

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50559/2020
(22) Anmeldetag: 02.07.2020
(45) Veröffentlicht am: 15.10.2023

(51) Int. Cl.: **H01F 6/04** (2006.01)
H01F 6/06 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 19914778 B4
WO 0152276 A2
US 5513498 A

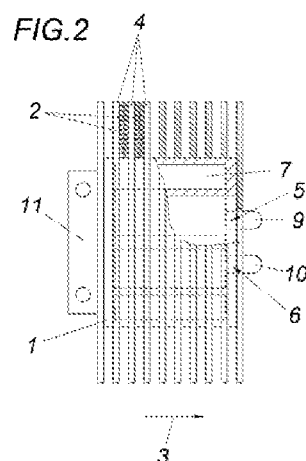
(73) Patentinhaber:
Universität Linz
4040 Linz (AT)

(72) Erfinder:
Brozyniak Aleksander
4030 Linz (AT)
Hohage Michael Dr.
4202 Kirchschlag bei Linz (AT)
Navarro-Quezada Andrea Dr.
4213 Unterweikersdorf (AT)
Leihmlehner Robert
4300 St. Valentin (AT)
Fink Ewald
4600 Wels (AT)
Fragner Konrad
4282 Pierbach (AT)
Zeppenfeld Peter Univ.Prof. Dr.
4040 Linz (AT)

(74) Vertreter:
Hübscher & Partner Patentanwälte GmbH
4020 Linz (AT)

(54) **Elektromagnet zum Einsatz in einem Ultrahochvakuum mit einer um einen Spulenhalter gewickelten Spule**

(57) Es wird ein Elektromagnet zum Einsatz in einem Ultrahochvakuum mit einer um einen Spulenhalter (1) gewickelten Spule, deren Windungen (2) zwischen vom Spulenhalter (1) abstehenden Kühlrippen (4) verlaufen, beschrieben. Um trotz kompakter Bauweise des Elektromagneten ein starkes und homogenes Magnetfeld bei geringer Verlustleistung in einem Ultrahochvakuum zu erzeugen, wird vorgeschlagen, dass der Spulenhalter (1) einen sich von einem Zulauf (5) zu einem Ablauf (6) erstreckenden Strömungskanal (7) für ein Kühlfluid umfasst.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf einen Elektromagneten zum Einsatz in einem Ultrahochvakuum mit einer um einen Spulenhalter gewickelten Spule, deren Windungen zwischen vom Spulenhalter abstehenden Kühlrippen verlaufen.

[0002] Aus dem Stand der Technik sind zahlreiche Möglichkeiten bekannt, ein modulierbares Elektromagnetfeld in einer Ultrahochvakuumumgebung zu erzeugen. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen der Temperatur eines Leiters und seinem elektrischen Widerstand ist die effektive Kühlung eines Elektromagneten Voraussetzung zum Erreichen der gewünschten Magnetfeldstärken.

[0003] Es existieren zwar Möglichkeiten, einen Elektromagneten effektiv mittels Immersion in einem Fluid zu kühlen, jedoch muss der Elektromagnet dabei außerhalb der Ultrahochvakuumumgebung gelagert werden. Dadurch werden aufgrund der Entfernung zum Wirkbereich nicht nur leistungsfähigere Magneten benötigt, sondern auch das Erzeugen eines homogenen Magnetfelds im gewünschten Wirkbereich erschwert.

[0004] Die EP0877395A1 offenbart einen Elektromagneten, bei der die Spule des Elektromagneten auf einen Spulenhalter gewickelt ist, wobei die Windungen der Spule zwischen vom Spulenhalter abstehenden Kühlrippen verlaufen. Über ein stangenförmiges Wärmeleitelement kann entstehende Wärme mittels Konduktion abgeführt werden. Durch diese kompakte Konstruktionsform kann der Elektromagnet samt Kühlung in einem Ultrahochvakuum gelagert werden.

