

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7809909号
(P7809909)

(45)発行日 令和8年2月3日(2026. 2. 3)

(24)登録日 令和8年1月26日(2026. 1. 26)

(51)Int. Cl.	F I
H 1 O N 10/17 (2023. 01)	H 1 O N 10/17 A
H O 2 N 11/00 (2006. 01)	H O 2 N 11/00 A

請求項の数 12 (全 20 頁)

(21)出願番号	特願2023-500842(P2023-500842)	(73)特許権者	503360115 国立研究開発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
(86)(22)出願日	令和4年2月15日(2022. 2. 15)	(74)代理人	100107766 弁理士 伊東 忠重
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/005838	(72)発明者	菅原 聡 東京都目黒区大岡山2-1-2-1 国立大 学法人東京工業大学内
(87)国際公開番号	W02022/176832	(72)発明者	熊谷 颯人 東京都目黒区大岡山2-1-2-1 国立大 学法人東京工業大学内
(87)国際公開日	令和4年8月25日(2022. 8. 25)	審査官	田邊 颯人
審査請求日	令和6年11月12日(2024. 11. 12)		
(31)優先権主張番号	特願2021-22218(P2021-22218)		
(32)優先日	令和3年2月16日(2021. 2. 16)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】熱電変換装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1熱電層および第2熱電層の表面に平行な第1方向に交互に設けられた互いに反対の導電型を有する前記第1熱電層および前記第2熱電層と、

前記第1熱電層と前記第2熱電層との間において前記第1熱電層および前記第2熱電層と電気的および熱的に接続され、前記第1方向に交互に設けられた第1接続層および第2接続層と、

前記第1接続層に熱的に接続し前記表面に交差する第2方向に延伸する第1熱伝導層と、

前記第2接続層に熱的に接続し、前記第1熱伝導層とは前記第1熱電層および前記第2熱電層に対し反対側に設けられ、前記第2方向に延伸する第2熱伝導層と、

前記第1熱伝導層が貫通し、前記第1熱伝導層より熱伝導率が小さい第1絶縁層と、
前記第1熱伝導層が貫通し、前記第1絶縁層より熱伝導率が小さく、前記第1絶縁層と前記第1熱電層および前記第2熱電層との間に設けられた第2絶縁層と、

前記第2熱伝導層が貫通し、前記第2熱伝導層より熱伝導率が小さい第3絶縁層と、
前記第2熱伝導層が貫通し、前記第3絶縁層より熱伝導率が小さく、前記第3絶縁層と前記第1熱電層および前記第2熱電層との間に設けられた第4絶縁層と、

を備え、

前記第2絶縁層と前記第4絶縁層の厚さは、前記第1方向における前記第1熱伝導層の中心と、隣合う前記第2熱伝導層の端との距離のうち大きい方の距離の1/4以上である

熱電変換装置。

【請求項 2】

前記第 2 絶縁層の厚さは前記大きい方の距離の 2 倍以下である請求項 1 に記載の熱電変換装置。

【請求項 3】

前記第 1 絶縁層の厚さは、前記第 2 絶縁層の厚さの $1/2$ 以上である請求項 1 または 2 に記載の熱電変換装置。

【請求項 4】

前記第 2 絶縁層は多孔質であり、前記第 1 絶縁層は非多孔質である請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の熱電変換装置。

【請求項 5】

前記第 2 絶縁層は、前記第 1 熱電層および前記第 2 熱電層と接し、前記第 1 絶縁層と接する請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の熱電変換装置。

【請求項 6】

前記第 4 絶縁層は多孔質であり、前記第 3 絶縁層は非多孔質である請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の熱電変換装置。

【請求項 7】

前記第 4 絶縁層は、前記第 1 熱電層および前記第 2 熱電層と接し、前記第 3 絶縁層と接する請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の熱電変換装置。

【請求項 8】

前記第 2 絶縁層および前記第 4 絶縁層の熱伝導率は、前記第 1 絶縁層および前記第 3 絶縁層の熱伝導率の $1/5$ 倍以下かつ $1/100$ 倍以上である請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の熱電変換装置。

【請求項 9】

前記第 2 絶縁層および前記第 4 絶縁層の熱伝導率は、前記第 1 接続層、前記第 2 接続層、前記第 1 熱伝導層および前記第 2 熱伝導層の熱伝導率の $1/300$ 倍以下かつ $1/30000$ 倍以上である請求項 8 に記載の熱電変換装置。

【請求項 10】

前記第 1 熱電層および前記第 2 熱電層の熱伝導率は、前記第 1 接続層、前記第 2 接続層、前記第 1 熱伝導層および前記第 2 熱伝導層の熱伝導率の $1/50$ 倍以下である請求項 9 に記載の熱電変換装置。

【請求項 11】

前記第 1 熱電層および前記第 2 熱電層の熱伝導率は、前記第 2 絶縁層および前記第 4 絶縁層の熱伝導率より大きい請求項 10 に記載の熱電変換装置。

【請求項 12】

前記第 1 絶縁層および前記第 3 絶縁層は、HSQ 層または酸化シリコン層であり、前記第 2 絶縁層および前記第 4 絶縁層はポーラスシリカである請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の熱電変換装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、熱電変換装置に関する。

【背景技術】

【0002】

熱電材料から構成される熱電層と熱電層を接続する接続層とを平面方向に交互配置し、接続層から平面に直交する方向に熱伝導層を介し熱を引き出すトランスパース型 μ TEG (μ TEG: Micro Thermoelectric Generator) が知られている (例えば特許文献 1)。トランスパース型 μ TEG は、温度差の小さい体温を用いた熱電発電に応用することができる。熱伝導率が異なる積層された絶縁層 (ベース基板および断熱基板) に引き出し電極を埋め込むことが知られている (例えば特許文献 2)。

10

20

30

40

50

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】国際公開第2018/042708号

【特許文献2】特開2009-158760号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

特許文献2の図8では、ベース基板(A1、B1)の熱電材料(5a~5h、6a~6h)側に断熱性の高い断熱基板(A2、B2)を設けている。特許の断面図面では平面方向と高さ方向の縮尺は異なることが一般的であり、特許文献2には、断熱基板(A2、B2)の厚さについての記載はない。特許文献2の0057段落では、平面方向に配置された放熱側電極(3a~3i)と吸熱側電極(2a~2h、8a~8i)との間において、熱流が熱電材料(5a~5h、6a~6h)を迂回することを問題としている。平面方向の熱流が問題の場合、断熱基板(A2、B2)が薄くても平面方向の熱流の迂回を抑制することができると考えられる。しかしながら、平面方向の熱流を考慮するだけでは、熱電材料(5a~5h、6a~6h)を迂回する熱流を抑制できず、熱電変換装置の出力電力が小さくなる。

10

【0005】

本発明は、上記課題に鑑みなされたものであり、出力電力の大きな熱電変換装置を提供することを目的とする。

20

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明は、第1熱電層および第2熱電層の表面に平行な第1方向に交互に設けられた互いに反対の導電型を有する前記第1熱電層および前記第2熱電層と、前記第1熱電層と前記第2熱電層との間において前記第1熱電層および前記第2熱電層と電気的および熱的に接続され、前記第1方向に交互に設けられた第1接続層および第2接続層と、前記第1接続層に熱的に接続し前記表面に交差する第2方向に延伸する第1熱伝導層と、前記第1熱伝導層が貫通し、前記第1熱伝導層より熱伝導率が小さい第1絶縁層と、前記第1熱伝導層が貫通し、前記第1絶縁層より熱伝導率が小さく、前記第1絶縁層と前記第1熱電層および前記第2熱電層との間に設けられ、前記第1熱伝導層の前記第1熱電層側の端と前記第2接続層の前記第1方向における中心との距離と、前記第1熱伝導層の前記第2熱電層側の端と前記第2接続層の前記第1方向における中心との距離と、のうち大きい方の距離の1/4以上の厚さを有する第2絶縁層と、を備える熱電変換装置である。

30

【0007】

上記構成において、前記第2接続層に熱的に接続し、前記第1熱伝導層とは前記第1熱電層および前記第2熱電層に対し反対側に設けられ、前記第2方向に延伸する第2熱伝導層と、前記第2熱伝導層が貫通し、前記第2熱伝導層より熱伝導率が小さい第3絶縁層と、前記第2熱伝導層が貫通し、前記第3絶縁層より熱伝導率が小さく、前記第3絶縁層と前記第1熱電層および前記第2熱電層との間に設けられ、前記大きい方の距離の1/4以上の厚さを有する第4絶縁層と、を備える構成とすることができる。

