



(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der  
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2022/120319**  
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2  
IntPatÜbkG)  
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2021 005 049.4**  
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2021/072400**  
(86) PCT-Anmeldetag: **15.11.2021**  
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **09.06.2022**  
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung  
in deutscher Übersetzung: **14.09.2023**

(51) Int Cl.: **H01F 3/10 (2006.01)**  
**H01F 27/24 (2006.01)**  
**H01F 10/10 (2006.01)**  
**H01F 41/30 (2006.01)**  
**H10N 97/00 (2023.01)**

(30) Unionspriorität:  
**17/108,096 01.12.2020 US**

(71) Anmelder:  
**FERRIC INC., New York, NY, US**

(74) Vertreter:  
**Prüfer & Partner mbB Patentanwälte  
Rechtsanwälte, 81479 München, DE**

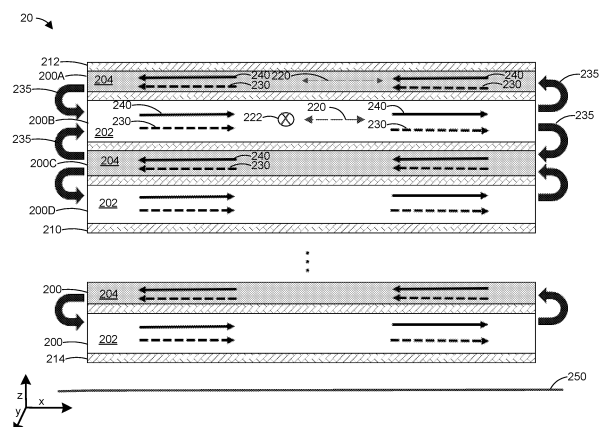
(72) Erfinder:  
**Lekas, Michael, Brooklyn, NY, US; Davies, Ryan,  
New York, NY, US; Sturcken, Noah, New York, NY,  
US; Shishkov, Denis, Brooklyn, NY, US**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Magnetkern mit hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten und Strukturen, welchen diesen enthalten**

(57) Zusammenfassung: Ein planarer Magnetkern enthält mehrere ferromagnetische Schichten, darunter mehrere hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten und mehrere weichferromagnetische Schichten. Jede ferromagnetische Schicht umfasst eine weichferromagnetische Schicht oder eine hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht. Jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht ist eine benachbarte ferromagnetische Schicht von mindestens einer weichferromagnetischen Schicht. Der planare Magnetkern umfasst auch eine Vielzahl von Isolatorschichten, wobei jede Isolatorschicht zwischen benachbarten ferromagnetischen Schichten angeordnet ist. Jede ferromagnetische Schicht hat eine leichte Magnetisierungsachse, die parallel zu einer Hauptebene des planaren Magnetkerns verläuft, wobei die leichten Magnetisierungsachsen ausgerichtet sind. Jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht ist magnetisiert, um einen in der Ebene liegenden Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht in einer ersten Richtung zu erzeugen, die parallel zur leichten Magnetisierungsachse verläuft, und einen geschlossenen Pfad durch eine benachbarte weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung parallel zur ersten Richtung zu bilden.



## Beschreibung

## Zusammenfassung

## Querverweis auf verwandte Anwendungen

**[0001]** Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der US-Patentanmeldung Nr. 17/108,096, eingereicht am 1. Dezember 2020, mit dem Titel „MAGNETIC CORE WITH HARD FERROMAGNETIC BIASING LAYERS AND STRUCTURES CONTAINING SAME“, die hiermit durch Bezugnahme einbezogen wird.

## Technischer Bereich

**[0002]** Diese Anwendung bezieht sich allgemein auf Magnetkerne und Vorrichtungen, die Magnetkerne enthalten, wie z. B. Induktoren.

## Hintergrund

**[0003]** Induktoren für die Mikroelektronik bestehen aus einer abwechselnden Anordnung von weichferromagnetischen Schichten und Isolatorschichten. Ein Beispiel für einen typischen horizontal geschichteten Magnetkern 10 ist in **Fig. 1A** dargestellt. Der Kern umfasst weichferromagnetische Schichten 100 mit einer Isolatorschicht 110, die zwischen benachbarten weichferromagnetischen Schichten 100 angeordnet ist. Die Spule ist so konfiguriert, dass sie einen magnetischen Fluss durch die weichferromagnetischen Schichten 100 erzeugt, was zu abwechselnden Magnetisierungszuständen 120 führt, wie durch die Pfeile angezeigt.

**[0004]** Ein Problem bei dieser Konfiguration besteht darin, dass ein Teil des magnetischen Flusses einen geschlossenen Pfad innerhalb einer bestimmten Schicht bildet, zusätzlich zur Bildung eines geschlossenen Pfades in einer benachbarten Schicht. Die Bildung eines geschlossenen Pfades innerhalb einer bestimmten Schicht führt zu mehreren magnetischen Domänen 130 mit antiparallelen Magnetisierungszuständen 135, die die Energie für den/die geschlossenen Pfad(e) innerhalb der Schicht minimieren, wie z. B. in **Fig. 1B** dargestellt, die eine Draufsicht auf die obere weichferromagnetische Schicht 100 im Kern 10 zeigt. Der obere Isolator 110 ist in **Fig. 1B** aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Zwischen den magnetischen Domänen 130 bilden sich magnetische Domänenwände 140, in denen einige der magnetischen Momente 145 nicht mit einer der magnetischen Domänen 130 ausgerichtet sind. Das von der Induktionsspule angelegte Feld bewirkt, dass sich diese magnetischen Momente 145 neu ausrichten, was sowohl Hysterese als auch Wirbelstromverluste verursacht.

**[0005]** Es wäre wünschenswert, diese und/oder andere Defizite des Standes der Technik zu beseitigen.

**[0006]** Die hier beschriebenen Ausführungsbeispiele weisen innovative Merkmale auf, von denen kein einziges unverzichtbar oder allein für ihre wünschenswerten Eigenschaften verantwortlich ist. In der folgenden Beschreibung und den Zeichnungen werden bestimmte illustrative Ausführungsformen der Offenbarung im Detail beschrieben, die mehrere beispielhafte Möglichkeiten aufzeigen, wie die verschiedenen Prinzipien der Offenbarung ausgeführt werden können. Die anschaulichen Beispiele sind jedoch nicht erschöpfend für die vielen möglichen Ausführungsformen der Offenbarung. Ohne den Umfang der Ansprüche einzuschränken, werden nun einige der vorteilhaften Merkmale zusammengefasst. Andere Objekte, Vorteile und neuartige Merkmale der Offenbarung werden in der folgenden detaillierten Beschreibung der Offenbarung dargelegt, wenn sie in Verbindung mit den Zeichnungen betrachtet werden, die die Erfindung veranschaulichen und nicht einschränken sollen.

**[0007]** Ein Aspekt der Erfindung betrifft einen horizontal geschichteten planaren Magnetkern, der Folgendes umfasst: eine Vielzahl ferromagnetischer Schichten, die eine Vielzahl hartferromagnetischer Schichten und eine Vielzahl weich ferromagnetischer Schichten umfasst, wobei: jede ferromagnetische Schicht eine der weichferromagnetischen Schichten oder eine der hartferromagnetischen Schichten umfasst und jede hartferromagnetische Schicht eine benachbarte ferromagnetische Schicht mindestens einer weichferromagnetischen Schicht ist. Der horizontal geschichtete planare Magnetkern umfasst ferner eine Vielzahl von Isolatorschichten, wobei jede Isolatorschicht zwischen benachbarten ferromagnetischen Schichten angeordnet ist, wobei jede ferromagnetische Schicht eine leichte Magnetisierungsachse parallel zu einer Hauptebene des planaren Magnetkerns aufweist und die leichten Magnetisierungsachsen ausgerichtet sind.

**[0008]** In einer oder mehreren Ausführungsformen sind die ferromagnetischen Schichten entlang einer Höhe des planaren Magnetkerns gestapelt. In einer oder mehreren Ausführungsformen umfasst die Mehrzahl der hartferromagnetischen Schichten eine obere hartferromagnetische Schicht, die als obere ferromagnetische Schicht angeordnet ist. In einer oder mehreren Ausführungsformen umfasst die Vielzahl der hartferromagnetischen Schichten eine untere hartferromagnetische Schicht, die als untere ferromagnetische Schicht angeordnet ist. In einer oder mehreren Ausführungsformen ist die Mehrzahl der weichferromagnetischen Schichten zwischen der oberen und der unteren hartferromagnetischen Schicht angeordnet. In einer oder mehreren Ausführungsformen umfasst die Vielzahl der weichferromagnetischen Schichten N weichferromagnetische

Schichten, wobei N eine ungerade ganze Zahl größer oder gleich 3 ist.

**[0009]** In einer oder mehreren Ausführungsformen ist die weichferromagnetische Dicke jeder weichferromagnetischen Schicht gleich, die hartferromagnetische Dicke jeder hartferromagnetischen Schicht ist gleich, und die hartferromagnetische Dicke ist auf die weichferromagnetische Dicke bezogen. In einer oder mehreren Ausführungsformen ist das Verhältnis der hartferromagnetischen Dicke zur weichferromagnetischen

Dicke  $\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}}$  : 1 wobei  $M_{S\_weich}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Schicht ist.

**[0010]** In einer oder mehreren Ausführungsformen sind die obere und die untere hartferromagnetische Schicht jeweils magnetisiert, um einen jeweiligen Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die obere bzw. untere hartferromagnetische Schicht in einer ersten Richtung zu erzeugen, die parallel zu den leichten Magnetisierungsachsen in der oberen und unteren hartferromagnetischen Schicht verläuft. In einer oder mehreren Ausführungsformen bildet der jeweilige Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die obere hartferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine erste benachbarte weichferromagnetische Schicht, der jeweilige Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die untere hartferromagnetische Schicht bildet eine geschlossene Schleife durch eine zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht, und der jeweilige Vormagnetisierungsmagnetfluss verläuft durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung, die der ersten Richtung entgegengesetzt ist. In einer oder mehreren Ausführungsformen induziert der jeweilige Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht einen Magnetfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht in der zweiten Richtung, der induzierte Magnetfluss durch die erste benachbarte weichferromagnetische Schicht bildet eine geschlossene Schleife durch eine dritte benachbarte weichferromagnetische Schicht in der ersten Richtung, der induzierte magnetische Fluss durch die zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht bildet eine geschlossene Schleife durch eine vierte benachbarte weichferromagnetische Schicht in der ersten Richtung, die obere hartferromagnetische Schicht und die dritte benachbarte weichferromagnetische Schicht sind die benachbarten ferromagnetischen Schichten der ersten benachbarten weichferromagnetischen Schicht, und die untere hartferromagnetische Schicht und die vierte benachbarte weichferromagnetische Schicht sind die benachbarten ferromagnetischen Schichten der

zweiten benachbarten weichferromagnetischen Schicht.

**[0011]** In einer oder mehreren Ausführungsformen bestehen die hart- und weich ferromagnetischen Schichten aus Kobalt, Eisen und/oder Nickel. In einer oder mehreren Ausführungsformen umfassen die Isolatorschichten: (a) Aluminium, Kobalt, Chrom, Silizium, Tantal, Titan und/oder Zirkonium, oder (b) eine Verbindung aus (1) Aluminium, Kobalt, Chrom, Silizium, Tantal, Titan und/oder Zirkonium und (2) Sauerstoff und/oder Stickstoff. In einer oder mehreren Ausführungsformen hat jede hartferromagnetische Schicht eine Koerzitivfeldstärke von über 50 Oe und jede weichferromagnetische Schicht eine Koerzitivfeldstärke von unter 1 Oe. In einer oder mehreren Ausführungsformen liegt die Dicke jeder ferromagnetischen Schicht in einem Bereich von etwa 10 nm bis etwa 1.000 nm, wobei die Dicke in Bezug auf eine Achse gemessen ist, die orthogonal zur Hauptebene des planaren Magnetkerns liegt. In einer oder mehreren Ausführungsformen liegt die Dicke jeder Isolatorschicht in einem Bereich von etwa 1 nm bis etwa 50 nm, wobei die Dicke jeder Isolatorschicht in Bezug auf die Achse gemessen ist. In einer oder mehreren Ausführungsformen ist die Gesamtdicke des Kerns kleiner als oder gleich 100.000 nm, wobei die Gesamtdicke in Bezug auf die Achse gemessen ist.

**[0012]** Ein weiterer Aspekt der Erfindung bezieht sich auf einen horizontal geschichteten planaren Magnetkern, der Folgendes umfasst: eine Vielzahl von weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaaren, wobei jedes weich-hart-ferromagnetische Schichtpaar eine weichferromagnetische Schicht und eine hartferromagnetische Schicht enthält; eine Intra-Paar-Abstandshalterschicht, die zwischen der weichferromagnetischen Schicht und der hartferromagnetischen Schicht in jedem weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar angeordnet ist; eine Zwischenpaar-Abstandshalterschicht, die zwischen benachbarten weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaaren angeordnet ist, wobei eine Zwischenpaar-Abstandshalterdicke jeder Zwischenpaar-Abstandshalterschicht größer ist als eine Intra-Paar-Abstandshalterdicke jeder Intra-Paar-Abstandshalterschicht, und die Zwischenpaar-Abstandshalterdicke und die Intra-Paar-Abstandshalterdicke in Bezug auf eine Achse gemessen sind, die orthogonal zu einer Hauptebene des Kerns ist.

**[0013]** In einer oder mehreren Ausführungsformen ist bei jedem weich-hart-ferromagnetischen Paar die relative Position der weichferromagnetischen Schicht in Bezug auf die hartferromagnetische Schicht die gleiche. In einer oder mehreren Ausführungsformen ist bei jedem weich-hart-ferromagnetischen Paar die weichferromagnetische Schicht

unterhalb der hartferromagnetischen Schicht angeordnet.

**[0014]** In einer oder mehreren Ausführungsformen umfasst der horizontal geschichtete planare Magnetkern ferner eine erste Zwischenpaar-Abstandshalterschicht, die zwischen einem ersten weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar und einem zweiten weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar angeordnet ist; und eine zweite Zwischenpaar-Abstandshalterschicht, die zwischen dem zweiten weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar und einem dritten weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar angeordnet ist, wobei das zweite weich-hart-ferromagnetische Schichtpaar zwischen dem ersten und dem dritten weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar angeordnet ist.

**[0015]** In einer oder mehreren Ausführungsformen ist die weichferromagnetische Dicke jeder weichferromagnetischen Schicht gleich, die hartferromagnetische Dicke jeder hartferromagnetischen Schicht ist gleich, die weich- und hartferromagnetischen Dicken sind in Bezug auf die Achse gemessen, und die hartferromagnetische Dicke ist auf die weichferromagnetische Dicke bezogen. In einer oder mehreren Ausführungsformen ist in jedem Paar aus weich- und hartferromagnetischer Schicht: die hartferromagnetische Schicht magnetisiert, um einen Vormagnetisierungsfluss durch die hartferromagnetische Schicht in einer ersten Richtung zu erzeugen, die parallel zu einer leichten Magnetisierungsachse in der hartferromagnetischen Schicht ist, wobei die leichte Magnetisierungsachse innerhalb einer Hauptebene der hartferromagnetischen Schicht angeordnet ist, und der Vormagnetisierungsfluss bildet eine geschlossene Schleife nur durch die weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung, die parallel zu einer leichten Magnetisierungsachse in der weichferromagnetischen Schicht ist, wobei die leichte Magnetisierungsachse innerhalb einer Hauptebene der weichferromagnetischen Schicht angeordnet ist. In einer oder mehreren Ausführungsformen gilt für jedes Paar aus weich- und hartferromagnetischer Schicht: Der Vormagnetisierungsfluss durch die weichferromagnetische Schicht induziert einen Magnetfluss durch die weichferromagnetische Schicht in der zweiten Richtung, und der induzierte Magnetfluss bildet eine geschlossene Schleife nur durch die hartferromagnetische Schicht in der ersten Richtung.

