

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6880225号
(P6880225)

(45) 発行日 令和3年6月2日 (2021. 6. 2)

(24) 登録日 令和3年5月7日 (2021. 5. 7)

(51) Int. Cl. F I
H O 2 S 10/30 (2014. 01) H O 2 S 10/30

請求項の数 13 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2019-551419 (P2019-551419)	(73) 特許権者	000006013
(86) (22) 出願日	平成29年10月3日 (2017. 10. 3)		三菱電機株式会社
(65) 公表番号	特表2020-515067 (P2020-515067A)		東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(43) 公表日	令和2年5月21日 (2020. 5. 21)	(74) 代理人	100110423
(86) 国際出願番号	PCT/JP2017/036564		弁理士 曾我 道治
(87) 国際公開番号	W02018/173342	(74) 代理人	100111648
(87) 国際公開日	平成30年9月27日 (2018. 9. 27)		弁理士 梶並 順
審査請求日	令和1年9月17日 (2019. 9. 17)	(74) 代理人	100122437
(31) 優先権主張番号	15/468, 180		弁理士 大宅 一宏
(32) 優先日	平成29年3月24日 (2017. 3. 24)	(74) 代理人	100147566
(33) 優先権主張国・地域又は機関	米国 (US)		弁理士 上田 俊一
		(74) 代理人	100161171
			弁理士 吉田 潤一郎

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 熱光起電力エネルギー変換器及び熱光起電力エネルギー変換器を製造する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

熱光起電力 (T P V) エネルギー変換器であって、
熱を受信することに応答してエネルギーの光子を発生させる熱エミッタと、
前記熱エミッタから或る距離に配置された熱レシーバであって、前記受信した光子を電気エネルギーに変換する光起電力セルを含む、熱レシーバと、
を備え、

前記熱エミッタは、前記熱レシーバに最も近い、前記熱エミッタの表面上に配置された第1の層を含み、前記熱レシーバは、前記熱エミッタに最も近い、前記熱レシーバの表面上に配置された材料の第2の層を含み、前記第2の層の材料は、前記第1の層の材料と同一であり、

前記第1の層及び前記第2の層は前記光起電力セルのバンドギャップを超える表面共鳴周波数を有する、T P Vエネルギー変換器。

【請求項 2】

前記第1の層の前記表面共鳴周波数は前記第2の層の前記表面共鳴周波数と同一である、請求項1に記載のT P Vエネルギー変換器。

【請求項 3】

前記第2の層の深さは、前記第1の層及び前記第2の層の前記表面共鳴周波数の波長より小さい、請求項1に記載のT P Vエネルギー変換器。

【請求項 4】

10

20

前記熱レシーバは、前記熱エミッタの最も遠くの、前記熱レシーバの表面上に配置された第3の層を含み、前記第3の層は前記光起電力セルのバンドギャップを超える表面共鳴周波数を有する、請求項1に記載のTPVエネルギー変換器。

【請求項5】

前記第3の層の材料は前記第2の層の材料と同一である、請求項4に記載のTPVエネルギー変換器。

【請求項6】

前記第3の層の材料は前記第2の層の材料と異なる、請求項4に記載のTPVエネルギー変換器。

【請求項7】

前記熱エミッタは、真空によって前記熱レシーバから分離される、請求項1に記載のTPVエネルギー変換器。

【請求項8】

前記熱エミッタは、
基板と、

前記第1の層を形成するために前記基板上に配置された格子と、
を備える、請求項1に記載のTPVエネルギー変換器。

【請求項9】

前記格子は、台形形状を有する断面を有する複数の等距離構造を含む、請求項8に記載のTPVエネルギー変換器。

【請求項10】

前記格子と前記基板との間に配置された誘電体層を更に備える、請求項8に記載のTPVエネルギー変換器。

【請求項11】

前記熱エミッタの幾何学的パラメータ及び材料は、 $\lambda_g = hc/E_g$ に従って求められる λ_g より短い波長を有する放射を放出するように選択され、ここで、 h はプランクの定数であり、 c は光速であり、 E_g は前記光起電力セルのバンドギャップエネルギーである、請求項1に記載のTPVエネルギー変換器。

【請求項12】

熱エミッタ及び光起電力セルを有する熱レシーバを含む熱光起電力（TPV）エネルギー変換器を製造する方法であって、

前記熱エミッタが到来する熱を放射に変換し、前記光起電力セルのバンドギャップを超える表面共鳴周波数を有するように、前記熱エミッタの材料及び幾何学的パラメータを選択することと、

前記熱エミッタが、前記熱レシーバに最も近い、前記熱エミッタの表面上に配置された第1の層を含み、前記熱レシーバが、第2の層を含み、前記第2の層の材料が前記第1の層の材料と同一であるように、前記光起電力セルのバンドギャップを超える表面共鳴周波数を有する前記第2の層を設計することと、

前記設計された前記第2の層が、前記熱エミッタに最も近い、前記熱レシーバの表面を形成するように、前記熱レシーバから或る距離に配置された前記熱エミッタを有する前記TPVエネルギー変換器を製造することと、
を含む、方法。

