



(10) **DE 10 2018 213 633 B4** 2024.08.29

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 213 633.5**  
(22) Anmeldetag: **13.08.2018**  
(43) Offenlegungstag: **13.02.2020**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **29.08.2024**

(51) Int Cl.: **H01L 23/66** (2006.01)  
**H01L 23/60** (2006.01)  
**H01L 27/082** (2006.01)  
**H01L 29/861** (2006.01)  
**H01L 27/102** (2023.01)

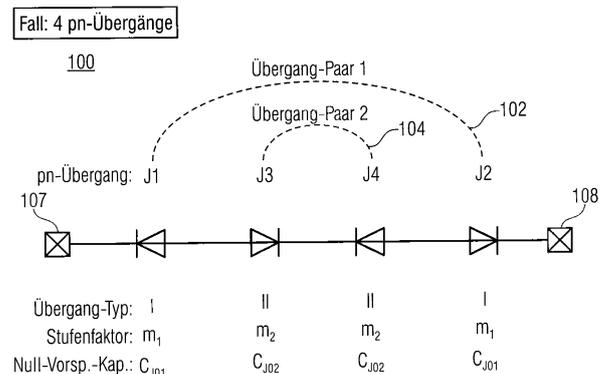
Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber: <b>Infineon Technologies AG, 85579 Neubiberg, DE</b>	(72) Erfinder: <b>Willemen, Joost, 81929 München, DE</b>
(74) Vertreter: <b>Schoppe, Zimmermann, Stöckeler, Zinkler, Schenk &amp; Partner mbB Patentanwälte, 81373 München, DE</b>	(56) Ermittelte Stand der Technik: <b>US 2008 / 0 290 465 A1</b> <b>US 2016 / 0 329 918 A1</b> <b>US 2018 / 0 083 473 A1</b>

(54) Bezeichnung: **Halbleitervorrichtung**

(57) Hauptanspruch: Eine Halbleitervorrichtung (100), die folgende Merkmale aufweist:

„n“ Paare von pn-Übergang-Strukturen, wobei n eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergangs-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergangs-Strukturen vom i-ten Typ anti-seriell geschaltet sind, wobei die pn-Übergangs-Struktur vom i-ten Typ dahingehend ausgestaltet ist, einen i-ten Übergangs-Stufenfaktor  $m_i$  aufzuweisen, wobei zumindest ein erstes Paar der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend ausgestaltet ist, einen ersten Übergangs-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_1 < 0,50$ , und ein zweites Paar der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend ausgestaltet ist, einen zweiten Übergangs-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_2 > 0,50$ , und wobei die Übergangs-Stufenfaktoren  $m_1, m_2$  des ersten und zweiten Paares der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend eingestellt sind, dass sie zu einer Erzeugung eines Störende-Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung mit einem Signalleistungspegel (PH3) führen, der zumindest 10 dB niedriger als ein Referenz-Signalleistungspegel (PH3) des Störende-Dritte-Harmonische-Signals ist, der für einen Referenzfall erhalten wird, bei dem der erste und zweite Übergangs-Stufenfaktor  $m_1, m_2$  gleich 0,25 sind.



## Beschreibung

### Technisches Gebiet

**[0001]** Ausführungsbeispiele beziehen sich auf eine Halbleitervorrichtung mit zumindest zwei Paaren von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen (hierin auch als Diodenstrukturen bezeichnet) mit eingestellten Übergang-Stufenfaktoren (auch als Diode-Potenzgesetz-Exponent bezeichnet) zum Bereitstellen einer zumindest reduzierten oder einer minimalen Erzeugung von störenden ungeradzahigen Harmonischen, zum Beispiel dritten Harmonischen.

**[0002]** Weitere Ausführungsbeispiele beziehen sich auf eine Halbleitervorrichtung mit zumindest zwei anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen mit eingestellten Übergang-Stufenfaktoren, wobei eine der zwei pn-Übergang-Strukturen eine „zusammengesetzte“ Diodenstruktur aufweist, um ein erwünschtes TVS-Verhalten (TVS = transient voltage suppressor, Überspannungsbegrenzer) der Halbleitervorrichtung bezüglich Durchbruchspannung anzupassen und zu erhalten und um eine zumindest reduzierte oder eine minimale Erzeugung von störenden ungeradzahigen Harmonischen bereitzustellen, zum Beispiel von dritten Harmonischen.

### Hintergrund

**[0003]** Diskrete ESD-Schutzvorrichtungen (ESD = electrostatic discharge, elektrostatische Entladung) und TVS-Vorrichtungen (TVS = Transient Voltage Suppressor, Überspannungsbegrenzer) weisen im Allgemeinen nichtlineare elektrische Eigenschaften auf, die eine harmonische Verzerrung von HF-Signalen (HF = Hochfrequenz) bewirken, die auf Signalleitungen vorhanden sind, z. B. auf PCB-Leitungen (PCB = printed circuit board, gedruckte Schaltungsplatine), die mit der ESD-Schutzvorrichtung oder der TVS-Vorrichtung verbunden sind. Diese Erzeugung von Harmonischen erzeugt störende und unerwünschte harmonische Signale, die andere Funktionen oder Funktionsblöcke eines elektronischen Systems stören können, wenn diese Funktionen oder Funktionsblöcke Frequenzbänder verwenden, die ein ganzzahliges Vielfaches des verzerrten HF-Signals sind.

**[0004]** So stört beispielsweise die Dritte-Harmonische(H3)-Frequenz bestimmter Frequenzbänder im Bereich zwischen 800 und 900 MHz, die bei Mobilfunkstandards verwendet werden, die HF-Signale in dem WiFi-Band mit 2,4 GHz, d. h. in dem Frequenzbereich zwischen 2,412 und 2,472 GHz.

**[0005]** Um derartige unerwünschte Störungen zwischen den oben beispielhaft beschriebenen Frequenzbändern zu vermeiden, sollten elektronische Vorrichtungen wie beispielsweise TVS-Vorrichtungen die Erzeugung von Harmonischen auf einen ausreichend niedrigen Pegel reduzieren.

**[0006]** Bei bekannten Implementierungen wird beispielsweise die Erzeugung von geradzahigen Harmonischen durch Nutzung eines streng symmetrischen Designs und eines hochsymmetrischen Verhaltens der elektronischen Vorrichtung für positive und negative Halbwellen des HF-Signals minimiert. Durch Sicherstellung einer Symmetrie können geradzahige Harmonische effizient unterdrückt werden, jedoch wird die Erzeugung von ungeradzahigen Harmonischen durch diesen Ansatz nicht bewirkt oder ausreichend unterdrückt.

**[0007]** Bezüglich einer minimalen Erzeugung von ungeradzahigen Harmonischen, zum Beispiel der dritten Harmonischen (H3), wurde im Stand der Technik lange Zeit davon ausgegangen, dass eine geringe Kapazität und ein Flach-Kapazität/Spannung(CV)-Verhalten einer elektronischen Vorrichtung zu einer geringen Erzeugung von Harmonischen einschließlich der dritten Harmonischen führt.

**[0008]** Jedoch haben aktuelle Forschungen des Anmelders gezeigt, dass unter Berücksichtigung des Vergleichs der Harmonischen-Erzeugung von elektronischen Vorrichtungen mit unterschiedlichen Kapazitätswerten und CV-Charakteristiken der obige Ansatz zum Unterdrücken der Erzeugung von ungeradzahigen Harmonischen nicht ausreichend ist.

**[0009]** Halbleitervorrichtungen zur Unterdrückung von Harmonischen sind beispielsweise beschrieben in den Druckschriften US 2008 / 0 290 465 A1, US 2016/0 329 918 A1 und US 2018 / 0 083 473 A1.

**[0010]** Generell besteht im Stand der Technik ein Bedarf an einem Ansatz zur Implementierung von Halbleitervorrichtungen, zum Beispiel von diskreten ESD-Schutzvorrichtungen oder TVS-Vorrichtungen, mit einer reduzierten oder minimalen Erzeugung von ungeradzahigen Harmonischen, z. B. der dritten Harmonischen.

**[0011]** Allgemein herrscht im Stand der Technik ein Bedarf an einem Ansatz zur Implementierung von Halbleitervorrichtungen, zum Beispiel von diskreten ESD-Schutzvorrichtungen oder TVS-Vorrichtungen, die ferner eine reduzierte oder abgestimmte Durchbruchspannung aufweisen.

#### Kurzdarstellung

**[0012]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel weist eine erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung „n“ Paare von pn-Übergang-Strukturen auf, wobei n eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ anti-seriell geschaltet sind, wobei die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ dahingehend angeordnet ist, einen i-ten Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  aufzuweisen,

**[0013]** wobei zumindest ein erstes Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_1 < 0,50$ , und ein zweites Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_2 > 0,50$ , und wobei die Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2$  des ersten und zweiten Paares der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend eingestellt sind, zu einer Erzeugung eines Störende-Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung mit einem Signalleistungspegel (PH3) zu führen, der zumindest 10 dB niedriger als ein (beispielsweise simulierter) Referenz-Signalleistungspegel (PH3) des Störende-Dritte-Harmonische-Signals ist, der für einen (beispielsweise simulierten) Referenzfall erhalten wird, bei dem der erste und zweite Übergang-Stufenfaktor  $m_1, m_2$  0,25 sind.

