(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2022年12月15日(15.12.2022)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2022/260109 A1

(51) 国際特許分類:
H02S 10/30 (2014.01)　*C01B 32/168* (2017.01)

(21) 国際出願番号：　PCT/JP2022/023198

(22) 国際出願日：　2022年6月8日(08.06.2022)

(25) 国際出願の言語：　日本語

(26) 国際公開の言語：　日本語

(30) 優先権データ：
特願 2021-096124　2021年6月8日(08.06.2021)　JP

(71) 出願人: 国立研究開発法人科学技術振興機構(**JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY AGENCY**) [JP/JP]; 〒3320012 埼玉県川口市本町４丁目１番８号 Saitama (JP).

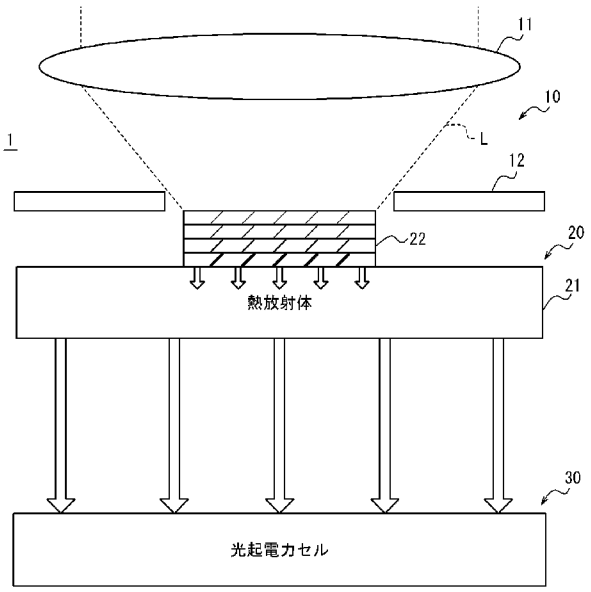
(72) 発明者: 宮内　雄平 (**MIYAUCHI Yuhei**); 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町３６番地１ 国立大学法人京都大学内 Kyoto (JP). 西原 大志(**NISHIHARA Taishi**); 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町３６番地１ 国立大学法人京都大学内 Kyoto (JP). 高倉 章 (**TAKAKURA Akira**); 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本町３６番地１ 国立大学法人京都大学内 Kyoto (JP). 小鍋 哲(**KONABE Satoru**); 〒1028160 東京都千代田区富士見二丁目１７番１号 学校法人法政大学内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 杉村　憲司 (**SUGIMURA Kenji**); 〒1000013 東京都千代田区霞が関三丁目２番１号 霞が関コモンゲート西館３６階 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,

(54) **Title:** THERMAL RADIATION BODY, LIGHT SPECTRUM CONVERSION ELEMENT, PHOTOELECTRIC CONVERSION DEVICE, AND THERMAL RADIATION METHOD

(54) 発明の名称： 熱放射体、光スペクトル変換素子、光電変換装置、及び熱放射方法



20 Thermal radiation body
30 Photovoltaic cell

(57) **Abstract:** A thermal radiation body (21) includes a first carbon nanotube (CNT) in which excitons, generated on the basis of energy from an energy source, have energy matching a wavelength region within a range from the visible region to the near infrared region. The chemical potential of the excitons is maintained so as to be greater than zero.

(57) 要約：熱放射体（２１）は、エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が可視域から近赤外域までの範囲に含まれる波長領域に整合するエネルギーを有する第１カーボンナノチューブ（ＣＮＴ）を含み、励起子の化学ポテンシャルがゼロよりも高く維持される。

WO 2022/260109 A1

QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一　国際調査報告（条約第21条(3)）

明　細　書

発明の名称 ：

熱放射体、光スペクトル変換素子、光電変換装置、及び熱放射方法

関連出願の相互参照

[0001]　本出願は、２０２１年６月８日に日本国に特許出願された特願２０２１－０９６１２４号の優先権を主張するものであり、この出願の開示全体をここに参照のために取り込む。

技術分野

[0002]　本開示は、熱放射体、光スペクトル変換素子、光電変換装置、及び熱放射方法に関する。

背景技術

[0003]　従来、エネルギー源からのエネルギーを利用した熱放射体に関連する技術が知られている。例えば、エネルギー源からのエネルギーを利用して、光起電力セルにより電力を得るための技術が知られている。例えば、太陽熱光起電力（Solar thermo-photovoltaics（ＳＴＰＶ））及び熱光起電力（Thermo-photovoltaics（ＴＰＶ））と呼ばれる技術が知られている。ＳＴＰＶでは、太陽の光エネルギーが熱放射体に蓄えられる。広帯域のスペクトルを有する太陽光は、熱放射体において、太陽電池の発電効率が高い波長領域で狭帯域のスペクトルを有する平衡熱放射に変換される。光起電力セルは、このような平衡熱放射を吸収して電力を発生させる。ＴＰＶでは、熱放射体は例えばガスの燃焼により加熱される。

[0004]　例えば、特許文献１には、熱放射体に半導体型カーボンナノチューブ（ＣＮＴ）を含む膜を用いた熱光変換素子が記載されている。特許文献１に記載の熱光変換素子では、熱エネルギーにより生成された励起子の消滅によって近赤外における狭帯域の平衡熱放射が発生する。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開２０１９－１９３４１８号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 従来技術では、エネルギー源からのエネルギーは、例えば熱放射体の前段に配置される吸収体によって全て熱に変換されていた。このような熱エネルギーは、熱伝導により熱放射体に伝送され、上述した狭帯域の平衡熱放射に利用されていた。このとき、吸収体及び熱放射体において熱の一部が外部へと逃げてしまい、光起電力セルにおいて電力に変換されるエネルギーが低減していた。エネルギー源からのエネルギーが最終的に光起電力セルに伝送されるときの伝送レートを、吸収体及び熱放射体における熱リークレートよりも十分に大きくすることが困難であり、エネルギー源からのエネルギーに基づいて光起電力セルで最終的に電力を得るときの変換効率に改善の余地があった。

[0007] 本開示は、エネルギー源からのエネルギーに基づく放射強度が向上する熱放射体、光スペクトル変換素子、光電変換装置、及び熱放射方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 本開示は、

（１）

エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が可視域から近赤外域までの範囲に含まれる波長領域に整合するエネルギーを有する第１カーボンナノチューブ（ＣＮＴ）を含み、前記励起子の化学ポテンシャルがゼロよりも高く維持される、熱放射体、

である。

[0009] （２）

上記（１）に記載の熱放射体では、

前記第１ＣＮＴは、半導体型ＣＮＴを含み、

前記波長領域は、光起電力セルの感度領域に対応してもよい。

[0010] （３）

上記（２）に記載の熱放射体では、

前記第１ＣＮＴの直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ３.５ｎｍの条件を満たしてもよい。

[0011] （４）

上記（３）に記載の熱放射体では、

前記直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ２．５ｎｍの条件を満たしてもよい。

[0012] （５）

上記（２）乃至（４）のいずれか１つに記載の熱放射体では、

前記エネルギー源からのエネルギーは、太陽からの光エネルギーを含んでもよい。

[0013] （６）

上記（１）に記載の熱放射体では、

前記第１ＣＮＴは、金属型ＣＮＴを含んでもよい。

[0014] （７）

上記（６）に記載の熱放射体では、

前記第１ＣＮＴの直径ｄは、１．２ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．５ｎｍの条件を満たしてもよい。

[0015] 本開示は、

（８）

上記（２）乃至（５）のいずれか１つに記載の熱放射体と、

前記熱放射体に取り付けられ、前記エネルギー源からの光エネルギーを前記熱放射体に伝送する受光部と、

を備える、

光スペクトル変換素子、

である。

[0016] （９）

上記（８）に記載の光スペクトル変換素子では、

前記熱放射体は、単一種類の前記第１ＣＮＴにより形成される放射層を含み、

前記受光部は、前記第１ＣＮＴとは異なる半導体型の第２ＣＮＴによりそれぞれ形成され、かつ前記放射層に積層される少なくとも１つの吸収層を含んでもよい。

[0017] （１０）

上記（９）に記載の光スペクトル変換素子では、

前記第２ＣＮＴは、前記エネルギー源からの光エネルギーの吸収によって生成される励起子のエネルギーが前記第１ＣＮＴにおける励起子のエネルギーよりも高くなるような直径とカイラル指数とで特定されてもよい。

[0018] （１１）

上記（９）又は（１０）に記載の光スペクトル変換素子では、

前記第１ＣＮＴ及び前記第２ＣＮＴの直径は、前記エネルギー源側に位置する層ほど小さくなってもよい。

[0019] （１２）

上記（９）乃至（１１）のいずれか１つに記載の光スペクトル変換素子では、

前記第１ＣＮＴ及び前記第２ＣＮＴの各々に対して、直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．０ｎｍの条件を満たし、かつカイラル指数（ｎ，ｍ）は、５≦ｎ≦５０及び０≦ｍ≦ｎである整数の組を含んでもよい。

[0020] （１３）

上記（９）乃至（１２）のいずれか１つに記載の光スペクトル変換素子は、

前記放射層及び前記少なくとも１つの吸収層を含む積層体の積層方向における両面の少なくとも一方に積層され、前記第１ＣＮＴ及び前記第２ＣＮＴよりも屈折率が低い材料から形成されている低屈折率層をさらに備えてもよい。

[0021] （１４）

上記（８）乃至（１３）のいずれか１つに記載の光スペクトル変換素子では、

前記受光部は、前記エネルギー源からの光を受け入れる孔と、前記孔から入射した前記光を閉じ込めて内部を伝搬させる閉じ込め構造と、を有し、

前記熱放射体の表面は、前記閉じ込め構造の一の面を構成してもよい。

[0022] 本開示は、

（１５）

上記（２）乃至（５）のいずれか１つに記載の熱放射体と、

前記熱放射体と同一層として形成され、前記第１ＣＮＴとは異なる半導体型の第２ＣＮＴを含み、前記エネルギー源からの光エネルギーを前記第２ＣＮＴが吸収して前記第１ＣＮＴに伝送する受光部と、

を備える、

光スペクトル変換素子、

である。

[0023] 本開示は、

（１６）

上記（２）乃至（５）のいずれか１つに記載の熱放射体、又は上記（８）乃至（１５）のいずれか１つに記載の光スペクトル変換素子と、

前記第１ＣＮＴにおける励起子の消滅によって放出された光エネルギーを電気エネルギーに変換する前記光起電力セルと、

を備える、

光電変換装置、

である。

[0024] 本開示は、

（１７）

エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が消滅することで可視域から近赤外域までの範囲に含まれる波長領域に整合するエネルギーを有する非平衡熱放射を発生させる熱放射体、

である。

[0025] 本開示は、

（１８）

エネルギー源からの光エネルギーに基づいて生成された励起子が光起電力セルの感度領域に整合するエネルギーを有する単一種類の第１半導体型ＣＮＴにより形成される放射層と、

前記第１半導体型ＣＮＴとは異なる第２半導体型ＣＮＴによりそれぞれ形成され、かつ前記放射層に積層される少なくとも１つの吸収層であって、前記エネルギー源からの光エネルギーを前記放射層に伝送する前記吸収層と、

を備える、

光スペクトル変換素子、

である。

[0026] 本開示は、

（１９）

エネルギー源からの光エネルギーに基づいて生成された励起子が光起電力セルの感度領域に整合するエネルギーを有する第１半導体型ＣＮＴを含む熱放射体と、

前記熱放射体に取り付けられ、前記エネルギー源からの光エネルギーを前記熱放射体に伝送する受光部と、

を備え、

前記受光部は、前記エネルギー源からの光を受け入れる孔と、前記孔から入射した前記光を閉じ込めて内部を伝搬させる閉じ込め構造と、を有し、

前記熱放射体の表面は、前記閉じ込め構造の一の面を構成する、

光スペクトル変換素子、

である。

[0027] 本開示は、

（２０）

エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が可視域から

近赤外域までの範囲に含まれる波長領域に整合するエネルギーを有する第１ＣＮＴを含む熱放射体を、８００Ｋ以上の動作温度で動作させるステップを含む、熱放射方法、

である。

発明の効果

[0028] 本開示の一実施形態に係る熱放射体、光スペクトル変換素子、光電変換装置、及び熱放射方法によれば、エネルギー源からのエネルギーに基づく放射強度が向上する。

図面の簡単な説明

[0029] [図1]本開示の第１実施形態に係る光電変換装置の概略構成図である。

[図2]図１の光スペクトル変換素子の積層構造を示す概略図である。

[図3]図２の光スペクトル変換素子のスペクトル特性を説明するための概念図である。

[図4]熱放射体からの非平衡熱放射の実験結果を示す図である。

[図5]熱放射体に含まれる第１半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルを示す図である。

[図6]図４の非平衡熱放射に基づく放射強度の温度依存性を示す図である。

[図7]単一の第１半導体型ＣＮＴからの放射に基づく放射強度の温度依存性を示す図である。

[図8]図７の実験結果に基づいて見積もられた化学ポテンシャルの温度依存性を示す図である。

[図9A]理論計算に基づく結果を示す図である。

[図9B]理論計算に基づく結果を示す図である。

[図10]吸収層の積層膜の作製例を示す図である。

[図11]本開示の第２実施形態に係る光電変換装置の概略構成図である。

[図12]図１１の光電変換装置に基づく変換効率の試算結果を示す図である。

[図13]本開示の第３実施形態に係る熱放射体の概略構成図である。

[図14]図１３における一本の金属型ＣＮＴからの非平衡熱放射に基づく放射

強度の温度依存性を示す図である。

[図15]図１３における熱放射体の非平衡熱放射スペクトルの印加電圧依存性を示す図である。

[図16]図１の光スペクトル変換素子の積層構造の変形例を示す図２に対応する概略図である。

[図17]図１の光スペクトル変換素子の変形例を示す図２に対応する概略図である。

発明を実施するための形態

[0030] 以下、本開示の一実施形態について、図面を参照して説明する。

[0031] （第１実施形態）

図１は、本開示の第１実施形態に係る光電変換装置１の概略構成図である。図１を参照しながら、第１実施形態に係る光電変換装置１の構成及び機能について主に説明する。光電変換装置１は、大きな構成要素として集光部１０と、光スペクトル変換素子２０と、光起電力セル３０と、を有する。

[0032] 光電変換装置１は、例えばＳＴＰＶに用いられる。光電変換装置１は、エネルギー源からのエネルギーを利用して電力を得る。本明細書において、「エネルギー源からのエネルギー」は、例えば太陽からの光エネルギーを含む。すなわち、光電変換装置１は、太陽光Ｌを吸収して電力を得る太陽電池装置を含む。

[0033] 光電変換装置１では、太陽光Ｌが吸収されてから発電に至るまでの過程で、広帯域のスペクトルを有する太陽光Ｌは、光起電力セル３０の発電効率が高い波長領域で狭帯域のスペクトルを有する非平衡熱放射に変換される。「非平衡熱放射」の定義については後述する。このような波長領域は、可視域から近赤外域までの範囲に含まれる。本明細書において、「可視域」は、例えば４００ｎｍ以上８００ｎｍ未満の波長領域を含む。「近赤外域」は、例えば８００ｎｍ以上３０００ｎｍ以下の波長領域を含む。

[0034] 集光部１０は、太陽光Ｌを集光して光スペクトル変換素子２０へと導く。集光部１０は、例えば外部から入射してくる太陽光Ｌを光スペクトル変換素

子２０へと導くレンズ１１を含む。これに限定されず、集光部１０は、レンズ１１に代えて、又は加えてミラーなどの他の光学部品により構成される光学系を含んでもよい。集光部１０は、光スペクトル変換素子２０の表面をレンズ１１側に露出させた状態で光スペクトル変換素子２０及び光起電力セル３０をレンズ１１とは反対側に位置させて囲むシールド１２を有する。

[0035] 集光部１０は、外部から入射してくる太陽光Ｌを所定の倍率で集光する。本明細書において、「所定の倍率」は、例えば１０倍以上２０００倍以下の範囲に含まれる。すなわち、集光部１０は、太陽光Ｌの単位面積当たりの光エネルギーに相当する光強度がレンズ１１の通過後に光スペクトル変換素子２０において所定の倍率に増大するように太陽光Ｌの面積を縮小する。