【請求項13】

前記設計することは、

前記第2の層の深さの他の値と比べて、受信した光子を電気エネルギーに変換する効率を最大にする前記第2の層の深さの値を選択することを含む、請求項12に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、熱光起電力（TPV：thermophotovoltaic）システムに関し、より具体的に

10

20

30

40

50

は、T P Vシステム内のT P Vエネルギー変換器に関する。

【背景技術】

【0002】

熱光起電力（T P V）エネルギー変換は、熱を、光子を介して電気に変換するプロセスである。基本的なT P Vシステムは、熱エミッタ及び光起電力（P V：photovoltaic）セル（一般的にソーラセルとも呼ばれる）を含むレシーバを含む。エミッタは、熱源によって或る特定の（高い）温度に維持され、P Vセルに光子を放射する。P Vセルは、バンドギャップ E_g によって特徴付けられた半導体である。バンドギャップより大きいエネルギーの、エミッタが放射した光子を吸収すると、価電子帯を占める電子が伝導帯に励起され、電流源になる。

10

【0003】

T P V効率を支配する因子は、熱エミッタによって放出される光子の数及びP Vセルによって吸収される光子の（エネルギー）スペクトルを含む。所与のエミッタ放射スペクトルについて、低エネルギー及び高エネルギーの光子を、電流に完全に変換できない。すなわち、低エネルギー光子は、一方で、伝導電子を発生できないため浪費され、高エネルギー光子は、他方で、熱電子を発生し、熱電子は、（光子を放出することによって）伝導帯の底に達するまでに急速に減衰し、正味の電圧は、最大でも $V_g = E_g / |e|$ である。したがって、理想的なエミッタスペクトルは、出来る限り強いピーク強度を有する、バンドギャップの少し上にピークのある狭い幅のスペクトルである。

20

【0004】

T P V効率を改善するために、熱エミッタは、光起電力セルのバンドギャップのエネルギーより高いエネルギーを有する光子を放出しなければならない。特許文献1を含む過去の研究は、熱を、T P Vシステムに対して調整された表面共鳴周波数を有する放射に変換する熱エミッタの設計に的を絞っている。例えば、近方場ベースT P Vシステムの場合、エミッタは、空間的に局在化される少数の（少なくとも1つの）共鳴モードをサポートし、エミッタとP Vセルとの間の分離は、共鳴モードによって規定される波長より遥かに短い。達成される場合、吸収される放射スペクトルは、共鳴エネルギーにピークがあり、黒体限界より数桁高いピーク強度を有する。

【0005】

概して、P Vセルによって吸収される光子（そのエネルギーは E_g より大きい）の数を増加させることは、P Vセルによって生成される出力電力を増大させる。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】米国特許第15／347,961号

【発明の概要】

【0007】

熱光起電力（T P V）システムのP Vセルによって吸収される光子（そのエネルギーは E_g より大きい）の数を増加させ、それにより、T P Vシステムの効率を増加させること、及び／又は、P Vセルが発生できる電力を増加させることが幾つかの実施形態の目的である。幾つかの実施形態は、熱エミッタとP Vセルとの間の分離を減少させることによって、光子の反射を低減できる、すなわち、分離が小さければ小さいほど、エミッタからより多くの光子をP Vセルが吸収できるという理解に基づく。しかしながら、エミッタとP Vセルとは異なる温度に維持されるので、熱エミッタは、P Vセルから十分に分離される必要がある。換言すれば、エミッタとP Vセルとの間の距離は無制限に減少させることはできない。

40

【0008】

幾つかの実施形態は、P Vセルにおける光子の吸収を、熱エミッタとP Vセルを含む熱レシーバとの間の「インピーダンス整合（impedance matching）」によって増加できるという理解に基づく。例えば、電気インピーダンスは、電圧が印加されると回路が電流に対

50

して呈する抵抗の尺度である。電子工学において、インピーダンス整合は、信号源からの電力伝達を最大にするように、又は、負荷からの信号反射を最小にするように、電気負荷の入力インピーダンス及び／又はその対応する信号源の出力インピーダンスを設計する慣行である。同じ原理は放射エネルギー伝達のためのインピーダンス整合に当てはまる。この場合、インピーダンス整合は、材料の表面共鳴の関数であり、その関数は、ひいては、材料の角周波数及び減衰係数又は帯域幅等の材料の誘電体特性の関数である。

【0009】

幾つかの実施形態は、P Vセルが熱エミッタの材料と異なる材料を有し、そのことが不十分なインピーダンス整合をもたらすという認識に基づく。そのため、幾つかの実施形態は、熱エミッタの特性と同様の又は厳密に同じ特性の表面層をP Vセルの上部に付加して、熱エミッタとレシーバとの間のインピーダンスを整合させる。

10

【0010】

特筆すべきことに、表面層を付加することは、従来の見識に反する。この従来の見識とはすなわち、表面層を付加することはエミッタとP Vセルとの間の距離を増加させ、表面層はP Vセルによって吸収することができたはずの光子を吸収するおそれがある、というものである。しかしながら、インピーダンス整合はこれらの欠点を過剰補償する。その表面共鳴がエミッタの表面共鳴に近い薄い前材料（理想的にはエミッタと同じ材料）を設置することによって、吸収体によって吸収される光子の数が増大される。この増大は、上記で述べた欠点を上回る。