**[0014]** Bei einem üblicherweise angewendeten Modell einer pn-Übergang-Struktur wird der i-te Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  basierend auf einer spannungsabhängigen Kapazitätscharakteristik  $C_i(V_i)$  einer Verarmungsregion der pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ für eine Sperrvorspannung  $V_i$  bestimmt, die an die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ angelegt werden kann, mit

$$C_i(V_i) = \frac{C_{J0i}}{\left(\frac{V_i}{V_{Ji}} + 1\right)^{m_i}}; \quad (A1)$$

wobei  $C_{J0i}$  eine i-te Null-Vorspannung-Kapazität bezeichnet und  $V_{Ji}$  ein i-tes Übergang-Spannungspotential bezeichnet.

**[0015]** Die Erzeugung von störenden ungeradzahigen Harmonischen, beispielsweise für den Referenzfall, kann durch Simulationen unter Verwendung eines standardmäßigen Schaltung-Simulationstools wie beispielsweise dem Advanced Design System (ADS) von Keysight Technologies bestimmt werden, zum Beispiel durch eine Harmonische-Balance-Analyse, die im Stand der Technik allgemein bekannt ist.

**[0016]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel weist eine erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung „n“ Paare von pn-Übergang-Strukturen auf, wobei n eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ anti-seriell geschaltet sind, wobei die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ dahingehend angeordnet ist, einen i-ten Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  aufzuweisen, wobei der erste bis n-te Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 0,05$  die folgende Ellipsengleichung erfüllen:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i - 0,25}{a_i}\right)^2 = 1, \text{ mit } \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{a_i}\right)^2 = 16,$$

wobei zumindest ein erstes Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_1 < 0,50$ , und ein zweites Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_2 > 0,50$ , und wobei die Parameter  $a_i$  basierend auf einer Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J0i}$  und einem Übergang-Spannungspotential  $V_{Ji}$  der pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ bestimmt werden.

**[0017]** Der Toleranzbereich von  $\pm 0,05$  gibt einen Bereich für jeden der Übergang-Stufenfaktoren an. In dem vorliegenden Kontext werden die Stufenfaktoren  $m_1$  bis  $m_n$  dahingehend betrachtet, dass dieselben innerhalb

dieses Toleranzbereichs die Ellipsengleichung erfüllen, falls die Ellipse das durch den Toleranzbereich definierte Volumen in der Nähe eines spezifischen Punkts ( $m_1$  bis  $m_n$ ) in dem n-dimensionalen Raum (Koordinatensystem) des Stufenfaktors schneidet oder zumindest berührt. Zu Veranschaulichungszwecken ist in dem zweidimensionalen Fall von zwei Paaren von pn-Übergang-Strukturen mit Stufenfaktoren  $m_1$  und  $m_2$  das durch die Toleranzbereiche definierte Volumen ein Kreis mit dem Durchmesser 0,10 und dem spezifischen Punkt ( $m_1, m_2$ ) in der Mitte. Dadurch wird effektiv ein Breitenbereich von 0,10 um die Ellipse definiert, in dem sich mögliche Kombinationen von Stufenfaktoren  $m_1$  bis  $m_n$  befinden können.

**[0018]** Darin können der i-te Übergang-Stufenfaktor  $m_i$ , die Null-Vorspannung-Übergang-Kapazität  $C_{J0i}$  und das Übergang-Potential  $V_{Ji}$  der pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ auch durch die oben erwähnte Formel (A1) beschrieben werden.

**[0019]** Somit beziehen sich Ausführungsbeispiele auf eine Halbleitervorrichtung, die zumindest zwei Paare von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen aufweist, mit für jedes der zumindest zwei Paare eingestellten Übergang-Stufenfaktoren zum Bereitstellen einer zumindest reduzierten oder einer minimalen Erzeugung von störenden ungeradzahigen Harmonischen, zum Beispiel der dritten Harmonischen.

**[0020]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel weist eine Halbleitervorrichtung eine zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur in einem Halbleitersubstrat auf, wobei die zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur dahingehend angeordnet ist, einen vorbestimmten ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 > 0,50$ , wobei die zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur eine erste partielle pn-Übergang-Struktur und eine zweite partielle pn-Übergang-Struktur aufweist, wobei die erste partielle pn-Übergang-Struktur dahingehend angeordnet ist, einen vorbestimmten ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$  aufzuweisen, und wobei die zweite partielle pn-Übergang-Struktur dahingehend angeordnet ist, einen vorbestimmten zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{12}$  aufzuweisen, wobei der vorbestimmte erste partielle Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$  von dem vorbestimmten zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{12}$  verschieden ist, mit  $m_{11} \neq m_{12}$ , und wobei zumindest einer des vorbestimmten ersten und zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktors  $m_{11}, m_{12}$  größer als 0,5 ist, mit  $m_{11}$  und/oder  $m_{12} > 0,5$ , und wobei der vorbestimmte erste Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur auf einer vorbestimmten Kombination des ersten und zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktors  $m_{11}, m_{12}$  basiert.

**[0021]** Somit beziehen sich Ausführungsbeispiele auf eine Halbleitervorrichtung, die zumindest zwei Paare von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen mit eingestellten Übergang-Stufenfaktoren aufweist, wobei zumindest eines der zumindest zwei Paare von pn-Übergang-Strukturen ein Paar von anti-seriell geschalteten zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen ist (hierin auch als zusammengesetzte Diodenstruktur bezeichnet), um ein erwünschtes TVS-Verhalten (TVS = transient voltage suppressor, Überspannungsbegrenzer) der Halbleitervorrichtung bezüglich einer Durchbruchspannung anzupassen und zu erhalten und um eine zumindest reduzierte oder eine minimale Erzeugung von störenden ungeradzahigen Harmonischen bereitzustellen, zum Beispiel von dritten Harmonischen.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0022]** Ausführungsbeispiele des vorliegenden Konzepts werden hierin unter Bezugnahme auf die beige-fügte Zeichnung und die Figuren beschrieben, wobei Folgendes gilt:

**Fig. 1a-d** zeigen beispielhafte schematische Schaltungsbeispiele einer Halbleitervorrichtung mit n Paaren von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 2** zeigt ein beispielhaftes Schaltungsblockbild zum Testen der Halbleitervorrichtung,

**Fig. 3a, 3b** zeigen schematische Leistungsverteilungen von HF-Signalen gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 4a** zeigt die graphische Darstellung (Graph der Funktion) der Aufhebungslinien des Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung in Abhängigkeit von dem ersten und zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_1, m_2$  gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 4b** zeigt eine vergrößerte Darstellung (Ansicht) von **Fig. 4a**,

**Fig. 4c** zeigt eine weitere graphische Darstellung der Funktionsgraphen, für die die Dritte-Harmonische-Erzeugung PH3 der Halbleitervorrichtung optimal unterdrückt werden kann,

**Fig. 4d** zeigt eine vergrößerte Darstellung (Ansicht) der graphischen Darstellung von **Fig. 4c**,

**Fig. 4e** zeigt eine graphische Darstellung der Parameter  $a_1$ ,  $a_2$  (= Radien  $r_1$ ,  $r_2$ ) der Ellipse, bei der die Dritte-Harmonische-Erzeugung der Halbleitervorrichtung optimal unterdrückt werden kann,

**Fig. 4f** zeigt eine graphische Darstellung der Aufhebungslinien der dritten Harmonischen PH3 der Halbleitervorrichtung in Abhängigkeit von dem ersten und zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$ ,  $m_2$  angesichts des Einflusses von nichtgleichen Werten für das erste und zweite Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$ ,  $V_{J2}$ ,

**Fig. 4g-j** zeigen die simulierte störende dritte Harmonische PH3 der Halbleitervorrichtung mit gleicher erster und zweiter Vorspannung-Übergang-Kapazität  $C_{J01} = C_{J02}$  bei unterschiedlichen Eingangsleistungspegeln des Grundfrequenzsignals,

**Fig. 5a** zeigt eine schematische Querschnittsansicht der Halbleitervorrichtung von **Fig. 1a**,

**Fig. 5b** zeigt eine schematische simulierte Darstellung eines beispielhaften Dotierungsprofils von pn-Übergang-Strukturen der Halbleitervorrichtung von **Fig. 5a**,

**Fig. 6a** zeigt eine schematische Querschnittsansicht einer Halbleitervorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 6b** zeigt eine schematische Draufsicht der Halbleitervorrichtung von **Fig. 6a**,

**Fig. 7a, 7b** zeigen beispielhafte schematische Schaltbilder einer Halbleitervorrichtung mit  $n$  Paaren von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 8a** zeigt eine schematische simulierte Darstellung des resultierenden Übergang-Stufenfaktors  $m_1$  in Abhängigkeit von der Dotierungskonzentration, basierend auf unterschiedlichen Implantationsdosen für die Dotierungsprofile von **Fig. 5b**,

