



(10) **DE 10 2012 020 148 A1** 2014.04.17

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2012 020 148.6**

(22) Anmeldetag: **15.10.2012**

(43) Offenlegungstag: **17.04.2014**

(51) Int Cl.: **H03F 3/14** (2006.01)

(71) Anmelder:

Bundesrepublik Deutschland, endvertreten durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 38116, Braunschweig, DE

(74) Vertreter:

GRAMM, LINS & PARTNER GbR, 38122, Braunschweig, DE

(72) Erfinder:

Drung, Dietmar, Dr., 13583, Berlin, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US 2009 / 0 079 501 A1

US 2010 / 0 117 736 A1

US 2011 / 0 004 072 A1

US 2011 / 0 043 281 A1

JP 2002- 050 935 A

SU 559 187 A1

Analog Devices: A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers. Norwood, MA, USA, 2006. Kapitel 1 und 2. - Firmenschrift. http://www.analog.com/static/imported-files/design_handbooks/5812756674312778737Complete_In_Amp.pdf [abgerufen am 02.07.2013]

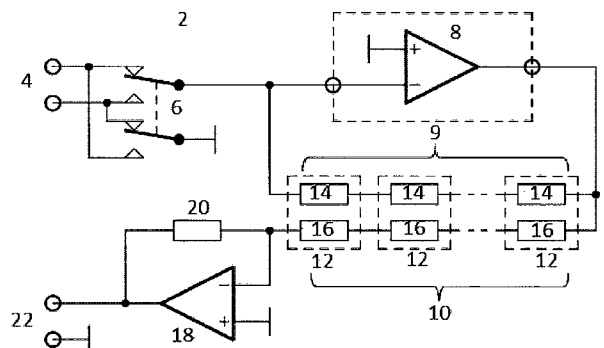
SU 559 187 A1; WPI abstract, [recherchiert in EPOQUE]

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verstärker zum Verstärken kleiner elektrischer Ströme**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Verstärker zum Verstärken eines elektrischen Stroms von unter 1000 Pikoampere mit: einem Stromeingang (4), einem Spannungsausgang (22) und zumindest einem ersten Operationsverstärker (8), der mit dem Stromeingang (4) elektrisch verbunden ist und als Stromverstärker geschaltet ist, einem hochohmigen Gegenkopplungswiderstand (9), der zwischen einen invertierenden Eingang (7) und einen Ausgang (15) des ersten Operationsverstärkers (8) geschaltet ist, einem zweiten Operationsverstärker (18), der so hinter den ersten Operationsverstärker geschaltet ist, dass er einen Strom vom ersten Operationsverstärker (8) in eine Spannung wandelt, und einem Zwischen-Widerstand (10), der zwischen den ersten Operationsverstärker (8) und den zweiten Operationsverstärker (18) geschaltet ist. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass der Gegenkopplungswiderstand (9) und der Zwischen-Widerstand (10) so ausgebildet sind, dass sich ein Widerstandsverhältnis (Q) von elektrischem Widerstand (R_9) des Gegenkopplungswiderstands (9) zu elektrischem Widerstand (R_{10}) des Zwischen-Widerstands (10) bei einer Temperaturänderung von 0,1 K um höchstens das 10^{-6} -fache ändert.



Beschreibung

[0001] Die präzise, rückführbare Messung kleinster Ströme ist wegen des Rauschens der Stromverstärker sehr schwierig. Um Stromstärken im Bereich von 100 Pikoampere mit einer Messunsicherheit von 10^{-7} rückführbar innerhalb einer akzeptablen Messzeit bestimmen zu können, ist es wünschenswert, dass das eingangsbezogene Stromrauschen der Verstärkeranordnung etwa $1 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ nicht übersteigt. Weiterhin muss die Anordnung eine außerordentlich hohe Temperatur- und Langzeitstabilität aufweisen.

[0002] Bekannte Messgeräte erreichen zwar ein hinreichend geringes Stromrauschen, die rückführbare Messunsicherheit ist jedoch zu hoch, um Stromstärken im Bereich von 100 Pikoampere auf 10^{-7} genau zu messen.

[0003] Stromverstärker auf Halbleiterbasis mit Feldeffekttransistoren weisen bis zu niedrigen Frequenzen herab ein akzeptables Stromrauschen auf, wenn Gegenkopplungswiderstände im Gigaohmbereich verwendet werden. Widerstände dieser Größenordnung, die üblicherweise als Drahtwiderstände oder in Dickschichttechnik hergestellt werden, besitzen im Allgemeinen aber nicht die nötige Temperatur- und Langzeitstabilität.

[0004] Die Aufgabe der Erfindung ist es, die Messgenauigkeit bei vorgegebener Messzeit bei der Messung von elektrischen Strömen von höchstens 1000 Pikoampere zu erhöhen.

[0005] Vorteilhaft an der Erfindung ist das geringe Eigenrauschen des Verstärkers. Da der hochohmige erste Gegenkopplungswiderstand und der niederohmige Widerstand in Form des Zwischen-Widerstands eine mit hoher Genauigkeit übereinstimmende Temperaturabhängigkeit zeigen, heben sich die von den beiden Widerständen verursachten Messungenauigkeiten gerade auf. Es kommt dann nicht mehr auf die absolute Temperaturstabilität der Widerstände an, sondern nur noch darauf, dass beide Widerstände bei Temperaturänderung das gleiche Verhalten zeigen.