20

【0011】

したがって、1つの実施形態は、熱光起電力（TPV）エネルギー変換器であって、熱を受信することに応答してエネルギーの光子を発生させる熱エミッタと、熱エミッタから或る距離に配置された熱レシーバであって、受信した光子を電気エネルギーに変換する光起電力セルを含む、熱レシーバとを備え、熱エミッタは、熱レシーバに最も近い、熱エミッタの表面上に配置された第1の層を含み、熱レシーバは、熱エミッタに最も近い、熱レシーバの表面上に配置された第2の層を含み、第2の層の材料は第1の層の材料と同一であり、第1の層及び第2の層は光起電力セルのバンドギャップを超える表面共鳴周波数を有する、TPVエネルギー変換器を開示する。

【0012】

別の実施形態は、熱エミッタ及び光起電力セルを有する熱レシーバを含む熱光起電力（TPV）エネルギー変換器を製造する方法を開示する。本方法は、熱エミッタが到来する熱を放射に変換し、光起電力セルのバンドギャップを超える表面共鳴周波数を有するように、熱エミッタの材料及び幾何学的パラメータを選択することと、表面層の表面共鳴周波数が光起電力セルのバンドギャップを超えるように、熱レシーバの表面層を設計することと、設計された表面層が、熱エミッタに最も近い、熱レシーバの表面を形成するように、熱レシーバから或る距離に配置された熱エミッタを有するTPVエネルギー変換器を製造することを含む。

30

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】幾つかの実施形態によるTPVシステムの概略図である。

40

【図2】TPV用途のために調整された熱エミッタの最適エミッタンス曲線のプロットである。

【図3】1つの実施形態による熱エミッタの概略図である。

【図4】別の実施形態による誘電体層を含む熱エミッタの概略図である。

【図5】光子の吸収が表面共鳴周波数に依存することを示すグラフである。

【図6A】1つの実施形態による熱エミッタを製造する方法のブロック図である。

【図6B】1つの実施形態による図6Aの熱エミッタを含むTPVシステムを形成するために熱レシーバ及び／又は熱レシーバの表面層を製造する方法のブロック図である。

【図7A】1つの実施形態による対称TPV変換器の概略図である。

【図7B】幾つかの実施形態によって決定される表面層の厚さ又は深さの異なる値につい

50

ての、図7AのTPV変換器のPVセルによって吸収される放射電力スペクトルを示す図である。

【図8】別の実施形態によるTPV変換器の概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

熱光起電力(TPV)エネルギー変換は、熱から電気への変換を伴い、1960年代以降、有望な技術として特定されている。例示的なTPVシステムは熱エミッタ及び熱レシーバを含む。熱エミッタは、通常、(すなわち、通常、約1200°Kから約1500°Kの範囲内の)高温に加熱されると熱放出を発生させる、固体材料のピース又は特別設計された構造である。熱放出は、熱エミッタ材料内の電荷の熱運動による光子の自発放射(放出)である。通常のTPVシステム動作温度の場合、放射される光子の大部分は、近赤外周波数及び赤外周波数にある。熱レシーバは、これらの放射された光子の一部を吸収するために位置決めされた光起電力(PV)セルを含み、ソーラセルに通常関連する方法で、吸収される光子を自由電荷キャリア(すなわち、電気)に変換するように構築される。熱エミッタは、外部源から(例えば、集中化された太陽光又は他の熱発生器によって)加熱される固体構造とすることができる。

【0015】

図1は、幾つかの実施形態によるTPVシステムの概略図を示す。TPVシステムは、熱源115と、熱源115からの熱を放射に変換する熱エミッタ110と、放射を電気に変換する、熱エミッタ110から或る距離125に配置された光起電力セル120を含む。熱源115の例は、太陽、及び、燃焼、原子力、並びに他のエネルギー源からの放射を含む。

【0016】

TPVの動作は、光起電力(PV)原理に基づくが、直接放射エネルギーは、高温(1000K~2000K)エミッタからのものである。そのため、幾つかの実施形態は、エミッタ材料として、タングステン等の耐熱金属を使用する。例えば、PVシステムにおいて、ソーラセルは、太陽からの放射エネルギーを直接受信する。エミッタとTPVセルとの間の距離125は、約 μm から cm であり、一方、PVシステムにおいて、ソーラセルは、太陽から数百万マイル離れている。そのため、TPVにおけるエミッタからの放射強度は、エミッタとTPVセルとの間の距離が近いために、PVシステムにおける太陽からの放射強度より遥かに高いが、エミッタ温度は、太陽温度より遥かに低い。同様に、PVシステムは、太陽放射の一部を使用することができるだけであり、ソーラセルのバンドギャップより高いエネルギーを有する光子のみを、電子-正孔対に変換でき、他の低エネルギー光子は役立たない。しかしながら、TPV内の適切なスペクトル制御システムを用いる場合、半導体バンドギャップ未満のエネルギーを有する光子を、エミッタに戻るように反射し、再利用できる。そのため、適切なスペクトル制御を用いる場合、TPVシステムの潜在的効率はPVシステムより遥かに高い。