**Fig. 8b** zeigt eine schematische simulierte Darstellung der resultierenden Durchbruchspannung in Abhängigkeit von der Dotierungskonzentration, basierend auf unterschiedlichen Implantationsdosen für die Dotierungsprofile von **Fig. 5b**,

**Fig. 8c** zeigt den resultierenden kombinierten Übergang-Stufenfaktor der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur vom ersten Typ in Abhängigkeit von dem Flächenverhältnis zwischen den Flächen der ersten und zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur, basierend auf zwei eingestellten partiellen Übergang-Stufenfaktoren  $m_{11}$ ,  $m_{12}$  für zwei der in **Fig. 5b** gezeigten Dotierungsprofile,,

**Fig. 9a** zeigt eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren beispielhaften Implementierung der Halbleitervorrichtung,

**Fig. 9b** zeigt eine schematische simulierte Darstellung von unterschiedlichen beispielhaften Dotierungsprofilen der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur der Halbleitervorrichtung von **Fig. 9a**,

**Fig. 9c** zeigt eine schematische Draufsicht durch die Halbleitervorrichtung von **Fig. 9a** in der Ebene durch die zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur vom ersten Typ, die die „aktiven“ Flächen der ersten und zweiten partiellen Anodenregion der pn-Übergang-Struktur vom ersten Typ zeigt, und

**Fig. 9d-f** zeigen schematische Querschnittsansichten von weiteren beispielhaften Implementierungen der Halbleitervorrichtung.

**[0023]** Bevor Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung anhand der Zeichnungen ausführlicher erläutert werden, wird darauf hingewiesen, dass in den Figuren und der Anmeldung identische Elemente und Elemente mit derselben Funktionalität und/oder demselben technischen oder physikalischen Effekt in der Regel mit denselben Bezugszeichen versehen oder mit demselben Namen gekennzeichnet sind, so dass die Beschreibung dieser Elemente und der Funktionalität derselben, wie sie in den verschiedenen Ausführungsbeispielen veranschaulicht ist, untereinander austauschbar sind oder bei den verschiedenen Ausführungsbeispielen wechselseitig angewendet werden können.

Ausführliche Beschreibung von veranschaulichenden Ausführungsbeispielen

**[0024]** In der folgenden Beschreibung werden Ausführungsbeispiele der Erfindung ausführlich diskutiert, wobei zu beachten ist, dass die Erfindung viele anwendbare Konzepte bietet, die in einer Vielzahl von Halbleitervorrichtungskonzepten verkörpert sein können. Die diskutierten spezifischen Ausführungsbeispiele veranschaulichen lediglich spezifische Wege zur Herstellung und Nutzung der Erfindung und schränken den Schutzbereich der Erfindung nicht ein. In der folgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen sind denselben oder ähnlichen Elementen mit derselben Funktion dieselben Bezugszeichen oder derselbe Name

zugeordnet, und eine Beschreibung derartiger Elemente wird nicht für jedes Ausführungsbeispiel wiederholt. Darüber hinaus können Merkmale der unterschiedlichen nachfolgend beschriebenen Ausführungsbeispiele miteinander kombiniert werden, sofern nicht ausdrücklich anders angegeben.

**[0025]** Es versteht sich, dass, wenn ein Element als mit einem anderen Element „verbunden“ oder „gekoppelt“ bezeichnet wird, es direkt mit dem anderen Element verbunden oder gekoppelt sein kann, oder dass Zwischenelemente vorhanden sein können. Umgekehrt gilt, wenn ein Element als „direkt“ mit einem anderen Element verbunden, „verbunden“ oder „gekoppelt“ bezeichnet wird, keine Zwischenelemente vorliegen. Andere Begriffe, die zur Beschreibung der Beziehung zwischen Elementen verwendet werden, sollten auf ähnliche Weise konstruiert werden (z. B. „zwischen“ und „direkt dazwischen“, „benachbart“ und „direkt benachbart“ usw.).

**[0026]** Die hier verwendete Abkürzung CV bzw. C(V) steht für Kapazität gegenüber Spannung (capacitance/voltage = Kapazität/Spannung). Die Begriffe C(V)-Charakteristika, C(V)-Eigenschaften und C(V)-Verhalten können in diesem Dokument synonym verwendet sein.

**[0027]** Die Fig. 1a-d zeigen verschiedene schematische Schaltbilder einer Halbleitervorrichtung 100 mit „n“-Paaren 102, 104 (...) von antiseriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2, J3, J4 (...), die auf der Grundlage des vorliegenden Konzepts wie nachfolgend beschrieben angepasst werden können, um eine reduzierte, z. B. stark reduzierte, oder sogar minimierte Erzeugung einer störenden ungeradzahligigen Harmonischen aufzuweisen, zum Beispiel einer dritten Harmonischen.

**[0028]** Genauer gesagt weist die Halbleitervorrichtung 100 „n“ Paare 102, 104 (...) von pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 (...) auf, wobei n eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ antiseriell geschaltet sind. Die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ ist dahingehend angeordnet, einen i-ten Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  ( $m_1, m_2, \dots$ ), eine i-te Null-Vorspannung-Übergang-Kapazität  $C_{J0i}$  und ein i-tes Übergang-Spannungspotential  $V_{Ji}$  aufzuweisen und das folgende Kapazitätsverhalten  $C_i(V_i)$  aufzuweisen, basierend auf einer Sperrvorspannung  $V_i$ , die an die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ angelegt werden kann, mit

$$C_i(V_i) = \frac{C_{J0i}}{\left(\frac{V_i}{V_{Ji}} + 1\right)^{m_i}}.$$

**[0029]** Die C(V)-Charakteristika, die durch die obige Gleichung beschrieben werden, gelten auch für kleine Vorwärtspannungen. Mit anderen Worten gilt der Ausdruck auch für einen Bereich von angelegten Spannungen, wo die Sperrvorspannung negativ ist, d. h. die angelegte Spannung eine Vorwärtspannung ist. In dieser Anmeldung wird die Formulierung „pn-Übergang (oder Diodenstruktur) mit einem Stufenfaktor  $m_i$ “ verwendet, um auszudrücken, dass die C(V)-Charakteristika des pn-Übergangs oder der Diodenstruktur durch die obige Gleichung, mit einem Stufenfaktor oder Potenzgesetz-Exponenten  $m_i$  beschrieben werden können.

**[0030]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist zumindest ein erstes Paar 102 der n Paare 102, 104 (...) von pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 (...) dahingehend angeordnet, einen ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$ , und ein zweites Paar 104 der n Paare 102, 104 (...) von pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 (...) ist dahingehend angeordnet, einen zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0,00, 0,50\}$ , und wobei das erste Paar 102 der pn-Übergang-Strukturen J1, J2 dahingehend angeordnet ist, den ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 < 0,50$ , und wobei die Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2$  des ersten und zweiten Paares 102, 104 (...) der n Paare von pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 (...) dahingehend eingestellt sind, zu einer Erzeugung eines Störende-Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung 100 mit einem Signalleistungspegel PH3 zu führen, der zumindest 10dB niedriger, bevorzugt zumindest 15dB niedriger, und noch bevorzugter zumindest 20dB niedriger als ein (beispielsweise simulierter) Referenz-Signalleistungspegel PH3 des Störende-Dritte-Harmonische-Signals ist, der für einen (beispielsweise simulierten) Referenzfall erhalten wird, bei dem der erste und zweite Übergang-Stufenfaktor  $m_1, m_2$  jeweils 0,25 ist. Im Hinblick auf die erleichterte Herstellung der pn-Übergang-Struktur kann es vorzuziehen sein, dass  $m_1 \leq 0,48$  ist.

**[0031]** Erfindungsgemäß weist das zweite Paar 104 der pn-Übergang-Strukturen J3, J4 den zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  auf, mit  $m_2 > 0,50$ , vorzugsweise  $m_2 \geq 0,52$ .

**[0032]** In dem Referenzfall wird ein Referenz-Signalleistungspegel PH3' des Störende-Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung 100 simuliert und berechnet, indem der Referenzwert der Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2 (\dots)$  festgelegt wird, d. h. aller Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2, (\dots)$ , die oben eingestellt wurden und zwischen 0,00 und 0,50 von dem Referenzwert  $m_i = 0,25$  abweichen.

**[0033]** Gemäß dem oben definierten Ausführungsbeispiel sind die Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2 (\dots)$  der n Paare 102, 104 (...) der pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 (...) dahingehend eingestellt, einen zumindest reduzierten Signalleistungspegel des Störende-Dritte-Harmonische-Signals PH3 bereitzustellen, im Vergleich zu dem, z. B. simulierten, Referenz-Signalleistungspegel PH3' des Störende-Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung 100, der in dem Referenzfall erhalten wird, bei dem die Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2 (\dots)$  auf einen Referenzwert von 0,25 festgelegt sind. Die folgenden Auswertungen bezüglich der **Fig. 2a-i** werden zum Beispiel zeigen, dass eine Simulation mit einem Schaltungs-Simulationstool, die weiter unten ausführlicher beschrieben wird, bezogen auf den Referenz-Signalleistungspegel PH3' der Halbleitervorrichtung 100, bei der die Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2 (\dots)$  auf den Referenzwert 0,25 festgelegt sind, sich auf ein (theoretisches) lokales Maximum des Referenz-Signalleistungspegels PH3' des Störende-Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung 100 bezieht.