**[0016]** In einer oder mehreren Ausführungsformen ist das Verhältnis zwischen der hartferromagnetischen Dicke und der weichferromagnetischen Dicke  $\frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}} : 1$  wobei  $M_{S\_weich}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Schicht ist. In einer oder mehre-

ren Ausführungsformen ist die Zwischenpaar-Abstandshalterdicke der ersten und zweiten Zwischenpaar-Abstandshalterschicht gleich, die Intra-Paar-Abstandshalterdicke jeder Intra-Paar-Abstandshalterschicht ist gleich, und die Zwischenpaar-Abstandshalterdicke liegt in einem Bereich vom 2- bis 10-fachen der Intra-Paar-Abstandshalterdicke. In einer oder mehreren Ausführungsformen bestehen die Intra-Paar-Abstandshalterschichten und die Zwischenpaar-Abstandshalterschichten aus einem Isolatormaterial.

**[0017]** Ein weiterer Aspekt der Erfindung ist auf einen Induktor gerichtet, der Folgendes umfasst: einen horizontal geschichteten planaren Magnetkern, der Folgendes umfasst: eine Vielzahl ferromagnetischer Schichten, die eine Vielzahl hartferromagnetischer Schichten und eine Vielzahl weichferromagnetischer Schichten umfasst, wobei jede ferromagnetische Schicht eine der weichferromagnetischen Schichten oder eine der hartferromagnetischen Schichten umfasst und jede hartferromagnetische Schicht eine benachbarte ferromagnetische Schicht mindestens einer benachbarten weichferromagnetischen Schicht ist. Der Induktor umfasst ferner eine Vielzahl von Isolatorschichten, wobei jede Isolatorschicht zwischen benachbarten ferromagnetischen Schichten angeordnet ist. Jede ferromagnetische Schicht hat eine leichte Magnetisierungsachse, die parallel zu einer Hauptebene des planaren Magnetkerns verläuft, und die leichten Magnetisierungsachsen sind zueinander ausgerichtet. Der Induktor umfasst ferner eine leitende Wicklung, die sich im Allgemeinen spiralförmig auf der Außenseite des ebenen geschichteten Magnetkerns windet.

**[0018]** In einer oder mehreren Ausführungsformen hat jede ferromagnetische Schicht eine Hartmagnetisierungsachse, die orthogonal zu der leichten Magnetisierungsachse innerhalb einer Hauptebene der jeweiligen ferromagnetischen Schicht ist, und die Hartmagnetisierungsachsen sind ausgerichtet, und die leitende Wicklung ist so konfiguriert, dass sie einen Induktionsspulenmagnetfluss durch den horizontal geschichteten planaren Magnetkern in einer Richtung parallel zu der Hartmagnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht erzeugt. In einer oder mehreren Ausführungsformen umfasst die Mehrzahl von hartferromagnetischen Schichten eine obere hartferromagnetische Schicht, die als obere ferromagnetische Schicht angeordnet ist, und eine untere hartferromagnetische Schicht, die als untere ferromagnetische Schicht angeordnet ist, wobei die Mehrzahl von weichferromagnetischen Schichten zwischen den oberen und unteren hartferromagnetischen Schichten angeordnet ist, wobei jede der oberen und unteren hartferromagnetischen Schichten magnetisiert ist, um einen jeweiligen Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die oberen bzw.

unteren hartferromagnetischen Schichten zu erzeugen, und in einer ersten Richtung, die parallel zu den leichten Magnetisierungsachsen in den oberen und unteren hartferromagnetischen Schichten verläuft, bildet der Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die obere hartferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine erste benachbarte weichferromagnetische Schicht, der Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die untere hartferromagnetische Schicht bildet eine geschlossene Schleife durch eine zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht, und der Vormagnetisierungsmagnetfluss verläuft durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung, die der ersten Richtung entgegengesetzt ist. In einer oder mehreren Ausführungsformen induziert der Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht einen Magnetfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht in der zweiten Richtung, der induzierte Magnetfluss durch die erste benachbarte weichferromagnetische Schicht bildet eine geschlossene Schleife durch eine dritte benachbarte weichferromagnetische Schicht in der ersten Richtung, der induzierte magnetische Fluss durch die zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht bildet eine geschlossene Schleife durch eine vierte benachbarte weichferromagnetische Schicht in der ersten Richtung, die obere hartferromagnetische Schicht und die dritte benachbarte weichferromagnetische Schicht sind die benachbarten ferromagnetischen Schichten der ersten benachbarten weichferromagnetischen Schicht, und die untere hartferromagnetische Schicht und die vierte benachbarte weichferromagnetische Schicht sind die benachbarten ferromagnetischen Schichten der zweiten benachbarten weichferromagnetischen Schicht.

**[0019]** Ein weiterer Aspekt der Erfindung ist auf eine Struktur gerichtet, die eine integrierte Halbleiterschaltung umfasst, die ein auf einem Substrat gebildetes Mehrebenen-Verdrahtungsnetzwerk umfasst, wobei der Induktor in das Mehrebenen-Verdrahtungsnetzwerk integriert ist.

**[0020]** Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Herstellungsverfahren, bei dem über einem Halbleitersubstrat mehrere ferromagnetische Schichten aufgebracht werden, die mehrere hartferromagnetische Schichten und mehrere weichferromagnetische Schichten umfassen, wobei jede ferromagnetische Schicht eine der weichferromagnetischen Schichten oder eine der hartferromagnetischen Schichten umfasst und jede hartferromagnetische Schicht eine benachbarte ferromagnetische Schicht von mindestens einer benachbarten weichferromagnetischen Schicht ist. Das Verfahren umfasst ferner das Aufbringen einer Isolatorschicht zwischen benachbarten ferromagnetischen Schichten; das Induzieren einer

leichten Magnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht, wobei die leichten Magnetisierungsachsen parallel zu einer oberen ebenen Oberfläche des Halbleitersubstrats ausgerichtet sind; das Magnetisieren jeder hartferromagnetischen Schicht, um einen Vormagnetisierungsfluss durch die jeweilige hartferromagnetische Schicht in einer ersten Richtung zu erzeugen, wobei der Vormagnetisierungsfluss parallel zu der leichten Magnetisierungsachse in der jeweiligen hartferromagnetischen Schicht verläuft; und das Definieren eines horizontal geschichteten ebenen Magnetkerns, der die mehreren ferromagnetischen Schichten und die Isolatorschichten umfasst.

**[0021]** In einer oder mehreren Ausführungsformen umfasst das Verfahren ferner das Definieren einer Hartmagnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht, wobei die Hartmagnetisierungsachse orthogonal zur leichten Magnetisierungsachse innerhalb einer Hauptebene jeder ferromagnetischen Schicht verläuft; und das Ausbilden einer leitenden Wicklung um den horizontal geschichteten planaren Magnetkern, wobei die leitende Wicklung so konfiguriert ist, dass sie ein Induktionsspulen-Magnetfeld bildet, das durch den horizontal geschichteten planaren Magnetkern in einer Richtung parallel zur Hartmagnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht verläuft.

**[0022]** In einer oder mehreren Ausführungsformen umfasst das Verfahren ferner das Aufbringen einer oberen hartferromagnetischen Schicht als obere ferromagnetische Schicht; das Aufbringen einer unteren hartferromagnetischen Schicht als untere ferromagnetische Schicht; und das Aufbringen der Vielzahl von weichferromagnetischen Schichten zwischen der unteren und der oberen hartferromagnetischen Schicht.

**[0023]** In einer oder mehreren Ausführungsformen ist das Verhältnis der hartferromagnetischen Dicke jeder hartferromagnetischen Schicht zur weichferromagnetischen Dicke jeder weichferromagnetischen

Schicht  $\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}}$  : 1 wobei  $M_{S\_weich}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen

Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Schicht ist, und die weich- und hartferromagnetischen Dicken in Bezug auf eine Achse gemessen sind, die orthogonal zur oberen planaren Oberfläche des Halbleitersubstrats ist.

**[0024]** In einer oder mehreren Ausführungsformen umfasst das Verfahren ferner das Aufbringen einer Vielzahl von weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaaren, wobei jedes weich-hart-ferromagnetische Schichtpaar eine der weichferromagnetischen Schichten und eine der hartferromagnetischen

Schichten enthält; das Abscheiden einer Intra-Paar-Abstandsschicht zwischen der weichferromagnetischen Schicht und der hartferromagnetischen Schicht in jedem weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar; und das Aufbringen einer Zwischenpaar-Abstandsschicht zwischen benachbarten weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaaren, wobei jede Isolatorschicht eine der Intra-Paar-Abstandsschichten oder eine der Zwischenpaar-Abstandsschichten umfasst, eine Zwischenpaar-Abstandsschichtdicke jeder Zwischenpaar-Abstandsschicht größer ist als eine Intra-Paar-Abstandsschichtdicke jeder Intra-Paar-Abstandsschicht, und die Zwischenpaar-Abstandsschichtdicke und die Intra-Paar-Abstandsschichtdicke in Bezug auf eine Achse gemessen sind, die orthogonal zur oberen planaren Oberfläche des Halbleitersubstrats ist. In einer oder mehreren Ausführungsformen ist das Verhältnis einer hartferromagnetischen Dicke jeder hartferromagnetischen Schicht zu einer weichferromagnetischen Schicht

$$\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}} : 1 \text{ wobei } M_{S\_weich} \text{ die Sättigungsmag-}$$

netisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Schicht ist, und die weich- und hartferromagnetischen Dicken in Bezug auf die Achse gemessen sind.

#### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

**[0025]** Zum besseren Verständnis der Natur und der Vorteile der vorliegenden Konzepte wird auf die ausführliche Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen und die beigefügten Zeichnungen verwiesen.

**Abb. 1A** ist eine Querschnittsansicht eines vorhandenen horizontal geschichteten Magnetkerns.

**Abb. 1B** ist eine Draufsicht auf den in **Abb. 1A** dargestellten horizontal geschichteten Magnetkern.

**Abb. 2** ist eine Querschnittsansicht eines planaren Magnetkerns gemäß einer Ausführungsform.

**Fig. 3** ist eine perspektivische Explosionsansicht des in **Fig. 2** dargestellten planaren Magnetkerns.

**Abb. 4** ist eine Querschnittsansicht eines planaren Magnetkerns gemäß einer anderen Ausführungsform.

**Abb. 5** ist eine Querschnittsansicht eines planaren Magnetkerns gemäß einer anderen Ausführungsform.

**Fig. 6** ist eine perspektivische Explosionsansicht des in **Fig. 5** dargestellten planaren Magnetkerns.

**Fig. 7** ist ein Flussdiagramm eines Verfahrens zur Herstellung eines Halbleiterbauelements gemäß einer Ausführungsform.

**Abb. 8** ist ein repräsentativer Querschnitt einer Magnetkernspule, die in ein Halbleiterbauelement auf einem Substrat gemäß einer Ausführungsform integriert ist.

#### Detaillierte Beschreibung

**[0026]** Ein horizontal geschichteter planarer Magnetkern enthält eine Vielzahl von ferromagnetischen Schichten, darunter mehrere hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten und mehrere weichferromagnetische Schichten. Mindestens eine weichferromagnetische Schicht ist die benachbarte ferromagnetische Schicht jeder hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht. Jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht ist so magnetisiert, dass sie einen in der Ebene liegenden Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die jeweilige hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht in einer ersten Richtung erzeugt. Der Vormagnetisierungsmagnetfluss bildet einen geschlossenen Pfad, indem er durch die benachbarte weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung verläuft, die der ersten Richtung entgegengesetzt ist (z. B. sind die erste und zweite Richtung antiparallel). Die ferromagnetischen Schichten sind anisotrop, so dass ihre leichten Magnetisierungsachsen parallel zueinander und zu der ersten und zweiten Richtung verlaufen. Die Hartmagnetisierungsachsen der ferromagnetischen Schichten sind orthogonal zu den leichten Magnetisierungsachsen innerhalb der Hauptebene der jeweiligen ferromagnetischen Schichten.

**[0027]** Der Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die benachbarte weichferromagnetische Schicht legt die Vorzugsrichtung für die Magnetisierung der magnetischen Momente der weichferromagnetischen Schicht fest, so dass zwischen der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht und der/den weichferromagnetischen Schicht(en) ein geschlossener Pfad für den magnetischen Fluss zwischen den Schichten entsteht. Dies reduziert die Anzahl der Domänenwände, die sich in der weichferromagnetischen Schicht bilden, da sich der Magnetfluss nun in der angrenzenden hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht schließt, anstatt sich durch die weichferromagnetische Schicht zurückziehen, was neue magnetische Domänen bilden würde, die sowohl in der ersten als auch in der zweiten Richtung magnetisiert sind. Die Beseitigung der magnetischen Domänen und ihrer zugehörigen Domänenwände, die durch den Vormagnetisierungsmagnetfluss entstehen, reduziert die Anzahl der Domänenwände, die durch den Vormagnetisierungsmagnetfluss entstehen.

magnetfluss der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht verursacht werden, reduziert die Hysterese und die Wirbelstromleistungsverluste in einem Induktor im Vergleich zur Verwendung eines Induktorkerns, der keine hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten enthält.

**[0028]** Ein Induktor kann unter Verwendung des horizontal geschichteten planaren Magnetkerns gebildet werden. Die Spule des Induktors kann so konfiguriert werden, dass sie einen magnetischen Fluss durch die ferromagnetischen Schichten in einer Richtung parallel zu den Hartmagnetisierungsachsen erzeugt.

**[0029]** **Abb. 2** ist eine Querschnittsansicht eines horizontal geschichteten planaren Magnetkerns 20 gemäß einer Ausführungsform. Der planare Magnetkern 20 kann auf einem Substrat 250 hergestellt und/oder in eine mehrstufige Verdrahtungsstruktur auf dem Substrat 250 integriert werden, um einen Induktor zu bilden.

**[0030]** Der Magnetkern 20 besteht aus einer Vielzahl ferromagnetischer Schichten 200 und Isolatorschichten 210. Jede ferromagnetische Schicht 200 ist entweder eine weichferromagnetische Schicht 202 oder eine hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204. Die ferromagnetischen Schichten 200 umfassen eine Vielzahl von weichferromagnetischen Schichten 202 und eine Vielzahl von hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 204, die in einer abwechselnden Reihenfolge von (a) einer weichferromagnetischen Schicht 202 und (b) einer hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 angeordnet sind. Die ferromagnetischen Schichten 204 sind entlang der Höhe des Kerns 20 (z. B. entlang der „z“-Achse) gestapelt.