【0017】

特に、TPVエミッタが理想的な黒体エミッタである場合、かなりの量の放出電力が浪費される。その理由は、PVセルのバンドギャップ(対応する波長 $\lambda_g = hc/E_g$ を有する E_g 、ここで、 h はプランクの定数であり、 c は光速である)未満のエネルギーを有する光子が、電子-正孔対を発生できないからである。したがって、幾つかの実施形態において、熱エミッタ110は、出来る限りPVセルバンドギャップより高いエネルギーを有する光子を放出し、出来る限りPVセルバンドギャップより低いエネルギーを有する光子を放出しないように設計される。

【0018】

しかしながら、そのバンドギャップ E_g より高い適切なエネルギーを有する光子がPVセル120に当たると、光子の一部は後方に反射し、光子の一部のみがPVセルによって吸収されて、電子及び正孔を発生させる。幾つかの実施形態において、熱エミッタは、真空によって熱レシーバから分離される。さらに又は代替的に、熱エミッタと熱レシーバと

の間の距離 125 はナノメートル (nm) のオーダーである。

【0019】

PVセルによって吸収される光子は、熱エミッタとPVセルとの間の分離125を減少させることによって増大する可能性がある、すなわち、分離が小さければ小さいほど、エミッタからより多くの光子をPVセルが吸収できる。しかしながら、熱エミッタは、エミッタとPVセルとを異なる温度に固定できるように、PVセルから十分に分離される必要がある。すなわち、エミッタとPVセルとの間の距離は無制限に減少させることはできない。

【0020】

幾つかの実施形態は、PVセルにおける光子の吸収を、熱エミッタ110とPVセル120を含む熱レシーバ150との間の「インピーダンス整合」160によって増加できるという理解に基づく。例えば、電気インピーダンスは、電圧が印加されると回路が電流に対して呈する抵抗の尺度である。電子工学において、インピーダンス整合は、信号源からの電力伝達を最大にするように、又は、負荷からの信号反射を最小にするように、電気負荷の入力インピーダンス及び／又はその対応する信号源の出力インピーダンスを設計する慣行である。このインピーダンス整合の概念は、放射エネルギー伝達のためのインピーダンス整合にも当てはまる。この場合、インピーダンス整合は、材料の表面共鳴の関数であり、その関数は、ひいては、材料の角周波数及び減衰係数又は帯域幅等の材料の誘電体特性の関数である。

【0021】

幾つかの実施形態は、PVセルが熱エミッタの材料と異なる材料を有し、そのことが不十分なインピーダンス整合をもたらすという認識に基づく。これは、PVセルの材料及び熱エミッタの材料が異なる目的で設計されるためである。そのため、幾つかの実施形態は、熱エミッタの特性と同様の又は厳密に同じ特性を有する表面層140をPVセルに付加して、熱エミッタ110とレシーバ150との間のインピーダンスを整合させる。

【0022】

特筆すべきことに、表面層を付加することは、従来の見識に反する。この従来の見識とはすなわち、表面層を付加することはエミッタとPVセルとの間の距離130を増加させ、表面層はPVセルによって吸収することができたはずの光子を吸収するおそれがある、というものである。しかしながら、インピーダンス整合はこれらの欠点を過剰補償する。その表面共鳴がエミッタの表面共鳴に近い薄い前材料（理想的にはエミッタと同じ材料）を設置することによって、吸収体によって吸収される光子の数が増大される。この増大は、上記で述べた欠点を上回る。

【0023】

そのため、幾つかの実施形態において、TPVエネルギー変換器100は、エネルギーの光子を発生させる熱エミッタ110及び熱エミッタから或る距離に配置された熱レシーバ150を含む。熱レシーバは、受信した光子を電気エネルギーに変換する光起電力セル120を含む。熱エミッタは、熱レシーバに最も近い、熱エミッタ110の表面上に配置された第1の層を含む。幾つかの実装態様において、熱エミッタはモノリシック構造であり、第1の層は熱エミッタ110全体によって形成される。代替の実施形態において、熱エミッタは層状構造であり、第1の層は熱レシーバ150に最も近い層である。

【0024】

熱レシーバ150は、熱エミッタに最も近い、熱レシーバの表面上に配置された第2の層140を含む。そのため、第2の層は、本明細書で、表面層又は熱レシーバの表面層とも呼ばれる。第2の層は、熱エミッタと熱レシーバとの間のインピーダンス整合160を提供するために設計される。そのため、第1の層及び第2の層は共に、光起電力セルのバンドギャップを超える表面共鳴周波数を有する。

【0025】

図2は、TPV用途のために調整された熱エミッタの最適エミッタンス曲線250のプロットを示す。最適エミッタンス曲線250は、 λ_g より短い波長の場合に少なくとも理

10

20

30

40

50

想的に1に等しいスペクトルを有する高エミッタンスゾーン251と、 λ_g より長い波長の場合に少なくとも理想的に0に等しいスペクトルを有する低エミッタンスゾーン252とを有する、ステップ関数に従う。そのため、幾つかの実施形態において、熱エミッタの構造及び材料は、曲線250を近似するように選択され、第2の層140の構造及び材料は、インピーダンスを熱エミッタと整合させるように選択される。

