

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2005-525691

(P2005-525691A)

(43) 公表日 平成17年8月25日(2005.8.25)

(51) Int. Cl.⁷

H05K 7/20
B81B 1/00
F25D 1/02
F25D 9/00
H01L 23/473

F I

H05K 7/20
B81B 1/00
F25D 1/02
F25D 9/00
H01L 23/46

テーマコード (参考)

3L044
5E322
5F036

審査請求 有 予備審査請求 有 (全 53 頁)

(21) 出願番号 特願2003-532907 (P2003-532907)
(86) (22) 出願日 平成14年9月16日 (2002. 9. 16)
(85) 翻訳文提出日 平成16年3月25日 (2004. 3. 25)
(86) 国際出願番号 PCT/US2002/029405
(87) 国際公開番号 W02003/029731
(87) 国際公開日 平成15年4月10日 (2003. 4. 10)
(31) 優先権主張番号 60/326, 151
(32) 優先日 平成13年9月28日 (2001. 9. 28)
(33) 優先権主張国 米国 (US)
(31) 優先権主張番号 10/053, 859
(32) 優先日 平成14年1月19日 (2002. 1. 19)
(33) 優先権主張国 米国 (US)

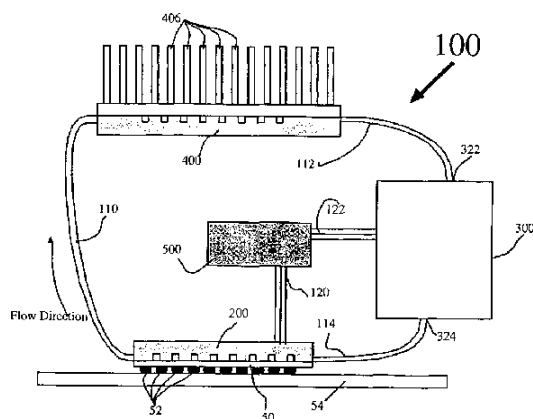
(71) 出願人 591148484
ボード オブ トラスティーズ オブ ザ
レランド スタンフォード ジュニア
ユニバーシティ
アメリカ合衆国, カリフォルニア 943
04-1850, パロ アルト, スウィー
ト 350, ウエルチロード 900
(74) 代理人 100078282
弁理士 山本 秀策
(74) 代理人 100062409
弁理士 安村 高明
(74) 代理人 100113413
弁理士 森下 夏樹

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電気浸透マイクロチャネル冷却システム

(57) 【要約】

本発明による装置および方法は、好ましくは、機械的部品を移動させることなく、また、不快な電氣的または音響上のノイズを生成することなく、さらには、信頼性を低下させることなく、高圧及び高流量を生成することが可能な電気浸透ポンプを使用する。これらの電気浸透ポンプは、好ましくは、現在利用可能なマイクロポンプに比較して性能、効率を改善し、重量及び製造コストを削減できる材料と構造で構成されている。また、これらの電気浸透ポンプは、好ましくは、発生ガスや沈殿材料を回収でき、長期にわたる閉ループ操作を可能とする。また、本発明による装置及び方法は、ポンプを通る流れを電氣的に制御することによりデバイスの温度を動的に調整することができるとともに、多数の冷却ループを利用して、デバイスの温度プロファイルの空間的及び時間的特性を個別に調整することができる。新規なマイクロチャネル構造体も説明している。



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

熱放出デバイス用の冷却システムであって、前記冷却システムは液相を有する流体を使って作動し、前記冷却システムは、

少なくとも一部が内部に配設されたマイクロチャネルを有する基板であって、前記熱放出デバイスに物理的に接続されるように構成されており、それによって前記熱放出デバイスから基板に熱エネルギーを伝達し、さらに前記基板から前記マイクロチャネル内に配設した流体へ熱エネルギーを伝達し、前記マイクロチャネルは、流体が内部を流れるように構成された基板と、

流体が内部を流れ、熱エネルギーを熱交換器から伝達するように構成された熱交換器と 10

、
流体の流れを生成する電気浸透ポンプとを備え、

前記基板、前記熱交換器、および前記電気浸透ポンプは、閉ループの流体の流れを利用して共に作動するように構成されている、冷却システム。

【請求項 2】

熱を熱放出デバイスから移動させる方法であって、

電気浸透ポンプを使って液相を有する流体の流れを生成する工程と、

基板を熱放出デバイスに物理的に接続することによって、基板内のマイクロチャネルを通るように流体の流れを方向付けて加熱流体を生成する工程であって、流体の流れを電気浸透ポンプから熱交換器に向ける工程と、 20

熱交換器を通して流れるように加熱流体をさらに方向付けて冷却流体を生成する工程と

、
使用し、方向付け、さらに方向付ける工程を作動させて閉ループの流体の流れを生成する工程を備えた、方法。

【請求項 3】

液相を有する流体を使って作動する冷却システムとともに使用する装置であって、

熱放出素子を備えた熱放出デバイスと、

前記熱放出デバイスに物理的に接続された基板であって、前記熱放出デバイスと前記基板がそれぞれマイクロチャネルの少なくとも一部を含み、前記熱放出デバイスから前記基板に熱エネルギーを伝達し、熱エネルギーをマイクロチャネル内に配置された流体にさらに伝達し、前記マイクロチャネルが、前記流体が内部を流れるように構成されている基板とを備えた、装置。 30

【請求項 4】

流体を内部に流し、熱エネルギーを流体から外に伝達するように構成された熱交換器と

、
流体の流れを形成する電気浸透ポンプとを備え、

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプとが共に作動して閉ループの流体の流れと閉ループの流体の流れの一方を形成するように構成されている、請求項 3 に記載の装置。

【請求項 5】

前記基板が、さらに、複数の垂直方向の電気相互接続を含む、請求項 3 に記載の装置。 40

【請求項 6】

前記複数の垂直方向の相互接続が、複数の温度センサを温度制御回路に電氣的に接続する電気接続の一部を提供する、請求項 5 に記載の装置。

【請求項 7】

前記温度制御回路が、熱放出デバイスの一部である、請求項 6 に記載の装置。

【請求項 8】

前記基板が、別の相互作用が前記熱放出デバイスの一部に当たり得る開口を含む請求項 3 に記載の装置。

【請求項 9】

マイクロチャネルの一部が、
上側チャンバと、
下側チャンバと、
前記上側チャンバと前記下側チャンバの間に配設された複数のサブチャネルとを含む、
請求項 3 に記載の装置。

【請求項 10】

マイクロチャネルが、その内部を通して液相を有する流体を移送し、特定の集積回路チップの内部の熱エネルギーを放散できるようにマイクロチャネルを基板の中に載置する方法であって、

前記特定の集積回路チップを選択する工程と、

10

コンピュータを使用して、内部を流動している流体で熱エネルギーを十分放散させる、
基板内のマイクロチャネルの位置と断面形状を予測する工程であって、前記マイクロチャネルの位置と断面形状を予測する工程は、流体と固体の温度と圧力の分布を反復して算出して、基板内のマイクロチャネルの潜在的な位置と潜在的断面形状を反復して判定する工程を含み、さらに

前記マイクロチャネルを基板内の予測した断面形状で予測したマイクロチャネルの位置に形成する工程とを含む、方法。

【請求項 11】

電圧の印加に呼応して液相を有する流体を揚水する電気浸透ポンプ装置であって、

流体インレットと流体アウトレットを有する流体チャンバと、

20

アノードチャンバ部の内部に配設したアノードと、

カソードチャンバ部の内部に配設したカソードと、

アノードとカソードの間に電圧が印加されると電気浸透ポンピングを行い、流体チャンバ内のアノードチャンバ部とカソードチャンバ部の間に仕切りを形成する多孔構造体と、
流体チャンバに一体化された触媒再結合器を備えた、電気浸透ポンプ装置。

【請求項 12】

前記触媒再結合器が、酸素と水素を再結合する、請求項 11 に記載の装置。

【請求項 13】

さらに、前記触媒再結合器の近傍に配設された加熱素子を含む、請求項 11 に記載の装置。

30

【請求項 14】

さらに、触媒再結合器を乾いた状態に保つように覆うガス透過性膜を含む、請求項 11 に記載の装置。

【請求項 15】

さらに、カソードチャンバ部とアノードチャンバ部の間に配設されたチャンネルと、

流体の通過を最低限に抑えると共にガスの副産物の通過を許容する、チャンネルの近傍に配設されたガス透過性膜とを含む、請求項 11 に記載の装置。

【請求項 16】

ガス副産物が水素であり、チャンネルが、カソードチャンバ部に配置された水素をアノードチャンバ部へと通す、請求項 15 に記載の装置。

40

【請求項 17】

半導体熱放出デバイスに接続され、液相を有する流体を使用して作動する熱伝達装置であって、

前記半導体熱放出デバイスに物理的に接続されるように構成された基板と、

基板内に配設された第 1 と第 2 のマイクロチャネル流体インレットと、

基板内に配設された第 1 と第 2 のマイクロチャネル流体アウトレットと、

前記第 1 と第 2 の流体インレットと前記第 1 と第 2 の流体アウトレットの間をそれぞれ接続することによって独立した流体流路を提供する第 1 と第 2 のマイクロチャネルとを含む、熱伝達装置。

【請求項 18】

50

さらに、流体を内部に流すことによって、熱エネルギーを熱交換器から伝達するように構成された熱交換器と、

流体の流れを形成する電気浸透ポンプと、

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプが、開ループ及び閉ループの一方の流体の流れを利用して共に作動するように構成した少なくとも一つの流体コネクタとを含む、請求項 17 に記載の装置。

【請求項 19】

さらに、第 1 の温度センサが前記第 1 の温度センサの近傍において熱放出デバイスによって生成された熱エネルギーを検出し、第 2 の温度センサが前記第 2 の温度センサの近傍において熱放出デバイスによって生成された熱エネルギーを検出するように、前記第 1 と第 2 のマイクロチャネルの近傍にそれぞれ位置する第 1 と第 2 の温度センサとを含む、請求項 17 に記載の装置。

10

【請求項 20】

前記第 1 と第 2 のマイクロチャネルが、前記第 1 のマイクロチャネルの内部の流体の流れが第 2 のマイクロチャネルの内部の流体の流れと逆の方向に向かうように、それぞれ、互いに平行に隣接して配設された第 1 と第 2 のマイクロチャネル部を含む、請求項 17 に記載の装置。

【請求項 21】

前記第 1 のマイクロチャネルは、少なくとも一部が熱放出デバイスの高熱エネルギー位置に配設されており、前記第 2 のマイクロチャネルは、高熱エネルギー位置とは異なる熱放出デバイスの別の部分に配設される、請求項 17 に記載の装置。

20

【請求項 22】

基板が、さらに複数の垂直方向の電気相互接続を含む、請求項 17 に記載の装置。

【請求項 23】

複数の垂直方向の相互接続が、複数の温度センサを温度制御回路に電氣的に接続する電気接続の一部を提供する、請求項 22 に記載の装置。

【請求項 24】

前記基板が、別の相互作用が前記熱放出デバイスの一部に当たり得る開口を含む、請求項 17 に記載の装置。

【請求項 25】

30

液相を有する流体を使用して作動する熱放出デバイス用の冷却システムであって、

内部に少なくともマイクロチャネルの一部が配設された基板と、

内部に流体を流すことによって、熱エネルギーを流体の外に伝達するように構成された熱交換器と、

流体の流れを生成する電気浸透ポンプを備え、

前記マイクロチャネルが、流体と接触する表面積を増加させるための部分的遮断構造体を有する部分を含み、

前記基板は、前記熱放出デバイスに物理的に接続できるように構成され、熱エネルギーを前記熱放出デバイスから基板に伝達し、さらに、熱エネルギーを前記基板から前記マイクロチャネル内に配置された流体に伝達し、前記マイクロチャネルは、流体が内部を流れるように構成され、

40

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプが共に作動して閉ループの流体の流れを形成する、冷却システム。

【請求項 26】

前記部分的遮断構造体が、マイクロチャネルの壁の粗面化部から構成される、請求項 25 に記載の冷却システム。

【請求項 27】

部分的遮断構造体が、マイクロチャネルの内部に配設されている、請求項 25 に記載の冷却システム。

【請求項 28】

50

液相を有する流体を使って作動する、熱放出デバイス用の冷却システムであって、

少なくともマイクロチャネルの一部が内部に配設された基板であって、前記熱放出デバイスに物理的に接続されるように構成されており、それによって前記熱放出デバイスから基板に熱エネルギーを伝達し、さらに前記基板から前記マイクロチャネル内に配置した流体へ熱エネルギーを伝達し、前記マイクロチャネルは、流体が内部を流れるように構成され、マイクロチャネルの一部が上側チャンバと、下側チャンバと、前記上側チャンバと下側チャンバの間に配設された複数のサブチャネルを備える、基板と、

内部に流体を流し、熱エネルギーを流体から外に伝達するように構成された熱交換器と

、
流体の流れを形成する電気浸透ポンプとを備え、

10

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプとが共に作動して閉ループの流体の流れを生成する、冷却システム。

【請求項 29】

液相を有する流体を使って作動する、熱放出デバイス用の冷却システムであって、

圧力センサと、

少なくともマイクロチャネルの一部が内部に配設された基板であって、前記熱放出デバイスに物理的に接続されるように構成されており、それによって前記熱放出デバイスから基板に熱エネルギーを伝達し、さらに前記基板から前記マイクロチャネル内に配設した流体へ熱エネルギーを伝達し、前記マイクロチャネルは、流体が内部を流れるように構成された基板と、

20

内部に流体を流し、熱エネルギーを流体から外に伝達するように構成された熱交換器と

、
流体の流れを形成する電気浸透ポンプとを備え、

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプとが共に作動して閉ループの流体の流れを生成するように構成された、冷却システム。

【請求項 30】

前記圧力センサが、基板の内部に配設された、請求項 29 に記載の冷却システム。

【請求項 31】

前記圧力センサが、基板と熱交換器の間の流路に配設された、請求項 29 に記載の冷却システム。

30

【請求項 32】

さらに、電気浸透ポンプと基板との間の流路に配設された別の圧力センサを含む、請求項 31 に記載の冷却システム。

【請求項 33】

さらに、基板内部に配設された温度センサを含む、請求項 32 に記載の冷却システム。

【請求項 34】

さらに、前記圧力センサと、前記別の圧力センサと、前記温度センサから入力信号を受信する温度制御回路を含む、請求項 33 に記載の冷却システム。

【請求項 35】

前記温度制御回路が、前記圧力センサと、前記別の圧力センサと、前記温度センサからの信号を使用して電気浸透ポンプを制御する、請求項 34 に記載の冷却システム。

40

【請求項 36】

液相を有する流体を使って作動する、熱放出デバイス用の冷却システムであって、

少なくともマイクロチャネルの一部が内部に配設された基板であって、前記熱放出デバイスに物理的に接続されるように構成されており、それによって前記熱放出デバイスから基板に熱エネルギーを伝達し、さらに前記基板から前記マイクロチャネル内に配設した流体へ熱エネルギーを伝達し、前記マイクロチャネルは、流体が内部を流れるように構成された基板と、

マイクロチャネルの近傍に配設された温度センサからの入力信号を受信する温度制御回路と、

50

内部に流体を流すことによって熱エネルギーを流体から外に伝達するように構成された熱交換器と、

流体の流れを形成する電気浸透ポンプとを備え、

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプとが共に作動して閉ループの流体の流れを生成する、冷却システム。

【請求項 37】

液相を有する流体を使って作動する、熱放出デバイス用の冷却システムであって、

少なくともマイクロチャネルの一部が内部に配設された基板であって、第1と第2の層を備え、前記マイクロチャネルの少なくとも一部が前記第1と第2の層両方の内部に形成された基板と、

10

内部に流体を流し、熱エネルギーを流体から外に伝達するように構成された熱交換器と

、
流体の流れを形成する電気浸透ポンプとを備え、

前記基板は前記熱放出デバイスに物理的に接続されるように構成されており、それによって前記熱放出デバイスから基板に熱エネルギーを伝達し、さらに前記基板から前記マイクロチャネル内に配置した流体へ熱エネルギーを伝達し、前記マイクロチャネルは、流体が内部を流れるように構成されており、

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプとが共に作動して閉ループの流体の流れを生成する、冷却システム。

【請求項 38】

20

液相を有する流体を使って作動する、複数の集積回路から構成された熱放出デバイスのための冷却システムであって、

前記複数の集積回路の間に配設され、マイクロチャネルの少なくとも一部が内部に配設された基板であって、前記熱放出デバイスに物理的に接続されるように構成されており、それによって前記熱放出デバイスから基板に熱エネルギーを伝達し、さらに前記基板から前記マイクロチャネル内に配置した流体へ熱エネルギーを伝達し、前記マイクロチャネルは、流体が内部を流れるように構成された基板と、

内部に流体を流し、熱エネルギーを流体から外に伝達するように構成された熱交換器と

、
流体の流れを形成する電気浸透ポンプとを備え、

30

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプとが共に作動して閉ループの流体の流れを生成する、冷却システム。

【請求項 39】

液相を有する流体を使って作動する、熱放出デバイス用の冷却システムであって、

少なくともマイクロチャネルの一部が内部に配設された基板であって、前記熱放出デバイスに物理的に接続されるように構成されており、それによって前記熱放出デバイスから基板に熱エネルギーを伝達し、さらに前記基板から前記マイクロチャネル内に配置した流体へ熱エネルギーを伝達し、前記マイクロチャネルは、流体が内部を流れるように構成され、さらに、複数の垂直な電気相互接続を含む基板と、

内部に流体を流し、熱エネルギーを流体から外に伝達するように構成された熱交換器と

40

、
流体の流れを形成する電気浸透ポンプとを備え、

前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプとが共に作動して閉ループの流体の流れを生成する、冷却システム。

【請求項 40】

前記マイクロチャネルが、さらに垂直及び水平な流体チャネルを含む、請求項 39 に記載の冷却システム。

【請求項 41】

前記複数の垂直方向の相互接続が複数の温度センサを温度制御回路に電氣的に接続する電気接続の一部を提供する、請求項 39 に記載の冷却システム。

50

【請求項 4 2】

液相を有する流体を使って作動する、熱放出デバイス用の冷却システムであって、少なくともマイクロチャネルの一部が内部に配設された基板と、流体を内部に流し、熱エネルギーを流体の外に伝達するように構成された熱交換器と、流体の流れを生成する電気浸透ポンプを備え、前記基板が、別の相互作用が前記熱放出デバイスの一部に当たり得る開口を含み、前記基板は、前記熱放出デバイスに物理的に接続できるように構成され、それによって熱エネルギーを前記熱放出デバイスから基板に伝達し、さらに、熱エネルギーを前記基板から前記マイクロチャネル内に配置された流体に伝達し、前記マイクロチャネルは、内部に流体が流れるように構成され、前記基板と、前記熱交換器と、前記電気浸透ポンプが共に作動して閉ループの流体の流れを形成する、冷却システム。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本出願は、2001年9月28日提出の米国出願No. 60/326,151号に関連し、その優先権を主張し、本明細書において参考として明示的に援用される。ここで説明する本発明は、DARPA/エアフォース・コントラクトF33615-99C-1442によって部分的に支持されたものである。

【0002】

20

(発明の分野)

本発明は、概ね、発熱するデバイスからの熱除去に関する。特に、本発明は、集積回路、光電子デバイス、パワーエレクトロニクス、生物学分析デバイス、および熱除去のために特定の手段を必要とするほど十分な熱を浪費するかまたは吸収する任意のデバイスからの熱除去に関する。

【背景技術】

【0003】

(発明の背景)

例えば、携帯電話と同様に、ラップトップコンピュータ、携帯用コンピュータ、及びデスクトップコンピュータなどのような電子工学システムは、入力電力を使用して作動する。これらは、入力電力の一部が熱に変換され、発生した熱は、一般的に集積回路チップや回路板などのように、特定可能な領域に集中する特徴を有する。このようなデバイスや製品には、その作動温度を特定の範囲に調節するため、必要に応じてヒートシンク、ファン、熱パイプ、冷却手段及び冷却水などが内蔵されている。

30

【0004】

現在開発中の電子デバイスは、従来の放熱技術の冷却能力を超える量及び空間密度の熱を発生すると考えられる。例えば、半導体業界が設定し、半導体国際技術ロードマップ(International Technology Roadmap for Semiconductors)がまとめた技術ターゲットは、2007年までにマイクロプロセッサの表面から200Wの熱を取り除く必要があることを示している。総電力及び電力密度の増加の傾向は、光電子通信業界、パワーエレクトロニクス業界、その他においても同様に激しい。従来のヒートシンクでは、システム設計や市場の期待に見合った量の範囲内で、目標とする量の電力や電力密度を除去することができないのである。

40

【0005】

この状態は、冷却デバイス用として利用可能な容積や表面積が減少する結果となる、目標とするシステム全体の小型化への傾向によってさらに悪化している。これら二つの傾向(熱負荷の増加とシステムの小型化)の相互作用は、半導体業界や、熱発生または吸収デバイスに依存する他の業界の将来における重大な問題として認識されている。

【0006】

熱をデバイスから除去するための従来の技術には、数多くの確立された技術がある。

50

【 0 0 0 7 】

ヒートシンクは、一般的に、自然の対流もしくは人工的な対流により、熱をデバイスから周囲の空気に伝達するフィンを有する金属板から構成される。ヒートシンクのフィンは、デバイスと空気との間の接触面積を増加することにより、熱伝達の効率を増加させる役割を果たす。50年以上もの間に、さまざまな材料、形状及び構成のヒートシンクが知られてきた。

【 0 0 0 8 】

電気モータによって駆動する回転ブレードから構成されるファンにより、ヒートシンクの周囲及び内部に、自然の対流より速い速度で空気を通過させることによってヒートシンクと周囲の空気との間の熱伝達を高めることができる。ファンは、冷却システムにおいて、30年以上もの間使用されてきた。大量の熱を発生するデバイスを冷却するためのファンをヒートシンクに組み込むことは、多くの発明者によって開発されてきており、広く使用されている。

【 0 0 0 9 】

ヒートパイプは、ウィッキング構造を組み込んだ中空のチューブで形成され、部分的に液体を充填してある。ヒートパイプの一端は、熱を発生するデバイスに接触して戴置する。ヒートパイプのこの端部においては、液体が蒸発し、蒸気は管の中空部分の中心を通過して他端まで進む。この端部は、冷却媒体、もしくはヒートシンクと接触させて戴置するか、もしくは、周囲の空気と接触させ、管の中心の蒸気を凝結温度まで冷却する。この液体は、凝結後、管の高温側端部までウィッキング構造の毛細管力によって運ばれる。ヒートパイプは、同じ寸法の固体の金属棒より熱伝達がかなり優れており、多くの分野で広く使用されている。ヒートパイプは、現在、電子製品、宇宙船、小型形状における発熱が問題となるような様々な分野において熱除去に使用されている。ヒートパイプは、多くの形状構造に形成されており、十分な熱伝達を実現するためにデバイスのパッケージの中に一体化することもでき(5, 216, 580)、また、可撓性を有するカップリングを介してある程度離れたところまで熱を伝達することもできる(5, 560, 423)。蒸気室は、操作原理と寸法の点ではヒートパイプに酷似しているが、一般的に(管状ではなく)矩形の断面を有し、様々な幾何学的配置のウィッキング構造を有する場合がある。ヒートパイプも蒸気室も共にピーク電力において、同様の基本的な物理的限界がある。熱源とヒートシンクとの距離を長くすればするほど、断面積が小さくなり、これらのデバイスが毛細管現象の限度、もしくは乾燥状態に達する前に除去できる総熱力が小さくなる。