40

【0008】

上記構成において、前記第2絶縁層の厚さは前記大きい方の距離の2倍以下である構成とすることができる。

【0009】

上記構成において、前記第1絶縁層の厚さは、前記第2絶縁層の厚さの1/2以上である構成とすることができる。

【0010】

上記構成において、前記第2絶縁層は多孔質であり、前記第1絶縁層は非多孔質である構成とすることができる。

50

【0011】

上記構成において、前記第2絶縁層は、前記第1熱電層および前記第2熱電層と接し、前記第1絶縁層と接する構成とすることができる。

【0012】

上記構成において、前記第4絶縁層は多孔質であり、前記第3絶縁層は非多孔質である構成とすることができる。

【0013】

上記構成において、前記第4絶縁層は、前記第1熱電層および前記第2熱電層と接し、前記第3絶縁層と接する構成とすることができる。

【0014】

上記構成において、前記第2絶縁層は、前記第1熱電層および前記第2熱電層と接し、前記第1絶縁層と接し、前記第2絶縁層の厚さは前記大きい方の距離の2倍以下であり、前記第4絶縁層の厚さは前記大きい方の距離の2倍以下である構成とすることができる。

10

【0015】

上記構成において、前記第2絶縁層および前記第4絶縁層の熱伝導率は、前記第1絶縁層および前記第2絶縁層の熱伝導率の1/5倍以下かつ1/100倍以上である構成とすることができる。

【0016】

上記構成において、前記第2絶縁層および前記第4絶縁層の熱伝導率は、前記第1接続層、前記第2接続層、前記第1熱伝導層および前記第2熱伝導層の熱伝導率の1/300倍以下かつ1/30000倍以上である構成とすることができる。

20

【0017】

上記構成において、前記第1熱電層および前記第2熱電層の熱伝導率は、前記第1接続層、前記第2接続層、前記第1熱伝導層および前記第2熱伝導層の熱伝導率の1/50倍以下である構成とすることができる。

【0018】

上記構成において、前記第1熱電層および前記第2熱電層の熱伝導率は、前記第2絶縁層および前記第4絶縁層の熱伝導率より大きい構成とすることができる。

【0019】

上記構成において、前記第1絶縁層および前記第3絶縁層は、HSQ層または酸化シリコン層であり、前記第2絶縁層および前記第4絶縁層はポラスシリカである構成とすることができる。

30

【0020】

上記構成において、前記第1熱伝導層の前記第1熱電層側の端と前記第2接続層の前記第1方向における中心との距離と、前記第1熱伝導層の前記第2熱電層側の端と前記第2接続層の前記第1方向における中心との距離と、は同じである構成とすることができる。

【発明の効果】

【0021】

本発明によれば、出力電力の大きな熱電変換装置を提供することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】図1(a)は、実施例1における熱電変換装置の平面図、図1(b)は、図1(a)のA-A断面図である。

【図2】図2は、実施例1における熱電変換装置の拡大断面図である。

【図3】図3(a)は、実施例1における熱電変換モジュールの平面図、図3(b)は、図3(a)のA-A断面図である。

【図4】図4は、比較例1における熱流を示す図である。

【図5】図5(a)および図5(b)は、それぞれ規格化Xおよび規格化Zに対する規格化熱流を示す図である。

50

【図 6】図 6 は、比較例 1 における熱流を示す図である。

【図 7】図 7 (a) および図 7 (b) は、それぞれ規格化 X および規格化 Z に対する規格化熱流を示す図である。

【図 8】図 8 (a) から図 8 (c) は、実施例 1 における $t_{ins,1}$ に対する P_{out} を示す図である。

【図 9】図 9 (a) から図 9 (e) は、各サンプルにおける出力電圧 V_{out} に対する電流 I および出力電力 P_{out} を示す図である。

【図 10】図 10 は、実施例 1 の変形例 1 における熱電変換装置の拡大断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0023】

特許文献 2 の図 8 では、上述のように断熱基板 (A 2 、 B 2) の厚さについての記載はない。機械的強度が低い断熱基板 (A 2 、 B 2) が厚いと熱電変換装置の機械的強度が低くなる。断熱基板 (A 2 、 B 2) が薄いと熱電変換装置の性能が低下する。また、特許文献 2 の図 8 では熱電材料 (5 a ~ 5 h 、 6 a ~ 6 h) と断熱基板 (B 2) との間に空間 1 5 (すなわち空隙) が設けられている。熱電材料と断熱基板との間に空隙が設けられると、熱電変換装置の強度が弱くなってしまふ。

【0024】

そこで、空隙を有さない熱電変換装置について、発明者らが開発した高精度な分布定数回路モデルを用いシミュレーションした。分布定数回路モデルでは、各材料の熱伝導率を考慮することで、精度の高いシミュレーションが可能となった。シミュレーションの結果、機械的強度を確保しつつ、出力電力等の性能の低下を抑制できる構造が初めて明らかになった。以下に、その実施例とシミュレーション結果について説明する。

【実施例 1】

【0025】

図 1 (a) は、実施例 1 における熱電変換装置の平面図、図 1 (b) は、図 1 (a) の A - A 断面図である。図 2 は、実施例 1 における熱電変換装置の拡大断面図である。図 1 (a) では、熱電層、接続層および電極を図示している。熱電層 1 2 a および 1 2 b の表面を XY 平面とし、熱電層 1 2 a および 1 2 b の配列方向 (幅方向) および延伸方向 (長さ方向) をそれぞれ X 方向および Y 方向とし、各層の積層方向を Z 方向としている。

【0026】

図 1 (a) 、図 1 (b) および図 2 に示すように、熱電変換装置 3 0 では、熱電層 1 2 a (第 1 熱電層) および熱電層 1 2 b (第 2 熱電層) は Y 方向に延伸する短冊状である。熱電層 1 2 a および 1 2 b は、X 方向 (表面に平行な第 1 方向) に交互に設けられている。熱電層 1 2 a および 1 2 b は、それぞれ n 型および p 型であり、互に反対の導電型を有する。隣接する熱電層 1 2 a と 1 2 b とは、X 方向において交互に接続層 1 4 a (第 1 接続層) および 1 4 b (第 2 接続層) に電気的および熱的に接続されている。接続層 1 4 a および 1 4 b は Y 方向に延伸している。一对の熱電層 1 2 a と 1 2 b とは 1 つのゼーベック素子 1 0 を形成する。複数のゼーベック素子 1 0 は、電極 2 4 a と 2 4 b との間に直列に接続されている。

【0027】

接続層 1 4 a および 1 4 b はそれぞれ - Z 方向および + Z 方向 (表面に交差する第 2 方向) において熱伝導層 1 6 a (第 1 熱伝導層) および 1 6 b (第 2 熱伝導層) と熱的に接続されている。熱伝導層 1 6 a および 1 6 b は電気的な絶縁膜 2 0 a および 2 0 b をそれぞれ介し基部 2 2 a および 2 2 b に熱的にそれぞれ接続されている。熱伝導層 1 6 a および 1 6 b はそれぞれ絶縁層 1 8 a および 1 8 b を貫通する。絶縁層 1 8 a は、絶縁層 1 7 a (第 1 絶縁層) と 1 7 b (第 2 絶縁層) とを備えている。絶縁層 1 7 b は絶縁層 1 7 a とゼーベック素子 1 0 および接続層 1 4 a および 1 4 b との間に設けられている。絶縁層 1 8 b は、絶縁層 1 7 c (第 3 絶縁層) と 1 7 d (第 4 絶縁層) とを備えている。絶縁層 1 7 d は絶縁層 1 7 c とゼーベック素子 1 0 および接続層 1 4 a および 1 4 b との間に設けられている。絶縁層 1 7 b および 1 7 d は、熱電層 1 2 a および 1 2 b にそれぞれ接し、

10

20

30

40

50

熱伝導層 16 a および 16 b にそれぞれ接する。絶縁層 17 a および 17 c は、絶縁層 17 b および 17 d にそれぞれ接し、絶縁膜 20 a および 20 b にそれぞれ接し、熱伝導層 16 a および 16 b に接する。絶縁層 17 a および 17 c の熱伝導率は接続層 14 a、14 b、熱伝導層 16 a および 16 b より小さく、絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率は絶縁層 17 a および 17 c の熱伝導率より小さい。

【0028】

図3(a)は、実施例1における熱電変換モジュールの平面図、図3(b)は、図3(a)のA-A断面図である。図3(a)および図3(b)に示すように、熱電変換モジュール100では、基部22aと22bとは対向している。基部22bの上面にはヒートシンク33が熱的に接続されている。基部22aの基部22bに対向する面は凸部を有する。基部22aは、基部22bの方に突出した領域35と突出していない領域36とを有する。領域36における基部22aと22bとの間隔Hは、領域35における基部22aと22bとの間隔より大きい。例えば基部22bは平板状であり、基部22aは平板に凸部が設けられた形状である。基部22bの下面に凸部が設けられていてもよく、基部22aの上面および22bの下面の両方に凸部が設けられていてもよい。基部22a、22bおよび領域35の平面形状として正方形を例に図示したが、これらの平面形状は任意に選択できる。

