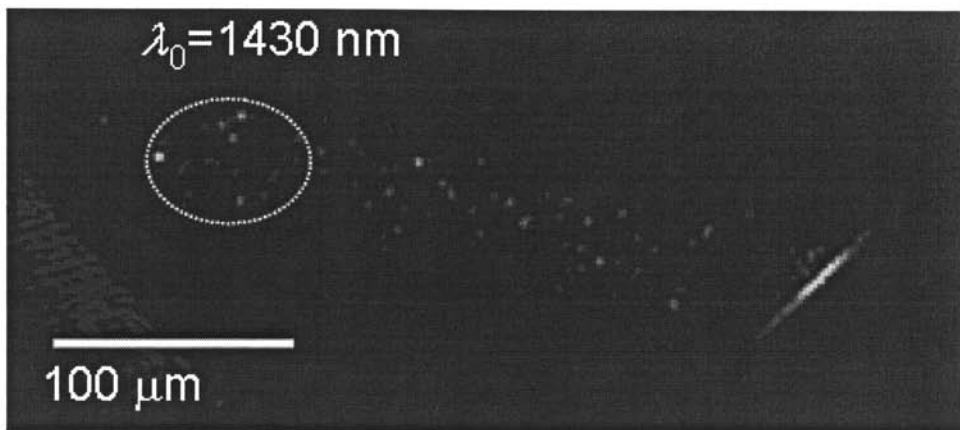


【図6】

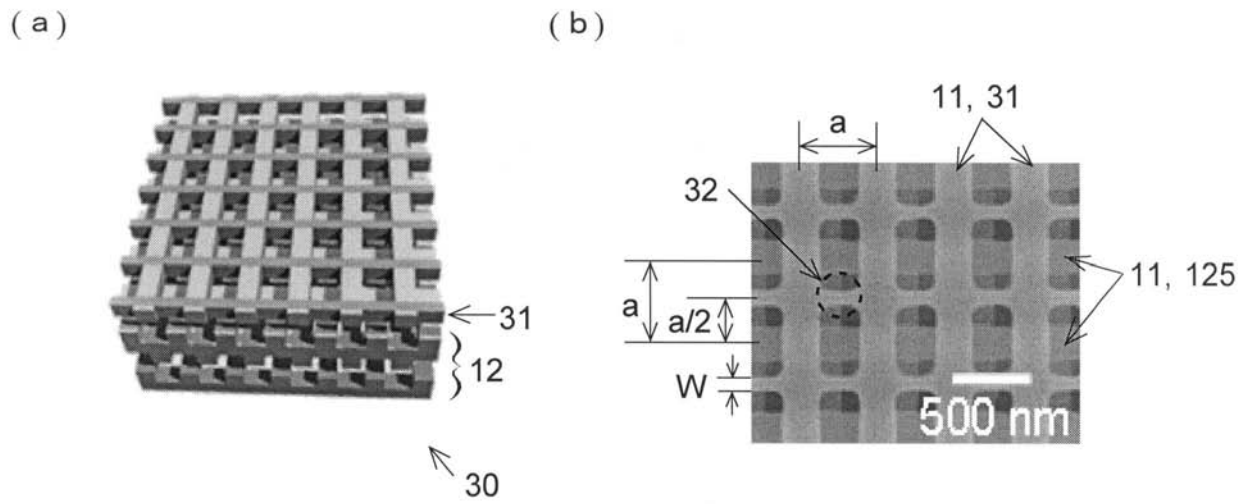
(a)