【 0 0 1 0 】

ある高性能な熱制御を必要とする用途、または低温の調節が必要な場合に、蒸気圧縮サイクルを介した、または熱電気や他の固体冷却デバイスによるデバイスの動的冷却を使用される。これらの用途においては、デバイスからの熱は、排熱面まで伝達され、冷却機構の熱力学の効率の限界により、かなりの過大な熱が追加される。排熱面は、一般的にここで説明した他の手段のうちの一つによって冷却しなければならない。蒸気圧縮冷却サイクルは、長年の間、家庭用エアコンやキッチンの冷蔵庫から宇宙船や極低温貯蔵を要するシステムなどに亘る多くの用途に使用されてきた。

【 0 0 1 1 】

冷却水は、大量の熱が発生し、ここで説明する他の方法が熱を周囲の空気に排除できない場合に使用される。この場合、冷却水を連続的に供給しなければならない、この冷却水は付設の構造体の中のデバイスまたは通路の周囲または内部を通る。その後、温まった水を排水システムに戻す。

【 0 0 1 2 】

冷却水を使用する小型化の適用において、小型マイクロチャネル冷却システムおよび小型閉ループ冷却システム、小型マイクロチャネル冷却システムおよび流体の能動的な揚水に依存して冷却を実現するシステムなどの問題に取り組む、技術が存在する。マイクロチャネル熱交換器は、元々、タッカーマン氏他(US 4, 450, 472、US 4, 573, 067)によって、1980年早期に開発されたものである。これらのデバイスは、真

10

20

30

40

50

っ直ぐで断面が均一の微細加工の通路をシリコン基板内に設け、その中に冷却液を通すものである。タッカーマン氏とピース氏による元々の研究に続くその後の特許（４，４５０，４７２）には、マイクロチャネルの製造方法、取り付け方法及び特定の適用方法に対する特定の材料と設計についての説明がある。

【００１３】

熱伝達率を高めるため、もしくは温度の均一性を改善するためのマイクロチャネルヒートシンク設計も開発された。フィリップ氏（ＵＳ４，８９４，７０９）では、チップ内の温度の均一性を改善するためのガードヘッダ構造を有する液体マイクロチャネル冷却について説明している。フリースター氏（ＵＳ４，３１２，０１２）は、核に起因する沸騰及び熱伝達率を改善するため、マイクロチャネルの表面を変形した技術について説明している。スウィフト氏（ＵＳ４，５１６，６３２）及びワルポール氏（ＵＳ５，０９９，９１０）は、流動方向を変更して温度の均一性を改善したチャネルについて説明している。ロモリーノ氏（ＵＳ５，４２７，１７４）は、冷却水の有効熱容量と目標の温度範囲における乱流を制御するために、２種類の流体を混合して使用している。

10

【００１４】

マイクロチャネルを採用している閉ループ冷却システムはまた、最近、研究が盛んな分野であり、ハミルトン氏（ＵＳ５，９０１，０３７）は、集積回路に付設したマイクロチャネルに流体を通し、磁気ポンプが圧力を生成する閉ループ冷却システムについて説明している。さらに、デイビス氏（ＵＳ５，７０３，５３６）は、強力ＲＦトランスミッタを冷却するための閉ループ流体冷却システムの使用について説明している。

20

【００１５】

これらは、マイクロポンプの開発において、広範囲の研究が進められてきた。これら研究の成果には、振動圧電膜に基づくポンプ、ぜん動ポンプ、電気流体力学ポンプ他がある。これらのポンプは、目下のところ、高熱束を高出力なデバイスから除去する際に必要とされる圧力及び／または流れの生成ができないようである。

【００１６】

電気浸透現象はＦ．Ｆ．ルス氏の１８０９年の研究以来知られている。この現象を簡単に説明すると、液体の流れが液体／壁の界面において発達する実効電荷の領域に誘導されるという現象である。この力の大きさは、印加された電界と、この実効電荷の領域で利用可能な荷電化学種の量に比例する。システムの断面積が大きければ、大流量が実現される。

30

【００１７】

電気浸透現象に基づく小型ポンプ（すなわち電気浸透ポンプ）は、ティーウェス氏（３，９２３，４２６）が元々開発した技術であり、多孔セラミック構造体を使用して荷電した表面層を有するマイクロサイズの通路を多数設けている。ティーウェス氏は、高多孔率、所定の作動流体に対する高電気浸透流動性、小径の孔などを特徴とする、ポンプ構造を選択する重要性について説明すると共に、場合によってはビーズからなる石英やガラスセラミクス、及び多孔質のポリマーマトリックスの使用可能性について論じている。ティーウェス氏のポンプにおける作動流体が、高誘電率、低粘度、低導電性を有することが示されている。ティーウェス氏のポンプが使用する模範的な液体は、脱イオン水、エチルアルコール、アルコールと水との混合液、その他多種の有機溶剤である。これらの材料と溶剤により、１ｍＬ／分を超える流量と１気圧を超える圧力が報告されている。

40

【００１８】

これまで、多数の多種多様の冷却デバイス及び技術について説明したが、小型化した環境において実行可能な能力を有する高パワーの用途における改良した閉ループの流体冷却システム及び技術が必要である。さらに、例えば、ポンプを通る液体の流れを電氣的に制御して、集積回路デバイスの温度を動的に調節することにより高温点の冷却を容易に行うことができるデバイスの帰還制御温度調節機能を有する改良された小型流体冷却システムが必要である。このような小型流体冷却システムにより、（多数のポンプと連動して）複数の冷却ループを使用して、デバイス温度プロファイルの特別且つ時間的な特性を独立し

50

て調整することができるようになる。

【0019】

さらに、予測される高熱束（例えば、100W以上の電力）を取り除くために必要な高圧（例えば、10PSI以上の圧力）及び／または高流量（例えば5ml/分以上の流量）を生成することが可能な小型ポンプが必要である。このようなポンプは、例えば、発生ガスや沈殿材料に関する実際問題に対して（例えばリキャプチャなどによって）対策を施した閉ループシステムで使用するポンプ形状などのように、従来のポンプが有する欠点を克服もしくは解決したものでなければならない。これらの問題は、ポンプを採用する閉ループ流体冷却システムにおいて、顕著になってきている。

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0020】

（発明の要旨）

一つの局面によると、本発明は、ポンプを備えた流体ループを使用することによって、熱を発生するデバイスから熱を除去し、熱除去構造体へ伝達するという利点を有する。享受できる多くの特定の利点のうちのいくつかは、単体もしくは様々な組み合わせの形態をとる。

【0021】

本発明は、デバイスから高い熱束及び高い総電力を除去することが可能である。

【0022】

また、本発明は、ポンプと熱交換器の重量と共に、熱を発生するデバイスに取り付けなければならない冷却システムの要素の体積及び重量を最小限に抑えることができる。

【0023】

また、本発明は、デバイスをマイクロ熱交換器とともに作動させた結果のデバイス温度の分布をシミュレートすることができる。このシミュレーションにより、所定の流量とマイクロチャネル構造群におけるマイクロ熱交換器への熱伝達に対する熱抵抗を判定する。

【0024】

本発明はまた、マイクロ熱交換器のマイクロチャネルの形状と分布を最適化するとともに、デバイスの操作における変動による熱束が空間的及び時間的に大きく変化しても、デバイスにおける空間的及び時間的温度変化を最小限とすることができる。

【0025】

また、本発明は、その性能と信頼性に非常に有害な影響を与えうる熱束の大きいばらつきがある状態においても、デバイスの温度変化を最小限に抑えることが可能である。これは、設置、形状、及びマイクロチャネル熱交換器の内部特性を調整することによって実現可能である。最適なマイクロチャネル設計は、後に述べる本発明のシミュレーション機能を使って実現可能である。

【0026】

本発明は、熱除去要素の位置において柔軟性を有し、特に、熱を発生するデバイスの位置から大きく離れた位置にも設置可能である。また、除去面積を大きくとることができ、全体として除去や、システムに対する熱抵抗を低減することができる。

【0027】

本発明による装置と方法は、好ましくは、機械的部品を移動させることなく、また、関連する不快な電氣的または音響上のノイズを生成することなく、さらには、関連する信頼性を低下させることなく、高圧及び高流量を生成することが可能な電気浸透ポンプを使用する。これらの電気浸透ポンプは、好ましくは、現在利用可能なマイクロポンプに比較して性能、効率を改善し、重量及び製造コストを削減できる材料と構造で構成されている。また、これらの電気浸透ポンプは、好ましくは、発生ガスや沈殿材料を回収でき、長期にわたる閉ループ操作を可能とする。

【0028】

また、本発明による装置及び方法は、ポンプを通る流れを電氣的に制御することにより

10

20

30

40

50

デバイスの温度を動的に調整することができるとともに、多数の冷却ループを利用して、デバイスの温度プロファイルの空間的及び時間的特性を個別に調節することができる。

【0029】

本発明におけるこれら、そして他の利点及び局面は、図面とともに示す本発明の好ましい実施の形態の詳細な説明から明らかとなると共に、容易に理解できよう。

【0030】

(好ましい実施形態の詳細な説明)

本発明は、ひとつの局面において、マイクロ熱交換器を基礎とする電子システムのための小型冷却システムを提供し、特にシリコンまたは金属で加工したマイクロチャネルと小型電気浸透ポンプを提供する。このシステムは、密閉されてモジュール形式に配置され得、デバイスから効率よく熱を除去するとともに便利なマイクロ熱交換器に伝達することができる。上記のようなマイクロ熱交換器と電気浸透ポンプは、非常に小型であると共に出力効率がよく、その結果、システム全体は、ヒートパイプ、蒸気室、及び小型デバイスに見合った電力を除去するために通常使用されるフィンアレイヒートシンクなどよりはるかに小さく軽量である。このシステムは、可撓性のチューブによって互いに接続され、それによって、設計上の可撓性において有利である。このシステムのある実施形態は、一般的にループシステムと呼ばれ、その好ましい形状から、様々な構成要素によって閉ループが確立され、そこを熱エネルギー伝達のための液体が通る。

10

【0031】

それぞれの図がシステムの異なる局面を示しているが、別の図面における類似した構成要素は、必要に応じて同様の参照符号で表している。ここで詳細に示す様々な構成要素の組み合わせ以外の組み合わせが企図されることが理解される。さらに、マイクロ熱交換器、マクロ熱交換器、及びポンプのような別体の構成要素は、折に触れ、特定のシステムの実施形態を参照しながら説明されており、その説明が正しい限り、それらの構成要素は、ここで説明したその変形も含め、独立して意義があると共に、それらが説明されたシステムとは離れて別に説明した特許を受けられる特徴を有すると理解できるものである。

20

【0032】

図1は、閉ループ冷却システム100の一実施形態を示しており、熱を発生するデバイス50(電気接続52を介して回路板54に取り付けた集積回路として示しているが、回路板、または他の熱を発生するデバイスでもよい)に取り付けたマイクロ熱交換器200、作動流体用の小型ポンプ300、電子システムから熱を環境へ排除するためのマクロ熱交換器400と、マイクロ熱交換器200で測定した温度に基づいたポンプ入力電圧のコントローラ500を備える。個々のシステム構成要素について、それぞれより詳細に説明する。

30

【0033】

(マイクロ熱交換器)

マイクロ熱交換器200は、断面が小さく(厚みは1mm未満)、熱抵抗が非常に低い。これは、銀充填エポキシまたははんだのような熱接着剤を使ってデバイスの表面に直接取り付けられる。精選したものの設計は寸法が20~500マイクロメートルのチャネル(以下マイクロチャネルと称する)を使用している。マイクロ熱交換器200の有意な局面は、サーモメータを一体化した別々のチャネル群である。空間的分布、寸法及び流動方向は、チップまたはデバイス50の異なる機能位置において起きる熱束の変化に合わせて調整できる。さらに、これらのマイクロチャネルまたはマイクロ噴流の形状及び配置を最適化して、以下に議論されるように、デバイス50全体にわたる温度の均一化、あるいは、デバイス50の異なる領域の独立した温度制御が可能である。

40

【0034】

マイクロ熱交換器200は、例えば、金属薄板、シリコン・ガラス層、セラミクおよびカーボンファイバーコンポジットなどのような様々な材料から構成することができる。この構造体の材料は、デバイス50から流体への熱伝達の必要条件を満たし、デバイス50への取り付けが確実に行われ、ループ内で長期間にわたって流体と接触した状態で作動で

50

きるような材料を選択される。取り付けを確実にこなう必要があることから、その熱膨張率をデバイス 50 の熱膨張率と適合させたいという要望が出てきた。考えられるデバイス 50 の多くがシリコンから形成されているので、マイクロ熱交換器 200 をシリコンから製造すると有利であり得る。さらに、シリコン製造方法論により、マイクロチャネルの形状と配置が正確に制御でき、温度センサ、圧力センサ、及び制御回路をマイクロチャネル構造体の中に組み込むことができる。あるいは、金属製造方法は、要求される寸法の制御が可能となり、低価格で製造でき、密閉技術における信頼性が高く、一部の用途の熱基準に適合するなど、状況によっては、シリコンを上回る利点を提供する。本発明の利点は、材料の選択においてかなり融通が利くという点と、マイクロチャネル構造体の形状が、部分的に、そしてある状況下においては、電気浸透ポンプ 300 の機能に基づくものであるという点にある。 10

【0035】

(電気浸透ポンプ 300)

本明細書中で説明するシステムにおいて実施され、操作される可能性のあるポンプには、多くの種類が考えられる。しかし、好ましくは、出力において高圧、高流量を生成できる、新規の電気浸透ポンプ 300 (「EOポンプ 300」もしくは単に「ポンプ 300」ともいう) を使用する。電気浸透ポンプ 300 は、電界を使って液体と固体の境界近辺における電荷を促進し、一般的には動的ポンプエレメントの面と容量の比率が非常に高くなるように調整されている。電荷層と、それによって起きる電気浸透の基本的な電気化学作用は、水または水溶液と接触すると多くの材料面で生じることが分かっており、よってポンプ 300 は多岐に渡る製造方法を使用して製造が可能である。特定の水溶液と特定の表面との間の相互作用の性質により、印加した電界によって引き出される電荷水溶液の量にバラツキが起こる。その結果、EOポンプ 300 の性能は、その表面相互作用に依存せず、このことは、強力な電気浸透ポンプ効果をもたらす表面と水溶液を選択するのに有効であり得る。 20

【0036】

ポンプ 300 の高圧、高流量は、例えば、ホウ珪酸フリット、ポリマーフリット、ガラス微粒子の充填層などのような焼結細孔媒体を使うことによって得られ得る。エアロゲル、クラスファイバーコンポジット、ナノ構造媒体、多孔質シリカ、マイクロチャネル板構造体、他の多孔質セラミック材および、高表面/容積比を提供すると共に、化学的に活性の表面を提供する多くの他の材料を使って電気浸透ポンプ 300 を製造することができる。また、リソグラフィ法を使って高表面/容積比の構造体を直接製造することもできる。シリコン微細加工ポンプ構造は、後にさらに詳しく説明するように、センサとマイクロチャネル構造体を含む他のマイクロ熱交換器 200 の要素と、コントローラ 500 のような制御エレクトロニクスとを、すべて一つのモジュール内に一体化できるという利点を有し得る。 30

【0037】

(マクロ熱交換器 400)

マクロ熱交換器 400 は、閉ループシステムとその環境との間で非常に低い熱抵抗を提供する。マクロ熱交換器 400 は、多種の異なる方法を実施する多くの従来の熱除去デバイスから構成することが可能であり、低熱抵抗で周囲に向けて除去する役割を果たす。例えば、マクロ熱交換器 400 は、金属ファン冷却ヒートシンク、または、デバイスの筐体もしくはパッケージのケースの専用部分を含んでもよい。冷却ループにより、マクロ熱交換器 400 は、設計の自由度が非常に高くなることが特に重要な点である。なぜなら、ある実施形態では、マクロ熱交換器 400 をデバイス 50 から離れた位置に戴置すれば、デバイス 50 の近くの領域の必要条件に物理的に合わせる必要がなくなるからである。 40

【0038】

(コントローラ 500)

コントローラ 500 は、デバイス 50 の電子システムから利用可能な標準入力電圧を取り、それらを電気浸透ポンプ 300 が必要とする操作電圧に変換する。コントローラ 50 50

0 はまた、マクロ熱交換器 200 の内部に一体化された温度、圧力、及び流量センサを監視し、ポンプ 300 に伴う電源に適当な駆動電圧を供給して各電気浸透ポンプ 300 のアノード 314 とカソード 316 の間に適当な電流を確立し、ポンプ 300 内の作動流体の中の液相を押し進めることができる環境を作り上げる。大面積 (2 cm^2 より大きい) のデバイス 50 では、複数のセンサと電気浸透ポンプ 300 を使用した設計によって、デバイス 50 のマイクロチャネルグループの近くの異なる領域を異なる比率で冷却し得る。

【0039】

ポンプ 300 を含む上記のような構成要素の材料と構造の製造方法の多様性に加え、本発明は、別の局面として、唯一の操作方法を説明する。

【0040】

電気浸透ポンプ法の使用の避けられない局面の一つは、流体と電極の間の相互作用の電子化学である。この界面における電荷の交換により、電気分解が起こり、流体の構成要素のうちの一部が分解する。水の場合、電気分解により、 H_2 が一方の電極で、そして、他方の電極で O_2 が連続的に形成される。

【0041】

よって、本発明の一つの局面は、後にさらに詳しく説明するように、撥水性プラチナ媒体からなる触媒から構成される触媒再結合器の結合である。 H_2 と O_2 は、再結合してこの触媒で水を形成し、この表面の撥水性により水が弾けて触媒の表面から落下し、流体に戻る。液体を触媒の表面から離れた状態で保つ別の方法は、水素の酸化に伴う反応熱を利用する方法である。水素と酸素の水への再結合により、閉鎖され、密閉されたシステムとして本明細書中で説明しているようなシステム 100 の実施を可能にしている。多くの異なる触媒材料も使用できるが、本明細書中でさらに詳しく説明する撥水性プラチナ触媒が、今のところ最もよく働くことが分かっている。

【0042】

本明細書中で説明する本発明の別の局面は、インレット及びアウトレットの設計、電極の設計、及び単一容積の小さいチャンバ内で、酸素と水素の泡が結合するような再結合室の位置である。図 2 は、ポンプチャンバ 312 を形成する筐体のカソードとアノードの半体 312A、312B のそれぞれの間を、多孔構造体 310 で密閉することによって形成されたポンプ 300 の設計をさらに詳しく示している。アノード 314 とカソード 316 は、それぞれの電極 313 及び 315 との接続を介して筐体の壁 318 を通ってポンプチャンバ 312 の中に挿入され、ポンプ 300 の内部の作動流体と電氣的に接触する。壁 318 は、例えば、ガラスアクリル、セラミック、または SiO_2 被覆シリコンのような絶縁材料からなり、多孔構造体 300 の境界線に示すように結合し、例えば、接着剤、ガスケットであり得るか、または二片を溶かすかもしくは溶接することによるシール 320 を使って密閉した壁 318A と 318B を含む二片構造を使用して形成する。流体は、インレット 322 から流れ、電気浸透力によりポンプチャンバ 312 内の多孔構造体 300 を通って引き出され、アウトレット 324 を通って排出される。アノード 314 で生成された酸素は、チャンバ部 312B 内で止まり、カソード 316 で生成された水素は、ループを回ってポンプ 300 に戻り、そこで残りの酸素とともに触媒再結合器 326 に入って再結合して水になり、ポンプチャンバ 312 に戻る。

【0043】

上流の電極 (アノード 314) で生成された酸素の泡は、圧力 (すなわち、浮力) によって再結合室に追いやられる。水素の泡は、閉ループシステムを回って流れ (圧力、表面張力及び粘力を受ける)、ポンプ 300 のインレット 322 に入ると、浮力によって再結合室 312 にも追いやられ、最終的にはメッシュまたはペレット触媒再結合器 326 に入り、そこで水素が再結合して上記のように水を形成する。

【0044】

冷却ループの操作中に、蒸発領域における流体の連続的な蒸発によって、蒸発装置内、もしくは冷却ループのどこかに残留物が蓄積し得る。これらの残留物には、電解物、蒸発中に溶液から沈殿する塩分、あるいは他の溶解固体が含まれていてもよい。これらの電解

10

20

30

40

50

物のいくつかは、電極の表面と、ポンプの多孔構造体の性質を保存するこれらの能力に起因して、故意に加えたものであってもよい。沈殿した残留物が長期間蓄積することは、ポンプを短期間、最大流量で定期的に作動させることによって回避され得る。流量が最大まで増加したら、液相が冷却ループ全体に充填され、堆積した材料を溶液の中に再溶解させることにより、蓄積した残留物を回収する。この工程は、ウォッシュ・スルーと呼ばれ、ポンプの電極に印加される電位差を上げることによって迅速に流量を調整できる性質に依存する。ポンプ300で短時間（例えば、1000秒毎に1秒）ウォッシュ・スルー操作を行って、冷却ループに堆積した残留物を流体内に回収し得る。これにより、システム100を長時間操作しやすくなる。

【0045】

電解物を使用することにより、ポンプ300の性能を長時間維持することができるようになり（界面化学を安定化することにより）、電極とポンプ構造体との間の電圧降下（すなわち、電極面から介在する電解物を通してポンプ構造体のインレット孔までのイオンの伝導に係る電圧降下）を減少させる。

【0046】

システム100についてさらに説明する前に、システム100のその他の固有の操作局面についてさらに説明する。

【0047】

（一過性チップ温度均一性のためのポンプ制御）

マイクロ熱交換器200の中に温度計を組み込んでコントローラ500を通してフィードバックすることにより、デバイス50の熱負荷に一過性サージの存在下でさえ、システム100は、デバイス50の時間的溫度変化を最低限に抑えることができる。シリコン熱交換器の場合、温度計を、例えば、ドープシリコンサーミスタ、ダイオードまたはパターン金属電気抵抗ブリッジを使って熱交換器に組み込む。コントローラ500は、信号を送ってそれぞれの電気浸透ポンプ300に伴う電源を制御し、マイクロ熱交換器200の測定温度に基づいてアノード314とカソード316との間に存在する電流を制御する。1つを超えるポンプ300を使用しているシステム100の場合、コントローラ500と適当なポンプ300でデバイス50の異なる領域の温度サージに対して別々に応答することができる。この機能は、システム100の要素の重要な特性を利用したものである。ポンプ300による圧力と流量は、1msより速いタイムスケールで印加された電圧の変化に応答し、マイクロ熱交換器200の比熱は非常に低い。結果として、熱負荷の変化または操作温度の変化要求に対するシステム100の応答は、非常に迅速で、約1Hzの帯域幅で動的な温度制御を行うことができる。この特性は、ヒートパイプ、冷却フィン（及び/またはファン）及び位相変化材料適用のような、電気信号入力によって調節可能な熱除去ができない手段（受動ヒートシンク、ヒートパイプ、位相変化材料）を使用する、あるいは、熱容量が大きく、熱伝達係数（ファン）を変えるぎりぎりの能力に起因して、時間的応答が非常に緩慢であるといった、現存の小型デバイス温度制御技術の大きな改善である。