10

【0029】

基部22aおよび22bの周縁における基部22aと22bとの間に支持体34が設けられている。支持体34に囲まれた基部22aと22bとの間に熱絶縁体32が設けられている。熱絶縁体32は例えば大気圧より低い圧力を有する気体または真空である。支持体34は、熱絶縁体32の圧力または真空を維持する。支持体34は基部22aと基部22bとを機械的に支持する。熱絶縁体32の熱伝導率は熱電変換装置30、基部22a、22bおよび支持体34の熱伝導率より小さい。

20

【0030】

熱電変換装置30は複数のブロック31a~31cを有している。各ブロック31a~31cでは、複数の熱電層12aおよび12bが交互にX方向に配列されている。複数のブロック31aから31cはY方向に配列されている。電極24cはブロック31aと31bとを接続し、電極24dはブロック31bと31cとを接続する。これにより、ゼーベック素子10は電極24aと24bとの間に直列に接続される。その他の熱電変換装置30の構成は図1(a)から図2と同じであり、説明を省略する。

30

【0031】

使用温度が室温近傍または数100程度までの応用では、熱電層12aおよび12bに用いる熱電材料として、ビスマステルル系合金、フルホイスラー系合金またはハーフホイスラー系合金とすることができる。ビスマステルル系合金は、n型として例えば $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ 、およびp型として例えば $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ である。フルホイスラー系合金は、n型として例えば $\text{Fe}_2\text{VAl}_{1-x}\text{Ge}_x$ 、 $\text{Fe}_2\text{VAl}_{1-x}\text{Si}_x$ または $\text{Fe}_2\text{VTa}_x\text{Al}_{1-x}$ 、およびp型として例えば $\text{Fe}_2\text{V}_{1-x}\text{W}_x\text{Al}$ 、 $\text{Fe}_2\text{V}_{1-x}\text{Ti}_x\text{Al}$ または $\text{Fe}_2\text{V}_{1-x}\text{Ti}_x\text{Ga}$ 、その他例えば Fe_2NbGa 、 Fe_2HfSi 、 Fe_2TaIn 、 Fe_2TiSn または Fe_2ZrGe を母体とした材料である。ハーフホイスラー系合金は、n型として例えば TiPtSn 、 $(\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{NiSn}$ または NbCoSn 、およびp型として例えば $\text{TiCoSn}_x\text{Sb}_{1-x}$ 、 $\text{Zr}(\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Sn}$ 、 $\text{Zr}(\text{Ni}_{1-x}\text{In}_x)\text{Sn}$ 、 HfPtSn である。n型熱電材料とp型熱電材料とを同系の材料とすることで、熱電層12aおよび12bの作製が容易となる。また、使用する温度領域が室温より十分に高い場合には、熱電層12aおよび12bに用いる熱電材料として、Si、SiGe合金またはGeSn合金を用いることもできる。

40

【0032】

熱電層12aおよび12bは、例えばそれぞれn型およびp型を有する上記例示した材料を用いる。熱電層12aと12bとは、上記例示した材料のうち異なる材料系を用いて

50

もよい。また、熱電層 1 2 a および 1 2 b の一方を n 型または p 型の上記例示した材料を用い、熱電層 1 2 a および 1 2 b の他方を熱電材料ではない適切な金属で置き換えてもよい。

【 0 0 3 3 】

接続層 1 4 a および 1 4 b としては電気伝導率および熱伝導率が大きな材料が好ましく、例えば Cu、Al、Au または Ag 等の金属層を用いることができる。接続層 1 4 a と 1 4 b とは異なる材料でもよい。

【 0 0 3 4 】

絶縁層 1 7 a および 1 7 c として、例えば酸化シリコン等の無機絶縁体、アルキル基含有シリカもしくは同様の酸化物および絶縁体（例えば、水素シルセスキオキサン）、樹脂（例えばアクリル樹脂、エポキシ樹脂、塩化ビニル樹脂、シリコーン樹脂、フッ素樹脂、フェノール樹脂、ベークライト樹脂、ポリエチレン樹脂、ポリカーボネイト樹脂、ポリスチレン樹脂、ポリプロピレン樹脂）もしくはゴム（天然ゴム、エチレンプロピレンゴム、クロロプレンゴム、シリコーンゴム、ブチルゴムもしくはポリウレタンゴム）等を用いることができる。絶縁層 1 7 b および 1 7 d として、上記絶縁体の多孔質（例えばポーラスシリコンまたはポーラスシリカ）を用いることができる。ポーラスシリコンは、例えば高抵抗シリコンを用いたポーラスシリコンである。ポーラスシリカは、例えばポーラスシリコンを酸化等により電気的および熱的に絶縁体としたポーラスシリカである。絶縁層 1 8 a および 1 8 b は、CVD（Chemical Vapor Deposition）法、スパッタ法またはスピコート法を用い形成できる。

【 0 0 3 5 】

基部 2 2 a および 2 2 b としては、熱伝導率が大きい材料が好ましく、例えば Cu、Al、Au もしくは Ag 等の金属、Si もしくはアルミナなどのセラミックス等を用いることができる。電気的絶縁膜 2 0 a および 2 0 b は電気的な絶縁性が高く熱伝導性が高い材料が好ましく、例えば酸化アルミニウム膜等である。絶縁膜 2 0 a および 2 0 b は基部 2 2 a および 2 2 b にスパッタ法または CVD 法を用い形成してもよい。基部 2 2 a および 2 2 b が電気的な絶縁体の場合、絶縁膜 2 0 a および 2 0 b は用いなくてもよい。基部 2 2 a および 2 2 b の少なくとも一方は、スパッタ法または CVD 法を用い形成できる。これにより、基部 2 2 a および 2 2 b を薄膜化できる。基部 2 2 a および 2 2 b の少なくとも一方は、メッキ法で形成できる。これにより、基部 2 2 a および 2 2 b をある程度厚い膜にすることができる。基部 2 2 a および 2 2 b の少なくとも一方を酸化膜またはセラミックスとする場合、スピコート等による塗布膜を用いることができる。基部 2 2 a および 2 2 b として、熱交換特性および放熱特性の高い構造（例えばフィン構造またはヒートシンク構造）および材料（例えば放熱シート、揮発性材料を含んだ放熱材料または吸熱材料、または表面をアルマイト加工した Al など）を用いることができる。

【 0 0 3 6 】

支持体 3 4 は、熱伝導率が低いことが好ましいが、基部 2 2 a と 2 2 b とを支持する観点、および / または気体層または真空を保持する観点から、熱絶縁体 3 2 より硬い材料が好ましい。支持体 3 4 として、例えば、樹脂またはゴム等の高分子有機材料を用いることができる。例えば熱絶縁体 3 2 が固体の場合、支持体 3 4 は熱絶縁体 3 2 を補強する観点から支持体 3 4 の降伏強度は熱絶縁体 3 2 より大きいことが好ましい。

【 0 0 3 7 】

[比較例 1]

まず、絶縁層 1 7 b および 1 7 d を設けず、絶縁層 1 8 a および 1 8 b の全体を絶縁層 1 7 a および 1 7 c とした比較例 1 について、シミュレーションを行った。

【 0 0 3 8 】

[比較例 1 のシミュレーション]

以下のように、図 1 ~ 図 3 に記載の構造パラメータを定義した。

D : 基部 2 2 a および 2 2 b の X 方向および Y 方向の幅

D' : 領域 3 5 の X 方向および Y 方向の幅

10

20

30

40

50

D_0 : 熱電変換装置 30 の X 方向の長さ (ブロック 31 a ~ 31 c の合計の長さ)
 H : 領域 36 における基部 22 a と 22 b との間隔
 x : 支持体 34 の X 方向および Y 方向の幅
 d : 熱電層 12 a および 12 b の X 方向のピッチ
 : トレードオフパラメータ、熱電層 12 a および 12 b の占める幅が d となるパラメータ
 d : 熱電層 12 a および 12 b の X 方向の幅
 $(1 -)d$: 熱電層 12 a と 12 b との X 方向の間隔
 L : 熱電層 12 a および 12 b の Y 方向の長さ
 t_s : 熱電層 12 a および 12 b の Z 方向の厚さ
 t_{ins1} : 絶縁層 17 b および 17 d の Z 方向の厚さ、比較例 1 では t_{ins1} は 0 である。
 t_{ins2} : 絶縁層 17 a および 17 c の Z 方向の厚さ
 $t_c = t_{c1} + t_{c2}$: 絶縁層 18 a および 18 b の Z 方向の厚さ
 t_{c1} : 熱伝導層 16 a の端と熱伝導層 16 b の中心との X 方向の距離、熱伝導層 16 b の端と熱伝導層 16 a の中心との X 方向の距離のうち大きい方
 t_{PI} : 絶縁膜 20 a および 20 b の Z 方向の厚さ
 m_0 : 熱電層 12 a および 12 b の対数 (すなわちゼーベック素子 10 の個数)
 T_s : 基部 22 a の下面と基部 22 b の上面の温度差
 P_{out} : 熱電変換装置の出力電力