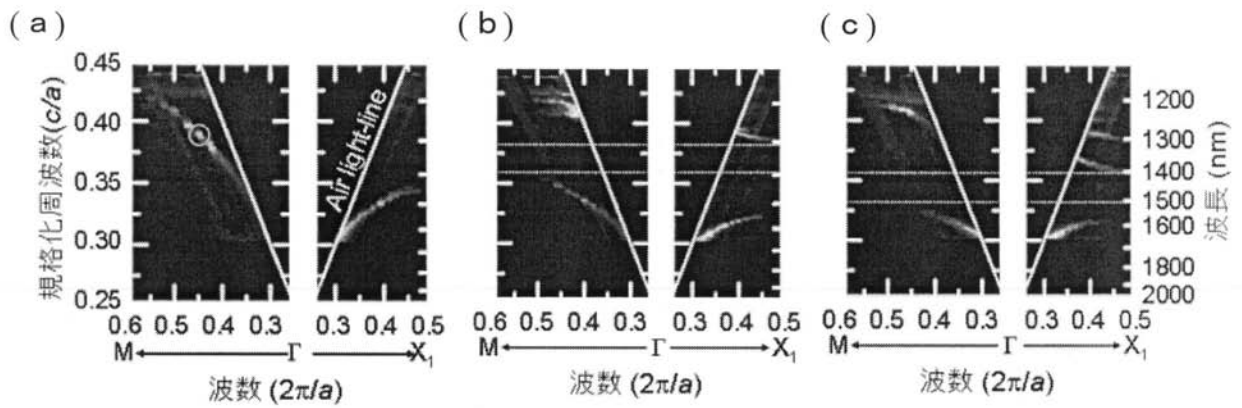
(b)