【0048】

（チップ温度と温度勾配を最低限に抑えるためのマイクロ熱交換器の設計）

マイクロ熱交換器200は、デバイス50からの熱束が空間的に大きく変化することを考慮したとしても、所定の流量に対する最大及び平均チップ温度を最低限に抑えるための現場温度検出のような設計改革を可能とする。これらの改革の機会として、ドープシリコンサーミスタの一体化がある。これにより、下記に述べるように、コントローラ500が、温度の局所的変化に応答できるようになる。また、マイクロ熱交換器200は、チャンネル寸法および空間密度を調整してデバイス50の領域にわたる有効熱抵抗を変化させることにより、熱束の違いによる温度勾配を最低限に抑える機会を提供する。シリコンのマイクロチャンネルの設計および最適化はまた、さらに後述のチャンネル内二相の沸騰流の一次元モデルを使って達成され得る。最大熱束の領域の有効なチャンネル寸法は、内部フィンのような局所的な高表面領域構造体、もしくは、より小さい断面積50の領域を利用して低減し

10

20

30

40

50

、局所的熱伝導を増大する。さらに、流体インレットに対する流れの方向および高熱束の領域の位置を利用して、局所的温度を最低限に抑えることができる。流体がチャネルを通過して移動するにつれて圧力が連続的に低下し、二相液体・蒸気混合体の温度は、圧力のみ依存するので、流体インレットと高熱束領域との間の間隔を大きくすることによって、その温度を大幅に低下させることができる。デバイス 50 の反対方向に流れるチャネル群を有効に利用して温度の均一性を大幅に高めることもまたできる。

【0049】

詳細の熱モデリングに基づく最適な設計方法論の開発により、マイクロチャネルの形状設計をカスタマイズして特定のデバイス 50 の熱分布に適合させることができる。本発明のこの局面により、システム 100 の総合的な性能を、特定のデバイス特性に対して最適化することができる。本発明のこの局面は、さらに、単一のマイクロ熱交換器 200 で多数の独立した冷却ループを操作可能とすることにより可能となる。シリコン製造用の設計及び製造能力により、複数の流体マニホールドを単一の基盤の上に共存させ、且つ同時に作動させて、デバイス 50 の異なる領域の独立した熱調整を行うことができるようになる。

10

【0050】

(ループシステム用作動流体設計及び最適化)

目標のデバイス 50 の温度は、さらに、調整した作動流体化学作用及び操作圧を使用して実現する。化学作用および操作圧は共に、沸騰温度に影響を与え、それにより、システム 100 が最低熱抵抗を達成するデバイス 50 の温度を決定する。これらの設計および最適化戦略は、図 2 に示す触媒再結合器 326 の操作にも影響を与えるという点で意義のあることであり、効率よく操作するためには、水素および酸素の最低分圧を必要とする。

20

【0051】

使用できる流体化学物質は、脱イオン水 (DI)、水性緩衝液、有機液 (例えば、アセトニトリルおよびメタノール)、及びポンプ 300 の作動流体としての有機液と緩衝液との混合液を含む。ただしこれらに限定されるものではない。必要とされる熱伝達の要件を達成する最適化した作動流体の混合液によって、さらにポンプの性能および信頼性を最適化することができる。作業流体混合液の最適化のポイントは、作業流体の長期にわたる pH 制御を含む (これは、ポンプ表面電荷密度、従って、ポンプ圧と流量性能に直接影響する)。純粋な脱イオン水により、熱除去において最高の熱力学的効率をしばしば得ることが、システムの操作にさらなる必要条件が課されることもある。例えば、ポンプの高流量性能は、DI 水から入手可能なもの以外の流体の導電性を増加する (例えば、水に緩衝液を加える) ことにより、達成することができる場合もある。さらに、水溶液の中の添加物も、電極及び多孔ポンプ構造体の表面特性の保存を助けることができる。例えば、作業流体の導電性の増加は、ポンプ 300 のジュール熱の散逸を増加するというマイナスの効果をも有するが、多孔ポンプ構造体の中の水溶液の電荷イオンの層の厚みが減り、これにより、ポンプによって提供される圧力と流量が増加するという有益な効果も有する。さらに、流体の導電性が増加することにより、電極から多孔ポンプ構造体の表面への電位降下が低減される。これは、多孔構造体の表面の電位差のみがポンプ作用に貢献するため、重要である。アノードから一方の面、そして他方の面からカソードへの電位の降下は無駄になる

30

40

【0052】

ループシステム 100 についてさらに詳細に説明する前に、提供される特定の利点について述べる。これらの利点により、システム 100 は、上述のようにラップトップ及び携帯型デバイスのヒートパイプおよび蒸気室技術ならびに、デスクトップコンピュータで利用される伝統的な金属フィンアレイ・ヒートシンクを含む従来の熱散逸システムに匹敵することができる。ピーク熱負荷増加と、デバイス 50 の最低容量および、温度変化の過渡的及び空間的低減の可能性を含む主要な改良に起因して、本明細書中に記載されるループシステム 100 の様々な局面が、電子システムの継続した調整および性能改善をも可能とする。

50

【 0 0 5 3 】

(所定のデバイスの容量に対し、大幅に大きいピーク熱負荷)

本発明によるシステム 1 0 0 の意義のある利点は、ずっとより小型の容量を使って、従来のデバイスより大幅に高い熱負荷を処理する能力である。冷却ループが揚水されるので、所定のループシステム 1 0 0 の設計の圧力の降下および流量を、標的の熱負荷である 5 W (携帯) と 1 k W (パラレル・プロセッサのデスクトップ) との間の値に調整することができる。電気浸透ポンプ 3 0 0 を使用している場合には、それにより、ループシステム 1 0 0 の容量が少しだけ増えるが、それぞれのポンプ 3 0 0 は非常にコンパクト (競合するどのポンプより小型) であり、性能における莫大な利点をもたらす。特に、液相の揚水により、システム 1 0 0 は、ヒートパイプおよび同様の容量を有する蒸気室が処理可能な加熱力をはるかに超える全加熱力を除去することができるようになる。ポンプ 3 0 0 が必要とする追加の電力は、デバイス 5 0 が必要とする電力に比較すると小さく、従って、その用途が可搬電子システムであった場合にも電池の寿命に大きい負担を掛けることはない。

10

【 0 0 5 4 】

(チップの裏側における最低容量)

システムの小型化およびマルチチップ集積化の見地から、厚みが 1 m m 未満の特定のマイクロチャネルヒートシンクにおいて、マイクロ熱交換器 2 0 0 は、膨大な利点を有する。なぜなら、従来の技術より、特に、デバイス 5 0 の裏側においてスペースをとらないからである。チップ間で最低限の距離を確保することが、信号の遅れを抑制するためには重要であるが、特に、半導体業界はより多くのチップを単一のデバイス 5 0 パッケージに集積することを目標としているので、これは、意義のあることである。シングルチップシステムでは、マイクロ熱交換器 2 0 0 のチップの裏側の容量を最低限とすることが重要である。なぜなら、それにより、電子システムの場合に寸法を小型化することができるからである。金属フィンアレイ・ヒートシンクの場合、設計によりデバイス 5 0 の裏側に直接取り付けするための巨大な容量が適応し得る。この大容量の必要性は、サーバーのような製品内に複数の回路の載置を必要とする用途の場合には、特に、回路の過密なパッケージ化ができない。ラップトップコンピュータなどのような他の用途では、マイクロプロセッサ上のスペースが非常に限られており、5 0 W を上回る電力に適したフィンアレイ・ヒートシンクは収容が難しい。複数のチップを単一のパッケージの中に密に組み込むことを妨げ、システムの小型化を妨害する従来の設計、特に小型デスクトップコンピュータでは上記のような容量を収容できない。

20

30

【 0 0 5 5 】

(設計の自由度)

好ましいポンプ 3 0 0 は、特に、使用する流体管を取り付けるだけでデバイス 5 0 から離れた比較的大きな面積にわたって熱を除去することができ、実施するシステムに依存して様々な場所に配設され得るので、設計の自由度を大きくする。例えば、図 1 は、ポンプ 3 0 0 が流体をマイクロ熱交換器 2 0 0 内に揚水する閉ループシステムを示しており、ポンプ 3 0 0 は、流体を図 1 に示す位置の代わりに、もしくはそれに加えてマクロ熱交換器 4 0 0 に揚水することができる。

40

【 0 0 5 6 】

(オンチップ温度変化に対する過渡的及びローカライズされた応答)

ヒートパイプ、蒸気室、金属フィンアレイ・ヒートシンクと対照的に、ループシステム 1 0 0 は加熱における過渡的サージに応答する (例えば、電気浸透ポンプ 3 0 0 の制御を通じて) ことができるとともに、デバイス 5 0 の加熱強度および温度上昇の空間的变化に応答する (例えば、マイクロチャネルの設計および、デバイス 5 0 の領域のマイクロチャネル専用のポンプ 3 0 0 を別に制御することにより) ことができる。これにより、システム 1 0 0 は、デバイス 5 0 の温度を時間的、空間的により均一に提供することができる。

【 0 0 5 7 】

(チップとヒートシンクとの間の熱不整合不足)

50

ヒートパイプおよび蒸気室に関する主要な信頼性は、デバイス 50 とデバイス 50 と直接接触する熱分散器との間の熱膨張率の不整合である。本明細書中でさらに説明するシリコンチップデバイス 50 とともにシリコンマイクロ熱交換器 200 を使用した閉ループシステム 100 のある実施形態では、チップとヒートシンクとの間に熱膨張の不整合がない。この利点は、伝統的な金属充填有機材料ではなく、例えば、薄型合金はんだなどのような新規の取り付け材料を使用して、システム全体の熱抵抗を実質的に下げることにより、実現する。

【0058】

提供された上記の概要ならびに議論されたいくつかの利点を用いて、システム 100 についてさらに詳しく説明するとともに、様々な局面及び方法について以下に述べる。

10

【0059】

図 1 は、上記のように、本発明の 1 つの閉ループ流体システム 100 の略図を示し、マイクロ熱交換器 200 と、ポンプ 300 と、マクロ熱交換器 400 およびコントローラ 500 を備える。これらの個々の要素をさらに説明する前に、システム 100 のいくつかの重要な特性について説明する。

【0060】

ポンプ 300 の出力は、マイクロ熱交換器 200 のインレットに向けることが重要であり得る。マクロ熱交換器 200 は、典型的には、加熱し、ループ内の最も温度の高い点となるデバイス 50 に物理的に取り付けられる。マイクロ熱交換器 200 のアウトレットでは、流体 / 蒸気混合体が可撓性のチューブ 110 をマクロ熱交換器 400 に向かって下流へ進む。重要な特性の一つは、このチュービングの長さが、いくつかの用途では数センチでもよく、また他の用途では 1 m 程度にできることである。こうした長尺が可能な理由は、本発明ではポンプで高圧性能を利用できるからである。ポンプ 300 は、非常に高い圧力を生成することができ、この力により、流体 / 蒸気混合体は、かなりの長さのチューブ内を進むために使用され得るので、システム 100 の設計を決める他のあらゆる要素に基づいてマクロ熱交換器 400 の位置を決めることができる。

20

【0061】

マクロ熱交換器 400 の内部では、流体 / 蒸気混合体が完全に流体に凝結し、第 2 の長さ 112 の可撓性チューブを流れる。この長さ 112 も非常に長くてよいので、示されるように、第 3 の長さ 114 の可撓性のチューブを用いるか、あるいは、図 18 を参照しながらさらに後述するマイクロ熱交換器 200 と一体化したポンプ 300 に組み込んでさえも、ポンプ 300 をマイクロ熱交換器 200 の近傍に設置することが可能である。

30

【0062】

コントローラ 500 は、マイクロ熱交換器 200 内の温度計からの、あるいは、冷却中のデバイス 50 内の温度計からの入力信号を受け取る電子回路であると理解でき、その信号は、信号線 120 に沿って伝達される。コントローラ 500 は、入力信号に基づいて、ポンプ 300 に付設の電源に信号線 122 に沿って信号を印加することによって、ポンプ 300 内を流れる電流を調整して所望の熱特性を実現する。ポンプの流量は、印加された電圧に厳密に比例するので、この制御アルゴリズムは単純な比例コントローラ 500 でよく、あるいは、より高性能な方法論を組み込んだものでもよい。マイクロ熱交換器 200 の比熱は低く、ポンプ 300 の応答時間は速いので、熱コントロールシステムの時間的応答は、非常に速くなり得、丈夫で正確な、かつ動的応答が迅速なコントローラ 500 の実現が可能となる。

40

【0063】

また、図 1 に示す実施形態は、システムの要素の設計が非常に細分化されている、すなわち、各要素、200, 300, 400, 500 がそれぞれシステムの他の要素の特徴からは独立した性能に対して最適化され得るというという特徴をも有する。結局、ポンプ 300 は、必要な熱を取り込み、伝達するのに必要とされる流量と圧力を生成することができることが重要なのである。しかし、マイクロ熱交換器 200 の設計には、マクロ熱交換器 400 の設計に影響を有する局面がほとんどない。このシステム要素の細分化により、

50

独立した最適化が容易に実現でき、さらに、システム 100 は、任意の特定の用途の性能必要条件に適合するように、個々に設計、製造された構成要素の集合から組み立てることもできる。

【0064】

(マイクロ熱交換器 200 の設計及び最適化)

図 1 に示すマイクロ熱交換器 200 は、微細加工したシリコン構造体または加工した金属構造体、もしくは多くの他の可能な材料から構成することができる。図 3 A 及び 3 B は、それぞれ、模範的なマイクロチャネル構造体の上面図及び断面図を示す。層 210 は、一つの面 212 にエッチングしたマイクロチャネル 220 のパターンを有している。これらのチャネル 220 は、デバイス 50 の特定の領域からの熱除去の必要性に応じて表面 212 上に配置することも可能であり、あるいは、全体に均一に配分することもできる。図 3 A に流体マイクロチャネル通路 220 - 1, 220 - 2 として示すように、一つ以上の流体通路をこの表面上に形成するように配置することも可能である。これらの独立した通路は、用途の必要性に応じて、独立したポンプ 300 及び / または独立したマクロ熱交換器 400 に別々に接続することができる。

10

【0065】

マイクロチャネル 220 の配置は、図 3 A に示すように、デバイス 50 の予測される熱源の分布にあわせることができる。チャネル 220 の密度は、過熱源に対応する領域で増やし、あるいは、チャネル 220 の経路を調整して、マイクロ熱交換器 200 のインレット 222 からアウトレット 224 への温度勾配を最小限に抑えることができる。チャネル 220 の幅、深さ、及び形状も調整して、デバイスの温度の均一化を改善することができる。様々なチャネル形状において、様々な速度で移動する流体への熱伝達の計算と連動するデバイスの中の熱源のコンピュータモデルを利用して、デバイス 50 の温度プロファイルを実シミュレートし、これらのプロファイルを最低限に抑えることによって、マイクロ熱交換器 200 の設計が最適化される。以下に、このモデリングプロセスについて説明する。

20

【0066】

EOポンプ 300 の高圧性能の一つの特別な利点は、チャネル 220 の配置を、圧力の降下を最低限に抑えると同時に温度の均一性を最大限とするような設計にする必要がないという点である。この温度均一性は所定のデバイス 50 に対して最適化し、そしてマイクロ熱交換器 200 とマクロ熱交換器 400 を作動させるのに適した圧力と流量を供給するように EOポンプ 300 を調整することができる。チャネル 220 は、二層結合マイクロ熱交換器 200 のチャネル 220 A で示すように、層 210 にのみエッチングするか、もしくは、それぞれ層 210、214 にエッチングしたチャネル部分 220 B、220 C で示すように、両方の層 210、214 にエッチングが存在してもよい。層 210、214 を合わせることで、チャネル 220 の幾何学的断面が、さらにデバイス 50 内の温度変化を最低限に抑えるのに適した形状になる。

30

【0067】

図 3 B に示す二つの層 210, 214 は、ガラス及びシリコン構造体用のアノードもしくは溶融接着、または共融接着、あるいは接着剤による接着で接着してもよい。金属構造体は、溶着、はんだ付け、共融接着または接着剤によって接着できる。同様の技術は、ほぼいかなる材料の多層マイクロチャネル構造体に対してでも実施可能である。チャネルの形状と配置は、デバイスからの熱除去の要件に基づいて決定するべきであり、この設計は、本出願のいずれかで説明する熱モデリングツールを補助として利用することによって実現できる。

40

【0068】

温度計とも称される温度センサのマイクロ熱交換器 200 内への設置は、もう一つの重要な要素であり、これらの温度計をマイクロチャネル 220 とデバイス 50 の熱源に対して横方向に設置できるという独自の利点を有し、さらに、温度計を、後述のように垂直方向の異なる位置に配置できるという利点も有する。

50

【0069】

また、図3Aは、マイクロ熱交換器200の様々な位置に配置された温度センサ250を示している。これらの温度センサ250は、マイクロ熱交換器220のその特定の領域の温度を示すことにより、デバイス50の特定の領域に対応した信号を図1に示した信号線120を介してコントローラ500へ出力する。これらの温度を利用して、前述の、そして以後さらに説明する最適な温度制御を維持する。250-1, 251-2, 250-3, 250-4, 250-5, 250-6の温度センサは、さらに、マイクロ熱交換器内の特定且つ有利な設置位置を示すものである。後述するように、温度計をチャンネルの中央近傍の接着面と熱交換器の上面上に戴置することにより、これらの区別された位置の温度の測定と制御が可能となるとともに過渡期の熱の流れを判別できるようになる。よって、測定した温度は、マイクロチャンネル220からの冷却の影響とローカライズされたデバイス50の熱源からの熱を含む、周囲の領域の平均温度となる。これらの影響の平均が近似により重み付けされる。すなわち、いずれかの特定の位置の温度が、その位置に最も近い加熱及び冷却源によって最も大きい影響を受けると言える。さらに、温度センサは、その位置に最も近い加熱及び冷却源に最も迅速に応答する。

10

【0070】

図示の如く、センサ250-1, 250-2は、同じ流体マイクロチャンネル通路220-1, 220-2それぞれに対応する流体通路間に位置する。しかし、センサ250-1は、マイクロチャンネル220-1の断面積が異なる部分間に配設されており、センサ250-2は、マイクロチャンネル220-2の断面積が一定の区間に配設されている。よって、チャンネルの近傍に位置するセンサ250-1、250-2は、チャンネル内の熱伝達の変化に最も敏感であり、その変化に最も迅速に応答する。

20

【0071】

さらに、センサ250-3は、二つの異なる流体マイクロチャンネル通路220-1, 220-2の間に配設されており、それによってコントローラ500が流体マイクロチャンネル通路220-1, 220-2内の流量の一方もしくは両方を変化させて、それに対応する領域の温度を変化させる。様々なマイクロチャンネル通路に対するセンサの配置により、いくつかのチャンネルを通る流量を調整し、チャンネル間の任意の位置を所定の温度にすることができる。

【0072】

さらに、特定のチャンネルの近傍にセンサを配置することによって、そのチャンネルを流れる流体の温度を測定し、制御することができるため、そのチャンネルの上流域もしくは下流域の温度をおおよそ制御することができる。最後に、チャンネルと温度センサの間の分離が、センサが流体の流れの変化に応答するのに必要とする時間に影響し、システム内のこの位置において温度のフィードバック制御を速くも遅くもできる。よって、センサ250-4, 250-5は、チャンネル220から遠い位置にありデバイス50の近くに位置し、一方、センサ250-6はチャンネル220とデバイス50の両方から遠い位置に描かれている。よって、デバイス50の接着界面に位置するセンサ250-4、250-5は、局所熱源に最も敏感であり、デバイス50の熱拡散における変化により温度の変化に最も迅速に反応し、一方、センサ250-6は、よりグローバルなレベルで、より長時間にわたって温度の変化の表示を行う。

30

40

【0073】

本発明の一つの目的は、デバイスに対し、動的にフィードバック制御した冷却を行うことであるため、温度、圧力及び/または流量センサを使用して入力信号をコントローラ500に供給することが重要である。測定したパラメータ(例えば温度)を所望のパラメータ(例えば温度)と比較し、その差をフィードバック制御アルゴリズムで分析し、ポンプ制御電圧を変化させる。その例として、デバイス50の特定の位置の温度が所望の調整温度を超えた場合、コントローラ500は、温度計の近傍のチャンネルへ流体を送給するポンプ300への電圧を上げ、それによって、その領域での流体への熱伝達を促進し、デバイス50のその領域を冷却する。単純なフィードバック制御で所望の温度と測定した温度の

50

差に比例する電圧をポンプ 300 に印加する。これは、しばしば比例制御と呼ばれる。単純な比例制御の欠点は、制御出力（揚水電圧）は、温度に大きい誤差があった後にしか大きく変化させることができないという点にある。より高度な制御戦略においては、温度、温度率の変化、そして、恐らく複数の温度計から情報を引き出して、温度をより正確に調整する制御信号を生成することを試みる。このようなコントローラ 500 は、上記のように、温度信号を、例えばデバイス 50 の近く、マイクロチャネル 220 の近く、そしてマイクロ熱交換器 200 の上面など、数箇所において記録すれば、容易に実現可能である。デバイス 50 及びマイクロチャネル 200 に対して、分散した位置でこのような温度測定を行うことにより、コントローラ 500 に対し、異なる率で、そして異なる局所的影響に対して異なる感度で情報を提供することができ、結果、熱入力が増加しても、より正確でより安定した全体的な制御戦略が実現する。よって、マイクロ熱交換器 200 内のいくつかの異なる箇所から入力項目（例えば熱）を供給するのが好ましい。

【0074】

層 210, 214 などのような層の厚みも考慮する。これらの層は、通常 0.1 mm 以上であり、材料と製造工程により、数 mm 程度の厚みを有する場合もある。例えば、層を 0.1 mm にまで薄くしてマイクロ熱交換器全体の厚みを最低限に抑えることもできるが、これらの層がシリコンやガラスウェーハから生成されている場合、このようなウェーハの典型的な厚みは 0.5 mm に近いのである。層がセラミックから形成されている場合は、典型的な層の厚みは 1 mm 以上である。層が金属から形成されている場合は、1 mm に近いかもしれないがそれより大きい厚みが典型的である。

【0075】

多くの用途において、冷却する装置はシリコン集積回路であるため、シリコンから形成されたマイクロ熱交換器に重要な利点がある。特に、デバイスと熱交換器の熱膨張率が一致するため、デバイスと熱交換器の間の界面において熱膨張の差による応力を排除することができる。シリコン製マイクロ熱交換器の場合、微細加工技術を利用して通路及びマイクロチャネルの断面形状や配置の正確な制御を実現し、これら構造体の全体的な寸法を最低限に抑え、デバイスを非常に近接してパッキングすることができる。最後に、マイクロ熱交換器の重要な利点は、厚みが限られているため、下記の図 25 に示すようにデバイスと冷却層を交互に積み重ねることができる点である。

【0076】

図 4 は、マイクロ熱交換器 200 の設計において可能な別の変形例を示す。図示の如く、マイクロ熱交換器 200 を通る通路 220 A のような一本の通路がインレット 222 A から 11 本の別々の通路 220 A - 1 ~ 220 A - 11 に別れ、アウトレット 224 A において再び一本の通路に結合されている。220 A - 1 ~ 220 A - 11 の領域のチャネルの幅は、大きさ、形状共に変更して、それぞれの分離した通路 220 A - 1 ~ 220 A - 11 の間で必要に応じて流体が分配されることを保証してもよい。