**[0034]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel weist die Halbleitervorrichtung 100 „n“ Paare 102, 104 (...) von pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 (...) auf, wobei n eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ anti-seriell geschaltet sind. Die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ ist dahingehend angeordnet, einen i-ten Übergang-Stufenfaktor  $m_i$ , eine i-te Null-Vorspannung-Übergang-Kapazität  $C_{J0i}$  und ein i-tes Übergang-Spannungspotential  $V_{ji}$  aufzuweisen und das folgende Kapazitätsverhalten  $C_i(V_i)$  basierend auf einer Sperrvorspannung  $V_i$  aufzuweisen, die an die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ angelegt werden kann, mit

$$C_i(V_i) = \frac{C_{J0i}}{\left(\frac{V_i}{V_{ji}} + 1\right)^{m_i}}; \text{ und}$$

wobei der erste bis n-te Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 0,05$  die folgende Ellipsengleichung erfüllen:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i - 0,25}{a_i}\right)^2 = 1, \text{ mit } \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{a_i}\right)^2 = 16,$$

wobei zumindest ein erstes Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$ , wobei  $m_1 < 0,50$ , und ein zweites Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0,00, 0,50\}$ , und wobei der erste bis n-te Parameter „ $a_1$  bis  $a_n$ “ von den Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J0i}$  und den Übergang-Spannungspotentialen  $V_{ji}$  der pn-Übergang-Strukturen abhängen. Im Hinblick auf die erleichterte Herstellung der pn-Übergang-Struktur kann es vorzuziehen sein, dass  $m_1 \leq 0,45$  ist.

**[0035]** Das zweite Paar 104 der pn-Übergang-Strukturen J3, J4 weist den zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  auf, mit  $m_2 > 0,50$ , vorzugsweise  $m_2 = 0,52$ .

**[0036]** Wie oben angegeben ist, erfüllen der erste bis n-te Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 0,05$  die angegebene (n-dimensionale) Ellipsengleichung. Der Toleranzbereich von  $\pm 0,05$  (oder  $\pm 0,03$ ) kann zum Beispiel unvermeidbare Halbleiterherstellungstoleranzen der Halbleitervorrichtung 100 berücksichtigen. Der Toleranzbereich von  $\pm 0,05$  (oder  $\pm 0,03$ ) kann zum Beispiel ferner eine (möglicherweise auftretende) Differenz zwischen der Bahn der theoretischen optimalen Unterdrückung von störenden dritten Harmonischen und der Bahn des tatsächlichen (zum Beispiel von der Eingangsleistung abhängenden) Optimums einer Unterdrückung bei unterschiedlichen Eingangsleistungspegeln der Halbleitervorrichtung 100 berücksichtigen. Dies wird im Folgenden mit Bezugnahme auf die **Fig. 4g-j** näher beschrieben.

**[0037]** Im Folgenden werden schematische Schaltbilder von einigen möglichen Implementierungen der Halbleitervorrichtung 100 gemäß dem vorliegenden Konzept mit Bezug auf die **Fig. 1a-d** beschrieben.

**[0038]** Wie in **Fig. 1a** beispielhaft gezeigt ist, kann die Halbleitervorrichtung 100  $n = 2$  Paare 102, 104 von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2, J3, J4 aufweisen, wobei das erste Paar 102 der pn-Übergang-Strukturen die pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ J1, J2 mit dem ersten Stufenfaktor  $m_1$ , dem ersten Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$  und der ersten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J01}$  aufweist, wobei das zweite Paar von pn-Übergang-Strukturen 104 die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ J3, J4 mit dem zweiten Stufenfaktor  $m_2$ , dem zweiten Übergang-Spannungspotential  $V_{J2}$  und der zweiten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J02}$  aufweist. Wie in **Fig. 1a** gezeigt ist, sind die pn-Übergang-Strukturen J1, J2 des ersten Paares 102 und die pn-Übergang-Strukturen J3, J4 des zweiten Paares 104 jeweils anti-seriell geschaltet, wobei die (zumindest) zwei Paare 102, 104 von pn-Übergang-Strukturen J1- J4 zwischen den ersten und zweiten Anschluss 107, 108 geschaltet sind.

**[0039]** **Fig. 1b** zeigt ein weiteres beispielhaftes schematisches Schaltungs bild der Halbleitervorrichtung 100 mit zwei ( $n = 2$ ) Paaren 102, 104 von pn-Übergang-Strukturen J1, J2, J3, J4, wobei das erste Paar 102 die pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ J1, J2 mit dem ersten Stufenfaktor  $m_1$ , dem ersten Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$  und der ersten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J01}$  aufweist und das zweite Paar 104 die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ J3, J4 mit dem zweiten Stufenfaktor  $m_2$ , dem zweiten Übergang-Spannungspotential  $V_{J2}$  und der zweiten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J02}$  aufweist. Wie in **Fig. 1b** gezeigt ist, sind die pn-Übergang-Strukturen J1, J2 des ersten Paares 102 anti-seriell geschaltet und die pn-Übergang-Strukturen J3, J4 des zweiten Paares 104 sind anti-seriell geschaltet, wobei die (zumindest) zwei Paare 102, 104 von pn-Übergang-Strukturen J1-J4 zwischen den ersten und zweiten Anschluss 107, 108 geschaltet sind. Die Anordnung der zwei Paare 102, 104 der pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4, wie sie in **Fig. 1b** gezeigt ist, unterscheidet sich beim Vergleich mit der Halbleitervorrichtung 100 von **Fig. 1a** lediglich durch eine umgekehrte Richtung der jeweiligen pn-Übergang-Strukturen J1-J4.

**[0040]** **Fig. 1c** zeigt ein weiteres schematisches Schaltungs bild der Halbleitervorrichtung 100 mit  $n = 2$  Paaren 102, 104 von pn-Übergang-Strukturen J1, J2, J3, J4, wobei in **Fig. 1c** das erste Paar 102 die pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ J1, J2 mit dem ersten Stufenfaktor  $m_1$ , dem ersten Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$  und der ersten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J01}$  aufweist, wobei das zweite Paar 104 die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ J3, J4 mit dem zweiten Stufenfaktor  $m_2$ , dem zweiten Übergang-Spannungspotential  $V_{J2}$  und der zweiten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J02}$  aufweist. Wie in **Fig. 1c** gezeigt ist, sind die pn-Übergang-Strukturen J1, J2 des ersten Paares 102 und die pn-Übergang-Strukturen J3, J4 des zweiten Paares 104 jeweils anti-seriell geschaltet, wobei die (zumindest) zwei Paare 102, 104 von pn-Übergang-Strukturen J1-J4 zwischen den ersten und zweiten Anschluss 107, 108 geschaltet sind. Die Anordnung der zwei Paare 102, 104 der pn-Übergang-Strukturen J1-J4, wie sie in **Fig. 1c** gezeigt ist, unterscheidet sich beim Vergleich mit der Halbleitervorrichtung 100 von **Fig. 1a** lediglich hinsichtlich der Reihenfolge der Anordnung der jeweiligen pn-Übergang-Strukturen J1-J4.

**[0041]** **Fig. 1d** zeigt ein weiteres schematisches Schaltungs bild der Halbleitervorrichtung 100 mit  $n = 3$  Paaren 102, 104, 106 von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 und J5, J6. Wie in **Fig. 1d** gezeigt ist, weist das erste Paar 102 die zwei pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ J1, J2 mit dem ersten Stufenfaktor  $m_1$ , dem ersten Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$  und der ersten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J01}$  auf, das zweite Paar 104 weist die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ J3, J4 mit dem zweiten Stufenfaktor  $m_2$ , dem zweiten Übergang-Spannungspotential  $V_{J2}$  und der zweiten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J02}$  auf, und wobei das dritte Paar 106 beispielsweise die pn-Übergang-Strukturen vom dritten Typ J5, J6 mit dem dritten Stufenfaktor  $m_3$ , dem dritten Übergang-Spannungspotential  $V_{J3}$  und der dritten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J03}$  aufweist. Wie in **Fig. 1d** gezeigt ist, sind die pn-Übergang-Strukturen J1, J2 des ersten Paares 102, die pn-Übergang-Strukturen J3, J4 des zweiten Paares 104 und die pn-Übergang-Strukturen J5, J6 des dritten Paares 104 jeweils anti-seriell geschaltet, wobei die drei Paare 102, 104, 106 von pn-Übergang-Strukturen J1-J6 zwischen den ersten und zweiten Anschluss 107, 108 geschaltet sind .