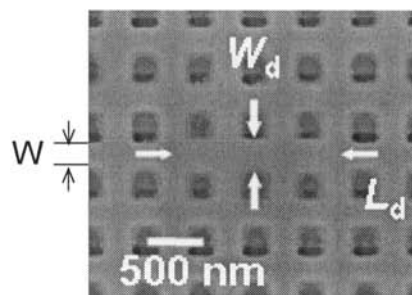
【 図 7 】



【 図 8 】

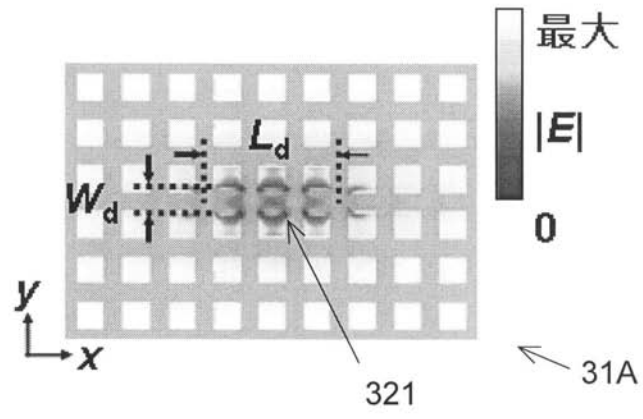


【 図 9 】

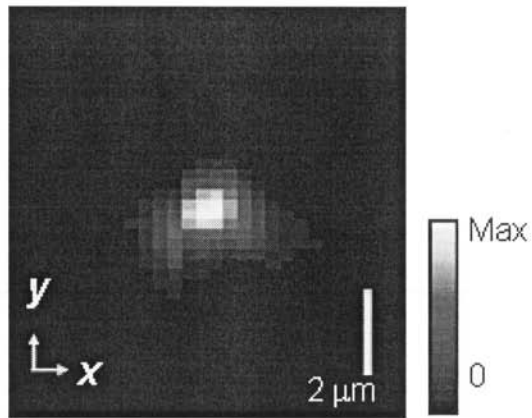


【 図 1 0 】

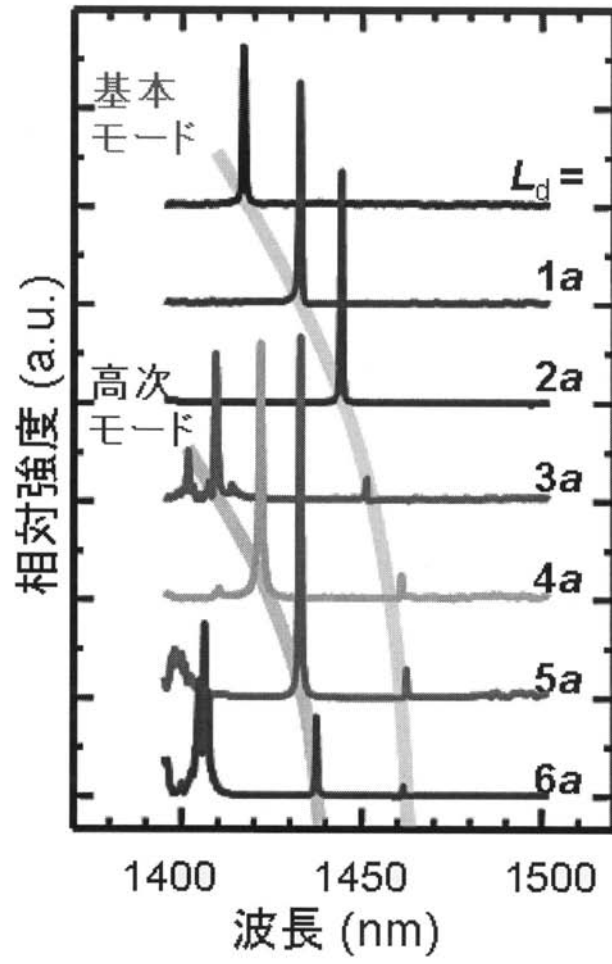
(a)



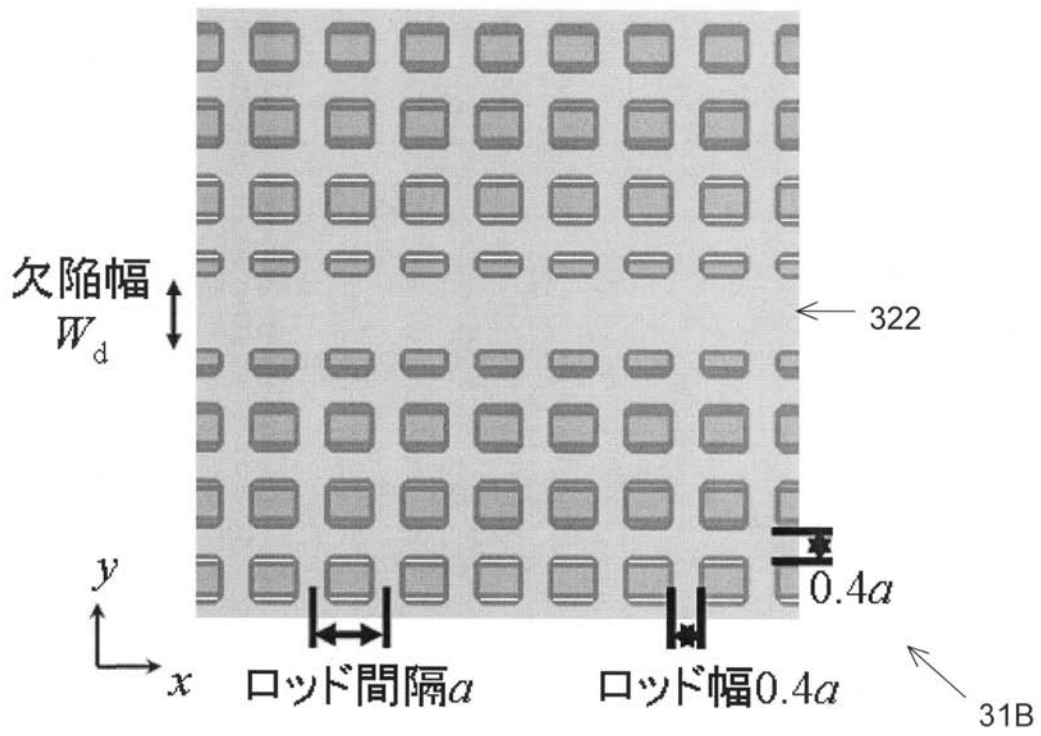
(b)