[0005] Nachteilig am Stand der Technik ist allerdings, dass der Transport der Wärmeenergie bedingt durch die kompakte Ausführungsform limitiert ist, da die Wärme nur konduktiv über ein Wärmeleitelement abgeführt wird. Dies führt zu einem Temperaturgradienten im Magneten, wobei die heißeste Stelle der Spule, selbst bei geringeren Temperaturen in der restlichen Spule, durch ihren hitzebedingt höheren Widerstand die Entwicklung eines starken Magnetfelds beeinträchtigt. Dadurch sind im fortlaufenden Betrieb keine starken Magnetfelder ohne Zufuhr hoher elektrischer Leistung realisierbar. Das Montieren weiterer Wärmeleitelemente könnte diesen Nachteil zwar mildern, jedoch würden diese entweder das Magnetfeld negativ beeinflussen und/oder die Dimensionen der Konstruktion wesentlich vergrößern. Andere Methoden des Wärmetransports können nicht benutzt werden, da für die Konvektion in einer Ultrahochvakuumumgebung klarerweise kein Medium bereitsteht und der Wärmetransport über elektromagnetische Strahlung zu ineffizient ist.

[0006] Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, trotz kompakter Bauweise des Elektromagneten ein starkes und homogenes Magnetfeld bei geringer Verlustleistung in einem Ultrahochvakuum zu erzeugen.

[0007] Die Erfindung löst die gestellte Aufgabe dadurch, dass der Spulenhalter einen sich von einem Zulauf zu einem Ablauf erstreckenden Strömungskanal für ein Kühlfluid umfasst. Dabei wird die abzuführende Wärme zuerst von der Spule an den Spulenhalter konduktiv abgegeben. Über den Zulauf wird Kühlfluid in den Strömungskanal des Spulenhalters eingespült und die abzuführende Wärme vom Spulenhalter auf das Kühlfluid übertragen. Danach wird die abzuführende Wärme durch das anschließende Abfließen des Kühlfluids aus dem Ablauf abgeführt. Durch den Strom des wärmetauschenden Kühlfluids kann also zusätzlich zur Konduktion auch über Konvektion Wärme vom Spulenhalter abtransportiert und so die Effizienz der Kühlung maßgeblich erhöht werden. Über die Anordnung und Dimensionierung des Strömungskanals im Spulenhalter kann darüber hinaus die Wärme gleichmäßig abgeführt werden, wodurch die Bildung von Temperaturgradienten minimiert werden kann. Der durch den Strömungskanal und den Zu- bzw. Ablauf erhöhte Platzbedarf kann vernachlässigt werden, da sich der Strömungskanal einerseits platzsparend im Spulenhalter anordnen lässt und durch die verbesserte Kühlung die Größe der Spule bei gleichbleibender Magnetfeldstärke reduziert werden kann. Durch die erfindungsgemäßen Merkmale kann der Elektromagnet so kompakt gebaut werden, dass er innerhalb des Ultrahochvakuums möglichst nahe am Wirkbereich positioniert werden kann, wodurch die

Erzeugung eines homogenen Magnetfelds im Wirkungsbereich vereinfacht wird.

[0008] Die Effektivität der Kühlung wird optimiert und die Magnetfeldleistung erhöht, wenn jede Windung der Spule an einer Kühlrippe anliegt. Jede Windung der Spule kann somit Wärme direkt über eine Kühlrippe an den fluidgeköhlten Spulenhalter abgeben, wodurch sich die Problematik möglicher Wärmestaus zwischen den einzelnen Windungen nicht mehr negativ auf den Widerstand der Spule auswirkt. Dabei können die Windungen nicht nur in Richtung der Wicklungsachse, sondern auch in mehreren Windungslagen radial zur Wicklungsachse, sogenannten pancake coils, gewickelt werden. Zwar sinkt durch diese Anordnung die Anzahl der möglichen Windungen in Richtung der Windungsachse, da zwischen zwei benachbarten Kühlrippen jeweils zwei Windungen in Richtung der Windungsachse nebeneinanderliegen können, allerdings kann durch die verbesserte Wärmeabfuhr der Widerstand der Spule niedrig gehalten werden, wodurch sich die Magnetfeldleistung durch höhere Ströme erhöhen lässt. Um nach dem Einbringen des Elektromagneten in das Hochvakuum das Ausgasen zu beschleunigen, können die beiden in Richtung der Windungsachse nebeneinanderliegenden Windungen den gleichen radialen Abstand von der Windungsachse aufweisen. Dadurch verringert sich das von den Windungen eingeschlossene Totvolumen.