**[0031]** Jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204 ist eine benachbarte ferromagnetische Schicht 200 von mindestens einer weichferromagnetischen Schicht 202. In **Fig. 2** ist beispielsweise die oberste ferromagnetische Schicht 200A im Stapel der ferromagnetischen Schichten 200 eine oberste hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204. Die benachbarte ferromagnetische Schicht der Schicht 200A ist die ferromagnetische Schicht 200B, die eine weichferromagnetische Schicht 202 ist. In einem anderen Beispiel sind die benachbarten ferromagnetischen Schichten der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 200C die weichen ferromagnetischen Schichten 200B und 200D.

**[0032]** Jede ferromagnetische Schicht 200 ist so anisotrop, dass ihre leichte Magnetisierungsachse 220 parallel zur „x“-Achse und ihre Hartmagnetisierungsachse 222 parallel zur „y“-Achse verläuft. Zum Beispiel ist die Hartmagnetisierungsachse 222 ortho-

gonal zur leichten Magnetisierungsachse 220 innerhalb der Hauptebene der ferromagnetischen Schicht 200. Die Hauptebene der ferromagnetischen Schicht 200 entspricht der x-y-Ebene (z. B. die Länge (x) und Breite (y) der ferromagnetischen Schicht 200, während die Dicke (z) der ferromagnetischen Schicht orthogonal zur x-y-Ebene verläuft). In einigen Ausführungsformen wird die Anisotropie der ferromagnetischen Schichten 200 während der Herstellung induziert, um die Achsen der Hartmagnetisierung und der leichten Magnetisierung dauerhaft oder semipermanent festzulegen. Beispielsweise kann die Achse der leichten Magnetisierung 220 durch Anlegen eines Vormagnetisierungsfeldes während oder nach der Abscheidung jeder ferromagnetischen Schicht 200 eingestellt werden, das parallel zur gewünschten Achse der leichten Magnetisierung 220 verläuft, und dann durch Glühen der jeweiligen ferromagnetischen Schicht 200.

**[0033]** Jede ferromagnetische Schicht 200 kann Kobalt, Eisen und/oder Nickel oder eine Verbindung oder Legierung mit Kobalt, Eisen und/oder Nickel enthalten. In einem Beispiel umfassen die weichferromagnetischen Schichten 202  $\text{Co}_x\text{Zr}_y\text{Ta}_{1-x-y}$  (CZT), wobei x und y ungefähr 0,915 bzw. 0,04 betragen. In einem anderen Beispiel können die weichferromagnetischen Schichten 202 aus  $\text{CoZrTa-B}$  (oder  $\text{CoZrTaB}$ ),  $\text{CoNiFe}$ ,  $\text{NiFe}$ ,  $\text{CoFe}$  und/oder  $\text{CoFeB}$  oder aus Legierungen bestehen, die eine der vorgenannten Verbindungen enthalten. Die hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 204 können  $\text{AlNiCo}$ ,  $\text{NdFeB}$ ,  $\text{SmCo}$ , Ferritlegierungen aus  $\text{Fe}_x\text{O}_y$ , die ein oder mehrere Metalle wie Co, Sr und/oder Ba enthalten, oder Legierungen, die eine der vorgenannten Verbindungen enthalten, umfassen.

**[0034]** Die Isolatorschicht 210 kann (a) Aluminium, Kobalt, Chrom, Silizium, Tantal, Titan und/oder Zirkonium oder (b) eine Verbindung aus (1) Aluminium, Kobalt, Chrom, Silizium, Tantal, Titan und/oder Zirkonium und (2) Sauerstoff und/oder Stickstoff umfassen. Zum Beispiel kann die Isolatorschicht 210 Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminiumoxid ( $\text{Al}_x\text{O}_y$ ), Chromoxid ( $\text{Cr}_x\text{O}_y$ ), Kobaltoxid ( $\text{Co}_x\text{O}_y$ ), Tantaloxid ( $\text{Ta}_x\text{O}_y$ ), Titanoxid ( $\text{Ti}_x\text{O}_y$ ), Siliziumnitrid ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ), Aluminiumnitrid ( $\text{Al}_x\text{N}_y$ ), Tantalnitrid ( $\text{Ta}_x\text{N}_y$ ) oder eine Kombination aus zwei oder mehreren der vorgenannten Stoffe umfassen. In einigen Ausführungsformen kann die Isolatorschicht 210 als Abstandshalter-schicht zwischen benachbarten ferromagnetischen Schichten 200 fungieren. Die Dicke jeder Abstandsschicht steht in Beziehung zum Energiezustand für die Bildung einer geschlossenen Magnetfeldschleife in benachbarten weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204. In einigen Ausführungsformen kann die Dicke der Abstandsschichten angepasst werden, um geschlossene Magnetfeldschleifen in Paaren von weich- und hartferromagnetischen

Schichten 202, 204 zu fördern, wie z. B. unten in Bezug auf **Fig. 4** erläutert.

**[0035]** Auf der Oberseite des Kerns 20 kann die Isolatorschicht 210 als Abdeckschicht 212 fungieren. Auf der Unterseite des Kerns 20 kann die Isolatorschicht 210 als Haftschiicht 214 fungieren. Natürlich kann der Magnetkern 20 gedreht oder gewendet werden, so dass die Begriffe „oben“ und „unten“ nicht zutreffen, aber die Schichten würden die gleichen relativen Positionen zueinander beibehalten.

**[0036]** Die hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 204 werden magnetisiert, um ein entsprechendes Vormagnetisierungsfeld zu erzeugen. Der in der Ebene liegende Vormagnetisierungsmagnetfeldfluss 230 aus dem Vormagnetisierungsmagnetfeld durch die hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 204 verläuft in einer ersten Richtung (z. B. von rechts nach links, wie durch die Pfeile in **Fig. 2** angedeutet) parallel zur leichten Magnetisierungsachse 220. Der Vormagnetisierungsmagnetfluss 230 durch jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204 bildet eine geschlossene Vormagnetisierungsmagnetfeldschleife, indem er durch die benachbarte(n) weichferromagnetische (n) Schicht(en) 202 verläuft, wie durch die gekrümmten Pfeile 235 angezeigt. Der Vormagnetisierungsmagnetfluss 230 durch jede weichferromagnetische Schicht 202 verläuft in einer zweiten Richtung (z. B. von links nach rechts), die der ersten Richtung entgegengesetzt (z. B. antiparallel) ist. Die zweite Richtung verläuft parallel zur leichten Achse der Magnetisierung 220.

**[0037]** Die Energie des magnetischen Vormagnetisierungsfeldes 230 ist geringer, wenn er eine geschlossene Schleife durch die benachbarte(n) hartferromagnetische(n) Vormagnetisierungsschicht(en) 204 bildet (wie durch die gekrümmten Pfeile 235 angedeutet), als wenn er eine geschlossene Schleife bildet, wenn er durch dieselbe weichferromagnetische Schicht 202 zurückgeht (z. B. zur Bildung von Domänenwänden innerhalb der jeweiligen weichferromagnetischen Schicht 202). Zum Beispiel haben die hartferromagnetischen Schichten 204 eine höhere Permeabilität als die weichferromagnetischen Schichten 202.

**[0038]** Der Vormagnetisierungsmagnetfluss 230 durch die weichferromagnetischen Schichten 202 erzeugt magnetische Momente und einen induzierten Magnetfluss 240 durch die weichferromagnetischen Schichten 202 in der zweiten Richtung. Wie beim Vormagnetisierungsfeld 230 ist die Energie des induzierten Magnetflusses 240 geringer, wenn er eine geschlossene Schleife bildet, indem er durch die benachbarte(n) hartferromagnetische(n) Vormagnetisierungsschicht(en) 204 läuft (wie durch die gekrümmten Pfeile 235 angedeutet), als wenn

er eine geschlossene Schleife bildet, indem er durch dieselbe weichferromagnetische Schicht 202 zurückläuft (z. B. um Domänenwände innerhalb der jeweiligen weichferromagnetischen Schicht 202 zu bilden).

**[0039]** Die Verringerung der Domänenwand in den weichferromagnetischen Schichten 202 kann den Wirkungsgrad des Kerns 20 verbessern (z. B. durch Verringerung der Koerzitivfeldstärke des gestapelten Kerns 20 im Vergleich zu einem Kern 20 ohne hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten 204), beispielsweise wenn der Kern 20 in eine Induktionsspule integriert ist, die mit einer hohen Frequenz (z. B. mindestens 1 MHz) arbeitet. So kann der Kern 20 beispielsweise geringere Hysterese- und Wirbelstromverluste aufweisen, als wenn der Kern 20 keine hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 204 enthält.

**[0040]** Jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204 kann eine Koerzitivfeldstärke von mehr als 50 Oe aufweisen, z. B. in einem Bereich von etwa 50 Oe bis etwa 1.000 Oe, einschließlich etwa 250 Oe, etwa 500 Oe, etwa 750 Oe, und in jedem Bereich oder Wert zwischen zwei der vorgenannten Koerzitivfeldstärken. Jede weichferromagnetische Schicht 204 kann eine Koerzitivfeldstärke von weniger als 10 Oe aufweisen, wie etwa einen Bereich von etwa 0,01 Oe bis 1 Oe, einschließlich etwa 0,1 Oe, etwa 0,25 Oe, etwa 0,5 Oe, etwa 0,75 Oe, und einen beliebigen Bereich oder Wert zwischen zwei der vorgenannten Koerzitivfeldstärken.

**[0041]** Die Dicke jeder ferromagnetischen Schicht 200 kann etwa 10 nm bis etwa 1.000 nm betragen. Die Dicke jeder Isolatorschicht 210 kann etwa 1 nm bis etwa 50 nm betragen. Die Gesamtdicke des Kerns 20 kann weniger als oder gleich etwa 100.000 nm (d. h. 100 Mikrometer) betragen. Die Dicke der ferromagnetischen Schichten 200, der Isolatorschichten 210 und des Kerns 20 wird in Bezug auf die „z“-Achse gemessen, die orthogonal zur Hauptebene des Kerns 20 ist.

**[0042]** Wenn der Kern 20 in eine mehrstufige Verdrahtungsstruktur integriert wird, um einen Induktior zu bilden, ist die Induktionsspule vorzugsweise so konfiguriert und ausgerichtet, dass der Magnetfluss der Induktionsspule durch die ferromagnetischen Schichten 200 in einer Richtung parallel zur Hartmagnetisierungsachse 222 verläuft.

**[0043]** **Fig. 3** ist eine perspektivische Explosionsansicht des in **Fig. 2** dargestellten planaren Magnetkerns 20. Die Deckschicht 212 ist in **Fig. 3** aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. **Fig. 3** zeigt ferner die magnetischen Flusslinien 230, 240, wie sie in einer ersten Richtung (d.h. von in **Fig. 3**) durch die hartferromagnetischen Vormagnetisie-

rungsschichten 204, in einer zweiten Richtung (d.h. von links nach rechts, rechts nach links in **Fig. 3**) durch die weichferromagnetischen Schichten 202 verlaufen und wie sie sich zwischen den weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 erstrecken. Dementsprechend hat der magnetische Fluss einen geschlossenen Weg durch die weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204. Die magnetischen Flusslinien 230, 240 durch die weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 verlaufen parallel oder im Wesentlichen parallel (z. B. innerhalb von 10 Grad) zur leichten Magnetisierungsachse 220. Darüber hinaus sind die magnetischen Flusslinien 230, 240 durch die weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 orthogonal oder im Wesentlichen orthogonal zu (d.h. innerhalb von 10 Grad) der Hartmagnetisierungsachse 222 innerhalb der jeweiligen Hauptebenen der weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204.

**[0044]** **Abb. 4** ist eine Querschnittsansicht eines planaren Magnetkerns 40 gemäß einer anderen Ausführungsform. Der Kern 40 ist derselbe wie der Kern 20, mit Ausnahme der nachstehenden Beschreibung. In **Fig. 4** sind die weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 als 202A, 202B, ... 202N und als 204A, 204B, ... 204N bezeichnet. Die Dicken der weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 im Kern 40 sind so aufeinander abgestimmt (z. B. co-optimiert), dass der magnetische Fluss durch ein Paar benachbarter weich- und hartferromagnetischer Schichten 202, 204 gleich ist. Mit anderen Worten,

$$\phi_{HL} = \phi_{SL} \quad (1)$$

wobei  $\phi_{HL}$  der magnetische Fluss durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204 ist und  $\phi_{SL}$  der magnetische Fluss durch die weichferromagnetische Schicht 202 ist. Gleichung (1) kann umgeschrieben werden als:

$$\mu_0 M_{S\_weich} \tau_{weich} = \mu_0 M_{S\_hart} \tau_{hart} \quad (2)$$

wobei  $\mu_0$  die Permeabilität des freien Raums ist,  $M_{S\_weich}$  die Sättigungsmagnetisierung der weichferromagnetischen Schicht 202 ist,  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 ist,  $\tau_{weich}$  die Dicke der weichferromagnetischen Schicht 202 ist, und  $\tau_{hart}$  die Dicke der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 ist.

**[0045]** Damit der magnetische Fluss durch ein Paar benachbarter weich- und hartferromagnetischer Schichten 202, 204 gemäß den Gleichungen (1) und (2) gleich ist, beträgt das Verhältnis der Dicke der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 zur Dicke der weichferromagnetischen

Schicht 202  $\frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}} : 1$ , wodurch die Dicken der

weich- und der hartferromagnetischen Schicht für die Schließung des magnetischen Flusses von Schicht zu Schicht gemeinsam optimiert werden. In **Fig. 4** ist dieses Dickenverhältnis dargestellt, wobei jede weichferromagnetische Schicht 202 eine Einheitsdicke (UT) aufweist und jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204 eine Dicke von  $UT \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}}$  aufweist.

**[0046]** Die Dicke der Isolatorschichten 210 kann angepasst werden, um geschlossene Magnetfeldschleifen in Paaren von weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 zu fördern. Im Allgemeinen weist der Kern 40 N weich-hartferromagnetische Paare 440 auf, wobei jedes weich-hartferromagnetische Paar 440 eine weichferromagnetische Schicht 202 und eine hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204 umfasst. Die N weich-hartferromagnetischen Paare 440 sind sich wiederholende Einheiten im Kern 40, wobei die relativen Positionen der weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 über jedes weich-hartferromagnetische Paar 440 gleich sind. Wenn beispielsweise die weichferromagnetische Schicht 202 in einem weich-hartferromagnetischen Paar 440 oberhalb der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 angeordnet ist, ist die weichferromagnetische Schicht 202 in allen N weich-hartferromagnetischen Paaren 440 oberhalb der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 angeordnet. Wenn die weichferromagnetische Schicht 202 unterhalb der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 in einem weich-hartferromagnetischen Paar 440 angeordnet ist, ist die weichferromagnetische Schicht 202 unterhalb der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 in allen N weich-hartferromagnetischen Paaren 440 angeordnet.