10

20

【 0039 】

熱電変換モジュール 100 をウェアラブルデバイスの電源として用いる場合、熱電変換モジュール 100 は人体の体温と大気との温度差を用いて発電することになる。そこで、人体の体温に恒温動物モデルを用いた。シミュレーションの詳細は IEEE Transactions on Electron Devices , doi: 10.1109/TED.2020.3006168 に記載されている。シミュレーションでは、出力電力 P_{out} が最大となるように、 d 、 $(1 -)d$ 、 m_0 、 L および t_{c1} を最適化している。熱電変換装置 30 内のモデルは、高精度な分布定数回路モデルを用いた。

【 0040 】

各寸法および材料のシミュレーション条件は以下とした。

30

$$D \times D = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$$

$$D' \times D' = 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$$

$$D_0 = 9 \text{ mm}$$

$$H = 5 \text{ mm}$$

$$x = 0.5 \text{ mm}$$

$$t_s = 1000 \text{ nm}$$

$$t_{PI} = 100 \text{ nm}$$

熱電層 12 a および 12 b

材料 : BiTe

$$\text{ゼーベック係数} = S_p - S_n : 434 \mu\text{V} / \text{K}$$

40

$$\text{熱伝導率} = (\kappa_p + \kappa_n) / 2 : 1.43 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\text{電気抵抗率} = (\rho_p + \rho_n) / 2 : 8.11 \mu \Omega \cdot \text{m}$$

ρ_n および κ_n はそれぞれ熱電層 12 a の熱伝導率および電気抵抗率であり、 ρ_p および κ_p はそれぞれ熱電層 12 b の熱伝導率および電気抵抗率である。

接続層 14 a、14 b、熱伝導層 16 a および 16 b

材料 : Cu

$$\text{熱伝導率} \kappa_c : 386 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\text{電気抵抗率} \rho_c : 17 \text{ n} \Omega \cdot \text{m}$$

絶縁膜 20 a および 20 b

材料 : AlO_x

50

熱伝導率 $\rho_I : 1.5 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$

支持体 3 4

材料：有機材料

熱伝導率 $\rho_{WL} : 0.15 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$

熱絶縁体 3 2

真空

接触抵抗

B i T e と C u

接触電気抵抗 $r_{PC} : 1.0 \cdot \mu\text{m}^2$

接触熱抵抗 $k_{PC} : 140 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{mW}$

C u と A l O_x

接触熱抵抗 $k_{C-PI} : 3.4 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{mW}$

人体の体温と大気との温度との温度差を 10 K とした。なお、接触電気抵抗は 2 つの材料が接触する面における単位面積当たりの電気抵抗であり、接触熱抵抗は 2 つの材料が接触する面における単位面積当たりの熱抵抗である。

【0041】

絶縁層 1 8 a および 1 8 b の材料として、以下の 3 つの材料についてシミュレーションした。

サンプル P S

材料：ポーラスシリカ

熱伝導率 $\rho_{PS} : 35.7 \text{ mW} / (\text{m} \cdot \text{K})$

サンプル H S Q

材料：水素シルセスキオキサン

熱伝導率 $\rho_{HSQ} : 0.3 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$

サンプル S i O₂

材料：S i O₂

熱伝導率 $\rho_{SiO_2} : 0.9 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$

P S は、熱伝導率が低いのが脆い。このため、厚く形成することが難しい。S i O₂ は、機械的強度が高く、厚く形成することが容易であるが熱伝導率が高い。H S Q (水素シルセスキオキサン：hydrogen silsesquioxane) は、シリカとシリコンの中間材料であるシルセスキオキサンに水素をドーブした分子であり、機械的強度は S i O₂ より弱い熱伝導率は S i O₂ より低い。

【0042】

表 1 は、図 2 に示されている $t_{c2} + t_{c1}$ との関係はなく、絶縁層 1 8 a および 1 8 b が各々 1 層構造において、 $t_{c2} = 30 \mu\text{m}$ のとき、最適化された出力電力 P_{out} および各パラメータを示す表である。

【表 1】

サンプル	PS	HSQ	SiO ₂
$P_{out} [\mu\text{W}]$	16.15	7.055	3.014
$\gamma d [\mu\text{m}]$	7.92	3.21	2.06
$(1-\gamma)d [\mu\text{m}]$	2.93	2.06	2.15
$m_0 [\text{pairs}]$	415	854	1069
$L [\mu\text{m}]$	7.18	1.25	0.525
$t_{c1} [\mu\text{m}]$	9.38	4.24	3.14

表 1 に示すように、サンプル P S では、出力電力 P_{out} が $16.15 \mu\text{W}$ であるが、サンプル H S Q の出力電力 P_{out} はサンプル P S の $1/2$ 以下、サンプル S i O₂ の出力電力 P_{out} はサンプル P S の $1/5$ 以下である。絶縁層 1 8 a および 1 8 b の熱伝導

率がサンプルごとに異なるため、出力電力 P_{out} を最適化したときの各パラメータはサンプルごとに異なる。

【0043】

比較例1では、絶縁層18aおよび18bとしてPSを用いると、出力電力 P_{out} が大きいが機械的強度が弱く、プロセスが難しい。絶縁層18aおよび18bとしてHSQおよびSiO₂を用いると、機械的強度が十分であり、プロセスが容易であるが、出力電力 P_{out} が大幅に低下してしまう。

【0044】

比較例1のサンプルPSおよびHSQにおける熱電層12a、12b、熱伝導層16aおよび16bから絶縁層18aおよび18bへの熱流の漏れを高精度な分布定数回路モデルを用いシミュレーションした。

10

【0045】

図4は、比較例1における熱流を示す図である。絶縁膜20aの下面を高温とし、絶縁膜20bの上面を低温とした。熱伝導層16aから絶縁層18aに漏れる熱流54、絶縁層18aから熱電層12aおよび12bにそれぞれ流入する熱流53をシミュレーションした。熱電層12aおよび12bのX座標の位置Xを規格化した。熱電層12aおよび12bと接続層14bとが接する位置Xを0とし、熱電層12aおよび12bと接続層14aとが接する位置Xを1とした。熱伝導層16aのZ座標の位置Zを規格化した。熱伝導層16aと絶縁膜20aとが接する位置Zを0とし、熱伝導層16aと接続層14aとが接する位置Zを1とした。

20

【0046】

図5(a)および図5(b)は、それぞれ規格化Xおよび規格化Zに対する規格化熱流を示す図である。シミュレーションでは、規格化Xの0~1の範囲および規格化Zの0~1の範囲をそれぞれ10個および15個の範囲に分割した。図5(a)および図5(b)のドットは分割された範囲内の規格化熱流の総和を示している。直線はドットをつなぐ線である。図5(a)は、絶縁層18aから熱電層12aおよび12bに流入する規格化熱流53を示している。なお、規格化熱流は、各熱流を外部から絶縁膜20aに流入する全熱流により規格化した熱流である。図5(a)に示すように、サンプルHSQにおいて、領域51では規格化Xが0付近で規格化熱流53が大きく、規格化Xが大きくなると規格化熱流53が小さくなる。これは、規格化Xが大きいほど熱電層12aおよび12bの温度が高いことに相当する。熱電層12aおよび12bの温度が低くなると、絶縁層18aから流入する熱流が大きくなる。領域50では、規格化Xが大きくなると規格化熱流53が大きくなる。

30

【0047】

図5(b)は、熱伝導層16aから絶縁層18aに漏れる規格化熱流54を示している。図5(b)に示すように、サンプルHSQにおいて、領域52では規格化熱流54はほぼ0である。領域50では、規格化Zが大きくなると規格化熱流54が大きくなる。このように、図4の領域50では、熱伝導層16aから絶縁層18aを経由し熱電層12aおよび12bに至る熱流が存在することがわかった。これは、熱伝導層16aと熱電層12aおよび12bとの間の接触熱抵抗 k_{pc} に起因し、接続層14aから熱電層12aおよび12bに流入しにくくなった熱流が領域50を通過することが原因とも考えられる。しかし、接触熱抵抗 k_{pc} は十分に小さいため、領域50を介した熱流は絶縁層18aの熱伝導率の高さに起因すると考えられる。サンプルPSでは、図5(a)および図5(b)における規格化熱流53および54はサンプルHSQに比べ小さい。これは、サンプルPSでは、絶縁層18aの熱伝導率が小さいため絶縁層18aを通過する熱が小さいためと考えられる。

40

【0048】

図6は、比較例1における熱流を示す図である。絶縁膜20aの下面を高温とし、絶縁膜20bの上面を低温とした。熱電層12aおよび12bから絶縁層18bにそれぞれ漏れる熱流58、絶縁層18bから熱伝導層16bに流入する熱流59をシミュレーション

50

した。規格化 X は図 4 と同じである。熱伝導層 16 b と接続層 14 b が接する位置 Z を 0 とし、熱伝導層 16 b と絶縁膜 20 b とが接する位置 Z を 1 とした。