[0009] Um bei gegebener Länge der Wicklungsachse den Elektromagneten besser zu kühlen und zusätzlich die äußeren Windungen mechanisch zu stützen, wird vorgeschlagen, dass an den in Richtung der Wicklungsachse einander gegenüberliegenden Enden des Spulenhalters je eine Kühlrippe vorgesehen ist, an der ausschließlich an einer Seite Windungen anliegen. Die an den in Richtung der Wicklungsachse einander gegenüberliegenden Enden des Spulenhalters vorgesehenen Kühlrippen kühlen also die erste und die letzte Windung der Spule und dienen zusätzlich als physische Barriere. Dadurch kann entstehende Wärme auch in den Anfangs- und Endabschnitten der Spule gut abgeleitet werden und es wird sichergestellt, dass kein Teil der Spule durch äußere Einwirkung vom Spulenhalter rutschen kann und die korrekte Anordnung der Windungen aufrecht bleibt.

[0010] Die Zuverlässigkeit des Elektromagneten, vor allem für den Betrieb im Hochvakuum, kann erhöht werden, wenn der Spulenhalter aus Kupfer besteht. Zusätzlich zu seinen guten Wärmeleiteigenschaften ist Kupfer in hohem Reinheitsgrad leicht verfügbar. Dadurch können Einflüsse des Spulenhalters auf das Magnetfeld leicht abgeschätzt, bzw. simuliert werden. Auch kommt es bei der Verwendung von Kupfer selbst bei Erwärmung des Spulenhalters zu keiner Ausgasung im Hochvakuum, was stabilere Messbedingungen ermöglicht.

[0011] Um trotz guter elektrischer Isolierung eine gute Wärmeleitung zu garantieren, können die Windungen eine Polyimidbeschichtung aufweisen. Auch wenn Polyimidbeschichtungen eine schlechte spezifische Wärmekapazität aufweisen, kann die Beschichtung so dünn gehalten werden, dass trotz der guten elektrischen Isolationseigenschaften ein guter Wärmeübergang von den Windungen zu den Kühlrippen gewährleistet ist. Zusätzlich gasen Polyimide unter Vakuumbedingungen nicht aus.

[0012] Damit die Kühlleistung mit geringem Aufwand besser justiert werden kann, wird vorgeschlagen, dass das Kühlfluid gasförmiger Stickstoff ist. Dadurch kann über die Durchflussmenge, beziehungsweise den Druck des Stickstoffes im Strömungskanal die Kühlleistung einfach eingestellt werden. Außerdem kann der gasförmige Stickstoff durch Regulierung des Drucks vor dem Elektromagneten gezielt verflüssigt werden, sodass er erst kurz vor dem Eintritt in den Strömungskanal verdampft, wodurch sich seine Kühlleistung nochmals erhöht. Darüber hinaus ist gasförmiger Stickstoff billig und leicht verfügbar.

[0013] Die Erfindung umfasst darüber hinaus eine Kühlvorrichtung für einen erfindungsgemäßen Elektromagneten mit einem zylinderförmig entlang einer Wicklungsachse verlaufenden Spulenhalter und von diesem radial abstehenden scheibenförmigen Kühlrippen, dadurch gekennzeichnet, dass der Radius der Kühlrippen den des Spulenhalters um wenigstens 30% übersteigt. Aufgrund der Zylinderform des Spulenhalters kann die Spule einfach um diesen gewickelt werden. Der gegenüber dem Spulenhalter um wenigstens 30% größere Radius der Kühlrippen ermöglicht dabei ein effizientes Kühlen der Windungen, selbst wenn diese in pancake coils angeordnet sind,

da jede Windung an einer Kühlrippe anliegen kann. Darüber hinaus dienen die Kühlrippen als mechanische Abstützung für die Windungen, wodurch deren Position stabilisiert und das Wickeln der Windungen erleichtert wird.