**[0047]** Wenn eine weichferromagnetische Schicht 202 zwei benachbarte hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten 204 aufweist, kann die Dicke eines ersten Isolators 210, der zwischen der weichferromagnetischen Schicht 202 und einer ersten benachbarten hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 (z.B., eine harte ferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204 in einem benachbarten weich-hartferromagnetischen Paar 440) angeordnet ist, größer sein als die Dicke eines zweiten Isolators 210, der zwischen der weichferromagnetischen Schicht 202 und einer zweiten benachbarten hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 (z. B. einer hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 204 in dem weich-hartferromagnetischen Paar 440 als die weichferromagnetische Schicht 202) angeordnet

ist. Am Beispiel der weichferromagnetischen Schicht 202A ist die Dicke der Isolatorschicht 210B größer als die Dicke der Isolatorschicht 210A. Die dickere Isolatorschicht (z. B. die Isolatorschicht 210B) kann als Zwischenpaar-Abstandshalterschicht 400 bezeichnet werden. Die dünnere Isolatorschicht (z. B. die Isolatorschicht 210A) kann als Intra-Paar-Abstandshalterschicht 410 bezeichnet werden.

**[0048]** Die Zwischenpaar-Abstandsschicht 400 kann etwa 2 bis etwa 10 Mal so dick sein als die Intra-Paar-Abstandsschicht 410. Die Dicke der Intra-Paar-Abstandsschicht 410 kann etwa 1 nm bis etwa 50 nm betragen, einschließlich etwa 10 nm, etwa 20 nm, etwa 30 nm, etwa 40 nm und jedes Wertes oder Bereichs zwischen zwei der vorgenannten Dicken. Somit ist die Dicke der Zwischenpaar-Abstandsschicht 400 größer als die Dicke der Intra-Paar-Abstandsschicht 410. Die Dicke jeder Schicht (z. B. der ferromagnetischen Schichten 200 und der Isolatorschichten 210) wird in Bezug auf die „z“-Achse gemessen, die orthogonal zu den oberen und unteren ebenen Flächen des Substrats 250 und zur Hauptebene des Kerns 40 verläuft.

**[0049]** Aufgrund dieses Unterschieds in der Isolatorschichtdicke ist die Energie für die Vormagnetisierung und den induzierten Magnetfluss 230, 240 durch die weichferromagnetische Schicht 202A geringer, um einen Rückweg durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204A zu bilden, als um einen Rückweg durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204B zu bilden. Daher bildet der gesamte oder im Wesentlichen der gesamte magnetische Fluss (z. B. Vormagnetisierung und induzierter magnetischer Fluss 230, 240) durch die weichferromagnetische Schicht 202A eine geschlossene Schleife durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204A, wie durch die gekrümmten Pfeile 435 angezeigt ist. Darüber hinaus bildet der gesamte oder im Wesentlichen der gesamte magnetische Fluss (z. B. Vormagnetisierung und induzierter magnetischer Fluss 230, 240) durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204A eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 202A, wie durch die gekrümmten Pfeile 437 angezeigt ist.

**[0050]** Im Allgemeinen ist für jede weichferromagnetische Schicht 202, die zwei benachbarte hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten 204 aufweist, eine Zwischenpaar-Abstandsschicht 400 auf einer ersten Seite 420 jeder weichferromagnetischen Schicht 202 (z. B. in direktem physischen Kontakt mit dieser) und eine Intra-Paar-Abstandsschicht 410 auf einer zweiten Seite 425 der jeweiligen weichferromagnetischen Schicht 202 (z. B. in direktem physischen Kontakt mit dieser) angeordnet. Die erste und zweite Seite 420, 425 befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten der weich-ferromagnetischen

Schicht 202. In **Fig. 4** befindet sich die erste Seite 420 auf der Unterseite jeder weich-ferromagnetischen Schicht 202, wobei die Unterseite näher am Substrat 250 liegt als die Oberseite. Die weichferromagnetische Schicht 202N, die sich auf der Unterseite des Kerns 40 befindet, hat nur eine benachbarte hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 204N und benötigt daher keine dickere Zwischenpaar-Abstandsschicht 400 unterhalb der Unterseite der weichferromagnetischen Schicht 202N, um die Magnetisierung einzustellen. Stattdessen wird eine dünnere Haftschiicht 214 unter der weichferromagnetischen Schicht 202N gebildet. Die Dicke der Haftschiicht 214 und der Abdeckschiicht 212 kann die gleiche sein wie die Dicke der Intra-Paar-Abstandsschiicht 410.

**[0051]** In einer alternativen Ausführungsform wird für jede weichferromagnetische Schicht 202, die zwei benachbarte hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten 204 aufweist, die Zwischenpaar-Abstandsschiicht 400 oberhalb (z. B. in direktem physischen Kontakt mit) der zweiten Seite 425 jeder weichferromagnetischen Schicht 202 angeordnet und die Intra-Paar-Abstandsschiicht 410 unterhalb (z. B. in direktem physischen Kontakt mit) der ersten Seite 425 der jeweiligen weichferromagnetischen Schicht 202 der oberen Oberfläche jeder weichferromagnetischen Schicht 202 angeordnet. Dies entspricht einer Drehung von **Fig. 4** um 180 Grad, so dass sich die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschiicht 204A nun auf der „Unterseite“ des Kerns 40 befindet.

**[0052]** Ein Vorteil der Paarung der weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 besteht darin, dass der gesamte oder im Wesentlichen der gesamte magnetische Vormagnetisierungsfluss 230 durch eine hartferromagnetische Vormagnetisierungsschiicht 204 geleitet wird, um durch eine entsprechende weichferromagnetische Schicht 202 in einem weich-hartferromagnetischen Paar 440 zu fließen, wodurch die Reduzierung der Domänenwandbildung in jeder weichferromagnetischen Schicht 202 maximiert wird.

**[0053]** Es wird darauf hingewiesen, dass selbst bei einer schichtweisen Schließung des magnetischen Flusses immer noch einige magnetische Domänenwände innerhalb der weichferromagnetischen Schichten 202 vorhanden sind. Die Anzahl der Domänenwände ist jedoch im Vergleich zu dem Fall reduziert, in dem der magnetische Fluss hauptsächlich innerhalb einer einzelnen magnetischen Schicht geschlossen wird, z. B. wenn die hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 204 vom Kern 40 entfernt werden. Dies ist vorteilhaft, weil (1) Domänenwände sich bewegen können, wenn der Kern einem magnetischen Wechselfeld ausgesetzt ist, was zu Leistungsverlusten führt, und (2) Domä-

nenmuster, die sich bilden, wenn der magnetische Fluss innerhalb einzelner Magnetschichten geschlossen ist, das Gesamtvolumen des magnetischen Materials, das auf magnetische Wechselfelder reagiert, reduzieren können, was folglich die maximal erreichbare Induktivität verringert.

**[0054]** Wenn der Kern 40 in eine mehrstufige Verdrahtungsstruktur integriert wird, um einen Induktor zu bilden, ist die Induktionsspule vorzugsweise so konfiguriert und ausgerichtet, dass der magnetische Fluss der Induktionsspule durch die weich- und hartferromagnetischen Schichten 202, 204 in einer Richtung parallel zur Achse der Hartmagnetisierung 222 verläuft.

**[0055]** Fig. 5 ist eine Querschnittsansicht eines planaren Magnetkerns 50 gemäß einer anderen Ausführungsform. Der planare Magnetkern 50 kann auf einem Substrat 550 hergestellt und/oder in eine mehrstufige Verdrahtungsstruktur auf dem Substrat 550 integriert werden, um einen Induktor zu bilden.

**[0056]** Der Kern 50 umfasst eine Vielzahl von ferromagnetischen Schichten 500A-G (im Allgemeinen ferromagnetische Schichten 500) und Isolatorschichten 510. Der Kern 50 umfasst auch eine Deckschicht 212 und eine Haftschiicht 214. Jede ferromagnetische Schicht 500 ist entweder eine weichferromagnetische Schicht 502 oder eine hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 504. Jede ferromagnetische Schicht 500 ist anisotrop, so dass ihre leichte Magnetisierungsachse 520 parallel zur „x“-Achse und ihre Hartmagnetisierungsachse 522 parallel zur „y“-Achse verläuft. Somit ist die Hartmagnetisierungsachse orthogonal zur leichten Magnetisierungsachse 520 innerhalb der Hauptebene der ferromagnetischen Schicht 500. Die weich- und hartferromagnetischen Schichten 502, 504 können dieselben sein wie die weich- bzw. hartferromagnetischen Schichten 202, 204. Die Isolatorschichten 510 können die gleichen sein wie die Isolatorschichten 210 und/oder die Intra-Paar-Abstandsschicht 410.

**[0057]** Die oberen und unteren (bzw. ersten und letzten) ferromagnetischen Schichten 500 (z. B. die Schichten 500A, 500G) sind hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten 504 (z. B. obere und untere hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten). Die hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 504 sind so konfiguriert, dass sie ein Vormagnetisierungsmagnetfeld 540 in einer ersten Richtung (z. B. von rechts nach links) erzeugen, die parallel zur leichten Achse der Magnetisierung 520 verläuft. Alle ferromagnetischen Schichten 500 zwischen den oberen und unteren hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 504 sind weichferromagnetische Schichten 502. Der Kern 50 ist so konfiguriert, dass die Hälfte des magnetischen Flusses durch jede weichferromagnetische Schicht 502

einen geschlossenen Pfad durch jede benachbarte ferromagnetische Schicht 500 bildet.

**[0058]** An der Oberseite des Kerns 50 verläuft der Vormagnetisierungsfluss 530 durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 500A in einer ersten Richtung (z. B. von rechts nach links), die parallel zur leichten Magnetisierungsachse 520 verläuft. Der magnetische Vormagnetisierungsfluss 530 hat einen Rückweg durch die weichferromagnetische Schicht 500B in einer zweiten Richtung (z. B. von links nach rechts), die parallel zur Achse der leichten Magnetisierung 520 verläuft, um einen geschlossenen Kreis zu bilden. Es ist ein niedrigerer Energiezustand für den Vormagnetisierungsmagnetfluss 530 durch die weichferromagnetische Schicht 500B, einen geschlossenen Pfad durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 500A zu bilden, als eine geschlossene Schleife zu bilden, indem er durch dieselbe weichferromagnetische Schicht 500B zurückgeht (z. B. um Domänenwände zu bilden).

**[0059]** Der Vormagnetisierungsfluss 530 durch die weichferromagnetische Schicht 500B erzeugt magnetische Momente und einen induzierten Magnetfluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500B in der zweiten Richtung. Die Größe des induzierten magnetischen Flusses 540 ist gleich oder annähernd gleich der Größe des Vormagnetisierungsmagnetflusses 530. Der induzierte magnetische Fluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500B (z. B. in der zweiten Richtung) bildet eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500C (z. B. in der ersten Richtung), in der der induzierte magnetische Fluss 540 als Vormagnetisierungsfluss 530' wirkt. Es ist ein niedrigerer Energiezustand für den induzierten magnetischen Fluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500B, um eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500C zu bilden (z. B. als Vormagnetisierungsfluss 530'), als eine geschlossene Schleife zu bilden, indem er durch die weichferromagnetische Schicht 500B zurückgeht (z. B. um Domänenwände zu bilden). Somit bildet die Hälfte des magnetischen Flusses (z. B. der Vormagnetisierungsfluss 530) durch die weichferromagnetische Schicht 500B eine geschlossene Schleife durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 500A und die andere Hälfte des magnetischen Flusses (z. B. der induzierte magnetische Fluss 540) durch die weichferromagnetische Schicht 500B bildet eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500C (z. B. als Vormagnetisierungsfluss 530').

**[0060]** Dies wiederholt sich für alle weichferromagnetischen Schichten 502 (z. B. die weichferromagnetischen Schichten 500C-F). Zum Beispiel erzeugt der Vormagnetisierungsmagnetfluss 530' durch die

weichferromagnetische Schicht 500C zusätzliche magnetische Momente und einen induzierten Magnetfluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500C. Die Größe des induzierten magnetischen Flusses 540 ist ungefähr gleich der Größe des Vormagnetisierungsmagnetflusses 530'. Der induzierte magnetische Fluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500C (z. B. in der ersten Richtung) bildet eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500D (z. B. in der zweiten Richtung), in der der induzierte magnetische Fluss 540 als Vormagnetisierungsmagnetisierungsfluss 530' wirkt. Es ist ein niedrigerer Energiezustand für den induzierten magnetischen Fluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500C, um eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500D zu bilden (z. B. als Vormagnetisierungsfluss 530'), als eine geschlossene Schleife zu bilden, indem er durch die weichferromagnetische Schicht 500C zurückgeht (z. B. um Domänenwände zu bilden). Somit bildet die Hälfte des magnetischen Flusses (z. B. der Vormagnetisierungsfluss 530') durch die weichferromagnetische Schicht 500C eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500B (z. B. als induzierter magnetischer Fluss 540) und die andere Hälfte des magnetischen Flusses (z. B. der induzierte magnetische Fluss 540) durch die weichferromagnetische Schicht 500C bildet eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500D (z. B. als Vormagnetisierungsfluss 530').

**[0061]** Am Boden des Kerns 50 durchläuft der Vormagnetisierungsmagnetfluss 530 die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 500G in einer ersten Richtung (z. B. von rechts nach links), die parallel zur leichten Magnetisierungsachse 520 verläuft. Der Vormagnetisierungsmagnetfluss 530 hat einen Rückweg durch die weichferromagnetische Schicht 500F in einer zweiten Richtung (z. B. von links nach rechts), die parallel zur Achse der leichten Magnetisierung 520 verläuft, um eine geschlossene Schleife zu bilden. Es ist ein niedrigerer Energiezustand für den induzierten magnetischen Fluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500F, um einen geschlossenen Pfad durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 500G zu bilden, als eine geschlossene Schleife zu bilden, indem er durch dieselbe weichferromagnetische Schicht 500F zurückgeht (z. B. um Domänenwände zu bilden).

**[0062]** Der Vormagnetisierungsfluss 530 durch die weichferromagnetische Schicht 500F erzeugt magnetische Momente und einen induzierten magnetischen Fluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500F in der zweiten Richtung. Die Größe des induzierten magnetischen Flusses 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500F ist gleich oder ungefähr gleich der Größe des Vormagnetisie-

rungsmagnetflusses 530 durch die weichferromagnetische Schicht 500F.

**[0063]** Der induzierte magnetische Fluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500F (z. B. in der zweiten Richtung) bildet eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500E (z. B. in der ersten Richtung), wobei der induzierte magnetische Fluss 540 als Vormagnetisierungsmagnetisierungsfluss 530' wirkt. Es ist ein niedrigerer Energiezustand für den induzierten magnetischen Fluss 540 durch die weichferromagnetische Schicht 500F, um eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500E zu bilden (z. B. als Vormagnetisierungsfluss 530'), als eine geschlossene Schleife zu bilden, indem er durch die weichferromagnetische Schicht 500F zurückgeht (z. B. um Domänenwände zu bilden). Somit bildet die Hälfte des magnetischen Flusses (z. B. der Vormagnetisierungsfluss 530) durch die weichferromagnetische Schicht 500F eine geschlossene Schleife durch die hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 500G und die andere Hälfte des magnetischen Flusses (z. B. der induzierte magnetische Fluss 540) durch die weichferromagnetische Schicht 500F bildet eine geschlossene Schleife durch die weichferromagnetische Schicht 500E (z. B. als Vormagnetisierungsfluss 530').

