



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 60 2004 011 995 T2 2009.04.09**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 706 751 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **60 2004 011 995.4**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/IB2004/052857**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **04 806 590.8**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2005/064356**

(86) PCT-Anmeldetag: **20.12.2004**

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: **14.07.2005**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **04.10.2006**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **20.02.2008**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **09.04.2009**

(51) Int Cl.⁸: **G01R 31/30 (2006.01)**

G01R 33/09 (2006.01)

G01R 15/20 (2006.01)

G11C 11/15 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

03104937 23.12.2003 EP

04105805 16.11.2004 EP

(73) Patentinhaber:

NXP B.V., Eindhoven, NL

(74) Vertreter:

**Richter, Werdermann, Gerbaulet & Hofmann,
20354 Hamburg**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,
GR, HU, IE, IS, IT, LI, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO,
SE, SI, SK, TR**

(72) Erfinder:

**DE WILDE, Johannes, NL-5656 AA Eindhoven, NL;
PINEDA DE GYZEZ, Jose D., NL-5656 AA
Eindhoven, NL; DE JONG, Franciscus G., NL-5656
AA Eindhoven, NL; HUISKEN, Josephus A.,
NL-5656 AA Eindhoven, NL; BOEVE, Hans M.,
NL-5656 AA Eindhoven, NL; PHAN LE, Kim,
NL-5656 AA Eindhoven, NL**

(54) Bezeichnung: **HOCHEMPFLINDLICHER MAGNETISCHER EINGEBAUTER STROMSENSOR**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Diese Erfindung betrifft eine Halbleitervorrichtung und ein Verfahren zum Herstellen einer derartigen Vorrichtung.

[0002] Es gibt verschiedene Typen bekannter BICS (eingebauter Stromsensoren). Einige werden in der Patentschrift US 5,963,038 beschrieben, welche das Detektieren von Fehlern in integrierten Schaltkreisen durch Messung des Stroms durch einen Leiter in dem integrierten Schaltkreis mittels eines Sensors zeigt, welcher in der Umgebung des Leiters angeordnet ist. Der Sensor kann auf verschiedenen Wegen aufgebaut sein, um so das Feld zu messen, welches von dem Strom durch den Leiter erzeugt wird. Offenbarte Beispiele umfassen einen Hall-Sensor, einen MR-(Magnetoresistiv)-Sensor und einen GMR-(Riesenmagnetoresistiv)-Sensor. Dies kann ein Prüfen von Leitern und ihren Verbindungen, auf welche nicht leicht durch externe Prüfausrüstung zugegriffen werden kann, oder ein Detektieren von Fehlern in einem individuellen Weg von parallelen Wegen ermöglichen, welche eine Prüfung des spezifischen Widerstands auch bestehen, wenn nur ein Weg leitet.

[0003] Ein MR-Sensor weist einen Widerstand auf, welcher von einem externen Magnetfeld in der Ebene des Sensors abhängig ist. Es existieren verschiedene Typen von MR-Sensoren. Sensoren auf der Grundlage eines anisotropen Magnetowiderstands (AMR) wurden für mehrere Jahre in magnetischen Aufzeichnungsköpfen verwendet. AMR-Sensoren weisen eine Schicht eines anisotropen, magnetischen Materials auf, und der Widerstand dieser Schicht wird von einem externen Magnetfeld beeinflusst, welches die Veränderung des Messstroms bewirkt, welcher in der Schicht fließt. Ein GMR-(Riesenmagnetoresistiv-, Giant MagnetoResistive)-Sensor weist eine Schicht des magnetischen Materials in einer festen Richtung (festgelegte Schicht) und eine Schicht des magnetischen Materials auf, dessen Magnetisierungsrichtung von einem externen Magnetfeld beeinflusst werden kann (freie Schicht), welche die Veränderung des gemessenen Widerstands bewirkt. In Abhängigkeit von dem Typ und der Konstruktion ist ein MR-Sensor in einer Richtung empfindlicher und in einer anderen Richtung in der Ebene des Sensors weniger empfindlich. Der MR-Sensor, welcher in dem oben stehend beschriebenen Patent gezeigt wird, wird in [Fig. 1](#) illustriert. Er ist aufgebaut, um die Wirkung des Stroms durch den Leiter auf den Widerstand des Sensors zu maximieren. [Fig. 1](#) zeigt einen MR-(Magnetoresistiv)-Sensor **502**, welcher nahe eines Leiters **104** in einer Schicht des integrierten Schaltkreises oberhalb oder unterhalb der Schicht angeordnet ist, in welcher der Leiter verwickelt ist. Der MR-Sensor **502** umfasst Anschlussbereiche **504** und **506**, an welchen durchkontaktierte Löcher **508** und **510** zum Messen des tatsächlichen Wi-

derstands des Sensors **502** angeschlossen sind.

[0004] Der Strom durch den Leiter **104** bewirkt ein kreisförmiges Magnetfeld um den Leiter **104** herum entlang der Ebene des Sensors **502** und senkrecht zu dem Leiter **104** in der Ebene des Sensors **502**. Der MR-Sensor **502** ist in dieser Richtung empfindlich, so dass sein Widerstand entlang der Ebene des Sensors **502**, parallel zu der Leiterebene gemessen wird, um die Stärke des Magnetfelds zu messen, welches von einem Gleichstrom durch den Leiter **104** erzeugt wird. Es kann ein herkömmlicher AMR-Sensor oder ein GMR-(Riesenmagnetoresistiv)-Sensor verwendet werden.

[0005] [Fig. 2](#) zeigt eine alternative Anordnung des MR-Sensors in dem integrierten Schaltkreis, welche aus dem oben stehend beschriebenen Patent bekannt ist. Ein MR-Sensor **602** wird nahe der Bondinsel **106** angeordnet, an welche der Bonddraht **108** angeschlossen ist. Der MR-Sensor **602** weist Anschlussbereiche **604** und **606** zum Verbinden des Sensors **602** mit jeweiligen durchkontaktierten Löchern **608** und **610** auf. Die typische Befestigung des Bonddrahts **108** an die Bondinsel **106** ist derartig, dass der Bonddraht **108** nahe der Bondinsel **106** zu einem bestimmten Grad senkrecht zu der Oberfläche der Bondinsel **106** ist. Ein Strom durch den Bonddraht **108** bewirkt dann ein Magnetfeld **612** in der Ebene der Bondinsel **106** und des MR-Sensors **602** und bewirkt folglich eine Veränderung des Widerstands des MR-Sensors **602**. Ein zweiter MR-Sensor **614** kann an einer anderen Seite der Bondinsel angeordnet werden und mit dem MR-Sensor **602** kombiniert werden, um eine Anordnung zu erhalten, welche für das Magnetfeld **612** empfindlicher ist als ein einzelner MR-Sensor. In [Fig. 2](#) sind die MR-Sensoren senkrecht zu dem Magnetfeld **612** angeordnet. Sie können in verschiedenen Winkeln zu dem Magnetfeld angeordnet werden, je nachdem welche Position empfindlicher ist. In jedem Fall wird der Widerstand der Sensorschicht noch entlang der Ebene der Schicht gemessen.

[0006] An einer Anschlussschicht der Schaltung sind die durchkontaktierten Löcher, z. B. **508** bis **510** und **608** bis **610**, mit Anschlussführungen verbunden, welche die jeweiligen MR-Sensoren **502**, **602** mit einem internen Detektionsschaltkreis oder mit externen Messpunkten verbinden. Der Widerstand des MR-Sensors **502**, **602** kann dann innerhalb des integrierten Schaltkreises mit dem Detektionsschaltkreis oder außerhalb des integrierten Schaltkreises mit einer geeigneten Messanordnung gemessen werden.

[0007] Derartige Sensoren sind nützlich zum Messen hoher Ströme, jedoch nicht ausreichend empfindlich für Anwendungen, wie beispielsweise eine Ruhestrom-(Quiescent Current, IDDQ)-Prüfung. Eine IDDQ-Prüfung hat eine sehr gute Abdeckung der

physikalischen Defekte, wie beispielsweise von Gate-Oxid-Kurzschlüssen, von Floating Gates und von Überbrückungsfehlern, gezeigt, welche von klassischen Fehlermodellen nicht sehr gut abgebildet werden oder durch herkömmliche Logikprüfungen nicht nachweisbar sind. Der Bedarf an hoher Qualität und Kosteneffektivität hat zu einer weit verbreiteten Verwendung der IDDQ-Prüfung als eine Zusatzprüfung zu Spannungsprüfungen geführt. Wenn sie mit anderen Prüfverfahren kombiniert wird, weist sie das Potenzial zur Eliminierung der Notwendigkeit eines Voralterungstests auf. Jedoch steigen die MOS-FET-Leckmengenströme mit jedem Technology Node schnell an, wobei sich die Differenz zwischen den IDDQ-Pegeln eines fehlerhaften und eines fehlerfreien Schaltkreises verkleinert.

[0008] US 6,300,617 B1 offenbart einen Strombestimmer mit einem Ausgang, an welchem Repräsentationen von Eingangsströmen bereitgestellt werden. Der Strombestimmer umfasst einen Eingangsleiter für den Eingangsstrom und einen Stromsensor, welcher auf einem Substrat getragen wird und von dem Leiter elektrisch isoliert ist, wobei der Sensor jedoch in den Magnetfeldern angeordnet ist, welche in der Nähe des Eingangsleiters aufgrund beliebiger Eingangsströme entstehen. Der Sensor erstreckt sich entlang des Substrats in einer Richtung in einem Winkel zur Längsausdehnung des Eingangsleiters und wird aus mindestens einem Paar ferromagnetischer Dünnfilmschichten gebildet, welche durch eine elektrisch leitfähige, nicht magnetische Schicht getrennt werden, wobei eine dieser beiden ferromagnetischen Dünnfilmschichten eine Magnetisierung aufweist, welche im Wesentlichen in einer ausgewählten Richtung unterhalten wird, trotz der Magnetfelder, welche durch die Eingangsströme entstehen, welche Umkehrungen der Richtung der Magnetisierung der verbleibenden dieser beiden ferromagnetischen Dünnfilmschichten bewirken. Der Sensor bildet einen Riesenmagnetoresistivsensor (man siehe beispielsweise D1, Spalte 11, Zeile 31 bis Spalte 13, Zeile 37). Dieser erste Stromsensor wird von dem Eingangsleiter zumindest teilweise durch ein elektrisch isolierendes Polymermaterial beabstandet, und der Eingangsleiter kann auf einer mechanisch steifen Basis bereitgestellt werden, welche auf einem derartigen Material getragen wird, und mit einem elektrischen Feldunterbrecher bereitgestellt werden, welcher ein derartiges Material zwischen dem ersten Stromsensor und dem Eingangsleiter unterstützt. Der Sensor kann mit einem elektronischen Schaltkomplex elektrisch verbunden sein, welcher in dem Substrat als ein monolithisch integrierter Schaltkreis ausgebildet ist, welcher eine Referenz gemeinsam benutzt, und zwei derartige monolithisch integrierte Chips in einem Gehäuse können eine doppelte Informationssignalübertragung bereitstellen.

[0009] Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfin-

dung, einen Sensor bereitzustellen, welcher empfindlich genug ist, um einen kleinen Strom, wie beispielsweise IDDQ-Ströme, zum Prüfen auf dem Chip zu messen. Die Erfindung wird durch die selbständigen Ansprüche definiert. Die abhängigen Ansprüche definieren vorteilhafte Ausführungsformen.

[0010] Bei einem ersten Gesichtspunkt stellt die vorliegende Erfindung eine Halbleitervorrichtung mit einem leitfähigen Element und einem Stromsensor bereit. Der Stromsensor ist eine magnetische Strommessvorrichtung zum Messen eines Gleichstroms, eines variierenden Stroms oder eines Wechselstroms, welcher durch das leitfähige Element fließt. Die Strommessvorrichtung ist in der Halbleitervorrichtung integriert und ist von dem leitfähigen Element galvanisch isoliert. Ein Vorteil ist eine größere Empfindlichkeit des Sensors im Vergleich zu Sensoren nach dem Stand der Technik: der Sensor kann zum Messen von Strom mit einer μA -Auflösung geeignet sein. Die größere Empfindlichkeit ermöglicht eine geringere Signalnachbearbeitung und benötigt weniger elektronischen Schaltkomplex, was für Anwendungen, wie beispielsweise für Mobilfunkvorrichtungen, wichtig ist. Bemerkenswerterweise kann im Prinzip eine ausreichende Empfindlichkeit für IDD-Messungen, wie beispielsweise für einen IDD-Ruhestrom (IDDQ) oder für einen IDD-Einschwingstrom (IDDT), sogar für CMOS-Prozesse der nächsten Generation erhalten werden, welche strengere IDD-Prüfungsanforderungen aufweisen. IDDQ ist der Ruhestrom, welcher von Vdd nach Vss (IDD-Strom) in einem CMOS-Schaltkomplex in einem Ruhezustand fließt. IDDT ist der IDD-Einschwingstrom während digitaler Übergänge. Ein Messen der IDDQ- und IDDT-Ströme gestattet, Fehler innerhalb des CMOS-Schaltkomplexes zu detektieren.

[0011] Die Strommessvorrichtung kann mindestens eine Magnetowiderstandsvorrichtung, wie beispielsweise eine Magnetic-Tunnel-Junction-(MTJ)-Vorrichtung, umfassen, welche den Tunnel-Magnetowiderstands-(TMR)-Effekt zeigt. Bei dieser Ausführungsform kann der Sensor eine einfache Integration mit CMOS-Prozessen der nächsten Generation, wie beispielsweise der MRAM-Technik, bereitstellen. Sie kann kompakter sein und verbraucht weniger Strom als Sensoren nach dem Stand der Technik.

[0012] Die Magnetic-Tunnel-Junction (MTJ), welche gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung als ein Messelement verwendet werden kann, wurde zuvor für Speicheranwendungen entwickelt, und die Erfinder haben erkannt, dass sie trotz der Tatsache, dass Speicherzellen und Stromsensoren verschiedene Eigenschaften aufweisen müssen, für eine Verwendung als ein Sensor angepasst werden kann. In einer Speicherzelle sollte eine Magnetowiderstandsschleife (MR-Schleife) einer freien

Schicht ein Quadrat mit einer relativ großen Koerzitivität sein (in der Größenordnung von einigen zehn Oe) und zwei distinkte Restmagnetisierungszustände aufweisen. Ferner muss die Mitte der Schleife bei einem Feld von null liegen. Im Gegensatz dazu muss ein Stromsensor auf der einen Seite eine so große Suszeptibilität für ein Magnetfeld wie möglich aufweisen (für eine hohe Empfindlichkeit) und muss auf der anderen Seite eine kleine oder gar keine Hysterese und eine lineare Kennlinie innerhalb des Messbereichs aufweisen. Die Strommessvorrichtung kann einen MTJ-Stapel mit einer MRAM-Vorrichtung gemeinsam benutzen, wodurch der MTJ-Stapel von dem herkömmlichen Typ oder von dem Umschalttyp sein kann. Dies weist den Vorteil auf, dass Stromsensoren und MRAM-Elemente in einem Durchgang angefertigt werden können.

[0013] Die Strommessvorrichtung kann so angeordnet werden, dass sie eine Beziehung zwischen Widerstand und Magnetfeld aufweist, welche im Wesentlichen keine Hysterese zeigt.

[0014] Die Strommessvorrichtung kann eine freie Magnetschicht aufweisen, welche eine leichte Achse aufweist, welche in einem Winkel zwischen 70° und 110° orientiert ist und vorzugsweise im Wesentlichen senkrecht zu einem Feld liegt, welches gemessen wird, um so die Hysterese zu minimieren. Die Strommessvorrichtung kann eine leichte Achse aufweisen, wobei die leichte Achse der freien Schicht durch eine Formverlängerung bewirkt wird.

[0015] Die Strommessvorrichtung kann eine festgelegte Magnetschicht mit einer Magnetisierungsrichtung und eine freie Magnetschicht mit einer leichten Achse aufweisen, wobei die Magnetisierungsrichtung der festgelegten Magnetschicht in einem Winkel zu der leichten Achse der freien Magnetschicht von vorzugsweise zwischen 0° und 180° , noch bevorzugter von zwischen 45° und 135° und ganz besonders bevorzugt im Wesentlichen senkrecht zu der einfachen Achse der freien Magnetschicht orientiert ist, um so die Empfindlichkeit des Signals zu maximieren, welches gemessen werden soll. Um die Hysterese zu unterdrücken, weist die vorliegende Erfindung Abweichungen von diesem Winkel von 90° auf.

[0016] Die Strommessvorrichtung kann einem zusätzlichen unmittelbaren oder konstanten Magnetfeld ausgesetzt werden, welches von z. B. einem zweiten Strom in der Umgebung der Vorrichtung erzeugt wird, um entweder die Hysterese weiter zu unterdrücken, wenn das zusätzliche Feld im Wesentlichen senkrecht zu dem Feld angelegt wird, welches gemessen wird, oder um den Messbereich zu verschieben, wenn das zusätzliche Feld im Wesentlichen parallel zu dem Feld angelegt wird, welches gemessen wird.

[0017] Ersatzweise kann die Strommessvorrichtung

einem zusätzlichen Wechselfeld ausgesetzt werden, welches von dem zweiten Strom erzeugt wird. Das zusätzliche Wechselfeld wird verwendet, um das Feld zu modulieren, welches gemessen werden soll, wobei folglich das Sensorsignal moduliert wird. Das Signal-Rausch-Verhältnis kann dann durch Verwendung von Signalverarbeitungsverfahren verbessert werden.

[0018] Eine Halbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung kann benachbart zu einer ersten Seite der Strommessvorrichtung einen ersten Leiter zum Führen eines Stroms, welcher gemessen werden soll, und benachbart zu einer zweiten Seite der Strommessvorrichtung einen zweiten Leiter zum Leiten eines Stroms umfassen, wobei sich der erste Leiter und der zweite Leiter kreuzen aber nicht elektrisch verbunden sind. Die freie Magnetschicht der Strommessvorrichtung weist eine leichte Achse auf, und der erste Leiter und der zweite Leiter können jeweils einen Winkel von im Wesentlichen zwischen 30° und 90° hinsichtlich der leichten Achse der Strommessvorrichtung aufweisen.

[0019] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann eine Halbleitervorrichtung weiterhin eine Rückkopplungsschaltung zum Messen von MR-Veränderungen auf der Strommessvorrichtung und zum Steuern von Strom in dem zweiten Leiter auf eine derartige Weise umfassen, dass keine MR-Veränderung auf der Strommessvorrichtung beobachtet wird. Die Stromrückkopplungsschaltung kann Mittel zum Erzeugen eines Rückkopplungssignals aufweisen, welches den Strom bezeichnet, welcher gemessen werden soll und welcher durch den ersten Leiter geführt wird.

[0020] Mindestens der erste Leiter und/oder der zweite Leiter kann mindestens eine vertikale Leitungskomponente und mindestens eine horizontale Leitungskomponente umfassen, wobei es einen rechten Winkel zwischen der vertikalen Leitungskomponente und der horizontalen Leitungskomponente gibt, welche folglich eine Leiterstruktur bilden, welche mindestens einen L-förmigen Teil aufweist, dessen rechter Winkel zu der Strommessvorrichtung benachbart angeordnet ist. Dies weist den Vorteil auf, mit einem gleichen Strom stärkere Felder an dem Sensorort zu erzeugen.

[0021] Eine Halbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung kann weiterhin einen Flussverdichter umfassen, um das Magnetfeld an dem Ort der Strommessvorrichtung zu erhöhen. Der Flussverdichter kann einen Dummy-MTJ-Stapel umfassen, welcher um mindestens eine vertikale Leitungskomponente herum gemustert ist. In diesem Fall kann der Flussverdichter in einem Schritt mit den MRAM-Elementen und dem Sensorelement hergestellt werden. Der Flussverdichter kann ringförmig sein und kann

eine Lücke zwischen den Polen umfassen, wobei die Strommessvorrichtung in der Lücke angeordnet ist.

[0022] Die Halbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung kann eine Sensorvorrichtung umfassen, welche mit einer CMOS- oder MOS-Verarbeitung verträglich ist.

[0023] Die Halbleitervorrichtung kann ein integrierter Schaltkreis sein. Die vorliegende Erfindung umfasst auch Software-Produkte, welche, wenn sie auf einer Verarbeitungsvorrichtung ausgeführt werden, Anwendungen unter Verwendung von Strömen implementieren, welche gemäß der vorliegenden Erfindung gemessen werden.