[0006] Die Stabilität des Widerstandsverhältnisses beträgt dabei zumindest 10^{-6} , vorzugsweise zumindest 10^{-7} . Der Begriff „hochohmig“ bezieht sich darauf, dass der Gegenkopplungswiderstand einen höheren elektrischen Widerstand hat als der Zwischen-Widerstand. Die Langzeitstabilität des Widerstandsverhältnisses ist durch Verwendung einer Vielzahl von Dünnschichtwiderständen möglich. Zwar ist es möglich, dass sich die Widerstände selbst ändern, das Verhältnis hingegen bleibt mit hoher Genauigkeit konstant. Durch die Vielzahl an Widerständen miteln sich zudem Fluktuationen des Widerstandsverhältnisses von Widerstandspaaren heraus.

[0007] Vorzugsweise beträgt der elektrische Widerstand des Gegenkopplungswiderstands zumindest das Hundertfache des ohmschen Widerstands des Zwischen-Widerstands.

[0008] Bevorzugt sind der hochohmige Gegenkopplungswiderstand und der Zwischen-Widerstand aus mittels einer Serienschaltung von zumindest 100 identisch dimensionierten Widerständen aufgebaut. So führen 1000 Widerstandspaare, bei denen das Gegenkopplungswiderstandselement 10 Megaohm hat und das Zwischen-Widerstandselement 10 Kiloohm, zu einem Gegenkopplungswiderstand von 10 Gigaohm und einem Zwischen-Widerstand von 10 Megaohm. Solche Widerstandspaare können einfach und mit einer hohen Genauigkeit hergestellt werden.

[0009] Zweckmäßigerweise sind dazu beide Widerstände des Widerstandspaares, also der hochohmige Gegenkopplungswiderstand und der Zwischen-Widerstand, aus der gleichen Anzahl von Einzelwiderständen aufgebaut, so dass die Übereinstimmung des temperaturabhängigen Verhaltens möglichst hoch ist.

[0010] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform weist der erste hochohmige Gegenkopplungswiderstand eine Mehrzahl an Gegenkopplungswiderstandselementen gleichen elektrischen Widerstands auf und der Zwischen-Widerstand eine Mehrzahl an Zwischen-Widerstandselementen gleichen elektrischen Widerstands, wobei je ein Gegenkopplungswiderstandselement und ein Zwischen-Widerstandselement ein Widerstandspaar bilden. Insbesondere sind die Widerstandselemente eines Widerstandspaares örtlich benachbart angeordnet und/oder auf einem gemeinsamen Substrat angeordnet. Die Temperaturabhängigkeit von in unmittelbarer Nähe zueinander auf dem Substrat gefertigten Widerstandspaaren ist in guter Näherung identisch. Das Widerstandsverhältnis zwischen ohmschem Widerstand des Gegenkopplungswiderstandselements und ohmschem Widerstand des Zwischen-Widerstandselements bleibt mit hoher Genauigkeit auch dann konstant, wenn die beiden ohmschen Widerstände selbst sich ändern.

[0011] Vorzugsweise sind die Widerstandspaare auf einem IC (integrated circuit, englisch für integrierten Schaltkreis) zusammengefasst.

[0012] Besonders bevorzugt sind die Widerstände als Dünnschichtwiderstände ausgebildet. Dünnschichtwiderstände umfassen eine elektrisch leitende Schicht vorzugsweise von weniger als 500 nm auf einem elektrischen Isolator. Günstig ist es, wenn die Dünnschichtwiderstände in NiCr-Dünnschichttechnik hergestellt sind, wobei neben Schichten aus NiCr beispielsweise auch solche aus TaN_2 oder SiCr verwendbar sind.

[0013] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind die Gegenkopplungswiderstandselemente und die Zwischen-Widerstandselemente auf einer Leiterplatte jeweils mäanderförmig und parallel zueinander angeordnet, wobei zwischen den Mäanderbahnen Ausnehmungen in der Leiterplatte angebracht sind. Mit Hilfe dieser Anordnung können Leckströme minimiert werden. Die Ausnehmungen können beispielsweise als Frässchnitte ausgeführt sein. Vorzugsweise sind unterhalb der Widerstandspaare Ausnehmungen zu einer Leiterplatte vorgesehen, auf der das Substrat befestigt ist, auf dem die Widerstandspaare angeordnet sind. Die Ausnehmungen verringern Leckströme in die Leiterplatte.

[0014] Bei auf konventionelle Weise gefertigten Widerstandsnetzwerken in Dünnschichttechnik werden die Werte der einzelnen Widerstände im Regelfall durch die Länge der Widerstandsbahnen vorgegeben, das heißt, neben der Schichtdicke wird auch die Bahnbreite konstant gehalten. Unter diesen Bedingungen hätte ein niederohmiger Einzelwiderstand eine um ein Vielfaches kleinere Fläche als ein hochohmiger Einzelwiderstand und wäre daher bezüglich des Stromrauschens und der Spannungsabhängigkeit dominant. Diese Probleme können vermieden werden, wenn die beiden Einzelwiderstände eines Einzelwiderstandspaares in etwa flächengleich sind. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform liegt daher das Flächenverhältnis zwischen der Fläche eines Gegenkopplungswiderstandselements und der Fläche eines Zwischen-Widerstandselements zwischen 0,9 und 1,1.

[0015] Falls dies aufgrund von konstruktionstechnischen Gründen nicht realisierbar ist, so ist es vorteilhaft, wenn die Fläche des niederohmigen Einzelwiderstands zumindest 10% der Fläche des hochohmigen Einzelwiderstands beträgt.