【0026】

図3は、一実施形態による熱エミッタ300の概略図を示す。熱エミッタ300は、基板310及び基板上に配置された格子320を含む。格子320は、複数の等距離構造325を含む。この例において、構造325の断面は台形形状を有し、例えば、格子320の等距離構造325は、三角形プロファイルの溝326によって分離される。代替の実施形態において、格子の異なるプロファイルが使用される。

10

【0027】

幾つかの実施形態は、空洞共鳴(cavity resonances)、伝播型表面プラズモンポラリトン(propagating surface plasmon polaritons)、及び局在化表面プラズモン共鳴(LSPR: localized surface plasmon resonances)を含む幾つかの物理的メカニズムによって、格子が平坦タングステン表面と比較して放出を大幅に増大できるという認識に基づく。LSPRを、垂直と水平との両方の金属-誘電体境界において励起することができ、共鳴周波数を、幾何学的設計を介して調整することができる。さらに、LSPRをサポートするナノ構造を、サブ波長であるように作ることができ、したがって、より多くの共鳴が同じエリア内で励起され、より強い吸収効果を生成することができる。

20

【0028】

熱エミッタ300において、第1の層は、格子320によって及び／又は基板310と格子320との組合せによって(こうした組合せがモノリシックである場合)形成される。代替の実施形態において、熱エミッタの他の層状構造が使用される。

【0029】

図4は、熱エミッタの格子420と基板410との間に配置された誘電体層430を含む別の実施形態による熱エミッタの概略図を示す。例えば、誘電体層430は SiO_2 (二酸化ケイ素)を含むことができる。誘電体層430は更なる励起共鳴モードをサポートし、それにより、放出されるスペクトルの高エミッタンスゾーンの長さを増加させる。この実施形態において、第1の層は格子440によって形成される層である。

30

【0030】

図5は、光子の吸収が熱エミッタ及び／又は熱レーザの材料の表面共鳴周波数に依存することを示すグラフ500を示す。幾つかの実施形態は、マクスウェルの方程式及び量子力学から、 ω_1 、 γ_1 、及び ω_2 、 γ_2 (ω は共鳴エネルギーであり、 γ は対応する減衰レートである)によってそれぞれ特徴付けられる表面共鳴をサポートする2つの材料について、材料の間のエネルギー伝達、すなわち光子の吸収が、 $\omega_1 = \omega_2$ 及び $\gamma_1 = \gamma_2$ であるときに増加するという認識に基づく。

【0031】

そのため、幾つかの実施形態において、第1の層の表面共鳴周波数は第2の層の表面共鳴周波数と同一である。例えば、この実施形態の1つの実装において、第1の層の材料は、インピーダンス整合を簡略化するために第2の層の材料と同一である。しかしながら、代替の実施形態において、この要件は、TPV変換器の設計を簡略化するために緩和される。これらの実施形態において、第1の層及び第2の層の表面共鳴周波数は互いに近いが、厳密に同じでない。

40

【0032】

例えば、1つの実施形態において、第1の層の表面共鳴周波数の帯域幅は第2の層の表面共鳴周波数の帯域幅に交差する。例えば、第1の層の表面共鳴周波数と第2の層の表面共鳴周波数との差は閾値より小さい。例えば、閾値を、第1の層の材料及び第2の層の材料の一方又は組合せの減衰係数の関数として規定することができる。

【0033】

50

図6Aは、1つの実施形態による、熱エミッタ及び光起電力セルを含むTPVシステムを形成するために熱エミッタを製造する方法のブロック図を示す。本方法は、熱エミッタの材料615を選択する(610)。材料615の例は、その熱抵抗によってタングステンを含む。

【0034】

本方法は、熱エミッタの幾何学的パラメータ及び材料が、 $\lambda_g = hc/E_g$ に従って求められる λ_g より短い波長を有する放射を放出するよう選択されるように、光起電力セルのバンドギャップ635の関数に基づく台形状の幾何学的パラメータ625を選択する(620)。ここで、 h はプランクの定数であり、 c は光速であり、 E_g は光起電力セルのバンドギャップ未満のエネルギーである。次に、熱エミッタは、基板と、幾何学的パラメータによって台形状を形成する非長方形断面を有する形状を有する複数の等距離構造を含む格子とを含むように、材料615を使用して製造される(630)。

10

【0035】

異なる実施形態において、図6Aの方法の計算は、プロセッサを使用して実施される。例えば、プロセッサを、エミッタンス曲線をプロットするために及び／又は熱エミッタの性能をシミュレートするために使用できる。製造すること(630)を、例えば、薄い誘電体層を基板の上部に堆積させること、及び、最初に薄いフィルムを堆積させ、次に、格子パターンを形成するフォトリソグラフィ及びエッチングステップを経ることにより格子層を作製することによって実施できる。