[0024] Zusätzliche Merkmale, welche abhängige Ansprüche bilden, umfassen, dass das Sensorelement planar ist und der Tunnelstrom senkrecht zu der Ebene des planaren Elements ausgerichtet ist. Ein anderes derartiges Merkmal ist, dass das Element angeordnet ist, um eine Beziehung zwischen Widerstand und Feld aufzuweisen, welche im Wesentlichen keine Hysterese zeigt. Ein anderes derartiges Merkmal ist, dass das Sensorelement eine freie Magnetschicht aufweist, welche eine leichte Achse aufweist, welche in einem Winkel vorzugsweise zwischen 70° und 110° und bevorzugter im Wesentlichen senkrecht zu dem Feld orientiert ist, welches gemessen werden soll. Dieser Winkel sollte vorzugsweise nahe bei 90° liegen, um in der Lage zu sein, das größte (absolute) Signal und die geringste Hysterese aufzuweisen. Andernfalls wird nur die Komponente entlang der 90° -Richtung gemessen. Dies erklärt, warum zusätzliche Modulations- oder Vorspannungsschemata in der senkrechten Richtung gestattet sind. Ein anderes derartiges Merkmal ist, dass die Übergangsstelle eine festgelegte Magnetschicht mit einer Magnetisierung umfasst, welche in einem Winkel von vorzugsweise zwischen 45° und 135° und bevorzugter im Wesentlichen senkrecht zu der leichten Achse der freien Magnetschicht orientiert ist. Ein anderes derartiges Merkmal ist, dass der Detektionsschaltkomplex einen Schaltkomplex zum Anlegen einer Festspannung über die Übergangsstelle des Sensorelements und zum Zuführen des Tunnelstroms an eine Last sowie einen Verstärker zum Verstärken der Spannung über der Last hinweg umfasst. Ein anderes derartiges Merkmal ist, dass der Detektionsschaltkomplex einen Schaltkomplex zum aktiven Anklemmen der Spannung über die Übergangsstelle hinweg umfasst. Ersatzweise kann der Detektionsschaltkomplex in einer Strombetriebsart arbeiten, bei welcher ein konstanter Strom, welcher von einer Stromquelle geliefert wird, durch die Übergangsstelle fließt und die Veränderung des Spannungsabfalls an der Übergangsstelle die Angabe seiner Widerstandsänderung ist und ein Verstärker verwendet wird, um diese Spannung zu verstärken. Natürlich kann der Ausgang alles von einem logischen Signal, welches

angibt, ob ein Feld detektiert wurde oder nicht, bis zu einem analogen oder digitalen Signal sein, welches eine Messung auf einer gegebenen Genauigkeitsebene angibt. Eine geeignete Nachverarbeitung des detektierten Ausgangs kann ausgeführt werden, um beispielsweise der Genauigkeit oder der Rauschfestigkeit der Anwendung zu entsprechen.

[0025] Als ein zusätzliches Merkmal sollte eine Breite des Sensorelements in einer Richtung parallel zu einer Breite des Leiters nicht größer und vorzugsweise kleiner als die Breite des Leiters sein. Dies kann dazu beitragen, ein gleichmäßiges Feld durch den Sensor zu gewährleisten.

[0026] Ein anderer Gesichtspunkt der Erfindung stellt einen Sensor zum Messen eines Magnetfelds bereit, welcher ein magnetoresistives Messelement mit gekreuzter Anisotropie aufweist, d. h. der Winkel zwischen der freien Magnetschicht und der festgelegten Richtung der festgelegten Magnetschicht ist im Wesentlichen 90° , so dass eine Achse der Ausdehnung des Messelements im Wesentlichen orthogonal zu dem gemessenen Magnetfeld ist, d. h. einen Winkel von zwischen 70° und 110° und vorzugsweise von im Wesentlichen 90° zwischen der freien Magnetschicht und dem gemessenen Feld umfasst.

[0027] Ein anderer Gesichtspunkt stellt einen integrierten Schaltkreis mit einem eingebauten Stromsensor bereit, welcher einen magnetoresistiven Stromsensor mit einer Empfindlichkeit von mehr als $100 \mu\text{V}$ pro mA umfasst.

[0028] Ein anderer Gesichtspunkt stellt einen integrierten Schaltkreis mit einem eingebauten Stromsensor bereit, welcher einen magnetoresistiven Stromsensor umfasst, welcher angeordnet ist, um einen Ruhestrom (IDDQ) zu messen.

[0029] Ein anderer Gesichtspunkt stellt entsprechende Verfahren zum Messen eines Magnetfelds oder eines Messstroms bereit.

[0030] Bei einem zweiten Gesichtspunkt stellt die vorliegende Erfindung die Verwendung einer integrierten magnetischen Strommessvorrichtung, welche sich galvanisch nicht im Kontakt mit einem leitfähigen Element befindet, zum Messen von mindestens einem Gleichstrom, einem variierenden Strom oder einem Wechselstrom bereit, welcher durch das leitfähige Element fließt, wobei die Messvorrichtung für eine Messung des Stroms auf dem Chip verwendet wird.

[0031] Der Stromsensor oder die -Sensoren können angeordnet werden, um Ruhestrome (IDDQ) oder Einschwingströme (IDDT) zu messen. Als ein zusätzliches Merkmal kann der integrierte Schaltkreis mehrere Stromsensoren aufweisen, deren Ausgänge in

einem Mechanismus auf der Grundlage einer Messkette verbunden sind, wie beispielsweise einer Grenzmessung (IEEE-Norm 1149.1). Ein Vorteil eines Stromsensors in einer Halbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung ist, dass er eine geringe physikalische Größe aufweist. Weil er klein ist, kann er leicht in einem IC integriert werden. Dieser eingebaute Sensor macht die IDDQ-Messung pro Schaltungsblock innerhalb eines IC oder pro getrennt stromversorgter Schaltung in einer Konstellation von Schaltungen in einem einzelnen Paket, wie bei einem MCM (Multichip-Modul) oder einem MCP (Multichip-Paket), möglich. Es ist auch eine IDDT-Messung pro Block möglich. In der Erwartung weiter wachsender Integrationsstufen in der IC-Domäne ist dies eine wichtige Prüf- und Messfähigkeit.

[0032] Weiterhin kann beim Integrieren weitere Funktionalität für diese Sensoren hin zugefügt werden.

[0033] Als ein zusätzliches Merkmal kann der integrierte Schaltkreis mehrere Stromsensoren aufweisen, deren Ausgänge in einer Messkette verbunden sind. Die Erfindung macht es möglich, mehrere Sensoren zu verwenden, um Ströme zu messen, welche von verschiedenen Blöcken verbraucht werden, um den Teil des Entwurfs zu bestimmen, welcher zu viel oder zu wenig Strom verbraucht. Eine schnellere Fehlereliminierung in dem Anfangsentwurf ist ein ökonomischer Schlüsselvorteil. Zusätzlich kann nun eine Abnutzung des IC während seiner Lebensdauer überwacht werden. Ein Ausschauen nach Veränderungen des Stromverbrauchs während der tatsächlichen Lebensdauer kann unerwartete Ausfälle vermeiden. Unter anderen können Sicherheitsgesichtspunkte für ausfallkritische Anwendungen aus diesen Daten abgeleitet werden.

[0034] Eine andere Fähigkeit ist die Messung des Stroms in separaten Verarbeitungseinheiten oder Kernen. Das Verfahren kann ein Messen von Strom in mindestens einem Verarbeitungsmodul umfassen. Die Funktion dient dem Bestimmen der Einplanung von Aufgaben auf der Grundlage dynamischer Leistungsverteilungsschemata. Die Kerne sind Verarbeitungseinheiten, welche Strom verbrauchen und welche heiß werden können, wenn sie bei ihrer maximalen Kapazität laufen. Auf der Grundlage der Strom-(Leistungs)-Messung pro Verarbeitungseinheit kann eine gleichmäßigere Verarbeitungslast besonders bei Systemen eingeplant werden, welche viele parallele Verarbeitungseinheiten aufweisen. Dies verhindert unnötige Warteschlangen, und es kann auch eine übermäßige Wärmeentwicklung in einem spezifischen Kern verhindert werden. Es können auch Stromsparschemata auf diese Weise gesteuert werden, wobei folglich teure Wärmeübertragungslösungen auf der Endfertigungsebene unterbunden werden.

[0035] Ein neuartiges, nun machbares Verfahren, ist die Steuerung der Taktgeschwindigkeit von mindestens einem Verarbeitungsmodul, um eine kontinuierliche Übereinstimmung mit einer vordefinierten Stromverbrauchsstufe zu erhalten. Dies ergibt eine Fähigkeit von maximalem Leistungsvermögen versus Batterielebensdauer.

[0036] Damit dieses Verfahren sachgerecht arbeitet, müssen die Schwellenpegel zum Vergleichen des Stromverbrauchs von einer Software in Registern eingestellt werden. Diese Software kann eine Dienstroutine sein, welche einem Betriebssystem nahe zugeordnet ist. Der Job-Einplanerteil der Software muss in der Lage sein, auf der Grundlage von Unterbrechungen aus der Detektion oder aus einem regelmäßigen Auslesen (Abfragen) der Werte aus den Registern umzuplanen. Dieser Hardware-gesteuerte Gesichtspunkt ist bei Einplanungs-Software relativ neu, ist aber im Grunde nicht von einer Software-basierten Einplanung verschieden, welche bereits existiert.

[0037] Bei einem dritten Gesichtspunkt stellt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Messen eines Stroms in einem Leiter in einer Halbleitervorrichtung bereit. Das Verfahren umfasst ein Messen eines Gleichstroms, eines variierenden Stroms oder eines Wechselstroms, welcher in dem Leiter fließt, durch Durchführen einer kontaktlosen, magnetischen Strommessung mit einem Sensor, welcher auf dem integrierten Schaltkreis integriert ist.

[0038] Das Verfahren kann ein Messen eines Magnetfelds umfassen, welches durch den Strom verursacht wird.

[0039] Die vorliegende Erfindung stellt auch ein Verfahren bereit, welches die Messung des Stromverbrauchs und die Erzeugung eines Warnsignals umfasst, falls eine vorgegebene Stromverbrauchsschwelle überschritten wird.

[0040] Die vorliegende Erfindung stellt weiterhin ein Verfahren bereit, wobei eine Software-basierte Routine eine Job-Einplanung über mehrere Verarbeitungseinheiten hinweg auf der Grundlage der gemessenen Ströme durchführt, welche entweder eine Unterbrechung oder das Setzen eines Register-Bits auslösen.

[0041] Bei einem weiteren Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Herstellen einer Strommessvorrichtung bereitgestellt, welche einen MTJ-Stapel mit einer MRAM-Vorrichtung gemeinsam benutzt. Der MTJ-Stapel kann vom herkömmlichen Typ (freie Magnetschicht mit einer von null verschiedenen Nettomagnetisierung) oder vom Umschalttyp sein (freie Magnetschicht mit einer Nettomagnetisierung von null). Der hergestellte

MTJ-Stapel umfasst ein elektrisch isolierendes Material, welches ausgelegt ist, eine magnetoresistive Tunnelbarriere zu bilden, einen festgelegten magnetischen Bereich, welcher auf einer Seite des elektrisch isolierenden Materials angeordnet ist, wobei der festgelegte magnetische Bereich einen magnetischen Momentvektor benachbart zum elektrisch isolierenden Material aufweist, und einen freien magnetischen Bereich. Der freie magnetische Bereich kann ein unausgeglichener magnetischer Bereich sein. Ersatzweise kann der freie magnetische Bereich ein beinahe ausgeglichener oder ausgeglichener magnetischer Bereich sein, welcher auf einer gegenüberliegenden Seite des elektrisch isolierenden Materials angeordnet ist, wobei der freie magnetische Bereich einen magnetischen Momentvektor benachbart zu dem isolierenden Material aufweist und in einer Position parallel oder antiparallel zu dem magnetischen Momentvektor des festgelegten magnetischen Bereichs orientiert ist, wobei der freie magnetische Bereich einen künstlichen, antiferromagnetischen (AAF-)Stapel umfasst, welcher ferromagnetische Schichten aufweist, welche antiferromagnetisch gekoppelt sind, wobei N eine ganze Zahl größer oder gleich zwei ist.

[0042] Falls der freie Bereich ein magnetisches Nettomoment aufweist, welches im Wesentlichen null ist, weist ein Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung ein Modifizieren des magnetischen Nettomoments des freien Bereichs auf, um es so von null verschieden zu machen. Dies erhöht die Empfindlichkeit eines Sensors vom Umschalttyp. Ein Modifizieren des magnetischen Nettomoments kann ein Erhöhen oder ein Vermindern des magnetischen Moments von mindestens einer der ferromagnetischen Schichten in den freien magnetischen Bereichen umfassen, z. B. durch ein mindestens teilweises Entfernen oder Zerstören einer der ferromagnetischen Schichten des freien magnetischen Bereichs oder durch lokales Umwandeln der antiferromagnetischen Koppelung in eine ferromagnetische Koppelung.

[0043] Die Merkmale aller abhängigen Ansprüche können miteinander oder mit allen selbständigen Ansprüchen kombiniert werden. Durchschnittsfachleuten werden weitere Vorteile besonders gegenüber einem anderen Stand der Technik offenkundig, welcher den Erfindern nicht bekannt ist. Nun wird unter Bezugnahme auf die angehängten schematischen Zeichnungen beschrieben, wie die vorliegende Erfindung verwirklicht werden kann. Offensichtlich können zahlreiche Variationen und Modifikationen vorgenommen werden, ohne von den Ansprüchen der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Es sollte deshalb deutlich verstanden werden, dass die Form der vorliegenden Erfindung nur beispielhaft ist und nicht vorgesehen ist, den Schutzzumfang der vorliegenden Erfindung einzuschränken.

[0044] Die Merkmale der Erfindung werden unter Bezug auf die begleitenden Zeichnungen besser verstanden, welche bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung illustrieren. Die Zeichnungen:

[0045] [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) zeigen Sensoren nach dem Stand der Technik,

[0046] [Fig. 3](#) zeigt eine MTJ-Speicherzelle nach dem Stand der Technik,

[0047] [Fig. 4](#) ist ein vertikaler Querschnitt einer MRAM-Zelle vom Umschalttyp.

[0048] [Fig. 5](#) illustriert die Reaktion eines ausgeglichenen, künstlichen, antiferromagnetischen Stapels, welcher als eine freie Schicht fungiert, wenn kein bzw. wenn ein externes Feld angelegt wird.

[0049] [Fig. 6A](#) illustriert einen CMOS-Invertierer, und [Fig. 6B](#) illustriert einen IDDQ-Strom für einen fehlerfreien und für einen fehlerhaften Schaltkomplex, wenn sich die Eingangsspannung V_{in} des CMOS-Invertierers der [Fig. 6A](#) vom L-Pegel auf den H-Pegel verändert,

[0050] [Fig. 7](#) zeigt ein Schaubild, welches den gemessenen IDDQ-Strom aufträgt, nachdem eine Anzahl Prüfmuster auf die digitalen Eingaben des Schaltkomplexes angewandt wurden,

[0051] [Fig. 8](#) zeigt eine Schemaansicht eines Sensors gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung,

[0052] [Fig. 9A](#) und [Fig. 9B](#) sowie [Fig. 10A](#) und [Fig. 10B](#) zeigen Magnetowiderstandseigenschaften für eine gegebene Speicherzellenstruktur nach dem Stand der Technik bzw. eine Sensorstruktur gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung,

[0053] [Fig. 11](#) zeigt eine Spannung versus den gemessenen Strom, wie es für einen TMR-Sensor kennzeichnend, ist,

[0054] [Fig. 12](#) zeigt ein Schaubild der Magnetfeldstärke für verschiedene Leiterbreiten, welche mit dem Abstand von dem Leiter variiert,

[0055] [Fig. 13](#) und [Fig. 14](#) zeigen Orientierungen der Schichten einer Speicherzelle nach dem Stand der Technik bzw. einen Sensor gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung,

[0056] [Fig. 15](#) bis [Fig. 18](#) zeigen Schaubilder des berechneten Widerstands eines TMR-Elements gegen die Magnetfeldstärke in verschiedenen Situationen,

[0057] [Fig. 19](#) ist eine perspektivische Ansicht (lin-

ke Seite) und eine Seitenansicht (rechte Seite) einer Schaltungsanordnung, welche eine Strommessvorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst, welche in der Ecke eines L-förmigen Stromleiters angeordnet ist.

[0058] [Fig. 20](#) ist eine perspektivische Ansicht (linke Seite oben), eine Querschnittsdarstellung (rechte Seite oben) und eine Draufsicht (rechte Seite unten) der Ausführungsform in [Fig. 19](#), welche jedoch gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung weiterhin mit einem Flussverdichtermittel versehen ist.

[0059] [Fig. 21](#) ist eine perspektivische Ansicht (linke Seite) und eine Seitenansicht (rechte Seite) einer Schaltungsanordnung, welche eine Strommessvorrichtung gemäß noch einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst, welche in der Mitte eines U-förmigen Stromleiters angeordnet ist.

[0060] [Fig. 22](#) ist eine perspektivische Ansicht (linke Seite oben), eine Seitenansicht (rechte Seite oben) und eine Draufsicht (rechte Seite unten) der Ausführungsform in [Fig. 21](#), welche jedoch gemäß noch einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung weiterhin mit einem Flussverdichtermittel versehen ist.

[0061] [Fig. 23](#) illustriert eine Draufsicht einer Strommessvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung mit sich kreuzenden ersten und zweiten Leiterbahnen.

[0062] [Fig. 24](#) ist ein Blockdiagramm einer Schaltung einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, welche eine Rückkopplungsschaltung umfasst.

[0063] [Fig. 25](#) ist eine perspektivische Ansicht der Strommessvorrichtung der [Fig. 23](#). [Fig. 26](#) ist eine Seitenansicht einer Anordnung eines integrierten Schaltkreises gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Elektroden der Messvorrichtung werden nicht gezeigt, um die Zeichnung zu vereinfachen.

[0064] [Fig. 27](#) ist eine perspektivische Ansicht einer Anordnung eines integrierten Schaltkreises gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0065] [Fig. 28](#) illustriert als Draufsicht (oberer Teil der Zeichnung) und als Querschnittsansicht (unterer Teil der Zeichnung) ein Maskieren von Bereichen eines MTJ-Stapels, welcher keine Sensoren enthält, wobei das Maskieren mittels einer Fotoresistschicht in einem Lithografieschritt durchgeführt wird.

[0066] [Fig. 29](#) illustriert die Entfernung einer Mag-

netschicht des AAF-Stapels mittels Ätzen gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0067] [Fig. 30](#) illustriert eine Zerstörung einer Magnetschicht des AAF-Stapels mittels Ionenimplantation gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0068] [Fig. 31](#) illustriert Hystereseschleifen vor und nach Tempern eines AAF-Stapels, welcher zwei Ni-Fe-Schichten von 4 nm und eine Ru-Zwischenschicht von 0,7 nm umfasst.

[0069] [Fig. 32](#) und [Fig. 33](#) zeigen Ausleseschaltungen für Sensoren gemäß Ausführungsformen der Erfindung,

[0070] [Fig. 34](#) illustriert ein grundlegendes Stromdetektionsschema gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung,

[0071] [Fig. 35](#) illustriert ein chipintegriertes System (SOC), bei welchem die angewandten Kernblöcke alle einen Stromsensor aufweisen, welcher ein Satz verteilter Sensoren pro Kern sein kann, und

[0072] [Fig. 36](#) illustriert ein chipintegriertes System (SOC), bei welchem der Ausgang von den Stromsensoren in den angewandten Kernblöcken mit einem Aufgabeneinplaner verbunden ist.

[0073] In den verschiedenen Figuren bezeichnen die gleichen Bezugszeichen die gleichen oder analoge Elemente.

[0074] Die vorliegende Erfindung wird hinsichtlich bestimmter Ausführungsformen und unter Bezugnahme auf bestimmte Zeichnungen beschrieben, die Erfindung wird dadurch jedoch nicht eingeschränkt, sondern nur von den Ansprüchen. Die beschriebenen Zeichnungen sind nur schematisch und nicht einschränkend. In den Zeichnungen kann die Größe einiger Elemente aus Darstellungsgründen übertrieben und nicht im Maßstab gezeichnet 1 sein. Wo der Begriff „umfassend“ in der vorliegenden Beschreibung und den Ansprüchen verwendet wird, schließt er andere Elemente oder Schritte nicht aus. Wo ein unbestimmter oder ein bestimmter Artikel verwendet wird, wenn auf ein Substantiv im Singular Bezug genommen wird, z. B. „ein“ oder „eine“, „der“, „die“ oder „das“, umfasst dies den Plural dieses Substantivs, außer es wird ausdrücklich anders lautend vermerkt.

[0075] Die MRAM-Entwicklung wird durch eine Einführung in die Beschreibung der Ausführungsformen der Erfindung kurz erklärt. Während der vergangenen Jahre wurde intensiv an magnetischem RAM (MRAM) geforscht. Die Integration magnetischer Materialien mit CMOS-Technik ist weniger problematisch geworden. Eine gewerbliche MRAM-Herstel-

lung wird für 2004 bis 2005 geplant. Ein Überblick über die MRAM-Technik wird von K.-M.H. Lenssen et al in „Expectations of MRAM in comparison.“, Non-Volatile Memory Technology Symposium 2000, (Nov. 15 bis 16, 2000, Arlington VA, USA), präsentiert. Dies zeigt, dass magnetische Direktzugriffsspeicher (MRAM) der ersten Generation auf AMR basierten. Nach 1988 ermöglichte die Entdeckung eines größeren Magnetowiderstandseffekts, welcher Riesenmagnetowiderstand (Giant Magnetoresistance, GMR) genannt wurde, die Realisierung kleinerer Elemente mit einem höheren Widerstand und einem größeren MR-Effekt (5 bis 15%) und deshalb eines größeren Ausgangssignals. Dies ermöglichte im Prinzip MRAMs für allgemeine Anwendungen. Ein Jahrzehnt nach seiner Entdeckung wird der GMR-Effekt bereits bei gewerblichen Produkten wie HDD-Leseköpfen und magnetischen Sensoren angewandt.

[0076] Ein Durchbruch in dem Feld der Magnetic-Tunnel-Junctions um 1995 verbesserte die Aussichten von MRAM sogar weiter, als ein starker Tunnelmagnetowiderstands(TMR)-Effekt bei Raumtemperatur gezeigt wurde. Seitdem wurden TMR-Effekte mit Amplituden von bis zu > 50% gezeigt, doch aufgrund der starken Vorspannungsabhängigkeit liegt die verwendbare Widerstandsänderung bei praktischen Anwendungen gegenwärtig bei ungefähr 35%.