[0016] Der Verstärker kann mit einer über einen Normalwiderstand einkoppelbaren Kalibrierspannung, die alternativ sowohl auf den Stromeingang des ersten Operationsverstärkers als auch auf einen Ausgang zum Messgerät geschaltet werden kann, ausgestattet sein. Das Umschalten zwischen dem Stromeingang des ersten Operationsverstärkers und dem Ausgang zum Messgerät kann dabei beispielsweise mit einem Schalter erfolgen. Mittels einer solchen Anordnung lässt sich eine interne Kalibrierfunktion realisieren. Der Normalwiderstand wird dabei so in seiner Dimensionierung an den Verstärkungsfaktor des Verstärkers angepasst, dass durch einen Vergleich der Kalibrierspannung, die lediglich über dem Normalwiderstand abfällt, und der am Messgerät anliegenden Spannung, wenn die Kalibrierspannung auf den Stromeingang des ersten Operationsverstärker geschaltet ist, eine mögliche Drift des Verstärkers bestimmt werden kann, wodurch eine relativ einfache Kalibrierungsfunktion bereitgestellt wird. Erfin-

dungsgemäß ist auch eine Anordnung mit einem erfindungsgemäßen Verstärker und einer Kalibrier- vorrichtung, die einen Quanten-Hall-Widerstand aufweist und so mit dem Verstärker verbunden ist, dass der Normalwiderstand kalibrierbar ist und/oder dass die Übertragungsfunktion des Verstärkers ermittelbar ist.

[0017] Vorzugsweise handelt es sich bei dem Normalwiderstand wiederum um einen Metallfolienwiderstand, der ebenfalls durch eine Serienschaltung von zumindest 10 Einzelwiderständen, bevorzugt von zumindest 50 Einzelwiderständen, gebildet werden kann. Ungenauigkeiten der Einzelwiderstände heben sich so im Wesentlichen gegenseitig auf, so dass ein extrem hochwertiger langzeitstabiler Normalwiderstand entsteht.

[0018] Das erfindungsgemäße Widerstandspaar zeichnet sich dadurch aus, dass beide Einzelwiderstände paarweise auf einem gemeinsamen Substrat gefertigt sind, so dass ein niederohmiger Widerstand einem hochohmigen Widerstand zugeordnet ist, und wobei der Widerstandswert des hochohmigen Widerstands den Widerstandswert des niederohmigen Widerstands um zumindest den Faktor 100 übersteigt. Durch eine Anpassung eines solchen Widerstandspaares an eine bestimmte Aufgabenstellung lässt sich zum Beispiel ein oben beschriebener Verstärker zum Verstärken von kleinen elektrischen Strömen herstellen, indem gegebenenfalls eine Vielzahl von erfindungsgemäßen Widerstandspaaren als Einzelwiderstandspaare in Serie geschaltet werden.

[0019] Nachfolgend wird die Erfindung anhand von in den Figuren gezeigten Ausführungsbeispielen näher erläutert. Es zeigen

[0020] Fig. 1 den Schaltplan eines erfindungsgemäßen Verstärkers,

[0021] Fig. 2 einen Detailausschnitt des Schaltplans nach Fig. 1,

[0022] Fig. 3 eine schematische Darstellung des erfindungsgemäßen Widerstandspaares,

[0023] Fig. 4 den Schaltplan eines erfindungsgemäßen Verstärkers mit interner Kalibrierfunktion und

[0024] Fig. 5 eine Möglichkeit zur Rückführung der in Fig. 4 gezeigten Anordnung auf den Quanten-Hall-Effekt.

[0025] Fig. 1 zeigt einen Schaltplan eines erfindungsgemäßen Verstärkers **2**. Durch einen Stromeingang **4** fließt ein zu messender Eingangsstroms **1** zu einem ersten Operationsverstärker **8**. Mittels eines Schalters **6** kann die Polarität des Eingangsstroms umgekehrt werden.

[0026] Der Verstärker **2** umfasst einen Gegenkopplungswiderstand **9**, der zwischen einen Ausgang **15** des Operationsverstärkers **8** und dessen invertierenden Eingang **7** geschaltet ist. Der Verstärker **2** besitzt zudem einen Zwischen-Widerstand **10**, der mit dem invertierenden Eingang **7** verbunden ist.

[0027] Der Gegenkopplungswiderstand **9** ist aus einer Vielzahl an in Serie geschalteten hochohmigen Gegenkopplungswiderstandselementen **14.1**, **14.2**, **14.3**, ..., **14.N** aufgebaut, der Zwischen-Widerstand **10** besteht aus einer Vielzahl an in Serie geschalteten Zwischen-Widerstandselementen **16.1**, **16.2**, **16.3**, ..., **16.N**. Je ein Gegenkopplungswiderstandselement **14** (Bezugszeichen ohne Zählsuffix bezeichnen das Objekt als solches) und ein Zwischen-Widerstandselement **16** bilden ein Widerstandspaar **12**, so dass eine Vielzahl an Widerstandsparen **12.1**, **12.2**, **12.3**, ..., **12.N** existiert.

[0028] Der Zwischen-Widerstand **10** ist zwischen den Ausgang **15** des ersten Operationsverstärkers **8** und einen invertierenden Eingang **17** eines zweiten Operationsverstärkers **18** geschaltet und kompensiert in guter Näherung alle Ungenauigkeiten, die der Gegenkopplungswiderstand **9** durch die Temperaturabhängigkeit der Gegenkopplungswiderstandselemente **14.n** ($n = 1, 2, 3, \dots, N$) hat.