[0036] 光スペクトル変換素子２０は、光起電力セル３０側に配置される熱放射体２１と、熱放射体２１に取り付けられ、吸収体がエネルギー源から吸収したエネルギーを熱放射体２１に伝送する受光部２２と、を有する。受光部２２は、熱放射体２１に対して集光部１０側に位置するように熱放射体２１に取り付けられる。

[0037] 図２は、図１の光スペクトル変換素子２０の積層構造を示す概略図である。図１及び図２を参照しながら、光スペクトル変換素子２０の構成及び機能について主に説明する。第１実施形態では、光スペクトル変換素子２０は、積層された複数の層を含む。各層には、単一種類の半導体型ＣＮＴが含まれている。複数の層にそれぞれ含まれている半導体型ＣＮＴの種類は、層ごとに互いに異なっている。

[0038] 例えば、熱放射体２１は、単一種類の第１半導体型ＣＮＴ（第１ＣＮＴ）により形成される放射層２３を含む。受光部２２は、第１半導体型ＣＮＴとは異なる第２半導体型ＣＮＴ（第２ＣＮＴ）によりそれぞれ形成され、かつ放射層２３に積層される少なくとも１つの吸収層２４を含む。図１及び図２では、吸収層２４の数は例えば４つであるが、これに限定されない。吸収層２４の数は、１つ以上の任意の値であってもよい。

[0039] 例えば、放射層２３は、光スペクトル変換素子２０に含まれる複数の層の

うち、最も光起電力セル３０側に配置される。放射層２３は、光スペクトル変換素子２０に含まれる複数の層において最下層を構成する。４つの吸収層２４１、２４２、２４３、及び２４４は、放射層２３の上に順に積層されている。吸収層２４４は、光スペクトル変換素子２０に含まれる複数の層のうち、最もエネルギー源側に配置される。吸収層２４４は、光スペクトル変換素子２０に含まれる複数の層において最上層を構成する。

[0040] 例えば、吸収層２４に含まれる第２半導体型ＣＮＴは、エネルギー源からの光エネルギーの吸収によって生成される後述の励起子のエネルギーが放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴにおける励起子のエネルギーよりも高くなるような直径とカイラル指数とで特定されてもよい。例えば、第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの直径ｄは、エネルギー源側に位置する層ほど小さくなってもよい。すなわち、光スペクトル変換素子２０に含まれる複数の層のうち、放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴの直径ｄが最も大きくてもよい。一方で、４つの吸収層２４にそれぞれ含まれる第２半導体型ＣＮＴの直径ｄは、吸収層２４１、２４２、２４３、及び２４４の順に次第に小さくなってもよい。例えば、第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの直径ｄは、０．６ｎｍ以上３．５ｎｍ以下であってもよい。例えば、第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの各々に対して、直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．０ｎｍの条件を満たし、かつカイラル指数（ｎ，ｍ）は、５≦ｎ≦５０及び０≦ｍ≦ｎである整数の組を含んでもよい。

[0041] 以上のような層構造を有する光スペクトル変換素子２０では、吸収層２４は、例えば集光部１０によって集光された太陽光Ｌを吸収し、励起子及び熱を生成する。例えば、吸収層２４に含まれる第２半導体型ＣＮＴが太陽光Ｌを吸収すると太陽からの光エネルギーに基づいて励起子が生成される。このような励起子のエネルギーは、第２半導体型ＣＮＴのカイラル指数に依存して変化する。本明細書において、「カイラル指数」は、例えば半導体型ＣＮＴの直径ｄ及び螺旋角を決定するパラメータである。直径ｄ（ｎｍ）とカイラル指数（ｎ，ｍ）とは、換算式 $d = 0.249 \times (n^2 + m^2 + nm)^{0.5}/$

πにより互いに関連付けられる。吸収層２４に含まれる第２半導体型ＣＮＴは、そのカイラル指数に応じて決定される励起子のエネルギーに相当する波長の光を主として吸収する。また、吸収層２４は、第２半導体型ＣＮＴの励起子のエネルギーに相当する波長よりも短波長の光についても、第２半導体型ＣＮＴ中の高次サブバンド励起子生成又は連続準位における電子正孔対生成により、直接吸収する。これにより、吸収層２４において熱が発生する。

[0042] 光スペクトル変換素子２０では、半導体型ＣＮＴの直径ｄに基づく上述した層構造に起因して、半導体型ＣＮＴの励起子に対し定義される化学ポテンシャルの勾配が形成される。例えば、励起子の化学ポテンシャルは、エネルギー源側の吸収層２４４から放射層２３に向かうにつれて次第に低くなる。これにより、吸収層２４において吸収された太陽からの光エネルギーが励起子を介して放射層２３に伝送される。

[0043] 例えば、吸収層２４４の第２半導体型ＣＮＴが太陽光Ｌを吸収すると吸収層２４４において励起子が生成される。吸収層２４４において励起子として保持されているエネルギーは、当該励起子が消滅して光子が放出されることで隣接する吸収層２４３に伝送される。このとき、放出される光子のエネルギーは、吸収層２４４の第２半導体型ＣＮＴのカイラル指数に応じて決定される励起子のエネルギーに相当する。吸収層２４３では、吸収層２４４において放出された光子に基づいて新たな励起子が生成される。吸収層２４３において励起子として保持されているエネルギーは、当該励起子が消滅して光子が放出されることで隣接する吸収層２４２に伝送される。このようなプロセスが繰り返されて、最終的に、放射層２３においてもエネルギー源からのエネルギーに基づく励起子が同様に生成される。以上のようなプロセスで、吸収層２４を含む受光部２２は、太陽からの光エネルギーを、放射層２３を含む熱放射体２１に励起子をエネルギーキャリアとして伝送する。

[0044] 放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴでは、エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が光起電力セル３０の感度領域に整合するエネルギーを有する。光起電力セル３０の感度領域は、可視域から近赤外

域までの範囲に含まれる波長領域に対応する。例えば、第１半導体型ＣＮＴの直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．５ｎｍの条件を満たしてもよい。第１半導体型ＣＮＴのカイラル指数（ｎ，ｍ）は、ｎ－ｍが０又は３の倍数となる組み合わせを除いた整数の組を含んでもよい。例えば、第１半導体型ＣＮＴの直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ １．０ｎｍ、１．０ｎｍ≦ ｄ ≦ ２．０ｎｍ、２．０ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．０ｎｍ、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ２.０ｎｍ、及び０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ２．５ｎｍのいずれかの条件を満たし、かつカイラル指数（ｎ，ｍ）は、ｎ－ｍが０又は３の倍数となる組み合わせを除いた整数の組を含んでもよい。例えば、第１半導体型ＣＮＴに対して、直径は０．９３６ ｎｍ、カイラル指数は（１０，３）であってもよい。加えて、放射層２３における励起子の化学ポテンシャルは、ゼロよりも高く維持される。

[0045] 以上により、放射層２３を含む熱放射体２１は、エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が消滅することで光起電力セル３０の感度領域に整合するエネルギーを有する非平衡熱放射を発生させる。すなわち、熱放射体２１は、光起電力セル３０の発電効率が高い波長領域で狭帯域のスペクトルを有する非平衡熱放射を発生させる。熱放射体２１は、光起電力セル３０の吸収波長帯域で狭帯域のスペクトルを有する非平衡熱放射を発生させる。

[0046] より具体的には、熱放射体２１は、励起子をエネルギーキャリアとして受光部２２から伝送されてきた太陽からの光エネルギーを受けて、励起子を生成する。熱放射体２１の放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴでは、このような励起子は、光起電力セル３０の感度領域に整合するエネルギーを有する。このような励起子のエネルギーは、光起電力セル３０の発電効率が高い波長領域、すなわち高い吸収率を示す吸収波長帯域に対応するエネルギー領域に含まれる。したがって、このような励起子が消滅することで得られる光エネルギーも、光起電力セル３０の発電効率が高い波長領域に対応するエネルギー領域に含まれる。すなわち、熱放射体２１から、光起電力セル３０の感度領域に整合するエネルギーを有する非平衡熱放射が発生する。

[0047] 上記のとおり、励起子は、輻射再結合により消滅すると、そのエネルギーに等しい光子を放出する。したがって、光起電力セル３０の感度領域に整合するエネルギーを有する励起子を保持できる直径及びカイラル指数を有するＣＮＴを第１半導体型ＣＮＴとして選択して利用する。これにより、光起電力セル３０の感度領域に整合するエネルギーを有する光子を発生させることができる。

[0048] 例えば、半導体のバンド構造において、熱励起された正孔及び電子に対しては、フェルミ準位は互いに一致する。このような場合、励起子の消滅によって平衡熱放射が発生する。一方で、熱だけでなく、光学ギャップよりも高いエネルギーを有する光によっても半導体を定常的に励起するとき、一般的に正孔の擬フェルミ準位と電子の擬フェルミ準位とが互いにずれ、その差が化学ポテンシャルに対応する。このような状態は非平衡状態である。本明細書において、「非平衡熱放射」は、例えば、上記非平衡状態において励起子、又は電子、正孔対の消滅によって発生する熱放射光を含む。このような非平衡熱放射は、ゼロよりも高い化学ポテンシャルを含む一般化プランク則に従う。

[0049] 図１を参照すると、光起電力セル３０は、熱放射体２１において発生した非平衡熱放射を吸収して電力を発生させる。例えば、光起電力セル３０は、熱放射体２１に含まれる第１半導体型ＣＮＴにおける励起子の消滅により放出された光エネルギーを電気エネルギーに変換する。光起電力セル３０は、例えばＩｎｘＧａ１－ｘＡｓｙＳｂ１－ｙ（０≦ｘ≦１００、０≦ｙ≦１００）層を含む。光起電力セル３０は、これに限定されず、熱放射体２１からの熱放射を吸収して電力を発生させることが可能な任意の層を含んでもよい。

[0050] 図３は、図２の光スペクトル変換素子２０のスペクトル特性を説明するための概念図である。図３を参照しながら、光スペクトル変換素子２０の吸収及び放射に関するスペクトル特性の一例について主に説明する。

[0051] 図３において、破線で示される各グラフは、対応する吸収層２４に含まれ

る第２半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルを示す。例えば、グラフＧ１は、吸収層２４４に含まれる第２半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルを示す。例えば、グラフＧ２は、吸収層２４３に含まれる第２半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルを示す。例えば、グラフＧ３は、吸収層２４２に含まれる第２半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルを示す。例えば、グラフＧ４は、吸収層２４１に含まれる第２半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルを示す。一点鎖線で示されるグラフは、放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルを示す。

[0052] 例えば、光スペクトル変換素子２０では、半導体型ＣＮＴの直径ｄとカイラル指数に基づく上述した層構造に起因して、エネルギー源から離れて放射層２３側に配置される吸収層２４ほど、含まれる第２半導体型ＣＮＴの吸収ピークは長波長側に位置する。放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴの吸収ピークは、最も長波長に位置する。すなわち、吸収層２４４から放射層２３に向かうほど、半導体型ＣＮＴにおいて生成される励起子のエネルギーは低くなる。

[0053] 光スペクトル変換素子２０の吸収層２４及び放射層２３では、第２半導体型ＣＮＴ及び第１半導体型ＣＮＴの吸収ピークが層ごとに段階的に変化することで、図３において細い実線で示すとおり、５層全体にわたる吸収率スペクトルは非常に広帯域になる。例えば、このような吸収率スペクトルは、波長４００ｎｍ以上の可視域を全て包含し、波長１３００ｎｍ近辺の近赤外域にまで達する。

[0054] 放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴの吸収ピークが波長１３００ｎｍ近辺に位置することで、熱放射体２１は、図３において太い実線で示すような波長１３００ｎｍ近辺にピークを持つ放射スペクトルの非平衡熱放射を発生させる。すなわち、吸収層２４において吸収された太陽の光エネルギーに対してより低いエネルギー（より長波長）で非平衡熱放射が発生する。このときのエネルギーの差分は、例えば励起子の生成消滅を繰り返してエネルギーが吸収層２４から放射層２３に伝送される間に光スペクトル変換素子２

０において非平衡分布を持つ励起子のエネルギーに変換される。

[0055] 図４は、熱放射体２１からの非平衡熱放射の実験結果を示す図である。図４は、熱放射体２１からの非平衡熱放射に基づく狭帯域の放射光の放射スペクトルを示す。図４に示す実験結果は、第１半導体型ＣＮＴに対して、直径ｄが０．９３６ｎｍであり、カイラル指数が（１０，３）であり、動作温度が約１０００Ｋであるという条件に基づく。熱放射体２１は、第１半導体型ＣＮＴの直径ｄの値に応じて、８００Ｋ以上の動作温度で動作可能である。加えて、熱放射体２１は、第１半導体型ＣＮＴを含む約１ｇ／ｃｍ^{3}の自立膜として構成される。このような熱放射体２１は、レーザーによって加熱され、太陽光加熱を擬似的に再現している。

[0056] 図４に示すとおり、非平衡熱放射に基づく熱放射体２１からの放射光は、波長１３００ｎｍ近辺にピークを持つ放射スペクトルを示す。そのスペクトル幅は、紫外域、可視域、及び近赤外域の一部にわたり広がる広帯域の太陽光スペクトルと比較して十分に狭い。加えて、そのスペクトル幅は、例えば１０００Ｋにおける黒体放射に基づく放射スペクトルと比較しても十分に狭い。１０００Ｋにおける黒体放射に基づく放射スペクトルは、波長３０００ｎｍ程度にピークを有し近赤外域から遠赤外域にわたって広帯域に広がっている。

[0057] 図５は、熱放射体２１に含まれる第１半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルを示す図である。図５に示す吸収率スペクトルは、第１半導体型ＣＮＴの直径ｄが０．９３６ｎｍ、カイラル指数が（１０，３）のＣＮＴを主成分とし、温度が室温程度であるという条件に基づく。加えて、熱放射体２１は、第１半導体型ＣＮＴを含む約１ｇ／ｃｍ^{3}の膜をサファイア上に形成した状態で構成される。

[0058] 図５に示すとおり、熱放射体２１に含まれる第１半導体型ＣＮＴは、波長１３００ｎｍ近辺において最も大きな吸収ピークを有する。一方で、波長１３００ｎｍよりも長波長側では吸収率がゼロに近くなり、熱放射体２１に含まれる第１半導体型ＣＮＴは光をほぼ吸収しない。以上により、熱放射体２

１は、波長１３００ｎｍ近辺に放射ピークを有する狭帯域の熱放射を発生させる。

[0059] 図６は、図４の非平衡熱放射に基づく放射強度の温度依存性を示す図である。図６において、丸印は実験結果を示す。丸印と重なる実線は、一般化プランク則に基づくフィッティング結果を示す。破線は、プランク則に従った、化学ポテンシャルμがゼロとなるときの平衡熱放射に基づく放射強度の温度依存性を示す。

[0060] 図６に示す実験結果では、平衡熱放射に基づく放射強度の温度依存性から完全に外れて、より高い放射強度の非平衡熱放射に関する温度依存性が示されている。得られた実験結果を一般化プランク則と比較することで、非平衡熱放射が発生するときの化学ポテンシャルμ_rとして０．２ｅＶの値が得られた。このように、非平衡熱放射においてゼロよりも高く維持される化学ポテンシャルは、熱放射体２１からの放射強度を温度ごとに測定し、測定された放射強度の温度依存性に対して一般化プランク則を適用し、一般化プランク則に基づくフィッティングから確認することができる。

[0061] 化学ポテンシャルがゼロよりも高く維持されていることを確認するための方法についてより詳細に説明する。

[0062] 真空度10^{-7}気圧以下の真空チャンバー内に測定対象となる非平衡熱放射体を設置し、ソーラーシミュレータ及びレーザーなどの光源から非平衡熱放射体に光を照射する。光照射下の非平衡熱放射体の温度を校正済熱電対により測定し、その放射強度を、放射率が既知である物体、例えば擬似黒体の同一温度における熱放射強度と比較する。このとき、熱電対には入射光が直接当たらないように光源と熱電対との間に高反射率の金属マスクを設置する。

[0063] 擬似黒体として、黒体塗料ＪＳＣ－３号（ジャパンセンサー株式会社、放射率０．９４程度）を塗布した耐熱基板（サファイア基板）を用意し、それをセラミックヒーター（坂口電熱株式会社、１０００℃対応５ｍｍ角マイクロセラミックヒーターＭＳ－Ｍ１０００）で加熱する。擬似黒体に取り付けた熱電対の温度と擬似黒体の放射スペクトルとの関係を測定する。次に、同