[0077] Ein Beispiel einer Zelle für eine derartige Vorrichtung wird in [Fig. 3](#) gegeben. Diese Struktur und wie sie herzustellen ist ist wohlbekannt und muss hier nicht erneut ausführlich beschrieben werden. Um es zusammenzufassen, ein derartiger TMR-basierter MRAM enthält Zellen, welche Magnetic-Tunnel-Junctions (MTJs) sind. MTJs enthalten im Grunde eine freie Magnetschicht **102**, eine Isolierschicht (Tunnelbarriere) **103**, eine festgelegte Magnetschicht **105** und eine antiferromagnetische Schicht **107**, welche verwendet wird, um die Magnetisierung der festgelegten Schicht **105** in einer festen Richtung „festzulegen“. In dem Beispiel, welches in [Fig. 3](#) gezeigt wird, gibt es eine Schichtstruktur mit, der Reihenfolge nach, einem oberen Kontakt **100**, einer freien Magnetschicht **102**, einer Tunnelbarriere **103**, einer festen Magnetschicht **105**, einer festlegenden Schicht **107** und einem untern Kontakt **110**. Die festgelegte Schicht **105** kann eine künstliche, antiferromagnetische (AAF-)Struktur umfassen. Weiterhin kann dieses Konzept auch in die freie Schicht **102** eingeführt werden, um ihr magnetisches Volumen zu erhöhen, z. B. aus Gründen der thermischen Stabilität, während ein kleines magnetisches Nettomoment erhalten wird, welches für die Formanisotropie und schließlich für die erforderlichen geringen Schaltfelder (oder folglich für den erforderlichen geringen Schreibstrom) verantwortlich ist. Es ist anzumerken, dass die freie Schicht **102** bei einem Magnetfeld von null deutlich ein magnetisches Moment aufweist. Sie wird deshalb oft als künstlicher Ferrimagnet (AFi) be-

zeichnet. Bei einer Verwendung in MRAM-Zellen kann der herkömmliche Schreibmechanismus, wie er Durchschnittsfachleuten bekannt ist und bald hier nachfolgend beschrieben wird, noch für diese komplexere freie Schicht erhalten werden.

[0078] Die MRAM-Zellen speichern binäre Informationen (1/0) in den Richtungen der Magnetisierung der freien Magnetschicht **102**, welche relativ frei sein kann, sich zwischen zwei entgegengesetzten Richtungen zu drehen. Der Widerstand der MTJ ist klein, wenn die Richtung der Magnetisierung der freien Schicht **102** parallel zu derjenigen der festgelegten Schicht **105** ist, und er ist groß, wenn sie antiparallel ist. Zum Auslesen der Information in einer bestimmten Zelle wird ein kleiner Messstrom I_s durch den MTJ-Stapel (vertikal) der ausgewählten Zelle geschickt. Der gemessene Spannungsabfall über dem MTJ-Stapel (proportional zu dem Widerstand) ist die Angabe der Information der Zelle. Die Information in einer Zelle kann bei einer Schreiboperation durch Schicken von Schreibströmen durch Wortleitungen und Bitleitungen verändert werden, welche unten und oben an den Speicherzellen gemustert sind. Die Ströme erzeugen Magnetfelder (ein Feld mit leichter Achse und ein Feld mit schwerer Achse) in der Speicherzelle. Die Felder werden programmiert, so dass sie groß genug sind, um die Magnetisierung der freien Schicht **102** der ausgewählten Zelle in Abhängigkeit von der binären Information, welche in der ausgewählten Zelle gespeichert werden soll, in eine neue Richtung umzuschalten.

[0079] Im Allgemeinen führen sowohl GMR als auch TMR zu einem geringen Widerstand, wenn die Magnetisierungsrichtungen der freien Schicht **102** und der festgelegten Schicht **105** parallel sind, und zu einem hohen Widerstand, wenn die Orientierungen der Magnetisierung antiparallel sind. Bei TMR-Vorrichtungen muss der Messstrom senkrecht zu den Schichtebenen (Strom senkrecht zu Ebene, Current Perpendicular to Plane, CPP) angelegt werden, weil die Elektronen durch die Sperrschicht tunneln müssen. Bei GMR-Vorrichtungen fließt der Messstrom gewöhnlich in der Ebene der Schichten (Strom in Ebene, Current In Plane, CIP). Unterstützt durch die schnell fortschreitende Miniaturisierung erscheint die Möglichkeit von MRAMs auf der Grundlage von CPP-TMR dennoch wahrscheinlicher.

[0080] Kürzlich hat Motorola ein neues MRAM-Konzept eingeführt, welches die Umschalt-(oder Spin-Flop)-MRAM-Zelle genannt wird, wie in US-6545906 beschrieben und wie in [Fig. 4](#) illustriert. Gemäß diesem Konzept wird die einzelne freie Magnetschicht **102** einer herkömmlichen MRAM-Zelle durch eine (beinahe) ausgeglichene, künstliche, antiferromagnetische (AAF) Struktur **220** ersetzt, während der Rest des Stapels im Allgemeinen unverändert bleibt. Hier nachfolgend wird diese AAF-Struktur

der freie AAF-Stapel **220** genannt. Der freie AAF-Stapel **220** besteht aus einer Vielzahl von N ferromagnetischen Schichten, wobei N eine ganze Zahl größer als eins ist, und in dem in [Fig. 4](#) gegebenen Beispiel aus zwei ferromagnetischen Schichten F_1 , F_2 besteht. Alle zwei benachbarten ferromagnetischen Schichten F_1 , F_2 werden durch eine Zwischenschicht **221** getrennt, welche eine dünne, nicht magnetische Schicht, vorzugsweise eine Ru-Schicht ist. Die Dicke der Zwischenschicht **221** wird auf eine derartige Weise eingestellt, dass eine antiferromagnetische Kopplung zwischen den beiden benachbarten ferromagnetischen Schichten F_1 , F_2 vorliegt, welche ihre Magnetisierungen bei einem Magnetfeld von null oder bei einem kleinen Magnetfeld antiparallel macht. Die Dicken der Magnetschichten F_1 , F_2 werden auf eine derartige Weise ausgewählt, dass die Nettomagnetisierung des freien AAF-Stapels **220** im Wesentlichen null beträgt.

[0081] Ein wichtiges Merkmal dieses Konzepts ist, dass dieser freie AAF-Stapel **220** aufgrund der Ausgeglichenheit des freien AAF-Stapels **220** fast kein magnetisches Nettomoment aufweist. Dies liegt daran, dass das magnetische Moment $m_1 = S \cdot t_1 \cdot M_1$ (Produkt der MTJ-Fläche S , der Schichtdicke t_1 und der Sättigungsmagnetisierung M_1 der ferromagnetischen Schicht F_1) der ersten Magnetschicht F_1 und das magnetische Moment m_2 der zweiten Magnetschicht F_2 im Wesentlichen gleich sind, $m_1 = m_2$, und dass sie antiparallel sind und sich folglich gegeneinander aufheben. Bei einem angelegten externen Feld von null sind die Momente in der Richtung der leichten Achse EA des MTJ-Elements ausgerichtet, wie auf der linken Seite der [Fig. 5](#) illustriert. In [Fig. 5](#) repräsentieren die durchgezogenen und unterbrochenen Pfeile in den Elementen die magnetischen Momente der oberen bzw. unteren Magnetschichten F_1 , F_2 des freien AAF-Stapels **220**. Die magnetischen Momente der ferromagnetischen Schichten F_1 , F_2 sind antiferromagnetisch gekoppelt und bilden ein Magnetisierungspaar. Wenn ein Magnetfeld, welches das Spin-Flop-Feld überschreitet, auf den MTJ-Stapel in einer bestimmten Richtung angewandt wird, welche von der Richtung der leichten Achse verschieden ist, „klappen“ die magnetischen Momente um, um ihre Vektorsumme in die Richtung der Richtung des angelegten Felds auszurichten (wie auf der rechten Seite der [Fig. 5](#) illustriert). Der so genannte Spin-Flop-Zustand basiert auf einer feinen Energiebalance zwischen der Zeeman-Energie (externes Feld) und der antiferromagnetischen Koppelungsenergie.

[0082] Der Widerstand des gesamten MTJ-Stapels ist von der jeweiligen Orientierung zwischen der Magnetisierungsrichtung **222** der unteren Magnetschicht F_2 des freien AAF-Stapels **220** und der Magnetisierungsrichtung der festgelegten Schicht **105** abhängig und wird verwendet, um die Speicherzustände zu definieren. Der freie AAF-Stapel **220** kann

nur umgeschaltet werden (zwischen dem ersten und dem zweiten Logikzustand, z. B. 1 nach 0), wenn ein ausreichend hohes Rotationsmagnetfeld angelegt wird. Dieses Rotationsmagnetfeld wird durch Ausenden von zwei sequenziellen Impulsen durch die Wort- und Digitleitungen hergestellt. Diese Impulse werden zeitlich leicht verschoben, aber überlappen sich noch, wie in US-6545906 beschrieben. Die beiden Leitungen sind orthogonal zueinander und bilden vorzugsweise einen Winkel von 45° zu der leichten Achse des MTJ-Stapels. Die Sequenz der beiden Impulse erzeugt ein Rotationsfeld, welches das Magnetisierungspaar des freien AAF-Stapels **220** kontinuierlich im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn von einer alten in eine neue Richtung dreht. Nicht ausgewählte Zellen sind höchstens nur einem der Impulse ausgesetzt; und relaxieren auf die ursprüngliche Position zurück, nachdem der Impuls endet. Mit diesem Schreibprozess werden die nicht ausgewählten Zellen nicht umgeschaltet, weil sie ein Maximum in der Energiebarriere nicht überschritten haben.

[0083] Die Erfinder haben erkannt, dass MTJ-Vorrichtungen sowohl vom herkömmlichen Typ als auch vom Umschalttyp als Magnetfeldsensoren verwendet werden können oder zu einer Verwendung dafür eingerichtet werden können. Diese weisen viele Anwendungen auf, beispielsweise bei kontaktlosen Messungen von Strömen, welche durch ein leitfähiges Element fließen, z. B. Leistungsstrom oder IDD-Strom, wobei sie kontaktlos hinsichtlich des leitfähigen Elements sind. Dies kann in jeder Art von CMOS-Chip oder anderen Chips geschehen. Natürlich können sie in MRAM-Chips implementiert werden. Die gleiche Herstellungstechnik, welche für MRAM-Zellen verwendet wird, kann mit wenigen Veränderungen verwendet werden, um integrierte Stromsensoren gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung zu bauen. Sie sind insbesondere zum Prüfen des Stromanschlusses und zur ID-Dx-Prüfung in MRAM-Chips oder in Chips geeignet, welche eingebetteten MRAM enthalten, da eine Implementierung dieser Sensoren keine zusätzliche Maske und keine zusätzlichen Verfahrensschritte kosten muss.

[0084] Aufgrund der Nettomagnetisierung des freien AAF-Stapels **220** von null, ist eine Speicherzelle vom Umschalttyp unempfindlicher gegenüber einem externen Magnetfeld und folglich robuster. Dieser Vorteil für MRAM wird zu einem Nachteil für Sensoranwendungen. Aufgrund der Unempfindlichkeit gegenüber dem externen Feld ist die Empfindlichkeit der magnetischen Sensoren, welche aus diesem Stapel angefertigt werden, stark verschlechtert und wird ein bis zwei Größenordnungen geringer geschätzt als bei dem herkömmlichen MRAM-Stapel. Die Erfinder haben dennoch erkannt, dass auch derartige Stapel als Magnetfeldsensoren verwendet

werden können oder zur Verwendung dafür eingerichtet werden können, wie nachfolgend offenbart wird.

[0085] Bei einem CMOS-Schaltkomplex, beispielsweise dem CMOS-Invertierer, wie in [Fig. 6A](#) gezeigt, ist IDD der Strom, welcher von einer hohen Stromversorgungsstufe V_{dd} zu einer niedrigen Stromversorgungsstufe V_{ss} fließt. Wenn sich der Schaltkomplex im Wartezustand befindet, was bedeutet, dass es keine digitalen Übergänge innerhalb des Schaltkomplexes gibt, und auch der Ruhezustand genannt wird, ist der IDD-Strom stabil und weist einen kleinen Wert auf, welcher der IDD-Ruhestrom oder kurz der IDDQ-Strom genannt wird. Wenn digitale Übergänge in dem Schaltkomplex auftreten, wie beispielsweise wenn sich V_{in} von niedrig nach hoch ändert und sich folglich V_{out} von hoch nach niedrig ändert ([Fig. 6B](#), oberer Teil), steigt der IDD-Strom auf ein Maximum an, welches der IDD-Einschwingstrom oder kurz der IDDT-Strom genannt wird ([Fig. 6B](#), mittlerer und unterer Teil). Nach dem Übergang fällt er dann erneut auf den IDDQ-Ruhepegel zurück ([Fig. 6B](#), mittlerer Teil). Die erwähnte Situation tritt auf, wenn der Schaltkomplex frei von Defekten ist. In dem Fall, dass es Defekte gibt, wie beispielsweise Gate-Oxid-Kurzschlüsse, Floating Gates, Überbrückungsfehler usw., wie beispielsweise durch den parallelen Widerstand R_p in [Fig. 6A](#) angegeben, wird eine signifikante Steigerung in dem IDDQ nach dem Übergang beobachtet, wie in dem unteren Schaubild der [Fig. 6B](#) illustriert. Durch Überwachen des IDDQ-Stroms nach Übergängen können Defekte des Schaltkomplexes leicht detektiert werden.

[0086] Es hat sich herausgestellt, dass IDDQ ein sehr gutes Prüfungsverfahren ist, welches viele Fehler abdeckt, welche von anderen Verfahren bisher nicht detektiert werden.

[0087] Ein verbessertes Verfahren der IDDQ-Prüfung ist das Delta-IDDQ-Verfahren. Bei dem Delta-IDDQ-Prüfverfahren wird eine Anzahl Prüfmuster an die digitalen Eingänge des Schaltkomplexes geschickt, und der IDDQ wird überwacht und verglichen ([Fig. 7](#)). Die Muster werden so ausgelegt, dass sie den Wert jedes internen Netzes garantiert verändern (umschalten). Die Differenz zwischen dem Durchschnittswert eines Musters zu einem anderen wird Δ IDDQ genannt. Falls einer der Δ IDDQ-Werte zu stark von dem bekannten normalen Wert abweicht, kann geschlossen werden, dass der Schaltkomplex fehlerhaft ist.

[0088] Für beide Verfahren beträgt die Stromauflösung vorzugsweise einige μ A oder weniger; obwohl der Strombereich bei dem Delta-IDDQ-Verfahren in Abhängigkeit von der Größe des Schaltkomplexes im mA-Bereich oder sogar höher liegen kann. Weitere Informationen zur IDDQ-Prüfung können bei Bram

Kruseman et al, The future of delta IDDQ testing, Proceedings of the Test Conference, 2001, Seiten 101 bis 110, gefunden werden, welcher somit durch Verweis einbezogen wird.

[0089] Das grundlegende Prinzip eines Sensors gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird in [Fig. 8](#) gezeigt. [Fig. 8](#) zeigt, dass der Sensor drei Schichten, eine freie Magnetschicht **102**, eine Tunnelbarriere **103** und eine festgelegte oder feste Magnetschicht **105** aufweist. Sowohl die freie Magnetschicht **102** als auch die feste Magnetschicht **105** können einen Stapel von Schichten umfassen. Der zu messende Strom I_x wird durch eine Leiterbahn **200** geschickt, welche unterhalb des MTJ-Sensorelements **210** angeordnet ist. Das Sensorelement **210** ist von dem Leiter **200** unter Verwendung einer herkömmlichen isolierenden Schicht galvanisch isoliert (in [Fig. 8](#) nicht gezeigt). Das Sensorelement **210** ist entlang der Achse des Leiters **200** verlängert, wie nachfolgend ausführlicher diskutiert. Das Sensorelement **210** kann in genau der gleichen Weise wie MRAM-Zellen gemustert werden und kann außerhalb des Bereichs angeordnet werden, welcher die Speichermatrix enthält. Das Feld, welches von dem Strom I_x erzeugt wird, dreht die Magnetisierungsrichtung der freien Schicht **102** des Sensorelements **210**, was durch seine Widerstandsänderung detektiert werden kann. Es wird ein Messstrom I_s durch das Element **210** geschickt (von oben nach unten), um den Widerstand zu messen.

[0090] Trotz der Verwendung eines ähnlichen Prinzips weisen MRAM-Zellen und Stromsensoren gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung unterschiedliche Kennlinien auf, wie in [Fig. 9A](#) und [Fig. 10A](#) gezeigt. Für jeden Fall wird die entsprechende Orientierung der Magnetschichten in [Fig. 9B](#) und [Fig. 10B](#) gezeigt. [Fig. 9A](#) zeigt die Kennlinie Widerstand versus Magnetfeld für eine MRAM-Speicherzellenstruktur. Bei MRAM-Zellen ist es erwünscht, dass die Magnetowiderstandsschleife (MR-Schleife) der freien Schicht quadratisch ist mit einer relativ großen Koerzitivität (in der Größenordnung von einigen zehn Oe, $1 \text{ Oe} = 10^{-4} \text{ Tesla}$) und zwei distinkte Restmagnetisierungszustände aufweist. Ferner muss die Mitte der Schleife bei einem Feld von null liegen. Im Gegensatz dazu ist die Kennlinie für den Stromsensor ziemlich verschieden, wie in [Fig. 10A](#) gezeigt. Sie muss auf der einen Seite eine ansteigende Kennlinie aufweisen, um eine möglichst große Suszeptibilität für ein Magnetfeld zu ergeben (für eine hohe Empfindlichkeit), und auf der anderen Seite muss sie eine kleine oder gar keine Hysterese aufweisen. Die Mitte der Schleife muss nicht bei einem Feld von null liegen. Der Mittelpunkt kann in Abhängigkeit von Anwendungen ausgewählt werden. Beispielsweise kann er in der Richtung verschoben sein, welche zu der des gemessenen Felds entgegengesetzt ist, so dass sein detektierter Be-

reich für den Fall des Messens eines unidirektionalen Stroms in einem breiten Bereich erweitert wird.

[0091] Die Geometrieabhängigkeit des magnetischen Verhaltens der Elemente kann ausgenutzt werden, um Sensoren mit der erwünschten Kennlinie zu bauen. Um bei MRAM die erwähnte Hystereseschleife zu erhalten, muss die leichte Achse der freien Schicht parallel zu der Richtung der festgelegten Magnetisierung sein, wie in [Fig. 9B](#) gezeigt. In der [Fig. 9B](#) und [Fig. 10B](#) werden die freie Schicht und die festgelegte Schicht aus Gründen der Deutlichkeit leicht versetzt gezeigt. In der Praxis sollten die Schichten übereinander gestapelt sein, wobei sie von einer dünnen, isolierenden Schicht (Tunnelbarriere) getrennt werden. Die leichte Achse kann durch Muster des Elements zu einer länglichen Form erzielt werden, wobei folglich eine Formanisotropie in der Längsrichtung bewirkt wird. Beim Schreiben ist das Feld der leichten Achse, welches die zum Umschalten des Elements erforderliche, angelegte Feldkomponente ist, entlang der leichten Achse ausgerichtet.

[0092] Bei der Sensorkonfiguration sollte die leichte Achse der freien Schicht (normalerweise in der Längsrichtung) in einem Winkel zwischen 0° und 180° , vorzugsweise zwischen 45° und 135° und besonders bevorzugt im Wesentlichen senkrecht zu der festgelegten Magnetisierung liegen, wie in [Fig. 10B](#) gezeigt. Der Leiter **200** für den gemessenen Strom liegt vorzugsweise parallel zu dieser leichten Achse, was ein Feld senkrecht zu der leichten Achse erzeugt. Es ist aus der Stoner-Wohlfarth-Theorie wohlbekannt, dass die Hystereseschleife eines magnetischen Elements einer einzelnen Domäne keine Hysterese aufweist, wenn es einem Magnetfeld ausgesetzt wird, welches senkrecht zu seiner leichten Achse ausgerichtet ist. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass der gemessene Strom I , in einem Winkel zu der leichten Achse orientiert wird; obwohl in den meisten Fällen die parallele Anordnung die optimale Wahl ist.

[0093] Um die Hysterese weiter zu unterdrücken, kann der Sensor ferner einem zusätzlichen Gleichstrommagnetfeld (ein paar Oe) unterworfen werden, welches z. B. von einem zweiten Stromleiter in der Umgebung der Vorrichtung erzeugt wird, um die Hysterese weiter zu unterdrücken. Der zweite Strom ist so eingerichtet, dass die Richtung des zusätzlichen Felds im Wesentlichen senkrecht zu dem Feld ist, welches gemessen werden soll, und folglich im Wesentlichen parallel zu der leichten Achse der freien Schicht liegt. Das zusätzliche Feld stabilisiert die kohärente Rotation der Magnetisierung innerhalb der freien Schicht, wobei folglich eine Hysterese unterdrückt wird, welche von Domänenwandbewegungen bewirkt wird. Um den Mittelpunkt der Kennlinienkurve zu verschieben, wobei folglich der Messbereich des Sensors verschoben wird, kann der zweite Strom so

angeordnet werden, dass die Richtung des zusätzlichen Felds im Wesentlichen parallel zu dem Feld ist, welches gemessen werden soll.