[0029] Der Verstärker **2** umfasst zudem einen Metallfolienwiderstand **20**, der als Gegenkopplungswiderstand für den zweiten Operationsverstärker **18** zwischen den invertierenden Eingang **17** und einen Ausgang **19** geschaltet ist. Mittels des zweiten Operationsverstärkers **18** wird der von dem ersten Operationsverstärker **8** verstärkte Eingangsstrom in eine Spannung umgewandelt, die an einem Spannungsausgang **22** des Verstärkers **2** anliegt.

[0030] Eine mögliche Dimensionierung kann wie folgt aussehen: Jedes hochohmige Gegenkopplungswiderstandselement **14** hat einen Widerstand von 1 Megaohm und jedes Zwischen-Widerstandselement **16** hat einen Widerstand von 10 Kiloohm. Bei insgesamt 1000 Widerstandsparen **12** hat dann der Gegenkopplungswiderstand **9** einen Widerstand von 1 Gigaohm und der Zwischen-Widerstand **10** hat einen Widerstand von 10 Megaohm. Geeignet ist die SO-Serie von Powertron (Vishay Precision Group).

[0031] Der Metallfolienwiderstand **20** hat im gezeigten Ausführungsbeispiel einen Widerstand von 100 Kiloohm. Mit der beschriebenen Dimensionierung lässt sich ein eingangsbezogenes Stromrauschen von $1,4 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ erreichen, welches nur wenig über dem Nyquist-Rauschen eines herkömmlichen 10 Gigaohm-Widerstands liegt.

[0032] Fig. 2 zeigt einen möglichen inneren Aufbau des ersten Operationsverstärkers **8**, der drei Teil-

Operationsverstärker umfasst. Der Teil-Operationsverstärker **8.1** fungiert als FET-Buffer, der mit diesem verbundene Operationsverstärker **8.2** dient als Integrator und der Operationsverstärker **8.3** wirkt als Ausgangsstufe.

[0033] Am Ausgang des Operationsverstärkers **8.3** treten die höchsten Spannungen auf, so dass es vorteilhaft ist, einen Hochvolt-Operationsverstärker zu verwenden. So kann bei der weiter unten beschriebenen Kalibrierung mit größeren Messsignalen gearbeitet und die Kalibrierdauer reduziert werden. Für die beiden übrigen Operationsverstärker **8.1** und **8.2** können herkömmliche ± 5 Volt-Typen verwendet werden. Der erste Operationsverstärker **8** umfasst zudem Widerstände **24**, **26** und **28** sowie eine Kapazität **25**.

[0034] Fig. 3 zeigt ein mögliches makroskopisches Layout des Zwischen-Widerstands **10**. Die Widerstandspaare **12** (Bezugszeichen ohne Zählsuffix bezeichnen das Objekt als solches) sind mäanderförmig angeordnet und bilden eine Widerstandskette **11**. Ein Detailausschnitt der Widerstandskette **11** ist im rechten Teil von Fig. 3 gezeigt. Zu erkennen sind jeweils die hochohmigen Gegenkopplungswiderstandselemente **14** und die niederohmigen Zwischen-Widerstandselemente **16**.

[0035] Sowohl in der Detailansicht auf der rechten Seite als auch im makroskopischen Überblick auf der linken Seite von Fig. 3 sind mit dem Bezugszeichen **30** Frässschnitte gekennzeichnet, die jeweils der Minimierung von Leckströmen dienen. Sowohl zwischen den einzelnen Teilen der mäanderförmig angeordneten Widerstandskette **11** als auch unter den einzelnen Widerstandsparen **12** sind solche Frässschnitte **30** angeordnet.

[0036] Der gesamte Flächenbedarf der in Fig. 3 gezeigten Anordnung entspricht im gezeigten Ausführungsbeispiel mit insgesamt 1000 Widerstandsparen **12** in etwa einer DIN-A4-Seite. Die absolute Toleranz der Widerstandswerte der Widerstandselemente **14**, **16** spielt nur eine untergeordnete Rolle, eine Toleranz von 20% ist hier ausreichend, solange die relative Toleranz ausreichend klein ist, also ein Widerstandsverhältnis

$$Q = \frac{R_9}{R_{16}}$$

von elektrischem Widerstand R_9 des Gegenkopplungswiderstand **9** zu elektrischem Widerstand R_{16} des Zwischen-Widerstands genau genug bestimmt ist.

[0037] Es hat sich gezeigt, dass die Konstanz des Widerstandsverhältnisses

$$Q = \frac{R_9}{R_{10}}$$

und insbesondere die Konstanz eines Paar-Widerstandsverhältnisses

$$Q_{12}(n) = \frac{R_{14}(n)}{R_{16}(n)}$$

für das n-te Widerstandspaar **12.n** für alle Widerstandspaare **12** von Bedeutung ist. Die Widerstandspaare **12** sind so herstellbar, dass die Temperaturstabilität des Paar-Widerstandsverhältnisses $Q_{12}(n)$ für jedes der N Einzelwiderstandspaare bei 2 bis 3 ppm/Kelvin liegt.

[0038] Bei einer mit einem Luftthermostaten ohne Weiteres erreichbaren Temperaturstabilität von $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ergibt sich daraus eine Stabilität des Widerstandsverhältnisses eines Widerstandspaares **12** von 3×10^{-7} . Durch die Serienschaltung von 1000 Einzelwiderstandspaaren verbessert sich im Regelfall die gesamte Stabilität, so dass für den Zwischenwiderstand **10** eine Obergrenze für die Stabilität des Verhältnisses Q der Widerstände von 10^{-7} erreichbar ist.