**[0042]** Die oben beschriebenen schematischen Schaltungs bilder der Halbleitervorrichtungen 100 zeigen, dass die Halbleitervorrichtung 100 eine Mehrzahl von Paaren 102, 104, 106 von pn-Übergang-Strukturen J1-J6 aufweisen kann, wobei die zwei zugehörigen pn-Übergang-Strukturen des jeweiligen Paares zwischen den ersten und zweiten Anschluss 107, 108 anti-seriell angeordnet bzw. geschaltet sind, wobei die Reihenfolge der jeweiligen pn-Übergang-Strukturen die resultierende Reduktion einer Erzeugung von dritten Harmonischen der Halbleitervorrichtung nicht beeinflusst, so dass die unterschiedlichen pn-Übergang-Strukturen der  $n$  Paare beliebig zwischen den ersten und zweiten Anschluss 107, 108 anti-seriell angeordnet werden können.

**[0043]** Die Erzeugung von störenden ungeradzahigen Harmonischen, beispielsweise im Referenzfall, kann durch Simulationen bestimmt werden, die ein standardmäßiges Schaltung-Simulationstool wie beispielsweise das Advanced Design System (ADS) von Keysight Technologies verwenden, wobei beispielsweise eine Harmonische-Balance-Analyse verwendet werden kann, die im Stand der Technik allgemein bekannt ist. Die Simulationsergebnisse können mit einer Messung der Erzeugung von störenden Harmonischen einer zu testenden Halbleitervorrichtung verglichen und somit mit der Erzeugung von Harmonischen des Referenzfalls verglichen werden, um einen Leistungspegel der gemessenen störenden dritten Harmonischen der zu testenden Vorrichtung in Bezug auf den Leistungspegel der störenden dritten Harmonischen zu bestimmen, der durch Simulation für den Referenzfall bestimmt wird. Andere Modellparameter für die Simulation des Referenzfalls als der Stufenfaktor, beispielsweise die Null-Vorspannung-Übergang-Kapazität und das Übergang-Potential, können von den Messungen der zu vergleichenden Vorrichtung, anhand von Verfahren erhalten werden, die im Stand der Technik allgemein bekannt sind.

**[0044]** Ein möglicher Schaltungsaufbau zur Messung oder Simulation der Erzeugung von Harmonischen einer zu testenden Halbleitervorrichtung ist durch das Blockschaltbild von **Fig. 2** dargestellt. Es stellt eine Übertragungsleitung aus zwei Teilen TL1 201 und TL2 202 dar, bei der die zu testende Halbleitervorrichtung 200 (beispielhaft als vier Diodenstrukturen J1 bis J4 dargestellt) in Shunt-Konfiguration mit Masse verbunden ist. Ein HF-Signal wird bei einer Grundfrequenz  $f_0$  von einer HF-Quelle PORT1 211 zugeführt und an einem dargestellten linken Ende der Übertragungsleitung TL1 201 durch einen Zirkulator CIR1 203 in TL1 201 eingekoppelt.

**[0045]** Das HF-Signal wird zu der zu testenden Halbleitervorrichtung 200 (J1 bis J4) geleitet, wo aufgrund von Nichtlinearitäten in den elektrischen Eigenschaften der zu testenden Halbleitervorrichtung 200 harmonische Signale in ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz (Obertöne) erzeugt werden. Die erzeugten harmonischen Signale werden von der zu testenden Halbleitervorrichtung 200 über TL2 202 an den Abschluss (engl.: termination) Term2 212 und über TL1 201, den Zirkulator CIR1 203 und die Übertragungsleitung TL3 204 an den Abschluss Term3 213 übertragen. Mit Hilfe eines Spektrumanalysators (nicht dargestellt) kann die HF-Leistungsverteilung der harmonischen Signale entweder an der Position des Abschlusses Term2 212 oder des Abschlusses Term3 213 bestimmt werden.

**[0046]** Durch Sweepen der Leistung des zugeführten HF-Signals bei der Grundfrequenz kann die Eingangsleistungsabhängigkeit der Harmonischen-Erzeugung bestimmt werden.

**[0047]** Die Empfindlichkeit der Bestimmung eines erzeugten harmonischen Signals kann ferner erhöht werden, indem beispielsweise zusätzliche Filter oder Diplexer (nicht gezeigt) zum Herausfiltern des Signals bei der Grundfrequenz  $f_0$  hinzugefügt werden.

**[0048]** Typische Spektren des erzeugten HF-Signals und der Harmonischen-Signale sind in **Fig. 3a** bzw. **3b** schematisch dargestellt. **Fig. 3a** veranschaulicht das Spektrum des HF-Signals, wie es von der HF-Quelle PORT1 211 zugeführt wird. Dieses Signal wird so zugeführt, dass dasselbe lediglich die Grundfrequenz  $f_0$  (1. Harmonische,  $x=1$ ) umfasst. **Fig. 3b** zeigt das Spektrum des Signals, das zum Beispiel bei Abschluss Term2 212 ankommt. Die Signalleistung bei der Grundfrequenz ist im Vergleich zu dem einfallenden Signal reduziert, wie in **Fig. 3a** gezeigt ist, (1) durch Impedanzfehlanspassung, die durch die zu testende Halbleitervorrichtung 200 in Shunt-Konfiguration bewirkt wird, und (2) durch partielle Umwandlung des elektrischen Signals bei der Grundfrequenz in die Obertöne, hier zur Vereinfachung für die zweite bis vierte Harmonische gezeigt. Das Spektrum zeigt ferner, dass das Signal, beispielsweise in dem Abschluss Term2 212, ebenfalls Leistungsbeiträge bei ganzzahligen Mengen der Grundfrequenz aufweist, wie z. B. die zweite harmonische Leistung PH2 bei 2 mal  $f_0$  ( $2 \times f_0$ ,  $x=2$ ), dritte harmonische Leistung PH3 bei 3 mal  $f_0$  ( $3 \times f_0$ ,  $x=3$ ) und so weiter. Im Allgemeinen nimmt der Leistungsbeitrag der Obertöne mit der Ordnung der Harmonischen ab.

**[0049]** Die folgenden Auswertungen geben eine umfassende Erläuterung des vorliegenden Konzepts in Form der beschriebenen Implementierungen und Ausführungsbeispiele der Halbleitervorrichtung 100 mit richtig eingestellten Übergang-Stufenfaktoren  $m_i$  ( $m_1, m_2, \dots$ ) gemäß den **Fig. 1a-d**. Insbesondere bezieht sich die folgende Diskussion bezüglich der **Fig. 4a - j** auf die technische und mathematische Analyse auf dem Gebiet von Halbleitervorrichtungen, zum Beispiel auf dem Gebiet von diskreten ESD-Schutzvorrichtungen bzw. TVS-Vorrichtungen, durch den Anmelder und auf die daraus resultierenden technischen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen zu einer richtigen Einstellung der Übergang-Stufenfaktoren  $m_i$  der  $n$  Paare von pn-Übergang-Strukturen der Halbleitervorrichtung 100.

**[0050]** Unter der Annahme, dass die „Kapazität/Spannung-C(V)-Charakteristika“ einer pn-Übergang-Struktur (oder einfach eines pn-Übergangs) der Hauptfaktor für die Erzeugung von ungeradzahigen Harmonischen der Halbleitervorrichtung 100 sind, kann die Dritte-Harmonische-Erzeugung im Falle einer richtigen Einstellung der C(V)-Charakteristika der individuellen pn-Übergang-Strukturen, die zumindest zwei Paare 102, 104 (....) von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2, J3, J4 (....) aufweisen können, im Wesentlichen vollständig aufgehoben oder zumindest stark reduziert werden.

**[0051]** Genauer gesagt kann im Falle einer Verbindung oder eines Stapels von beispielweise vier antiseriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1-J4 (d. h. zwei Paare von pn-Übergang-Strukturen) die Dritte-Harmonische-Erzeugung durch Auswahl einer geeigneten Kombination von C(V)-Verhalten der unterschiedlichen pn-Übergang-Strukturen J1-J4 in dem Vier-pn-Übergang-Strukturen-Stapel aufgehoben oder zumindest minimiert werden, zum Beispiel durch geeignete Wahl der (ersten und zweiten) n-Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2$  gemäß den unten angegebenen Gleichungen und Formeln für die Übergang-Stufenfaktoren  $m_i$  und die Parameter  $a_1, a_2$ , die von den Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J01}, C_{J02}$  und der Übergang-Spannung  $V_{J1}, V_{J2}$  der zwei Paare 102, 104 von pn-Übergang-Strukturen abhängen.

**[0052]** Das C(V)-Verhalten eines pn-Übergangs, der in der vorliegenden Beschreibung mit „i“ gekennzeichnet ist, um den „i-ten“ Typ anzugeben, kann allgemein mit dem folgenden Ausdruck beschrieben werden:

$$C_i(V) = \frac{C_{J0i}}{\left(\frac{V}{V_{ji}} + 1\right)^{m_i}} \quad (A1)$$

**[0053]** In vielen Fällen liefert dieser Ausdruck eine genaue Beschreibung der C(V)-Charakteristika von pn-Übergang-Strukturen. Die Parameter haben folgende Bedeutung:  $C_{J0}$  ist die Kapazität bei 0V Vorspannung,  $V_{ji}$  ist die eingebaute Spannung und  $m_i$  ist der „Übergang-Stufenfaktor“.  $V$  stellt die Sperrvorspannung über den i-ten pn-Übergang dar. Wie aus dem Ausdruck (A1) ersichtlich ist, ist der Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  ein Schlüsselparameter zum Steuern des C(V)-Verhaltens der pn-Übergang-Struktur und damit der Halbleitervorrichtung 100. Der Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  kann durch das Dotierungsprofil der jeweiligen pn-Übergang-Struktur J1-J4 (....) eingestellt werden.