[0014] Um die Wärme im Spulenhalter gleichmäßig abzuführen, wird vorgeschlagen, dass der Spulenhalter einen hohlzylinderförmigen Strömungskanal für ein Kühlfluid umfasst, dessen größte Breite in Richtung der Wicklungsachse verläuft und dass der Strömungskanal zwischen einem Zulauf und einem Ablauf, beispielsweise durch eine Trennwand unterbrochen ist. Durch diesen Verlauf und diese Dimensionierung kann der Wärmeweg zwischen den Windungen und dem Kühlfluid kurzgehalten werden, wodurch die Wärme schneller und gleichmäßiger über das Kühlfluid abgeführt werden kann. Die Unterbrechung zwischen einem Zulauf und einem Ablauf führt zu einer bevorzugten Hauptströmungsrichtung und garantiert damit, dass ein effizienter Wärmetausch zwischen Spulenhalter und Kühlfluid stattfinden kann.

[0015] Die Kühlvorrichtung kann einfacher in eine Hochvakuumkammer eingesetzt werden, wenn die äußersten Kühlrippen an einem Anschlüsse für den Zulauf und den Ablauf aufweisenden Träger befestigt sind. Der Träger dient einerseits als Halterung für den Spulenhalter und die Kühlrippen und andererseits kann über die Anschlüsse der Zulauf und der Ablauf mit Kühlfluid gespeist werden. Durch den dadurch fixierten Abstand zwischen Träger und Spulenhalter können Anschlüsse aus ausgasungsfreiem Material, wie beispielsweise Kupfer, verwendet werden, ohne den Einsatz der Kühlvorrichtung in einer Hochvakuumkammer zu erschweren. Zusätzlich können Leitungen zur Energieversorgung über den Träger zum Elektromagneten geführt werden.

[0016] Um eine stabile Position und möglichst gleichmäßige Wicklung der Windungen zwischen den Kühlrippen zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, dass eine Gruppe von Kühlrippen von einer parallel zur Wicklungsachse verlaufenden Durchtrittsöffnung für die Windungen durchbrochen ist. Dadurch kann der Draht der Spule, nachdem die gewünschte Anzahl an Windungen zwischen zwei Kühlrippen gelegt wurde, einfach in unmittelbarer Nähe des Spulenhalters zwischen die nächsten zwei Kühlrippen geführt werden, ohne dass der Draht hierfür diagonal über den Radius der Kühlrippen gelegt werden muss. Damit wird nicht nur die Wicklung von pancake coils vereinfacht, sondern auch unerwünschtes Spiel des Drahtes vermieden, welches in einer Änderung des Magnetfeldes resultieren würde. Aufgrund der verminderten Kühlleistung im Bereich der Durchtrittsöffnungen wird in einer besonders bevorzugten Ausführungsform vorgeschlagen, diese zum Ausgleich im Bereich des Zulaufs anzuordnen, damit der Wärmeaustausch lokal aufgrund der höheren Temperaturdifferenz zum noch nicht erwärmten Kühlfluid verbessert wird.

[0017] In der Zeichnung ist der Erfindungsgegenstand beispielsweise dargestellt. Es zeigen

[0018] Fig. 1 eine Draufsicht auf einen erfindungsgemäßen Elektromagneten,

[0019] Fig. 2 eine teilweise aufgerissene Seitenansicht des Elektromagneten zur besseren Darstellung des Strömungskanals und

[0020] Fig. 3 eine Detailansicht der zwischen den Kühlrippen verlaufenden Wicklungen in größerem Maßstab.

[0021] Ein erfindungsgemäßer Elektromagnet umfasst einen Spulenhalter 1, um den die Windungen 2 einer Spule gewickelt sind. Wie hier gezeigt, können die Windungen 2 in mehreren Windungslagen radial zur Wicklungsachse 3, sogenannten pancake coils, gewickelt werden. Jede Windung 2 liegt dabei an einer vom Spulenhalter 1 abstehenden Kühlrippe 4 an, wobei in der Zeichnung exemplarisch nur die Windungen 2 zwischen drei Kühlrippen 4 gezeigt werden. Der Spulenhalter 1 weist dabei einen Zulauf 5 und einen Ablauf 6 für einen vom Spulenhalter 1 umfassten Strömungskanal 7 für ein Kühlfluid auf.