様の測定系を用いて、非平衡熱放射体としてのＣＮＴの温度と放射強度との関係を測定する。

[0064] 同一の熱電対温度において、非平衡熱放射体からの、ＣＮＴの励起子共鳴波長における放射強度が、擬似黒体の放射強度に擬似黒体の放射率の逆数を乗じたものよりも大きければ、化学ポテンシャルがゼロよりも高く維持されていると判断できる。

[0065] 図７は、単一の第１半導体型ＣＮＴからの放射に基づく放射強度の温度依存性を示す図である。図７において、丸印は実験結果を示す。丸印と重なる実線は、プランク則（μ_r＝０）に基づくフィッティング結果を示す。図７に示す実験結果は、第１半導体型ＣＮＴに対して、直径ｄが１．２０ｎｍであり、カイラル指数が（１２，５）であるという条件に基づく。加えて、１つの第１半導体型ＣＮＴが、真空チャンバー内で架橋され、レーザーにより加熱される。

[0066] このとき、単一の第１半導体型ＣＮＴからの放射は、１４００Ｋ程度の高温側から１０００Ｋ程度の低温側に移行するにつれて平衡熱放射から非平衡熱放射へと変化する。例えば、単一の第１半導体型ＣＮＴからの放射は、１４００Ｋから１１００Ｋ近辺までの温度領域では平衡熱放射となり、化学ポテンシャルμがゼロとなってプランク則に従う。一方で、単一の第１半導体型ＣＮＴからの放射は、１１００Ｋ近辺よりも低温側では非平衡熱放射となり、化学ポテンシャルμ_rがゼロよりも高くなってプランク則から外れる。

[0067] 図８は、図７の実験結果に基づいて見積もられた化学ポテンシャルμ_rの温度依存性を示す図である。図８に示すとおり、１１００Ｋ近辺よりも低温側で化学ポテンシャルμ_rがゼロよりも高くなっている。カイラル指数が（１２，５）である第１半導体型ＣＮＴにおいても、例えば約１０００Ｋの動作温度で５０ｍｅＶ程度の化学ポテンシャルμ_rが得られている。

[0068] 図９Ａは、理論計算に基づく結果を示す図である。図９Ａは、化学ポテンシャルの温度依存性を第１半導体型ＣＮＴの異なる直径ｄごとに計算した結果を示す。図９Ａに示すとおり、第１半導体型ＣＮＴの直径ｄが小さくなる

ほど化学ポテンシャルが高くなる傾向にある。加えて、第１半導体型ＣＮＴの直径ｄが小さくなるほど化学ポテンシャルがゼロから立ち上がる温度が高くなる。

[0069] 例えば、直径ｄが０．９ｎｍのとき、化学ポテンシャルは１４００Ｋよりも低温側で０より高くなる。例えば、直径ｄが１．１ｎｍのとき、化学ポテンシャルは１２００Ｋよりも低温側で０より高くなる。例えば、直径ｄが１．２ｎｍのとき、化学ポテンシャルは１０５０Ｋ近辺よりも低温側で０より高くなる。

[0070] 図９Ｂは、理論計算に基づく結果を示す図である。図９Ｂは、化学ポテンシャルの非輻射緩和レート依存性を異なる温度ごとに計算した結果を示す。第１半導体型ＣＮＴの直径ｄは、０．９ｎｍである。図９Ｂに示すとおり、非輻射緩和レートが高くなるほど化学ポテンシャルは低下する傾向にある。しかしながら、温度が低いほど高い非輻射緩和レートに対しても化学ポテンシャルが高く維持される。

[0071] 以上のように、第１半導体型ＣＮＴの直径ｄが小さいほど、またルミネッセンス効率が高い、すなわち非輻射緩和レートが低いほど、化学ポテンシャルは高くなる。

[0072] 放射層２３の単層膜の製造方法は、例えば原料となる第１半導体型ＣＮＴが分散された溶液をメンブレンフィルターによりろ過する工程を含む。例えば、直径０．９３６ｎｍ、カイラル指数（１０，３）で特定される第１半導体型ＣＮＴが分散された溶液をメンブレンフィルターによりろ過する。これにより、直径０．９３６ｎｍ、カイラル指数（１０，３）で特定される第１半導体型ＣＮＴだけが蓄積されて膜が形成される。続いて、同様の工程を第２半導体型ＣＮＴが分散された溶液に対しても行い吸収層２４を形成する。これにより、放射層２３及び吸収層２４が重なった積層膜が形成される。

[0073] 図１０は、吸収層２４の積層膜の作製例を示す図である。このような積層膜の製造方法は、例えば原料となる第２半導体型ＣＮＴが分散された溶液をメンブレンフィルターによりろ過する工程を含む。例えば、図１０に示す作

製例では、初めに、直径０．７５７ｎｍ、カイラル指数（６，５）で特定される第２半導体型ＣＮＴが分散された溶液をメンブレンフィルターによりろ過する。これにより、直径０．７５７ｎｍ、カイラル指数（６，５）で特定される第２半導体型ＣＮＴだけが蓄積されて膜が形成される。続いて、同様の工程を、直径０．９１６ｎｍ、カイラル指数（９，４）で特定される第２半導体型ＣＮＴに対しても行う。これにより、２種類の第２半導体型ＣＮＴが重なった積層膜が形成される。

[0074] 図１０に示す例では、吸収層２４は、２つの層を有する。例えば、吸収層２４は、放射層２３側に位置し、直径０．９１６ｎｍ、カイラル指数（９，４）で特定される第２半導体型ＣＮＴを含む第１層と、第１層に積層され、直径０．７５７ｎｍ、カイラル指数（６，５）で特定される第２半導体型ＣＮＴを含む第２層と、を有する。

[0075] 図１０のグラフ中の挿図において、吸収層２４の第１層及び第２層に含まれる第２半導体型ＣＮＴの吸収率スペクトルがそれぞれ示されている。挿図に示すとおり、第１層に含まれる第２半導体型ＣＮＴは、波長１３００ｎｍ近辺において最も大きな吸収ピークを有する。一方で、第２層に含まれる第２半導体型ＣＮＴは、第１層における吸収ピークよりも短波長側で最も大きな吸収ピークを有する。

[0076] 吸収層２４では、第２半導体型ＣＮＴの吸収ピークが層ごとに段階的に変化することで、図１０のグラフにおいて示すとおり、２層全体にわたる吸収率スペクトルは、長波長側で１３００ｎｍ近辺にカットオフ波長を有する。このようなカットオフ波長よりも短波長側では、吸収層２４は、非常に広帯域の吸収を持つようになる。例えば、このような吸収率スペクトルは、可視域を包含し、波長１３００ｎｍ近辺の近赤外域にまで達する。

[0077] （第２実施形態）

図１１は、本開示の第２実施形態に係る光電変換装置１の概略構成図である。図１１を参照しながら、第２実施形態に係る光電変換装置１の構成及び機能について主に説明する。第２実施形態に係る光電変換装置１は、光スペ

クトル変換素子２０の受光部２２の構成が異なる点で第１実施形態と相違する。その他の構成、機能、効果、変形例などについては、第１実施形態と同様であり、対応する説明が第２実施形態に係る光電変換装置１においても当てはまる。以下では、第１実施形態と同様の構成部については同一の符号を付し、その説明を省略する。第１実施形態と異なる点について主に説明する。

[0078] 第２実施形態に係る光スペクトル変換素子２０は、第１実施形態で説明したような積層構造に代えて、単一種類の第１半導体型ＣＮＴにより形成される層を含む熱放射体２１の表面２１ａを覆うように熱放射体２１に受光部２２が取り付けられる構造を有する。例えば、受光部２２は、エネルギー源からの光を受け入れる孔２２ａと、孔２２ａから入射した光を閉じ込めて内部を伝搬させる閉じ込め構造２２ｂと、を有する。このとき、熱放射体２１の表面２１ａは、閉じ込め構造２２ｂの一の面を構成する。

[0079] より具体的には、閉じ込め構造２２ｂは、囲み部材２２ｂ１と、囲み部材２２ｂ１の中に配置される透明固体２２ｂ２と、熱放射体２１において光起電力セル３０と反対側に位置する表面２１ａと、により構成される。これに限定されず、閉じ込め構造２２ｂは、透明固体２２ｂ２に代えて、空洞を有してもよい。すなわち、閉じ込め構造２２ｂは、囲み部材２２ｂ１及び表面２１ａ、並びにこれらによって囲まれる空洞により構成されてもよい。

[0080] 囲み部材２２ｂ１は、例えば金、銀、白金、銅などの低放射率金属により構成されてもよい。囲み部材２２ｂ１は、全体として凹状に形成され、透明固体２２ｂ２の表面を覆う。囲み部材２２ｂ１の上面に孔２２ａが形成される。

[0081] 透明固体２２ｂ２は、例えば太陽光Ｌを高い透過率で伝搬させることが可能な任意の媒質を含む。例えば、透明固体２２ｂ２は、透明の固体サファイアを含んでもよい。

[0082] 太陽光Ｌは、集光部１０によって集光され、孔２２ａから閉じ込め構造２２ｂの内部に入射する。孔２２ａから閉じ込め構造２２ｂに入射した太陽光

Ｌのエネルギーは、第１半導体型ＣＮＴを含む熱放射体２１に近接場、又は内部の光散乱で生じた遠方場を介して伝送される。例えば、太陽光Ｌは、透明固体２２ｂ２の内部を伝搬する間に、熱放射体２１の表面２１ａに生じる近接場を介してそのほとんどが第１半導体型ＣＮＴに吸収される。これにより、第１実施形態と同様に、熱放射体２１において励起子が生成される。以上のように、第２実施形態では、受光部２２は、熱放射体２１に取り付けられ、エネルギー源からの光エネルギーを熱放射体２１に直接的に伝送する。

[0083] 図１２は、図１１の光電変換装置１に基づく変換効率の試算結果を示す図である。図１２において、水平に引かれた破線は、バンドギャップ０．６７ｅＶの光電変換セルの、いわゆるショックレー・クワイサー限界を示す。例えば、透明固体２２ｂ２として用いられる固体サファイアからの熱放射リークの試算は、熱放射体２１の面積を１ｃｍ^{2}及び動作温度を１２００Ｋとして最大で５Ｗとしている。

[0084] 図１１の光電変換装置１を用いた非平衡ＳＴＰＶでは、熱リークレートが５Ｗとなるときの変換効率は４０％近くまで上がり、ショックレー・クワイサー限界を超える。このときの励起子の化学ポテンシャルμ_rは０．２ｅＶであり、熱放射体２１からの出力は５．８Ｗである。一方で、従来の平衡ＳＴＰＶの場合、熱リークレートが５Ｗとなるときの変換効率は大幅に低下する。このときの熱放射体からの出力は０．７Ｗである。従来の平衡ＳＴＰＶにおいて４０％と同等の変換効率を得るためには、熱リークレートが大幅に低くなる必要がある。

[0085] （第３実施形態）

図１３は、本開示の第３実施形態に係る熱放射体２１の概略構成図である。図１３を参照しながら、第３実施形態に係る熱放射体２１の構成及び機能について主に説明する。第３実施形態に係る熱放射体２１は、熱放射体２１に含まれるＣＮＴが半導体型ではなく金属型である点で第１実施形態及び第２実施形態と相違する。

[0086] その他の構成、機能、効果、変形例などについては、第１実施形態及び第

２実施形態と同様であり、対応する説明が第３実施形態に係る熱放射体２１においても当てはまる。

[0087] 以下では、第１実施形態及び第２実施形態と同様の構成部については同一の符号を付し、その説明を省略する。第１実施形態及び第２実施形態と異なる点について主に説明する。

[0088] ＣＮＴが半導体型であるときに限定されず、金属型であるときにも非平衡熱放射を発生させることができる。約０．１Ｖ／μｍ以上の一定の電圧を印加して金属型ＣＮＴに電流を流すことで、当該金属型ＣＮＴから非平衡熱放射が発生する。第３実施形態では、第１実施形態及び第２実施形態における光起電力セル３０を利用した発電用途以外の、例えば高強度近赤外光源への応用が可能な、金属型ＣＮＴの非平衡熱放射について主に説明する。

[0089] 金属型ＣＮＴでは、電場により加速された電子がフォノンと衝突することで、光学フォノンの非平衡分布が生成可能である。このような非平衡光学フォノンと電子系との相互作用により、ゼロよりも高い化学ポテンシャルを有する励起子が生成される。したがって、当該励起子の輻射再結合により生成される放射は、ゼロよりも高い化学ポテンシャルを有する非平衡熱放射となる。化学ポテンシャルがゼロよりも高く維持されていることを確認するための方法は、第１実施形態及び第２実施形態における半導体型ＣＮＴの場合と同様である。

[0090] 熱放射体２１は、エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が可視域から近赤外域までの範囲に含まれる波長領域に整合するエネルギーを有する第１ＣＮＴを含む。当該励起子の化学ポテンシャルは、ゼロよりも高く維持される。第１ＣＮＴは、金属型ＣＮＴを含む。

[0091] 熱放射体２１に含まれる金属型ＣＮＴの直径ｄは、１．２ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．５ｎｍの条件を満たしてもよい。金属型ＣＮＴのカイラル指数（ｎ，ｍ）は、ｎ－ｍが０又は３の倍数となる整数の組を含んでもよい。例えば、金属型ＣＮＴに対して、直径ｄは、１．２ｎｍ≦ ｄ ≦ ２．５ｎｍ、及び２．５ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．５ｎｍのいずれかの条件を満たし、かつカイラル指数（ｎ

，ｍ）は、ｎ－ｍが０又は３の倍数となる整数の組を含んでもよい。例えば、金属型ＣＮＴに対して、直径はｄ＝２．７１ｎｍ、カイラル指数は（２４，１５）であってもよい。

[0092] 図１３に示すとおり、熱放射体２１は、電流注入により加熱されることで非平衡熱放射を発生させる、細長い棒状の金属型ＣＮＴを複数有する。このような金属型ＣＮＴは、一方向に沿って複数配列されている。一の金属型ＣＮＴと一の金属型ＣＮＴに隣接する他の金属型ＣＮＴとの間の間隔は、略一定である。

[0093] 熱放射体２１は、金属型ＣＮＴが一対の電極２５に対して複数架橋したユニットとなっている。一対の電極２５には、電源２６が接続されている。電源２６及び一対の電極２５により金属型ＣＮＴに電流が注入されて当該金属型ＣＮＴが加熱される。

[0094] 熱放射体２１は、このようなユニットを１組のみ有してもよいし、複数組有してもよい。熱放射体２１は、例えばこのようなユニットを複数組有し、ユニット同士を積層又は集積することで、デバイスとしての高強度化を実現可能である。

[0095] 熱放射体２１に含まれる金属型ＣＮＴの直径は、例えば１ｎｍ以上４ｎｍ以下であるが、これに限定されない。例えば、金属型ＣＮＴの直径は、第１実施形態における第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの直径ｄと同様に、０．６ｎｍ以上３．０ｎｍ以下であってもよい。ユニットあたりの、金属型ＣＮＴの本数密度は、直径ｄｎｍのＣＮＴを用いる場合、例えば５００，０００／ｄ（本／ｍｍ^2）程度であるが、これに限定されない。

[0096] 図１４は、図１３における一本の金属型ＣＮＴからの非平衡熱放射に基づく放射強度の温度依存性を示す図である。

[0097] 図１４において、三角印は、一本の金属型ＣＮＴに電流を注入して一本の金属型ＣＮＴを加熱したときに発生する非平衡熱放射の放射強度の温度依存性を測定した実験結果を示す。三角印と重なる実線は、一般化プランク則に基づくフィッティング結果を示す。

[0098] 図１４において、丸印は、一本の金属型ＣＮＴをレーザーにより加熱したときに発生する平衡熱放射の放射強度の温度依存性を測定した実験結果を示す。丸印は、化学ポテンシャルμがゼロとなるときの平衡熱放射に基づく放射強度の温度依存性を示す。丸印と重なる実線は、プランク則に基づくフィッティング結果を示す。

[0099] 図１４に示す実験結果について、金属型ＣＮＴの構造は、（２４、１５）のカイラル指数で表される。金属型ＣＮＴの直径は２．６７ｎｍである。金属型ＣＮＴの長さは約２０μｍである。非平衡熱放射を得るときの実験について、印加電圧は１．５～１．９Ｖであり、電流は約４μＡである。