【0077】

図 5 は、マイクロ熱交換器 200 の設計において可能な別の変形例を示す。図示の如く、二本の通路 220 - 1, 220 - 2 をアウトレット 224 - 1 の直前において結合して、マイクロ熱交換器 200 に外部から接続した一本の流体ライン 110 を利用できるように構成してある。さらに、図 4 に関連してすでに述べたように、通路 220 - 2 の端部近くで、チャネルが 7 本の平行な通路 220 - 2 - 1 ~ 220 - 2 - 7 に分離しており、一本の通路をマイクロ熱交換器 200 内で独立した通路に分離して再び結合することが可能であることを示している。

【0078】

（マクロ熱交換器 400 の設計）

マクロ熱交換器 400 は、大気への熱除去のため、様々な従来の微細な手段のいずれかを使って構成することができる。例えば、流体を金属フィン・ヒートシンクの基部のチャネルに通すことができる。システム 100 の一つの利点は、ポンプ 300 が高圧機能を有するため、他の性能を可能にするか、またはコストにおいて有利であれば、マクロ熱交換

器 4 0 0 の流体抵抗を高めることができる点である。よって、流体流動抵抗の増加の影響を気遣うことなく、流体をマクロ熱交換器 4 0 0 内の複雑な通路を通して熱抵抗を最低限に抑えることが可能である。

【 0 0 7 9 】

図 6 はマクロ熱交換器 4 0 0 A の一例を示し、フィン 4 0 6 を備えた従来の巨視的な熱交換器の設計に基づいている。流れチャンネル 4 2 0 は、コア要素 4 1 8 内に配設されており、流体が流体インレット 4 2 2 と流体アウトレット 4 2 4 の間を流れるように構成されている。重要な利点は、ループの要素の間を繋ぐ可撓性の流体接続 1 1 0 , 1 1 2 , 1 1 4 を通って長距離に亘って熱を伝達し得るように構成されているため、マクロ熱交換器 4 0 0 の形状と性能をデバイス 5 0 の環境の制限外で最適化することができるという点である。

10

【 0 0 8 0 】

システム 1 0 0 で実現可能な利点は、空気と熱接触する大表面積構造全体に亘って、非常に複雑な流体の流路（単数もしくは複数）を含むマクロ熱交換器 4 0 0 を設計できるという点である。図 7 は、可能なマクロ熱交換器 4 0 0 の一例を示し、流体チャンネル 4 2 0 はコア要素 4 1 8 から突出するフィン 4 0 6 の内部を通っている。この流体の流路をフィン 4 0 6 内部へ通したことにより、マクロ熱交換器 4 0 0 の全体的な熱抵抗を大幅に低減し、よってシステム 1 0 0 全体の熱除去性能を改善することができる。

【 0 0 8 1 】

本発明のある好ましい実施形態では、マクロ熱交換器をシステムの外表面に直接連結している。上記図 1 は、フィン配列ヒートシンクにマクロ熱交換器を接続したものを示しているが、マクロ熱交換器をシステムの外表面に直接連結するのが有利であり得る。システムがデスクトップコンピュータである場合、このような実施形態は、マクロ熱交換器を直接筐体の側部または上部の内面に取り付けることを含む。また、システムがラップトップコンピュータである場合には、マクロ熱交換器を画面の裏側に取り付けるのが有利である。これら二つの場合、このような形態をとることが、これら垂直方向に面した表面からの自然な対流を高めることができるという利点を有する。

20

【 0 0 8 2 】

マイクロ熱交換器 2 0 0 の場合のように、以後さらに説明する熱モデリングを使って、直径、断面形状、深さ、形状、密度、及び他の幾何学的パラメータなどの詳細な設計を含み、マクロ熱交換器 4 0 0 内の流体通路 4 2 0 の分布を最適とし、マクロ熱交換器 4 0 0 の性能を最適化することができる。

30

【 0 0 8 3 】

典型的に、最適な熱性能を提供するように熱交換器 2 0 0 及び 4 0 0 を設計した後、ポンプ 3 0 0 の性能の必要条件を決定し、その後、その特徴を個別に最適化することができる。本発明のひとつの特徴は、ポンプ 3 0 0 の機能を調整して熱交換器 2 0 0 及び 4 0 0 を個別に最適化してシステム全体の熱性能を実質的に改善することができる点である。

【 0 0 8 4 】

（電気浸透ポンプ 3 0 0 の設計および製造）

このシステムにおける好ましい電気浸透ポンプ 3 0 0 は、様々な材料から、また、多数の製造方法によって製造することができる。しかし、静電気で起動する薄膜ポンプ、圧電ポンプ、電気流体力学ポンプ、超音波ポンプなどの他のポンプも利用可能であり、それでも本発明の一部の利点は実現できる。しかし、好ましくは、ポンプは電気浸透ポンプ 3 0 0 であり、ポンプ構造は、図 2 に示すと共にすでに説明したような、多孔構造体 3 1 0 のいずれかの側に電極 3 1 4 および 3 1 6 を有する液体充填室 2 1 3 を備える。アノード 3 1 4 とカソード 3 1 6 との間、そしてひいては、多孔構造体 3 1 0 の対向する側の間に電位差が存在する場合、多孔構造体 3 1 0 内のイオンが側面 3 1 2 B から側面 3 1 2 A に引き出され、隣接する液体も構造体 3 1 0 から引き出される。その結果の流速および圧力の差によって、液体が閉ループシステム 1 0 0 全体を通して流れる。図 2 に示す実施形態では、セラミックディスクの形状の多孔構造体 3 1 0 が、チャンバ 3 1 2 の半体 3 1 2 A と

40

50

3 1 2 B との間を密閉し、流体インレット 3 2 2 及びアウトレット 3 2 4、アノード 3 1 4、カソード 3 1 6 及び触媒再結合器 3 2 6 が設けられているのが分かる。この特定のポンプの実施形態は、安価な材料から容易に組み立てることができ、2 A t m を超える圧力と 1 0 m L / 分程度の流量を生成するために使用することができる。

【 0 0 8 5 】

好ましい電気浸透ポンプ 3 0 0 が、所望の圧力および流量を生成するには、ポンプ 3 0 0 に次に示す要素を設けるのが好ましい。

【 0 0 8 6 】

1 . 片側から反対側まで貫通する複数の小径通路を特徴とする多孔構造体 3 1 0 . 通路の直径は、代表的に 0 . 0 1 m m 未満であり、直径 0 . 0 0 2 5 m m より小であるのが好ましい。これが好ましい理由は、チャンネルの直径が小さいほど、表面近傍の流体の比率が大きく、流体の電荷部分が大きいと、特定の電位差について流体全体にかかる力が大きくなる。多孔構造体 3 1 0 の厚みは、典型的には 1 m m と 1 c m との間である。これより薄い構造では、特定の電位差での流量は上がるが、結果として得られる圧力によりその構造体に力がかかるということを忘れないことが重要であり、薄すぎると不良が起き得る。高流量の要件と信頼性との間のバランスから、数 m m のセラミック構造体についての好ましい厚みが決まる。この状態を、図 1 0 に示すように、多孔構造体の両側の領域内の数箇所に支持体を設けることによって改善することもできる。

10

【 0 0 8 7 】

スペースが設計制限であるか、または考慮の対象となる場合は、チャンバの寸法を選択してポンプの寸法と質量とを最小限とする反面、丈夫な筐体を設けるようにしてもよい。筐体は、絶縁性の表面を有する材料から形成して、カソードもしくはアノードからの電流がチャンバ面に入らないようにしなければならない。アクリル製のチャンバの場合、全体的な寸法は、数 c m であり、壁の厚みは 1 ~ 3 m m である。これらの寸法をすべて減じて、ポンプの全体寸法を 1 c m 以下、そして、さらに 1 ~ 2 m m ほどとし得；これらのポンプは、チャンバの厚みがそれぞれほぼ 1 m m から 0 . 1 m m であることを特徴とする。

20

【 0 0 8 8 】

多孔構造体 3 1 0 の材料は、作業流体に対して高電気浸透流動性を有し、発生する高い圧力差に耐えうるだけの機械的一体性を備えていなければならない。

【 0 0 8 9 】

2 . 多孔構造体 3 1 0 に電界を印加するための、図示のような一对の電極、アノード 3 1 4 及びカソード 3 1 6 。これらの電極 3 1 4、3 1 6 は、多孔構造体 3 1 0 の両側において流体に浸漬されるため、流体との化学的相互作用ならびに電圧を掛けたときに起こる電解に耐えるものでなければならない。

30

【 0 0 9 0 】

3 . 流体の流れのためのインレット 3 2 2 およびアウトレット 3 2 4 。

【 0 0 9 1 】

4 . 発生した水素ガス及び酸素ガスを捕らえると同時に、再結合して、電解へ失われた水分を置換するための、図示した触媒再結合器 3 2 6 のような手段。このような触媒再結合器 3 2 6 の例を図 1 0 に示しており、プラチナ被覆を施した網またはプラチナで被覆したセラミックのペレットで充填した小さいチャンバからなる。プラチナの表面は、ポンプ内のほかの場所で発生した H_2 と O_2 分子が再結合して液体の水を生成する際に効率よく反応させるための基板として機能し、その後、この水はポンプの主チャンバに戻る。このチャンバはポンプチャンバ 3 1 2 の壁の中に位置させるか、もしくはチャンバの外側に取り付けることができる。再結合器のチャンバには、ポンプチャンバからガスを導入して流体を戻すための手段を設けることが重要である。

40

【 0 0 9 2 】

5 . 多孔構造体の表面に対する低粘性、高抵抗、高電気浸透流動性を特徴とする作動流体。この流体は、システム 1 0 0 内の他の材料に長時間さらされている間、もしくは連続的な電気分解の間に劣化しない成分から構成しなければならない。

50

【0093】

流体冷却システム100の閉ループ操作に適したポンプ300の、これらの要素を含む実施形態について、以下に説明する。これらの説明には、ポンプ構造全体の形成、多孔構造体の表面への電極の取り付け方法、及び多孔構造体310を形成するために選択した特定の材料の例などの詳細が含まれる。

【0094】

(焼結シリカポンプ製造工程)

このようなポンプ要素を製造するための可能な方法の一つは、多孔構造体310としてシリカ粒子の充填床を使用する方法である。焼結粒子ポンプ媒体を製造する様々な方法が開発されており、当業者に周知である。

10

【0095】

第1の工程は、シリカ/水の懸濁液を遠心分離し、脱水して、ケーキを乾燥させ、約1mmのディスク部に薄切りにし、焼結する。これは、少なくとも1ミクロンの寸法を有する粒子を使用すると首尾よく行うことができる。

【0096】

第2の工程は、図8に示すように、フィルタ支持体82と真空ポート84が真空(図示せず)に連結されている膜フィルタ80を使って、水性懸濁液からろ過によって粒子を収集し、多孔構造体310となる粒子のケーキ310AAを得る。この工程は、1ミクロンの粒子を使用すると首尾よく行うことができるが、3ミクロンの粒子のフィルタケーキ310AAは、乾いた砂のように崩さない限り処理できない。湿った状態で処理しても、焼結の初期段階でケーキ310AAが乾いてしまい、ひびが入る。この乾いたケーキ310AAの機械的特性の低さは、シリカゲルの“バインダ”を使用することによって解決できる。フリットは、1150℃でひび割れることなく焼結できる。三つの異なる粒子-ジェルフリットディスク加工について、3ミクロンのシリカ粒子に関して以下に説明する。

20

【0097】

前駆物質であるシリカゲルは、TEOSが1に対し、エタノールが2、水が0.2、10%のHClを0.01の割合で勢いよく攪拌しながら生成する。気泡が消えたら、前駆水溶液を閉鎖した容器の中で2時間攪拌する。すると、下記を含む様々な方法で、フィルタケーキサンプルが得られた:

1. 図8に略図で示すように、3ミクロンの粒子のフィルタケーキが収集されたが、完全に乾燥する前に前駆溶液を2アリコットだけフィルタケーキにかけた;
2. 3ミクロンのシリカ粒子の水性懸濁液に1アリコットの前駆溶液を加え、図8に示すようにろ過した;そして
3. 3ミクロンのシリカ粒子のエタノール懸濁液に1アリコットの前駆溶液を加え、図8に示すようにろ過した。

30

【0098】

次いで、各種サンプルを3日間空気中で乾燥させ、傾斜率20℃/分で1150℃の空气中で燃焼させ、1150℃で30分保持して20℃/分で冷却した。

【0099】

処理工程は代表的なもので、最適化はされていないが、多孔構造体310として使用できるより密度の高いディスク、もしくはより高いポンプ機能を得られ得ることを特徴とするディスクを生成する変更例である。

40

【0100】

電気泳動でシリカ粒子を水性懸濁液から圧縮することによってシリカ粒子をケーキの状態で収集する第3の方法でも、適した構造を有する多孔要素310を生成することができる。この工程は、図8において、電位がフィルタと支持体とに印加され、そして電界が溶液内のイオンに大きい力をかけ、粒子を密度の高いディスクに圧縮するのを助ける力を生じるという点を除けば、上記のものと類似している。

【0101】

この一般的な製造手段の主な利点は、制御されたフリット形状、制御された孔寸法、流

50

量および圧力の最適化、そしてより簡単でより効率的な表面化学である。これらの利点はすべて、E Oポンプ300のより信頼性の高い操作と、安価で広く入手可能な材料を使って非常に安価な製造を導く。

【0102】

(焼結ガラスフリットの製造工程)

別のポンプ製造工程は、市販の超微細焼結ガラスフリットの使用に基づいており、図9A及び9Bに示す焼結ガラスフリットポンプ300を生じる。この場合、セラミックディスクは、正確な寸法および形状で得られる。ポンプ300に挿入するためのディスクの準備とポンプ300の組み立てについて以下に説明する：

1. 直径30mmの超微細ガラスフリットを、Robu, Inc. 4のような業者から購入する。アクリルブロックを加工して、キャビティ312Aおよび312Bを形成し、チャンバ312を形成する壁318を設ける。これらのキャビティ312Aおよび312Bは、公称円筒形状で、深さ4mm、直径4mmである。流体インレット322もしくは流体アウトレット324のいずれかとして機能する少なくとも一つの貫通孔が各ブロックの縁部に必要である。各貫通孔はここでは3mmの孔であり、その中に加工したかかりのある固定具がエポキシ接着してあり、そこにインレットとアウトレットのチューブが取り付けられている。また、0.5mmの孔も、各電極にプラチナワイヤリード線を供給し、そしてエポキシシーリングするために、各アクリルブロックに貫通して設けてある。エポキシシーリングを施す各ブロックの表面は、180グリットの研磨剤で研磨してあり、エポキシ接着を促進する。

10

20

【0103】

2. 典型的にはインレットからコンパートメントを横切るように、2×4mmの網状触媒片をアノードコンパートメントに挿入する。

【0104】

3. 電極フリットが二つのアクリルブロックの間で組み立てられるように、プラチナワイヤリード線342をアノード室及びカソード室のそれぞれの孔に挿入して、組立体をCクランプで共に挟持する。防水エポキシを使用して、アクリルとセラミックディスクとの間の結合部をシール320する。アクリルは、セラミックディスクの孔の中に引き込まれるので、軽いエポキシコートのみが最初に塗布され、その後1時間以内に2番目に重いエポキシの被覆が塗布されて、アクリルとセラミックディスクとの間の接着を強化する。

30

【0105】

4. ポンプ300は、インレットポート322を通して真空充填することによって準備が完了する。

【0106】

5. ポンプ300は、正の電極(アノード314)をポンプ300のインレット322側に、また、アース(すなわち、カソード316)をアウトレット322側に設けて、DC電源を取り付けることによって作動する。

【0107】

6. 気泡が流れの中に移流しやすくするため、また、再結合器326でのガスの収集をしやすくするため、ポンプ300を気泡の浮力が移流と収集とを促進するような方向に向ける。

40

【0108】

(電極金属のポンプ構造体自体の上への沈着)

ポンプ電極の上記の態様は、電極金属の多孔誘電体フリットポンプ材の表面への沈着を利用している。受容したフリットは接地され、順に120、180、240、322、600グリットの研磨剤で研磨され、多孔セラミック構造体340を得る。目的は、フリット製造の際の粗い表面の凸凹を取り除き、メタライズしたガラス粒の“アイランド”を相互接続する目的に役立つ程度に平坦面を相互接続した粒上の面に設けることにある。

【0109】

1. 薄いメタルフィルムを、パターン化した電極314および316として、セラミ

50

ックディスクの大きい表面の対向面上に沈着させる。これらのフィルムは、40 nmのチタン及び100 nmのプラチナのe-ビーム蒸発層からなる。チタン層は、典型的な接着促進フィルムであり、プラチナ挿入電極フィルムの厚みは、応力、電導性、段差被覆および表面孔の閉塞率の間の妥協によって決定する。

【0110】

2. 10 milのプラチナワイヤ342を、エポキシ344を使ってチタン-プラチナフィルム上に銀エポキシ接着することにより、パッケージの壁を通る電気リード線を形成する。銀エポキシは、透明な防水エポキシ346でオーバーコートすることにより陽極酸化から保護されている。

【0111】

(陽極酸化したアルミナポンプ製造工程)

この手法は、Anoporeフィルタで例示される多孔質のアルミナの代替的構造型について説明する。これらのフィルタは、厚みが70ミクロンであり、アルミニウムシートを陽極酸化することによって形成されている。本発明は、市販のアノポアフィルタに対する、EOポンプ300に適合するようにする二種類の改良型を含む。第1は、陽極酸化媒体としてシュウ酸を使用することである。結果として得られる混合表面酸化物-シュウ酸塩を焼成して、より単純な表面化学特性を有する酸化物のみを形成する。シュウ酸塩の酸化物への転換は、周知のセラミック技術である。そして第2の改良は、実質的により厚いアルミニウムの層を陽極酸化して孔の長さを数百ミクロンに増大し、ポンプ300が生成できる水圧抵抗および最大圧力を上げる。多孔フィルムはまた、厚ければ厚いほど、現存

10

20

【0112】

上記のすべての手法が有する、多孔構造体310として使用できる多孔構造体を形成するための現存の手法を上回る主な利点には、「ねじれ」を抑える平行孔による最適な流動構造体の形成、ポンプ構造体の形成は非常に平坦であるため、沈着した金属フィルム電極が相互結合するのを確実にすること、そして直径25 mmのフィルタの小売価格はポリプロピレン支持構造体を(熱)接着した後で1ドルであるので、コストが安いなどがある。

【0113】

図10は、上記のような多孔フリットを使用するポンプ300の変形を示す。しかし、この変形では、ポンプ300は、筐体の左右の半体に、多孔ポンプ構造体を機械的に支持するために取り付け了一組の支持構造体350を使用している。ポンプの重要な特性の一つは、流体に対して生じた力が、ポンプを横切る電位と、多孔構造体内の表面上の荷電層の密度とに比例するという点である。ポンプを通して流れる流量は、多孔媒体の厚みを減らすことができれば増加するが、この媒体は圧力差に耐えなければならない。広い面積の、薄い構造体は、一般的に、圧力差が大きいと不良となる。これに対処するため、図10に示すように、ポンプチャンバ312を形成する筐体の片側半体312Aから筐体の他方側半体312Bまで延在するように支持構造体350を製造することができる。これらの支持構造体350は、構造体の一寸法を横切って延在するピラーもしくはビームのような形状でよく、また、多孔ポンプ構造体310への、またその内部での流体の流れを実質的に損なうことなく、機械的支持の点のみを提供することができる。

30

40

【0114】

ここで説明する電気浸透ポンプ300は、大容量の流れと高圧を、電力をほとんど消費せず動く部品を持たない小型のパッケージ内で生成できるという独自の機能を提供する。しかし、このポンプ300は、管理しなければならないいくつかの複雑性を有する。例えば、ポンプ300内の溶液に電位および電流を印加すると、必ず電気分解が起こり、この工程で発生するガスを管理しなければならない。ガスを単にシステムから揚水流体と共に逃がすための一つの方法について、図21を参照しながら以下に説明する。このようなシステムでは、流体は、徐々に劣化するので、時々しか使用しないシステムの場合には耐えられ得る。そうでなければ流体を補充しなければならない。第2の複雑性は、液体流動ラインの中の電解気泡およびガスのスラグの流れの管理と制御である。このため、本発明者

50

らは、電解気泡を分離してそれらを再結合チャンバに再び向けるために使用され得る気体透過膜を適用することを考案した。第3の複雑性は、ポンプの特性が、使用するイオンのタイプ、イオンの濃度、溶液のpH、及び温度の関数であるような、作動流体の最適化である。

【0115】

しかし、一般的にはガスを回収し、それを再結合させて流体を回収するのが好ましい。図10(a-b)は、カソード314からの水素ガスがアウトレット324を通過し、ループを回ってアノード316に到着するシステムを示している。アノード316で生成された酸素は、触媒の再結合器326の表面で水素と結合する。ループ(そこで気泡が圧力と流量の変動を引き起こす)に水素ガスを通過させるより、このガスをカソード室312aで捕らえて直接アノードチャンバ312bまで戻せば有利である。

10

【0116】

図11は、アノードチャンバ312bにガスを供給するように変形したポンプ300の実施形態を示す。支持構造体のチャンネル328は、このガスを通過させるように構成されており、半透過性膜330が液体の流れを遮断する一方、ガスは流れるようにして位置している。実際、ガスを移動し、再結合をさせるためのチャンネル328と膜330の幾何学的配置にはいろいろな可能性が考えられる。図11は、カソードチャンバ312aに単一の多孔膜330を有する多孔ポンプ構造体の上および周りの通路を示している。この膜330を筐体の二つの半体の間の結合部や、その他、チャンネル328の中のアノードチャンバ312bに位置させることも可能である。

20

【0117】

図12は、重力に対するポンプ300の向きに関わらずガスが通れるように、これらチャンネル328が多数、ポンプ構造体の周囲に位置している好ましい実施形態を示している。例えば、図12は、考えられる配置の一つである。

【0118】

いくつかの場合において、再結合器326の触媒に使われる材料は、流体と接触すると効率が下がる場合がある。このような場合には、半透過性膜を使って再結合器326をポンプチャンバ312の液体から隔離すればよい。図13および14は、それぞれ、半透過性膜327A、327Bを使用する再結合器326の二つの可能な配置を示しており、この隔離機能を実行している。このような膜327を使用するだけでなく、この問題を緩和するため、あるいは、再結合器の触媒の機能を迅速に回復するために、図16に示すようにヒータ332を使って触媒の加熱もしている。このヒータ332を使うことにより、再結合器326を常に温かい状態に保つことができ、あるいは、乾燥や性能を上げるために必要に応じて再結合器326をパルスヒートすることができる。以下説明するように、冷却ループとポンプ300の状態を診断するために、圧力センサと温度計の組み合わせを採用することも可能である。例えば、圧力の上昇が検出された場合、再結合器326が濡れてか、または回復しなければならないことを示す場合がある。ヒータ322を使って定期的に熱を加えるか、あるいは、ヒートパルスを短時間だけ加えることにより、再結合器326の中の触媒の性能を回復することができる。

30

【0119】

膜330、327の材料としてはいくつかの選択肢がある。必要なことは、気体を透過するが水は通過させないような密度の高い繊維構造を有する膜であるという点である。その材料の一例として、アウトドア衣料に使用されるゴアテックス材がある。この材料は、水は通過しないが蒸気は通過させるということで知られている。