**[0054]** Einige Beispiele für den Übergang-Stufenfaktor  $m$ :

- $m = 0,5$  stellt (1.) das Verhalten eines abrupten pn-Übergangs mit gleichförmigen Dotierungsstoffen (= Dotierungskonzentrationen) in der n- und p-Region, oder (2.) eines einseitigen Übergangs mit einem sehr abrupten pn-Übergang zwischen einer hochdotierten Region und einer gleichförmig dotierten schwächer dotierten Region dar. Es kann schwierig oder teuer sein, diese Art eines idealisierten Übergangs mit den konventionellen Halbleitertechnologien zu realisieren.

- $m = 0,33$  stellt das Verhalten eines linear gestuften Übergangs dar. In diesem Fall variiert die Dotierungsstoffkonzentration um den Übergang linear mit der Tiefe. Dieser pn-Übergang-Typ ist in der herkömmlichen Halbleitertechnologie als Ergebnis einer Diffusion einer p- und einer n-dotierten Region sehr häufig.

- Im Fall von  $m > 0,5$  wird der Begriff hyper-abrupter Übergang verwendet. Dieser kann als einseitiger Übergang betrachtet werden, bei dem die schwächer dotierte Region kein konstantes Dotierungsprofil, sondern vielmehr eine Dotierungskonzentration aufweist, die mit dem Abstand von dem metallurgischen Übergang abnimmt.

**[0055]** Im Folgenden wird die mathematische Ableitung der optimalen C(V)-Parameter zur Unterdrückung einer Dritte-Harmonische-Erzeugung der Halbleitervorrichtung 100 allgemein erörtert. Die folgende Ableitung kann die C(V)-Charakteristika ausreichend gut für niedrige Eingangsleistungen  $P_{IN}$  des Eingangs-HF-Signals beschreiben, z. B. nicht mehr als 20 dBm, kann aber für höhere Eingangsleistungen weniger genau sein.

**[0056]** In den folgenden Gleichungen (1) bis (38) und in den zugehörigen **Fig. 4a** bis **4j** entsprechen die Radien  $r_i$  den bisher beschriebenen Parametern  $a_i$  der beschriebenen Ellipsengleichung, also  $r_i = a_i$ . Generell entsprechen in diesem Dokument die Radien, wie sie hierin beschrieben und/oder dargestellt werden, den Parametern  $a_i$ , wie sie hierin beschrieben und/oder dargestellt sind, d. h.  $r_i = a_i$ .

**[0057]** Das Kapazität/Spannung-Verhalten von zwei unterschiedlichen pn-Übergängen wird durch die folgenden Gleichungen ausgedrückt. Diese Gleichungen können erfolgreich verwendet werden, um das Verar-

mungskapazitätsverhalten bei Bedingungen von Sperr- und Durchlassvorspannungen innerhalb eines breiten Spektrums von Dotierungsprofilen zu beschreiben:

$$C_1(V) = \frac{C_{J0,1}}{\left(\frac{V}{V_{J1}} + 1\right)^{m_1}} \quad (1)$$

$$C_2(V) = \frac{C_{J0,2}}{\left(\frac{V}{V_{J2}} + 1\right)^{m_2}} \quad (2)$$

wobei  $V$  die angelegte Sperrvorspannung ist,  $C_{J0i}$  die Null-Vorspannung-Übergang-Kapazität ist,  $V_{Ji}$  die Übergang-Spannung oder das Übergang-Potential ist (gleich oder eng bezogen auf die eingebaute Spannung, gelegentlich als „effektive eingebaute Spannung“ bezeichnet) und wobei  $m_i$  der Stufenfaktor ist (auch als „Diode-Potenzgesetz-Exponent“ bezeichnet).

**[0058]** Die Gleichungen zu Kapazität/Spannung-Verhalten können zu einer Taylorschen Reihe erweitert werden:

$$C_1(V) = K_{10} + K_{11}V + K_{12}V^2 + \dots \quad (3)$$

$$C_2(V) = K_{20} + K_{21}V + K_{22}V^2 + \dots \quad (4)$$

**[0059]** Durch Integration der  $C_i(V)$ -Ausdrücke von 0 V bis zu einer bestimmten Spannung  $V_{ij}$  wird die Gesamtladung  $Q_{ij}$  bestimmt. Im Falle einer Serienschaltung von zwei Paaren von antiseriellen pn-Übergängen müssen die Folgenden angewendet werden, um die Ladung auf jedem pn-Übergang zu finden, unter Berücksichtigung, dass bei jedem Übergang-Paar ein Übergang in Sperrrichtung und ein Übergang in Durchlassrichtung vorgespannt ist.

$$Q_{11}(V_{11}) = \int_0^{V_{11}} C_1(V) dV \quad (5)$$

$$Q_{12}(V_{12}) = -\int_0^{-V_{12}} C_1(V) dV \quad (6)$$

$$Q_{21}(V_{21}) = \int_0^{V_{21}} C_2(V) dV \quad (7)$$

$$Q_{22}(V_{22}) = -\int_0^{-V_{22}} C_2(V) dV \quad (8)$$

**[0060]** Das Anwenden der Integration einer Kapazität/Spannung-Beziehung  $C(V)$  auf die Reihenentwicklungen ergibt die folgenden Ausdrücke:

$$Q_{11} = K_{10}V_{11} + \frac{K_{11}V_{11}^2}{2} + \frac{K_{12}V_{11}^3}{3} + \dots \quad (9)$$

$$Q_{12} = K_{10}V_{12} - \frac{K_{11}V_{12}^2}{2} + \frac{K_{12}V_{12}^3}{3} + \dots \quad (10)$$

$$Q_{21} = K_{20}V_{21} + \frac{K_{21}V_{21}^2}{2} + \frac{K_{22}V_{21}^3}{3} + \dots \quad (11)$$

$$Q_{22} = K_{20}V_{22} - \frac{K_{21}V_{22}^2}{2} + \frac{K_{22}V_{22}^3}{3} + \dots \quad (12)$$

**[0061]** In einer seriengeschalteten Konfiguration von Kondensatoren ist die Ladung auf allen Kondensatoren gleich:

$$Q_{11} = Q_{12} = Q_{21} = Q_{22} = Q \quad (13)$$

**[0062]** Durch Serienumkehrung kann die Ladung in Abhängigkeit von Spannung (Gleichungen (9)-(12)) umgekehrt werden zu Spannung in Abhängigkeit von Ladung.

$$V_{11} = \frac{Q}{24K_{10}^7} \left[ 24K_{10}^6 + 12K_{10}^4 K_{11} Q + K_{10}^2 Q^2 (-8K_{10} K_{12} + 12K_{11}^2) + 5K_{11} Q^3 (4K_{10} K_{12} - 3K_{11}^2) \right] + \dots \quad (14)$$

$$V_{12} = \frac{Q}{24K_{10}^7} \left[ 24K_{10}^6 - 12K_{10}^4 K_{11} Q + K_{10}^2 Q^2 (-8K_{10} K_{12} + 12K_{11}^2) + 5K_{11} Q^3 (-4K_{10} K_{12} + 3K_{11}^2) \right] + \dots \quad (15)$$

$$V_{21} = \frac{Q}{24K_{10}^7} \left[ 24K_{20}^6 + 12K_{20}^4 K_{21} Q + K_{20}^2 Q^2 (-8K_{20} K_{22} + 12K_{21}^2) + 5K_{21} Q^3 (4K_{20} K_{22} - 3K_{21}^2) \right] + \dots \quad (16)$$

$$V_{22} = \frac{Q}{24K_{20}^7} \left[ 24K_{20}^6 - 12K_{20}^4 K_{21} Q + K_{20}^2 Q^2 (-8K_{20} K_{22} + 12K_{21}^2) + 5K_{21} Q^3 (-4K_{20} K_{22} + 3K_{21}^2) \right] + \dots \quad (17)$$

**[0063]** Die Gesamtspannung  $V$  über die zwei Paare von anti-seriell geschalteten pn-Übergängen beträgt:

$$V = V_{11} + V_{12} + V_{21} + V_{22} \quad (18)$$

**[0064]** Durch Summieren der Gleichungen (14)-(17) ist die Gesamtspannung  $V$  über die seriengeschalteten pn-Übergänge in Abhängigkeit von der Ladung  $Q$ :

$$V = 2 \left( \frac{1}{K_{20}} + \frac{1}{K_{10}} \right) Q + \left( \frac{K_{11}^2}{K_{10}^5} + \frac{K_{21}^2}{K_{20}^5} - \frac{2K_{12}}{3K_{10}^4} - \frac{2K_{22}}{3K_{20}^4} \right) Q^3 + \dots \quad (19)$$

**[0065]** Durch Serienumkehrung von Gleichung (19) ist die Ladung  $Q$  in Abhängigkeit von der Gesamtspannung  $V$  über den seriengeschalteten pn-Übergang wie folgt:

$$Q = \frac{K_{10} K_{20}}{2(K_{10} + K_{20})} V + \frac{K_{10}^5 (2K_{20} K_{22} - 3K_{21}^2) + K_{20}^5 (2K_{10} K_{12} - 3K_{11}^2)}{48K_{10} K_{20} (K_{10} + K_{20})^4} V^3 + \dots \quad (20)$$

**[0066]** Die Kapazität/Spannung-Charakteristika des seriengeschalteten Übergangs können durch Differenzierung der  $Q(V)$ -Ausdrucks (Gl. 20) berechnet werden.