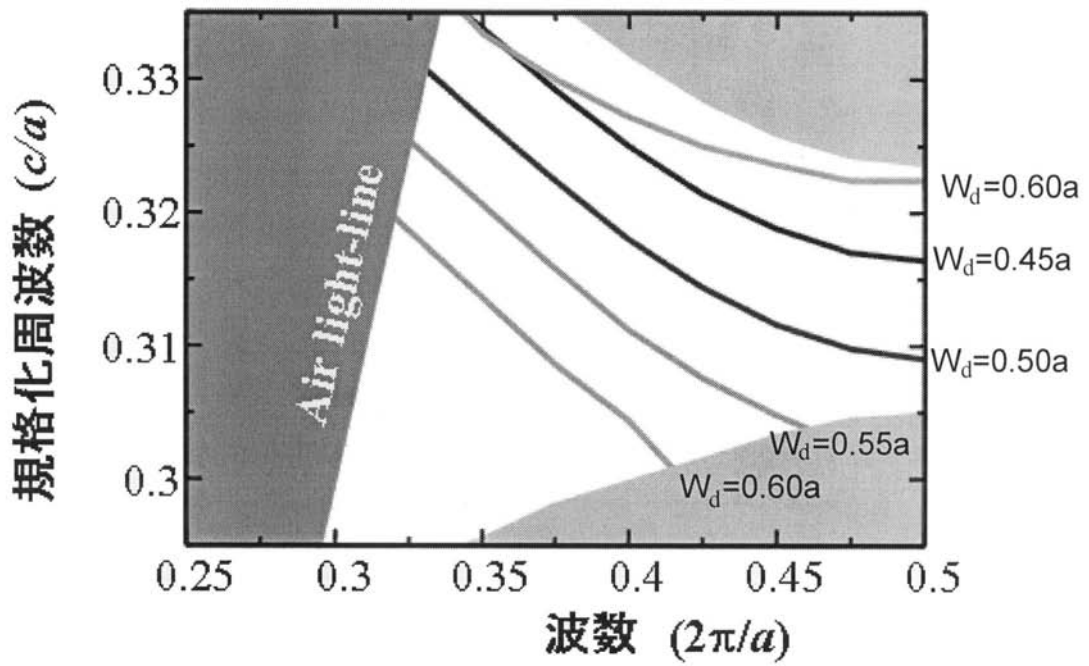
【図 1 1】



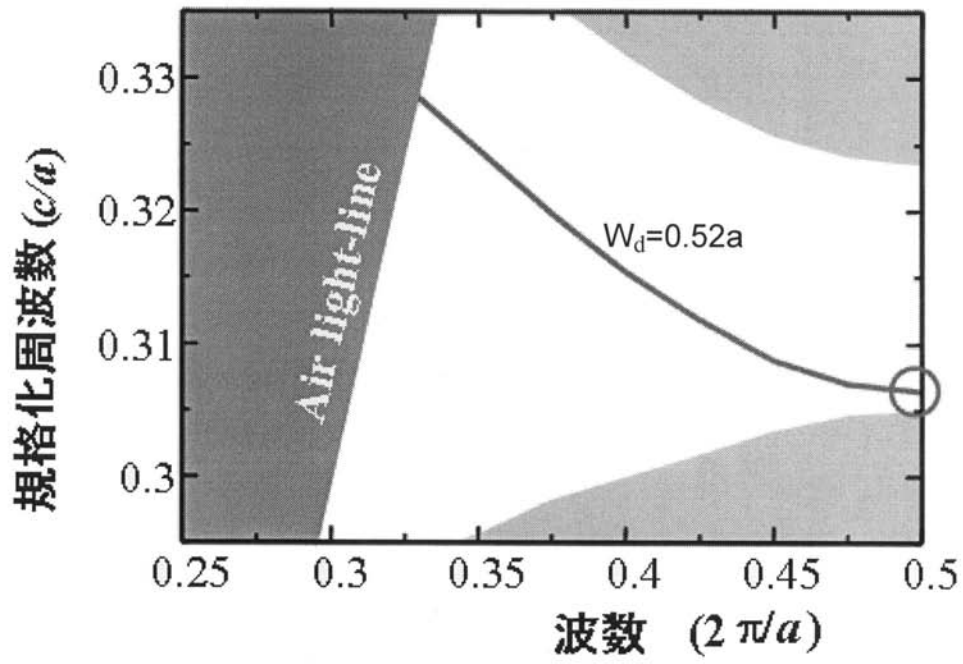
【図13】



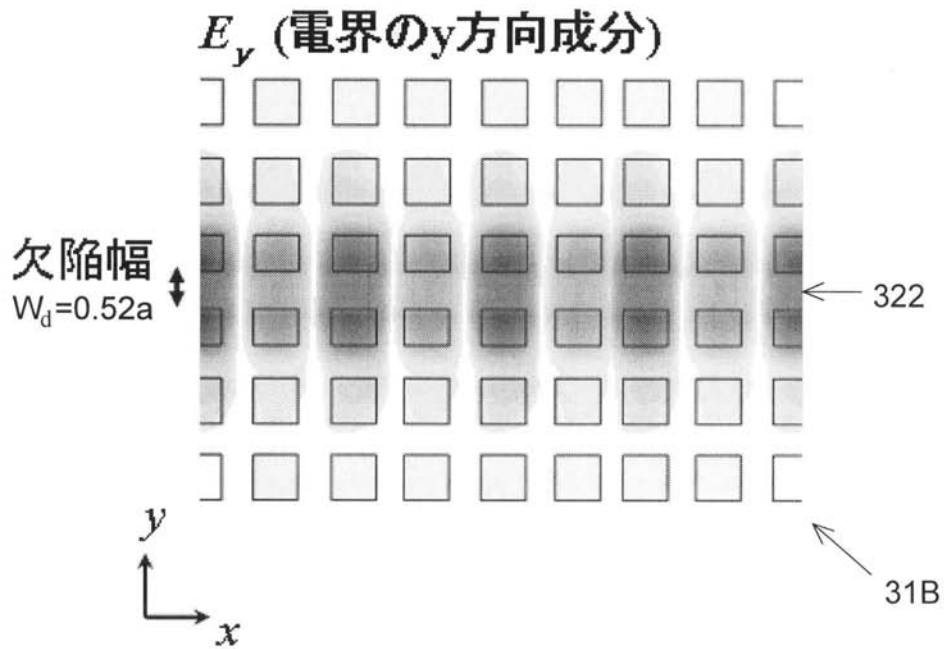
【図14】



【 図 1 5 】



【 図 1 6 】



フロントページの続き

特許法第30条第1項適用申請有り 『Nature, Vol. 460, No. 7253』、平成21年7月16日、Nature Publishing Group、367-370頁〔刊行物等〕 『日経産業新聞』、平成21年7月16日、日本経済新聞社発行、第14面〔刊行物等〕 『日刊工業新聞』、平成21年7月16日、日刊工業新聞社発行、第22面〔刊行物等〕 『京都新聞』、平成21年7月16日、京都新聞社発行、第27面〔刊行物等〕 『科学新聞』、平成21年7月24日、科学新聞社発行、第4面〔刊行物等〕 『朝日新聞』、平成21年7月31日、朝日新聞社発行、第24面〔刊行物等〕 『読売新聞』、平成21年8月3日、読売新聞社発行、第13面〔刊行物等〕 『2009年(平成21年)春季 第56回応用物理学関係連合講演会講演予稿集』、平成21年3月30日、社団法人応用物理学学会発行〔刊行物等〕 『2009年(平成21年)秋季 第70回応用物理学学会学術講演会講演予稿集』、平成21年9月8日、社団法人応用物理学学会発行〔刊行物等〕 平成21年7月16日、<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20090716/index.html>〔刊行物等〕 平成21年7月16日、http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2009/090716_2.htm〔刊行物等〕 平成21年7月16日、http://www.jiji.co.jp/jc/p_archives?rel=j7&id=20090716130446-8232207〔刊行物等〕 平成21年7月15日、<http://www.sciencecentric.com/news/article.php?q=09071535-manipulation-photons-at-crystal-surface>〔刊行物等〕 平成21年7月17日、http://www.infox.ru/science/lab/2009/07/15/2D_PBG_crystal.phtml〔刊行物等〕 平成21年7月28日、<http://nanotechweb.org/cws/article/tech/39924>〔刊行物等〕 平成21年7月30日、<http://optics.org/cws/article/research>