40

【0120】

EOポンプ300の主な実施形態の別の形態では、マイクロ熱交換器200への流路を形成するために複数の多孔構造体310を使用している。図15は、一対の多孔構造体310を有する1つの特定の実施形態を示しており、一つのインレット322から一対のアウトレット324A、324Bに流体を揚水する様子を示す。これら二つのアウトレット324A、324Bからの流れを再結合して単一の流体ループを通すこともできるが、分

50

離したままでもよい。電極 315A, 315B を介して二つのカソード 316A、316B にかけた電位は等しくなくてもよいので、この設計は、電極 313 を有する共通のアノード 314 と共通のポンプ領域を使用して、一对の冷却ループを通る流体の流れを個別に制御することができる。このダブルポンプ構造は、前述の基本的なポンプの高置換型としても機能する。二つのアウトレット 324A、324B からの流体を結合することによって、このポンプ 300 の実施形態は、いかなる単一ポンプと比較しても 2 倍の容量が処理可能であり、同様の高圧を生成すると共に同じ電圧で作動する。また、この配置は、ポンプ構造体の半分はポンプの他の半分の性能に異常が記録されたときのみに起動するような主ポンプと補助ポンプとして考えることもできる。

【0121】

10

一对より多いポンプ構造体を有する組み合わせも可能である。一对で使用する形態は、一对のポンプ構造体を互いに近接して配置し、ポンプの総容量や質量、コストなどをほとんど追加することなく 2 倍の流量を有するポンプを実現できるため、好ましい。第 2 のポンプを設けることにより、複雑な流量制御を実現するために二つの半体のポンプを独立して使用するという、別の適用法が実現する。

【0122】

(微細加工のスリットポンプ)

図 17 に示した微細加工のスリットポンプ 300C は、極薄型の平坦なチャンネル 310 - CH (上記の実施形態の多孔構造体内に元々存在するチャンネルに相当する) が、一枚の基板 370 に浅いチャンネル 310 - CH をエッチングすることによって形成され、次いで、 Si_3N_4 層のような絶縁層でその上をコーティングし、平坦な表面ウェーハを有する第 2 のガラス層 380 を接着して狭いチャンネル 310 - CH を密閉した層構造の EO ポンプ 300 から成る。また、基板 370 の表面に垂直に向けた極薄で平坦なチャンネルを基盤 370 にエッチングして、インレット 372 とアウトレット 374 のチャンバを接続することもできる。より深い凹部を形成してインレット 372 とアウトレット 374 のチャンバを設け、その中に電極 314、316 を戴置する。微細加工の電気浸透型ポンプ 300C は、流体通路の総断面積が実質的に EO ポンプ 300 の他の形態より小さいため、1 mL / 分未満の流量が典型的に生成される。損失した流量は、同じ基板上で平行に作動するポンプ 300C を多数設けることによって回復できる。

20

【0123】

30

(エアロゲルポンプエレメント)

この手法は、エアロゲルと呼ばれる多孔シリカの代替的構造形態によるものである。この材料を EO ポンプ 300 の形成に使用する主な利点は、多孔性が非常に高いという点であり、よって、電気浸透流量が大幅に高くなると共に質量(重量)が大幅に削減される。また、エアロゲルは希望の形状、例えば、電極構造体上などに鑄造することができる。さらに、この材料は高温処理に耐えることができる。

【0124】

(ポンプの作動流体の最適化)

水、好ましくは、脱イオン水(DI)は、電気浸透ポンプ 300 に現在使用されている作動流体である。気化の高潜熱のような優れた熱特性に加え、水は電気浸透をも支持し、その電解物、水素及び酸素ガスを都合よく触媒と再結合することができる。

40

【0125】

ポンプ 300 の性能は、水性の作動流体の構成を変えることによって最適化されている。このような最適化の例を図 50 に示す。ここでは、初期の平均定常時流量に対するそこに加えたホウ酸ナトリウムの濃度をグラフにした。性能のピークは、この電解物の場合、ほぼ濃度 3 mM であることが分かる。他の電解物では、流量が電解質の成分及び/または濃度によって影響される化学的原因は完全に明らかになっていないので、幾分異なる濃度で最適な性能が得られる可能性もある。

【0126】

しかし、電解質は、電気不活性であるか、もしくは完璧に可逆的であり、電解質の副産

50

物が時間と共に蓄積することはないということは重要である。例えば、塩化物イオン電解物は、アノードで酸素の代わりに塩素ガスを発生し、本発明者らの触媒は、塩素を水素と再結合することはない。さらに、溶融している塩素は酸素ガスを溶融しているものに比較すると腐食性ははるかに高い作動流体である。

【0127】

ホウ酸ナトリウムを選択したもう一つの理由は、多孔ポリマーのフリットを作るガラス材料の三つの主要な構成物質のうちの二つに相当するからである。よって、電解質も、多孔媒体の分離または過渡的な化学変化を抑制するのに役立つ。もう一つの同様の電解質は、多孔媒体に安定した、電気浸透的に活性化された表面を形成するのに優れたものがよい。

10

【0128】

最適化された作動流体のもう一つの特性はpHの制御であり、特にアノードコンパートメントの酸を生成する性質を抑える。pHを低く抑えることが重要な理由は、図51に示すように、電気浸透流量はpHの低下とともに劇的に低下するからである。

【0129】

(一体化したシステム)

本発明の個々の構成要素200, 300, 400, 500の開発についてこれまで説明してきた。本発明は、別の局面では、特にマイクロ熱交換器200と電気浸透ポンプ300のような要素を、また、好ましくは熱の集中制御ができる小型モジュールにコントローラ500を一体化している。本発明の一実施の形態では、図18の上方に示すように、一体型マイクロ熱交換器600を開発している。このモジュールには、上記のようなマイクロ熱交換チャンネル220と、温度分布を測定するための温度センサまたは温度計250と、微細加工のEOポンプ300をすべて小型パッケージの中に有する。また、別のタイプのセンサ、例えば、圧力や流量計タイプのセンサを設けてもよい。

20

【0130】

この配置の中のマイクロチャンネル220は、上記のように作製可能である。温度計250は別々の小型抵抗温度計を取り付けることによって、あるいは、シリコン構造体の領域を軽くドーピングして構造体内に温度計を組み込むことによって、容易に一体化することができる。軽くドーピングしたシリコンを使用して、抵抗を測定することによって、あるいは、電流にバイアスをかけたダイオードを形成することによって、また、順方向電圧の降下を測定することによって温度を正確に検出することができる。いずれの場合も、これらの温度計要素250は、同じリソグラフィ、沈着、標準MEMS製造工場内でマイクロチャンネル220を形成する際に使用するエッチングツールを利用し作製することができる。これらの温度計250により、デバイス50近傍の局所的、且つ正確な温度の測定が可能であるとともに、ポンプ圧および流体流量を調整してデバイスの温度を指定の制限内とすることができる。

30

【0131】

さらに、微細加工構造体を有するEOポンプ300、典型的に寸法の制限による小型のEOポンプも一体化が可能である。図17に関連して上述した微細加工を施した“スリットポンプ”300Cは、微細加工を施したシリコン構造体から全体を作製することができるEOポンプ300の一つの形態として意図したものであり、本書で説明する他の温度計250とマイクロチャンネル220の作製と互換性を有する。マイクロ熱交換器200と、一組の一体化した温度計250と、一体化したEOスリットポンプ300を含む一体化冷却モジュールの好ましい実施形態を図18に示す。場合によっては、この程度の一体化を行うことにより、取り付けの際の全体的な複雑性が軽減され、製造コストの低減につながる場合もある。コントローラ500と構造体との一体化も可能である。

40

【0132】

閉ループ冷却システム100の別の設計も企図される。

【0133】

図19は、閉ループ冷却システム100の変更例の略図である。この実施形態では、シ

50

システムに二つの別体の流路があり、流体ライン 1 1 0、1 1 2、および 1 1 4 が一つの流路になっており、流体ライン 1 1 0 A、1 1 2 A、および 1 1 4 A が別の流路となっている。これらの流路を通る流量は、二つのポンプ 3 0 0、3 0 0 A の中の異なる電極へ異なる電位を印加することによって独立して制御可能であり、よって、信号線 1 2 2、1 2 2 A を介してコントローラ 5 0 0 から送られた信号に基づいて各ポンプ 3 0 0、3 0 0 A を通る電流を調整できる。このようなシステム 1 0 0 の利点は、様々な熱発生分布に応じてデバイス 5 0 の複数の領域の温度を独立して調整することができることである。例えば、デバイス 5 0 は、一部の領域では一定の率で熱を発生し、他の領域では急速な変化率で熱を発生するマイクロプロセッサでもよい。この構成により、デバイス 5 0 の別々の領域を通る冷却水を個別に制御することができ、熱の発生にこのような空間的变化がある場合に全体的な熱の均一性を維持することができるようになる。

10

【0 1 3 4】

図示の一つのポンプを複数使用するように拡張可能なもう一つの形態では、単一のポンプ 3 0 0 からの流体を、デバイス 5 0 に入る前、もしくはデバイス 5 0 に入った後に複数の流路に分離し、これら分離した通路への流量の一部を、弁または流れを分割する他の方法で変更することができる。図 2 0 は、このシステム 1 0 0 の実施形態を示すものであり、単一のポンプ 3 0 0 により、二本の分離した通路、すなわち一方はループの流体ライン 1 1 0 と 1 1 5 を使用し、他方は流体ライン 1 1 0 A と 1 1 5 A を使用して流体がループを流れるように構成しており、フロー分配器 5 9 0 を使って、ポンプ 3 0 0 の出力をどのように二つの通路に分配するかを決定する。この図では、流路は、マイクロ熱交換器の入

20

【0 1 3 5】

前述の閉ループ冷却技術に加え、本発明の実施形態は、冷却流体をリザーバから引き出し、ループ内を一回通過した後、システムから排出する開ループ形状を使用している。図 2 1 は、流体をリザーバ 3 0 2 から取り込み、それをポンプ 3 0 0 を介してループの中に引き込み、マイクロ熱交換器 2 0 0 を通って、さらにマクロ熱交換器 4 0 0 を通った後、流体は、システムから出て廃棄物用リセプタクルに入る。このようなシステムは多くの内蔵式の適用方法にとって理想的ではないが、外部のソースからの冷却水を使用して廃棄することが可能な他の適用方法も日常的に数多く使用されている。本明細書で説明するポンプと熱交換器はこのような技術と結合して高圧や流体流量の制御などといった特定の利点を実現することができる。

30

【0 1 3 6】

図 2 2 は、マクロ熱交換器 4 0 0 が含まれておらず、マイクロ熱交換器 2 0 0 から加熱流体と蒸気を排出するように構成された本システムの変形例を示す。この加熱流体は、加熱流体と共に運ばれる熱とともに廃棄レセプタクルに送給される。マクロ熱交換器 4 0 0 の排除は、いくつかの適用方法においては有利であることが分かる。

【0 1 3 7】

図 2 3 に示すような特定の開ループの実施形態では、電気浸透ポンプ 3 0 0 を、ポンプのアノード側の電解物によって形成されたガスが周囲に逃げることができるように構成している。いくつかの場合においては、このガスを回復して再結合させ、流体を形成し、その流体すべてをシステム内に保持する必要がある。しかし、ガスを回収する必要のない用途もある。そのような場合、ある種のガス用通気口を設けてポンプ 3 0 0 から排出する必要がある。ポンプ 3 0 0 のアノード側 3 1 2 b では、生成されたガスは多孔構造体 3 1 0 を通過することができないため、通気口 3 0 4 を設ける必要が出てくるのである。カソード側 3 1 2 a では、ガスは、流体と共に図示のアウトレット 3 2 4 を通って逃げることができる、もしくは、同様に排気することができる。カソード側 3 1 2 a で生成されたガスが冷却システムの残りの部分を通過すると、最終的にはポンプ 3 0 0 のアノード側 3 1 2

40

50

bに到着し、そこで、再結合するか、あるいは通気口304を通して逃げる。

【0138】

図24は、マイクロ熱交換器200のもう一つの実施形態を示しており、図3Bに関して、層210および214で形成されているとすでに説明し、論じている各冷却層230が、電氣的相互接続232と織り合わされており、好ましくは、そのほとんどが垂直となっている。これら垂直の相互接続232を使ってデバイス50の上面との電氣接觸を可能にし得、また、表面で熱冷却を行うこともできる。多くの用途において、冷却を確立するために使用するものと同じ表面を使用して電氣接点を有するデバイス50との電氣接觸を確立することが重要であるため、この構造は有用である。光電子デバイスから恩恵を受け得るようなデバイス50の例として、シリコンウェーハの両側にパターン化された集積回路またはシングルチップラジオの提案で企図されるような、多層、ミックスド・シグナル・システムなどがある。図24に示すように、垂直電氣的相互接続232は、層214の上面234からの電氣信号を層210の底面に伝達し、一面もしくは両面から熱を効率よく取り除くために横方向の流体チャンネル220を備える。

10

【0139】

図25は、3Dミックスド・シグナル・システムで見られ得るような、界面ボード244、マザーボード246、ワイヤーボンド248を含む多層エレクトロニクススタック内にこのような熱交換器200の一体化を例示して示す図である。冷却層230を3D一体化システムへ組み込むことにより、密度とこれらのデバイスの電力消費が増加するに従って熱の分散を大幅に助け得る。すべての層を通った表面までの通常の熱伝達では不十分のため、冷却層230を3D構造内にはるかに効率よく戴置することにより、熱伝達が可能となり、そして、図示した240および242のような外表面は、システムへの電氣的、光学的、そしてRFアクセスが益々重要となる。

20

【0140】

図26Aおよび26Bは、上記のような電氣的相互接続232を含む冷却層230用のもう一つの配置を有する別のマイクロ熱交換器200を示す。この実施形態では、冷却層230にマイクロ熱交換器200を貫通する開口260を設け、マイクロ熱交換器200の開口260の上方に開放領域を通じてデバイス50が光学的、電氣的、または他の相互作用にアクセスできるようにするためのスペースを提供している。他の相互作用とは、圧力、音、化学的、機械的力、または電磁界の相互作用などである。環状のマイクロ熱交換器はデバイス50への熱的接続および電氣的接続を提供し、そしてデバイス50への他のタイプの接続を提供する。外部の刺激にアクセス可能である場合には、デバイス50の表面が冷却されていた方がより良好に作動し得、このような開口260を設けることは重要であり得る。例えば、ダイオードレーザは、光学的にアクティブな表面の冷却を必要とするだけでなく、その面の発光領域への光学的アクセスも必要とし得る。

30

【0141】

図27は、マイクロチャンネル熱交換器の他の可能な実施形態を示し、デバイス50の上面の領域へのアクセスが「C型」の開口262によって提供されており、上記の開口260と同様の機能を有する。

【0142】

図28は、マイクロ熱交換器200で使用可能なテーパ状チャンネル部220Tを示し、以下に説明する利点を可能にする。このようなテーパ状チャンネル部220Tは、すでに説明した図3Aにも示す。

40

【0143】

本発明の別の有利な特性は、熱特性を最適化するように、図3Aに示すようなマイクロ熱交換器200におけるマイクロチャンネル220のジオメトリーを調整することである。この特性の例として、流入する流体の温度と、デバイス50上の熱発生空間的分布を予測することが可能である。デバイス50上全体に亘って均一な温度とするためには、流体への熱伝達の空間的分布を熱発生の空間的分布と適合させる必要がある。流体は、マイクロチャンネル220を通して流れるため、その温度は上昇し、蒸気になり始めるので流体

50

は大幅に膨張し、よって速度が大幅に上昇する。一般的に、マイクロチャンネル 220 の壁 262 から流体への熱伝達の効率は流速が速いほうがよい。よって、マイクロ熱交換器の中のマイクロチャンネルの断面形状を調整することによって、流体への熱伝達効率を調節することができる。図 28 は、インレット 264 では断面積が小さく（よってインレット 264 近辺では流速が速い）、下流のアウトレット 266 では断面積が大きくなっている（流速が低い）マイクロチャンネル 220 を示す。この特殊な設計は、インレットの近傍において熱発生が大きい場合の設計を表し得る。

【0144】

さらに、流体および蒸気の混合が考えられるマイクロチャンネル 220 の領域においては、液体から蒸気への転換に伴う容量の増加により、大幅に加速し、速度が上昇するため、断面を大きく設計したほうが有利であり得る。この場合、流体がインレット 264 からアウトレット 266 へ移動する際に、流体から流体 / 蒸気混合状態に部分的に変わるため、それに対応するには図 28 に示すものと同様の設計が適している。さらに、チャンネルを一旦広げて再び狭くすることによって、マイクロ熱交換器の異なる位置の流速を下げてから再び上げることができるので有利であり得る。デバイス上で予測される熱放散分布に対する熱伝達効率を調節するためには、図 3A に示すように、チャンネル寸法を大から小へ、そしてまた戻すというように何度も変化させるとよい。一般的に断面が狭ければ狭いほど流体の速度は速くなり、熱伝達効率が高くなる。

【0145】

熱伝達の速度と効率は、チャンネル 220 における流速を上げたい領域に特別な構造体 270 を導入するなど、別の方法でも上げることができる。図 29 は、そのような設計を示すものであり、多数の構造体 270 をチャンネル 220 の中に残し、流れの一部を遮断している。これらの構造体 270 により、チャンネル 220 の残りの断面積が減るため、その領域の流速が上がり、それによってこの領域の熱伝達効率が上昇する。さらに、これらの構造体の表面により、流体との接触合計表面積が増えるため、チャンネル 220 の有効表面積が増え、それによって、デバイス 50 から流体への熱伝達効率がさらに上昇する。

【0146】

マイクロ熱交換器のチャンネル 220 を形成するための微細加工法が特に有する利点は、幅が変化するテーパ状のチャンネル 220 T を形成する、あるいはチャンネル 220 の内側に構造体 270 を使用するなどのような細かい設計の特性の導入をすることができるという点にある。最低特徴寸法は、1 マイクロメートルでも可能であり、チャンネル 220 の形状や部分遮断構造体 270 を非常に正確に制御できる。チャンネル 220 の幅を調整したり、部分遮断構造体 270 を挿入することとは別に、チャンネルの深さの変化するチャンネルを設計し、それによりマイクロチャンネル 220 の相対的密度を変えることなく、チャンネルの断面積を連続的に調整することも可能である。

【0147】

上記のように実質的に平坦なマイクロチャンネルを基礎とするマイクロ熱交換器 220 のジオメトリーに加え、デバイス 50 からの熱伝達を助ける流体分布は、図 3B ですでに説明したような冷却層 230 に伴って存在する図 30A および 30B に示すような別の冷却層 230 - n によって生じ得る。図 30A と 30B は、流体の二つの冷却層 230、230 - 2 を含む可能なマイクロ熱交換器ジオメトリーを示し、図 30A の上面図は、層 210 の上の部分に沿って切った図である。上側の層 216 は、前述の層 210 および 214 上に形成され、第 2 の冷却層 230 - 2 を形成する（層 210、214 および 216 を任意の数だけ使って冷却層 230 の数を変えることができる）。この実施形態では、上側の冷却層 230 - 2 は、流体インレット 222 からマイクロ熱交換器 200 の全体にわたる多数箇所へ冷却流体を分配するためのものであり、下側の冷却層 230 は、流体を広げ、その流体を 224 - 1 および 224 - 2 で示す流体アウトレットまで送るためのものである。この実施形態の利点は、低温の冷却流体を底の冷却層 230 のいずれの箇所にでも挿入することができ、各チャンネル 220 を通る流体の流量は側方および垂直チャンネルの断面寸法によって決定することができるという点である。

10

20

30

40

50

【 0 1 4 8 】

冷却流体の分配のある一つの特定の興味ある実施形態を図 3 1 に示す。ここでは、流体がマイクロ熱交換器 2 0 0 の上側層 2 1 6 の流体インレット 2 2 2 から流入し、平坦なリザーバ 2 7 4 全体で均一に広がる。第 2 の層 2 1 4 の複数の小孔 2 7 6 により、マイクロ熱交換器 2 0 0 の第 1 の層 2 1 0 のチャンバ 2 7 8 の中への流体射出点もしくは噴流の分布が形成される。低温流体の分布は、開口の寸法と、各領域の開口の密度によって決まる。そして、流体は第 1 の層 2 1 0 における流体アウトレット 2 2 4 から出る。この実施形態では、上記の実施形態の場合と同様に、様々な層 2 1 0、2 1 4 および 2 1 6 が形成され、何らかの方法で互いに連結されて接着剤、導電性コンパウンド、はんだ、または直接接着によりデバイス 5 0 に貼り付けられる。

10

【 0 1 4 9 】

図 3 2 は、図 3 1 に示す実施形態と類似したマイクロ熱交換器 2 0 0 のもう一つの実施形態を示し、層 2 1 0 を排除し、デバイス 5 0 の表面と直接流体接触させている。この構成では、層 2 1 6 および 2 1 4 が形成されると、次いで直接デバイス 5 0 に貼り付けられ、下側のチャンバ 2 7 8 が、デバイス 5 0 とマイクロ熱交換器 2 0 0 との間の界面に形成されている。図 3 3 は、やはりデバイス 5 0 の表面と直接流体接触する単一の冷却層 2 3 0 を備えたマイクロ熱交換器 2 0 0 のもう一つの実施形態を示す。さらに図 3 3 は、デバイス 5 0 が、回路板と電気接続を形成するバンプボンドを有する電気回路として示される実施形態を示す、マイクロプロセッサなどの場合であり得る。流体をデバイス 5 0 と直接接触可能とすることにより、いくつかの障壁が取り除かれ、最適なシステム性能を可能とするため、デバイス 5 0 から流体への熱伝達が改善される。しかし、この手法は、デバイス 5 0 とマイクロ熱交換器 2 0 0 との間の物理的な取り付けが流体と圧力に耐えることができなければならない、また、デバイス 5 0 の寿命の間は漏れ防止を必要とするため、複雑である。

20

【 0 1 5 0 】

層 2 1 4 の開口 2 7 6 を横切る圧力差とそれら開口 2 7 6 の寸法に依存して、チャンバ 2 7 8 に送られる流体は小さい噴流を形成し得、これはいくつかの重要な利点を有する。一般的に噴流の形成は、流れのレイノルズ数によって左右される。噴流の開口が大きすぎると、電気浸透ポンプによって形成されるマスフローの速度が遅すぎて、開口流のレイノルズ数が小さすぎ、噴流が形成されない（開口出口で流れが分岐することが特徴である）。また、噴流開口が小さすぎると、ポンプによって生成された圧力エネルギーを粘性応力が分散させ、よって、この場合もレイノルズ数が小さすぎる。従って、レイノルズ数が比較的大きい（層流に過ぎなくても）噴流を達成するためには最適な噴流開口直径であるべきである。噴流、より好ましくは、噴流のアレイを形成することにより、速度が速くなり、このチャンバ 2 7 8 内では慣性流が不安定であるという理由から、チャンバ 2 7 8 内の流体の熱伝達の効率を上げる。さらに、噴流により、このチャンバ 2 7 8 内の流体は良好に混合され、それにより温度の勾配を均一にするのを助ける。