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (21)$$

$$C = \frac{K_{10} K_{20}}{2(K_{10} + K_{20})} + \frac{K_{10}^5 (2K_{20} K_{22} - 3K_{21}^2) + K_{20}^5 (2K_{10} K_{12} - 3K_{11}^2)}{16K_{10} K_{20} (K_{10} + K_{20})^4} V^2 + \dots$$

**[0067]** Die Koeffizienten in dieser resultierenden Serie für das  $C(V)$ -Verhalten werden wie folgt definiert:

$$C = \kappa_0 + \kappa_1 V + \kappa_2 V^2 + \dots \quad (23)$$

**[0068]** Der Koeffizient des quadratischen Terms  $K_2 V^2$  bestimmt die Erzeugung der dritten Harmonischen. Dieser Koeffizient  $K_2$  ist:

$$\kappa_2 = \frac{K_{10}^5 (2K_{20}K_{22} - 3K_{21}^2) + K_{20}^5 (2K_{10}K_{12} - 3K_{11}^2)}{16K_{10}K_{20}(K_{10} + K_{20})^4} \quad (24)$$

**[0069]** Nun werden die Koeffizienten  $K_{10}$ ,  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{20}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{22}$  der Reihenentwicklung der individuellen pn-Übergänge durch die jeweiligen Taylorschen Koeffizienten ersetzt, die aus einer Taylorschen Entwicklung des  $C(V)$ -Verhaltens resultieren (Gleichung (1) und (2)). Nach dieser Ersetzung wird der Koeffizient  $K_2$  des quadratischen Terms zu:

$$\kappa_2 = - \frac{1}{8 \left( \frac{1}{C_{J0,1}} + \frac{1}{C_{J0,2}} \right)^4} \left[ \frac{1}{C_{J0,1}^3 V_{J1}^2} \left( m_1^2 - \frac{1}{2} m_1 \right) + \frac{1}{C_{J0,2}^3 V_{J2}^2} \left( m_2^2 - \frac{1}{2} m_2 \right) \right] \quad (25)$$

**[0070]** Bei einer Serienentwicklung des  $C(V)$ -Verhaltens ist der quadratische Term für die Erzeugung der dritten Harmonischen verantwortlich. Falls der quadratische Term null ist, wird die dritte Harmonische vollständig aufgehoben.

$$\kappa_2 = 0 \quad (26) \quad (22)$$

**[0071]** Dieser Ausdruck (Gl. 25) für  $K_2 = 0$  kann in die folgende Form umgewandelt werden, die eine Ellipse in der Ebene  $m_1$ ,  $m_2$  beschreibt:

$$\frac{(m_1 - m_{0,1})^2}{r_1^2} + \frac{(m_2 - m_{0,2})^2}{r_2^2} = 1 \quad (27)$$

wobei  $(m_{0,1}, m_{0,2})$  der Mittelpunkt der Ellipse ist und  $r_1$  und  $r_1$  die Radien in der Richtung von  $m_1$  bzw.  $m_2$  sind.

**[0072]** Die Gleichung (25) unter der Bedingung, die durch Gleichung (26) ausgedrückt wird, wird in die Form von Gleichung (27) umgewandelt und ergibt somit:

$$\frac{\left( m_1 - \frac{1}{4} \right)^2}{\left( \frac{\sqrt{C_{J0,1}^3 V_{J1}^2 + C_{J0,2}^3 V_{J2}^2}}{4C_{J0,2}^2 V_{J2}} \right)^2} + \frac{\left( m_2 - \frac{1}{4} \right)^2}{\left( \frac{\sqrt{C_{J0,1}^3 V_{J1}^2 + C_{J0,2}^3 V_{J2}^2}}{4C_{J0,1}^2 V_{J1}} \right)^2} = 1 \quad (28)$$

woraus geschlossen werden kann, dass die Dritte-Harmonische-Erzeugung aufgehoben wird, wenn die Stufenfaktoren  $m_1$  und  $m_2$  sich auf der Ellipse befinden, zentriert bei  $\left( \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \right)$ , mit den Radien  $r_1$  und  $r_2$ , wie durch die folgenden Gleichungen beschrieben wird:

$$r_1 = \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{C_{J0,1}}{C_{J0,2}} \right)^3 \left( \frac{V_{J1}}{V_{J2}} \right)^2 + 1} \quad (29)$$

$$r_2 = \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{C_{J0,2}}{C_{J0,1}} \right)^3 \left( \frac{V_{J2}}{V_{J1}} \right)^2 + 1} \quad (30)$$

**[0073]** Aus den Gleichungen (29) und (30) kann geschlossen werden, dass die Form der Ellipse, in die die Kombinationen der Stufenfaktoren  $m_1$  und  $m_2$  fallen, von dem Verhältnis der Null-Vorspannung-Kapazitäten und von den Übergang-Potentialen beider Übergang-Paare abhängt. Die Null-Vorspannung-Kapazität kann über ein breites Spektrum variieren, indem das Dotierungsprofil des pn-Übergangs und/oder das physische Design (Layout) des pn-Übergangs angepasst wird. Andererseits ist der Variationsbereich des Übergang-Potentials erheblich geringer, da dieser Parameter sich auf die eingebaute Spannung des pn-Übergangs

bezieht. Ein üblicher Variationsbereich von  $V_J$  für einen Siliziumpn-Übergang beträgt ungefähr 0,6 bis 0,9 V. Falls eine bestimmte Durchbruchspannung durch einen pn-Übergang bereitgestellt werden muss, ist die Einflussnahme bezüglich  $V_J$  sehr begrenzt und kann nicht als sinnvoller Parameter zum Gestalten des Vorrichtungungsverhaltens betrachtet werden.

**[0074]** Die Fig. 4a-j, wie sie unten beschrieben sind, zeigen den Einfluss der Vorrichtungsparameter, d. h. der Null-Vorspannung-Übergang-Kapazitäten  $C_{J01}$ ,  $C_{J02}$ , und der Übergang-Spannungspotentiale  $V_{J1}$ ,  $V_{J2}$  auf die Beziehung zwischen dem ersten bis n-ten (hier: zweiten) Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  (hier:  $m_1$  und  $m_2$ ).

**[0075]** Fig. 4a zeigt die graphische Darstellung (Graph der Funktion) der Aufhebungslinien des Dritte-Harmonische-Signals PH3 der Halbleitervorrichtung 100 in Abhängigkeit von dem ersten und zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$ ,  $m_2$  gemäß einem Ausführungsbeispiel.

**[0076]** Auf Basis der obigen mathematischen Ableitung der optimalen  $C(V)$ -Parameter, geben die Ellipsen von Fig. 4a, in die die Kombinationen der Stufenfaktoren  $m_1$ ,  $m_2$  fallen, eine Aufhebung des Dritte-Harmonische-Signals PH3 der Halbleitervorrichtung 100 an. Deshalb werden diese Ellipsen in dem vorliegenden Kontext auch Aufhebungslinien genannt. Die Form der Ellipsen hängt von dem Verhältnis der Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J01}$ ,  $C_{J02}$  und von den Übergang-Spannungspotentialen  $V_{J1}$ ,  $V_{J2}$  der beiden Paare 102, 104 der pn-Übergang-Strukturen J1-J4 der Halbleitervorrichtung 100 ab.

**[0077]** Genauer gesagt, zeigt Fig. 4a die Kombinationen der Übergang-Stufenfaktoren  $m_1$ ,  $m_2$ , bei denen die dritte Harmonische PH3, die durch die Halbleitervorrichtung 100 (zum Beispiel mit zwei Paaren 102, 104 von pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J3) erzeugt wird, null oder zumindest fast null ist, wobei das Verhältnis der Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J01}$ ,  $C_{J02}$  die Form (=Exzentrizität) der Ellipse bestimmt, indem der Parameter  $a_1$  und der Parameter  $a_2$  bestimmt werden, wie in den obigen Gleichungen (29) und (30) angegeben ist. Wie oben erwähnt ist, entsprechen die Parameter  $a_i$  den Radien  $r_i$  der Gleichungen (1) bis (31) weiter oben und den Radien  $r_i$ , wie sie in den Fig. 4a bis 4j gezeigt sind, das heißt  $r_i = a_i$ . Die anderen Parameter, die Einfluss auf die Parameter  $a_1$ ,  $a_2$  der Ellipsen haben, zum Beispiel das erste und zweite Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$ ,  $V_{J2}$ , sind beispielsweise während der Berechnung der Kurven (Funktionsgraphen) von Fig. 4a auf gleiche Werte festgelegt.