[0094] Ersatzweise kann der Sensor einem zusätzlichen Wechselfeld unterworfen werden, welches von einem zweiten Stromleiter erzeugt wird. Das zusätzliche Wechselfeld wird verwendet, um das Feld zu modulieren, welches gemessen werden soll, wobei folglich das Sensorsignal moduliert wird. Durch Verwendung eines geeigneten Signalnachbehandlungsverfahrens kann das Signal extrahiert werden, wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis deutlich verbessert werden kann.

[0095] [Fig. 11](#) zeigt eine Messung einer Transferkennlinie (Spannung gegen Strom) einer Stromsensor-(Wheatstone)-Brücke. Jedes Element der Sensorbrücke ist ein TMR-Element mit einer Größe von $6,5 \times 8 \mu\text{m}^2$. Die Distanz zwischen der Sensorebene bis zu der Oberseite des Leiters **200** beträgt 150 nm. Der Leiterquerschnitt beträgt $6,5 \mu\text{m}$ (lateral) \times $0,35 \mu\text{m}$ (vertikal). Die Spannung, welche an die Wheatstone-Brücke angelegt wird, beträgt 400 mV. Aus der Steigung der Kennlinienkurve, welche in [Fig. 11](#) illustriert ist, kann die Empfindlichkeit dieses Sensors abgeleitet werden, welche $1,7 \text{ mV}/\text{mA}$ beträgt. Bei einer IDDx-Prüfung führt die erforderliche Auflösung von $2 \mu\text{A}$ zu einer Veränderung von $3,4 \mu\text{V}$. Mit einem Verstärker nach herkömmlichen Prinzipien kann diese Veränderung leicht aufgelöst werden, ohne von Rauschen überdeckt zu werden.

[0096] Die Größe des Sensorelements **210** wird mehr oder weniger durch die Breite des Leiters **200** definiert, welcher den Strom führt, welcher gemessen werden soll. Für ein relativ homogenes Feld über dem Element **210** ist es ratsam, dass die Breite des Sensorelements **210** gleich oder kleiner wie die Breite des Leiters **200** ist. Auf der anderen Seite muss die Breite des Leiters **200** so ausgewählt werden, dass sie ein ausreichendes Feld auf dem Sensorelement **210** bereitstellt. [Fig. 12](#) zeigt die Beziehung zwischen der Leiterbreite und der Leiter-Sensor-Distanz und dem Feld, welches an dem Sensorelement **210** erzeugt wird. Der Leiter **200** weist eine Dicke von 300 nm auf, und der Strom beträgt 10 mA. Allgemein gesagt, je kleiner die Breite des Leiters **200** ist und je kürzer die Distanz zwischen Leiter **200** und Sensorelement **210** ist, desto größer ist das Feld, welches an dem Sensorelement **210** erzeugt werden kann. Falls beispielsweise eine Messung in dem Bereich von einigen mA oder weniger erforderlich ist, sollte die Breite des Leiters **200** nicht größer als ungefähr $2 \mu\text{m}$ betragen, um ein ausreichendes Feld zu erhalten, um das Sensorelement **210** zu betreiben. Es wird angenommen, dass die Dicke des Leiters **200** ungefähr 300 nm beträgt und die Distanz zwischen dem Leiter **200** und der Sensorebene ungefähr 150 nm beträgt, was realistische Praxiswerte sind. Da die Breite des

Sensorelements **210** nicht größer sein sollte als die des Leiters **200**, sollte deshalb die Sensorbreite auch geringer als $2 \mu\text{m}$ sein.

[0097] Die Länge des Sensorelements **210** hängt von den Anforderungen an Empfindlichkeit und Hysterese ab. Je kleiner das Seitenverhältnis, desto größer ist die Empfindlichkeit, welche erhalten werden kann. Idealerweise kann die Sensorform rund sein, um die maximale Empfindlichkeit zu erhalten. Die Empfindlichkeit ist jedoch ein Gegenfaktor der Hysterese: je kleiner das Seitenverhältnis ist, desto größer wird die Hysterese. Um die Hysterese zu reduzieren, ist es nötig, etwas Anisotropie entlang der Leiterichtung einzuführen, um die magnetischen Momente zu stabilisieren. Der leichteste Weg ist es, das Element zu verlängern, um die so genannte „Formanisotropie“ zu verwenden. In der Praxis wird ein Kompromisswert des Seitenverhältnisses von ungefähr 5 bis 7 gefunden (gültig für Elemente mit einer Breite von ungefähr 1 bis ein paar Mikron), welcher eine relativ hohe Empfindlichkeit ohne bemerkenswerte Hysterese aufweist.

[0098] Die festgelegte (oder harte Referenz-)Schicht des Sensorelements kann aus einer einzelnen ferromagnetischen Schicht mit einer Nettomagnetisierung bestehen, oder sie kann aus einem künstlichen, antiferromagnetischen (AAF-)Stapel mit einer Nettomagnetisierung von im Wesentlichen null bestehen. Der AAF-Stapel besteht typischerweise aus zwei ferromagnetischen Schichten (z. B. CoFe), welche durch die nicht magnetische Schicht (z. B. Ru) antiferromagnetisch gekoppelt sind. Dieser Stapel ist tatsächlich äquivalent zu einer einzelnen festgelegten Schicht, jedoch aufgrund der starken antiferromagnetischen Interaktion der Schichten robuster. Weiterhin ist anzumerken, dass fortgeschrittene geschichtete Strukturen gemäß den Materialsystemen für die freie Schicht verwendet werden, welche eingeführt wurden, um die Skalierbarkeit von MRAM in Richtung kleinerer CMOS-Nodes zu verbessern, wie beispielsweise magnetostatisch gekoppelte Strukturen und antiferromagnetisch gekoppelte AAF-Strukturen.

[0099] [Fig. 13](#) zeigt die Magnetisierungsorientierungen des AAF-Stapels als festgelegte (harte Referenz-)Schicht und der freien (weichen Speicher-)Schicht in der Speicherzelle, und [Fig. 14](#) zeigt die Magnetisierungsorientierungen der entsprechenden Schichten für den Sensor. In diesen Figuren werden die isolierende Tunnelbarriereschicht und die nicht magnetische Zwischenschicht des AAF-Stapels aus Gründen der Einfachheit nicht gezeigt. [Fig. 12](#) und [Fig. 14](#) zeigen wie die Formanisotropie, mit anderen Worten die Längenausdehnung, für den Sensor orthogonal zu dem extern angelegten Feld H_{extern} ist und für die Speicherzelle nach dem Stand der Technik parallel ist. Dies erzeugt auch die Steigung

der Transferkurve. In [Fig. 14](#) wird eine Konfiguration mit gekreuzter Anisotropie in dem Sensorentwurf erzielt, welcher eine stabile Magnetisierungskonfiguration gestattet (bei einem Magnetfeld von ungefähr null), bei welcher die Magnetisierung von weichen Schichten und von Referenzschichten orthogonal zueinander sind.

[0100] Einige Beispiele der berechneten Kennlinien für Sensorelemente mit einer Struktur wie in [Fig. 14](#), werden in den Schaubildern der [Fig. 15](#) bis [Fig. 18](#) gezeigt. Es werden Graphen gezeigt, welche den Widerstand gegen die Magnetfeldstärke illustrieren. [Fig. 15](#) zeigt den Widerstand gegen die Magnetfeldstärke für eine Speicherzelle für Referenzzwecke. Es ist offensichtlich, dass die Empfindlichkeit für ein Feld nahe null gering ist und dass es eine Hysterese gibt. Dieses Beispiel verwendet Schichten in einer rechteckigen Form von $180 \times 120 \text{ nm}^2$. Der MRAM weist einen Referenzstapel aus CoFe-Ru-CoFe auf, in welchem die Dicken der beiden CoFe-Schichten 1,75 bzw. 2,25 nm und eine freie Schicht aus NiFe 5 nm betragen.

[0101] [Fig. 16](#) illustriert den Graphen des Widerstands gegen die Magnetfeldstärke für eine erste Sensorvorrichtung, welche als die Speicherzelle zusammengesetzt ist, welche oben stehend hinsichtlich [Fig. 15](#) beschrieben ist, und Abmessungen von $120 \times 180 \text{ nm}^2$ aufweist. Bei der Sensorkonfiguration sind die CoFe-Magnetschichten des Referenzstapels in der Richtung festgelegt, welche orthogonal zu der leichten Achse der freien Schicht liegt, und das Feld wird in der Richtung der festgelegten Richtung angelegt.

[0102] Für eine Ellipse ist die Formanisotropie durch ein Anisotropiefeld

$$H_K = 4\pi(t \cdot M)(\eta_y - \eta_x)/w$$

gegeben, wobei $(t \cdot M)$ das Produkt der freien Schichtdicke und der Sättigungsmagnetisierung und $(\eta_y - \eta_x)$ eine monoton ansteigende Funktion des Seitenverhältnisses $1/w$ mit dem Wert 0 für $1/w = 1$ (kreisförmig) und 1 für $1/w = \infty$ ist. Für die nachfolgend gegebenen Zahlen ist $H = 160 \text{ Oe}$. Die Sensorempfindlichkeit ist dann von dem Signal abhängig. Es wird beispielsweise eine Magnetic-Tunnel-Junction mit z. B. 40% verwendbarem TMR-Signalanteil angenommen. Die geschätzte Empfindlichkeit ist dann:

$$\text{Empfindlichkeit} = \text{TMR}[\%]/(2 \cdot H_K)$$

[0103] Für das gegebene Beispiel beträgt die Empfindlichkeit $0,125\%/Oe$. Es ist zu beachten, dass diese Empfindlichkeit durch Erhöhen der Breite w des Sensors verbessert werden kann. Eine wirksame Magnetfeldempfindlichkeit kann aus dem Spannungssignal abgeleitet werden, welches abgerufen

wird. Für eine Vorspannung von ungefähr 200 mV führt ein TMR-Signal von 40% zu $\Delta V = 80$ mV, aus welcher die Empfindlichkeit vor der Verstärkung zu $250 \mu\text{V/Oe}$ berechnet wird. Wie bei MRAM-Speicherzellenentwürfen, kann ein die Spannung begrenzender Transistor hinzugefügt werden, um die Spannung V_{bias} über das Sensorelement festzulegen, und die resultierende Stromschwankung I_{sense} kann verstärkt werden. Für eine Magnetic-Tunnel-Junction von $10 \text{ k}\Omega$ ist die maximale Stromschwankung $8,3 \mu\text{A}$ und z. B. mit $R_{\text{load}} = 50 \text{ k}\Omega$ ist dann $\Delta V = 415$ mV.

[0104] [Fig. 17](#) illustriert den Graphen des Widerstands gegen Magnetfeld für eine zweite Sensorvorrichtung. Die Vorrichtung weist Abmessungen von $700 \times 5000 \text{ nm}^2$ auf. Die Vorrichtung weist einen Referenzstapel aus CoFe-Ru-CoFe von 2,0 bis 2,5 nm und eine weiche Schicht aus NiFe von 5 nm auf. Unter der Annahme, dass das volle MR-Verhältnis 40% beträgt, kann berechnet werden, dass die Empfindlichkeit des Sensors $0,4\%/Oe$ ist.

[0105] In einem letzten Schritt kann die Magnetfelderzeugung einer Stromleitung betrachtet werden. Dieses Problem hängt stark von der Geometrie ab, wie in [Fig. 12](#) gezeigt. Ein typischer Wert bei MRAM-Entwürfen ist ein paar Oe Magnetfelderzeugung pro mA Strom. Es wird eine Felderzeugung von 5 Oe pro mA angenommen. Mit den vorhergehenden Ergebnissen führt dies zu einer effektiven Stromempfindlichkeit von ungefähr $6,5 \text{ mV/mA}$. Für das in [Fig. 18](#) gegebene Beispiel unter Verwendung eines rechteckigen Sensors von $240 \times 360 \text{ nm}^2$ mit $H_K = 50$ Oe ist die Stromempfindlichkeit unter den gleichen Annahmen ungefähr 21 mV/mA .

[0106] In der Schlussfolgerung ist es sowohl nach experimentellen als auch nach theoretischen Überlegungen möglich, Signale im Bereich von ein paar bis zu ein paar zehn mV pro mA zu erhalten, was ungefähr zwei Größenordnungen besser ist als bei gegenwärtigen MAGFET-Vorrichtungen, wie bei Walker et al, „A Practical Built-in Current Sensor for DDQ Testing“, ITC2001, Paper 14.3; oder bei Giovanni Busatto et al, Microelectronics Reliability 43 (2003), 577 bis 583, beschrieben. Mit anderen Worten, eine Stromschwankung im μA -Bereich führt zu einer Signalveränderung im Bereich von μV bis zu einigen zehn μV .

[0107] Gemäß weiteren Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung kann die integrierte Schaltkreisanordnung, welche die oben stehend beschriebene Strommessvorrichtung umfasst, mit speziellen Maßnahmen bereitgestellt werden, um die Empfindlichkeit der Strommessvorrichtung oder die Erzeugung des Felds zu verbessern, welches gemessen werden soll.

[0108] Gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung können Mittel zum Erzeugen eines

stärkeren Felds auf der Sensorebene mit einem gleichen Strom bereitgestellt werden, welcher von einem Stromleiter geführt wird. Ein derartiges Mittel kann beispielsweise sein, mindestens eine vertikale Leitungskomponente, wie beispielsweise ein Kontaktloch, zusammen mit mindestens einer horizontalen Leitungskomponente zu verwenden, wie beispielsweise einer Verbindungsleitung. Die vertikalen Leitungskomponenten und die horizontalen Leitungskomponenten werden so verbunden, dass eine L-förmige Leiterstruktur gebildet wird oder dass sie zumindest einen L-förmigen Leiterabschnitt aufweisen, dessen Ecke benachbart zu der Strommessvorrichtung angeordnet ist.

[0109] Beispiele, wie dies zu erhalten ist, werden hier nachfolgend gegeben.

[0110] Als ein erstes Beispiel ist eine horizontale Verbindungsleitung **40** mit einem vertikalen Kontaktloch **41** verbunden, wobei folglich eine L-förmige Struktur **42** gebildet wird ([Fig. 19](#)). Die linke Seite der [Fig. 19](#) zeigt eine perspektivische Ansicht, und die rechte Seite der [Fig. 19](#) zeigt eine vertikale Querschnittsansicht. Diese L-förmige Struktur **42** wird als der Leitungsweg für einen Strom I_x verwendet, welcher gemessen werden soll. Die Strommessvorrichtung **210** ist nahe der Ecke **44** der L-förmigen Struktur **42** angeordnet. Weil sowohl das Kontaktloch **41** als auch die horizontale Verbindungsleitung **40** ein Magnetfeld in der gleichen Richtung an der Position der Strommessvorrichtung **210** gemäß der Rechten-Hand-Regel erzeugen, wenn Strom durch die L-förmige Struktur **42** fließt, wird das resultierende Magnetfeld, welches an der Strommessvorrichtung **210** gemessen wird, gegenüber dem bei dem herkömmlichen Entwurf mit nur einem geraden horizontalen Leiter ungefähr verdoppelt. Es ist erwünscht, dass die vertikale Leitungskomponente, das Kontaktloch **41**, in Abhängigkeit von der verfügbaren Muster-technik so nahe wie möglich an der Strommessvorrichtung **210** angeordnet wird. Das obere Ende des Kontaktlochs **41** kann mit jeder oberen Verbindungsebene verbunden sein, welche sich mit dem unter Messung befindlichen Stromweg weiter verbindet.

[0111] Als ein zweites Beispiel wird ein ringförmiger Flussverdichter **50** zu dem Entwurf des ersten Beispiels hinzugefügt, wie in [Fig. 20](#) illustriert. Der ringförmige Flussverdichter **50** weist eine Lücke **51** auf, und die Strommessvorrichtung **210** ist in der offenen Lücke **51** des ringförmigen Flussverdichters **50** angeordnet.

[0112] Der Flussverdichter **50** kann eine Dummy-MTJ sein und beispielsweise um das Kontaktloch **41** herum gemustert werden. Die freie Schicht der ringförmigen Dummy-MTJ, welche in der Nachbarschaft der Strommessvorrichtung angeordnet ist, kann als eine Kraftflussführung verwendet werden,

um mehr Krafffluss in der Strommessvorrichtung zu konzentrieren, wobei folglich die Detektionsgrenze gesenkt wird. Der ringförmige Flussverdichter **50** konzentriert die kreisförmigen Feldlinien, welche um das vertikale Kontaktloch **41** herum erzeugt werden, in der Lücke **51** des Rings, in welchem die Messvorrichtung **210** angeordnet ist. Zusätzlich konzentriert die Fläche des Flussverdichters **50** nahe der Lücke **51** auch teilweise Feldlinien, welche von der horizontalen Leiterbahn **40** erzeugt werden. Unter Verwendung des Flussverdichters **50** kann die Kraffflussdichte und folglich die Magnetfeldstärke an der Messvorrichtung **210** drastisch erhöht werden. Die Distanz zwischen den Rändern der Messvorrichtung **210** und den „Polen“ der Lücke **51** sollte in Abhängigkeit von den Fähigkeiten der Technik so klein wie möglich sein.

[0113] Auf der linken Seite oben der [Fig. 20](#) wird eine perspektivische Ansicht der L-förmigen Struktur **42** gezeigt, welche mit einem Flussverdichter **50** bereitgestellt wird. Die Schichten des Flussverdichters **50** entsprechen denjenigen der Messvorrichtung **210** und gemäß der vorliegenden Erfindung folglich auch den Schichten der integrierten MRAM-Zellen. Es gibt eine (freie) Messschicht **102**, eine Isolierschicht (Tunnelbarriere **103**), eine festgelegte Magnetschicht **105** und eine antiferromagnetische Schicht **107**, welche verwendet wird, um die Magnetisierung der festgelegten Schicht auf eine feste Richtung festzulegen (Austauschvorspannungsrichtung). Bei dem in [Fig. 20](#) gezeigten Beispiel gibt es auch eine Deckschicht **241**. Aus Gründen der Einfachheit werden nur diese Schichten in dem MTJ-Stapel gezeigt. In der Praxis kann es mehr Schichten geben, welche für das Funktionsprinzip hier nicht relevant sind. Die freie Schicht (Messschicht **102**) des Flussverdichters **50** kann als eine Kraffflussführung für die Messvorrichtung **210** fungieren, welche in der Lücke **51** des Flussverdichters **50** angeordnet wird, weil sich ihre Magnetisierung frei drehen kann. Die festgelegte Schicht **105** des Flussverdichters **50** beeinflusst die Kraffflussänderung während der Messung nicht, weil ihre Magnetisierung festgelegt ist.

[0114] Der vorliegende Entwurf gestattet, dass der Flussverdichter **50** für die Messvorrichtung **210** ohne zusätzliche Verarbeitungsschritte erzeugt werden kann, was für Anwendungen, wie beispielsweise einer Integration in MRAM-Chips, geeignet ist.

[0115] Auf der rechten Seite oben der [Fig. 20](#) wird ein Querschnitt der Struktur gezeigt, welche auf der linken Seite oben der [Fig. 20](#) illustriert ist.

[0116] Die rechte Seite unten der [Fig. 20](#) zeigt eine Draufsicht der L-förmigen Struktur **42** mit dem Flussverdichter **50**. Es ist bevorzugt, dass der Flussverdichter **50** für eine bessere Effizienz und ein homogenes Feld, welches in der Lücke **51** erzeugt wird, eine

Breite aufweist, welche größer als die Messvorrichtung **210** ist. Die Permeabilität des Flussverdichters **50** kann durch Variieren seiner Geometrie abgestimmt werden. Das Seitenverhältnis des Flussverdichters **50** sollte derartig ausgewählt werden, dass er in dem Feldbereich, welcher gemessen werden soll, nicht vollständig gesättigt ist, jedoch noch eine ausreichend große Permeabilität zum Konzentrieren des Kraffflusses aufweist. Der Flussverdichter **50** sollte so nah wie möglich an der Messvorrichtung **210** gemustert werden, jedoch noch elektrisch isoliert von ihr. Je näher er liegt, desto effizienter ist die Kraffflussführung. Natürlich hängt der minimale Abstand von der Lithografieauflösung und dem verwendeten Ätzverfahren ab.

[0117] Als ein drittes Beispiel, welches in [Fig. 21](#) illustriert ist, wird ein zweites Kontaktloch **60** zu dem Entwurf des ersten Beispiels hinzugefügt, um eine U-förmige Struktur **61** zu bilden. Der U-förmige Leitungsweg windet sich um die Messvorrichtung **210** herum, wobei teilweise eine Schleife gebildet wird. Mit dieser U-förmigen Struktur **61** wird das Feld, welches an der Messvorrichtung **210** erzeugt wird, für einen gleichen zu messenden Strom im Vergleich zu dem herkömmlichen Fall mit nur einem geraden Leiter ungefähr verdreifacht. Die Messvorrichtung **210** wird vorzugsweise in der Mitte dieser U-förmigen Struktur **61** und vorzugsweise gleichermaßen beabstandet von den drei Segmenten **41**, **42**, **60** der U-förmigen Struktur **61** angeordnet. Die oberen Enden der Kontaktlöcher **41**, **61** sind mit allen oberen Verbindungsebenen (in den Zeichnungen nicht dargestellt) verbunden, welche mit dem unter Messung befindlichen Stromweg weiter in Verbindung stehen.