30

【 0 1 5 1 】

先に説明した図 3 B は、図 3 4、図 3 5 と共に、マイクロチャンネル 2 2 0 を密閉構造として調製し、次いでその密閉構造体を熱伝導コンパウンドでデバイス 5 0 に取り付けるマイクロ熱交換器 2 0 0 の各種実施形態を示している。この手法独自の利点は、デバイス 5 0 を破壊し得る高温プロセスおよび化学薬品を使ってマイクロ熱交換器 2 0 0 を調製できるという点である。熱交換器 2 0 0 の作製が完了したら、デバイス 5 0 に損傷を与えることのないプロセスと材料を使ってデバイス 5 0 の背面に取り付ける。図示した様々な実施形態のうち、図 3 B および 3 5 は、流体がデバイス 5 0 に接着されている熱交換器 2 0 0 層に直接送給され、よってデバイス 5 0 からの熱は、マイクロチャンネル 2 2 0 の内の流体によって取り除かれる前に移動する距離が短いので、図 3 4 の実施形態には好ましい。

40

【 0 1 5 2 】

流体をデバイス 5 0 の表面と接触させる上記の実施形態に加え、マイクロ熱交換器 2 0 0 の他の実施形態は、デバイス 5 0 の表面の形状を変更して接触表面積を増加することが

50

できる。図 3 6 は、チャネル 2 2 0 がデバイス 5 0 の背面に形成されたマイクロチャネルの設計を示す。取り付けた構造体の残りの部分が流体をこれらチャネル 2 2 0 へ誘導し、分配する。図 3 7 は、デバイス 5 0 に接着した、図 3 2 に関連してすでに説明した噴流のアレイを示し、デバイス 5 0 の背面にエッチングすることによって噴流送給用のチャンバ 2 7 8 が形成されている。

【 0 1 5 3 】

冷却ループの操作中は、ループの特定の要素が不良になり始め得る可能性もある。例えば、マイクロ熱交換器 2 0 0 やマクロ熱交換器 4 0 0 の圧力が上昇し始め得る（沈殿材料が堆積していることを示す）。この状態に対する適切な対処法は、短時間だけポンプ 3 0 0 を通る流れを増加することによって達成できる洗浄である。ループ全体の圧力の増加はまた、ポンプ 3 0 0 内のアノード 3 1 4 またはカソード 3 1 6 の電解質からのガスの堆積と、ポンプ 3 0 0 のガス再結合要素が短時間不足する可能性を示唆し得る。この状態に対する適した対処方法の一つは、暫く、典型的には数十秒間の範囲でポンプの操作電流を下げるか、もしくはおおよそ同じ位の間ポンプ 3 0 0 の電位を反転させてガスを逆流させる。また、この状態に対する適した別の方法として、再結合器 3 2 6 を加熱する方法がある。不良、もしくは潜在的な不良を示す上記またはその他の状態を検知するため、圧力、温度、電流などのセンサを使用して、冷却ループ、もしくは冷却ループの特定の要素の状態の特定の局面を診断することができる。これらのセンサは、温度センサに関して上述したような方法によりシステム内で実施し得る。同様に、コントローラ 5 0 0 を採用してこれらの状態を検出してよい。

【 0 1 5 4 】

図 3 8 は、上述の温度センサ 2 5 0 に加え、圧力を測定する圧力センサ 2 8 0 と電流を測定する電流センサ 2 9 0 をループ内の位置に設置し、これらのセンサからの信号をコントローラ 5 0 0 に戻す冷却ループの図を示す。コントローラ 5 0 0 は、これらの信号を使ってループの状態を診断し、必要に応じて補正制御信号を送る

上記の説明では、便宜上、コントローラ 5 0 0 はシステム内における個別のデバイスとして示していることに留意する必要がある。コントローラ 5 0 0 は、他にも下記に示すような機能を生じ得る他の可能性もまた存在する。

【 0 1 5 5 】

図 3 9 に示すように、本発明は、この機能を達成するためにデバイス 5 0 の性能を利用することができる。例えば、デバイス 5 0 がマイクロプロセッサである場合、マイクロプロセッサは、マイクロ熱交換器上の温度センサ 2 5 0 及びループ上の他のセンサ 2 8 0 および 2 9 0 からの信号を入力信号として受け取ることができる。マイクロプロセッサは、これらの信号を判断し得、そして温度を調整するために必要な出力信号を算出し得る、「洗浄（wash-through）」工程を実行し得るか、または圧力や電流の変化に回答し得る。

【 0 1 5 6 】

図 4 0 に示すように、本発明は、マイクロコントローラ 5 0 0 A または他の回路デバイスをマイクロ熱交換器 2 0 0 に一体化することが可能である。あるいは、マイクロコントローラ 5 0 0 A を、図 4 1 に示すように、マイクロ熱交換器 2 0 0 の外側に取り付けることも可能である。いずれの場合も、制御機能はマイクロ熱交換器 2 0 0 の一部であると考えられる、単体として構成された集積回路によって処理される。

【 0 1 5 7 】

本発明の別の実施形態では、上記の各種構成要素のうち、ヒートスプレッドとして従来から知られるものを使用している。熱をある場所から別々に離れた箇所まで移動させるのではなく、本発明を利用すると、流体を揚水して熱を局所的なソースからより大きい表面積に効率よく広げることができ、固体構造体の熱伝導性の限界を克服できるという利点を有する。実用的であるという観点から、前述の実施形態で説明したように、マイクロ熱交換器 2 0 0 とマクロ熱交換器 4 0 0 の両方を使用するのではなく、図 4 2 に示すような単一のヒートスプレッド 1 5 0 を使用してデバイス 5 0 が発生した熱をヒートスプレッド 1

50の内部の広い面積に分配する。ヒートスプレッド150は、前述の説明ではマイクロ熱交換器200とマクロ熱交換器400によって実施させていた機能を実施する構成要素を備える。スプレッド150は、非常に表面積が大きいので、この熱を伝達し、それを周囲の空气中に効率よく分配する。上述のように、熱は、デバイス50の局在化された熱発生源から移動流体によって運ばれ、ヒートスプレッド150の全容量に亘って効率よく広がる。

【0158】

熱がヒートスプレッド150を介して取り付け構造体に直接伝達される実施形態に加え、図43に示すものでは、デバイス50が発生する熱量は小さく、より大型のヒートスプレッド150に取り付けられている。流体は、デバイス50とヒートスプレッド150の間の小さい表面積を、デバイス50が発生した熱を捕らえながら横切る。そして、流体はヒートスプレッド150と、それより大幅に大きい取り付けシャーシ160の間の界面162を横切る。この構成では、ヒートスプレッド150は、シャーシ160への低熱抵抗接続で、熱を効率よく広げることができる。これにより、シャーシ材料の熱伝導性には限界があるため、デバイス50を直接シャーシ160に取り付けることによる場合よりも、良好な熱特性（低熱抵抗）が与えられる。スプレッド150は、（デバイス50上の）小さい表面積上で発生した熱をシャーシ160上のより大きい表面積に伝える低熱抵抗構造体として機能する。この実施形態におけるバリエーションは、シャーシが熱を広げるための十分な表面積、もしくは他の熱伝達機構（風や水流など）へのアクセスを有している、任意の用途に使用することができる。その例として車両に搭載されたパワーエレクトロニクスデバイス、または表面積の大きいデバイスに分配される集中熱源などが含まれる。

【0159】

（システムの熱伝達モデリングと最適化）

本発明のもう一つの有用な局面は、特定のシステム設計の熱除去能力を詳細レベルでシミュレートするための熱伝達詳細化コンピュータモデリングを使用することと、このシミュレーション能力を使って設計の詳細を繰り返し、システム性能全体を最大化とすることである。例えば、デバイス50内の空間的および時間的な熱発生分布を含む、実際の熱発生デバイス50の挙動をシミュレートすることができる。

【0160】

（熱設計CAD）

（熱設計CADの目的の概要）

本発明は、ユーザが、そのユーザの特別な熱発生デバイス50に対して最適な熱均一性を実現するマイクロ熱交換器200のレイアウトを完成できるようにするための熱設計CADツールの使用を伴う。このCADツールは、所定のデバイスの熱発生プロフィールと所定のマイクロチャネルの形状に対する圧力、速度、熱伝達率、および温度変化を計算するモジュールを含む。このシステムの構築ブロックについて説明し、その後、機能的な説明を提供する。このCADツールは、マイクロチャネルの形状を最適化してその結果得られるヒートシンクの利点の形態を改善するため、特に温度の変化を低減し、かつ平均熱抵抗を低減するための、中心的役割を果たす。

【0161】

（熱伝達モデル）

デバイス50内部から表面への詳細モデリング、界面から熱除去構造体（マイクロ熱交換器200）への詳細モデリング、この構造体からそこを流れる流体への詳細モデリング、その同じ流体からマクロ熱交換器400への詳細モデリング、次いで環境への熱伝達の詳細モデリングを、全て実行することができる。これらの熱伝達特性は、各構造体内部におけるチャネルの形状と配置に特有であり、EOポンプ300によって生成された圧力と流量によって依存する。この完璧なシステムのモデルにより、設計者が、チャネルの形状（例えば配置、間隔、直径、形状）の変化のような、システム設計の詳細の変更を導入し、これらの変更の、システム性能への影響を算出し得る。特に、計算により、デバイスから大気への熱抵抗、デバイス温度の空間的变化、およびデバイス温度の時間的变化などを

全体的に判定する。

【 0 1 6 2 】

モデリングは、計算上単純な 1 D アプローチに基づいて行われる。1 D アプローチは、特に、より詳細な多相シミュレーションアプローチと比較すると、その計算効率のために非常に有利である。よって、1 D 近似アプローチは、チャンネルの最適化には有効であり、この最適化は、複数の形状および形態のチャンネルの性能を多く逐次計算しなければならない。ここで発明したシミュレーションアプローチは、マイクロ熱交換器の固体の壁（シリコンまたは金属）における熱伝導についてのエネルギー方程式および流体の対流に対するエネルギーの方程式を、熱交換器を取り巻く環境への熱損失によって決定した境界の条件で、数値的に解くものである。流体用のインレットとアウトレットの状態は、それぞれ、E O ポンプを出る流体の排出状態と熱除去器のインレットにリンクされている。シミュレーションは、有限体積法を使用し、作動流体の表形式データに対する相関関係に基づいて液体特性と蒸気特性との、温度と圧力に対する依存性を考慮する。

10

【 0 1 6 3 】

流体への熱伝達とチャンネルに沿った圧力の降下は、熱伝達係数および壁表面の摩擦係数を使って決定される。これらの係数は、データへの実験的適合性、またはチャンネル内の二相流についての正確な解のいずれかから得られる。シミュレーションは、所定のチャンネルの長さに沿った、空間的に変化する熱発生を考慮し、複数のチャンネルに対して平行で実施される場合は、熱流束における横方向の変化も考慮する。いずれの所定のチャンネルに対しても、シミュレーションは、熱発生率、チャンネル形状、および流入流量および温度の関数として、デバイス 50 の温度分布を判定する。シミュレーションは、様々な断面形状と流路の効果をモデリングできる。シミュレーションは、同一の仮想流れまたは分離の仮想流れのいずれかに基づき行うことができる。

20

【 0 1 6 4 】

シミュレーションは、環境への熱の損失によって決定した境界の条件で、シリコンの壁における熱伝導と流体による対流に対するエネルギー方程式を数値的に解く。シミュレーションは有限体積法を使用し、表形式のデータに対する相関関係に基づいて液体特性と蒸気特性との、温度と圧力とに対する依存性を考慮する。このシミュレーションは、チャンネルに沿った方向の一次元で行い、固体の壁と流体の平均局所的な温度（それぞれ、 T_w および T_f ）それぞれ使用する。エネルギーの方程式は、

30

【 0 1 6 5 】

【 数 1 】

$$\frac{d}{dz} \left(k_w A_w \frac{dT_w}{dz} \right) - \eta h_{conv} p (T_w - T_f) - \frac{w(T_w - T_\infty)}{R_{env}} + q''_w = 0 \quad (1)$$

$$\dot{m} \frac{di_f}{dz} - \eta h_{conv} p (T_w - T_f) = 0 \quad (2)$$

ここで、 z は、チャンネルに沿った座標であり、 A_w は、チャンネル壁の断面積であり、 p は、チャンネル断面の周囲長であり、 w は、一本のチャンネルのピッチである。フィンの有効性は、局所的チャンネル壁内部のヒートシンクに直角な (normal) 温度変化を表す。シリコンの熱伝導性は k_w であり、

40

【 0 1 6 6 】

【 数 2 】

\dot{m}

は、質量流量であり、 h_{conv} は、チャンネル壁と流体との間の熱伝達に対する対流係数である。二相流の単位質量に対する流体エンタルピー i_f は、局所的な流体の品質 x で表すことができ、これは、

【 0 1 6 7 】

50

【数 3】

$$i_f = (1-x)i_l + xi_v \quad (3)$$

を使用した蒸気相の質量分率である。ここで、添え字の l と v は、二相流の液体相および蒸気相をそれぞれ表す。

【0168】

式(1)は、第1の項ではシリコン壁に沿った熱伝導を表し、第2の項では対流熱伝達率を表し、第3の項では抵抗 R_{env} を使って環境の自然な対流熱損失を表す。放射熱の損失は、非常に小さいので無視する。流体流れの式(2)は、チャンネルの壁から流体への熱伝達率に対する流体の平均エンタルピー密度の変化を関係付ける。 10

【0169】

デバイス50の温度の均一性は、ICの信頼性のある性能にとって重要な要素である。マイクロプロセッサチップデバイス上の熱の発生がより大きい領域では、例えば、残りのチップが故障に対する温度の閾値を大きく下回る場合、局所的な温度がより高くなり、故障の前兆につながる。よって、チップの温度を均一とすることを達成できる能力が、いかなる冷却ソリューションにとっても重要な適格性である。さらに、進歩的な冷却ソリューションは、局所的な熱の発生率がチップ上の平均をはるかに上回り、局所的なチップの温度が劇的に上昇する機能を生じる場合、実際のチップのホットスポットに関連した温度均一性の問題を解決できる潜在的能力を明示できなければならない。 20

【0170】

(構築ブロック：流れ/圧力モデル)

二相体系に二つの流れ体系(regime)を開発する。同一流れモデルは、液体と蒸気とがすべての位置 z において同じ速度を有すると仮定する。もう一つのアプローチは、環状二相流モデルで、薄型でゆっくりと移動する液体フィルムが速く移動する蒸気のコアを取り巻いていると仮定する。類似した寸法のチャンネルに沿った二相流に対する熱流束と摩擦係数についての Stanley らのデータ(R. S. Stanley, R. F. Barron, および T. A. Ameel 「Two-Phase Flow In Microchannels」、DSC-Vol. 62/HTD-Vol. 34 MEMS, ASME (1997)、143-152頁)では、同一流れモデルに大してより大きく支持している。圧力の配分は、それぞれ、同一モデルに関しては、 30

【0171】

【数 4】

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right) = \frac{fm''^2}{2\rho D} + \frac{d}{dz}\left(\frac{m''^2}{\rho}\right) \quad (4)$$

また、環状モデルに関しては、

【0172】

【数 5】

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right) = \frac{2\tau_l}{D/2-\delta} + \frac{m''^2}{\alpha} \frac{d}{dz}\left(\frac{x^2}{\rho_v}\right) \quad (5) \quad 40$$

に従う。液体-蒸気の混合物の密度は、 ρ であり、 ρ_v は、蒸気相の密度であり、 f は、全体的な平均化摩擦係数であり、 D は、チャンネルの動水直径(hydraulic diameter)である。質量束 m'' は、質量流量

【0173】

【数 6】

$$\dot{m}$$

とは、

【 0 1 7 4 】

【 数 7 】

$$m'' = \dot{m} A_c,$$

の関係を有し、 A_c は、流路の断面積である。液体フィルムの厚みは δ_i であり、 δ_i は、環状流量モデルの液体 - 蒸気の界面におけるせん断応力であり、 ϵ は、空隙率であり、これは、蒸気流れ断面積と蒸気流れ総断面積の比である。

【 0 1 7 5 】

ここで説明した詳細な数値的モデリングを使用してマイクロチャネル熱交換構造体内の温度分布を予測することができ、そして反復型設計プロセス内で使用してこれらのマイクロチャネル設計の性能を最適化して、特定のシステム性能の目的を達成することができるのである。

10

【 0 1 7 6 】

(ブロックの構築：熱伝達と流れ / 圧力のモデルの結合)

モデリングは、チャネル位置、相対的流量、局所的断面形状の最適化、およびチャネル内における拡張面の制御された配置が、温度の均一化を実現することを可能にする。これらのモデリング工程は下記を含む。

【 0 1 7 7 】

1 . 流体混合平均温度と局所的壁温度に基づいた長手方向チャネルの、1 D 熱伝導および熱対流の問題に対する離散化方程式 (d i s c r e t i z a t i o n e q u a t i o n) の微分。離散化方程式の組への入力はいンレットの流量と温度、チャネル形状と基板を通る縦座標に沿った形状の変化、ならびに基板に沿ったチャネルの壁にかかる熱流束の局所の値である。

20

【 0 1 7 8 】

2 . 熱力学状態 (温度、圧力、質) と現行のデータを参照するライブラリーのプログラムに基づく混合平均流体 (二相) 特性 (粘性、熱伝達率、比熱) の判定。

【 0 1 7 9 】

3 . 二つの方法のうち的一方を使用した熱伝達係数と摩擦係数の計算。3 . 1 N a v i e r - S t o k e s 方程式とエネルギー方程式とを解くことによって係数を分析的に決定する別の流れモデル、3 . 2 本発明者らの研究および文献から得られた経験的適合を使って係数を決定する同一流れモデル。

30

【 0 1 8 0 】

4 . 大きく下方緩和した G a u s s - S i e d e l 技術を使った離散化方程式の解。計算により、上述の入力から得た壁の温度を得る。

【 0 1 8 1 】

このモデリング手法を、模式的に図 5 2 に示す。図 5 2 に示すように、モデリングプロセスは、初期幾何学的形状と、ブロック 9 1 0 での熱入力 of 空間的分布 of 定量的説明から始まる。上記のステップ 1 - 2 によると、ブロック 9 1 2 でマイクロチャネル内の各箇所における流体の状態を判定し、圧力分布と流速を算出する。上記のステップ 3 - 4 によると、ブロック 9 1 4 で熱伝達係数を計算し、その結果得られる壁の温度分布を判定し、デバイスの温度分布に関連付ける。チャネルの形状に対する連続的な摂動により、チャネル形状の変化と、そのチャネルの長さに沿った発生、流量、およびインレットの温度に関して最適化して、所定の熱流束における変化を考慮して温度変化を最低限に抑える作業を反復して行い (補正マネージャ 9 0 4)、最適な設計に近づける (集束マネージャ 9 0 6)。最適な性能を実現するための詳細と方法について、以下に説明する。

40

【 0 1 8 2 】

特に、熱交換器内の圧力分布は、二相混合体の飽和温度の分布を決定し、所定の熱流束を考慮する壁温度を制御するために使用する。例えば、下流端の熱流束における劇的な増加を考慮しても、チャネルの下流端の壁を上流端の壁より低い温度に維持することができた。飽和温度の変化は、この場合は、局所的な熱流束ではなく、壁の温度分布を決定する

50

ものであった。

【0183】

二相マイクロチャネル冷却は、作動流体の潜熱よりも、単相液体冷却より効率よく、そしてより良好なチップ温度の均一性を示した。しかし、実験データとシミュレーションの両者から、マイクロ熱交換器の温度のピークは、沸騰が始まってから、空間的にチャネルに沿ったすぐ上流側の位置において起きることが分かった。この温度ピークは、部分的にマイクロチャネルの壁の過熱に伴うものであり、チップ温度差が 200°C を超える場合もある。過熱は、通常の核沸騰が阻止されると常に起きる。また、壁温度のピークは、純粋な液体から二相流への移行による、沸騰の開始近くの熱伝達係数の低下に伴うものである。

10

【0184】

マイクロチャネルでは、泡成核部位がないため、または離れた泡が液体と一緒に伝播するにはマイクロチャネルが小さすぎるため、核沸騰は抑制され得る。例えば、離れた泡の寸法がチャネルの直径と同じ程度である場合、液体の流れは泡によって遮断され得、そして液体から蒸気への転換がすべてこの界面において起こり得る。この状態では、チャネルの下流の熱伝達係数が低下し、マイクロチャネルの壁の温度が大きく上昇する可能性があるという、好ましくない結果となりうる。

【0185】

本発明に至るまでの間に、マイクロチャネルの沸騰体系をマッピングするための測定を行い、所定の直径のチャネルを所定の速度で流れ抜ける水に対してどのような沸騰体系が予想されるかについて判定した。直径が $100\text{ }\mu\text{m}$ を超えるチャネルを 1 m/s 未満の速度で流れる流体の場合、沸騰および熱伝達は同一流速仮定（液体と蒸気が同じ速度で進む）で完璧に説明がつくことが分かった。この制約の下に、熱伝達は、マイクロチャネルの壁から流体への熱伝達を判定するためのKandlikarの相関関数を使った有限体積モデルによって妥当な正確性で説明がつく。よって、これを利用してマイクロチャネルのいかなる箇所においても壁から流体への熱伝達を正確に算出することができる。

20

【0186】

Kandlikarの相関関数アドレスを使った有限体積モデルによるシミュレーションは、例として、 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の領域から 200 W の熱を除去することを目的としたマイクロチャネル熱交換器の設計がある。水の流速は、 $10 \sim 20\text{ ml/min}$ であり、ヒートシンクの出口において $0.5 \sim 0.25$ の質量（これは液体の状態に出る流体の分量である）となる。所定のチップ寸法において、チャネルの数は厚みが一樣に $100\text{ }\mu\text{m}$ であるチャネルの壁に対する要件とマイクロチャネルの幅によって決まる。最適な設計では、有利な性能を得るために幅は、インレットからアウトレットまで変化し得る。ここで説明している設計では、 69°C のインレットの温度で、水を作動流体として使用しているが、作動流体やインレットの温度の多くのバリエーションが可能である。

30

【0187】

（構築ブロック：出口圧力の最適化）

信頼性のために必要な仕様にチップ温度を調整するという特定の目的を伴う、調整可能なパラメータの一つは、マイクロ熱交換器の出口の圧力である。この圧力が大気圧と同じであれば、過熱を伴わない液体 - 蒸気の移行は 100°C である。しかし、この移行温度は、例えば、マイクロ熱交換器の出口の圧力を大気圧より低くすることによって下げることができる。この手法は、すべての点において大気条件から隔離される閉ループにおいて実用的であり得る。多くの用途において、これらは移行温度を 100°C 未満まで下げることができるという利点を有する。例えば、集積回路は、一般的に、トランジスタのピーク操作温度が 125°C 未満である必要がある。トランジスタと熱交換器の間にはいくらかの熱抵抗があるので、熱交換器からトランジスタまでの間に温度が上昇する。温度の上昇と電力消費との間の比率を熱抵抗と呼ぶ。所定の熱抵抗に対し、 125°C 未満でのトランジスタの作動および 100°C でのマイクロ熱交換器作動に伴う最大電力がある。しかし、マイクロ熱交換器を 75°C で操作できれば、トランジスタを 125°C 未満に維

40

50

持しながら 2 倍の電力が消費され得る。よって、マイクロ熱交換器のアウトレットを大気圧以下とした状態での流体ループの作動は非常に有用な方法である。

【0188】

例えば、本発明者らはマイクロ熱交換器の出口の圧力を 0.3 パールとした図 1 に示す冷却ループを考える。この場合、約 70 °C のマイクロヒートシンク内で液体 - 蒸気の移行温度が発生し、これにより、デバイスの作動温度の 100 °C 以下までの低下、あるいは、より高い温度で作動するデバイスに対しては電力消費につながる。