[0100] 図１４に示す実験結果では、平衡熱放射に基づく放射強度の温度依存性から完全に外れて、より高い放射強度の非平衡熱放射に関する温度依存性が示されている。例えば１０００Ｋなどの同一温度で比較すると、非平衡熱放射に基づく放射強度は、平衡熱放射に基づく放射強度よりも二桁以上高くなっている。すなわち、平衡熱放射のときよりも二桁以上高い強度の光が非平衡熱放射として放出されている。

[0101] 図１５は、図１３における熱放射体２１の非平衡熱放射スペクトルの印加電圧依存性を示す図である。図１５に示すとおり、熱放射体２１に含まれる金属型ＣＮＴに電流を注入して金属型ＣＮＴを加熱したときに発生する非平衡熱放射の放射強度は、印加電圧が高くなるほど高くなる。すなわち、非平衡熱放射の放射強度は、印加電圧が高くなって金属型ＣＮＴに注入される電流が大きくなり金属型ＣＮＴの加熱量が大きくなるほど高くなる。これは、図１４において金属型ＣＮＴの温度が高くなるほど非平衡熱放射に基づく放射強度が高くなっている点と対応している。

[0102] （効果）

以上のような一実施形態によれば、一定の熱リークレートのもとで、エネルギー源からのエネルギーに基づいて光起電力セル３０で電力を得るときの変換効率が向上する。例えば、熱放射体２１に含まれる第１ＣＮＴの励起子の化学ポテンシャルがゼロよりも高く維持されることで、熱放射体２１は、

非平衡熱放射を発生させる。これにより、従来はプランク則で律速されていたエネルギー伝送レートを、受光部２２及び熱放射体２１における熱リークレートよりも十分に大きくすることが可能となる。

[0103] 例えば、図１２において示したとおり、非平衡ＳＴＰＶでは、熱リークレートが高い場合であっても十分な変換効率が得られる。逆に言えば、光スペクトル変換素子２０は、平衡ＳＴＰＶと同一の熱放射強度を得ようとしたときに、動作温度を低下させることも可能となる。したがって、動作温度低下による安全性、耐久性、及び省熱リーク性が向上する。

[0104] 光スペクトル変換素子２０は、熱放射体２１に取り付けられ、エネルギー源からの光エネルギーを熱放射体２１に伝送する受光部２２を有することで、太陽からの光エネルギーなどを効率的に第１ＣＮＴの励起子に変換することが可能となる。

[0105] 従来のＳＴＰＶでは、太陽からの光エネルギーは、受光部において全て熱エネルギーに変換されていた。一方で、光スペクトル変換素子２０では、第１実施形態のような半導体型ＣＮＴを含む積層構造を有することで、太陽からの光エネルギーの一部は熱エネルギーに変換されるが、残りは化学ポテンシャルがゼロよりも高い励起子に変換される。光スペクトル変換素子２０は、受光部２２及び熱放射体２１において励起子として保持されたエネルギーを、熱として外部に逃がさないうちに光起電力セル３０に伝送可能である。これにより、エネルギー伝送レートが熱リークレートよりも十分に大きくなり、変換効率が向上する。

[0106] 第１実施形態において、第２半導体型ＣＮＴは、エネルギー源からの光エネルギーの吸収によって生成される励起子のエネルギーが第１半導体型ＣＮＴにおける励起子のエネルギーよりも高くなるような直径とカイラル指数とで特定される。これにより、熱放射体２１において発生する非平衡熱放射の放射ピークの波長よりも短波長側の光エネルギーが受光部２２において吸収される。例えば、光スペクトル変換素子２０は、図３に示すようなスペクトル特性を有することで、太陽光のほとんどの波長成分を吸収可能である。逆

に、光スペクトル変換素子２０は、非平衡熱放射の放射ピークの波長よりも長波長側の光エネルギーを吸収しない。したがって、熱放射に基づくエネルギー損失が抑制される。

[0107] 第１実施形態において、第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの励起子エネルギーがエネルギー源側に位置する層ほど高くなることで、受光部２２及び熱放射体２１において化学ポテンシャルの勾配を形成することが可能となる。励起子エネルギーは半導体型ＣＮＴの直径が小さくなるほど高くなる傾向を有し、カイラル指数により決まる。これにより、受光部２２は、太陽からの光エネルギーにより生成された励起子を介して、エネルギーを速やかにかつ一方的に熱放射体２１へと伝送することが可能となる。これにより、エネルギー伝送レートが熱リークレートよりも十分に大きくなり、変換効率が向上する。

[0108] 光スペクトル変換素子２０は、第２実施形態のような受光部２２の構成を有することで、第１実施形態のような積層構造と比較して構造をより単純化することが可能である。加えて、光スペクトル変換素子２０は、受光部２２の孔２２ａによって太陽光が閉じ込め構造２２ｂからわずかに漏れたとしても、太陽光を熱放射体２１と直接的に相互作用させることが可能であることから、太陽光との相互作用の効率を向上させることができる。

[0109] （変形例）

本開示は、その精神又はその本質的な特徴から離れることなく、上述した実施形態以外の他の所定の形態で実現できることは当業者にとって明白である。したがって、先の記述は例示的であり、これに限定されない。開示の範囲は、先の記述によってではなく、付加した請求項によって定義される。あらゆる変更のうちその均等の範囲内にあるいくつかの変更は、その中に包含されるとする。

[0110] 例えば、上述した各構成部の形状、配置、向き、個数などは、上記の説明及び図面における図示の内容に限定されない。各構成部の形状、配置、向き、個数などは、その機能を実現できるのであれば、任意に構成されてもよい

。

[0111] 上記実施形態では、光スペクトル変換素子２０に用いられる半導体材料はＣＮＴであるとして説明したが、これに限定されない。光スペクトル変換素子２０は、エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が消滅することで光起電力セル３０の感度領域に整合するエネルギーを有する非平衡熱放射を発生させることが可能であれば、任意の半導体材料により形成されてもよい。例えば、半導体材料は、ＳｉＣ、原子層半導体（遷移金属ダイカルコゲナイド類）などの他の材料を含んでもよい。

[0112] 上記実施形態では、放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴのカイラル指数は（１０，３）であると説明したが、これに限定されない。第１半導体型ＣＮＴのカイラル指数は、エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が光起電力セル３０の感度領域に整合するエネルギーを有し、励起子の化学ポテンシャルがゼロよりも高く維持されるような任意の値であってもよい。

[0113] 上記実施形態では、熱放射体２１は、ＳＴＰＶに用いられると説明したが、これに限定されない。熱放射体２１は、ＴＰＶに用いられてもよい。すなわち、エネルギー源からのエネルギーは、太陽からの光エネルギーに限定されない。

[0114] 上記実施形態では、熱放射体２１は、単一の放射層２３を含むと説明したが、これに限定されない。熱放射体２１は、複数の放射層２３を含んでもよい。

[0115] 上記実施形態では、熱放射体２１の放射層２３は、単一種類の第１ＣＮＴにより形成されると説明したが、これに限定されない。放射層２３は、複数種類の第１ＣＮＴにより形成されてもよい。例えば、放射層２３は、単一の層に複数種類の第１ＣＮＴが含まれるように形成されてもよいし、複数の層の各々に互いに異なる種類の第１ＣＮＴが含まれるように形成されてもよい。

[0116] 上記第１実施形態では、第１半導体型ＣＮＴと第２半導体型ＣＮＴとは互

いに異なる種類であると説明したが、これに限定されない。第１半導体型ＣＮＴと第２半導体型ＣＮＴとは互いに同一種類であってもよい。すなわち、放射層２３及び吸収層２４には、同一種類の半導体型ＣＮＴが含まれてもよい。

[0117] 上記第１実施形態では、受光部２２の吸収層２４の各々は、単一種類の第２半導体型ＣＮＴにより形成されると説明したが、これに限定されない。吸収層２４の各々は、複数種類の第２半導体型ＣＮＴにより形成されてもよい。また、受光部２２の吸収層２４の各々は、互いに異なる種類の第２半導体型ＣＮＴを含むと説明したが、これに限定されない。吸収層２４の各々は、互いに同一種類の第２半導体型ＣＮＴを含んでもよい。

[0118] 上記第１実施形態では、第２半導体型ＣＮＴは、エネルギー源からの光エネルギーの吸収によって生成される励起子のエネルギーが第１半導体型ＣＮＴにおける励起子のエネルギーよりも高くなるような直径とカイラル指数とで特定されると説明したが、これに限定されない。第２半導体型ＣＮＴにおける励起子のエネルギーと第１半導体型ＣＮＴにおける励起子のエネルギーとは互いに同一であってもよい。第２半導体型ＣＮＴは、このような励起子のエネルギーを実現する直径とカイラル指数とで特定されてもよい。

[0119] 上記第１実施形態では、第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの直径は、エネルギー源側に位置する層ほど小さくなると説明したが、これに限定されない。第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの直径は、光スペクトル変換素子２０における上記の非平衡熱放射を実現可能である任意の関係性に基づいて定められてもよい。すなわち、放射層２３及び吸収層２４は、このような関係性に基づく任意の種類の半導体型ＣＮＴを含んでもよい。

[0120] 上記第１実施形態では、第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの直径は、０．６ｎｍ以上３．０ｎｍ以下であると説明したが、これに限定されない。第１半導体型ＣＮＴ及び第２半導体型ＣＮＴの直径は、光スペクトル変換素子２０における上記の非平衡熱放射を実現可能である任意の値であってもよい。

[0121] 上記第１実施形態では、受光部２２は、第２半導体型ＣＮＴを含む積層構造により構成されると説明したが、これに限定されない。受光部２２は、半導体型ＣＮＴを含む積層構造に代えて、又は加えてフォトニック結晶により構成されてもよい。

[0122] 図１６は、図１の光スペクトル変換素子２０の積層構造の変形例を示す図２に対応する概略図である。

[0123] 上記第１実施形態では、放射層２３及び吸収層２４を含む積層体について、図２に示すとおり、放射層２３及び吸収層２４以外の他の層を有さないと説明したが、これに限定されない。図１６に示すとおり、光スペクトル変換素子２０は、低屈折率層２７をさらに有してもよい。低屈折率層２７は、放射層２３及び少なくとも１つの吸収層２４を含む積層体の積層方向における両面の少なくとも一方に積層されている。例えば、低屈折率層２７は、吸収層２４において最もエネルギー源側に配置されている吸収層２４４の上面に積層されている。低屈折率層２７は、放射層２３の下面に積層されている。

[0124] 低屈折率層２７は、放射層２３に含まれる第１半導体型ＣＮＴ及び吸収層２４に含まれる第２半導体型ＣＮＴよりも屈折率が低い材料から形成されている。このような材料は、例えばＣＮＴの屈折率よりも低く、ＣＮＴと比べて空気の屈折率１により近い屈折率を有するような任意の材料を含んでもよい。例えば、低屈折率層２７は、絶縁性及び高耐熱性を有するボロンナイトライドナノチューブにより形成されていてもよい。ボロンナイトライドナノチューブの屈折率は１．４程度である。

[0125] ボロンナイトライドナノチューブにより低屈折率層２７を形成するとき、放射層２３及び吸収層２４を形成するための製造プロセスと同一のプロセスで成膜可能である。ボロンナイトライドナノチューブにより形成された低屈折率層２７は、熱放射体２１による非平衡熱放射の波長において透明となる。

[0126] このような低屈折率層２７を積層体の積層方向における両面の少なくとも一方に積層することで、低屈折率層２７が支持体のような役割を果たし、積

層体の物理的な強度が向上する。このような補強効果は、図１６のように、積層体の積層方向における両面に低屈折率層２７を設けることでより顕著となる。

[0127] 加えて、低屈折率層２７は、ＣＮＴと比べて空気の屈折率１により近い屈折率を有する材料で形成されているので、光の反射を抑制する機能も有する。仮に低屈折率層２７が形成されていないと、空気とＣＮＴとの間の屈折率差が大きく、空気中から吸収層２４へ光が入射するとき、及び放射層２３から空気中へ光が出射するときに、光の反射が増大する。これにより、光スペクトル変換素子２０からの非平衡熱放射の放射強度が低下する。

[0128] 光スペクトル変換素子２０は、低屈折率層２７を有することで空気とＣＮＴとの間の屈折率差を縮めて光の反射を抑制することができる。したがって、光スペクトル変換素子２０は、吸収層２４における吸収効率及び放射層２３における放射効率を向上させて、太陽光との相互作用の全体的な効率を向上させることができる。結果的に、光スペクトル変換素子２０は、非平衡熱放射の放射強度を増大させることができる。

[0129] 低屈折率層２７が積層体の積層方向における両面に積層されることで、積層体の内部で光が反射を繰り返し、吸収層２４における吸収効率をさらに向上させることが可能となる。光スペクトル変換素子２０は、吸収層２４における光の吸収率を高めて、非平衡熱放射の放射強度をさらに増大させることができる。

[0130] 図１７は、図１の光スペクトル変換素子２０の変形例を示す図２に対応する概略図である。

[0131] 上記第１実施形態では、図２に示すとおり、熱放射体２１と受光部２２とは互いに異なる層として形成されていると説明したが、これに限定されない。受光部２２は、図１７に示すとおり、熱放射体２１と同一層として形成されていてもよい。このとき、受光部２２は、第１半導体型ＣＮＴとは異なる第２半導体型ＣＮＴを含み、エネルギー源からの光エネルギーを第２半導体型ＣＮＴが吸収して第１半導体型ＣＮＴに伝送する。

[0132] 受光部２２を形成している第２半導体型ＣＮＴにおいて、励起子の化学ポテンシャルは、熱放射体２１を形成している第１半導体型ＣＮＴよりも高い。光スペクトル変換素子２０は、一の層の中で、励起子の化学ポテンシャルが高い第２半導体型ＣＮＴの割合をより多くし、励起子の化学ポテンシャルが低い第１半導体型ＣＮＴの割合をより少なくした状態で形成されている。光スペクトル変換素子２０を構成する層において、第１半導体型ＣＮＴが局所的に存在する一方で、第２半導体型ＣＮＴが全体的に存在する。

[0133] 光スペクトル変換素子２０は、図１７に示すような構成を有することで、図２に示す積層構造と比較してより容易に製造可能である。光スペクトル変換素子２０は、より簡易的な構造で、エネルギー源からの光エネルギーを非平衡熱放射に変換することができる。

[0134] 上記第２実施形態では、受光部２２は、熱放射体２１の表面２１ａにのみ取り付けられると説明したが、これに限定されない。受光部２２は、表面２１ａに代えて、又は加えて熱放射体２１の他の表面にも取り付けられてもよい。

[0135] 上記第２実施形態では、図１１に示すとおり、受光部２２は、囲み部材２２ｂ１の上面に形成されている孔２２ａを１つのみ有すると説明したが、これに限定されない。受光部２２に形成されている孔２２ａの形状、大きさ、配置、向き、個数などはエネルギー源からの光を受け入れるという機能を実現可能であれば、任意に構成されてもよい。例えば、孔２２ａは、囲み部材２２ｂ１の上面に代えて、又は加えて、囲み部材２２ｂ１の側面及び下面の少なくとも一方に形成されていてもよい。例えば、孔２２ａは、囲み部材２２ｂ１の１つの面において複数形成されていてもよい。

[0136] 上記第２実施形態では、受光部２２は、エネルギー源からの光を受け入れる孔２２ａを有すると説明したが、これに限定されない。受光部２２は、このような孔２２ａに代えて、又は加えて、囲み部材２２ｂ１の１つの面において所定の透過率で太陽光Ｌを透過させて閉じ込め構造２２ｂの内部へと導く任意の光学素子を有してもよい。このような光学素子は、孔２２ａと同様

に、エネルギー源からの光を受け入れるという機能を実現可能な任意の形状、大きさ、配置、向き、個数などで構成されていてもよい。

[0137] 上記第２実施形態では、囲み部材２２ｂ１は、全体として凹状に形成されていると説明したが、これに限定されない。囲み部材２２ｂ１は、孔２２ａから入射した光を閉じ込めて内部を伝搬させることが可能な任意の形状で形成されていてもよい。例えば、囲み部材２２ｂ１は、積分球のように球状に形成されていてもよい。

[0138] 上記第２実施形態では、囲み部材２２ｂ１は、透明固体２２ｂ２と共に熱放射体２１の表面２１ａの全体を覆うと説明したが、これに限定されない。囲み部材２２ｂ１は、透明固体２２ｂ２と共に熱放射体２１の表面２１ａの一部のみを覆ってもよい。すなわち、閉じ込め構造２２ｂは、囲み部材２２ｂ１と、囲み部材２２ｂ１の中に配置される透明固体２２ｂ２と、熱放射体２１において光起電力セル３０と反対側に位置する表面２１ａの一部と、により構成されてもよい。