[0039] Fig. 4 zeigt eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verstärkers **2**, der im Vergleich zu dem in Fig. 1 gezeigten Verstärker einen Normalwiderstand **36** umfasst, der eine interne Kalibrierung ermöglicht. Diese Kalibrierung ist zweckmäßig, da die Widerstandsdrift relevant für die Messgenauigkeit werden kann. Mit der internen Kalibrierfunktion wird eine regelmäßige Kalibrierung zum Ausgleich einer potentiellen Widerstandsdrift möglich, ohne dass eine aufwändige rückführbare Kalibrierung notwendig ist.

[0040] Der Verstärker **2** umfasst dazu eine Spannungsquelle **34** zum Abgeben einer Kalibrierspannung, die über den Schalter **32** direkt auf ein Spannungsmessgerät **44** sowie über den Normalwiderstand **36** auf den Eingang des ersten Operationsverstärkers **8** geschaltet werden kann. Damit wird ein mit hoher Genauigkeit bekannter Kalibrierstrom in den Eingang des Stromverstärkers eingespeist.

[0041] Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wird als Normalwiderstand **36** ein 100 M Ω Metallfolienwiderstand verwendet, der wiederum als Serienschaltung von vielen einzelnen Widerständen ausgeführt sein kann. Geeignet ist hier beispielsweise die Type VHA 518 der Vishay Precision Group. So mitteln sich Ungenauigkeiten heraus und es entsteht ein langzeitstabiler Normalwiderstand. Durch Vergleich der Kalibrierspannung mit dem Ausgangssignal des Stromverstärkers, das heißt mit Hilfe der am Spannungs-

messgerät **44** gemessenen Spannung, kann der Verstärker **2** kalibriert werden.

[0042] Beispielsweise kann zur internen Kalibrierung eine Spannung von $\pm 0,48$ V an den Normalwiderstand **36** angelegt und so ein Kalibrierstrom von $\pm 4,8$ nA erzeugt werden. Aus der Abweichung zwischen Kalibrierspannung und Ausgangsspannung kann bei angenommener Konstanz des Normalwiderstands **36** die Drift der gesamten Messanordnung (Widerstände plus Operationsverstärker-Einflüsse) bestimmt werden. In der beschriebenen Anordnung dominiert bei der internen Kalibrierung das Nyquist-Rauschen des Normalwiderstands **36**, welches mit 13 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ungefähr eine Größenordnung über dem des Rauschen Stromverstärkers in Form des ersten Operationsverstärkers **2** liegt. Durch den relativ hohen Kalibrierstrom von $\pm 4,8$ nA ergibt sich eine akzeptable Messzeit für die interne Kalibrierung.

[0043] In Fig. 5 ist eine Möglichkeit zur rückführbaren Kalibrierung des Verstärkers mit Hilfe eines Kryostromkomparators (CCC) **46** und eines auf den Quanten-Hall-Effekt zurückgeführten Normalwiderstands **42** dargestellt. Die eine Seite der Schaltung besteht aus der Primärstromquelle **38**, einer Dämpfung **48** und einer Wicklung des CCC **46**. Auf der anderen Seite befinden sich die andere Wicklung des CCC, eine Sekundärstromquelle **40** sowie der auf den Quanten-Hall-Effekt rückgeführte Normalwiderstand **42** oder der Quanten-Hall-Widerstand von 12,9 Kiloohm direkt.

[0044] Mittels dieser Anordnung ist eine hochpräzise Kalibrierung des Verstärkers **2** möglich. Auch der Normalwiderstand **36** kann unmittelbar nach der externen Kalibrierung mittels des Kryostromkomparators **46** kalibriert werden, so dass über einen längeren Zeitraum auch ohne externe Kalibrierung eine hohe Genauigkeit aufrecht erhalten werden kann.

Bezugszeichenliste

2	Verstärker
4	Stromeingang
6	Schalter
7	invertierender Eingang
8	erster Operationsverstärker
9	Gegenkopplungswiderstand
10	Zwischen-Widerstand
11	Widerstandskette
12	Widerstandspaar
14	Gegenkopplungswiderstandselement
15	Ausgang
16	Zwischen-Widerstandselement
17	invertierender Eingang
18	zweiter Operationsverstärker
20	Metallfolienwiderstand
22	Spannungsausgang
24	Widerstand

25	Kapazität
26	Widerstand
28	Widerstand
30	Frässhneide
32	Schalter
34	Spannungsquelle
36	Normalwiderstand
38	Primärstromquelle
40	Sekundärstromquelle
42	Normalwiderstand
44	Spannungsmessgerät
46	CCC
48	Dämpfung

Patentansprüche

1. Verstärker zum Verstärken eines elektrischen Stroms von unter 1000 Pikoampere mit:

- (a) einem Stromeingang (4),
- (b) einem Spannungsausgang (22) und
- (c) zumindest einem ersten Operationsverstärker (8), der
 - mit dem Stromeingang (4) elektrisch verbunden ist und
 - als Stromverstärker geschaltet ist,
- (d) einem hochohmigen Gegenkopplungswiderstand (9), der zwischen einen invertierenden Eingang (7) und einen Ausgang (15) des ersten Operationsverstärkers (8) geschaltet ist,
- (e) einem zweiten Operationsverstärker (18), der so hinter den ersten Operationsverstärker geschaltet ist, dass er einen Strom vom ersten Operationsverstärker (8) in eine Spannung wandelt, und
- (f) einem Zwischen-Widerstand (10), der zwischen den ersten Operationsverstärker (8) und den zweiten Operationsverstärker (18) geschaltet ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- (g) der Gegenkopplungswiderstand (9) und der Zwischen-Widerstand (10) so ausgebildet sind, dass sich ein Widerstandsverhältnis (Q) von elektrischem Widerstand (R_9) des Gegenkopplungswiderstands (9) zu elektrischem Widerstand (R_{10}) des Zwischen-Widerstands (10) bei einer Temperaturänderung von 0, 1 K um höchstens das 10^{-6} -fache ändert.