【0049】

図 7 (a) および図 7 (b) は、それぞれ規格化 X および規格化 Z に対する規格化熱流を示す図である。図 7 (a) は、熱電層 12 a および 12 b から絶縁層 18 b に流入する規格化熱流 58 を示している。図 7 (a) に示すように、サンプル H S Q において、領域 56 では規格化 X が 1 付近で規格化熱流 58 が大きく、規格化 X が小さくなると規格化熱流 58 が小さくなる。これは、熱電層 12 a および 12 b の温度分布に起因する。領域 55 では、規格化 X が小さくなると規格化熱流 58 が大きくなる。

【0050】

図 7 (b) は、絶縁層 18 b から熱伝導層 16 b に流入する規格化熱流 59 を示している。図 7 (b) に示すように、サンプル H S Q において、領域 57 では規格化熱流 59 はほぼ 0 である。領域 55 では、規格化 Z が小さくなると規格化熱流 59 が大きくなる。このように、図 6 の領域 55 では、熱電層 12 a および 12 b から絶縁層 18 b を経由し熱伝導層 16 b に至る熱流が存在することがわかった。領域 55 を介した熱流は絶縁層 18 b の熱伝導率の高さに起因すると考えられる。図 7 (a) および図 7 (b) においても、サンプル P S の規格化熱流 58 および 59 はサンプル H S Q に比べ小さい。これは、サンプル P S では、絶縁層 18 b の熱伝導率が小さいため絶縁層 18 b を通過する熱流が小さいためと考えられる。

【0051】

以上のように、絶縁層 18 a および 18 b を通過する熱流には、熱電層 12 a および 12 b の温度分布に依存する熱流と、領域 50 および 55 を通過する絶縁層 18 a および 18 b の熱伝導率の高さに起因する熱流の 2 つの熱流がある。このようにメカニズムの異なる 2 つの熱流の存在は特許文献 2 では示唆されていない。この 2 つのメカニズムによる絶縁層 18 a および 18 b への熱流の漏れにより、サンプル H S Q および S i O₂ ではサンプル P S より出力電力 P_{out} が低くなると考えられる。上記のような 2 つのメカニズムが存在する場合における実施例 1 の出力電力をシミュレーションした。

【0052】

[実施例 1 のシミュレーション]

サンプル H S Q / P S は、絶縁層 17 a および 17 c として H S Q を用い、絶縁層 17 b および 17 d として P S を用いたサンプルである。サンプル S i O₂ / P S は、絶縁層 17 a および 17 c として S i O₂ を用い、絶縁層 17 b および 17 d として P S を用いたサンプルである。 $t_{c1} = 7 \mu\text{m}$ および $t_{c2} = 1 \mu\text{m}$ 、 $t_{c1} = 8 \mu\text{m}$ および $t_{c2} = 10 \mu\text{m}$ 、 $t_{c1} = 9.4 \mu\text{m}$ および $t_{c2} = 30 \mu\text{m}$ の 3 つの条件について、絶縁層 17 b および 17 d の厚さ t_{ins1} を変化させ最適化した出力電力 P_{out} をシミュレーションした。

【0053】

図 8 (a) から図 8 (c) は、実施例 1 における t_{ins1} に対する P_{out} を示す図である。実施例 1 としてサンプル H S Q / P S および S i O₂ / P S と、比較例 1 としてサンプル P S を示している。サンプル P S では $t_{ins1} = t_{c1} + t_{c2}$ であるが、サンプル H S Q / P S および S i O₂ / P S と比較するため P_{out} を t_{ins1} の値に依らずに一定の値をとる点線で示す直線で図示している。図 8 (a) から図 8 (c) に示すように、 t_{ins1} が 0 付近では、サンプル H S Q / P S および S i O₂ / P S とともに出力電力 P_{out} はサンプル P S の 1 / 2 以下である。 t_{ins1} が大きくなると出力電力 P_{out} はサンプル P S に近づき、 $t_{ins1} = t_{c1}$ のとき、サンプル H S Q / P S および S i O₂ / P S の出力電力 P_{out} はほぼサンプル P S の出力電力 P_{out} とほぼ同じとなる。

【0054】

表 2 は、サンプル P S の出力電力 $P_{out} P S$ に対するサンプル H S Q / P S の出力電力 $P_{out} H S Q$ を示す比 $P_{out} H S Q / P_{out} P S$ を示す表である。

【表 2】

$P_{out}HSQ/P_{out}PS$	$t_{ins1}=t_{c1}$	$t_{ins1}=t_{c1}/2$
$t_{c2}=1\mu m$	0.996	0.935
$t_{c2}=10\mu m$	0.988	0.920
$t_{c2}=30\mu m$	0.984	0.909

【0055】

表 3 は、サンプル PS の出力電力 $P_{out}PS$ に対するサンプル SiO_2/PS の出力電力 $P_{out}SiO_2$ を示す比 $P_{out}SiO_2/P_{out}PS$ を示す表である。

10

【表 3】

$P_{out}SiO_2/P_{out}PS$	$t_{ins1}=t_{c1}$	$t_{ins1}=t_{c1}/2$
$t_{c2}=1\mu m$	0.999	0.927
$t_{c2}=10\mu m$	0.988	0.906
$t_{c2}=30\mu m$	0.983	0.893

【0056】

表 2 および表 3 では、 t_{c2} が $1\mu m$ 、 $10\mu m$ および $30\mu m$ のとき、 t_{ins1} が t_{c1} および $t_{c1}/2$ のときの $P_{out}HSQ/P_{out}PS$ および $P_{out}SiO_2/P_{out}PS$ を示している。表 2 および表 3 に示すように、 $t_{ins1}=t_{c1}$ では、 t_{c2} によらず、 $P_{out}HSQ$ および $P_{out}SiO_2$ はほぼ $P_{out}PS$ と同じとなる。 $t_{ins1}=t_{c1}/2$ では、 t_{c2} によらず、 $P_{out}HSQ$ および $P_{out}SiO_2$ は $P_{out}PS$ のほぼ 90% となる。また、図 8 (a) から図 8 (c) のように、 $t_{ins1}=t_{c1}/4$ では、 $P_{out}HSQ$ および $P_{out}SiO_2$ は $P_{out}PS$ のほぼ 75% となり、 $t_{ins1}=t_{c1}/3$ では、 $P_{out}HSQ$ および $P_{out}SiO_2$ は $P_{out}PS$ のほぼ 85% となる。このように、絶縁層 17b および 17d の厚さ t_{ins1} を所定の値以上に大きくしないと出力電力 P_{out} を大きくできない。

20

【0057】

絶縁層 17b および 17d の厚さ t_{ins1} を大きくしないと出力電力 P_{out} を大きくできない理由としては以下が考えられる。まず、図 4 において、規格化 X が 0 付近で絶縁層 18a から熱電層 12a および 12b に流入する熱流 53 は、絶縁層 18a 内の熱電層 12a および 12b から t_{c1} 程度までの範囲を通過するためと考えられる。さらに、熱伝導層 16a から絶縁層 18a に漏れる熱流 54 が存在する領域 50 は、熱電層 12a および 12b から t_{c1} 程度の範囲まで広がっているためと考えられる。図 6 においても、規格化 X が 1 付近で熱電層 12a および 12b から絶縁層 18b に漏れた熱流 58 は、絶縁層 18b 内の熱電層 12a および 12b から t_{c1} 程度まで範囲を通過するためと考えられる。さらに、絶縁層 18b から熱伝導層 16b に流入する熱流 59 が存在する領域 55 は、熱電層 12a および 12b から t_{c1} 程度の範囲まで広がっているためと考えられる。

30

【0058】

このような、絶縁層 17b および 17d の厚さ t_{ins1} に対する出力電力 P_{out} の振る舞いは特許文献 2 の記載からは示唆されておらず、図 4 から図 7 (b) のように、精度の高い分布定数回路モデルのシミュレーションを行い始めて得られた知見である。

40

【0059】

実施例 1 によれば、絶縁層 17b および 17d の厚さ t_{ins1} を $t_{c1}/4$ 以上とする。これにより、出力電力 P_{out} をサンプル PS の出力電力 P_{out} の 75% 以上とすることができる。なお、 t_{c1} は、熱伝導層 16a の熱電層 12a 側の端と、熱伝導層 16b の X 方向の中心と、の距離、または熱伝導層 16a の熱電層 12b 側の端と、熱伝導層 16b の X 方向の中心と、の距離の大きい方である。厚さ t_{ins1} は $t_{c1}/3$ 以上

50

がより好ましく、 $t_{c1} / 2$ 以上がさらに好ましい。絶縁層17bおよび17dの厚さ t_{int1} を t_{c1} の $1 / 2$ とすることでサンプルPSの出力電力の90%程度の出力電力が得られ、厚さ t_{int1} を t_{c1} の $1 / 3$ とすることでサンプルPSの出力電力の85%程度の出力電力が得られることが精度の高い分布定数回路モデルのシミュレーションから得られたからである。