[0022] Die im Betrieb des Elektromagneten entstehende Wärme wird von den Windungen 2 konduktiv über die Kühlrippen 4 an den Spulenhalter 1 abgegeben, wo die Wärme mittels Konvektion an das Kühlfluid abgegeben wird. Das Kühlfluid tritt dabei über den Zulauf 5 in den Strömungskanal 7 ein, wo es die Wärme vom Spulenhalter 1 aufnimmt und anschließend über den Ablauf 6 aus dem Strömungskanal 7 wieder austritt. Die Wärme kann dabei am effizientesten abgeleitet

werden, wenn zwischen zwei benachbarten Kühlrippen 4 jeweils zwei Windungen 2 mit gleichem radialen Abstand von der Windungsachse 3 in Richtung der Windungsachse 3 nebeneinanderliegen. In einer von der Fig. 3 abweichenden Ausführungsform können die beiden in Richtung der Windungsachse 3 nebeneinanderliegenden Windungen 2 auch versetzt nebeneinanderliegen. Um die Windungen 2 der Spule zusätzlich mechanisch zu stützen, kann an den in Richtung der Wicklungsachse 3 gegenüberliegenden Enden des Spulenhalters 1 je eine Kühlrippe 4 vorgesehen sein, an der ausschließlich an einer Seite Windungen 2 anliegen. Diese Kühlrippen 4 verhindern dabei, dass sich die äußeren Windungen 2 vom Spulenhalter 1 lösen und das erzeugte Magnetfeld unbeabsichtigt ändern.

[0023] Die Windungen 2 können eine Polyimidbeschichtung 8 aufweisen. Durch dieses Material werden die Windungen 2 elektrisch voneinander isoliert. Aufgrund der verbesserten Kühleigenschaften ergibt sich in den Windungen 2 ein geringerer elektrischer Widerstand, wodurch für die gleiche Magnetfeldstärke eine geringere Spannungsdifferenz an die Spule angelegt werden muss, sodass für die Spannungsisolation die Polyimidbeschichtung dünn gehalten werden kann. Trotz der schlechten Wärmeleiteigenschaften von Polyimid kann somit die Wärme gut von den Windungen 2 auf die Kühlrippen 4 abgegeben werden, um Wärmestaus zu vermeiden.

[0024] Die Erfindung bezieht sich auch auf eine Kühlvorrichtung für einen Elektromagneten mit einem zylinderförmigen Spulenhalter 1 und von diesem radial abstehenden, scheibenförmigen Kühlrippen 4. Die mechanische Stützfunktion und die Wärmeübertragungseigenschaften aller Kühlrippen 4 können dabei besser genutzt werden, denn der Radius der Kühlrippen 4 den Radius des Spulenhalters 1 um wenigstens 30% übersteigt.

[0025] Um die Wärme möglichst gut über Konvektion abzuführen, sollte der Wärmeweg zum Strömungskanal 7 möglichst gering sein. Dies wird dadurch erreicht, dass der Strömungskanal 7 unmittelbar an den Mantel des Spulenhalters 1, an den die Kühlrippen 4 angesetzt sind, anschließt. Vorzugsweise verläuft die größte Breite des Strömungskanals 7 in Richtung der Wicklungsachse 3, wobei der Strömungskanal 7 zwischen einem Zulauf 5 und einem Ablauf 6 unterbrochen ist. Durch diese Dimensionierung kann das Totvolumen im Strömungskanal 7 klein gehalten und der Wärmetausch zwischen Kühlfluid und der Oberfläche des Strömungskanals 7 maximiert werden.

[0026] Die Kühlvorrichtung kann über die äußersten Kühlrippen auf einem Anschlüsse 9, 10 aufweisenden Träger 11 montiert sein. Dieser Träger 11 versorgt über die Anschlüsse 9, 10 den Zulauf 5 und den Ablauf 6 des Spulenhalters 1 und vereinfacht zusätzlich das Einsetzen der Kühlvorrichtung in eine Hochvakuumkammer, indem er die Kühlvorrichtung mechanisch stabilisiert. Auch können die elektrischen Leitungen für einen Elektromagneten und die Leitungen für das Kühlfluid, sowie weitere eventuelle Versorgungsleitungen an bzw. in dem Träger 11 angebracht sein. Dies ermöglicht beispielsweise den Einsatz ausgasungsfreier, jedoch starrer Anschlüsse 9, 10 für den Zulauf 5 und den Ablauf 6.