【0189】

出口の圧力を下げるには、マイクロチャネルの形状を、マイクロ熱交換器を流れる流量に対する圧力を大幅に上昇させる流動抵抗をなくすように調整することが重要であり得る。図 44A および 44B は、平均チップ温度と圧力の降下の、二つの異なる流量に対するチャネル寸法への依存度を示している。マイクロチャネルは、チャネル全長に亘る一定の断面を有し、合計 200 W の均一な熱発生が行われる。図 44A と 44B に示すように、チャネルの幅が大きいと、圧力の降下が減るので平均壁温度が低くなる。これらの定量的結果により、マイクロチャネルシステムの設計のガイドラインを設計することができる。

【0190】

図 45 は、平均チップ温度と、様々なチャネル断面形状における圧力の降下の比較を示す。図によると、拡開するチャネル形状も集束するチャネル形状も、一定の断面の広いチャネルよりも性能が劣ることがわかる。流動抵抗を最低限とするチャネル形状によれば、チャネルに沿った圧力の降下を低減すると共に出口圧を大気圧以下で操作する機会が維持される。

【0191】

これらの平均温度と圧力の計算は、チャネル形状による熱伝達効率の変化を考慮していない。一般的に、熱伝達は、流体速度が増加するような設計（チャネルの径が狭いもの）または、流体と接触するチャネルの表面積を増大する設計（例えば、フィンを導入したり、もしくはチャネルを長く、狭くする）によって改善されると予測される。一般的に、これらの変更により、流動抵抗が増加するので、出口圧の低下（および、操作温度の低下）を達成する設計と熱伝達効率を上げる設計が相反することになる。もちろん、マイクロ熱交換器の操作温度を低下させるという目的と、流体とマイクロ熱交換器の間の熱抵抗を低下させるという目的との間の均衡をとるものが最適な設計である。典型的には、最適化は反復的に達成される。

【0192】

（構築ブロック：熱分布）

圧力とチャネル形状の効果によって上昇するという問題に加え、デバイスにより発生した熱の分布が均一とならない場合に生じる複雑な状況がある。例えば、マイクロプロセッサは、ワット損が集中する“ホットスポット”を呈する。図 46 は、空間的に変化する加熱の特定の一例が圧力の降下とチップの温度フィールドに及ぼす影響を示すものである。この例では、チャネルの寸法は 300 m × 300 m、チャネル数は 50 である。水の流量は 10 ml / 分である。

【0193】

ケース 1 の場合、合計の電力の 25 % をチャネルの上流側半分に印加し、ケース 2 では 75 % を上流側半分に集中させた。液体がゆっくりと流れる液相領域では、対流の熱伝達係数が小さいので、壁温度が最高となったのはそれぞれのケースにおいてインレットの近傍である。左から右への流れの場合、（一部の流体が蒸気に転換するので）流速が上昇すると、流体がチップの右半分のホットスポットに近づくにつれ熱伝達効率が上がる。右から左への流れの場合、インレットでの熱伝達係数が低いと、インレットでのデバイスの温度が上がり、温度プロファイルの不均一性が高まる。また、ケース（1）は、圧力の降下が小さいので、平均チップ温度が低くなり、ケース（2）より温度フィールドの均一性が高い。ケース（1）の興味深い結果は、最高温度が、熱束が最高の領域ではなく、インレットの近傍であるということであり、これは、二相マイクロチャネルのヒートシンクの大

10

20

30

40

50

きい利点の一つである。よって、単相領域と二相領域のデバイスのホットスポットに対する位置と、特定の設計では可能である、不均一性を高める機会を制御することが重要であり得る。

【0194】

代表的に、CADツールを利用して、マイクロチャネルの配置と流れの方向を反復して調整し、設計を反復して最適な配置に近づける。上記の議論から、マイクロチャネルの形状と直径、およびマイクロチャネル内の流れの方向は、デバイス内の温度分布に劇的な影響を及ぼしうることが明らかである。

【0195】

図47は、ホットスポットの位置の影響を図3のような同じ幾何学的形状と流れの形状で検討し、例として、200Wのヒートシンクの温度と圧力の降下に対するホットスポットの位置の影響を示している。チャンネルの寸法は、700 m(W) × 300 m(H)であり、チャンネル数は25である。液体流量は20 ml / 分である。ホットスポットは2 mmの長さであり、合計40%の熱がこのホットスポットに集中している。このシミュレーションでは、ホットスポットの位置は、(マイクロチャネルに対し)チップの一端からチップの反対側端部まで徐々に移動する。ホットスポットがインレット領域の近傍に位置しているときには、沸騰がチャンネル内で先に始まり、その後のチャンネルに沿った圧力の降下により、温度はホットスポットの下流側で実質的に低くなる。さらに、インレット近傍の液相領域は、二相領域より熱伝達係数が低く、これにより、壁と流体の間の温度差が大きくなる。よって、最大壁温度はそのピークとなり、ヒートシンクは、ホットスポットと沸騰の開始点がほとんど重なるときにこの領域の近傍で最も温度勾配が大きくなる。ホットスポットがさらに下流に移動するに従って、最大温度は、平均温度より速く降下する。ホットスポットがインレットの近くに位置する場合には、壁温度は、沸騰の開始点とホットスポットとの、2つのピークを有するが、第1のピークの方が温度が高い。

【0196】

(構築ブロック：フィン)

壁の表面積を増加させることによって、マイクロチャネルの熱伝達の分布をさらに変更することができる。この効果を得るためにチャンネルの直径を減じるより、チャンネルにさらなる「フィン」を設けることによって、所定の流量に対する圧力の降下を劇的に増加することなく、流体への熱伝導を高めることができる。これらのさらなるフィンは、流体との熱接触を増加し、単相状態にあると予想されるマイクロチャネルの領域の熱伝達効率を大幅に高めることができる。例えば、マイクロチャネルのインレットは、ほとんど常に単相の流れを呈しており、前述の議論でも明らかのように、インレットをホットスポットの近傍に位置させることは、単相の流れにおいて、熱伝達効率が制限されるので、好ましくない。しかし、この影響は、フィンを導入することにより部分的に緩和することができ、よって、ホットスポットの近傍における流体への熱伝導を改善することができる。さらに、沸騰の開始点において、熱伝達係数の低下に伴って壁で起こる温度の上昇は、フィンを使用することによって抑制することができる。この効果を図48Aおよび48Bに示す。これらのフィンは、断面積が小さく、よって、特に流体がよく混合されている二相体系では流動抵抗が大幅に増加することはない。

【0197】

図48Aおよび48Bは、チップ温度分布上のチャンネル内部に位置する縦型フィンアレイの効果を示す図である。この結果から、マイクロチャネルの液相領域、すなわちチャンネルのインレットにフィンを設けると、チップ上のピーク温度が下がり、従って温度の均一性が改善されることが示唆される。二相領域にフィンを設け、熱伝達率を増加しようと努力しても、高速流動領域にフィンを戴置することによって益々圧力が降下することから、ほとんど効果はない。

【0198】

(構築ブロック：機能強化された核形成面)

沸騰は、固体 - 液体の界面にて起きることが知られており、泡の形成を促す表面

上の不良の存在により促進される。これらは、一般的にキャビティ形状の傷である。それは、液体 - 蒸気の界面膜を完全に球形面で生成する必要がなければ、この形状は泡を形成しやすいからである。非常に円滑な表面は過熱が起きやすい、すなわち、泡形成に伴うエネルギー的不利益により、温度が公称の移行温度よりずっと高くなるまで沸騰が抑制される。キャビティ傷の密度が高い、粗い表面の場合は一般的に過熱することなく、沸騰させることができることが知られている。実験によると、マイクロチャネル 220 は、図 49 に示すように特定の箇所 221 で故意に粗く形成しており、泡の形成がこれらの領域に局在されるのが観察された。よって、プラズマエッチングまたは他の粗面化法を使用して表面積が増加したチャネル内の局所領域 221 は、チャネル内の沸騰を促進するとともに安定化させて、過熱の発生と、それによる熱交換器の性能の劣化を低減することができる。これら、機能強化した表面積 221 を有する領域を使用して、特定の位置で、チャネル 220 内の特定の過熱レベル内で起きるように沸騰の開始点を調整し、そして、ホットスポットの近傍における最大温度値を低く設計することができる。これにより、特定の箇所を粗面化して、これらの特定の箇所で泡の核形成を引き起こし、それによって、マイクロチャネル内の沸騰の空間的分布を制御するための方法を提供することができる。

10

【0199】

(CAD ツールの実行)

上記に基づいて、CAD ツールが使用する一体化熱設計方法論について説明する。これは、デバイス上での電力消費の分布を考慮し、マイクロチャネルの位置、形状および密度を調整し、デバイスにとってより最適な熱均一性を実現するものである。このツールの内部では、様々なモジュールが圧力の降下や相転移温度を計算し、流体からマイクロチャネルの壁への熱伝達係数を計算し、デバイス上の得られた温度分布を計算する。ツールは、例えば好ましくは、チャネルの長さ方向に沿った特定の点における標準温度偏差と熱抵抗の絶対等級に基づいてコスト機能を使用する。このツールは、フィンの配置、チャネルの幅と高さ、核形成面を増加した領域の位置などを含む自由パラメータを最適化して品質関数を最大限とする。品質関数は、非均一にかけられた熱負荷を考慮して計算され得、それによって非均一性を考慮した、さらに最適な設計を提供する。

20

【0200】

図 52 は、最適熱設計 CAD ツール 900 の操作のフローチャートを示す。図 52 のフローチャートは、算出と設計変更のシーケンスを示す。より最適な設計が実現するまで繰り返して実行する。設計工程にすべてのブロックを採用する必要はなく、一部の工程を排除して、他の工程を設計判定基準と考察に基づいて追加してもよい。主要な要素は、算出ループ 902 と、形状摂動マネージャ 904 と、全体的な集束マネージャ 906 である。

30

【0201】

算出ループ 902 は、デバイスの熱分布を入力情報として考慮し、910 で示すユーザ入力チャネル形状から開始する。算出ループ 902 は、熱の入力がない状態のデバイスを通る流れのパターンを決定し、ステップ 912 に示すように、チャネルに沿った圧力と、すべての箇所における熱伝達係数を算出する。そして、ステップ 914 に示すように熱入力をシミュレーションに加え、熱伝達係数の開始値を使ってシステム全体の温度分布の算出を行う。次に、ステップ 912 の反復として示すように、温度分布を使用して熱によって誘発される粘度の変化による圧力分布の変化と、液体 - 蒸気相転移の初めの位置と、流れによって誘発される圧力の降下に対して影響を与える他の現象を計算する。この改良された圧力分布をさらに使用して、熱伝達係数、相転移の位置（移行温度は圧力の関数であるため）、およびシステム全体の温度分布を再計算する。このループを、完璧なソリューションが安定するまで、温度と圧力の算出の間で反復する。この算出ループの出力が、所定の熱プロファイルとマイクロチャネルの形状に対する圧力と温度分布の最終的な予測となる。

40

【0202】

形状摂動マネージャ 904 は、ステップ 916 に示すように、計算した熱分布の結果に伴う「コスト関数」を算出する。このコスト関数は、好ましくはシステムの熱均一性が最

50

適化されたときに最小値となるようなスケラパラメータである。形状摂動マネージャも、ステップ 918 に“感度を算出する”として示すマイクロチャネルの形状をパラメータ化し、ステップ 920 に示すようにチャネルの寸法と位置にわずかな摂動を導入して、新しい設計を算出ループの中に再び挿入する。新しい形状の算出ループの完了後、コスト関数をステップ 916 で再び算出し、コスト関数と摂動の関係を判別する。単純な例として、システムの一区間でチャネル幅を増加することによってチャネル形状が変更される場合を考慮する。このパラメータに対するコスト関数の依存度は、チャネル幅の部分的変更によって除算されたコスト関数の二つの値の間の差として解釈される。実際は、より高度な形状最適化アルゴリズムを実行する、すなわち、いくつかのパラメータ変更に対するコスト関数の感度を同時決定できるものが好ましい。形状最適化アルゴリズムは、多くの用途に対して広く使用され、現存の手法をこの用途に容易に適合させることができる。

10

【0203】

集束マネージャ 906 は、設計のパラメータの変化と共にコスト関数の変化をモニタリングし、設計が「局所的に最適」である方向へ集束するように更新されるよう正式に保証し、また設計において、設計が全体的に最適となりうる可能性を高く持てるように十分な変更を加えるものである。全体的な最適化に集束する摂動ループによって反復的に設計が変更されるので、集束マネージャは、設計パラメータにおける大きな摂動の結果をテストすることによって、そして、ステップ 922 で示すように、摂動に対するコスト関数の感度の低下を追跡してコスト関数の集束をモニタリングすることによって、全体的な最適化をテストする。最適な設計では、すべての方向におけるすべてのパラメータのわずかな摂動により、コスト関数の値が一般的にはわずかに上昇する。集束マネージャが、設計が最適設計のある範囲内に集束されたと判断したら、反復は停止し、最終設計が出力として提供される。

20

【0204】

種々の好ましい実施形態が、上記で詳細に説明されてきたが、当業者は、本発明の新規の教示と利点から実質的に逸脱することなく、例示した実施形態に多くの変更が可能であることを容易に理解する。

【図面の簡単な説明】

【0205】

【図 1】図 1 は、閉ループ冷却システムの一実施形態を示す図である。

30

【図 2】図 2 は、電気浸透ポンプの一実施形態を示す図である。

【図 3】図 3 A 及び 3 B は、マイクロチャネル構造体の一実施形態の上面図及び断面図である。

【図 4】図 4 は、マイクロチャネル構造体の他の実施形態を示す図である。

【図 5】図 5 は、マイクロチャネル構造体の他の実施形態を示す図である。

【図 6】図 6 は、マクロ熱交換器の実施形態を示す図である。

【図 7】図 7 は、マクロ熱交換器の実施形態を示す図である。

【図 8】図 8 は、焼結ディスクを形成する際に使用する装置を示す図である。

【図 9】図 9 A 及び 9 B は、本発明の実施形態による、焼結ガラスフリット多孔構造体を利用した電気浸透ポンプを示す図である。

40

【図 10】図 10 は、電気浸透ポンプの他の実施形態を示す図である。

【図 11】図 11 は、電気浸透ポンプの他の実施形態を示す図である。

【図 12】図 12 は、本発明による電気浸透ポンプの側面図であり、多孔構造体のすべての面に貫通路を配置した様子を示す。

【図 13】図 13 は、触媒再結合器を覆う際に使用する膜の実施形態を示す図である。

【図 14】図 14 は、触媒再結合器を覆う際に使用する膜の実施形態を示す図である。

【図 15】図 15 は、二重電気浸透ポンプの一実施形態を示す図である。

【図 16】図 16 は、触媒再結合器にヒータを使用している状態を示す図である。

【図 17】図 17 は、マイクロ加工を施した電気浸透ポンプの一実施形態を示す図である。

50

【図 18】図 18 は、一体化したマイクロチャネル構造と電気浸透ポンプの一実施形態を示す図である。

【図 19】図 19 は、閉ループ冷却システムの他の実施形態を示す図である。

【図 20】図 20 は、閉ループ冷却システムの他の実施形態を示す図である。

【図 21】図 21 は、閉ループ冷却システムの他の実施形態を示す図である。

【図 22】図 22 は、閉ループ冷却システムの他の実施形態を示す図である。

【図 23】図 23 は、電気浸透ポンプの別の実施形態を示す図である。

【図 24】図 24 は、マイクロチャネル構造体の別の実施形態を示す図である。

【図 25】図 25 は、3 D デバイスを積み重ねた状態で複数のマイクロチャネル構造体を使用している一実施形態を示す図である。

10

【図 26】図 26 は、取り付けた熱を発生するデバイスに対する別のアクセスのための開口を含むマイクロチャネル構造体の別の実施形態を示す図である。

【図 27】図 27 は、取り付けた熱を発生するデバイスに対する別のアクセスのための開口を含むマイクロチャネル構造体の別の実施形態を示す図である。

【図 28】図 28 は、マイクロチャネル構造体の一部の一実施形態を示す図である。

【図 29】図 29 は、一部遮断構造を含むマイクロチャネル構造体の一部の一実施形態を示す図である。

【図 30】図 30 A 及び 30 B は、多重冷却層を含むマイクロチャネル構造体の別の実施形態の上面図及び断面図である。

【図 31】図 31 は、二つのチャンバの間に複数の流体射出点を使用したマイクロチャネルの実施形態を示す図である。

20

【図 32】図 32 は、二つのチャンバの間に複数の流体射出点を使用したマイクロチャネルの実施形態を示す図である。

【図 33】図 33 は、マイクロチャネルを各種の層に形成した様子を示す図である。

【図 34】図 34 は、マイクロチャネルを各種の層に形成した様子を示す図である。

【図 35】図 35 は、マイクロチャネルを各種の層に形成した様子を示す図である。

【図 36】図 36 は、冷却中のデバイスに少なくとも部分的にマイクロチャネルを形成した様子を示す図である。

【図 37】図 37 は、冷却中のデバイスに少なくとも部分的にマイクロチャネルを形成した様子を示す図である。

30

【図 38】図 38 は、圧力と、電流と、温度センサを使用した冷却システムの一実施形態を示す図である。

【図 39】図 39 は、温度制御システムが冷却中のデバイスの一部である一実施形態を示す図である。

【図 40】図 40 は、マイクロチャネル構造体と温度制御システムが一体化された一実施形態を示す図である。

【図 41】図 41 は、温度制御システムがマイクロチャネル構造体に取り付けられている一実施形態を示す図である。

【図 42】図 42 は、熱分散器を使用した実施形態を示す図である。

【図 43】図 43 は、熱分散器を使用した実施形態を示す図である。

40

【図 44】図 44 A 及び 44 B は、マイクロチャネルの寸法に対する平均デバイス温度と圧力の降下の依存度を示すチャートである。

【図 45】図 45 は、平均壁温度及び圧力の降下に対する各種チャネル形状の効果を示す図である。

【図 46】図 46 は、温度と圧力の降下に対する非均一な発熱の効果を示す図である。

【図 47】図 47 は、温度及び圧力の降下に対するホットスポットの位置の効果を示す図である。

【図 48】図 48 A 及び 48 B は、壁温度均一性及び圧力の降下に対するフィンの効果を示す図である。

【図 49】図 49 は、バブル核発生部を含むマイクロチャネル構造体の一部の一実施形態

50

を示す図である。

【図 5 0】図 5 0 は、使用している流体の関数としての流量を示す表である。

【図 5 1】図 5 1 は、使用している流体の pH の関数としての流速を示す表である。

【図 5 2】図 5 2 は、本発明によるマイクロチャネル用のモデリング工程を示す機能フローチャートである。

【図 1】

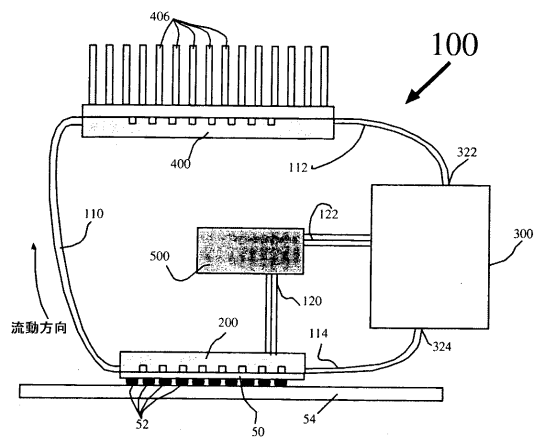


Figure 1

【図 2】

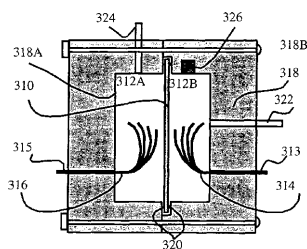
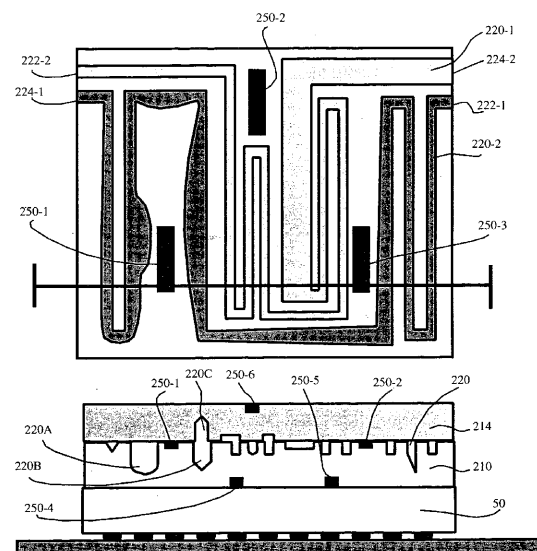


Figure 2

【図 3 A and 3 B】



Figures 3A and 3B

【 図 4 】

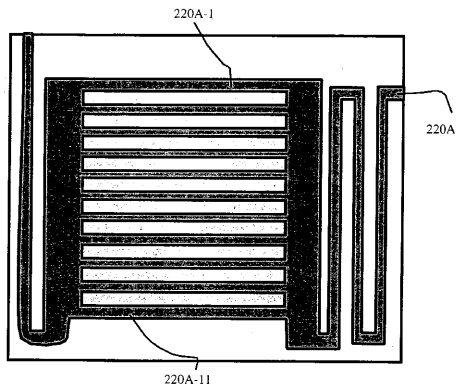


Figure 4

【 図 5 】

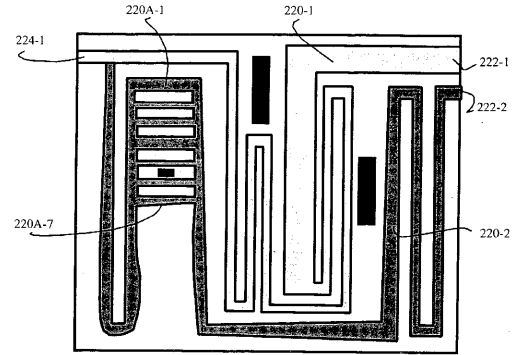


Figure 5

【 図 6 】

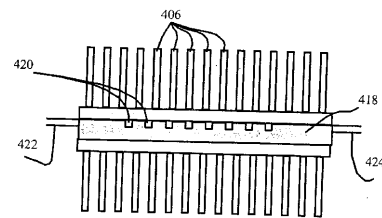


Figure 6

【 図 7 】

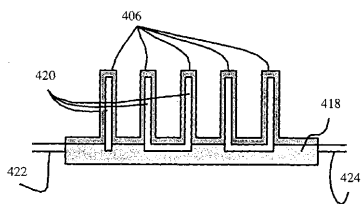


Figure 7

【 図 8 】

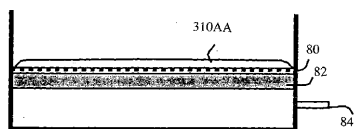
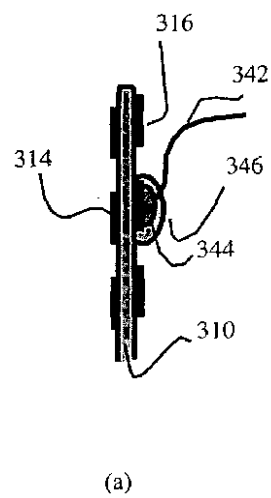