【0060】

厚さ t_{ins1} が t_{c1} より厚くなっても出力電力 P_{out} は大きくならない。よって、絶縁層18aおよび18bの機械的強度を高めるため、厚さ t_{ins1} は $2 \times t_{c1}$ 以下が好ましく、 $1.5 \times t_{c1}$ 以下がより好ましく、 t_{c1} 以下がさらに好ましい。なお、厚さ t_{ins1} の好ましい範囲（例えば $t_{c1} / 2$ 以上かつ t_{c1} 以下）は、図8(a)から図8(c)のように、絶縁層17bおよび17dの材料および t_{c2} を変えても変わらない。また、絶縁層17bおよび17dのいずれか一方の厚さ t_{ins1} を $t_{c1} / 4$ 以上かつ $2 \times t_{c1}$ 以下としてもよい。

10

【0061】

絶縁層18aおよび18bの機械的強度を大きくするためには、絶縁層17aおよび17bの厚 t_{ins2} は厚い方が好ましい。よって、 t_{ins2} は $t_{ins1} / 2$ 以上が好ましく、 t_{ins1} 以上がより好ましく、 $1.5 \times t_{ins1}$ 以上がさらに好ましい。

【0062】

絶縁層18aおよび18bの熱伝導率は、熱伝導層16aおよび16bの熱伝導率より低ければよい。絶縁層17aおよび17cの熱伝導率は、熱伝導層16aおよび16bの熱伝導率の $1 / 300$ 以下が好ましく、 $1 / 1000$ 以下がより好ましい。絶縁層17bおよび17dの熱伝導率は、絶縁層17aおよび17cの熱伝導率より低ければよいが、絶縁層17aおよび17cの熱伝導率の $1 / 5$ 以下が好ましく、 $1 / 10$ 以下がより好ましく、 $1 / 50$ 以下がさらに好ましい。絶縁層17bおよび17dの熱伝導率を絶縁層17aおよび17cの熱伝導率より低くするため、絶縁層17bおよび17dを多孔質（ポラス）とし、絶縁層17aおよび17cを非多孔質としてもよい。絶縁層17bおよび17dが多孔質のとき、絶縁層17bおよび17dのポロシティ（空隙率）は10%以上が好ましく、50%以上がより好ましい。これにより、絶縁層17bおよび17dの熱伝導率を低くできる。絶縁層17aおよび17cが非多孔質のとき、絶縁層17aおよび17bのポロシティは1%以下が好ましく、0.1%以下がより好ましい。これにより、絶縁層17aおよび17bの機械的強度を高くできる。

20

30

【0063】

表4は、サンプルHSQに対するサンプルHSQ/PSの出力電力 P_{out} の増加率、サンプルSiO₂に対するサンプルSiO₂/PSの出力電力 P_{out} の増加率を示す表である。 $t_{c2} = 30 \mu m$ であり、 $t_{ins1} = t_{c1}$ である。

【表4】

$t_{c2} = 30 \mu m, t_{int1} = t_{c1}$

HSQに対するHSQ/PSの P_{out} 増加率	125 %
SiO ₂ に対するSiO ₂ /PSの P_{out} 増加率	426 %

表4に示すように、サンプルHSQ/PSはサンプルHSQに比べ P_{out} が125%増加し、サンプルSiO₂/PSはサンプルSiO₂に比べ P_{out} が426%増加する。

【0064】

図9(a)から図9(e)は、各サンプルにおける出力電圧 V_{out} に対する電流Iおよび出力電力 P_{out} を示す図である。図9(a)はサンプルPS、図9(b)はサンプルHSQ、図9(c)はサンプルSiO₂、図9(d)はサンプルHSQ/PSおよび図9(e)はサンプルSiO₂/PSを示している。基部22aおよび22bの面積が $D \times D = 1 \text{ cm}^2$ のモジュールを複数直列および/または並列に接続して、実装面積 S_A を 20 cm^2 から 120 cm^2 まで 20 cm^2 ステップで変えている。いずれのサンプルも t

50

$c_2 = 30 \mu\text{m}$ であり、サンプルHSQ/PSおよびSiO₂/PSでは $t_{ins1} = t_{c1}$ である。

【0065】

図9(a)から図9(e)のように、出力電圧 V_{out} がほぼ1Vのとき出力電力 P_{out} はピークとなる。図9(a)のように、サンプルPSでは実装面積 S_A が 120 cm^2 において、出力電力 P_{out} として2mW程度を実現できる。しかし、サンプルPSは絶縁層18aおよび18bの機械的強度が低い。図9(b)および図9(c)のように、サンプルHSQおよびSiO₂では、絶縁層18aおよび18bの機械的強度は高いものの実装面積 S_A を 120 cm^2 しても、出力電力 P_{out} は1mWまたは0.5mW以下である。図9(d)および図9(e)のように、サンプルHSQ/PSおよびSiO₂/PSでは、 S_A が 120 cm^2 において、出力電力 P_{out} は2mW程度であり、サンプルPSとほとんど変わらない。絶縁層17aおよび17cがHSQまたはSiO₂のため、機械的強度を確保できる。

10

【0066】

[実施例1の変形例1]

図10は、実施例1の変形例1における熱電変換装置の拡大断面図である。図10に示すように、実施例1の変形例1では、熱電層12aと12bのX方向における長さが異なる。熱伝導層16bの熱電層12b側の端と熱伝導層16aのX方向の中心との距離を d_1 とし、熱伝導層16bの熱電層12a側の端と熱伝導層16bのX方向の中心との距離を d_2 とする。X方向のピッチを d とする。

20

【0067】

実施例1の変形例1のように、距離 d_1 と d_2 が異なる場合、絶縁層18aを迂回する熱流と絶縁層18bを迂回する熱流の両方を抑制することが求められる。よって、距離 d_1 と d_2 のうち大きい方の距離 d_2 を基準とする。すなわち、 t_{ins1} は $d_2/4$ 以上が好ましく、 $d_2/3$ 以上がより好ましく、 $d_2/2$ 以上がさらに好ましい。 t_{ins1} は $2 \times d_2$ 以下が好ましく、 $1.5 \times d_2$ 以下がより好ましく、 d_2 以下がさらに好ましい。実施例1のように、距離 d_1 と d_2 とは製造誤差程度に同じでもよいし、実施例1の変形例1のように、距離 d_1 と d_2 とは製造誤差程度以上異なってもよい。上述した実施例においては図10にその断面を示した絶縁層18aと絶縁層18bとがX方向のピッチ d で繰り返し配列されている。ピッチ d が一定値であるので、距離 d_1 と d_2 との二つの距離が存在する。なお、ピッチ d は一定でなくてもよい。この場合、複数の距離 d_1 と複数の距離 d_2 のうち最も大きい距離を基準とすればよい。

30

【0068】

上述した実施例においては、第1熱伝導層が貫通し、第1絶縁層より熱伝導率が小さく、前記第1絶縁層と前記第1熱電層および第2熱電層との間に設けられ、前記第1熱伝導層の前記第1熱電層側の端と前記第2接続層の前記第1方向における中心との距離と、前記第1熱伝導層の前記第2熱電層側の端と前記第2接続層の前記第1方向における中心との距離と、のうち大きい方の距離の $1/4$ 以上の厚さを有する第2絶縁層を図2または図10に示す絶縁体の多孔質が用いられた絶縁層17b、17dとした。

【0069】

図1(a)から図2のように、絶縁層17bが熱電層12aおよび12bと絶縁層17aと接し、絶縁層17dが熱電層12aおよび12bと絶縁層17aと接している場合、基部22aと熱電層12aおよび12bとの間並びに基部22bと熱電層12aおよび12bとの間に、特許文献2の図8のような空間15(すなわち空隙)が形成されない。半導体形成プロセスなどの微細積層プロセスによって、基部22aと、熱電層12aおよび12bと、基部22bとを生成するからである。これにより、非常に高密度で、小型の熱電変換装置を、低製造コストで提供することができ、さらには熱電変換装置の強度を高めることができる。

40

【0070】

空隙が形成されていない熱電変換装置において、絶縁層17bおよび17dの熱伝導率

50

を絶縁層 17 a および 17 c の熱伝導率より小さくすることで、図 8 (a) から図 8 (c) のシミュレーションの結果を適用できる。すなわち、熱伝導率が低い絶縁層 17 b および 17 d の厚さを各々 t_{c1} の 1 / 4 倍以上とすることで、絶縁層 18 a および 18 b の全てを熱伝導率が低い材料とする場合に比べ出力電力 P_{out} を大きくできる。図 8 (a) から図 8 (c) のように、絶縁層 17 b および 17 d がポラスシリカであり、絶縁層 17 a および 17 c が HSQ または SiO_2 である場合、絶縁層 18 a および 18 b の全てを HSQ または SiO_2 にする場合に比べ、出力電力を例えば 75 % 以上とすることができる。