[0139] 光スペクトル変換素子２０は、上述した第１実施形態及び第２実施形態のいずれか一方のみによって実現されてもよいし、第１実施形態及び第２実施形態の両方を組み合わせて実現されてもよい。例えば、光スペクトル変換素子２０は、放射層２３及び吸収層２４による積層構造の上に透明固体２２ｂ２が配置されるように実現されてもよい。このとき、閉じ込め構造２２ｂは、囲み部材２２ｂ１と、囲み部材２２ｂ１の中に配置される透明固体２２ｂ２及び吸収層２４と、放射層２３において光起電力セル３０と反対側に位置する表面２１ａと、により構成されてもよい。

符号の説明

[0140] １　光電変換装置

１０　集光部

１１　レンズ

１２　シールド

２０　光スペクトル変換素子

２１　熱放射体

２１ａ　表面

２２　受光部

２２ａ　孔

２２ｂ　閉じ込め構造

２２ｂ１　囲み部材

２２ｂ２　透明固体

２３　放射層

２４　吸収層

２４１　吸収層

２４２　吸収層

２４３　吸収層

２４４　吸収層

２５　電極

２６　電源

２７　低屈折率層

３０　光起電力セル

Ｌ　太陽光

請求の範囲

[請求項1] エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が可視域から近赤外域までの範囲に含まれる波長領域に整合するエネルギーを有する第１カーボンナノチューブ（ＣＮＴ）を含み、前記励起子の化学ポテンシャルがゼロよりも高く維持される、熱放射体。

[請求項2] 前記第１ＣＮＴは、半導体型ＣＮＴを含み、

前記波長領域は、光起電力セルの感度領域に対応する、

請求項１に記載の熱放射体。

[請求項3] 前記第１ＣＮＴの直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．５ｎｍの条件を満たす、

請求項２に記載の熱放射体。

[請求項4] 前記直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ２．５ｎｍの条件を満たす、

請求項３に記載の熱放射体。

[請求項5] 前記エネルギー源からのエネルギーは、太陽からの光エネルギーを含む、

請求項２乃至４のいずれか１項に記載の熱放射体。

[請求項6] 前記第１ＣＮＴは、金属型ＣＮＴを含む、

請求項１に記載の熱放射体。

[請求項7] 前記第１ＣＮＴの直径ｄは、１．２ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．５ｎｍの条件を満たす、

請求項６に記載の熱放射体。

[請求項8] 請求項２に記載の熱放射体と、

前記熱放射体に取り付けられ、前記エネルギー源からの光エネルギーを前記熱放射体に伝送する受光部と、

を備える、

光スペクトル変換素子。

[請求項9] 前記熱放射体は、単一種類の前記第１ＣＮＴにより形成される放射層を含み、

前記受光部は、前記第１ＣＮＴとは異なる半導体型の第２ＣＮＴによりそれぞれ形成され、かつ前記放射層に積層される少なくとも１つの吸収層を含む、

請求項８に記載の光スペクトル変換素子。

[請求項10] 前記第２ＣＮＴは、前記エネルギー源からの光エネルギーの吸収によって生成される励起子のエネルギーが前記第１ＣＮＴにおける励起子のエネルギーよりも高くなるような直径とカイラル指数とで特定される、

請求項９に記載の光スペクトル変換素子。

[請求項11] 前記第１ＣＮＴ及び前記第２ＣＮＴの直径は、前記エネルギー源側に位置する層ほど小さくなる、

請求項９又は１０に記載の光スペクトル変換素子。

[請求項12] 前記第１ＣＮＴ及び前記第２ＣＮＴの各々に対して、直径ｄは、０．６ｎｍ≦ ｄ ≦ ３．０ｎｍの条件を満たし、かつカイラル指数（ｎ，ｍ）は、５≦ｎ≦５０及び０≦ｍ≦ｎである整数の組を含む、

請求項９又は１０に記載の光スペクトル変換素子。

[請求項13] 前記放射層及び前記少なくとも１つの吸収層を含む積層体の積層方向における両面の少なくとも一方に積層され、前記第１ＣＮＴ及び前記第２ＣＮＴよりも屈折率が低い材料から形成されている低屈折率層をさらに備える、

請求項９に記載の光スペクトル変換素子。

[請求項14] 前記受光部は、前記エネルギー源からの光を受け入れる孔と、前記孔から入射した前記光を閉じ込めて内部を伝搬させる閉じ込め構造と、を有し、

前記熱放射体の表面は、前記閉じ込め構造の一の面を構成する、

請求項８に記載の光スペクトル変換素子。

[請求項15] 請求項２乃至４のいずれか１項に記載の熱放射体と、

前記熱放射体と同一層として形成され、前記第１ＣＮＴとは異なる

半導体型の第２ＣＮＴを含み、前記エネルギー源からの光エネルギーを前記第２ＣＮＴが吸収して前記第１ＣＮＴに伝送する受光部と、

を備える、

光スペクトル変換素子。

[請求項16] 請求項２乃至４のいずれか１項に記載の熱放射体、又は請求項７に記載の光スペクトル変換素子と、

前記第１ＣＮＴにおける励起子の消滅によって放出された光エネルギーを電気エネルギーに変換する前記光起電力セルと、

を備える、

光電変換装置。

[請求項17] エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が消滅することで可視域から近赤外域までの範囲に含まれる波長領域に整合するエネルギーを有する非平衡熱放射を発生させる熱放射体。

[請求項18] エネルギー源からの光エネルギーに基づいて生成された励起子が光起電力セルの感度領域に整合するエネルギーを有する単一種類の第１半導体型ＣＮＴにより形成される放射層と、

前記第１半導体型ＣＮＴとは異なる第２半導体型ＣＮＴによりそれぞれ形成され、かつ前記放射層に積層される少なくとも１つの吸収層であって、前記エネルギー源からの光エネルギーを前記放射層に伝送する前記吸収層と、

を備える、

光スペクトル変換素子。

[請求項19] エネルギー源からの光エネルギーに基づいて生成された励起子が光起電力セルの感度領域に整合するエネルギーを有する第１半導体型ＣＮＴを含む熱放射体と、

前記熱放射体に取り付けられ、前記エネルギー源からの光エネルギーを前記熱放射体に伝送する受光部と、

を備え、

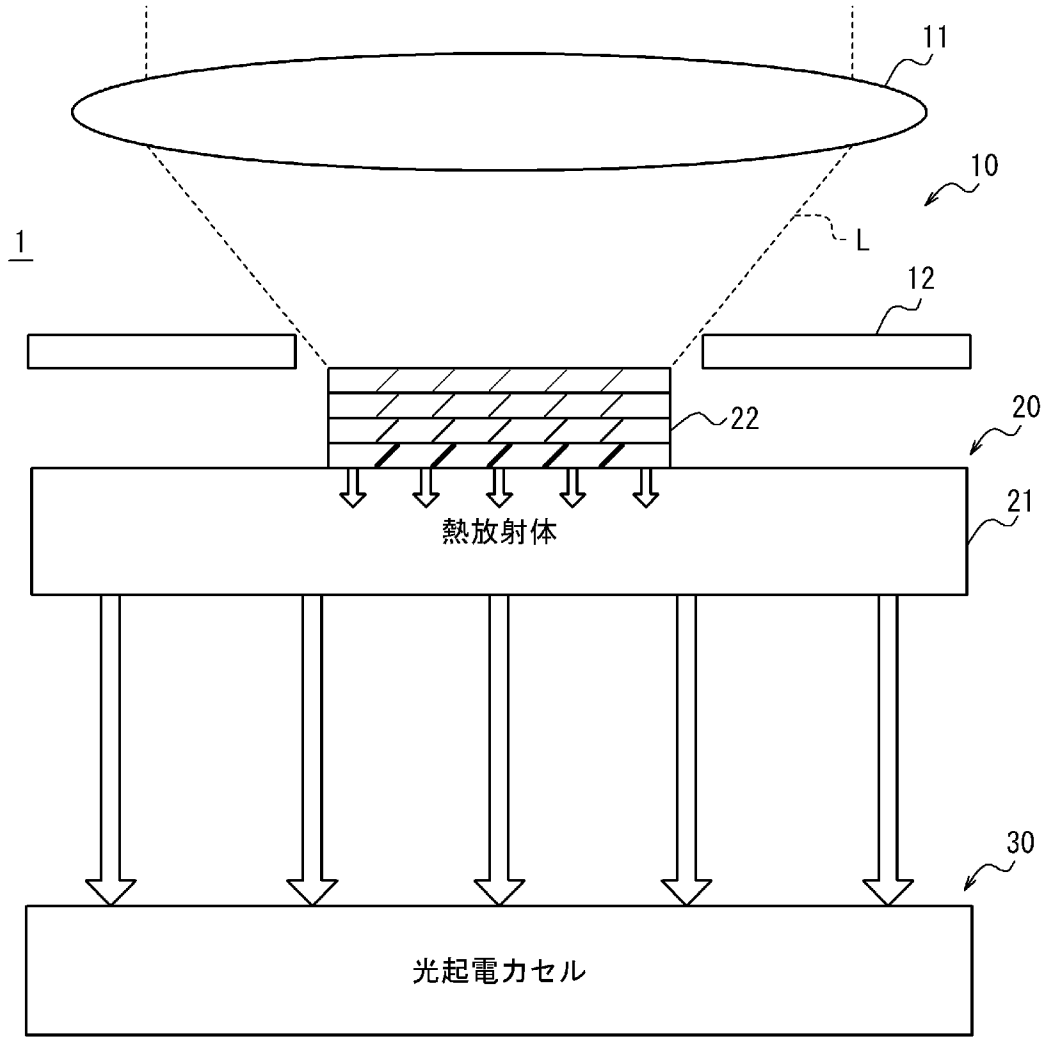
前記受光部は、前記エネルギー源からの光を受け入れる孔と、前記孔から入射した前記光を閉じ込めて内部を伝搬させる閉じ込め構造と、を有し、

前記熱放射体の表面は、前記閉じ込め構造の一の面を構成する、

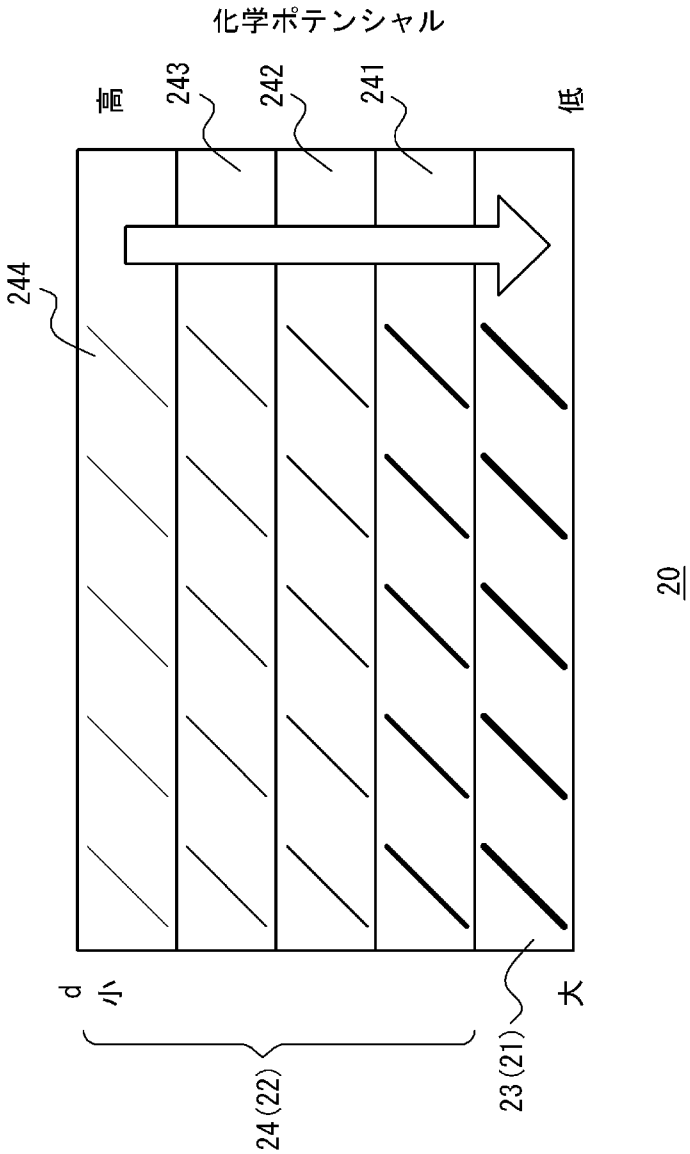
光スペクトル変換素子。

[請求項20] エネルギー源からのエネルギーに基づいて生成された励起子が可視域から近赤外域までの範囲に含まれる波長領域に整合するエネルギーを有する第１ＣＮＴを含む熱放射体を、８００Ｋ以上の動作温度で動作させるステップを含む、熱放射方法。

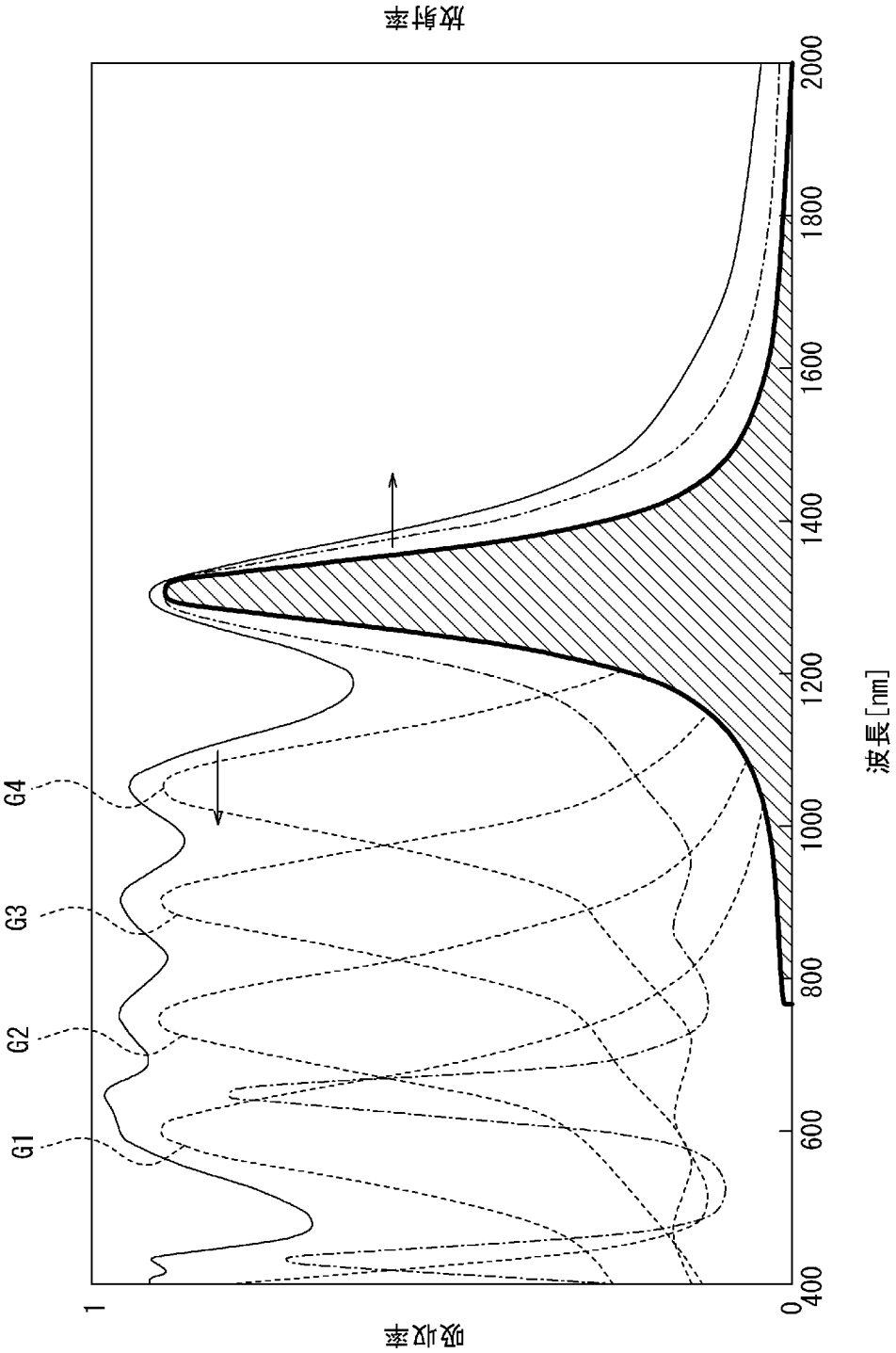
[図1]