【0036】

20

図6Bは、1つの実施形態による、図6Aの熱エミッタを含むTPVシステムを形成するために、熱レシーバ及び／又は熱レシーバの表面層を製造する(660)方法のブロック図を示す。実施形態は、熱エミッタ110の材料615及び／又は幾何学的パラメータ625に基づいて熱レシーバの表面層の材料を選択して、熱エミッタの表面層の表面共鳴周波数と同様の表面共鳴周波数を有する表面層を設計する。

【0037】

例えば、実施形態は、材料615と同一の材料645を選択し(640)、熱レシーバの設計のために最適化された熱エミッタの表面層の厚さ655を決定して(650)、光子の吸収を増加させ、エネルギー伝達を改善することができる。例えば、1つの実施形態において、熱レシーバの第2の層の深さは、熱エミッタの第1の層及び／又は熱レシーバの第2の層の表面共鳴周波数の波長より小さい。製造すること(660)を、製造すること(630)と同様の方法で実施できる。1つの実施形態において、TPV変換器は1つのデバイスとして同時に製造される。

30

【0038】

TPV変換器の例示的な設計パラメータ

幾つかの実施形態は、層状構成で配置された材料について、材料の間の放射熱伝達を、ダイアディックグリーン関数(dyadic Green)及び揺動散逸定理(fluctuation-dissipation theorem)に従うランダム電流源を使用して計算できるという認識に基づく。平面内モメンタム K ($x-y$ 平面を規定する)が良好な量子数である平面構造の場合、関数 z として平面に垂直なポインティングベクトル(Poynting vector)は、形態

40

【数1】

$$S_z(z) = \int_0^\infty \frac{d\omega}{2\pi} \hbar \omega [\Theta_i(\omega) - \Theta_j(\omega)] \frac{A}{(2\pi)^2} \int d^2K \varepsilon(\omega, \mathbf{K}; z)$$

$$\frac{S_z}{A} = \int_0^\infty \frac{d\omega}{2\pi} \hbar \omega [\Theta_i(\omega) - \Theta_j(\omega)] \frac{(2\pi)}{(2\pi)^2} \int k dk \varepsilon(\omega, k; z) \quad (1)$$

を有する。

【0039】

ここで、

50

【数 2】

$$\Theta_i(\omega) = \left[e^{\hbar\omega/(k_B T_i)} - 1 \right]^{-1}$$

はプランク分布であり、 A はエミッタの表面積であり、 k_B はボルツマン定数であり、 $k = |K|$ であり、 $\varepsilon(\omega, k; z)$ は空間構成によって決定される無次元関数である。幾つかの実施形態は、TPV変換器の有効性を設計し試験するために、式(1)を厳密に計算する。

【0040】

例えば、1つの実施形態は、その誘電関数を、

【数 3】

$$\varepsilon_L(\omega) = \varepsilon_\infty \frac{\omega^2 - \omega_{LO}^2 + i\gamma\omega}{\omega^2 - \omega_{TO}^2 + i\gamma\omega}$$

10

としてBN(窒化ホウ素)に対応するローレンツ発振器モデルによって記述できるエミッタを考慮する。ここで、 $\varepsilon_\infty = 4.46$ である。 ω_{LO} 及び ω_{TO} は縦光学モード及び横光学モードの周波数である。全ての周波数は、

【数 4】

$$\omega_{LO} = \bar{\omega}_{LO} \equiv 0.1616 \text{ eV}$$

20

において測定され、ここで、

【数 5】

$$\omega_{TO}/\bar{\omega}_{LO} = 0.81, \gamma/\bar{\omega}_{LO} = 0.0041, \bar{k}_{LO} = \bar{\omega}_{LO}/c$$

である。PVセルについて、誘電関数は直接価電子帯－伝導帯バンド間遷移(valence-to-conduction interband transition)によって支配される。

【0041】

エミッタと吸収体との間の放射エネルギー伝達は、TPVシステムの共通共鳴モードに対するそれらの結合に起因する。エミッタ／真空サブシステムのみが共鳴モードを維持する場合、設計原理は、吸収体に対する減衰レートに出来る限り近い、エミッタに対する減衰レートをシステム共鳴に持たせることである。この「インピーダンス整合」条件は放射エネルギー伝達を最大にする。減衰レートが、損失に関連し、制御するのがより難しいため、幾つかの実施形態は、単一共鳴のシステムを最適化することを考慮しない。エミッタ／真空と真空／吸収体との両方のサブシステムがそれらのそれぞれの共鳴モードを維持する場合(そのため、全体システムの2つの共鳴モードが存在する)、最大放射伝達は、これらの2つのサブシステムの実数部複素固有エネルギー(real part complex eigenenergies)が、考えられる最大K範囲について値が近いときに起こり、それは、設計原理として役立つ。対称エミッタ真空－エミッタ構成はこの基準を満たす。

30

【0042】

図7Aは、1つの実施形態による対称TPV変換器の概略図を示す。熱エミッタ110の層の材料は、熱レシーバの表面層720の材料と同一である。層720は、真空によって熱エミッタ110から分離され、等しい距離725、例えば10nmに配置される。そのため、図7AのTPV変換器を、エミッタ真空(10nm)－前材料－PV構成と呼ぶことができる。