【 0 0 7 1 】

また、図 8 (a) から図 8 (c) のように、絶縁層 17 b および 17 d の厚さを各々 t_{c1} の 2 倍より大きくしても出力電力は向上しない。そこで、熱伝導率が高く機械的強度が高い絶縁層 17 a および 17 c を設け、機械的強度が低い絶縁層 17 b および 17 d の厚さを各々 t_{c1} の 2 倍以下とすることで、絶縁層 18 a および 18 b の全てをポラスシリカのような機械的強度が低い材料にする場合に比べ、熱電変換装置の機械的強度を高めることができる。このように、熱電変換装置の機械的強度を確保しつつ、出力電力 P_{out} の低下を抑制できる。

【 0 0 7 2 】

図 8 (a) から図 8 (c) のシミュレーションにおいて、サンプル HSQ / PS および SiO_2 / PS では、絶縁層 17 b および 17 d (ポラスシリカ) の熱伝導率は絶縁層 17 a および 17 c (HSQ および SiO_2) の熱伝導率のそれぞれ 1 / 8 . 4 倍および 1 / 25 . 2 倍である。また、絶縁層 17 b および 17 d (ポラスシリカ) の熱伝導率は接続層 14 a および 14 b 並びに熱伝導層 16 a および 16 b (Cu) の熱伝導率の 1 / 10800 倍である。

【 0 0 7 3 】

図 8 (a) から図 8 (c) のシミュレーション結果と同様の作用効果を得るためには、絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率の範囲が絶縁層 17 a および 17 c の熱伝導率の 1 / 5 倍以下かつ 1 / 100 倍以上であることが好ましい。絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率を絶縁層 17 a および 17 c の熱伝導率の 1 / 5 倍以下とすることで、絶縁層 17 b および 17 d を介した熱流を前記シミュレーション結果とほぼ同様の範囲に抑制できる。これにより、出力電力の低下を抑制できる。さらには、絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率を絶縁層 17 a および 17 c の熱伝導率の 1 / 100 倍以上とすることで、絶縁層 17 a および 17 c に機械的強度の大きい材料を用いることができる。このため、絶縁層 17 b および 17 d を介した熱流を前記シミュレーション結果とほぼ同様の範囲に抑制しつつ、熱電変換装置の機械的強度を確保することができる。

【 0 0 7 4 】

また、絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率の範囲が接続層 14 a および 14 b 並びに熱伝導層 16 a および 16 b の熱伝導率の 1 / 300 倍以下かつ 1 / 30000 倍以上であることが好ましい。絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率を接続層 14 a および 14 b 並びに熱伝導層 16 a および 16 b の熱伝導率の 1 / 300 倍以下とすることで、接続層 14 a および 14 b 並びに熱伝導層 16 a および 16 b の熱伝導率を高くでき、絶縁層 17 b および 17 d を介した熱流を抑制できる。よって、出力電力の低下を抑制できる。絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率を接続層 14 a および 14 b 並びに熱伝導層 16 a および 16 b の熱伝導率の 1 / 30000 倍以上とすることで、絶縁層 17 b および 17 d として、半導体形成プロセスなどの微細積層プロセスに適用可能なポラスシリカ等の実用的な材料を用いることができる。このため、コストを低減することができる。さらに、絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率が上記範囲の場合、絶縁層 17 b および 17 d の厚さを各々 t_{c1} の 1 / 4 倍以上かつ 2 倍以下とすることが好ましい。

【 0 0 7 5 】

図 8 (a) から図 8 (c) のシミュレーションの結果と同様の作用効果を得るためには、絶縁層 17 b および 17 d の熱伝導率は、絶縁層 17 a および 17 c の熱伝導率の 1 /

10倍以下であることがより好ましく、 $1/20$ 以下であることがさらに好ましい。絶縁層17bおよび17dの熱伝導率は、接続層14aおよび14b並びに熱伝導層16aおよび16bの熱伝導率の $1/1000$ 倍以下であることがより好ましく、 $1/5000$ 倍以下であることがさらに好ましい。

【0076】

熱電層12aおよび12bの熱伝導率が小さい場合、比較例1では熱電層12aおよび12b内に温度分布が生ずる。このため、図4の熱流53のように絶縁層18aから熱電層12aおよび12bに流入する熱流、および図6の熱流58のように熱電層12aおよび12bから絶縁層18bに流出する熱流が増加する。図8(a)から図8(c)のシミュレーションにおいて、熱電層12aおよび12b(BiTe)の熱伝導率は接続層14aおよび14b、熱伝導層16aおよび16b(Cu)の熱伝導率の $1/270$ 倍である。そこで、図8(a)から図8(c)のシミュレーションの結果を適用するためには、熱電層12aおよび12bの熱伝導率は、接続層14aおよび14b、熱伝導層16aおよび16bの熱伝導率の $1/50$ 倍以下であることが好ましい。

10

【0077】

図8(a)から図8(c)のシミュレーションの結果と同様の作用効果を得るためには、熱電層12aおよび12bの熱伝導率は、接続層14aおよび14b、熱伝導層16aおよび16bの熱伝導率の $1/100$ 倍以下であることがより好ましい。熱電層12aおよび12bの熱伝導率は、接続層14aおよび14b、熱伝導層16aおよび16bの熱伝導率の例えば $1/1000$ 倍以上である。

20

【0078】

熱電層12aおよび12bの熱伝導率が小さすぎると、熱電層12aおよび12b内を流れる熱流が減少する。図8(a)から図8(c)のシミュレーションにおいて、熱電層12aおよび12b(BiTe)の熱伝導率は絶縁層17bおよび17d(ポラスシリカ)の熱伝導率の40倍である。そこで、図8(a)から図8(c)のシミュレーションと同様の作用効果を得るためには、熱電層12aおよび12bの熱伝導率は、絶縁層17bおよび17dの熱伝導率より大きいことが好ましい。図8(a)から図8(c)のシミュレーションの結果を適用するため、熱電層12aおよび12bの熱伝導率は、絶縁層17bおよび17dの熱伝導率の10倍以上であることがより好ましい。熱電層12aおよび12bの熱伝導率は、絶縁層17bおよび17dの熱伝導率の例えば100倍以下である。

30

【0079】

以上、本発明の好ましい実施例について詳述したが、本発明は係る特定の実施例に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載された本発明の要旨の範囲内において、種々の変形・変更が可能である。

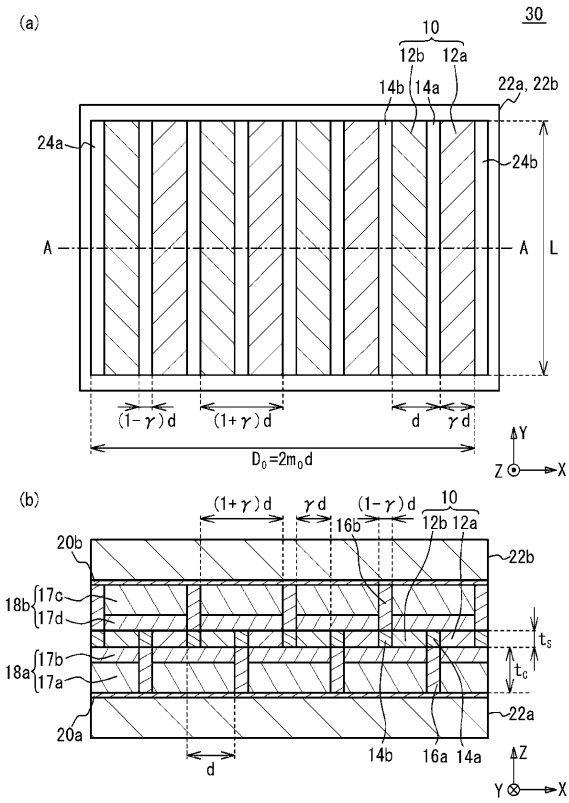
【符号の説明】

【0080】

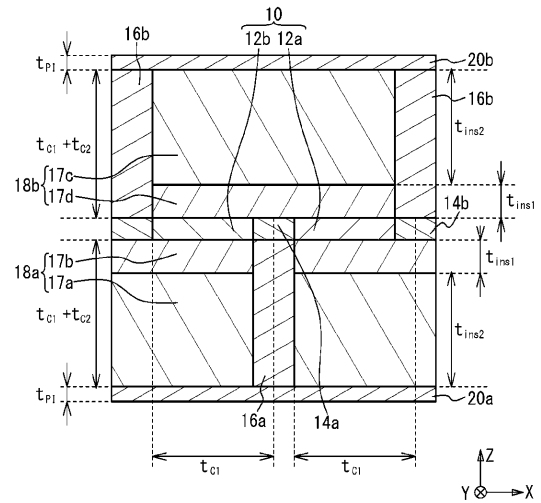
- 10 ゼーベック素子
- 12a、12b 熱電層
- 14a、14b 接続層
- 16a、16b 熱伝導層
- 17a~17d、18a、18b 絶縁層
- 22a、22b 基部
- 24a~24d 電極