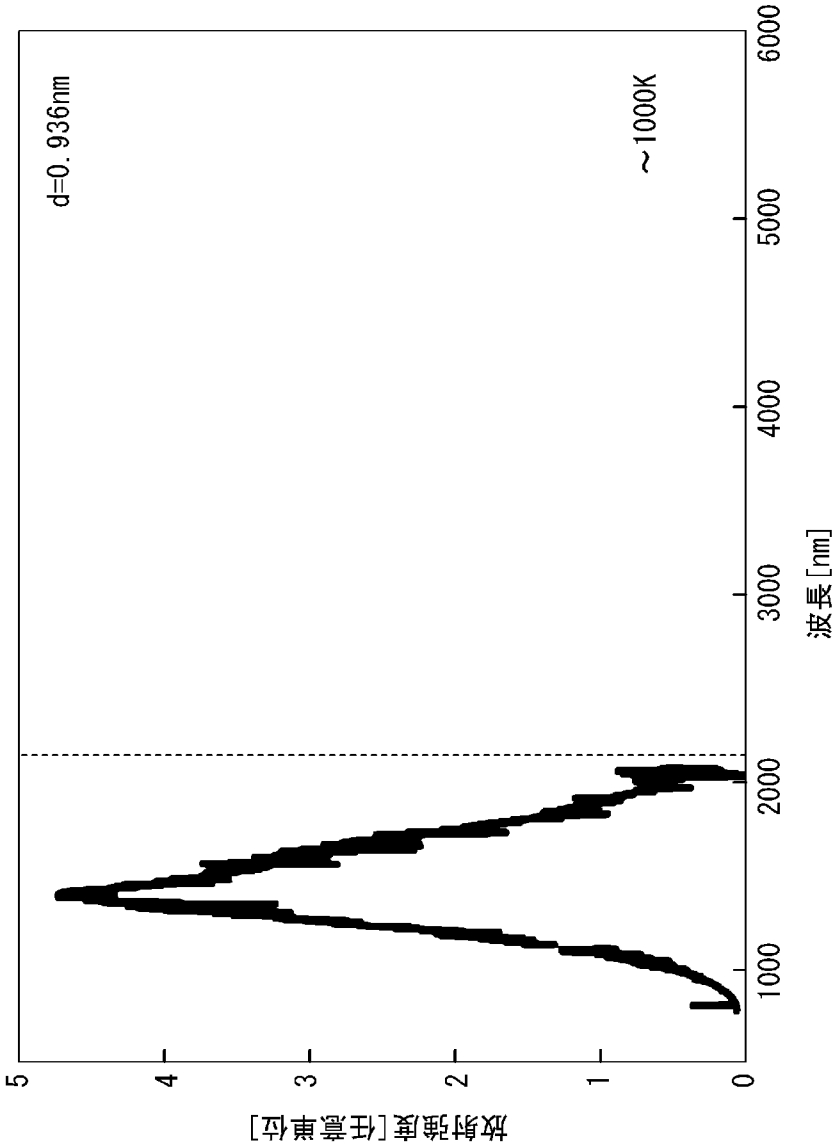
[図2]



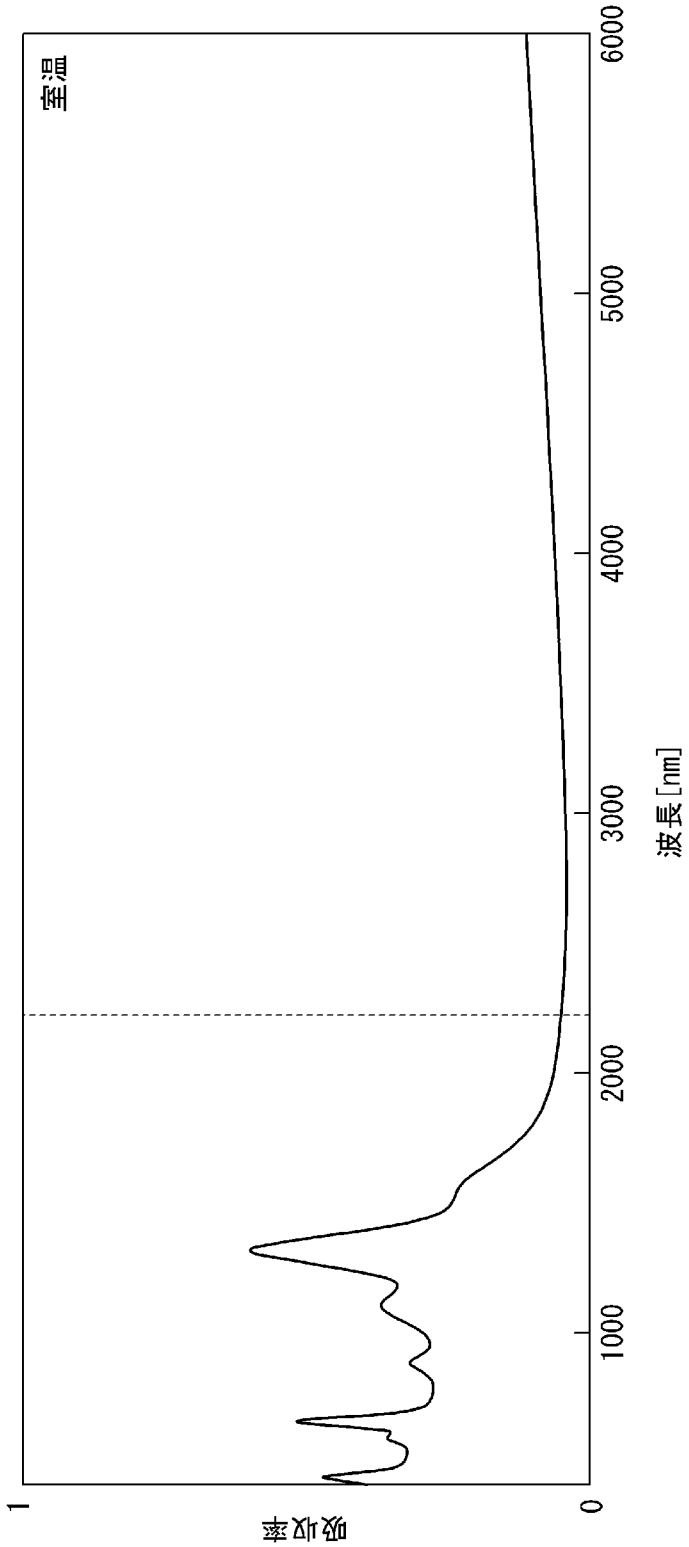
[図3]


吸収率
1
0
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
波長[nm]
G1
G2
G3
G4
放射率

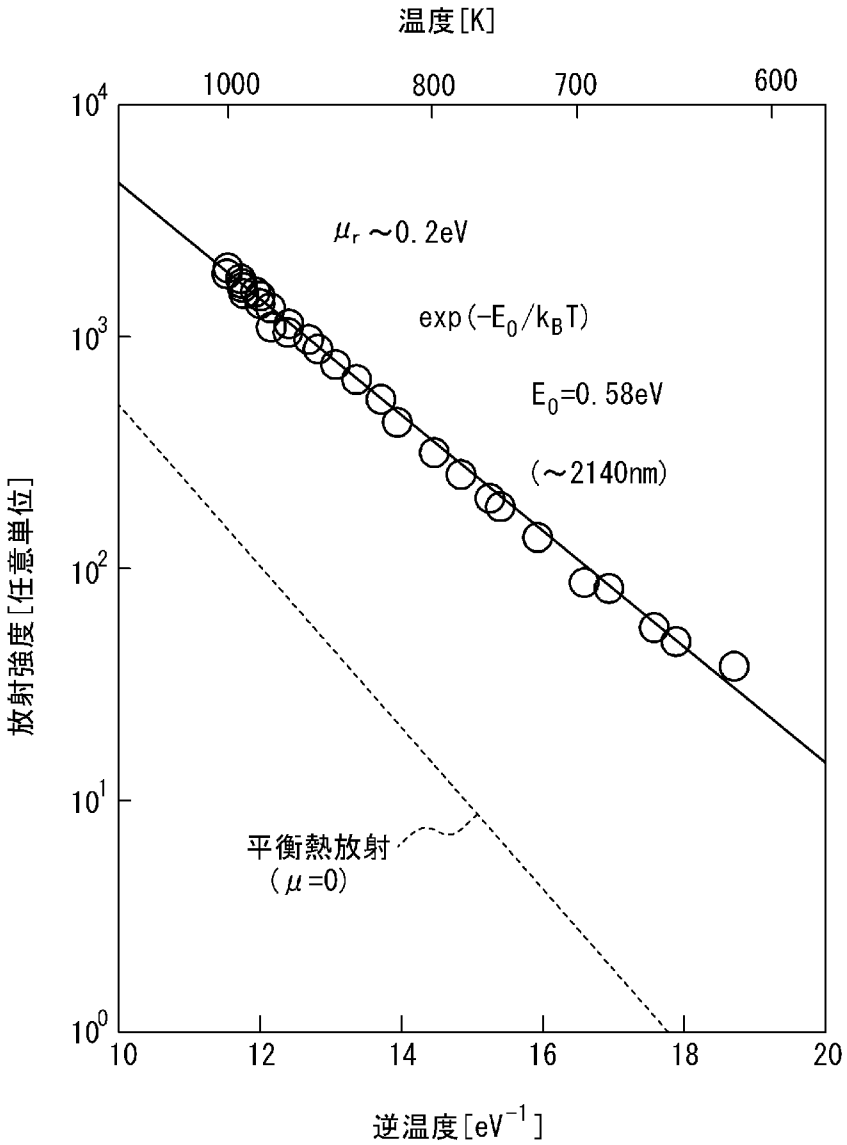
[図4]


d=0.936nm
~1000K
放射強度[任意単位]
0
1
2
3
4
5
1000
2000
3000
4000
5000
6000
波長[nm]

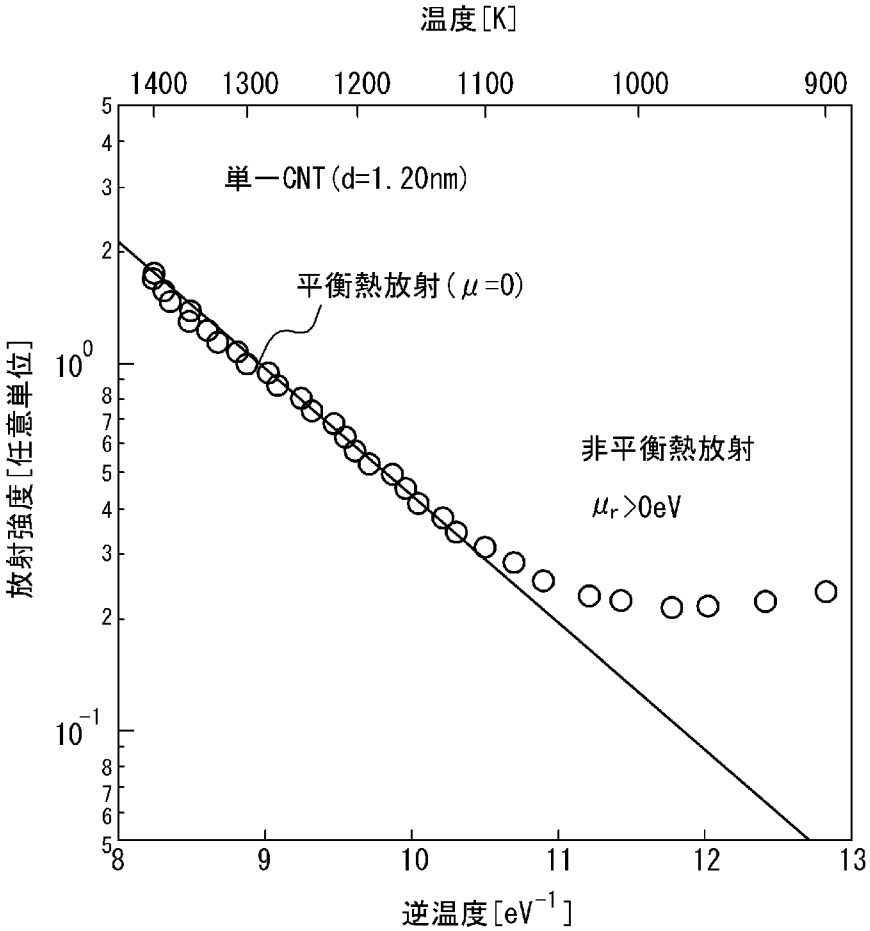
[図5]



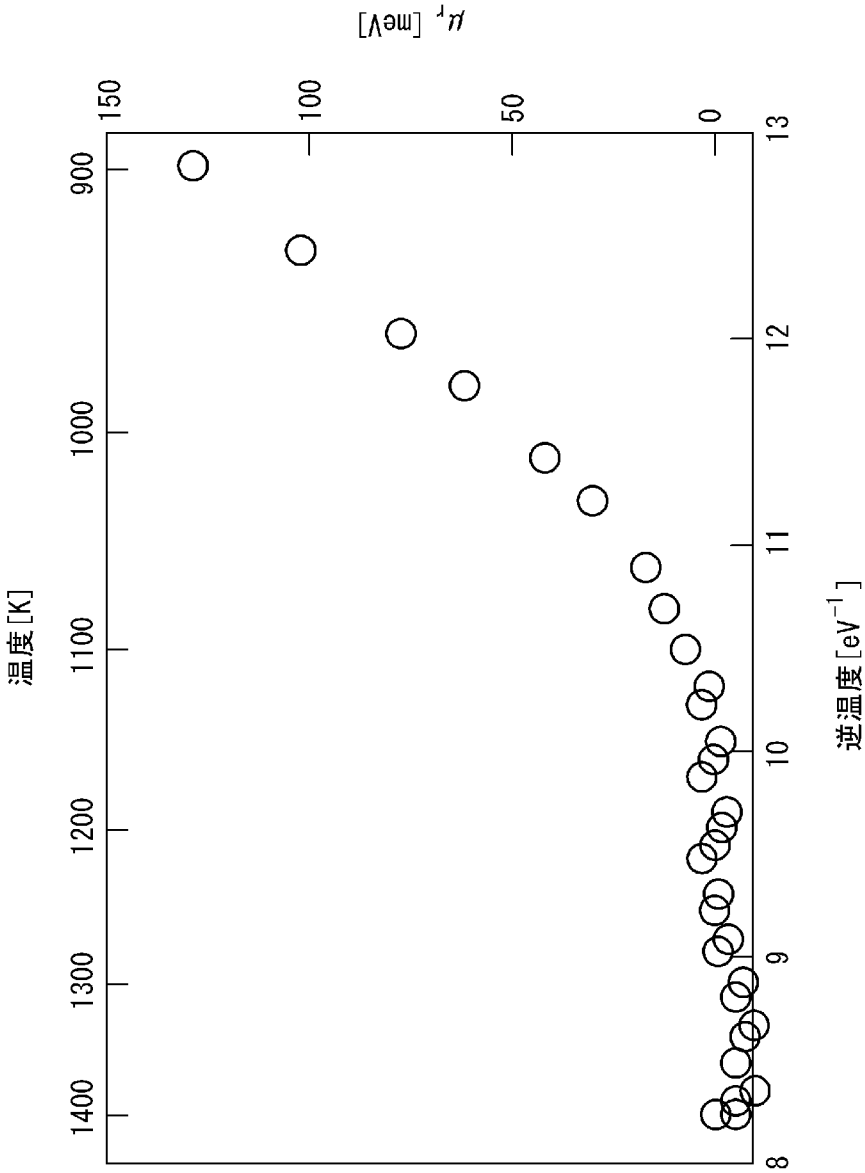
[図6]


温度[K]
1000
800
700
600
10^4
10^3
10^2
10^1
10^0
μ_r ~0.2eV
exp(-E_0/k_BT)
E_0=0.58eV
(~2140nm)
平衡熱放射
(μ=0)
放射強度[任意単位]
10
12
14
16
18
20
逆温度[eV^{-1}]