40

【0043】

図7Bは、幾つかの実施形態によって決定される層720の厚さ又は深さ710の異なる値についての、図7AのTPV変換器のPVセルによって吸収される放射電力スペクトル730を示す。例えば、プロット740は層720の4nmの深さに対応し、一方、プロット750は5nmの深さに対応する。前材料はエミッタと同じに選択され、PV吸収電力が最大になる約4nmの最適厚さが存在する。そのため、幾つかの実施形態は、熱エ

50

ミッタの表面層の深さの異なる値についてT P Vシステムの効率を試験し、表面層の深さの他の値と比べて、受信した光子を電気エネルギーに変換する効率を最大にする表面層の深さの値を選択する。

【0044】

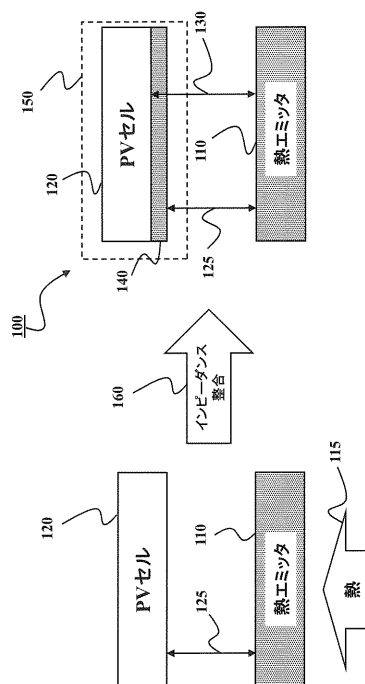
図8は、別の実施形態によるT P V変換器の概略図を示す。この実施形態において、T P V変換器800のレシーバは、表面層810と背面層820との両方を含む。背面層820の材料は、表面層810の材料と同じ又は異なることができる。背面層820は、T P V変換器のエネルギー効率を更に改善できる。

【0045】

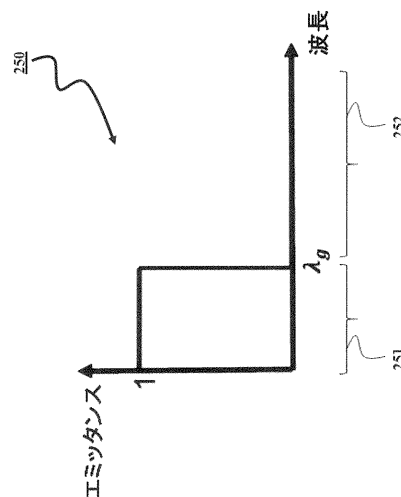
本発明の上記で説明した実施形態は、多数の方法のうちの任意のもので実施することができる。例えば、実施形態は、ハードウェア、ソフトウェア又はそれらの組み合わせを用いて実施することができる。ソフトウェアで実施される場合、ソフトウェアコードは、単一のコンピュータに設けられるのか又は複数のコンピュータ間に分散されるのかにかかわらず、任意の適したプロセッサ又はプロセッサの集合体において実行することができる。そのようなプロセッサは、1つ以上のプロセッサを集積回路部品に有する集積回路として実装することができる。ただし、プロセッサは、任意の適したフォーマットの回路類を用いて実装することができる。