**[0064]** Die Dicken der weich- und hartferromagnetischen Schichten 502, 504 sind gemeinsam für den Abschluss des magnetischen Flusses von Schicht zu Schicht optimiert. Wie man sieht, ist die Größe des magnetischen Flusses durch die hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 504 gleich oder ungefähr gleich der Hälfte der Größe des magnetischen Flusses durch die weichferromagnetischen Schichten 502. Daher kann die Flussaustauschgleichung (1) wie folgt umgeschrieben werden:

$$\frac{1}{2} \mu_0 M_{S\_weich} \tau_{weich} = \mu_0 M_{S\_hart} \tau_{hart} \quad (3)$$

**[0065]** Damit der magnetische Fluss durch benachbarte weich- und hartferromagnetische Schichten 502, 504 gleich ist, beträgt das Verhältnis der Dicke der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht 504 zur Dicke der weichferromagnetischen

Schicht 502  $\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}} : 1$ , wodurch die Dicken

der weich- und der hartferromagnetischen Schicht für den Abschluss des magnetischen Flusses von Schicht zu Schicht gemeinsam optimiert werden. In **Fig. 5** ist dieses Dickenverhältnis dargestellt, wobei jede weichferromagnetische Schicht 502 eine Einheitsdicke (UT) und jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht 504 eine Dicke von

$\frac{1}{2} UT \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}}$  aufweist. Die Dicke jeder Schicht

(z. B. der ferromagnetischen Schichten 500 und der Isolatorschichten 510) wird in Bezug auf die „z“-Achse gemessen, die orthogonal zu den oberen und unteren ebenen Flächen des Substrats 550 und zur Hauptebene des Kerns 50 verläuft. Es ist zu beachten, dass das „entmagnetisierende“ Feld sehr stark ist, egal in welcher Richtung die Struktur am kürzesten ist. In diesem Fall ist die Dicke („z“-Abmessung) typischerweise >100 X kleiner als die „y“- und „x“-Abmessungen der ferromagnetischen Schichten 500, so dass dieses Feld sehr stark ist und in den meisten Fällen verhindert, dass die „z“-Achse als leichte Achse festgelegt wird.

**[0066]** Wenn der Kern 50 in eine mehrstufige Verdrahtungsstruktur integriert ist, um einen Induktor zu bilden, ist die Induktionsspule vorzugsweise so konfiguriert und ausgerichtet, dass der Magnetfluss der Induktionsspule durch die ferromagnetischen Schichten 500 in einer Richtung parallel zur Hartmagnetisierungsachse 522 verläuft.

**[0067]** Im Allgemeinen umfasst der Kern 50 N ferromagnetische Schichten 500, wobei N eine ungerade ganze Zahl ist, die größer oder gleich 3 ist. Mit anderen Worten umfasst der Kern 50 obere und untere hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten 504 und eine ungerade ganze Zahl von weichferromagnetischen Schichten 502 zwischen den oberen und unteren hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschichten 504. Eine ungerade Zahl von weichferromagnetischen Schichten 502 verhindert die Akkumulation des induzierten magnetischen Flusses 540 im Kern 50.

**[0068]** Fig. 6 ist eine perspektivische Explosionsansicht des in Fig. 5 dargestellten planaren Magnetkerns 50. Die Deckschicht 212 ist in Fig. 6 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Fig. 6 illustriert ferner die magnetischen Flusslinien 530, 530', 540 in den ferromagnetischen Schichten 500. Die magnetischen Flusslinien 530, 530', 540 durch die weich- und hartferromagnetischen Schichten 502, 504 verlaufen parallel oder im Wesentlichen parallel (d. h. innerhalb von 10 Grad) zur leichten Magnetisierungsachse 520. Darüber hinaus sind die magnetischen Flusslinien 530 und/oder 540 durch die weich- und hartferromagnetischen Schichten 502, 504 orthogonal oder im Wesentlichen orthogonal zur Hartmagnetisierungsachse 522 (d. h. innerhalb von 10 Grad).

**[0069]** Fig. 7 ist ein Flussdiagramm 70 eines Verfahrens zur Herstellung einer Halbleiteranordnung gemäß einer Ausführungsform. In Schritt 700 wird eine abwechselnde Folge von ferromagnetischen Schichten und isolierenden Schichten aufgebracht. Die ferromagnetischen Schichten umfassen eine Vielzahl von hartferromagnetischen Schichten und eine Vielzahl von weichferromagnetischen Schichten,

und jede ferromagnetische Schicht umfasst eine weichferromagnetische Schicht oder eine hartferromagnetische Schicht. Darüber hinaus ist jede hartferromagnetische Schicht eine benachbarte ferromagnetische Schicht von mindestens einer (d. h. 1 oder 2) benachbarten weichferromagnetischen Schicht. Zum Beispiel kann jede hartferromagnetische Schicht die oberste oder unterste ferromagnetische Schicht in einem horizontal geschichteten Magnetkern sein. In diesem Fall ist jede hartferromagnetische Schicht eine benachbarte ferromagnetische Schicht von nur einer weichferromagnetischen Schicht (z. B. hat die hartferromagnetische Schicht auf der Oberseite des Kerns eine benachbarte weichferromagnetische Schicht unter der oberen hartferromagnetischen Schicht, und die hartferromagnetische Schicht auf der Unterseite des Kerns hat eine benachbarte weichferromagnetische Schicht über der unteren hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht). In einem anderen Beispiel ist die hartferromagnetische Schicht zwischen der oberen und der unteren ferromagnetischen Schicht angeordnet, wobei die hartferromagnetische Schicht zwei benachbarte weichferromagnetische Schichten hat (eine über und eine unter der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht). In einigen Ausführungsformen können die ferromagnetischen Schichten in weich-hartferromagnetischen Schichtpaaren aufgebracht werden.

**[0070]** In Schritt 710 wird in jeder ferromagnetischen Schicht eine leichte Magnetisierungsachse induziert. Die leichte Achse der Magnetisierung verläuft parallel zu einer oberen ebenen Fläche des Halbleiter-substrats, über oder auf dem das Halbleiterbauelement gebildet wird, und liegt innerhalb der Hauptebene der jeweiligen ferromagnetischen Schicht. Die leichte Achse liegt auch innerhalb der Hauptebene der jeweiligen ferromagnetischen Schicht. Die leichte Magnetisierungsachse kann während oder nach dem Aufbringen der ferromagnetischen Schicht (Schritt 700) induziert werden. Zum Beispiel kann während dem Aufbringen der ferromagnetischen Schicht (z. B. durch Elektroabscheidung und/oder Sputterabscheidung) ein Vormagnetisierungsfeld angelegt werden. Das Vormagnetisierungsfeld ist so konfiguriert, dass es durch die ferromagnetische Schicht, wenn sie aufgebracht wird, in einer Richtung parallel zur oberen ebenen Oberfläche des Halbleitersubstrats verläuft, um die leichte Magnetisierungsachse zu bilden. Zusätzlich oder alternativ kann das Vormagnetisierungsfeld während einer Glühphase nach dem Aufbringen angelegt werden.

**[0071]** Die Induktion einer leichten Magnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht induziert eine Hartmagnetisierungsachse in der jeweiligen ferromagnetischen Schicht. Die Hartmagnetisierungsachse ist orthogonal zur leichten Magnetisierung-

sachse in der Hauptebene der jeweiligen ferromagnetischen Schicht. Beispielsweise kann die leichte Magnetisierungsachse parallel zur „x“-Achse verlaufen, die Hartmagnetisierungsachse kann parallel zur „y“-Achse verlaufen, und die ferromagnetischen Schichten können entlang der „z“-Achse abgelagert werden.

**[0072]** In Schritt 720 wird jede hartferromagnetische Schicht magnetisiert, um eine entsprechende hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht zu bilden. Jede hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht erzeugt einen in der Ebene liegenden Vormagnetisierungsfluss durch die jeweilige hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht in einer ersten Richtung, die parallel zur leichten Achse der Magnetisierung (z. B. in Schritt 710 induziert) in jeder ferromagnetischen Schicht verläuft. Der Vormagnetisierungsmagnetfluss hat einen Magnetisierungszustand, der in eine erste Richtung ausgerichtet ist. Der Vormagnetisierungsfluss bildet einen geschlossenen Pfad, indem er durch die benachbarte weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung verläuft, die der ersten Richtung entgegengesetzt ist. Jede hartferromagnetische Schicht kann während dem Aufbringen der hartferromagnetischen Schicht, während eines Glühvorgangs nach der Abscheidung (z. B. in Gegenwart eines Magnetfelds in der Ebene mit ausreichender Stärke) und/oder während der Induktion der leichten Magnetisierungsachse in der hartferromagnetischen Schicht (z. B. in Schritt 710) magnetisiert werden. In einigen Ausführungsformen erfolgen die Schritte 710 und 720 gleichzeitig.

**[0073]** In Schritt 730 wird ein horizontal geschichteter planarer Magnetkern definiert, der die ferromagnetischen Schichten und die Isolatorschichten enthält, beispielsweise durch Photolithographie und Ätzen.

**[0074]** In einigen Ausführungsformen kann das Verfahren das Ausbilden einer leitenden Wicklung um den horizontal geschichteten planaren Magnetkern umfassen, um beispielsweise einen Induktor zu bilden. Die leitende Wicklung kann so konfiguriert sein, dass sie ein Induktionsspulenmagnetfeld bildet, das durch die mindestens eine benachbarte weichferromagnetische Schicht in einer Richtung parallel zur Hartmagnetisierungsachse der mindestens einen benachbarten weichferromagnetischen Schicht verläuft, um beispielsweise Domänenwandbewegung und damit verbundene Energieverluste zu vermeiden.

**[0075]** In einer Ausführungsform ist die obere ferromagnetische Schicht in der Vielzahl der ferromagnetischen Schichten eine hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht (z. B. eine obere hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht). Zusätzlich oder alternativ ist die untere ferromagne-

tische Schicht in der Vielzahl der ferromagnetischen Schichten eine hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht (z. B. eine untere hartferromagnetische Vormagnetisierungsschicht). Wenn die oberen und unteren ferromagnetischen Schichten jeweils hartferromagnetische Vormagnetisierungsschichten sind, können die anderen ferromagnetischen Schichten nur weichferromagnetische Schichten sein (z. B. eine ungerade Zahl von weichferromagnetischen Schichten). In dieser Ausführungsform kann das Verhältnis zwischen der hartferromagnetischen Dicke jeder hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht und der weichferromagnetischen Dicke jeder weichferromagnetischen Schicht wie folgt sein

$\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}} : 1$  wobei  $M_{S\_weich}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht ist, wie oben beschrieben.

**[0076]** In einer anderen Ausführungsform werden die ferromagnetischen Schichten als weich-hart-ferromagnetische Schichtpaare abgeschieden, wobei jedes weich-hartferromagnetische Schichtpaar eine weichferromagnetische Schicht und eine harterromagnetische Vormagnetisierungsschicht enthält. Zwischen der weichferromagnetischen Schicht und der hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht in jedem weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar wird eine Intra-Paar-Abstandshalterschicht abgeschieden, und zwischen benachbarten weich-hartferromagnetischen Schichtpaaren wird eine Zwischenpaar-Abstandshalterschicht abgeschieden. Die Zwischenschicht-Abstandshalter und die Intra-Paar-Abstandshalter sind Isolatorschichten, wobei die Dicke der Zwischenpaar-Abstandshalterschicht größer ist als die Dicke der Intra-Paar-Abstandshalterschicht. In dieser Ausführungsform ist das Verhältnis einer hartferromagnetischen Dicke jeder hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht zu einer weichferromagnetischen Dicke jeder weichferromagnetischen

Schicht  $\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}} : 1$  wobei  $M_{S\_weich}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Vormagnetisierungsschicht ist.

**[0077]** Abb. 8 ist ein repräsentativer Querschnitt 80 eines Magnetkerninduktors 800, der in ein Halbleiterbauelement auf einem Substrat 810 gemäß einer Ausführungsform integriert ist. Der Induktor 800 umfasst einen horizontal geschichteten Magnetkern 820 und eine leitende Wicklung 830.

**[0078]** Die leitende Wicklung 830 ist in ein mehrstufiges Verdrahtungsnetzwerk 835 integriert, das elekt-

rische Verbindungen zwischen den PMOS- und NMOS-Transistorgates 862, 864, der Induktivität 800 und den Chipkontaktstrukturen 832 der integrierten Schaltung (IC) herstellt. Die PMOS- und NMOS-Transistorgates 862, 864 werden auf einem Halbleitersubstrat 810 (z. B. Silizium, Silizium-auf-Isolator oder einem anderen Halbleitersubstrat) hergestellt. Die IC-Chip-Kontaktstrukturen 832 können C4-Kontakte, Lötunkte oder Kupfersäulen umfassen, aber auch alle anderen Kontakte für die externe Kommunikation des Halbleiterbauelements sind uneingeschränkt zulässig.

**[0079]** Das mehrstufige Verdrahtungsnetz 835 ist in Verdrahtungsebenen 820 unterteilt. Jede Verdrahtungsebene 820 enthält Verdrahtungssegmente 850. Die elektrischen Verbindungen zwischen den Verdrahtungssegmenten 850 der verschiedenen Verdrahtungsebenen 837 werden durch leitende VIAs 840 hergestellt. Die Zwischenräume im mehrstufigen Verdrahtungsnetz 835 sind mit einem dielektrischen Isoliermaterial 860 wie SiO<sub>2</sub> gefüllt.

**[0080]** Der Induktor 800 ist oben auf dem mehrstufigen Verdrahtungsnetz 835 integriert. Die leitende Wicklung 830 ist stückweise aus Verdrahtungssegmenten 850' und VIAs 840' aufgebaut, die in mindestens zwei Integrationsebenen 839 auf dem mehrstufigen Verdrahtungsnetzwerk 835 angeordnet sind. Die VIAs 840', die Teile der Wicklung 830 bilden, stehen senkrecht oder orthogonal zur Hauptebene 875 und verbinden die Verdrahtungssegmente 850' in den beiden Integrationsebenen 839 elektrisch miteinander. In anderen Ausführungsformen kann der Induktor 800 in das mehrstufige Verdrahtungsnetz 835 integriert werden, anstatt in den Integrationsebenen 830 auf dem mehrstufigen Verdrahtungsnetz 835.

**[0081]** Der Magnetkern 820 kann jeden der hier beschriebenen Magnetkerne umfassen. Zum Beispiel kann der Magnetkern 820 derselbe sein wie der Kern 20, der Kern 40 oder der Kern 50 oder diesen umfassen. Die leitende Wicklung 830 ist so konfiguriert und/oder angeordnet, dass sie ein Induktionsspulenmagnetfeld erzeugt, das einen Induktionsspulenmagnetfluss durch die weichferromagnetischen Schichten im Kern 820 erzeugt. Der Magnetfluss der Induktionsspule ist parallel zur Hartmagnetisierungsachse in der jeweiligen weichferromagnetischen Schicht. Der magnetische Fluss der Induktionsspule durch die weichferromagnetischen Schichten und die leichte Achse der Magnetisierung in den weichferromagnetischen Schichten sind parallel und/oder im Wesentlichen parallel zur Hauptebene 875 des planaren Magnetkerns 820, die auch parallel und/oder im Wesentlichen parallel zu den Verdrahtungsebenen 837 und der Oberfläche 812 des Halbleitersubstrats 810 ist.