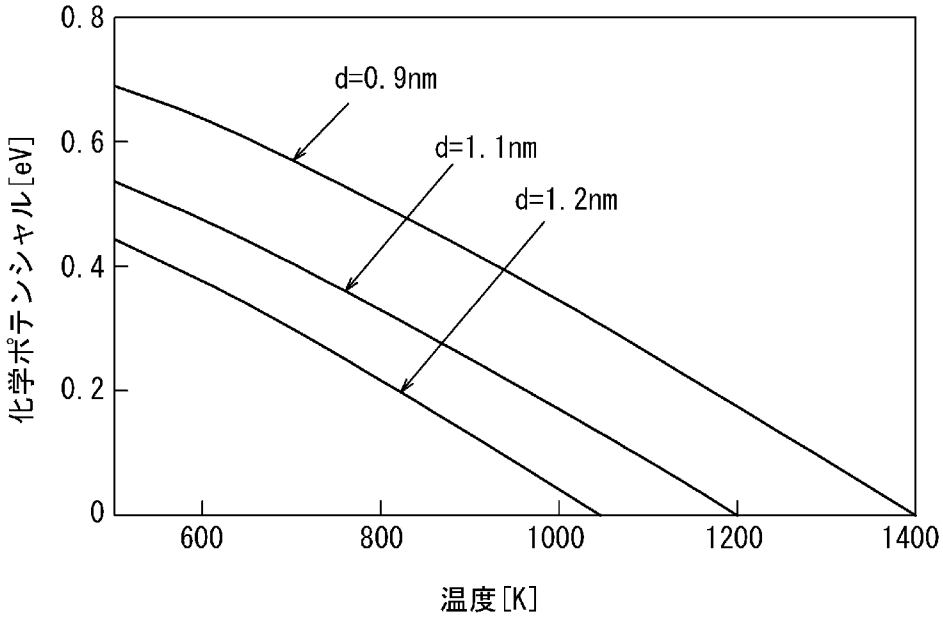
[図7]


温度[K]
1400
1300
1200
1100
1000
900
単一CNT(d=1.20nm)
平衡熱放射(μ=0)
非平衡熱放射
μr>0eV
放射強度[任意単位]
逆温度[eV-1]

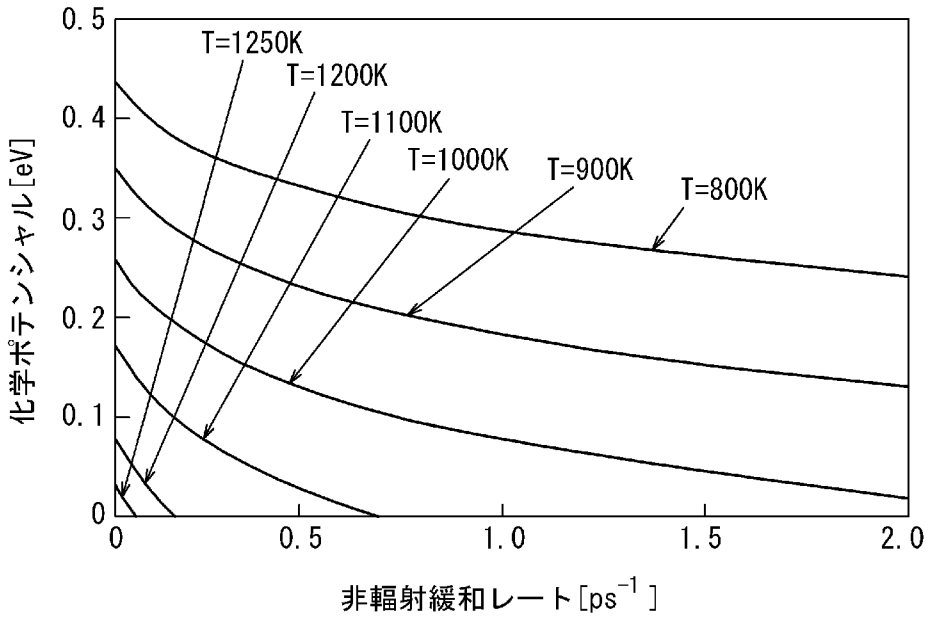
[図8]


温度[K]
1400
1300
1200
1100
1000
900
μ_r [meV]
150
100
50
0
8
9
10
11
12
13
逆温度[eV^{-1}]

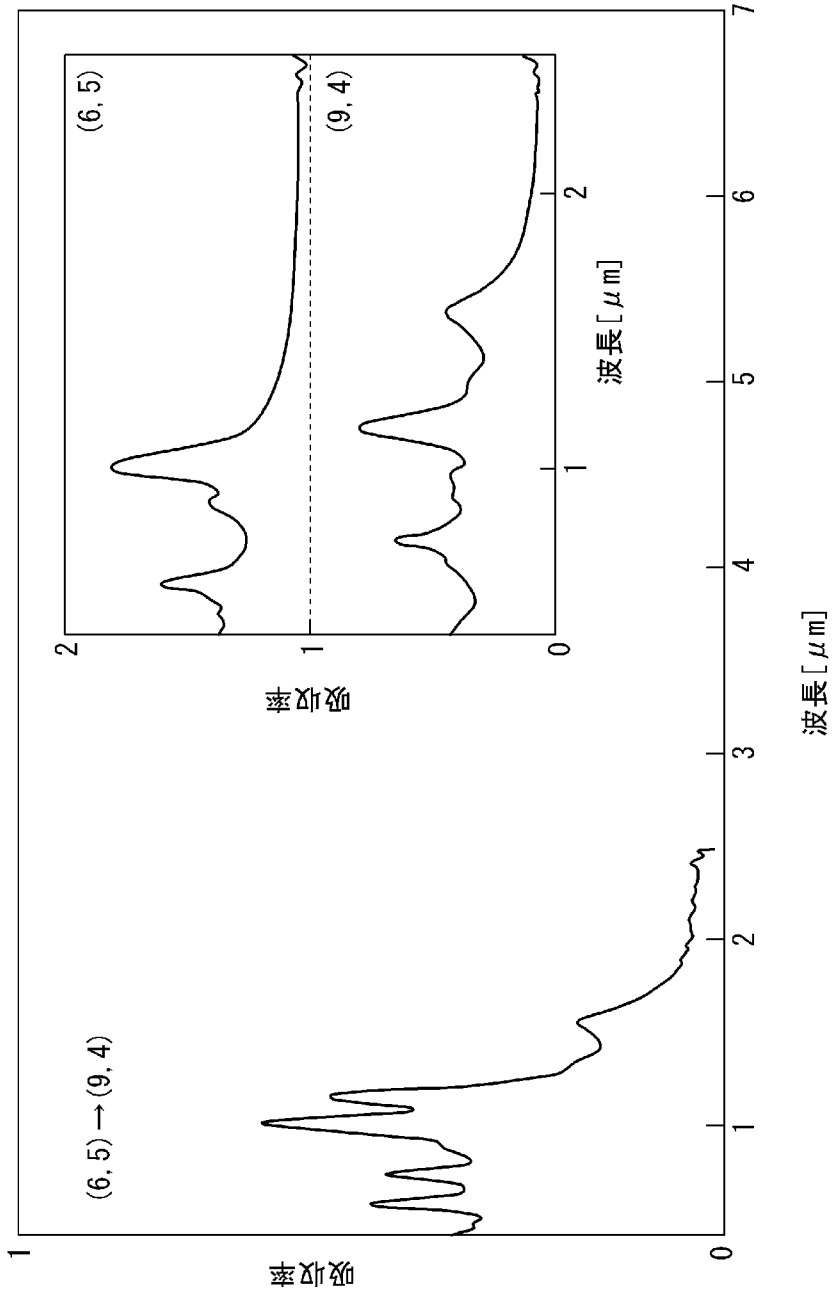
[図9A]


0.8
0.6
0.4
0.2
0
600
800
1000
1200
1400
d=0.9nm
d=1.1nm
d=1.2nm
化学ポテンシャル[eV]
温度[K]

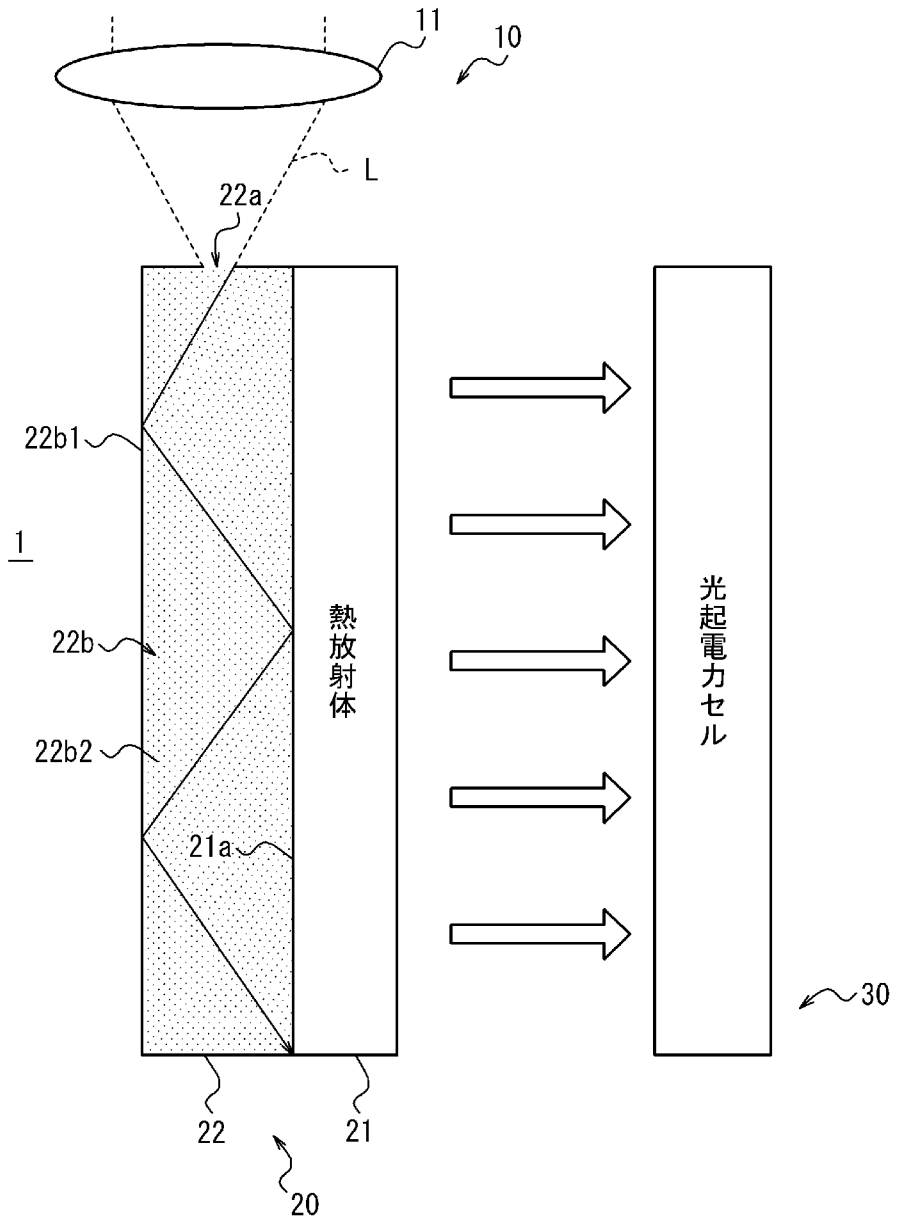
[図9B]


0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
0.5
1.0
1.5
2.0
T=1250K
T=1200K
T=1100K
T=1000K
T=900K
T=800K
化学ポテンシャル[eV]
非輻射緩和レート[ps^{-1}]

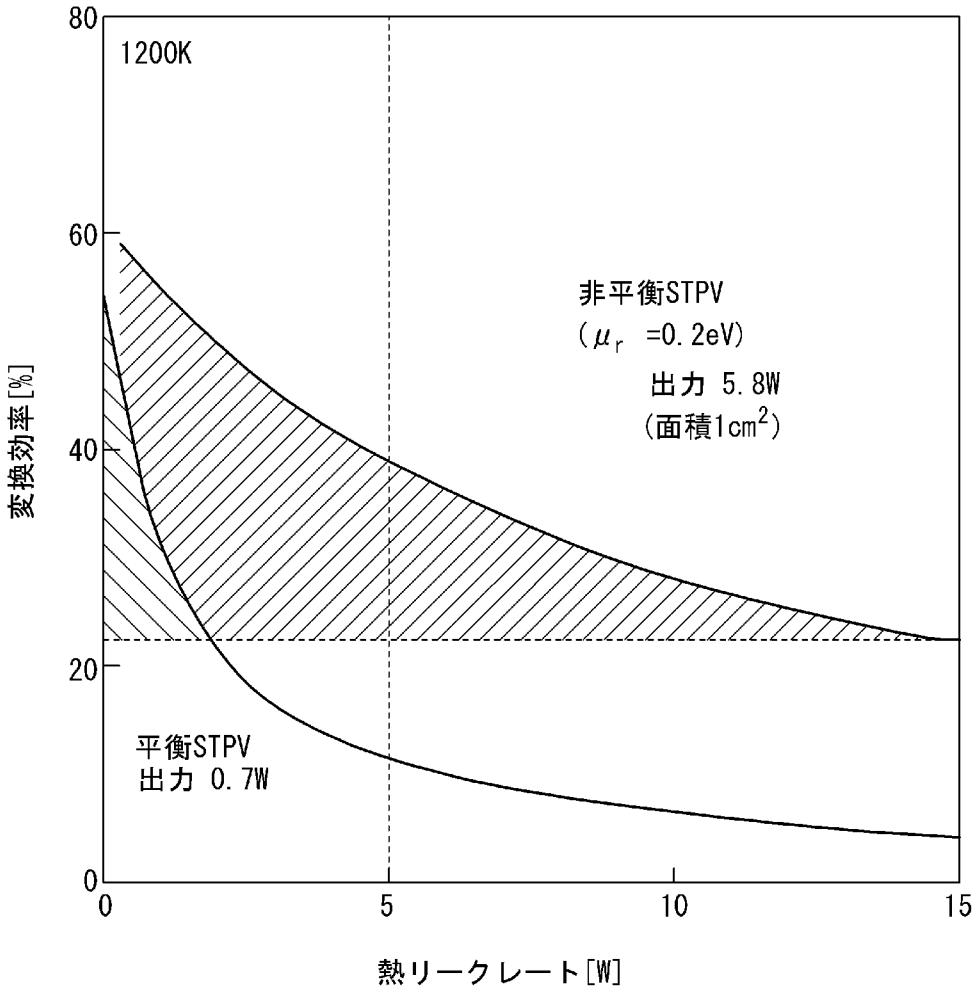
[図10]



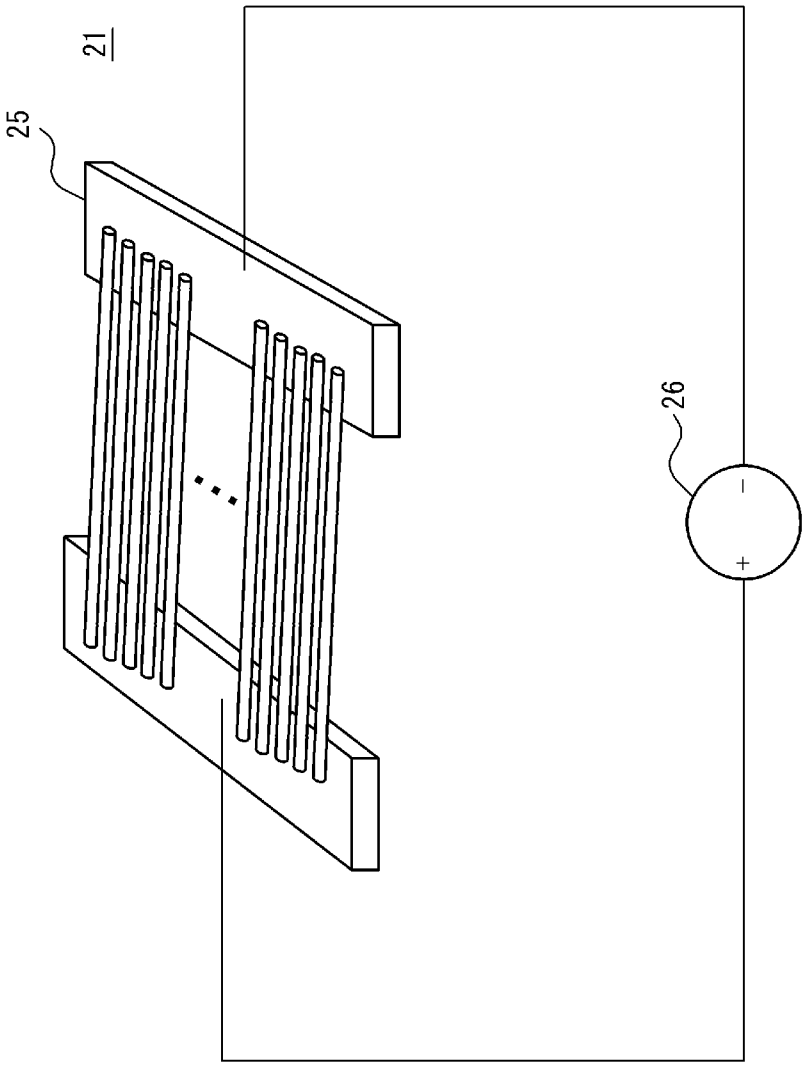
[図11]