40

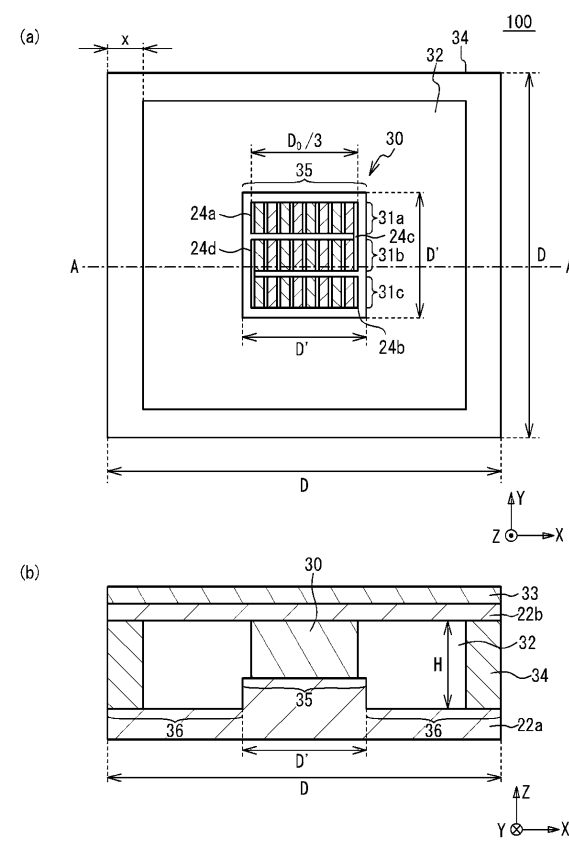
【 図 1 】



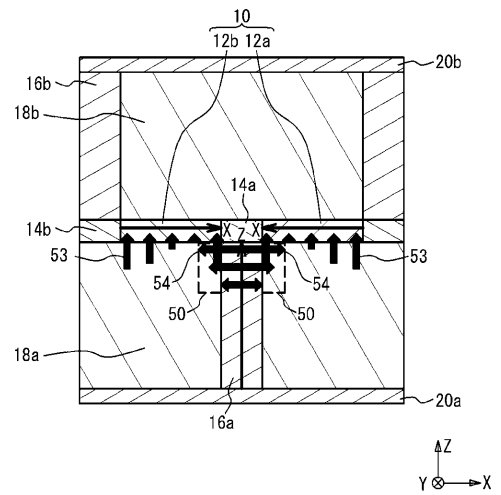
【 図 2 】



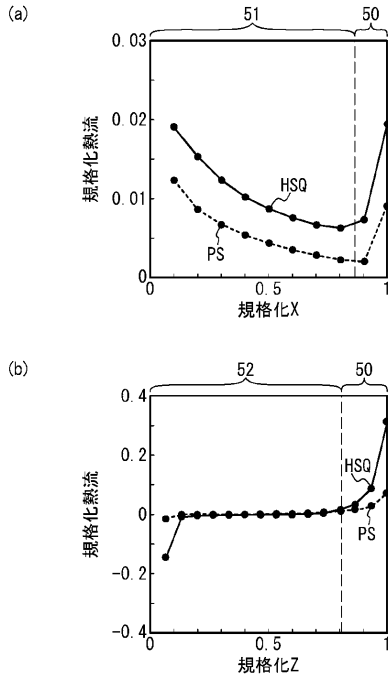
【 図 3 】



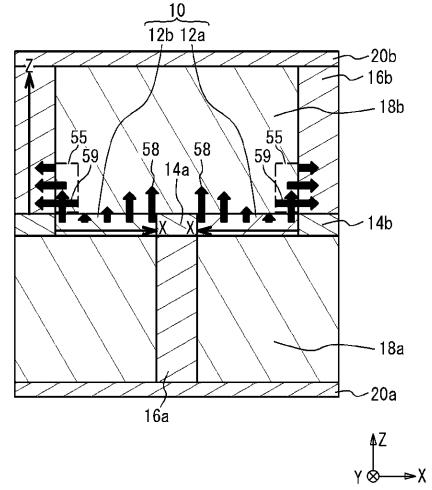
【 図 4 】



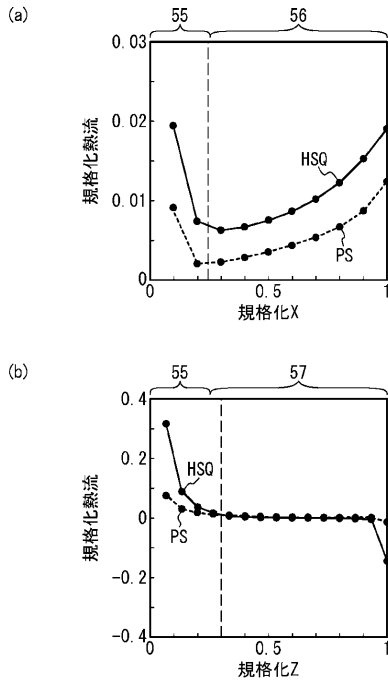
【 図 5 】



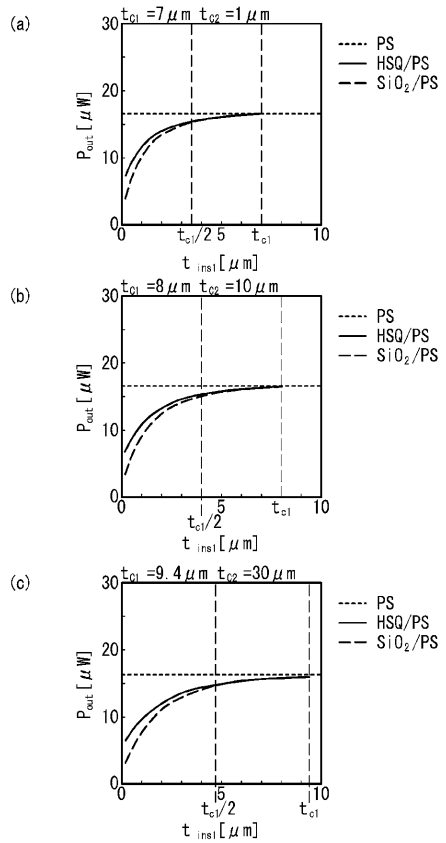
【 図 6 】



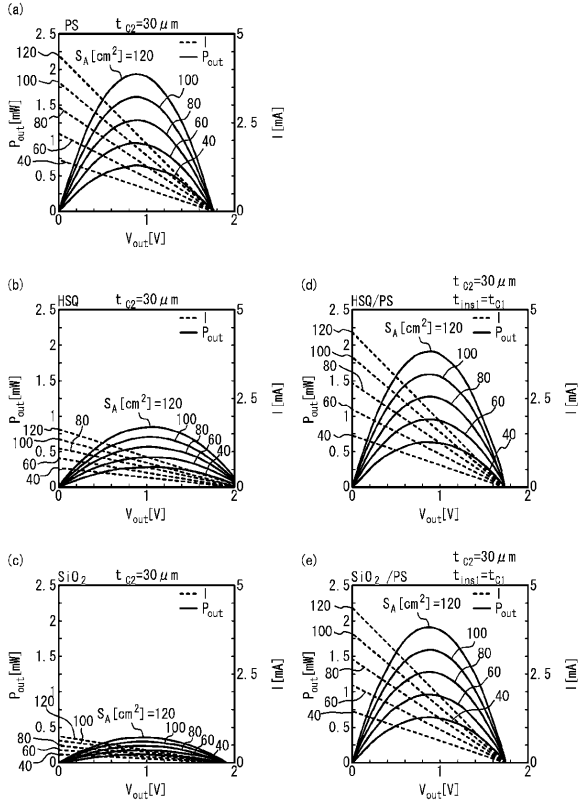
【 図 7 】



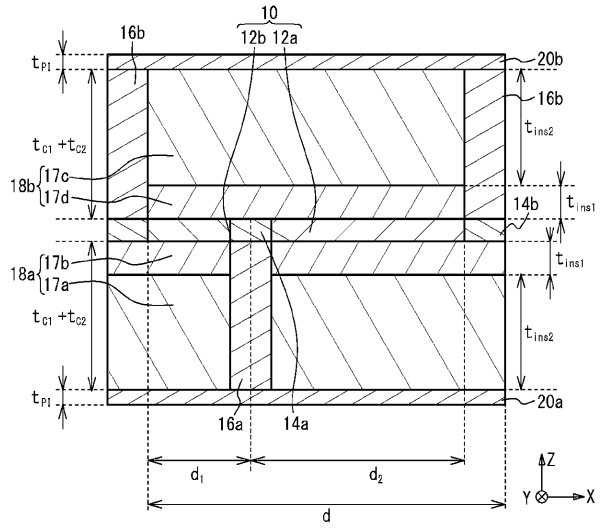
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開 2 0 1 6 - 1 8 7 0 0 8 (J P , A)
特開 2 0 1 9 - 1 4 0 1 8 2 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 8 / 0 4 2 7 0 8 (W O , A 1)
特開 2 0 0 9 - 1 5 8 7 6 0 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H 1 0 N 1 0 / 1 7
H 0 2 N 1 1 / 0 0