Eine Gruppe von Kühlrippen 4 kann von einer parallel zur Wicklungsachse 3 verlaufenden, Durchtrittsöffnung 12 für die Windungen 2 durchbrochen sein. Dadurch kann der Draht aus dem die Windungen 2 gewickelt werden einfach von einem durch zwei Kühlrippen 4 gebildeten Zwischenraum zum nächsten durch zwei Kühlrippen 4 gebildeten Zwischenraum geführt werden. So kann der Draht in unmittelbarer Nähe des Spulenhalters 1 gewickelt werden und es wird vermieden, dass der Draht über eine Kühlrippe 4 geführt werden muss. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform befindet sich die Durchtrittsöffnung 12 im Bereich des Zulaufs, da so die durch die Durchtrittsöffnung 12 verminderte lokale Kühlfunktion der Kühlrippe 4 durch die hohe Temperaturdifferenz zum noch nicht erwärmten Kühlfluid verbessert wird.

Patentansprüche

1. Elektromagnet zum Einsatz in einem Ultrahochvakuum mit einer um einen Spulenhalter (1) gewickelten Spule, deren Windungen (2) zwischen vom Spulenhalter (1) abstehenden Kühlrippen (4) verlaufen, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Spulenhalter (1) einen sich von einem Zulauf (5) zu einem Ablauf (6) erstreckenden Strömungskanal (7) für ein Kühlfluid umfasst.
2. Elektromagnet nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass jede Windung (2) der Spule an einer Kühlrippe (4) anliegt.
3. Elektromagnet nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass an den in Richtung der Wicklungsachse (3) einander gegenüberliegenden Enden des Spulenhalters (1) je eine Kühlrippe (4) vorgesehen ist, an der ausschließlich an einer Seite Windungen (2) anliegen.
4. Elektromagnet nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Spulenhalter (1) aus Kupfer besteht.
5. Elektromagnet nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Windungen (2) eine Polyimidbeschichtung (8) aufweisen.
6. Elektromagnet nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kühlfluid gasförmiger Stickstoff ist.
7. Kühlvorrichtung für einen Elektromagneten mit einem zylinderförmig entlang einer Wicklungsachse (3) verlaufenden Spulenhalter (1) und von diesem radial abstehenden, scheibenförmigen Kühlrippen (4), **dadurch gekennzeichnet**, dass der Radius der Kühlrippen (4) den des Spulenhalters (1) um wenigstens 30% übersteigt.
8. Kühlvorrichtung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Spulenhalter (1) einen hohlzylinderförmigen Strömungskanal (7) für ein Kühlfluid umfasst, dessen größte Breite in Richtung der Wicklungsachse (3) verläuft und dass der Strömungskanal (7) zwischen einem Zulauf (5) und einem Ablauf (6) unterbrochen ist.
9. Kühlvorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die äußersten Kühlrippen an einem Anschlüsse (9,10) für den Zulauf (5) und den Ablauf (6) aufweisenden Träger (11) befestigt sind.
10. Kühlvorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Gruppe von Kühlrippen (4) von einer parallel zur Wicklungsachse (3) verlaufenden Durchtrittsöffnung für die Windungen (2) durchbrochen ist.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