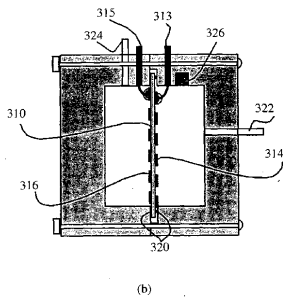
Figure 8

【 図 9 】

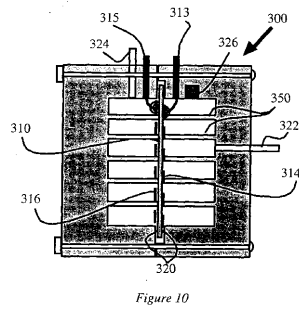


(a)

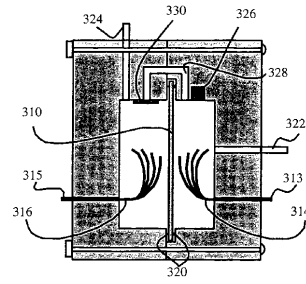
Figure 9



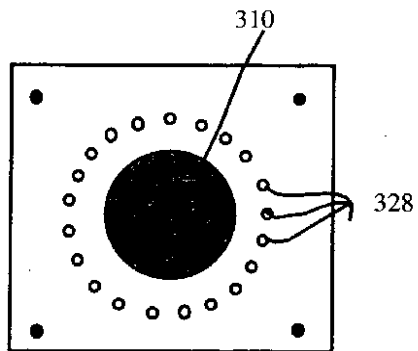
【図 10】



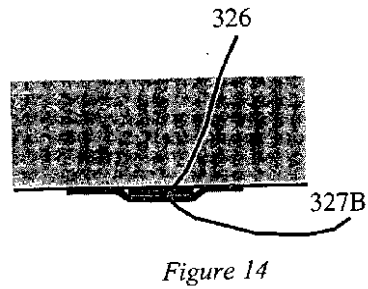
【図 11】



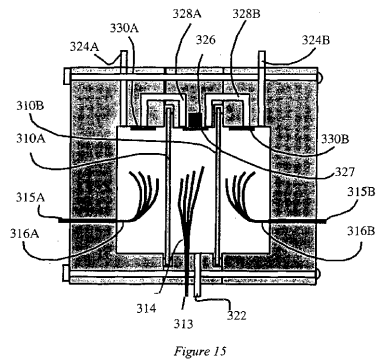
【図 12】



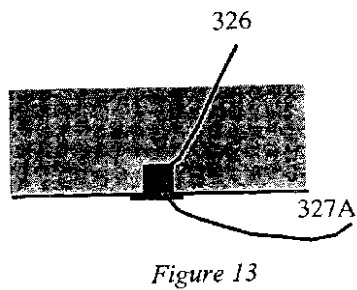
【図 14】



【図 15】



【図 13】



【図 16】

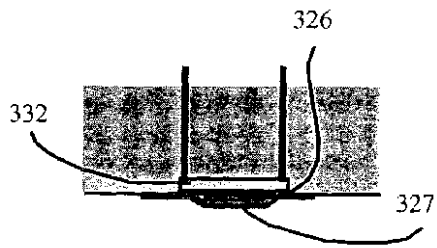


Figure 16

【図 17】

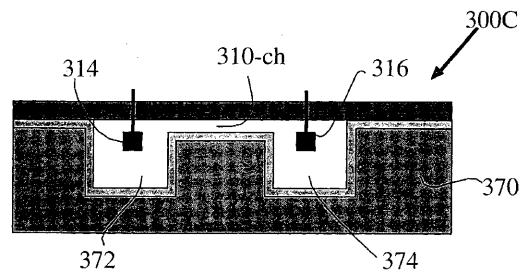


Figure 17

【図 18】

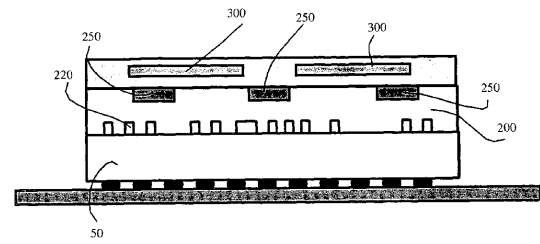


Figure 18

【図 19】

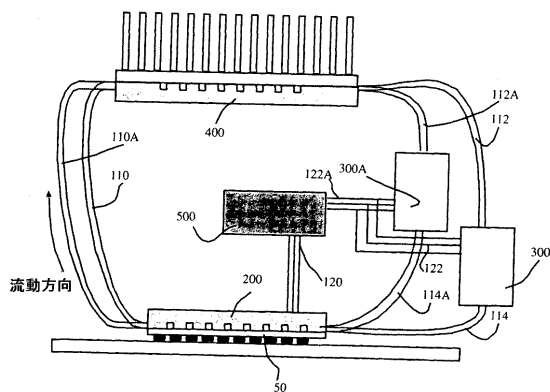


Figure 19

【図 20】

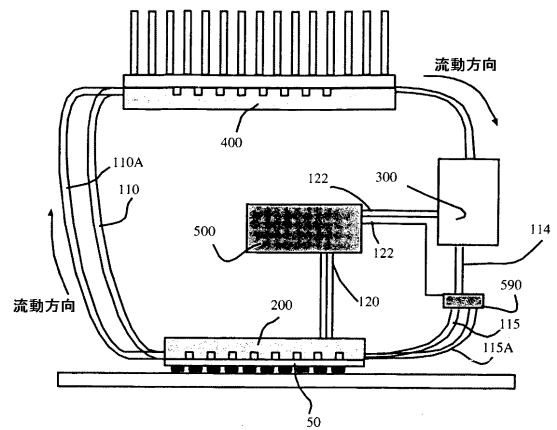


Figure 20

【図 2 1】

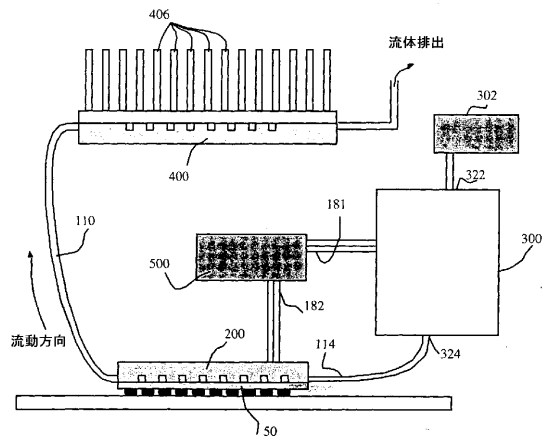


Figure 21

【図 2 2】

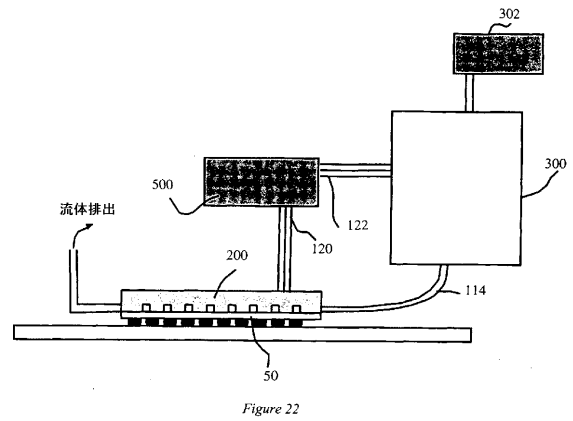


Figure 22

【図 2 3】

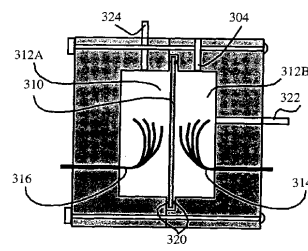


Figure 23

【図 2 4】

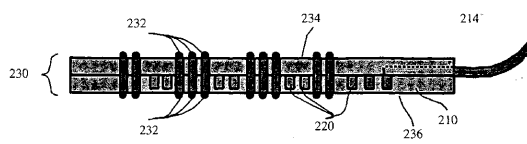


Figure 24

【図 2 5】

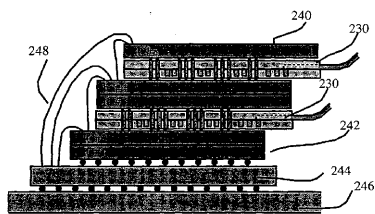


Figure 25

【図 2 6 a a n d 2 6 b】

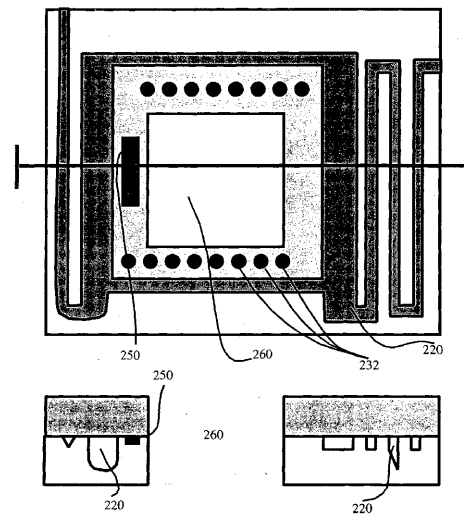


Figure 26a and 26b

【図 27】

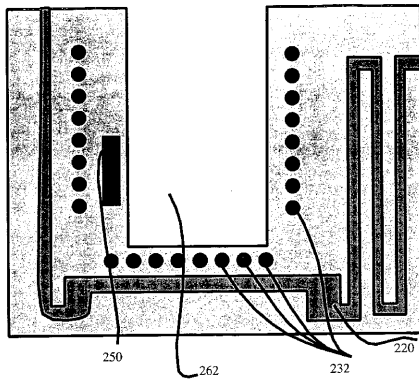


Figure 27

【図 28】

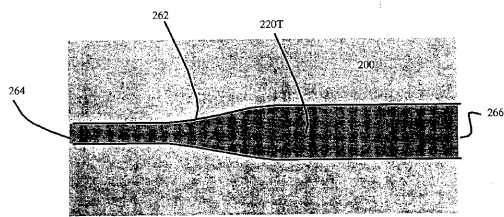


Figure 28

【図 30a and 30b】

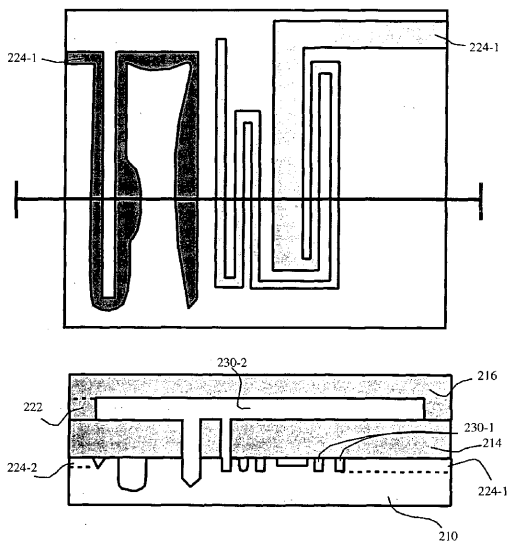


Figure 30a and 30b

【図 29】

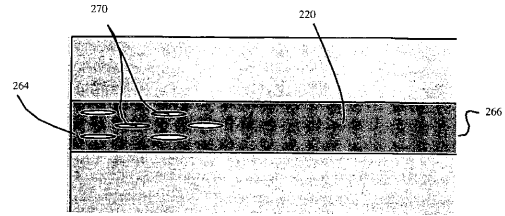


Figure 29

【図 31】

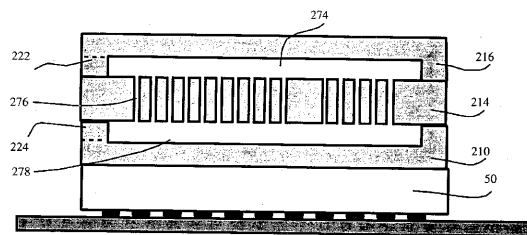


Figure 31

【図 32】

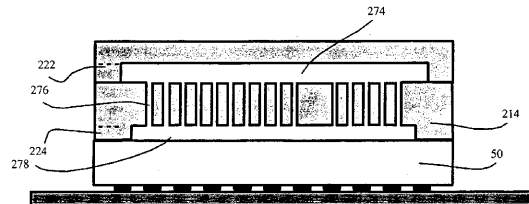


Figure 32

【図 33】

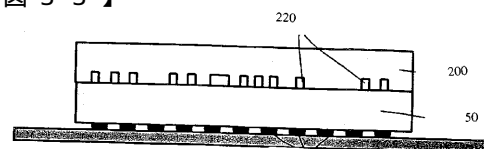


Figure 33

【図 34】

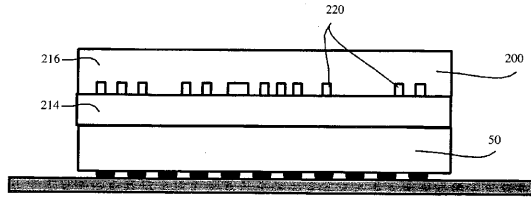


Figure 34

【図 37】

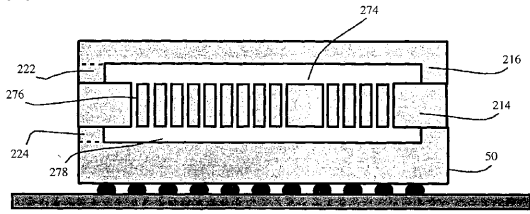


Figure 37

【図 35】

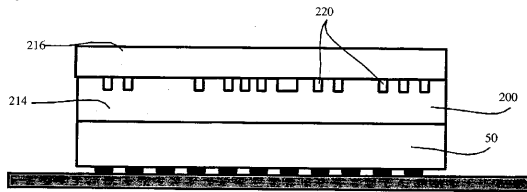


Figure 35

【図 38】

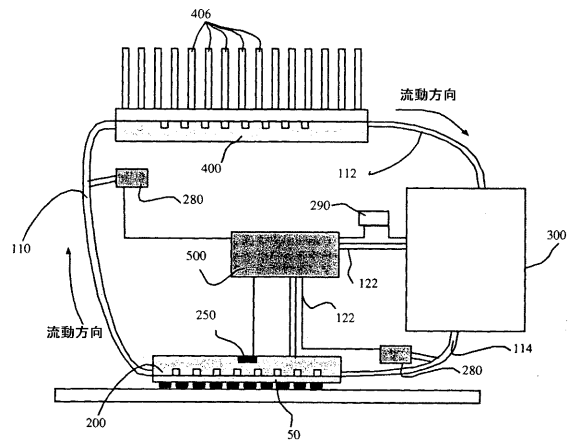


Figure 38

【図 36】

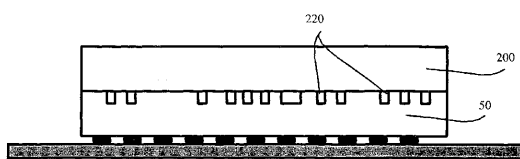


Figure 36

【図 39】

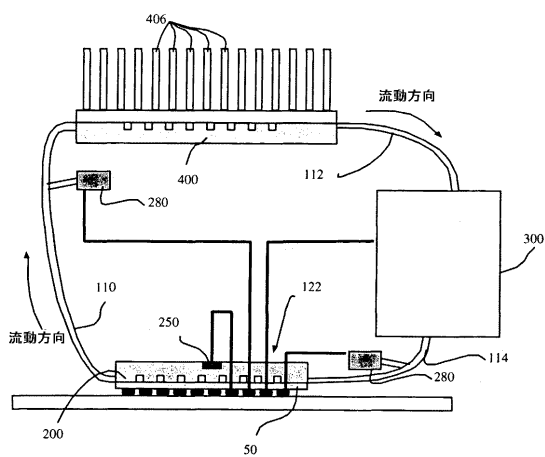


Figure 39

【図 40】

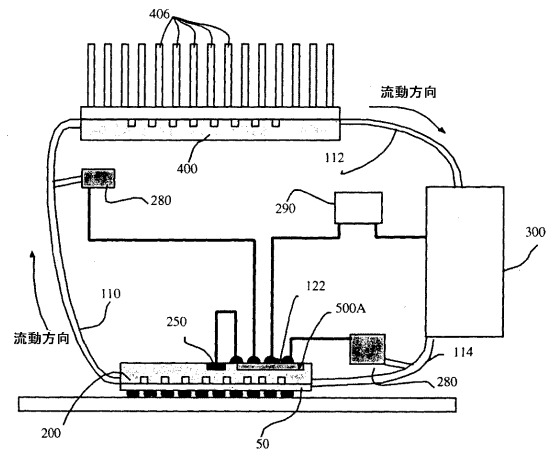


Figure 40

【 図 4 2 】

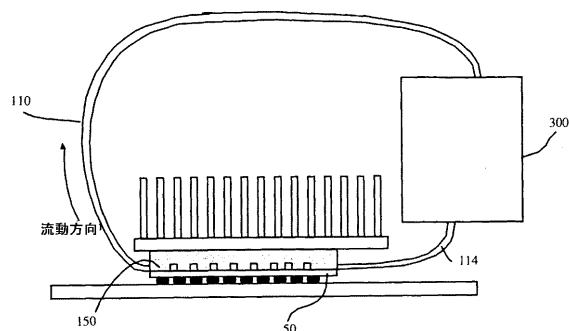


Figure 42

Figure 43

Figure 10 consists of two graphs. The left graph plots '平均温度(℃)' (Average Temperature in °C) on the y-axis (80 to 105) against 'チャネル幅 [μm]' (Channel Width in μm) on the x-axis (0 to 1000). It shows three curves for different channel depths: 20 cm (solid line), 100 cm (dashed line), and 300 cm (dotted line). The right graph plots '平均圧力(kg/cm²)' (Average Pressure in kg/cm²) on the y-axis (0 to 150) against 'チャネル幅 [μm]' (Channel Width in μm) on the x-axis (0 to 1000). It shows two curves for different flow rates: 20 ml/min (solid line) and 10 ml/min (dashed line). Both graphs show that temperature and pressure decrease as channel width increases, with higher flow rates resulting in higher temperatures and pressures.

Figure 44a および 44b

Figure 46





	$W = 300 \text{ }\mu\text{m}$,	46.3 kPa ,	$T_{w,avg} = 89.8 \text{ }^\circ\text{C}$
	$W = 700 \text{ }\mu\text{m}$,	31.3 kPa ,	$T_{w,avg} = 85.4 \text{ }^\circ\text{C}$
	$W = 300 - 700 \text{ }\mu\text{m}$,	38.6 kPa ,	$T_{w,avg} = 87.8 \text{ }^\circ\text{C}$
	$W = 700 - 300 \text{ }\mu\text{m}$,	53.7 kPa ,	$T_{w,avg} = 93.9 \text{ }^\circ\text{C}$

Figure 45

【 図 4 7 】

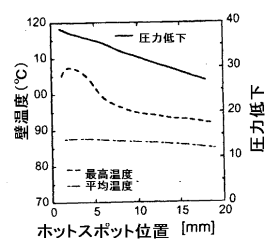


Figure 47

【図 48】

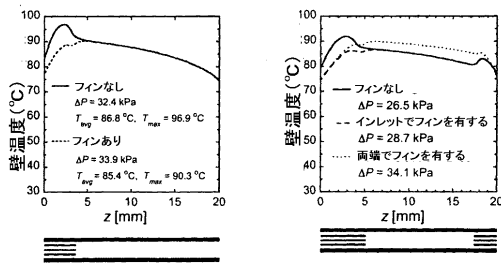


Figure 48a and 48b

【図 50】

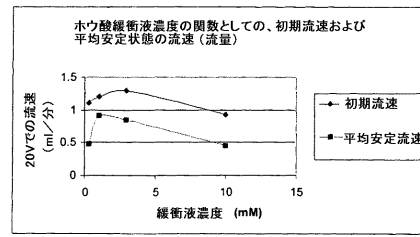


Figure 50

【図 49】

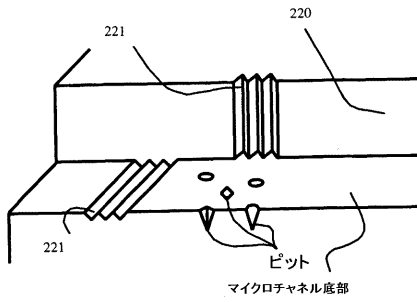


Figure 49

【図 51】

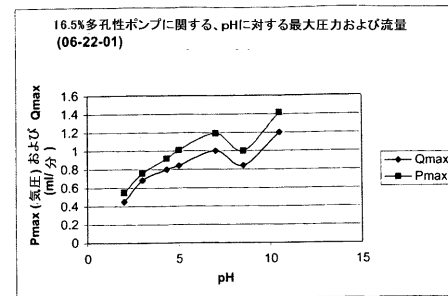


Figure 51

【図 52】

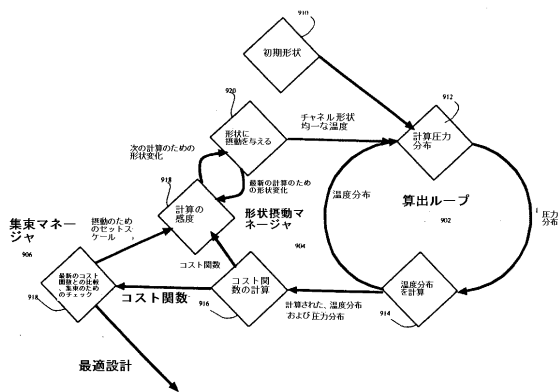


Figure 52

フロントページの続き

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,SK,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW, ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES, FI,GB,GD,GE,GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,N O,NZ,OM,PH,PL,PT,RO,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,UZ,VC,VN,YU,ZA,ZM,ZW

- (72)発明者 グッドソン, ケニス イー.
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94002, ベルモント, ウィンディング ウェイ 15
59
- (72)発明者 ハバー, デービット イー.
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94040, マウンテン ビュー, シャワーズ ドライブ
49, アpartment 165 - エヌ
- (72)発明者 ジャン, リナン
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94025, メンロ パーク, レキシントン ドライブ
209
- (72)発明者 ケニー, トーマス ダブリュー.
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94070, サン カルロス, デボンシャイアー 132
- (72)発明者 クー, ジャエ - モ
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94305, スタンフォード, マクファーランド コート
11エー
- (72)発明者 ミッケルセン, ジェームス シー.
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94024, ロス アルトス, クリントン ロード 87
1
- (72)発明者 サンティアゴ, ジュアン ジー.
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94555, フレモント, トワイライト コモン 538
9
- (72)発明者 ワン, イブリン ニン - イ
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94305, スタンフォード, ヴィア パラウ 450
- (72)発明者 ゼン, シューリン
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94086, サニーベイル, アカラネス ドライブ 41
5 ナンバー 22
- (72)発明者 ジャン, リエン
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94087, サニーベイル, リンネット レーン 175
3
- (72)発明者 チェン, チュアン - ファ
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94305, スタンフォード, エスコンディド ロード
621 ナンバー 341
- (72)発明者 ラザー, ダニエル ジェイ.
アメリカ合衆国 カリフォルニア 94117, サン フランシスコ, ビューラー ストリー
ト 144

F ターム(参考) 3L044 AA04 BA06 CA14 DB02 FA02 HA01 HA03 JA01 KA04 KA05
5E322 AA01 AA07 AA10 AA11 DA01
5F036 AA01 BA10 BA24 BB41 BB43 BB44 BF01 BF03