**[0082]** Der Induktor 800 kann eine Komponente eines Leistungswandlers sein, z. B. eines Gleichstrom-Gleichstrom-Wandlers mit geschalteter Induktivität. In einigen Ausführungsformen kann der Leistungswandler mehrere Induktoren enthalten, wobei jeder Induktor mit dem Induktor 800 identisch oder ihm ähnlich ist. Die Induktoren können elektrisch parallel zueinander, elektrisch in Reihe zueinander oder in einer Kombination davon angeordnet sein. Die mehreren Induktoren können auf denselben Integrations- oder Verdrahtungsebenen oder in verschiedenen Integrations- oder Verdrahtungsebenen integriert sein.

**[0083]** Die Erfindung sollte nicht als auf die oben beschriebenen besonderen Ausführungsformen beschränkt angesehen werden, sondern sollte so verstanden werden, dass sie alle Aspekte der Erfindung abdeckt, wie sie in den beigefügten Ansprüchen angemessen dargelegt sind. Verschiedene Modifikationen, äquivalente Verfahren sowie zahlreiche Strukturen, auf die die Erfindung anwendbar sein kann, werden für den Fachmann auf dem Gebiet, auf das sich die Erfindung bezieht, nach Durchsicht dieser Offenbarung offensichtlich sein. Die Ansprüche sollen solche Modifikationen und Äquivalente abdecken.

**[0084]** Das wird beansprucht:

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- US 17/108096 [0001]

### Patentansprüche

1. Horizontal geschichteter planarer Magnetkern, der Folgendes umfasst:

eine Vielzahl von ferromagnetischen Schichten, die eine Vielzahl von hartferromagnetischen Schichten und eine Vielzahl von weichferromagnetischen Schichten umfasst, wobei:

jede ferromagnetische Schicht eine der weichferromagnetischen Schichten oder eine der hartferromagnetischen Schichten umfasst, und

jede hartferromagnetische Schicht eine benachbarte ferromagnetische Schicht von mindestens einer weichferromagnetischen Schicht ist, und

eine Vielzahl von Isolatorschichten, wobei jede Isolatorschicht zwischen benachbarten ferromagnetischen Schichten angeordnet ist,

wobei jede ferromagnetische Schicht eine leichte Magnetisierungsachse hat, die parallel zu einer Hauptebene des planaren Magnetkerns verläuft, und die leichten Magnetisierungsachsen ausgerichtet sind.

2. Kern gemäß Anspruch 1, wobei die ferromagnetischen Schichten entlang einer Höhe des planaren Magnetkerns gestapelt sind.

3. Kern gemäß Anspruch 1, wobei die mehreren hartferromagnetischen Schichten eine obere hartferromagnetische Schicht umfassen, die als obere ferromagnetische Schicht angeordnet ist.

4. Kern gemäß Anspruch 3, wobei die Mehrzahl der hartferromagnetischen Schichten eine untere hartferromagnetische Schicht umfasst, die als untere ferromagnetische Schicht angeordnet ist.

5. Kern gemäß Anspruch 4, wobei die mehreren weichferromagnetischen Schichten zwischen der oberen und unteren hartferromagnetischen Schicht angeordnet sind.

6. Kern gemäß Anspruch 5, wobei die Mehrzahl der weichferromagnetischen Schichten  $N$  weichferromagnetische Schichten umfasst, wobei  $N$  eine ungerade ganze Zahl größer oder gleich 3 ist.

7. Kern gemäß Anspruch 4, wobei:  
die weichferromagnetische Dicke jeder weichferromagnetischen Schicht gleich ist,  
die hartferromagnetische Dicke jeder hartferromagnetischen Schicht ist gleich, und  
die hartferromagnetische Dicke auf die weichferromagnetische Dicke bezogen ist.

8. Kern gemäß Anspruch 7, wobei das Verhältnis zwischen der hartferromagnetischen Dicke und der weichferromagnetischen Dicke

$$\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}} : 1 \text{ wobei } M_{S\_weich} \text{ die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen Schicht}$$

netisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Schicht ist.

9. Kern gemäß Anspruch 5, wobei:  
die oberen und unteren hartferromagnetischen Schichten jeweils magnetisiert sind, um einen jeweiligen Vormagnetisierungsfluss durch die oberen bzw. unteren hartferromagnetischen Schichten in einer ersten Richtung zu erzeugen, die parallel zu den leichten Magnetisierungsachsen in den oberen und unteren hartferromagnetischen Schichten verläuft.

10. Kern gemäß Anspruch 9, wobei:  
der jeweilige Vormagnetisierungsfluss durch die obere hartferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine erste benachbarte weichferromagnetische Schicht bildet,  
der jeweilige Vormagnetisierungsfluss durch die untere hartferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht bildet, und  
der jeweilige Vormagnetisierungsfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung verläuft, die der ersten Richtung entgegengesetzt ist.

11. Kern gemäß Anspruch 10, wobei:  
der jeweilige Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht einen Magnetfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht in der zweiten Richtung induziert,  
der induzierte magnetische Fluss durch die erste benachbarte weichferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine dritte benachbarte weichferromagnetische Schicht in der ersten Richtung bildet,  
der induzierte magnetische Fluss durch die zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine vierte benachbarte weichferromagnetische Schicht in der ersten Richtung bildet,  
die obere hartferromagnetische Schicht und die dritte benachbarte weichferromagnetische Schicht die benachbarten ferromagnetischen Schichten der ersten benachbarten weichferromagnetischen Schicht sind, und  
die untere hartferromagnetische Schicht und die vierte benachbarte weichferromagnetische Schicht die benachbarten ferromagnetischen Schichten der zweiten benachbarten weichferromagnetischen Schicht sind.

12. Kern gemäß Anspruch 1, wobei die hart- und weichferromagnetischen Schichten Kobalt, Eisen und/oder Nickel umfassen.

13. Kern gemäß Anspruch 1, wobei die Isolatorschichten Folgendes umfassen:

- (a) Aluminium, Kobalt, Chrom, Silizium, Tantal, Titan und/oder Zirkonium, oder
- (b) eine Verbindung aus (1) Aluminium, Kobalt, Chrom, Silizium, Tantal, Titan und/oder Zirkonium und (2) Sauerstoff und/oder Stickstoff.

14. Der Kern nach Anspruch 1, wobei: jede hartferromagnetische Schicht eine Koerzitivfeldstärke von über 50 Oe aufweist und jede weichferromagnetische Schicht eine Koerzitivfeldstärke unter 1 Oe aufweist.

15. Kern gemäß Anspruch 1, wobei die Dicke jeder ferromagnetischen Schicht in einem Bereich von etwa 10 nm bis etwa 1.000 nm liegt, wobei die Dicke in Bezug auf eine Achse gemessen ist, die orthogonal zur Hauptebene des planaren Magnetkerns ist.

16. Kern gemäß Anspruch 15, wobei die Dicke jeder Isolatorschicht in einem Bereich von etwa 1 nm bis etwa 50 nm liegt, wobei die Dicke jeder Isolatorschicht in Bezug auf die Achse gemessen ist.

17. Kern gemäß Anspruch 16, wobei die Gesamtdicke des Kerns weniger als oder gleich 100.000 nm beträgt, wobei die Gesamtdicke in Bezug auf die Achse gemessen ist.

18. Horizontal geschichteter planarer Magnetkern, der Folgendes umfasst:

eine Vielzahl von weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaaren, wobei jedes weich-hart-ferromagnetische Schichtpaar eine weichferromagnetische Schicht und eine hartferromagnetische Schicht enthält;

eine Intrapaar-Abstandsschicht, die zwischen der weichferromagnetischen Schicht und der hartferromagnetischen Schicht in jedem weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar angeordnet ist;

eine Zwischenpaar-Abstandshalterschicht zwischen benachbarten weich-hartferromagnetischen Schichtpaaren,

wobei:

eine Zwischenpaar-Abstandshalterdicke jeder Zwischenpaar-Abstandshalterschicht größer ist als eine Intrapaar-Abstandshalterdicke jeder Intrapaar-Abstandshalterschicht, und

die Zwischenpaar-Abstandshalterdicke und die Dicke der Intra-Paar-Abstandshalter in Bezug auf eine Achse gemessen sind, die orthogonal zu einer Hauptebene des Kerns verläuft.

19. Kern gemäß Anspruch 18, wobei für jedes weich-hart-ferromagnetische Paar die relative Position der weichferromagnetischen Schicht in Bezug auf die hartferromagnetische Schicht die gleiche ist.

20. Kern gemäß Anspruch 19, wobei für jedes weich-hart-ferromagnetische Paar die weichferromagnetische Schicht unterhalb der hartferromagnetischen Schicht angeordnet ist.

21. Kern gemäß Anspruch 18, der außerdem Folgendes umfasst:

eine erste Zwischenpaar-Abstandsschicht, die zwischen einem ersten weich-hartferromagnetischen Schichtpaar und einem zweiten weich-hartferromagnetischen Schichtpaar angeordnet ist; und eine zweite Zwischenpaar-Abstandsschicht, die zwischen dem zweiten weich-hartferromagnetischen Schichtpaar und einem dritten weich-hartferromagnetischen Schichtpaar angeordnet ist, wobei das zweite weich-hart-ferromagnetische Schichtpaar zwischen dem ersten und dem dritten weich-hartferromagnetischen Schichtpaar angeordnet ist.

22. Kern gemäß Anspruch 18, wobei: die weichferromagnetische Dicke jeder weichferromagnetischen Schicht gleich ist, eine hartferromagnetische Dicke jeder hartferromagnetischen Schicht gleich ist, die weich- und hartferromagnetischen Dicken in Bezug auf die Achse gemessen sind, und die hartferromagnetische Dicke auf die weichferromagnetische Dicke bezogen ist.

23. Kern gemäß Anspruch 22, wobei in jedem weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar:

die hartferromagnetische Schicht magnetisiert ist, um einen Vormagnetisierungsfluss durch die hartferromagnetische Schicht in einer ersten Richtung zu erzeugen, die parallel zu einer leichten Achse der Magnetisierung in der hartferromagnetischen Schicht ist, wobei die leichte Achse der Magnetisierung innerhalb einer Hauptebene der hartferromagnetischen Schicht angeordnet ist, und der Vormagnetisierungsmagnetfluss eine geschlossene Schleife nur durch die weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung bildet, die parallel zu einer leichten Achse der Magnetisierung in der weichferromagnetischen Schicht ist, wobei die leichte Magnetisierungsachse innerhalb einer Hauptebene der weichferromagnetischen Schicht angeordnet ist.

24. Kern gemäß Anspruch 23, wobei in jedem weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar:

der Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die weichferromagnetische Schicht einen Magnetfluss durch die weichferromagnetische Schicht in der zweiten Richtung induziert, und der induzierte magnetische Fluss eine gutgeschlossene Schleife nur durch die hartferromagnetische Schicht in der ersten Richtung bildet.

25. Kern gemäß Anspruch 24, wobei das Verhältnis der hartferromagnetischen Dicke zur weich-

ferromagnetischen  $\frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}} : 1$  ist, wobei  $M_{S\_weich}$

die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Schicht ist.

26. Kern gemäß Anspruch 25, wobei:  
die Dicke der Zwischenpaar-Abstandshalter der ersten und der zweiten Zwischenpaar-Abstandshalter-schicht die gleiche ist,  
die Dicke der Intra-Paar-Abstandshalter jeder Intra-Paar-Abstandshalter-schicht gleich ist, und  
die Dicke der Zwischenpaar-Abstandshalter im Bereich des 2- bis 10-fachen der Dicke der Intra-Paar-Abstandshalter liegt.

27. Kern gemäß Anspruch 18, wobei die Intra-paar- Abstandshalter-schichten und die Zwischen-paar-Abstandshalter-schichten ein Isolator-material umfassen.

28. Induktionsspule, aufweisend:  
einen horizontal geschichteten planaren Magnetkern, der Folgendes umfasst:  
eine Vielzahl von ferromagnetischen Schichten, die eine Vielzahl von hartferromagnetischen Schichten und eine Vielzahl von weichferromagnetischen Schichten umfasst, wobei:  
jede ferromagnetische Schicht eine der weichferromagnetischen Schichten oder eine der hartferromagnetischen Schichten umfasst, und  
jede hartferromagnetische Schicht eine benachbarte ferromagnetische Schicht von mindestens einer benachbarten weichferromagnetischen Schicht ist, und  
eine Vielzahl von Isolatorschichten, wobei jede Isolatorschicht zwischen benachbarten ferromagnetischen Schichten angeordnet ist,  
wobei jede ferromagnetische Schicht eine leichte Magnetisierungsachse hat, die parallel zu einer Hauptebene des planaren Magnetkerns verläuft, und die leichten Magnetisierungsachsen aufeinander ausgerichtet sind, und  
eine leitende Wicklung, die sich im Allgemeinen spiralförmig auf der Außenseite des ebenen geschichteten Magnetkerns windet.

29. Induktor gemäß Anspruch 28, wobei:  
jede ferromagnetische Schicht eine Hartmagnetisierungsachse aufweist, die orthogonal zur leichten Magnetisierungsachse innerhalb einer Hauptebene der jeweiligen ferromagnetischen Schicht liegt, und die Hartmagnetisierungsachsen ausgerichtet sind, und  
die leitende Wicklung so konfiguriert ist, dass sie einen Induktionsspulen-Magnetfluss durch den horizontal geschichteten planaren Magnetkern in einer Richtung parallel zur Hartmagnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht erzeugt.

30. Induktor gemäß Anspruch 28, wobei:  
die Vielzahl der hartferromagnetischen Schichten eine obere hartferromagnetische Schicht, die als obere ferromagnetische Schicht angeordnet ist, und eine untere hartferromagnetische Schicht, die als untere ferromagnetische Schicht angeordnet ist, umfasst,  
die mehreren weichferromagnetischen Schichten zwischen der oberen und unteren hartferromagnetischen Schicht angeordnet sind,  
jede der oberen und unteren hartferromagnetischen Schichten magnetisiert sind, um einen jeweiligen Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die oberen bzw. unteren hartferromagnetischen Schichten in einer ersten Richtung zu erzeugen, die parallel zu den leichten Magnetisierungsachsen in den oberen und unteren hartferromagnetischen Schichten verläuft,  
der Vormagnetisierungsfluss durch die obere hartferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine erste benachbarte weichferromagnetische Schicht bildet,  
der Vormagnetisierungsfluss durch die untere hartferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht bildet, und  
der Vormagnetisierungsfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht in einer zweiten Richtung verläuft, die der ersten Richtung entgegengesetzt ist.