[0118] Als ein viertes Beispiel, welches in [Fig. 22](#) illustriert ist, wird ein Doppelring-Flussverdichter **70**, welcher aus einer Dummy-MTJ angefertigt wird, um die zwei vertikalen Kontaktlöcher **41**, **60** des dritten Beispiels herum hinzugefügt. Die Messvorrichtung **210** wird in der Lücke **71** des Flussverdichters **70** angeordnet. Der Leitungsweg, welcher aus dem Kontaktloch **41**, einer horizontalen Leitung **42** unterhalb der Messvorrichtung **210** und einem Kontaktloch **60** besteht, wird durch die beiden Öffnungen des Doppelring-Flussverdichters **72**, **73** geführt. Wenn ein Strom I_x durch den U-förmigen Leitungsweg **61**, z. B. von Kontaktloch **41** nach Kontaktloch **60**, geschickt wird, erzeugt er zwei Gruppen kreisförmiger Feldlinien **74**, **75** auf der Ebene der Messvorrichtung **210**, welche von dem Flussverdichter **70** konzentriert werden: eine Gruppe von Feldlinien **74**, welche gegen den Uhrzeigersinn hinsichtlich des Kontaktlochs **41** zirkulieren, und eine andere Gruppe von Feldlinien **75**, welche im Uhrzeigersinn hinsichtlich des Kontaktlochs **60** zirkulieren. Sie weisen an der Lücke **71** beide die gleiche Richtung auf, wobei folglich die Kraffflussdichte an der Messvorrichtung **210** im Vergleich zu dem zweiten gegebenen Beispiel in ihrer Stärke

verdoppelt wird. In Bezug auf Empfindlichkeit und niedriger Felddetektionsgrenze ist dies das beste Beispiel unter den vier Beispielen, weil mit einem gleichen Strom I_x , welcher durch den Leitungsweg geschickt wird, dieses Beispiel das stärkste Feld an der Sensorposition ergibt. Obwohl der Entwurf komplizierter ist, erfordert er dennoch keine zusätzlichen Verarbeitungsschritte; nur der Entwurf der Maske muss verändert werden.

[0119] Bei einer alternativen Ausführungsform ist es möglich, den Flussverdichter **50**, **70** vom Dummy-MTJ-Typ durch einen dedizierten Flussverdichter zu ersetzen, welcher aus einer weichmagnetischen Schicht angefertigt wird, welche von dem MTJ-Stapel separat gemustert wird. In diesem Fall erfordert er zusätzliche Verarbeitungsschritte. Im Ergebnis kann jedoch die Effizienz des Flussverdichters besser sein. Dies liegt daran, dass gezeigt wurde, dass der effizienteste Krafflussverdichter eine Dicke von mindestens 10 nm aufweist, wohingegen die freie Schicht der MTJ eine Dicke von nur ungefähr 4 bis 5 nm aufweist, obwohl er bei dieser Dicke beginnt, Wirkung zu zeigen.

[0120] Der Sensor der verschiedenen Ausführungsformen kann unter Verwendung eines Detektionsschaltkomplexes ausgelesen werden, welcher den Widerstand der Vorrichtung misst. Beispiele eines derartigen Detektionsschaltkomplexes werden nachfolgend diskutiert.

[0121] Zusätzlich kann eine Rückmeldungsbetriebsart mit Nullung eingesetzt werden. Bei einem derartigen System wird ein entgegengesetztes Magnetfeld an dem Ort des Magnetfeldsensors mit einer Größenordnung erzeugt, welche mit der Zeit und derart variiert, dass das gesamte lokale Feld, welches von dem Sensor gemessen wird, auf null gezwungen wird. Das elektrische Rückkopplungssignal selbst kann das unmittelbare Ausgangssignal des Sensormoduls sein. Eine Nullung weist den Vorteil auf, dass der Arbeitspunkt des Sensors typischerweise insbesondere bei einem Magnetfeld von null festgelegt ist. Als eine Konsequenz kann der Messbereich des Stromsensors erweitert und seine Linearität verbessert werden. Weiterhin können Hystereseeffekte unterdrückt werden. Eine Nullung kann für einen Stromsensor, welcher unter Verwendung des herkömmlichen MRAM-Konzepts ausgelegt wurde, sowie für Stromsensoren implementiert werden, welche den gleichen ausgeglichenen, freien AAF-Stapel mit MRAM-Zellen vom Umschalttyp gemeinsam benutzen.

[0122] Bei einer weiteren Ausführungsform wird ein unterschiedliches Nullungskonzept für Stromsensoren eingeführt, welche den gleichen MTJ-Stapel zusammen mit den MRAM-Zellen vom Umschalttyp benutzen. Das Prinzip hinter dieser Ausführungsform

wird in [Fig. 23](#) präsentiert. Eine Messvorrichtung **210** (d. h. ein MTJ-Element) wird zwischen einer ersten Leiterbahn **90** und einer zweiten Leiterbahn **91** angeordnet: eine unterhalb und eine oberhalb der Messvorrichtung **210**. Das MTJ-Element ist von den beiden Leiterbahnen **90**, **91** galvanisch isoliert. Die beiden Leitungen **90**, **91** werden hinsichtlich der leichten Achse der Messvorrichtung **210** symmetrisch angeordnet, d. h. jede von ihnen bildet einen gleichen Winkel mit der leichten Achse der Messvorrichtung **210**. Der Winkel α kann jeden Wert zwischen 30° und 90° aufweisen, wobei 45° oder 90° für eine Verträglichkeit mit gegenwärtigen CMOS-Entwurfsregeln bevorzugt ist. Die erste Leiterbahn **90**, beispielsweise eine Leiterbahn, welche physikalisch unterhalb der Messvorrichtung **210** angeordnet ist, wird für den Strom (I_x), welcher gemessen werden soll, verwendet, und die zweite Leiterbahn **91**, beispielsweise eine Leiterbahn, welche physikalisch oberhalb der Messvorrichtung **210** angeordnet ist, wird für einen Gegenstrom (I_2) verwendet. Bei alternativen Ausführungsformen kann jedoch die Anordnung der Leiterbahnen **90**, **91** umgekehrt sein, was bedeutet, dass die obere Leiterbahn zum Führen des Stroms I_x , welcher gemessen werden soll, verwendet werden kann und die untere Leiterbahn zum Führen des Gegenstroms I_2 verwendet werden kann.

[0123] Die obere und untere Elektrode (in den Zeichnungen nicht dargestellt) der Messvorrichtung **210** werden von den beiden Leiterbahnen **90**, **91** elektrisch isoliert und sind mit einer Rückkopplungsschaltung **80** verbunden (wie in [Fig. 24](#) illustriert). Die Rückkopplungsschaltung **80** betreibt einen Gegenstrom I_2 in der zweiten Leiterbahn **91**.

[0124] Während der Messung erzeugt der Strom I_x ein erstes Magnetfeld H_1 auf der Messvorrichtung **210**, welches dazu neigt, das AAF-Magnetisierungspaar in dem freien Stapel **220** im Uhrzeigersinn zu drehen, während der Strom I_2 ein zweites Magnetfeld H_2 bewirkt, welches versucht, das Magnetisierungspaar in dem freien Stapel **220** gegen den Uhrzeigersinn zu drehen (man siehe [Fig. 23](#)). Wenn das erste und das zweite Magnetfeld gleich sind, $H_1 = H_2$, oder wenn mit anderen Worten das resultierende Feld H in der Richtung der leichten Achse orientiert ist und wenn die Größenordnung des resultierenden Felds H das Spin-Flop-Feld in der Richtung der leichten Achse nicht übersteigt, wird sich das Magnetisierungspaar des freien Stapels **220** nicht drehen und folglich wird keine MR-Änderung an der Rückkopplungsschaltung **80** beobachtet. Das Spin-Flop-Feld H_{flop} ist eine Funktion des einachsigen Anisotropiefelds H_K und des Sättigungsfelds H_{sat} des künstlichen Antiferromagneten, d. h. $H_{\text{flop}} = \sqrt{H_K \cdot H_{\text{sat}}}$. Einzelheiten über das Spin-Flop-Feld können in US 2004/0120184 gefunden werden. Um zu vermeiden, dass das resultierende Feld H das Spin-Flop-Feld übersteigt, sollte der Winkel α zwischen jeder der Lei-

terbahnen **90**, **91** und der leichten Achse in Abhängigkeit von dem gemessenen Strombereich richtig ausgewählt werden, d. h. die folgende Bedingung muss erfüllt sein: $\cos \alpha < H_{\text{top}}/(2 \cdot H_1)$. Die Rückkopplungsschaltung **80** ist auf eine derartige Weise entworfen, dass sie versucht, das erste und das zweite Magnetfeld H_1 , H_2 durch Auslesen des Ausgangssignals der Messvorrichtung **210** auszugleichen. Mit anderen Worten die Rückkopplungsschaltung **80** versucht, den Strom I_2 in der zweiten Leiterbahn **91** so zu betreiben, dass die MR-Änderung der Messvorrichtung **210** null bleibt. Der Spannungsabfall an einem Lastwiderstand R_L , welcher mit der zweiten Leiterbahn **91** in Reihe geschaltet ist, ist folglich proportional zu dem Strom I_2 , welcher durch die zweite Leiterbahn **91** fließt, und folglich zu dem Strom I_x , welcher gemessen werden soll und welcher durch die erste Leiterbahn **90** fließt, und kann als die Ausgabe der Messvorrichtung **210** verwendet werden. Alle anderen Wege zum Extrahieren einer Ausgabe aus der Rückkopplungsschaltung **80** sind auch möglich.

[0125] Eine perspektivische Ansicht des Entwurfs gemäß dieser Ausführungsform wird in [Fig. 25](#) gezeigt.

[0126] Die vorgeschlagene Ausführungsform stellt die folgenden Vorteile bereit:

- Einen größeren Messbereich, da der Bereich nicht von der Drehbewegung des Magnetisierungspaares begrenzt wird.
- Eine lineare Kennlinie innerhalb des Messbereichs. Dies liegt daran, dass innerhalb des Messbereichs die Ausgabe proportional zu I_2 ist, welcher wiederum rein proportional zu I_x ist.
- Keine Hysterese, weil sich die Magnetisierung nicht wesentlich dreht.
- Keine Änderung bei den Verarbeitungsschritten, folglich keine zusätzlichen Kosten.

[0127] Eine andere Ausführungsform eines Entwurfs gemäß der vorliegenden Erfindung wird in [Fig. 26](#) vorgeschlagen. Die obere Leiterbahn **91** ist mit zwei vertikalen Kontaktlöchern **85**, **86** verbunden, welche nahe an der Messvorrichtung **210** angeordnet sind, wobei eine U-förmige Brücke **87** gebildet wird. I_2 tritt in die Brücke **87** aus einem Leiter **88** in einer unteren Metallschicht ein, beispielsweise aus der gleichen Schicht wie die untere Leiterbahn **90**, und er verlässt die Brücke **87** bei einem Leiter **89** in der gleichen Metallschicht oder in einer anderen. Die Magnetfelder, welche von den drei Segmenten **85**, **91**, **86** der U-förmigen Brücke **87** erzeugt werden, addieren sich an der Position der Messvorrichtung **210** auf und führen mit einem gleichen Strom I_2 im Vergleich zu dem Entwurf der [Fig. 25](#) zu einem ungefähr drei Mal größeren Feld. Um in diesem Fall $H_2 = H_1$ zu erhalten, ist deshalb der erforderliche Wert von I_2 sogar kleiner als der Strom I_x , welcher gemessen werden soll.

[0128] Eine weitere Ausführungsform wird in [Fig. 27](#) gezeigt, bei welcher sowohl die obere Leiterbahn **91** als auch die untere Leiterbahn **90** in der Form von einer U-förmigen Brücke **87**, **120** strukturiert werden. Die Empfindlichkeit und die niedrige Stromdetektionsgrenze werden in diesem Fall noch weiter verbessert.

[0129] Um empfindlichere Stromsensoren aus dem MRAM-Stapel vom Umschalttyp zu erhalten, wird gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung der MTJ-Stapel vom Umschalttyp, so wie er abgelagert wurde, lokal auf den Bereichen, welche die Sensoren enthalten, auf eine derartige Weise modifiziert, dass das magnetische Nettomoment der freien Schicht tatsächlich nicht null wird, wie bei herkömmlichen MTJ-Stapel-Sensoren. Ein herkömmlicher MRAM-Stapel, welcher für Sensoranwendungen geeignet ist, kann folglich lokal aus dem MRAM-Stapel vom Umschalttyp wiedererlangt werden.

[0130] Ein lokales Modifizieren von Bereichen, welche die Sensoren enthalten, auf eine derartige Weise, dass das magnetische Nettomoment der freien Schicht nicht null wird, kann gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung durch Vermindern oder Erhöhen des magnetischen Moments einer der Magnetschichten in dem freien AAF-Stapel ausgeführt werden.

[0131] Unmittelbar nach der Ablagerung des MTJ-Stapels wird ein Lithografieschritt ausgeführt, um die Bereiche zu maskieren, welche keine Sensoren enthalten, wie in [Fig. 28](#) illustriert, und deshalb nicht modifiziert werden. Die maskierten Bereiche können MRAM-Zellen enthalten, welche in den späteren Verfahrensschritten gemustert werden.

[0132] Der obere Teil der [Fig. 28](#) zeigt eine Draufsicht, und der untere Teil der [Fig. 28](#) zeigt eine vertikale Querschnittsansicht eines MTJ-Stapels vom Umschalttyp nach einer Ablagerung des Maskierungsmaterials und vor allen weiteren Strukturierungsschritten. Der Stapel ist dann für eine Modifizierung bereit, um so das magnetische Moment einer der Magnetschichten in dem freien AAF-Stapel **220** zu vermindern oder zu erhöhen. Nach der Modifizierung des MTJ-Stapels wird das Maskierungsmaterial, z. B. der Fotoresist **240**, entfernt.

[0133] Beispiele, wie das magnetische Moment einer der Magnetschichten F_1 , F_2 in dem freien AAF-Stapel **220** vermindert oder erhöht werden kann, werden hier nachfolgend gegeben.

[0134] Als ein erstes Beispiel kann zumindest die obere ferromagnetische Schicht F_1 des freien AAF-Stapels **220** auf eine geeignete Weise teilweise oder vollständig entfernt werden. Das am meisten bevorzugte Verfahren zur Entfernung ist ein Ätzverfahren.

ren, beispielsweise Ionenstrahlätzen, Ätzen mit reaktionsfähigem Ionenstrahl, Sputterätzen, Plasmaätzen, Nassätzen usw.

[0135] Die Deckschicht **241**, z. B. aus Ta, muss zuerst geätzt werden. Nachfolgend ist die obere Magnetschicht F_1 mindestens teilweise entfernt. Idealerweise sollte das Ätzen oben auf oder innerhalb der Zwischenschicht **221** aufhören, wie in dem oberen Teil der [Fig. 29](#) illustriert. Dies garantiert die höchste Empfindlichkeit des Sensors. F_1 kann jedoch auch teilweise entfernt werden, was ausreichend ist, um den AAF unausgeglichen zu machen. Falls der freie Stapel mehr als zwei Magnetschichten umfasst, können eine oder mehrere Schichten mindestens teilweise entfernt werden, um so eine Struktur zu erhalten, bei welcher das magnetische Nettomoment nicht mehr länger gleich null ist.

[0136] Schließlich kann die Maskierungsschicht, z. B. der Fotoresist **240**, nach dem Ätzen entfernt werden, wie in dem unteren Teil der [Fig. 29](#) illustriert. Der Standardteil, d. h. alle verbleibenden Schritte, welche zum Muster der MRAM-Zellen (und damit automatisch der Sensoren) und der Leiterbahnen benötigt werden, bis die vollständige Herstellung des Chips beendet ist, des MRAM-Prozesses kann nach diesen zusätzlichen Schritten normal ausgeführt werden.

[0137] Als ein zweites Beispiel kann die magnetische Eigenschaft der oberen ferromagnetischen Schicht F_1 des freien AAF-Stapels **220** teilweise oder vollständig durch ein geeignetes Zerstörungsverfahren zerstört werden. Das Zerstörungsverfahren sollte so beschaffen sein, dass es zu einer Umwandlung des Materials von magnetisch zu nicht magnetisch führt. Beispiele geeigneter Zerstörungsverfahren umfassen Oxidation, Ionenimplantation oder Dotieren unter Verwendung von Diffusion. Beispielsweise kann die magnetische Eigenschaft der oberen Magnetschicht F_1 lokal durch Oxidation zerstört werden. Der Oxidationsprozess sollte durch die Deckschicht **241** hinunter zu der Magnetschicht F_1 eindringen, und er sollte auf der Zwischenschicht **221** aufhören.

[0138] Ersatzweise kann die Zerstörung durch Ionenimplantation oder durch Dotieren unter Verwendung von Diffusion durchgeführt werden. Die Ionenimplantation ist ein wohlbekanntes Verfahren, wie beispielsweise in US-6153281 beschrieben. Implantierte Ionen können z. B. Cr, O, N, Nb, Si usw. sein, und die Implantation kann in senkrechter Richtung zu dem Substrat oder unter einem Winkel durchgeführt werden. Es ist wichtig, dass das Implantationsprofil **260**, welches in [Fig. 30](#) illustriert ist, flach ist. Dies kann durch Verwendung einer geringen Ionenenergie und durch Optimieren der Implantationsdosis und des Strahlwinkels erhalten werden. Weiterhin muss die Implantationszone innerhalb der obersten Magnetschicht F_1 eingeschlossen sein, was durch Ab-

stimmen der Implantationsdosis erhalten werden kann.

[0139] Gemäß einer weiteren Ausführungsform kann wieder ein anderes Verfahren, um zu erreichen, dass das magnetische Nettomoment des freien Bereichs **220** nicht null wird, sein, eine andere ferromagnetische Schicht F_3 (in den Zeichnungen nicht dargestellt) unmittelbar oben auf die obere ferromagnetische Schicht F_1 des freien AAF-Stapels **220** hinzuzufügen, nachdem die Deckschicht **241** durch ein geeignetes Verfahren, beispielsweise durch eine Ätzverfahren, entfernt wurde. Durch Hinzufügen einer Magnetschicht wird das magnetische Moment der kombinierten Schicht, welche F_1 und F_3 umfasst, größer als das von F_2 , was zu einer unausgeglichenen AAF-Struktur führt. Als eine Alternative kann die ganze Schichtstruktur von F_1 , F_2 und F_3 in einem Durchgang abgelagert werden. Deshalb weist auch der MRAM-Teil des Chips anfänglich eine zusätzliche Schicht auf, welche nachher entfernt werden muss, wobei die Prozesskomplexität wächst. Bei gegebener Tatsache, dass MRAM die Hauptfunktionalität des IC ist, ist dies in den meisten Fällen nicht annehmbar.

[0140] Gemäß einer anderen Ausführungsform kann ein alternatives Verfahren, um zu erreichen, dass das magnetische Nettomoment des freien Bereichs **220** nicht null wird, sein, die antiferromagnetische Koppelung zwischen den ferromagnetischen Schichten F_1 , F_2 des freien AAF-Bereichs **220** (teilweise) lokal in eine ferromagnetische Koppelung umzuwandeln. Dies kann durch lokales Tempern des freien AAF-Stapels **220** erhalten werden, was aufgrund der Zwischendiffusion mit der Ru-Zwischenschicht **221** zu ferromagnetisch gekoppelten Bereichen zwischen den Magnetschichten F_1 und F_2 führt. Dies bewirkt eine Restmagnetisierung (und folglich ein magnetisches Nettomoment von nicht null) in dem freien AAF-Stapel **220**. Bei dieser Ausführungsform muss keine zusätzliche Maskenschicht in den zugrunde liegenden MRAM-Verfahrensablauf eingefügt werden. Während der Prüfphase kann eine lokale Erwärmung erzeugt werden.

[0141] Diese letztere Ausführungsform ist von vorhergehenden Ausführungsformen in dem Sinn verschieden, dass keine Maske erforderlich sein kann. Es ist aus US 2004/0120184 bekannt, dass der freie AAF-Stapel **220** durch Tempern lokal verändert werden kann. Dies wurde kürzlich zum Reduzieren der Schreibleistung bei dem Konzept des MRAM-Schreibens vom Umschalttyp vorgeschlagen. Bei US 2004/0120184 wird der freie AAF-Stapel **220** bei moderater Temperatur getempert, was zu schwach gekoppelten Bereichen in dem AAF **220** führt und folglich zu einem geringeren Spin-Flop-Feld führt. Typischerweise werden dadurch 10 bis 20% des Probenbereichs modifiziert.

[0142] Es wurde experimentell beobachtet, dass, wenn bei höherer Temperatur getempert wird, diese schwach (antiferromagnetisch) gekoppelten Bereiche wachsen und sich schließlich zu Bereichen entwickeln, bei welchen die ferromagnetischen Schichten F_1 und F_2 ferromagnetisch gekoppelt sind. Als eine Konsequenz zeigt die Probe eine Restmagnetisierung (ein Nettomagnetfeld von nicht null) bei einem extern angelegten Magnetfeld von null (man siehe [Fig. 31](#)). [Fig. 31](#) illustriert Hystereseschleifen eines freien AAF-Stapels **220**, welcher eine Ni-Fe-Schicht F_1 von 4 nm, eine Ru-Zwischenschicht **221** von 0,7 nm und eine andere NiFe-Schicht F_2 von 4 nm umfasst. Das Tempern wurde für 15 Minuten bei 240°C durchgeführt. Es ist in der Einfügung der [Fig. 31](#) deutlich zu sehen, dass der Stapel nach der Temperung eine Restmagnetisierung von im Wesentlichen nicht null entwickelt, welche anzeigt, dass zumindest in Teilen des Films eine ferromagnetische Koppelung zwischen den ferromagnetischen Schichten F_1 und F_2 vorliegt.