10

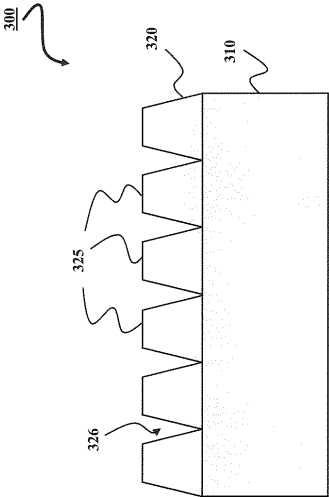
【図1】



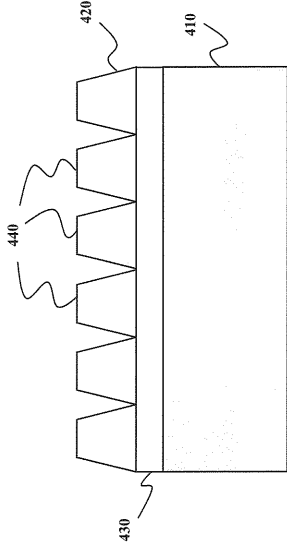
【図2】



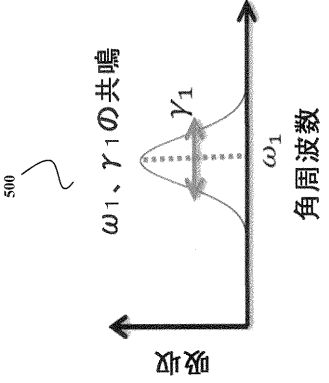
【図 3】



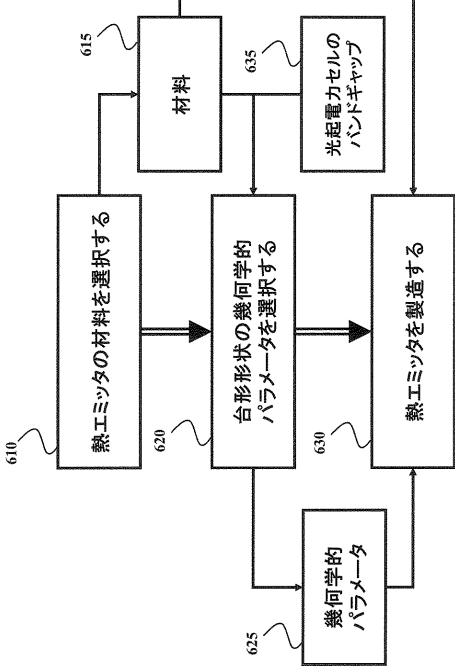
【図 4】



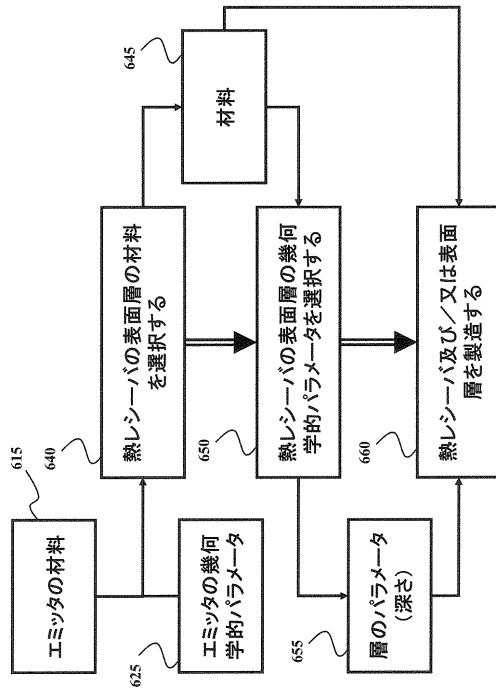
【図 5】



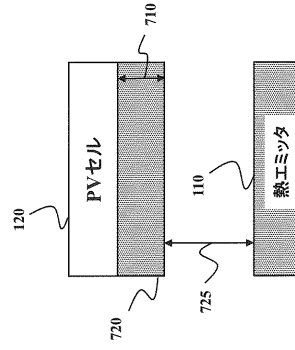
【図 6 A】



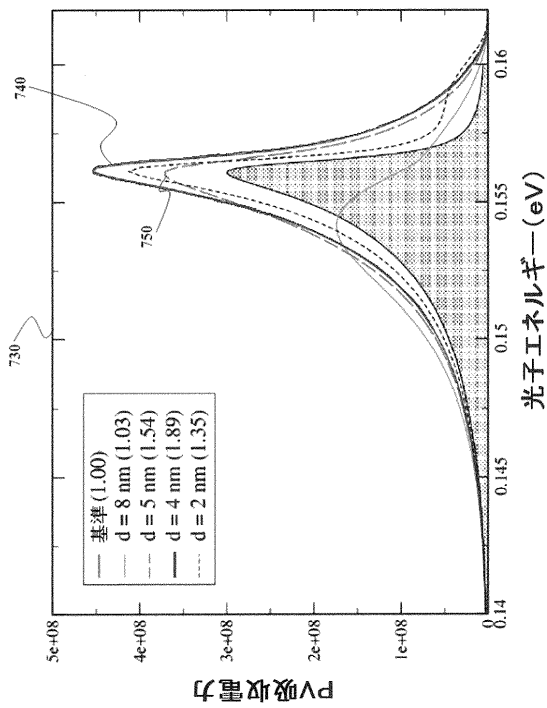
【図 6 B】



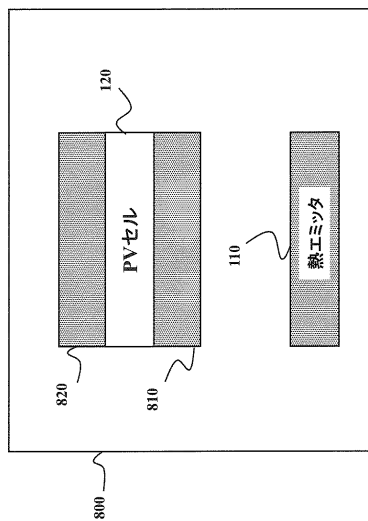
【図 7 A】



【図 7 B】



【図 8】



フロントページの続き

- (72)発明者 リン、チャンウェイ
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミツ
ビシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド
- (72)発明者 ワン、ピンナン
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミツ
ビシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド
- (72)発明者 テオ、クーン・フー
アメリカ合衆国、マサチューセッツ州、ケンブリッジ、ブロードウェイ 201、ケアオブ・ミツ
ビシ・エレクトリック・リサーチ・ラボラトリーズ・インコーポレイテッド

審査官 佐竹 政彦

- (56)参考文献 特開2018-143025 (JP, A)
特表2013-521673 (JP, A)
米国特許出願公開第2010/0031990 (US, A1)
米国特許出願公開第2011/0284059 (US, A1)
米国特許第07508110 (US, B2)
- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02S 10/30
IEEE Xplore
Google Scholar