31. Induktor gemäß Anspruch 30, wobei:  
der Vormagnetisierungsmagnetfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht einen Magnetfluss durch die erste und zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht in der zweiten Richtung induziert,  
der induzierte magnetische Fluss durch die erste benachbarte weichferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine dritte benachbarte weichferromagnetische Schicht in der ersten Richtung bildet,  
der induzierte magnetische Fluss durch die zweite benachbarte weichferromagnetische Schicht eine geschlossene Schleife durch eine vierte benachbarte weichferromagnetische Schicht in der ersten Richtung bildet,  
die obere hartferromagnetische Schicht und die dritte benachbarte weichferromagnetische Schicht die benachbarten ferromagnetischen Schichten der ersten benachbarten weichferromagnetischen Schicht sind, und  
die untere hartferromagnetische Schicht und die vierte benachbarte weichferromagnetische Schicht die benachbarten ferromagnetischen Schichten der zweiten benachbarten weichferromagnetischen Schicht sind.

32. Struktur, die Folgendes umfasst:  
eine integrierte Halbleiterschaltung mit einem mehr-

stufigen Verdrahtungsnetzwerk die auf einem Substrat gebildet ist, wobei der Induktor gemäß Anspruch 28 in das mehrstufige Verdrahtungsnetzwerk integriert ist.

33. Verfahren zur Herstellung, umfassend:  
Aufbringen einer Vielzahl von ferromagnetischen Schichten über einem Halbleitersubstrat, die eine Vielzahl von hartferromagnetischen Schichten und eine Vielzahl von weichferromagnetischen Schichten umfassen, wobei:  
jede ferromagnetische Schicht eine der weichferromagnetischen Schichten oder eine der hartferromagnetischen Schichten umfasst, und  
jede hartferromagnetische Schicht eine benachbarte ferromagnetische Schicht von mindestens einer benachbarten weichferromagnetischen Schicht ist, und  
Abscheiden einer Isolatorschicht zwischen benachbarten ferromagnetischen Schichten;  
Induzieren einer leichten Magnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht, wobei die leichten Magnetisierungsachsen parallel zu einer oberen ebenen Oberfläche des Halbleitersubstrats ausgerichtet sind;  
Magnetisieren jeder hartferromagnetischen Schicht, um einen Vormagnetisierungsfluß durch die jeweilige hartferromagnetische Schicht in einer ersten Richtung zu erzeugen, wobei der Vormagnetisierungsfluß parallel zur leichten Magnetisierungsachse in der jeweiligen hartferromagnetischen Schicht verläuft; und  
Definition eines horizontal geschichteten, ebenen Magnetkerns, der die mehreren ferromagnetischen Schichten und die Isolatorschichten umfasst.

34. Verfahren gemäß Anspruch 33, ferner umfassend:  
Definieren einer Hartmagnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht, wobei die Hartmagnetisierungsachse orthogonal zur leichten Achse der Magnetisierung innerhalb einer Hauptebene jeder ferromagnetischen Schicht verläuft; und  
Ausbilden einer leitenden Wicklung um den horizontal geschichteten planaren Magnetkern, wobei die leitende Wicklung so konfiguriert ist, dass sie ein Induktionsspulenmagnetfeld bildet, das durch den horizontal geschichteten planaren Magnetkern in einer Richtung parallel zur Hartmagnetisierungsachse in jeder ferromagnetischen Schicht verläuft.

35. Verfahren gemäß Anspruch 33, ferner umfassend:  
Aufbringen einer oberen hartferromagnetischen Schicht als oberste ferromagnetische Schicht;  
Aufbringen einer unteren hartferromagnetischen Schicht als untere ferromagnetische Schicht; und  
Aufbringen der mehreren weichferromagnetischen Schichten zwischen der unteren und der oberen hartferromagnetischen Schicht.

36. Verfahren gemäß Anspruch 35, wobei:  
das Verhältnis der hartferromagnetischen Dicke jeder hartferromagnetischen Schicht zur weichferromagnetischen Dicke jeder weichferromagnetischen Schicht  $\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}}$  : 1 beträgt, wobei  $M_{S\_weich}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Schicht ist, und  
die weich- und hartferromagnetischen Dicken in Bezug auf eine Achse gemessen sind, die orthogonal zur oberen ebenen Fläche des Halbleitersubstrats verläuft.

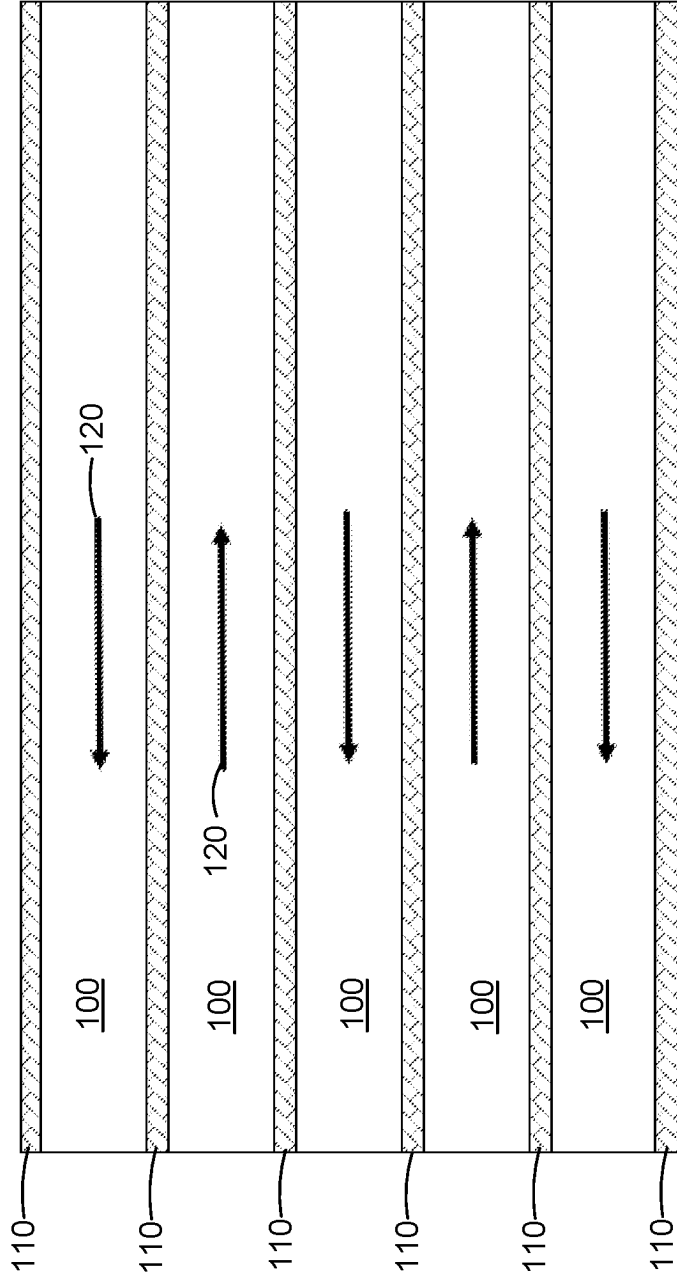
37. Verfahren gemäß Anspruch 33 ferner umfassend:  
Aufbringen einer Vielzahl von weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaaren, wobei jedes weich-hart-ferromagnetische Schichtpaar eine der weichferromagnetischen Schichten und eine der hartferromagnetischen Schichten enthält;  
Aufbringen einer Intra-Paar-Abstandsschicht zwischen der weichferromagnetischen Schicht und der hartferromagnetischen Schicht in jedem weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaar; und  
Aufbringen einer Zwischenpaar-Abstandshalterschicht zwischen benachbarten weich-hart-ferromagnetischen Schichtpaaren, wobei:  
jede Isolatorschicht eine der Intra-Paar-Abstandshalterschichten oder eine der Zwischenpaar-Abstandshalterschichten umfasst,  
eine Zwischenpaar-Abstandshalterschichtdicke jeder Zwischenpaar-Abstandshalterschicht größer ist als eine Intra-Paar-Abstandshalterschichtdicke jeder Intrapaar-Abstandshalterschicht, und  
die Dicke der Zwischenpaar-Abstandshalterschicht und die Dicke der Intrapaar-Abstandshalterschicht in Bezug auf eine Achse gemessen werden, die orthogonal zur oberen planaren Oberfläche des Halbleitersubstrats verläuft.

38. Verfahren gemäß Anspruch 37, wobei:  
das Verhältnis der hartferromagnetischen Dicke jeder hartferromagnetischen Schicht zur weichferromagnetischen Dicke jeder weichferromagnetischen Schicht  $\frac{1}{2} \times \frac{M_{S\_weich}}{M_{S\_hart}}$  : 1 beträgt, wobei  $M_{S\_weich}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder weichferromagnetischen Schicht ist und  $M_{S\_hart}$  die Sättigungsmagnetisierung jeder hartferromagnetischen Schicht ist, und  
die weich- und hartferromagnetischen Dicken in Bezug auf die Achse gemessen werden.