2. Verstärker nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- der erste hochohmige Gegenkopplungswiderstand (9) eine Mehrzahl an Gegenkopplungswiderstandselementen (14) aufweist und
- der Zwischen-Widerstand (10) eine Mehrzahl an Zwischen-Widerstandselementen (16) aufweist,
- wobei je ein Gegenkopplungswiderstandselement (14) und ein Zwischen-Widerstandselement ein Widerstandspaar (12) bilden, wobei alle Widerstandspaare (12) das gleiche Widerstandsverhältnis ($Q_{12}(n)$) haben.

3. Verstärker nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- die Gegenkopplungswiderstandselemente (14) alle den gleichen elektrischen Widerstand (R_{14}) haben und/oder
- die Zwischen-Widerstandselemente (16) alle den gleichen elektrischen Widerstand (R_{16}) haben.

4. Verstärker nach einem der Ansprüche 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Gegenkopplungswiderstandselemente (14) und die Zwischen-Widerstandselemente (16) Dünnschichtwiderstände sind.

5. Verstärker nach einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen Normalwiderstand (36) und eine Spannungsquelle (34), die so verschaltet sind, dass ein mit hoher Genauigkeit bekannter Strom zur Kalibrierung des Verstärkers erzeugt wird.

6. Verstärker nach einem der vorstehenden Ansprüche 2 bis 5, gekennzeichnet durch zumindest 100 identisch dimensionierte Widerstandspaare (12).

7. Verstärker nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Gegenkopplungswiderstandselemente (14) und die Zwischen-Widerstandselemente (16) auf einer Leiterplatte jeweils mäanderförmig und parallel zueinander angeordnet sind, wobei zwischen den Mäanderbahnen Ausnehmungen (30) in der Leiterplatte angebracht sind.

8. Verstärker nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Flächenverhältnis zwischen einer Fläche eines Gegenkopplungswiderstandselements und eines Zwischen-Widerstandselements einen Wert von 1:1 bis 1:10 aufweist.

9. Verwendung eines Verstärkers nach einem der vorstehenden Ansprüche zum Messen eines elektrischen Stroms von unter 1000 Pikoampere.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