[0143] Ein bestimmtes Mittel kann in den Sensorbereich aufgenommen werden, um lokal zusätzliche Wärme, z. B. durch Überschussstromtempern während eines bestimmten Temperungsschritts, zu erzeugen. Bei einem derartigen Schritt weisen nur Bereiche, wo Überschussleistung abgegeben wird, eine erhöhte Temperatur auf, welche ausreichend ist, Diffusionsprozesse und schließlich eine Bildung schwach gekoppelter Bereiche in dem AAF einzuleiten. Ein anderer Ansatz kann sein, den Stapel lokal unter Verwendung fokussierten Laserlichts zu erwärmen. Mit der gegebenen Tatsache, dass die Sensoren nicht in der Umgebung der MRAM-Matrix angeordnet sind, kann zu diesem Zweck ein ziemlich großes Belichtungssystem ausreichend sein.

[0144] Wenn die MTJ-Detektionselemente, entweder als MRAM-Stapel vom herkömmlichen Typ oder vom Umschalttyp, einmal gebildet wurden, kann jeder geeignete herkömmliche Schaltkomplex als der Detektionsschaltkomplex zum Messen des Widerstands des Messelements verwendet werden, um der Anwendung zu entsprechen. Für Anwendungen mit hohem Leistungsvermögen werden in [Fig. 32](#) und [Fig. 33](#) zwei alternative Ausleseschaltungen dargestellt, welche im Prinzip die gleichen sind, wie Ausleseschaltungen für MRAMs. Wie in [Fig. 32](#) gezeigt, wird ein Operationsverstärker **320** verwendet, um eine Spannung über einen Vorspannungstransistor **340** zu verstärken, welche an einem Lastwiderstand **310** abfällt, welcher mit dem Sensor **330** in Reihe geschaltet ist. In [Fig. 32](#) wird die Vorspannung auf dem Sensor mit einem ziemlich festen Wert (ungefähr 200 mV) angeklemmt, und die Veränderung des Widerstands des Sensors bewirkt eine Veränderung des Stroms, was zu einer Spannungsänderung an dem Lastwiderstand führt. Diese Spannungsänderung wird dann verstärkt. Ein Nachteil der Schaltung ist,

dass sie zu einer Schwankung der Klemmspannung führt, wenn der Widerstand des Sensors verändert wird.

[0145] In [Fig. 33](#) wird eine verbesserte Schaltung präsentiert, welche Material aus US-6,205,073 B1 in dem Kontext des Auslesens eines MTJ-Speichers verwendet. Bei diesem Entwurf gibt es zwei Operationsverstärker. Ein Ausgangsoperationsverstärker **360** verstärkt den Ausgang eines vorspannungsgeregelten Operationsverstärkers **350**. Der Ausgang des vorspannungsgeregelten Operationsverstärkers wird auch in einen Eingang des Vorspannungstransistors **340** eingespeist. Ein negativer Eingang des Operationsverstärkers **350** wird durch die Spannung an dem Sensor gespeist. Bei diesem Entwurf ermöglicht die negative Rückkoppelung des vorspannungsgeregelten Operationsverstärkers einen aktiven Weg, die Spannung an den Sensor **330** zu klemmen, welcher ein stabileres Signal und eine schnellere Auslesezeit bieten kann.

[0146] Der Ausgang V_{signal} des Sensormoduls **330**, welches beispielsweise der Schaltung ähnelt, welche in [Fig. 32](#) oder [Fig. 33](#) gezeigt wird, kann, wie in [Fig. 34](#) illustriert, durch einen Sensorausleseverstärker **400** ausgelesen werden, welcher einen zweiten Eingang V_{thres} aufweist, um einen Vergleich mit einer vorbestimmten Schwelle zu ermöglichen. In [Fig. 34](#) stammt das Vergleichssignal (V_{thres}) aus der Steuerlogik **402** und kann sogar eine programmierbare Ebene sein. Das resultierende höhere oder niedrigere Signal (als die Schwellenspannung), welches auf dem Ausgang des Verstärkers **400** erhalten wird, ist im Grunde ein digitales Signal und kann vorzugsweise z. B. mittels einer Grenzmesseinrichtung, welche Grenzmesszellen enthält, unter Verwendung interner Register gemäß der IEEE-Norm 1149.1 an einen Ausgangspol übermittelt werden ([Fig. 34](#)).

[0147] Die Erfindung macht es möglich, mehrere Sensoren zu verwenden, um Ströme zu messen, welche von verschiedenen Blöcken verbraucht werden, um den Teil des Entwurfs zu bestimmen, welcher zu viel oder zu wenig Strom verbraucht. [Fig. 35](#) illustriert ein chipintegriertes System (SOC) **400**, bei welchem die angewandten Kernblöcke **402** alle eine Stromsensoreinheit **404** aufweisen (welche ein Satz verteilter Sensoren pro Kern sein kann). Die Sensoreinheiten **404** sind mit einem Zugangsmittel verbunden (vorzugsweise mit einer Grenzmesseinrichtung wie in [Fig. 34](#)). Die Prüffähigkeit kann eine zusätzliche Verarbeitungsfunktion auf diesem Chip sein (in der Zeichnung nicht dargestellt). Durch die Grenzmessung kann die Prüffähigkeit auch außerhalb des Chips angeordnet werden. Die Abnutzung des IC während seiner Lebensdauer kann überwacht werden.

[0148] Ein spezifischeres Beispiel wird in [Fig. 36](#)

gegeben, bei welchem Stromsensoren auf den Stromversorgungsleitungen von mindestens einem Verarbeitungsmodul oder Kern angeordnet werden. Das Stromverteilungsnetz wird in einer vereinfachten Form gezeigt und ist normalerweise viel komplexer als das, welches in [Fig. 35](#) und [Fig. 36](#) schematisch gezeigt ist. Die Ausgänge der Stromsensoren **404** werden in einen zentralen Aufgabeneinplaner **700** eingespeist. Die Funktion des Einplaners **700** ist es, Informationen über den Stromverbrauch der verschiedenen Module oder Kerne **402** zu sammeln und dann die Einplanung der Aufgaben auf der Grundlage dynamischer Stromverteilungsschemata zu bestimmen. Der Einplaner **700** kann als Software implementiert werden, welche auf einer geeigneten Verarbeitungsvorrichtung läuft, wie beispielsweise einem herkömmlichen Mikroprozessor, z. B. einem eingebetteten Mikroprozessor oder einer programmierbaren digitalen Logikvorrichtung, wie beispielsweise einem programmierbaren Gate-Array, z. B. einer programmierbaren Array-Logik, einem programmierbaren Logik-Array, einem feldprogrammierbaren Gate-Array oder ähnlichem. Die Kerne **402** sind Verarbeitungseinheiten, welche Strom verbrauchen und welche heiß werden können, wenn sie bei ihrer maximalen Kapazität laufen. Auf der Grundlage der Strom-(Leistungs)-Messung pro Verarbeitungseinheit kann eine gleichmäßigere Verarbeitungslast eingeplant werden, d. h. der Aufgabeneinplaner **700** kann einen Lastausgleich durchführen. Dann werden Laststeuerungen an die Kerne **402** zurückgeführt. Diese Funktionalität ist besonders nützlich bei Systemen, welche viele parallele Verarbeitungseinheiten aufweisen. Dies verhindert unnötige Warteschlangen, und es kann auch eine übermäßige Wärmeentwicklung in einem spezifischen Kern **402** verhindert werden. Es können auch Stromsparschemata auf diese Weise gesteuert werden, wobei folglich teure Wärmeübertragungslösungen auf der Endfertigungsebene vermieden werden. Bei anderen Beispielen (nicht gezeigt) kann der Aufgabeneinplaner **700** durch verschiedene Schaltkreise ersetzt werden, welche verschiedene Funktionalitäten aufweisen, wie beispielsweise eine Messeinheit oder ein Unterbrechungserzeuger. Von dort wird ein Kontakt entweder zu einem internen Block oder nach außen oder zu einer Software-Umgebung zur weiteren Bearbeitung, wie beispielsweise für eine andere Steuerung oder Überwachungsaufgaben, hergestellt.

[0149] Die Stromsensoren, welche in allen oben stehenden Ausführungsformen beschrieben sind, können in integrierten Schaltkreisen vieler Arten und insbesondere in CMOS-Schaltungen und MRAM-Schaltungen implementiert werden. Ausgänge derartiger Sensoren können gemäß gängiger Praxis in Messketten verbunden werden, um viele Sensorausgänge auf einem oder mehreren Ausgängen des integrierten Schaltkreises zu multiplexen. Derartige integrierte Schaltkreise können in herkömmli-

chen Endverbrauchergeräten, insbesondere in Mobilgeräten wie beispielsweise in Laptop-Computern, Funktelefonen und Sicherheitssystemen, wie beispielsweise ABS für Auto- und Luftfahrtelektronik und so weiter, verwendet werden. Wie oben stehend beschrieben wurde, weist ein Sensor zum Detektieren einer Magnetfeldstärke, welche von dem Strom erzeugt wird, welcher gemessen werden soll, ein Sensorelement unter Verwendung einer Magnetic-Tunnel-Junction und einen Detektionsschaltkomplex auf, wobei das Sensorelement einen Widerstand aufweist, welcher mit dem Magnetfeld variiert, umfasst das Sensorelement eine Tunnel-Junction und ist der Detektionsschaltkomplex eingerichtet, um einen Tunnelstrom zu detektieren, welcher über die Tunnel-Junction fließt. Anisotropie, welche beispielsweise durch Längsausdehnung bewirkt wird, ist in einem Winkel, vorzugsweise orthogonal zu dem Magnetfeld orientiert. Die Vorteile umfassen eine größere Empfindlichkeit und folglich eine geringere Empfänglichkeit für Störgeräusche. Sie kann auch eine einfache Integration mit CMOS-Prozessen der nächsten Generation bereitstellen, kompakter sein und weniger Strom verbrauchen. Die größere Empfindlichkeit ermöglicht, dass weniger Nachverarbeitung verwendet werden muss, um Strom für Anwendungen wie beispielsweise für Mobilgeräte einzusparen. Anwendungen umfassen Stromsensoren, eingebaute Stromsensoren und IDDQ-Prüfung sogar für CMOS-Prozesse der nächsten Generation. Andere Variationen können innerhalb des Schutzzumfangs der Ansprüche ins Auge gefasst werden.

Patentansprüche

1. Halbleitervorrichtung umfassend:
 - einen magnetischen Direktzugriffsspeicher, welcher Magnetic-Tunnel-Junctions umfasst;
 - ein leitfähiges Element (**200**, **42**, **61**, **90**, **91**) zum Führen eines Gleichstroms, eines variierenden Stroms oder eines Wechselstroms (Ix);
 - eine Strommessvorrichtung (**210**), wobei die Strommessvorrichtung (**210**) in der Halbleitervorrichtung integriert ist und galvanisch von dem leitfähigen Element (**200**, **42**, **61**, **90**, **91**) isoliert ist, wobei die Strommessvorrichtung (**210**) mindestens eine Tunnel-Magnetowiderstandsvorrichtung zum Messen des Stroms (Ix) umfasst, welcher durch das leitfähige Element fließt, wobei die Tunnel-Magnetowiderstandsvorrichtung eine weitere Magnetic-Tunnel-Junction umfasst, wobei die Strommessvorrichtung (**210**) und der magnetische Direktzugriffsspeicher aus einem gemeinsam genutzten Magnetic-Tunnel-Junction-Stapel hergestellt werden.
2. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Magnetic-Tunnel-Junction-Stapel Folgendes umfasst:
 - ein elektrisch isolierendes Material (**103**), welches ausgelegt ist, eine magnetoresistive Tunnelbarriere

zu bilden,

– einen festgelegten magnetischen Bereich **(105)**, welcher auf einer Seite des elektrisch isolierenden Materials **(103)** angeordnet ist, wobei der festgelegte magnetische Bereich **(105)** einen magnetischen Momentvektor benachbart zu dem elektrisch isolierenden Material **(103)** aufweist,

– einen beinahe ausgeglichenen, freien magnetischen Bereich **(220)**, welcher auf einer gegenüberliegenden Seite des elektrisch isolierenden Materials **(103)** angeordnet ist, wobei der freie magnetische Bereich **(220)** einen magnetischen Momentvektor **(222)** benachbart zu dem isolierenden Material **(103)** aufweist und in einer Position parallel oder antiparallel zu dem magnetischen Momentvektor des festgelegten magnetischen Bereichs **(105)** orientiert ist, wobei der freie magnetische Bereich **(220)** ein künstliches, antiferromagnetisches Schichtmaterial umfasst, welches N ferromagnetische Schichten (F1, F2) aufweist, welche antiferromagnetisch gekoppelt sind, wobei N eine ganze Zahl größer oder gleich zwei ist.

3. Halbleitervorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Strommessvorrichtung **(210)** eine freie Magnetschicht aufweist, welche eine leichte Achse aufweist, welche so orientiert ist, dass sie im Wesentlichen senkrecht zu einem Magnetfeld ist, welches von einem unter Messung befindlichen Strom bewirkt wird.

4. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 3, wobei die Strommessvorrichtung **(210)** eine leichte Achse aufweist, wobei die leichte Achse der freien Schicht durch eine Formverlängerung bewirkt wird.

5. Halbleitervorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Strommessvorrichtung **(210)** eine festgelegte Magnetschicht mit einer Magnetisierungsrichtung und eine freie Magnetschicht mit einer leichten Achse aufweist, wobei die Magnetisierungsrichtung der festgelegten Magnetschicht in einem Winkel zu der leichten Achse der freien Magnetschicht von vorzugsweise zwischen 45° und 135° und noch bevorzugter im Wesentlichen senkrecht zu der leichten Achse der freien Magnetschicht orientiert ist.

6. Halbleitervorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Strommessvorrichtung **(210)** einem zusätzlichen Magnetfeld ausgesetzt wird, welches entweder ein gleich bleibendes Feld, ein variierendes Feld oder ein Wechselfeld sein kann.

7. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 6, wobei die Halbleitervorrichtung benachbart einer ersten Seite der Strommessvorrichtung **(210)** einen ersten Leiter **(90)** zum Führen eines Stroms (I_x), welcher gemessen werden soll, und benachbart einer zweiten

Seite der Strommessvorrichtung **(210)** einen zweiten Leiter **(91)** zum Leiten eines Stroms (I_2) umfasst, wobei sich der erste Leiter **(90)** und der zweite Leiter **(91)** kreuzen, jedoch nicht elektrisch verbunden sind.

8. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 7, wobei die freie Magnetschicht der Strommessvorrichtung **(210)** eine leichte Achse aufweist, wobei der erste Leiter **(90)** und der zweite Leiter **(91)** jeweils einen Winkel von im Wesentlichen zwischen 30° und 90° hinsichtlich der leichten Achse der Strommessvorrichtung **(210)** aufweisen.

9. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 7, weiterhin umfassend eine Rückkopplungsschaltung **(80)** zum Messen von Magnetowiderstandsänderungen an der Strommessvorrichtung **(210)** und zum Steuern des Stroms (I_2) in dem zweiten Leiter **(91)** auf eine derartige Weise, dass keine Magnetowiderstandsänderung an der Strommessvorrichtung **(210)** beobachtet wird.

10. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 9, wobei die Stromrückkopplungsschaltung **(80)** Mittel zur Erzeugung eines Rückkopplungssignals aufweist, welches den Strom (I_x) bezeichnet, welcher gemessen werden soll und von dem ersten Leiter **(90)** geführt wird.

11. Halbleitervorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, wobei mindestens der erste Leiter **(90)** und/oder der zweite Leiter **(91)** mindestens eine vertikale Leitungskomponente und mindestens eine horizontale Leitungskomponente umfasst, wobei es einen rechten Winkel **(44)** zwischen der vertikalen Leitungskomponente und der horizontalen Leitungskomponente gibt, welche folglich eine Leiterstruktur bilden, welche mindestens einen L-förmigen Teil aufweist, dessen rechter Winkel **(44)** zu der Strommessvorrichtung **(210)** benachbart angeordnet ist.

12. Halbleitervorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiterhin umfassend einen Flussverdichter **(50; 70)**, um das Magnetfeld an dem Ort der Strommessvorrichtung **(210)** zu erhöhen.

13. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 12, wobei der Flussverdichter **(50; 70)** einen Dummy-Magnetic-Tunnel-Junction-Stapel umfasst, welcher um mindestens eine vertikale Leitungskomponente herum gemustert ist.

14. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 12, wobei der Flussverdichter **(50; 70)** ringförmig ist und eine Lücke **(51)** zwischen den Polen umfasst, wobei die Strommessvorrichtung **(210)** in der Lücke **(51)** angeordnet ist.

15. Halbleitervorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Strommessvorrichtung

tung (**210**) mit einer CMOS- oder MOS-Verarbeitung verträglich ist.

16. Halbleitervorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Halbleitervorrichtung ein integrierter Schaltkreis ist.

17. Halbleitervorrichtung nach Anspruch 16, wobei die Strommessvorrichtung (**210**) eingerichtet ist, Ruhestrome (IDDQ) oder Einschwingströme (IDDT) zu messen.

18. Verfahren zum Herstellen einer Halbleitervorrichtung nach Anspruch 1, das Verfahren umfassend einen Schritt des Bereitstellens eines Magnetic-Tunnel-Junction-Stapels, welcher von dem magnetischen Direktzugriffsspeicher und der Strommessvorrichtung (**210**) gemeinsam genutzt wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, wobei der Schritt des Bereitstellens des Magnetic-Tunnel-Junction-Stapels einen Schritt des Ablagerns eines freien magnetischen Bereichs umfasst.

20. Verfahren nach Anspruch 19, wobei der Schritt des Ablagerns eines freien magnetischen Bereichs einen Schritt des Ablagerns eines künstlichen, antiferromagnetischen, freien Bereichs umfasst, welcher mehrere antiferromagnetisch gekoppelte, ferromagnetische Schichten umfasst.

21. Verfahren nach Anspruch 20, wobei der künstliche, antiferromagnetische, freie magnetische Bereich mit einem magnetischen Nettomoment abgelagert wird, welches im Wesentlichen null ist, das Verfahren weiterhin umfassend einen Schritt des Modifizierens des magnetischen Nettomoments des freien magnetischen Bereichs, um ihn so nicht null zu machen.