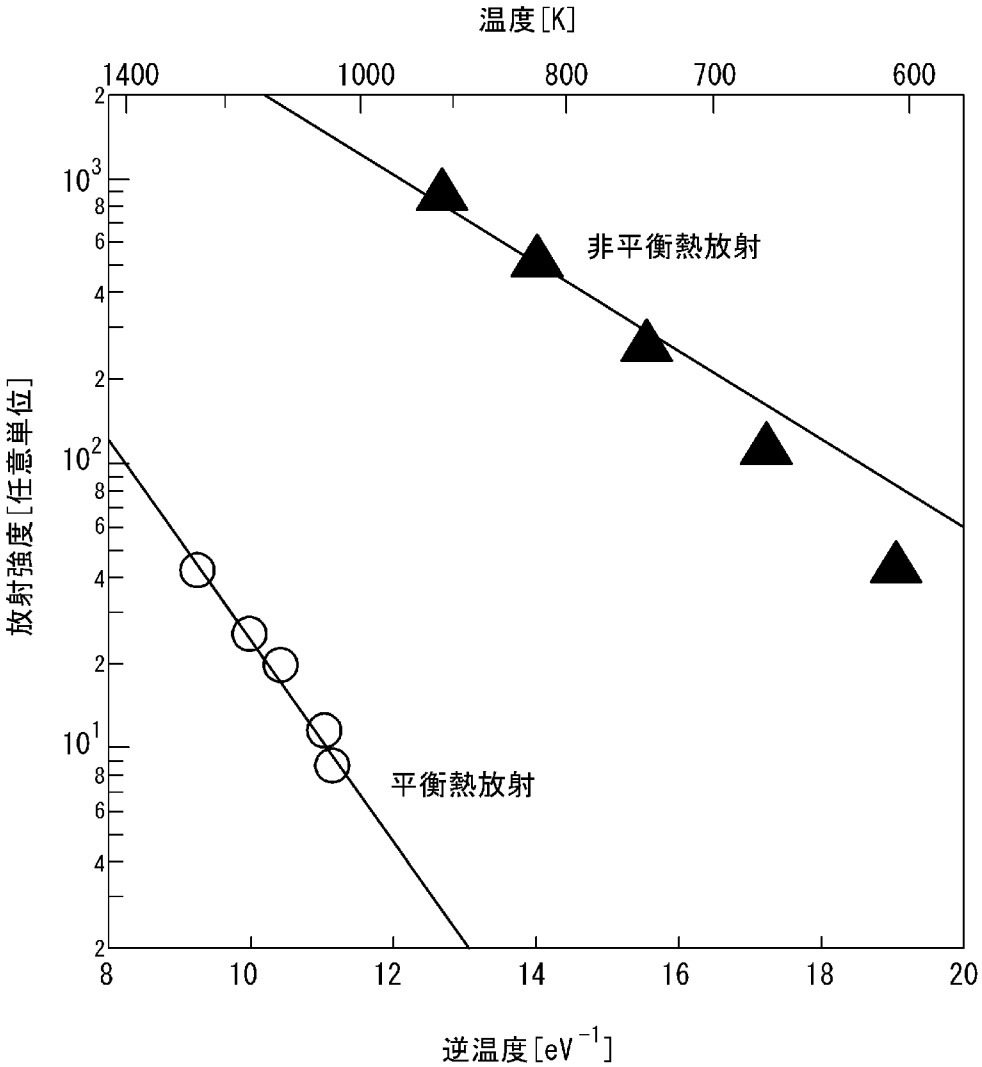
[図12]


80
60
40
20
0
1200K
非平衡STPV
(μr =0.2eV)
出力 5.8W
(面積1cm2)
平衡STPV
出力 0.7W
変換効率[%]
0
5
10
15
熱リークレート[W]

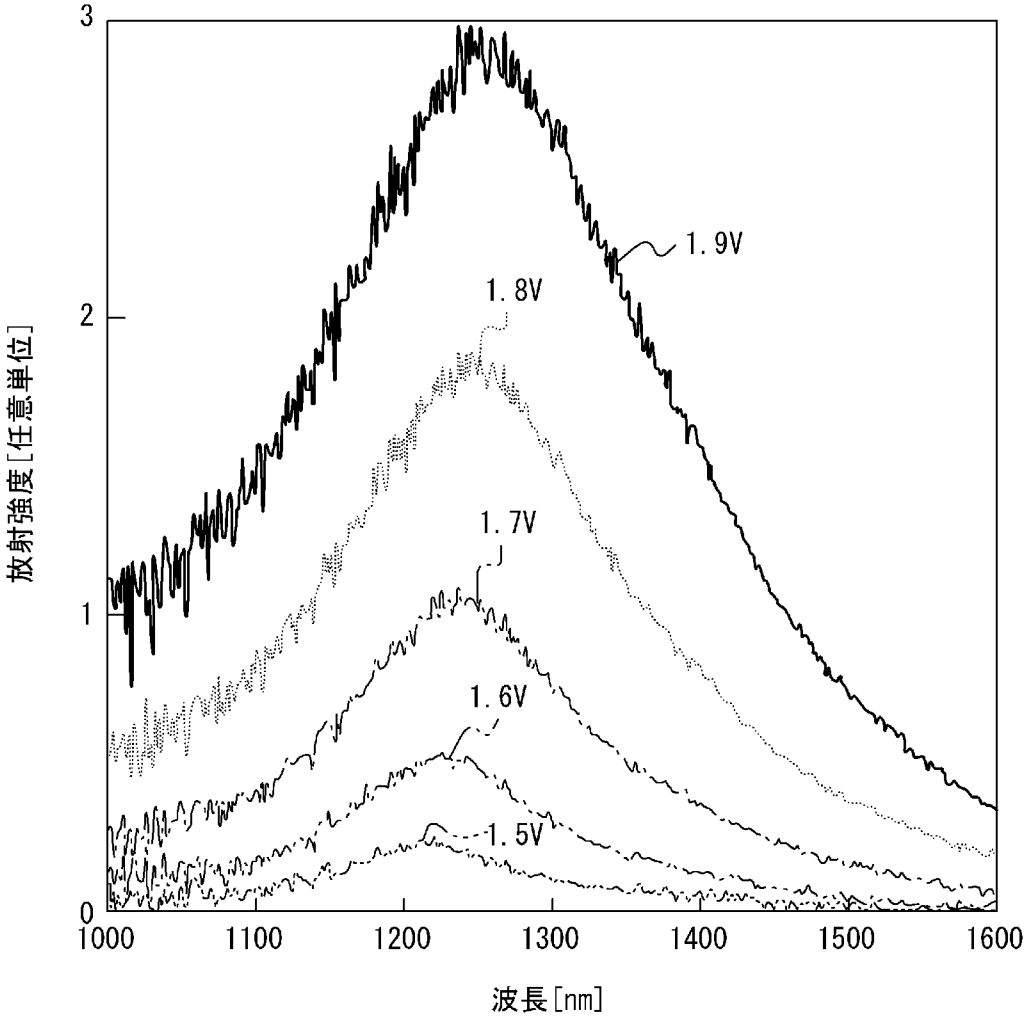
[図13]



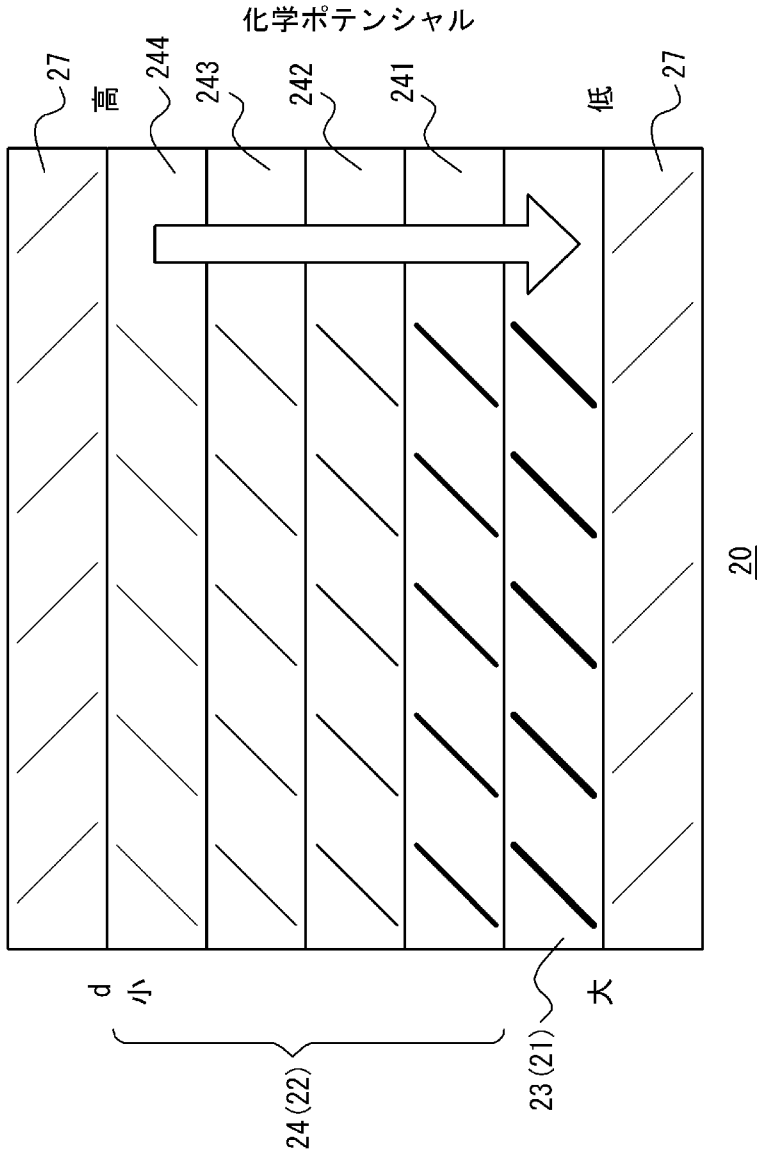
[図14]


温度[K]
1400
1000
800
700
600
放射強度[任意単位]
10^3
10^2
10^1
非平衡熱放射
平衡熱放射
8
10
12
14
16
18
20
逆温度[eV^{-1}]

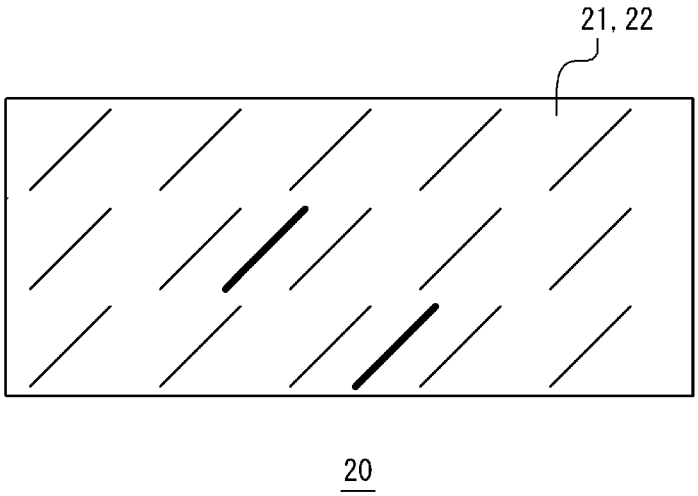
[図15]


3
2
1
0
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600
放射強度[任意単位]
波長[nm]
1.9V
1.8V
1.7V
1.6V
1.5V

[図16]



[図17]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2022/023198

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02S 10/30(2014.01)i; ***C01B 32/168***(2017.01)i
FI: H02S10/30; C01B32/168

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02S10/30

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022
Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus/JST7580 (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2009/0126783 A1 (RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE) 21 May 2009 (2009-05-21) paragraphs [0018]-[0034], fig. 1-6	1-8, 14-17, 19-20
A		9-13, 18
Y	JP 2010-138015 A (TOSHIBA CORP) 24 June 2010 (2010-06-24) paragraphs [0015]-[0023]	1-8, 14-17, 19-20
A		9-13, 18
Y	US 2020/0212840 A1 (TECHNION RESEARCH AND DEVELOPEMENT FOUNDATION LTD.) 02 July 2020 (2020-07-02) paragraphs [0053]-[0061], fig. 3A-3B	1-8, 14-17, 19-20
A		9-13, 18
Y	US 2014/0060604 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 06 March 2014 (2014-03-06) paragraphs [0038], [0041], fig. 3D, 5B	14, 19
A		1-13, 15-18, 20

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
21 July 2022	**02 August 2022**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2022/023198

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2020/0362236 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 19 November 2020 (2020-11-19) fig. 9	1-20
A	US 2016/0164451 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 09 June 2016 (2016-06-09)	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2022/023198

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 2009/0126783 A1	21 May 2009	(Family: none)	
JP 2010-138015 A	24 June 2010	US 2010/0140213 A1 paragraphs [0062]-[0075]	
US 2020/0212840 A1	02 July 2020	WO 2018/185754 A1 CN 110463031 A	
US 2014/0060604 A1	06 March 2014	WO 2014/039289 A1	
US 2020/0362236 A1	19 November 2020	WO 2018/098459 A1	
US 2016/0164451 A1	09 June 2016	WO 2015/116268 A2	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2022/023198

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

H02S 10/30(2014.01)i; C01B 32/168(2017.01)i
FI: H02S10/30; C01B32/168

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

H02S10/30

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２２年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２２年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２２年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus/JST7580 (JDreamIII)

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
Y	US 2009/0126783 A1 (RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE) 21.05.2009 (2009-05-21) ［００１８］－［００３４］、図１－６	1-8, 14-17, 19-20
A		9-13, 18
Y	JP 2010-138015 A (株式会社東芝) 24.06.2010 (2010-06-24) ［００１５］－［００２３］	1-8, 14-17, 19-20
A		9-13, 18
Y	US 2020/0212840 A1 (TECHNION RESEARCH AND DEVELOPEMENT FOUNDATION LTD.) 02.07.2020 (2020-07-02) ［００５３］－［００６１］、図３Ａ－３Ｂ	1-8, 14-17, 19-20
A		9-13, 18
Y	US 2014/0060604 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 06.03.2014 (2014-03-06) ［００３８］、［００４１］、図３Ｄ及び図５Ｂ	14, 19
A		1-13, 15-18, 20

☑ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
"A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
"E" 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
"L" 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
"P" 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献

"T" 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
"X" 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
"Y" 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
"&" 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
21.07.2022	02.08.2022

名称及びあて先

日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）

佐竹　政彦 2K 2911

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2022/023198

C.　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	US 2020/0362236 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 19.11.2020 (2020-11-19) 図９	1-20
A	US 2016/0164451 A1 (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 09.06.2016 (2016-06-09)	1-20

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2022/023198

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
US 2009/0126783 A1	21.05.2009	（ファミリーなし）	
JP 2010-138015 A	24.06.2010	US 2010/0140213 A1 ［００６２］－［００７５］	
US 2020/0212840 A1	02.07.2020	WO 2018/185754 A1 CN 110463031 A	
US 2014/0060604 A1	06.03.2014	WO 2014/039289 A1	
US 2020/0362236 A1	19.11.2020	WO 2018/098459 A1	
US 2016/0164451 A1	09.06.2016	WO 2015/116268 A2	