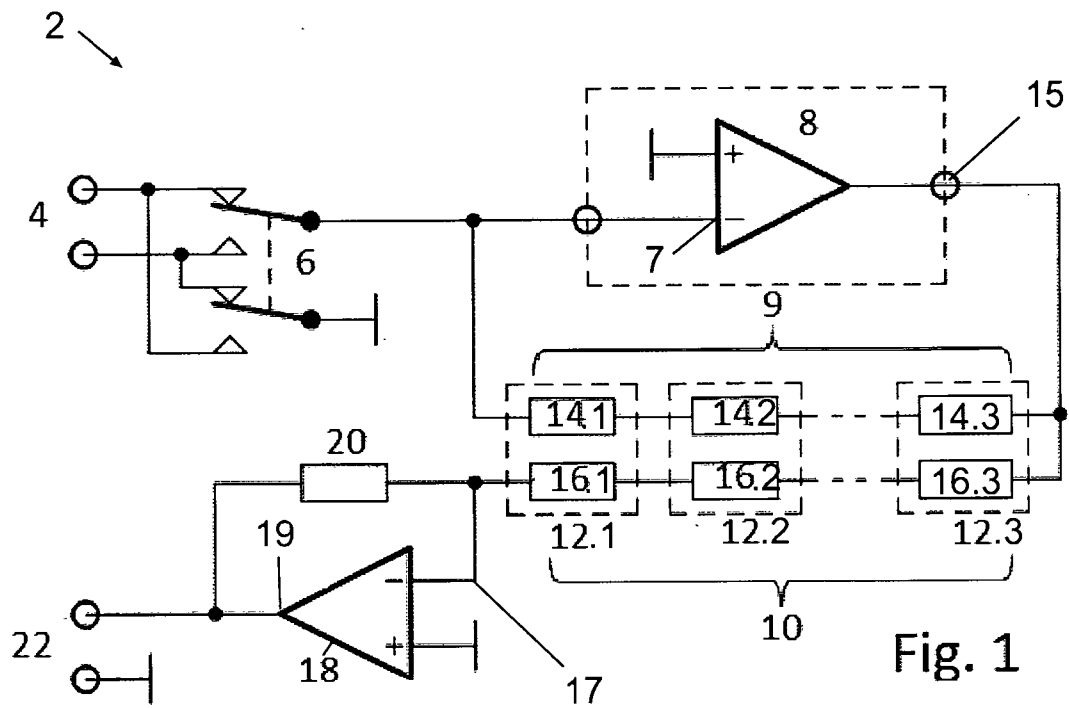


Fig. 1

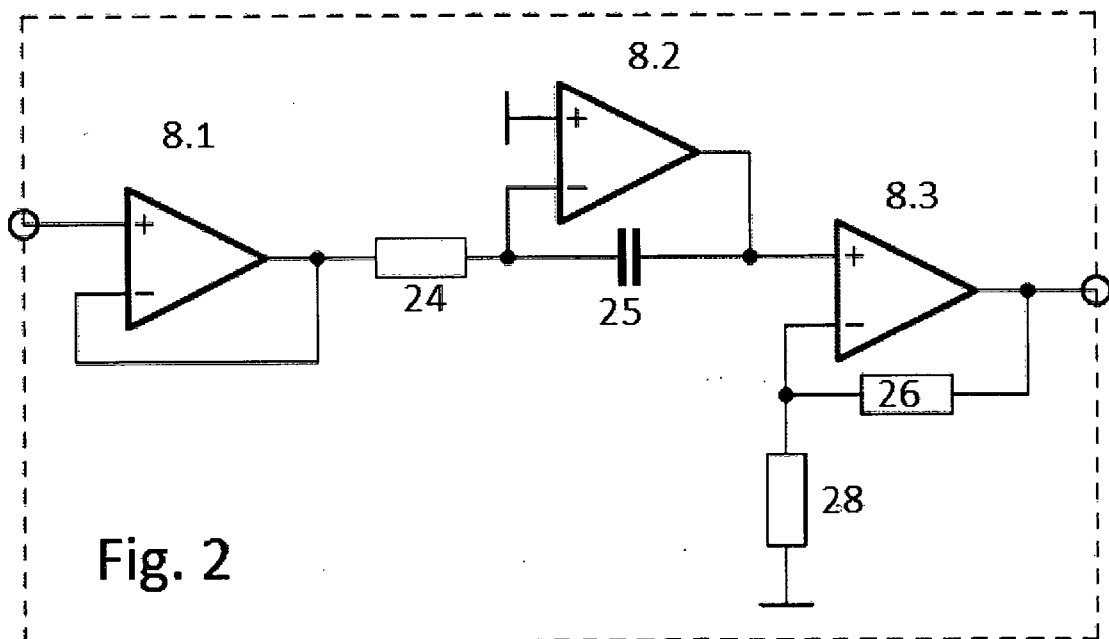


Fig. 2

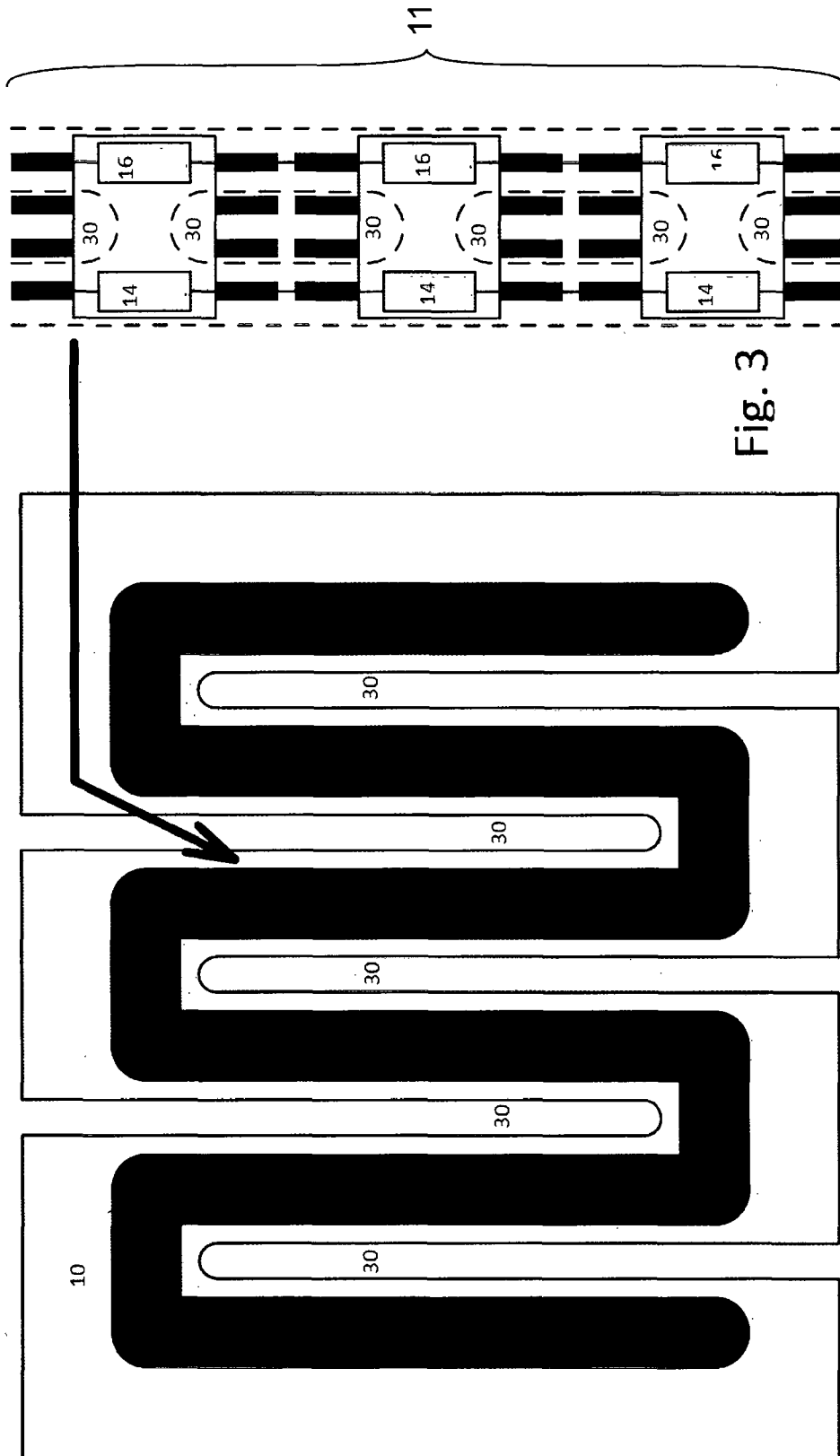