Es folgen 18 Blatt Zeichnungen

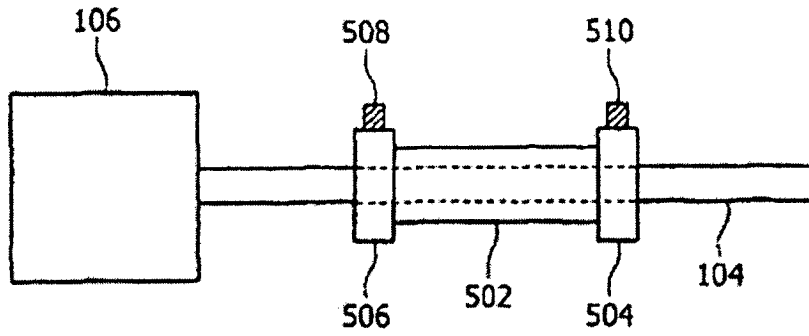


FIG. 1 Stand der Technik

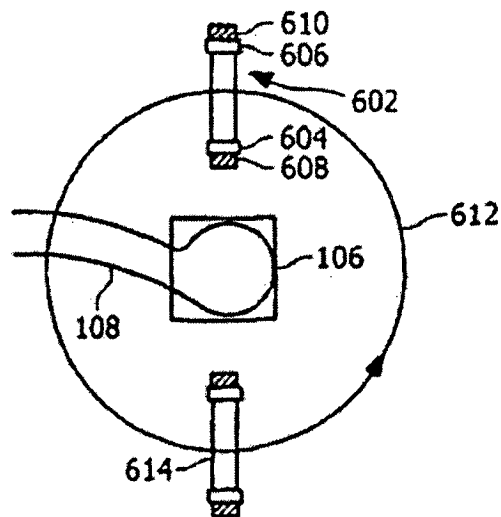


FIG. 2

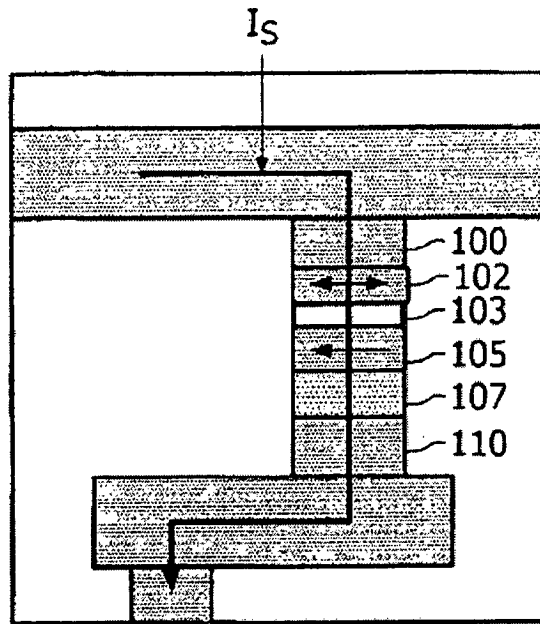


FIG. 3

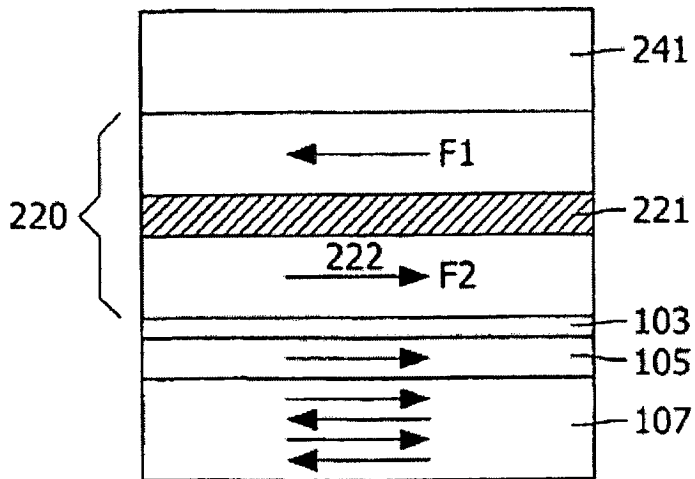


FIG. 4

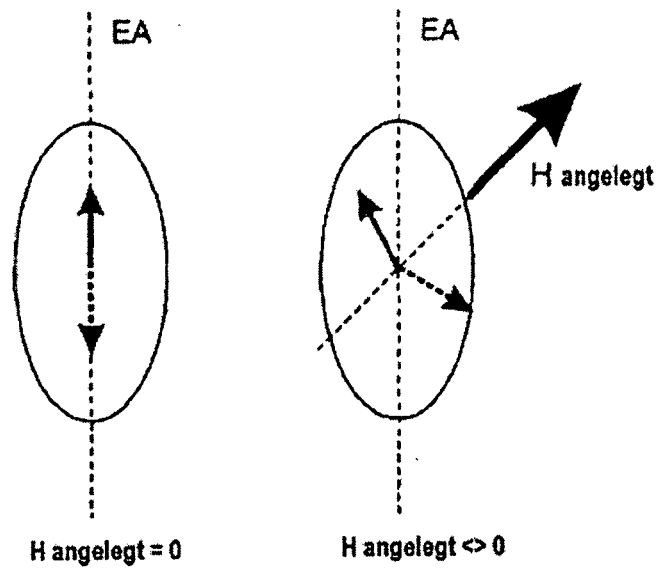


FIG.5

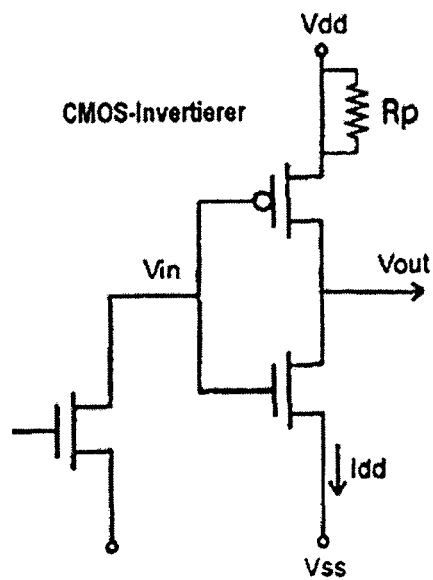


FIG.6A

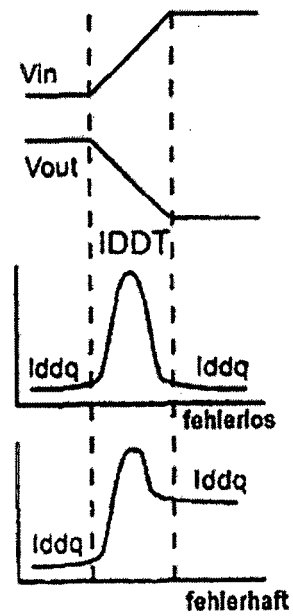


FIG.6B

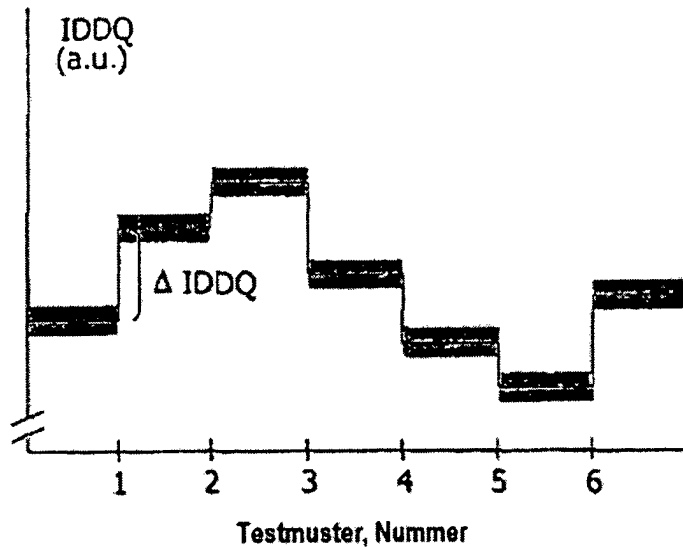


FIG.7

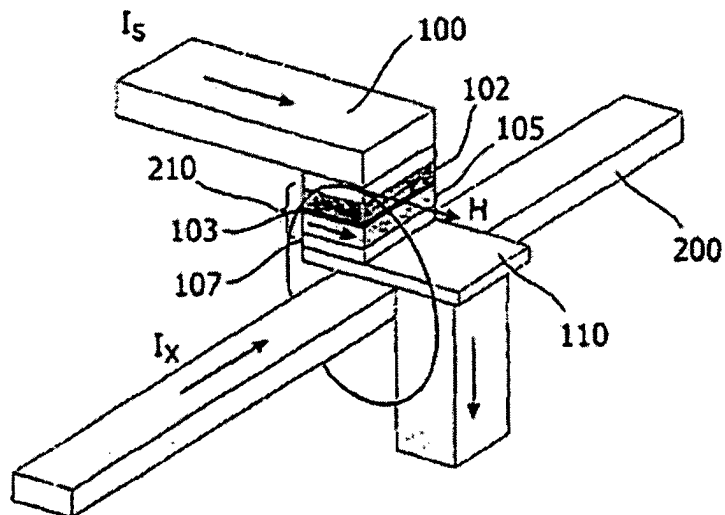


FIG.8

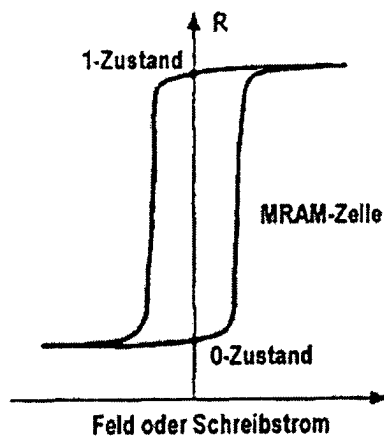


FIG. 9A

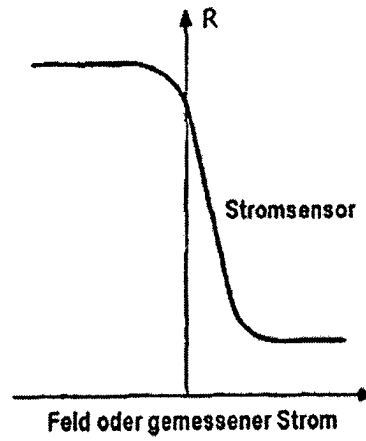


FIG. 10A

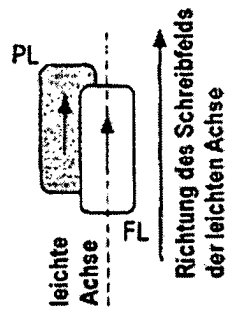


FIG. 9B

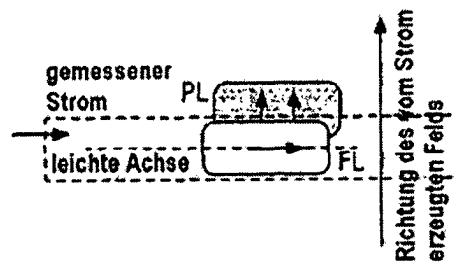


FIG. 10B

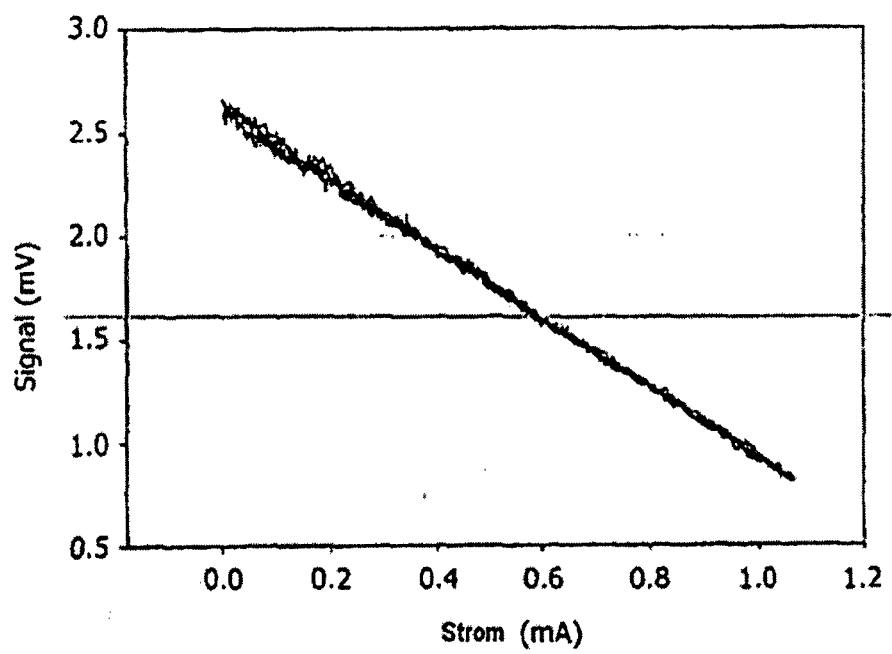


FIG.11

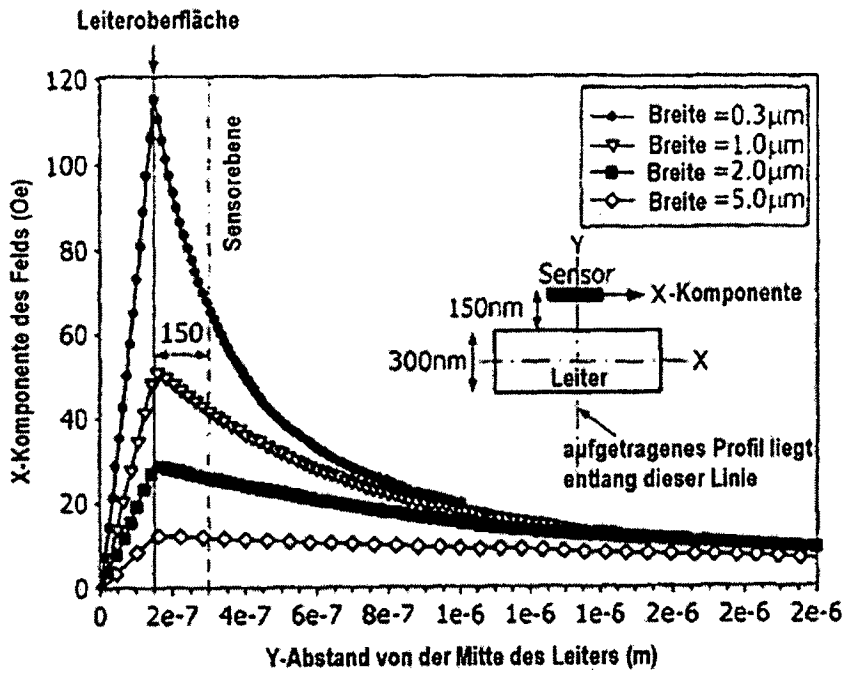


FIG. 12

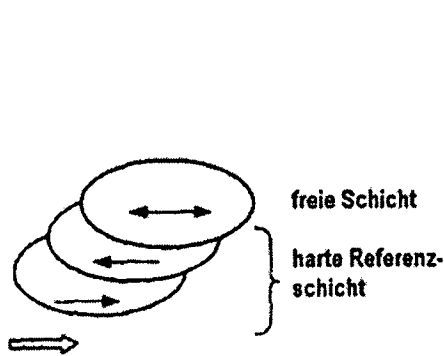


FIG. 13

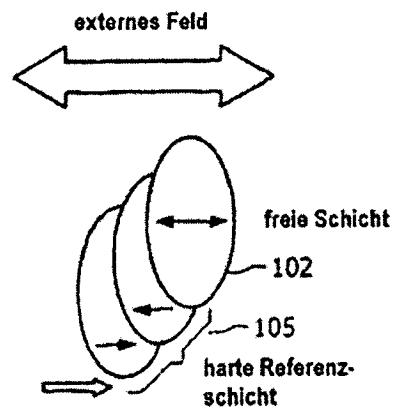


FIG. 14

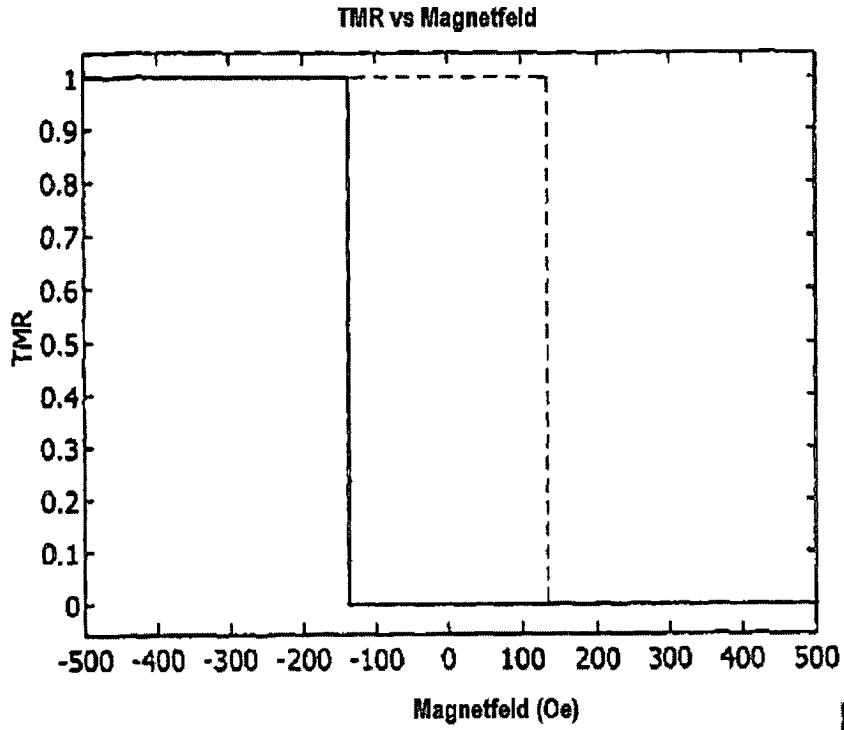