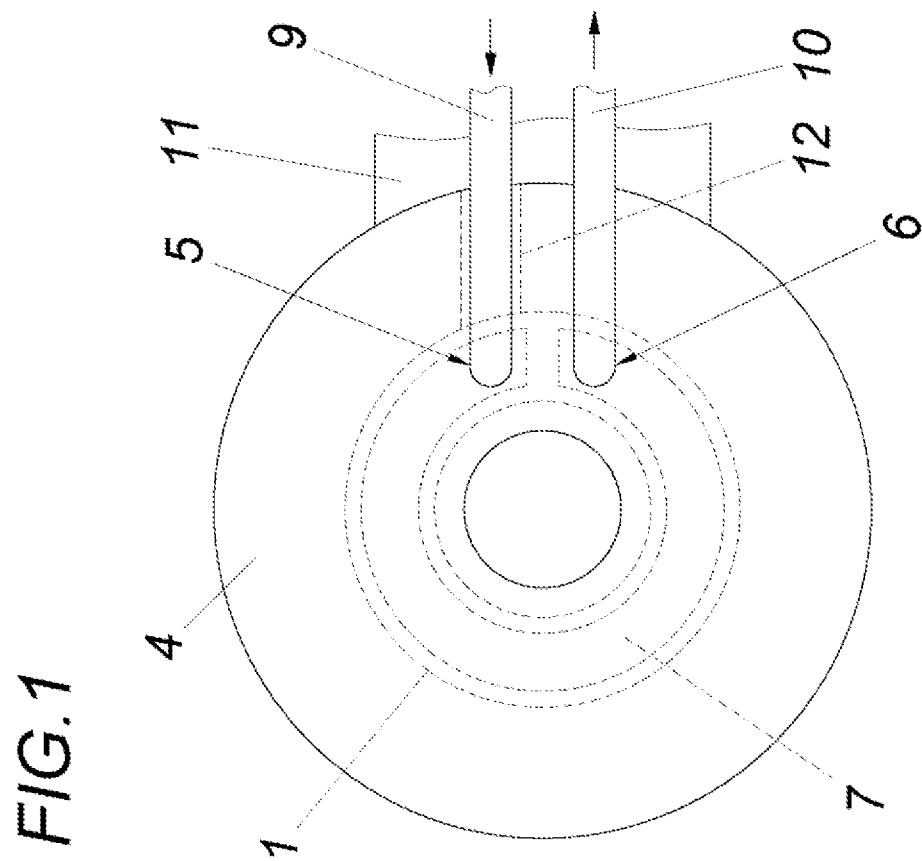
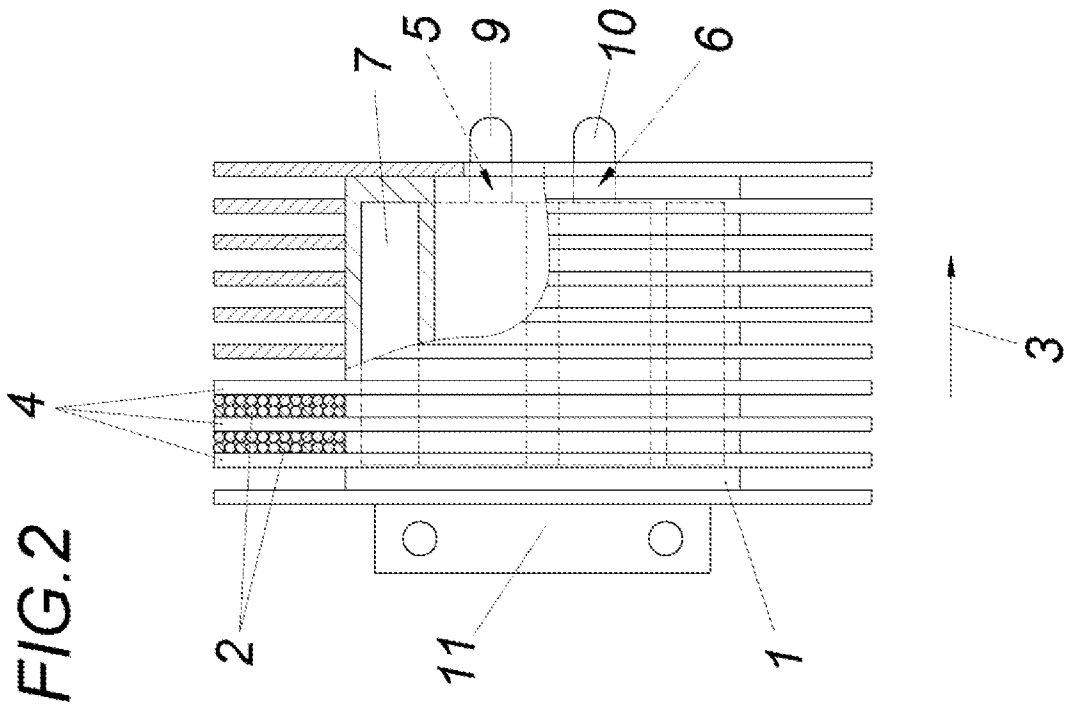


FIG.3