Es folgen 9 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

10 →



PRIOR ART

FIG. 1A

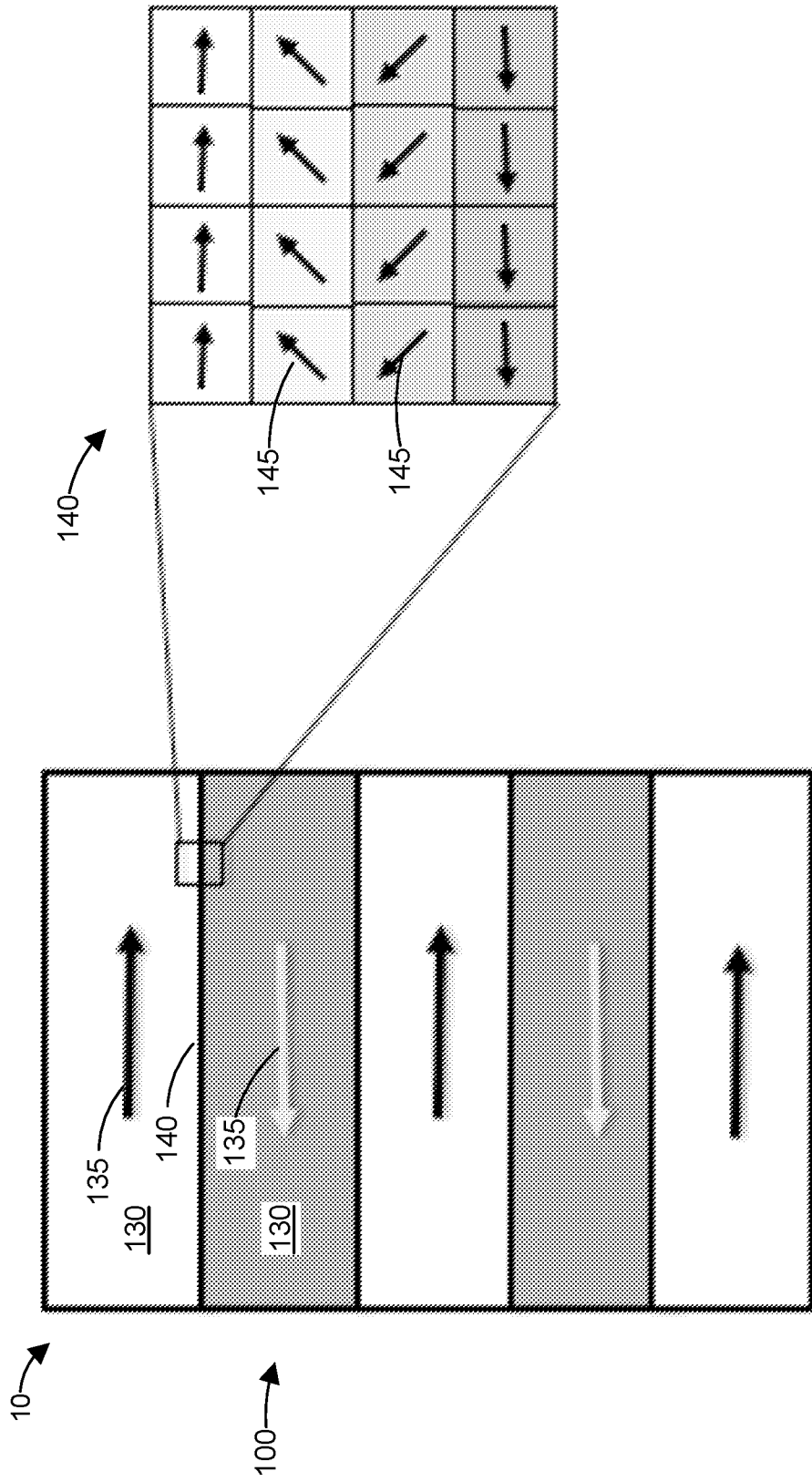


FIG. 1B

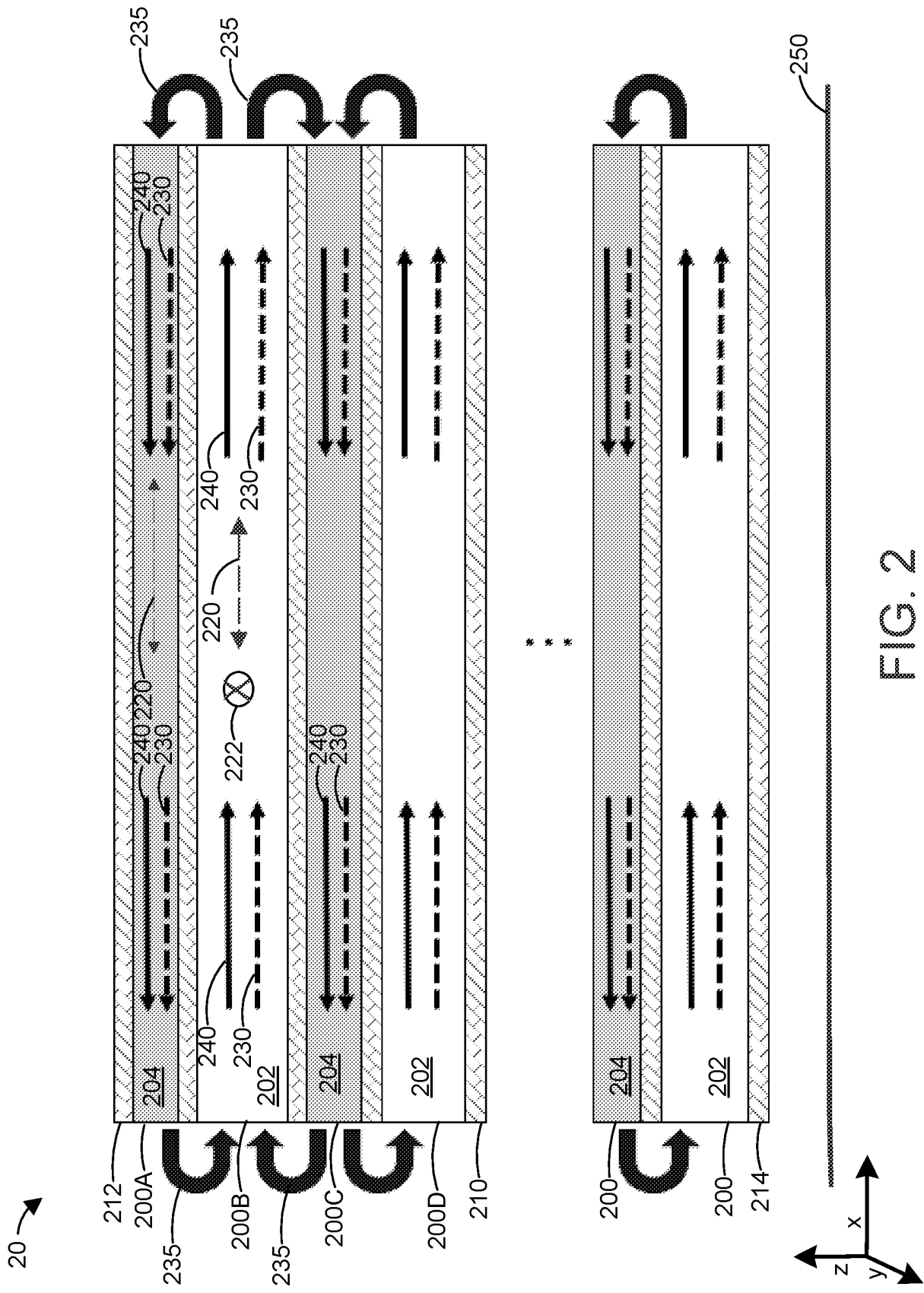


FIG. 2

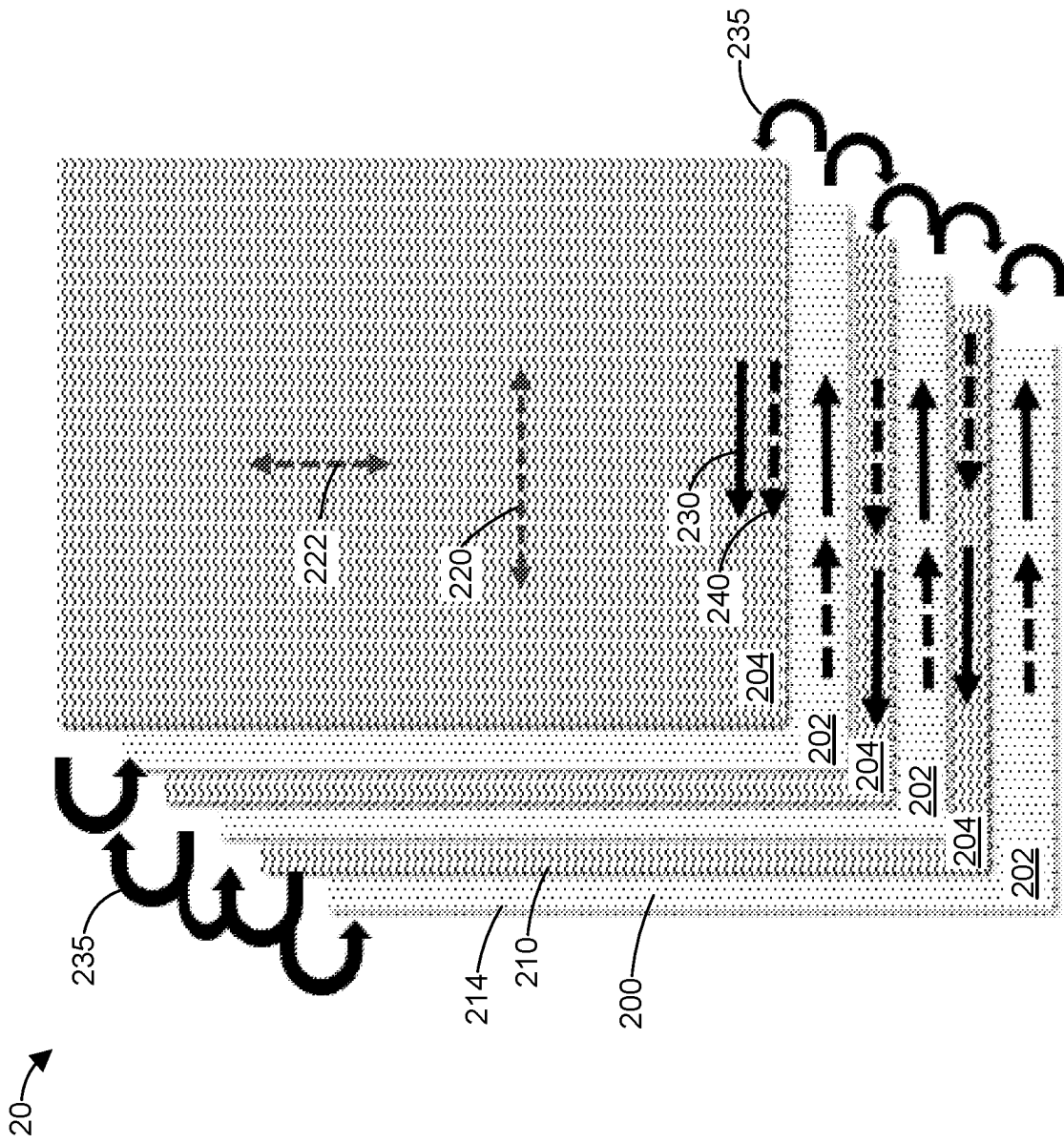


FIG. 3

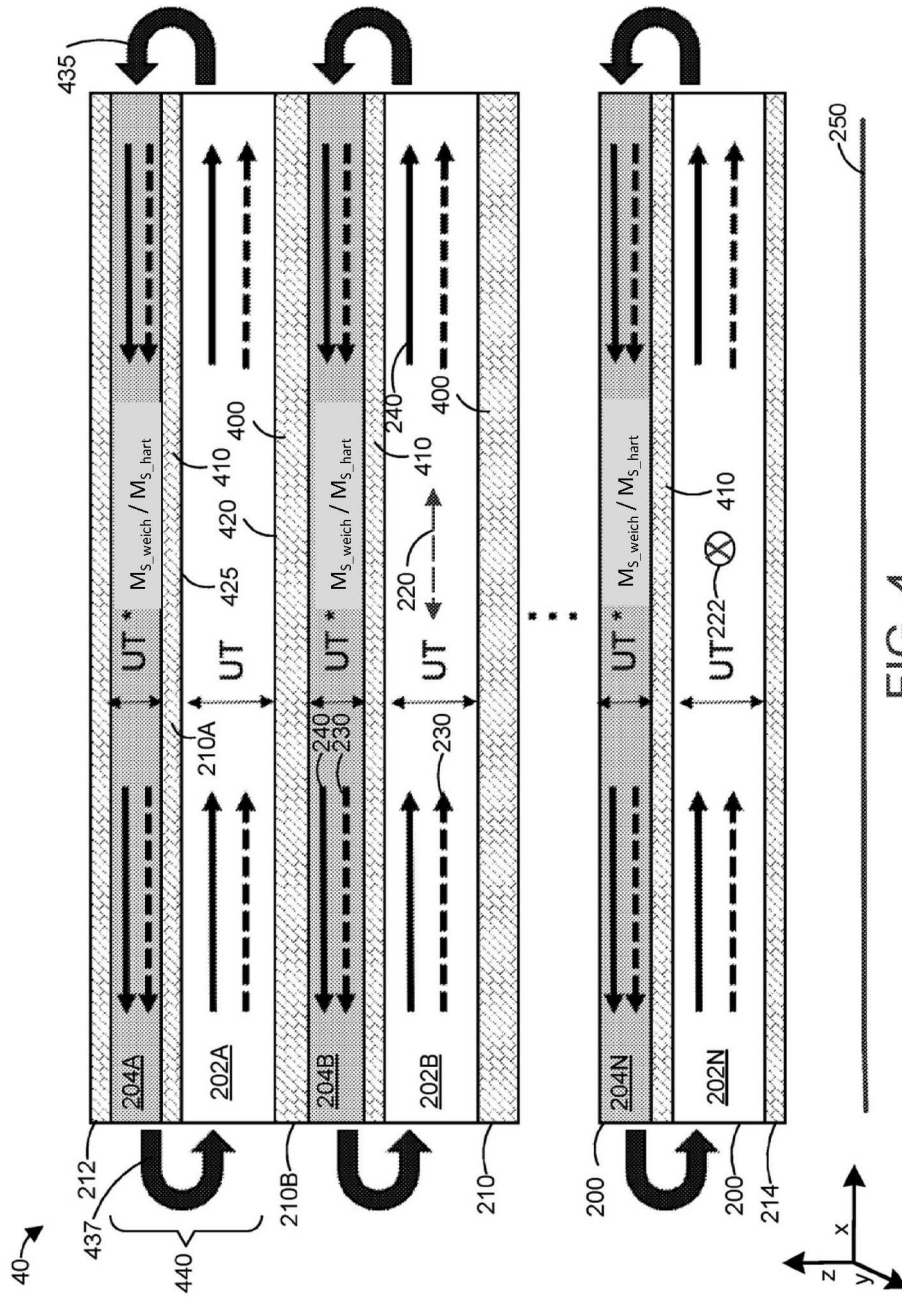


FIG. 4

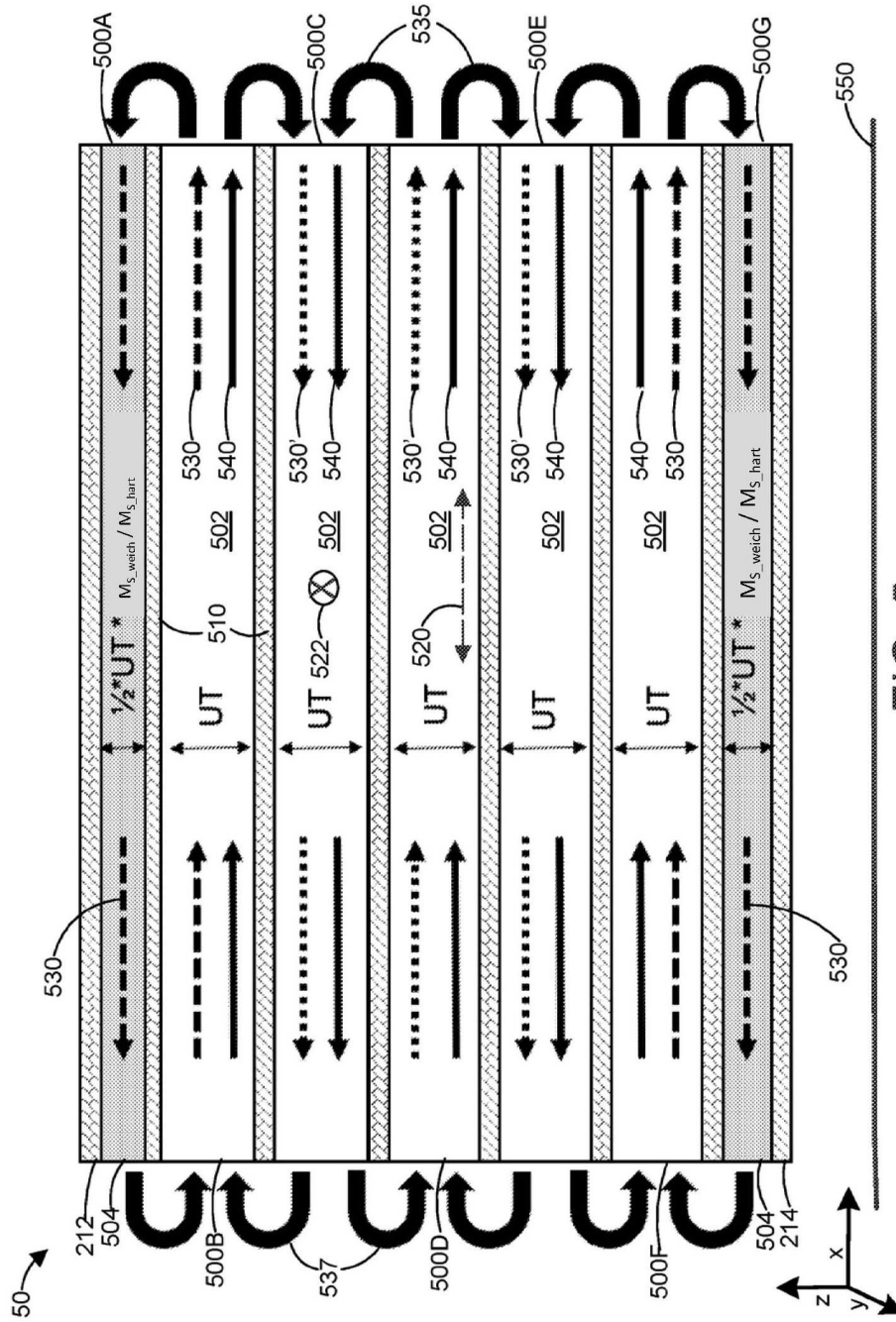


FIG. 5



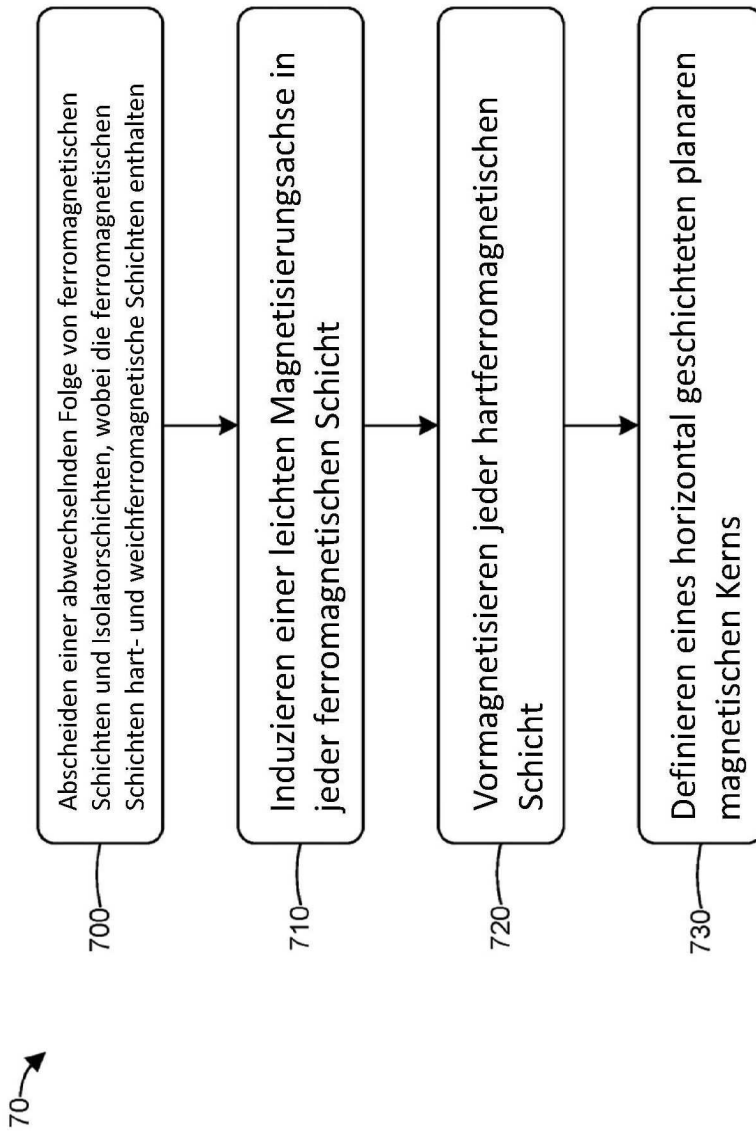


FIG. 7