Fig. 3

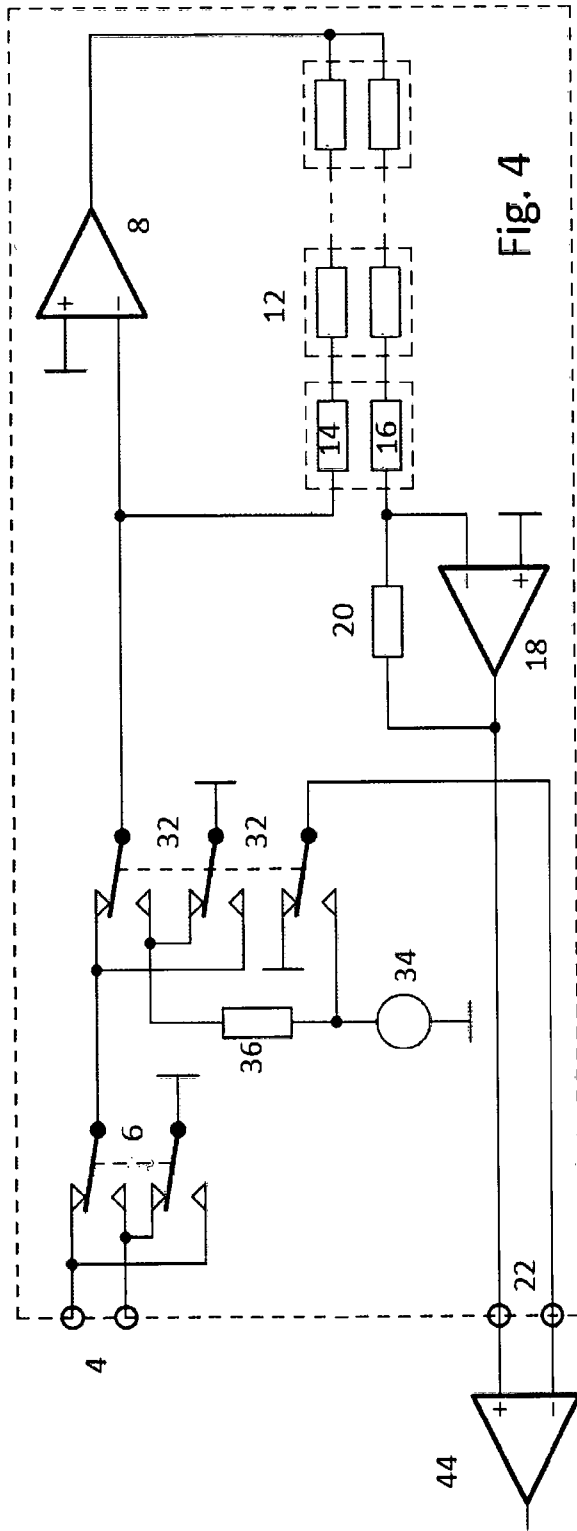


Fig. 4

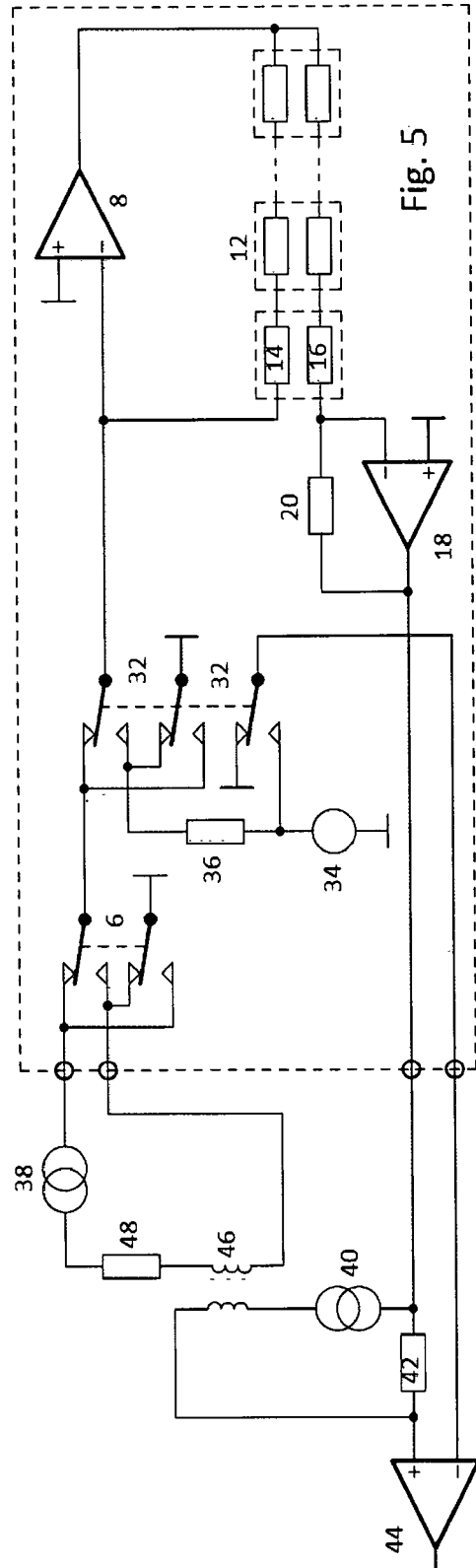


Fig. 5