FIG. 15

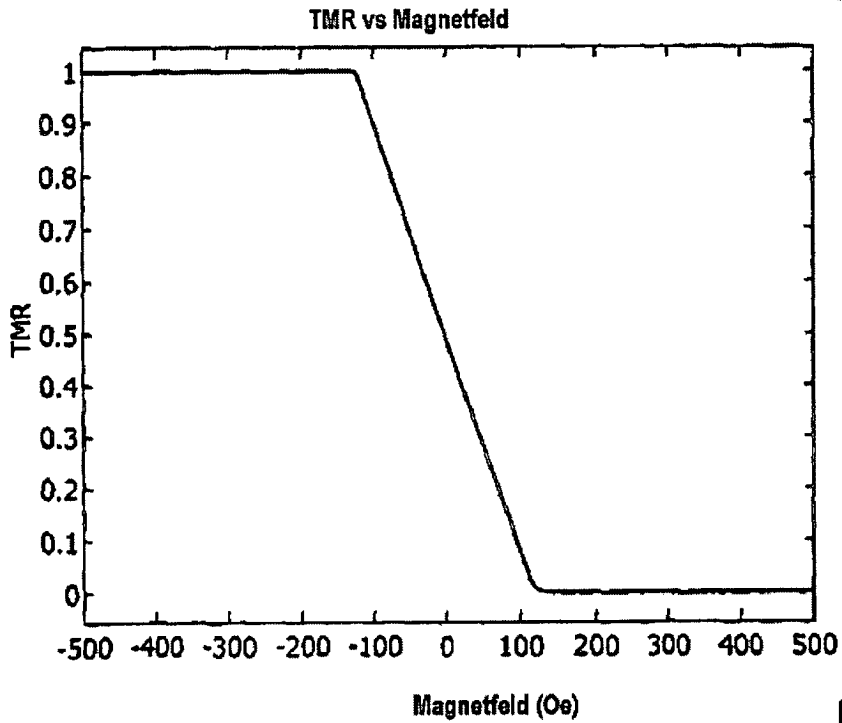


FIG. 16

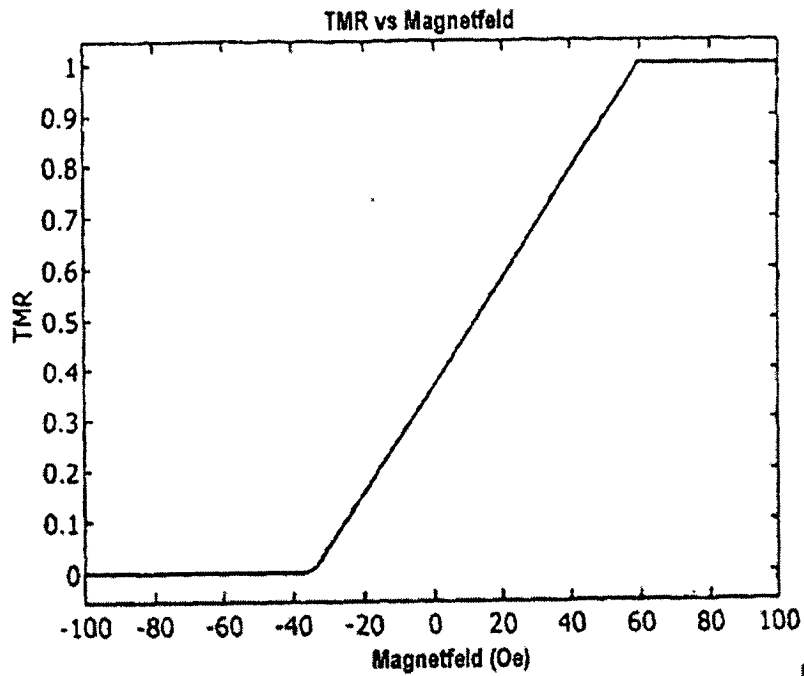


FIG. 17

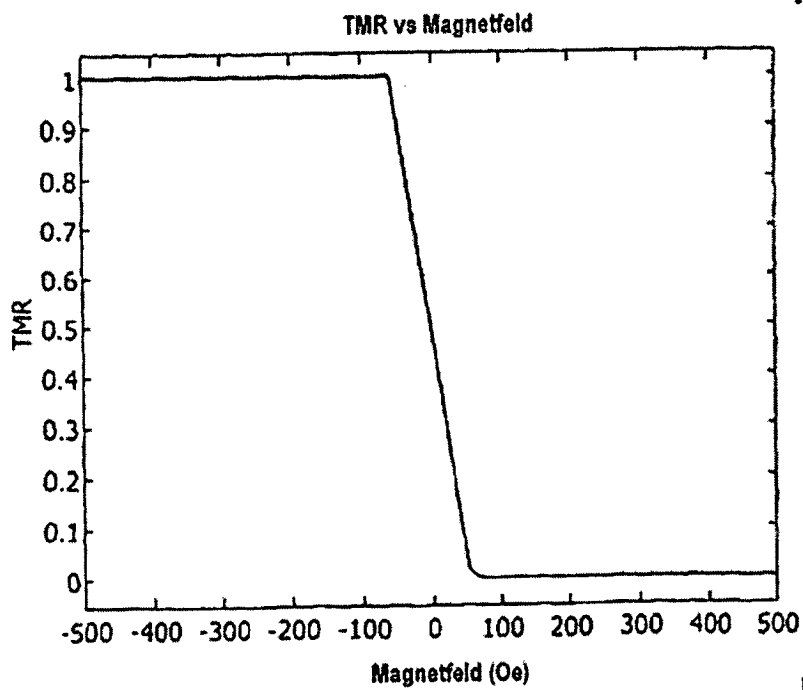


FIG. 18

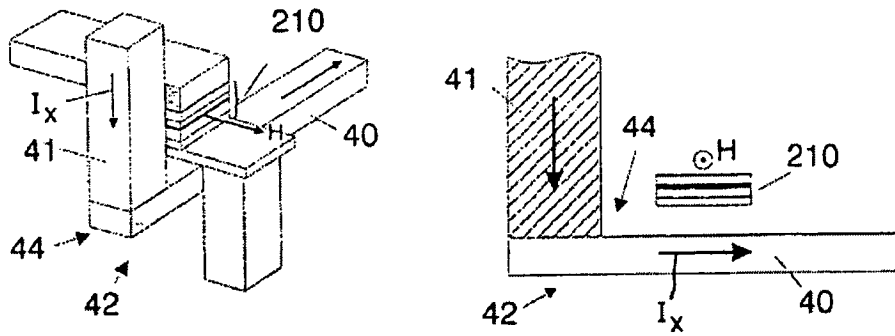


FIG. 19

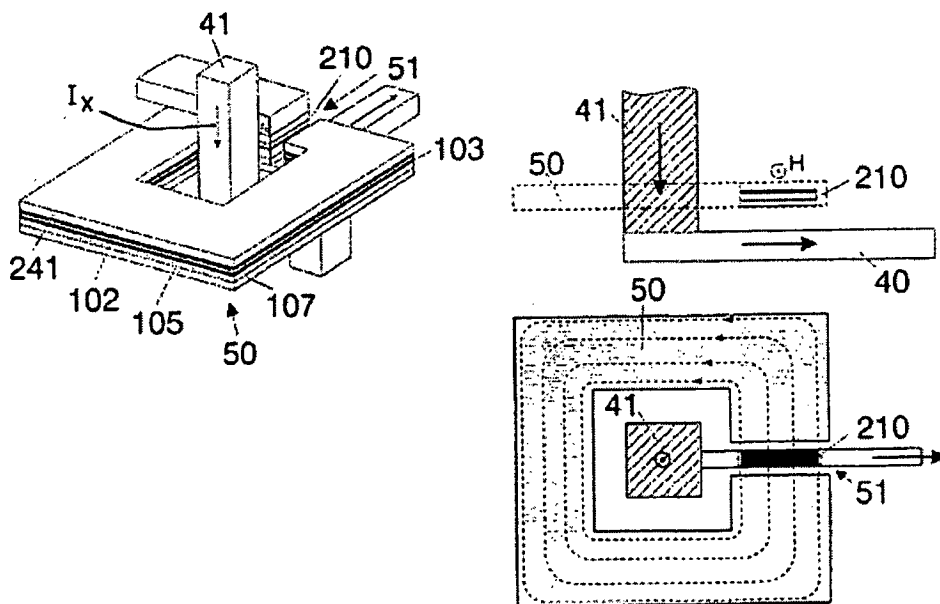


FIG. 20

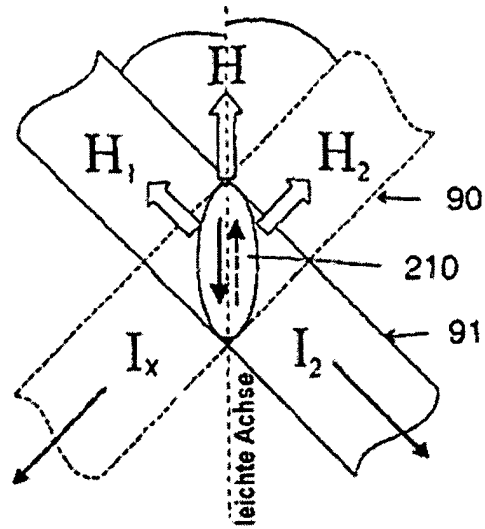


FIG. 23

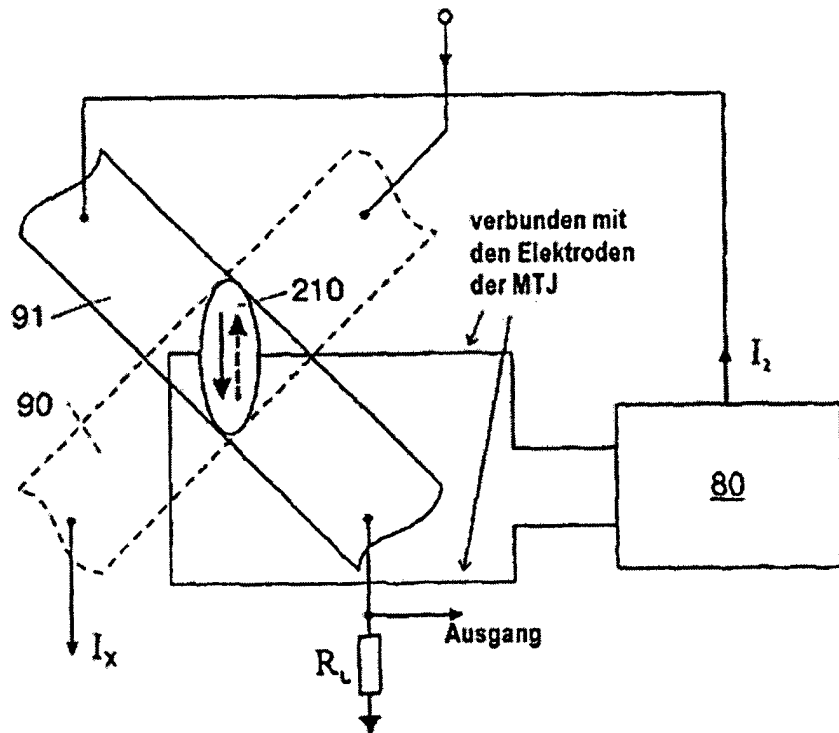


FIG. 24

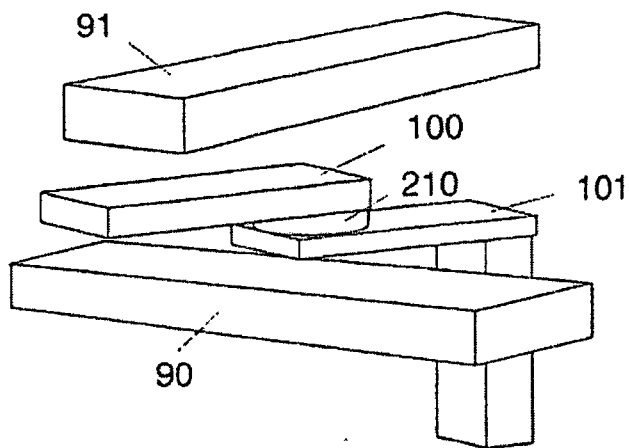


FIG. 25

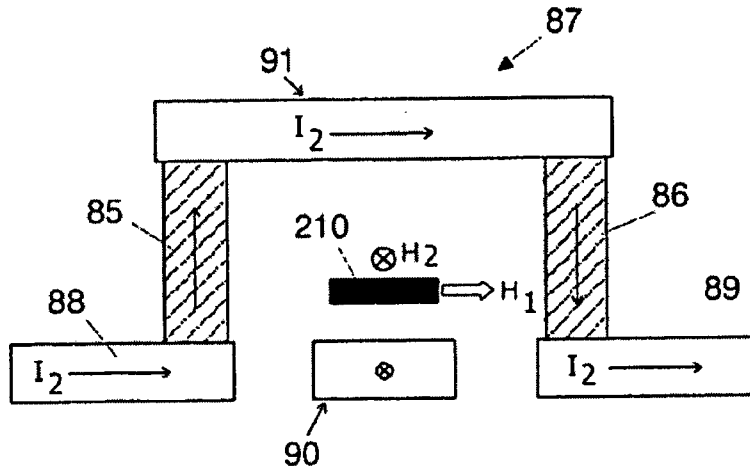


FIG. 26

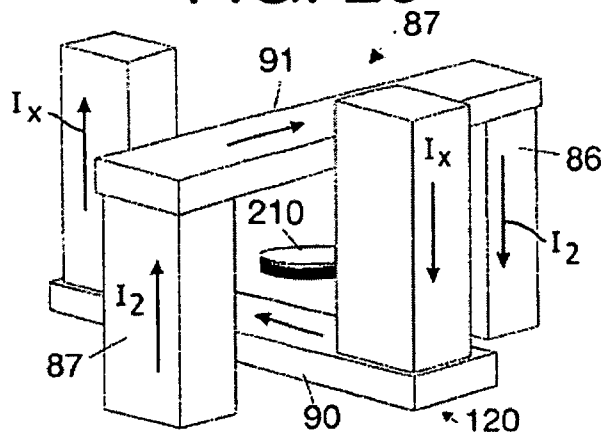


FIG. 27

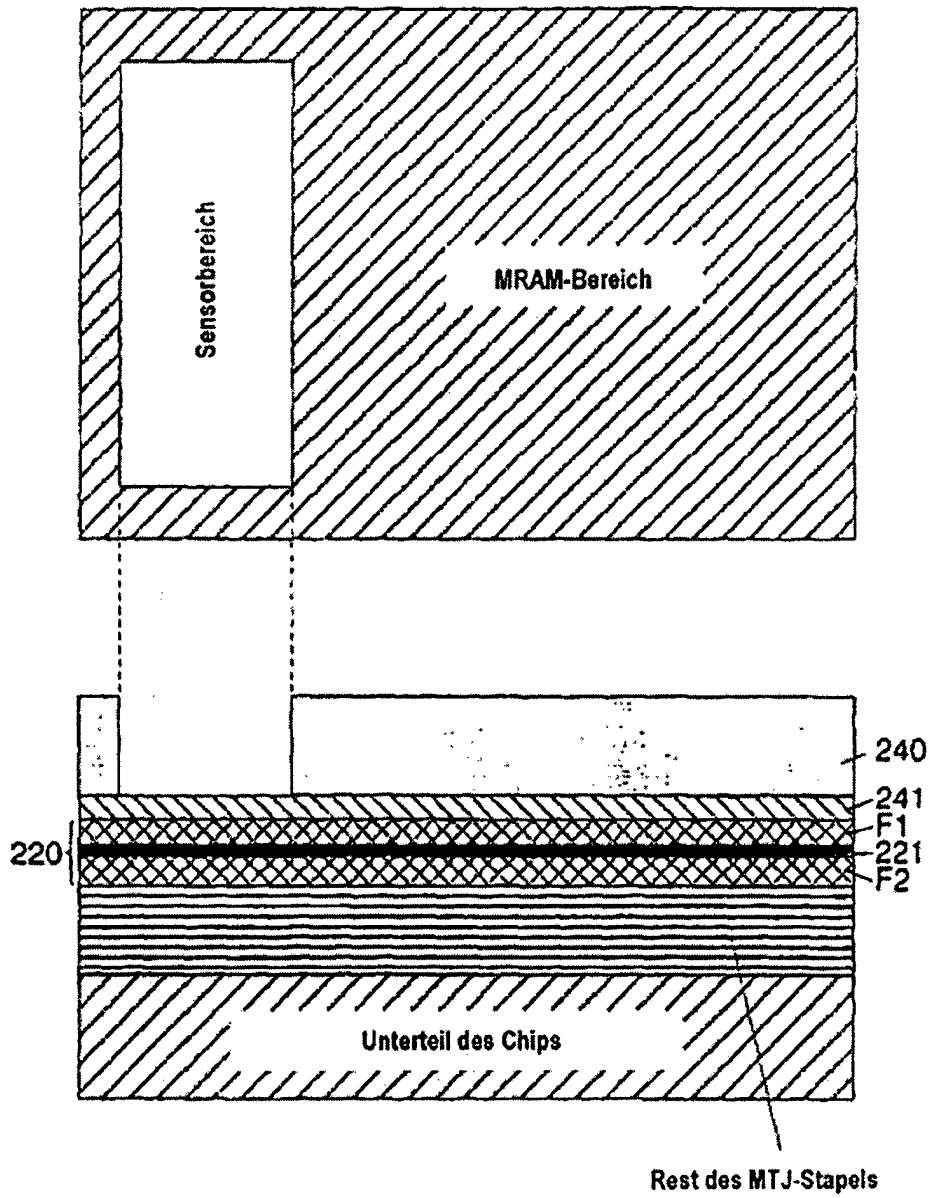


FIG. 28

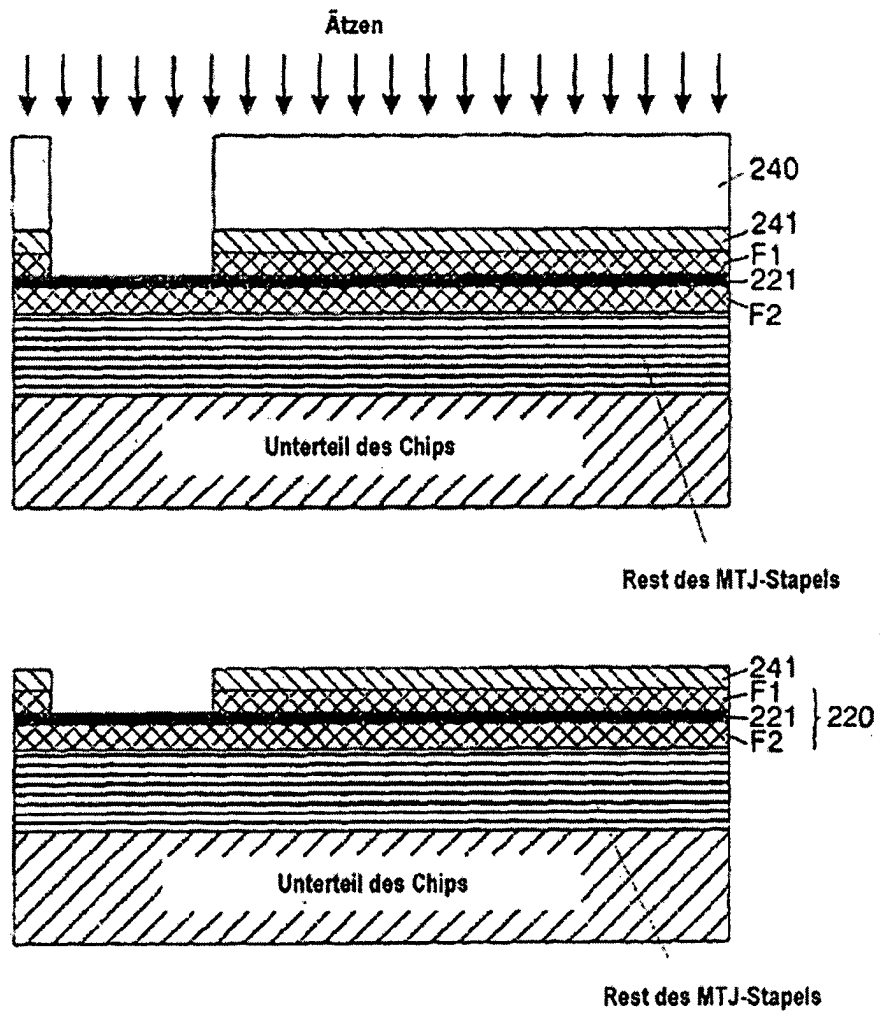


FIG. 29

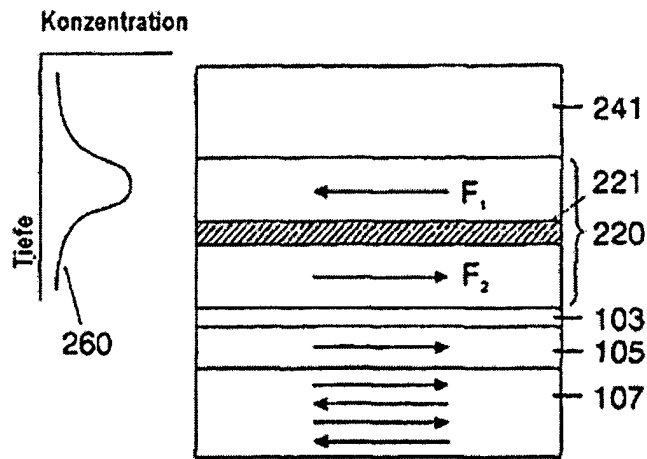


FIG. 30

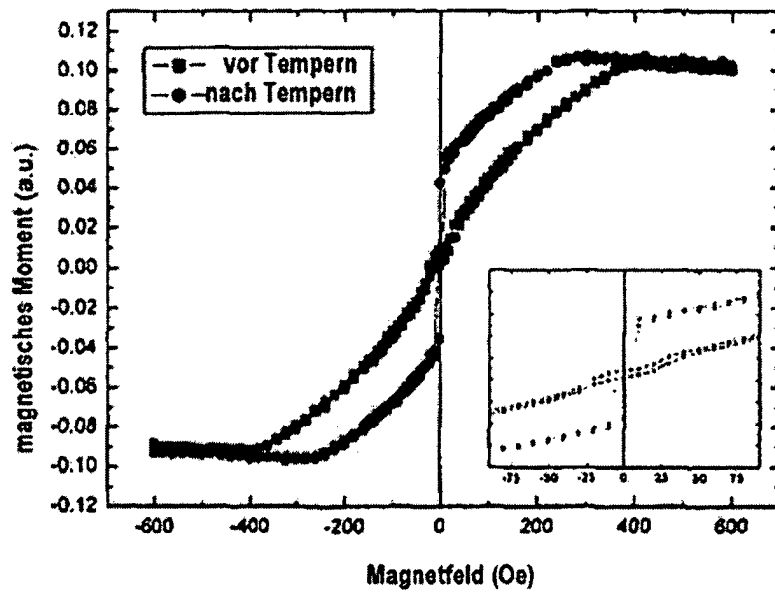


FIG. 31

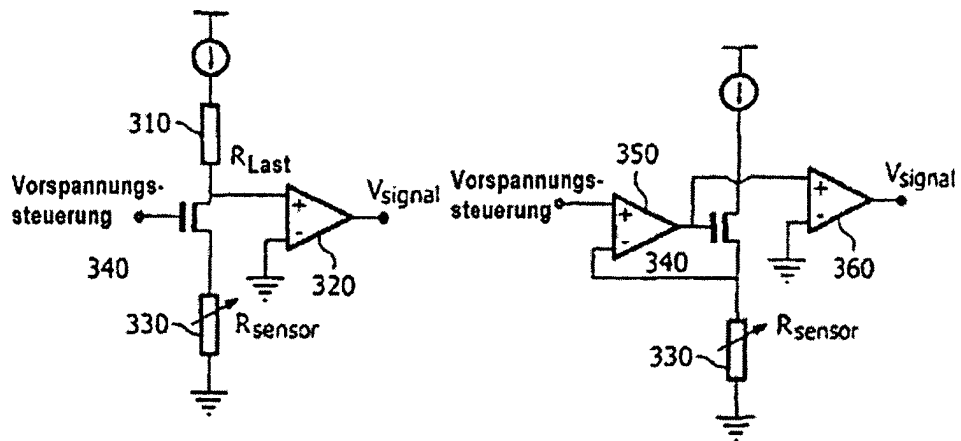


FIG. 32

FIG. 33

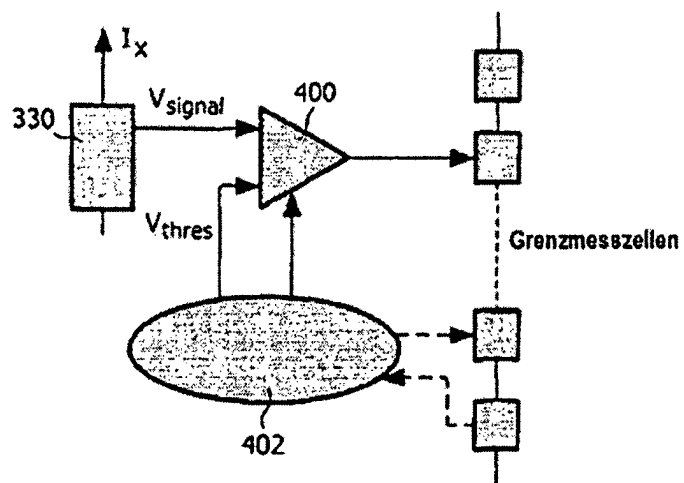


FIG. 34

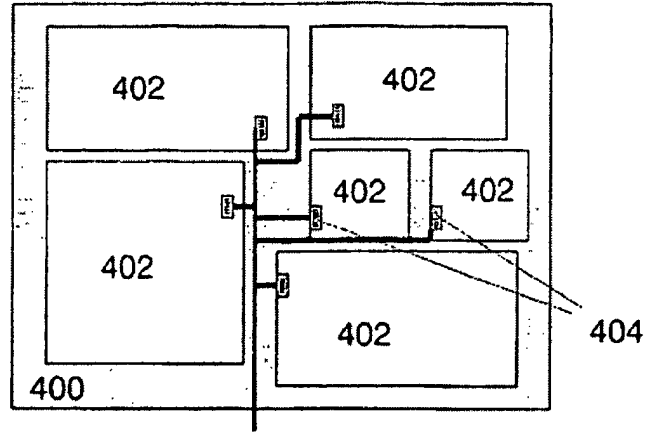


FIG. 35

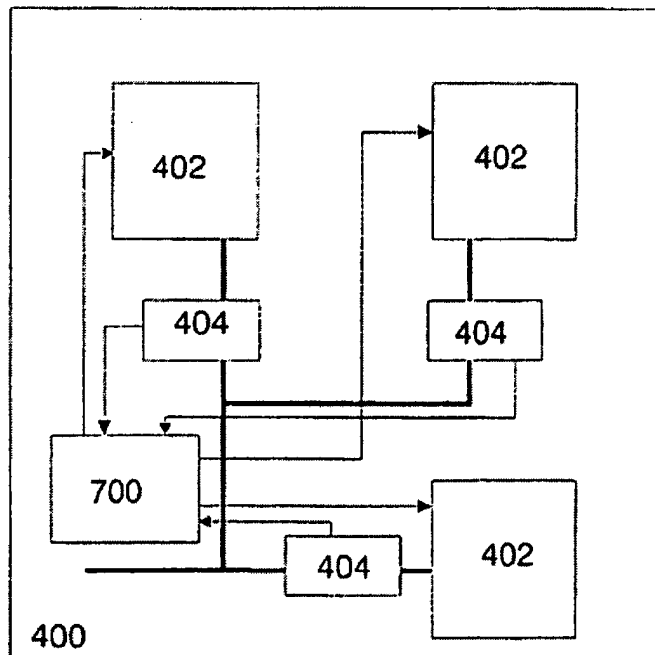


FIG. 36