**[0078]** Fig. 4b zeigt eine vergrößerte Darstellung (Ansicht) von Fig. 4a. Aus Fig. 4a und 4b ist ersichtlich, dass alle Ellipsen Kreuzungspunkte aufweisen für (1.)  $m_1 = m_2 = 0$ ; (2.)  $m_1 = m_2 = 0,5$ ; (3.)  $m_1 = 0$  und  $m_2 = 0,5$ ; und (4.)  $m_1 = 0,5$  und  $m_2 = 0$ , d. h. für  $m_i \in \{0,00, 0,50\}$ .

**[0079]** Fig. 4c zeigt eine weitere graphische Darstellung der Funktionsgraphen, für die die Dritte-Harmonische-Erzeugung PH3 der Halbleitervorrichtung 100 theoretisch vollständig unterdrückt wird. Genauer gesagt, zeigt Fig. 4c den Stufenfaktor  $m_2$  des zweiten Paares 104 von pn-Übergang-Strukturen J3, J4, für die die Dritte-Harmonische-Erzeugung PH3 vollständig unterdrückt wird, in Abhängigkeit von dem Verhältnis der ersten und zweiten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_R = C_{J01}/C_{J02}$ . Der Stufenfaktor  $m_1$  des ersten Paares 102 von pn-Übergang-Strukturen J1, J2 ist ein Parameter dieser Darstellung (Funktionsgraph). Während der Berechnung dieser Kurven von Fig. 4c sind das erste und zweite Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$ ,  $V_{J2}$  auf gleiche Werte festgelegt, mit  $V_R = V_{J01}/N_{J02} = 1$ .

**[0080]** Fig. 4d zeigt eine vergrößerte Darstellung (Ansicht) der graphischen Darstellung von Fig. 4c.

**[0081]** Fig. 4e zeigt eine graphische Darstellung der Parameter  $a_1$ ,  $a_2$  (Radien  $r_1$ ,  $r_2$ ) der Ellipse, bei der die Dritte-Harmonische-PH3-Erzeugung der Halbleitervorrichtung 100 zumindest theoretisch vollständig unterdrückt wird, in Abhängigkeit von dem Verhältnis  $C_R$  der ersten und zweiten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J01}/C_{J02}$ . Während der Berechnung dieser Kurven sind das erste und zweite Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$ ,  $V_{J2}$  auf gleiche Werte festgelegt, mit  $V_R = V_{J01}/N_{J02} = 1$ .

**[0082]** Die relativ große Abhängigkeit des ersten Parameters  $a_1$  (erster Radius  $r_1$ ) der Ellipse von dem Verhältnis  $C_R$  der ersten und zweiten Vorspannungskapazität  $C_{J01}/C_{J02}$  spiegelt die zunehmende Exzentrizität der Ellipse wider, wie in Fig. 4a bezüglich des zunehmenden Verhältnisses  $C_R$  der ersten und zweiten Null-Vorspannung-Kapazität  $C_R = C_{J01}/C_{J02}$  gezeigt ist.

**[0083]** Fig. 4f zeigt eine graphische Darstellung der Aufhebungslinien der dritten Harmonischen PH3 der Halbleitervorrichtung 100 in Abhängigkeit von dem ersten und zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$ ,  $m_2$  ange-

sichts des Einflusses von nichtgleichen Werten auf das erste und zweite Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$ ,  $V_{J2}$ , d. h. für  $V_R = V_{J01}/N_{J02} \neq 1$ . Genauer gesagt, zeigt **Fig. 4f** den Einfluss von nichtgleichen Werten für das erste und zweite Übergang-Spannungspotential  $V_{J1}$ ,  $V_{J2}$ , auf die Kombinationen der Stufenfaktoren  $m_1$ ,  $m_2$ , die zu einer vollständigen Unterdrückung der Dritte-Harmonische-PH3-Erzeugung der Halbleitervorrichtung 100 führen. Im Fall von **Fig. 4f** sind die erste und zweite Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J01}$ ,  $C_{J02}$  auf gleiche Werte festgelegt, mit  $C_{J01} = C_{J02}$ . Das Übergang-Spannungspotential  $V_{J2}$  des zweiten Paares 104 von pn-Übergang-Strukturen J3, J4 ist auf einen festen Wert  $V_{J2} = 0,8$  festgelegt.

**[0084]** Die **Fig. 4g-j** zeigen graphische Darstellungen der jeweiligen Leistungspegel PH3 der dritten Harmonischen für die Halbleitervorrichtung 100 in Abhängigkeit von dem ersten und zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$ ,  $m_2$  als Ergebnis einer Simulation, die beispielsweise das Verfahren nutzt, wie es oben mit Bezugnahme auf **Fig. 2** und **3** erläutert wird. Außerdem ist in den **Fig. 4g-j** die theoretische Aufhebungslinie gezeigt (= die Bahn der theoretischen optimalen Unterdrückung der dritten Harmonischen PH3 für niedrige Eingangsleistungspegel  $P_{IN}$ ). Genauer gesagt, zeigen die **Fig. 4g-j** die simulierte störende dritte Harmonische PH3 der Halbleitervorrichtung 100 mit gleicher erster und zweiter Null-Vorspannung-Übergang-Kapazität  $C_{J01} = C_{J02}$  bei unterschiedlichen Eingangsleistungspegeln  $P_{IN}$  (**Fig. 4g**  $P_{IN} = -10$  dBm; **Fig. 4h**  $P_{IN} = 0$  dBm und **Fig. 4i**  $P_{IN} = +10$  dBm) des Grundfrequenz-HF-Signals (zum Beispiel unter Verwendung des oben beschriebenen Schaltung-Simulationstools). Die Bahn der theoretischen optimalen PH3-Unterdrückung gemäß der oben beschriebenen Ableitung (hierin auch als Aufhebungslinie bezeichnet) wird durch die Kurve „A“ („graue“ Kurve) dargestellt. Bei niedrigeren Eingangsleistungspegeln  $P_{IN}$  stimmen die minimale dritte Harmonische PH3 der Schaltungssimulation und die theoretische Ableitung (Kurve „A“) stark überein, wobei für zunehmende Eingangsleistungspegel  $P_{IN}$  die Abweichung der minimalen dritten Harmonischen PH3, die aus der Schaltungssimulation und von der theoretischen optimalen Unterdrückung (Kurve „A“) resultiert, etwas ausgeprägter ausfällt, jedoch für die untersuchten Eingangsleistungen und bis zu 20 dBm moderat bleibt.

**[0085]** Es ist festzustellen, dass die unregelmäßigen Merkmale der Isolinien in den **Fig. 4g-j**, und sogar die Erscheinung von getrennten Isolinienregionen in der Nähe der Aufhebungslinie, in den Konturdarstellungen auf den Algorithmus zurückzuführen sind, mit dem die Konturdarstellungen aus einem Simulationsdatensatz erzeugt werden, in dem die Simulationsdaten lediglich für eine finite Anzahl von simulierten  $m_1$ ,  $m_2$  Kombinationen vorliegen, die sich in einem regelmäßigen rechteckigen Netz befinden.

**[0086]** Die Änderung des optimalen Übergang-Stufenfaktors mit Eingangsleistung ist auch aus **Fig. 4j** ersichtlich, die den simulierten PH3-Leistungspegel abhängig von dem Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  für unterschiedliche Eingangsleistungen  $P_{IN}$  (-10 dBm, 0dBm, 10 dBm und 20dBm) zeigt. Der Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  wird fest bei  $m_1 = 0,25$  gehalten, wobei ferner  $C_{J01}=C_{J02}$  festgelegt wird. Die Leistungspegel werden auf das lokale Maximum bei  $m_1=m_2=0,25$  (Referenzfall) normiert, um die Ergebnisse besser zu vergleichen. Daher kann darauf hingewiesen werden, dass die Unterdrückung der Erzeugung der störenden dritten Harmonischen für einen erwarteten vorbestimmten Eingangsleistungspegel optimiert werden kann. Zu diesem Zweck kann es auch möglich sein, gezielt von der Kurve „A“ abzuweichen, die für kleine Eingangsleistungspegel  $P_{IN}$  analytisch abgeleitet wird, und die pn-Übergang-Strukturen mit jeweiligen Übergangs-Stufenfaktoren anzuordnen, die entworfen sind, um die Erzeugung der störenden dritten Harmonischen bezüglich des Referenzfalls um einen gewünschten Betrag für einen vorbestimmten Eingangspegel  $P_{IN}$  zu unterdrücken, unter Verwendung der Ergebnisse aus der oben beschriebenen Simulation seitens des Schaltung-Simulationstools.

**[0087]** Darüber hinaus kann es unter Umständen lediglich notwendig sein, die optimalen Übergang-Stufenfaktoren bis zu einer bestimmten Genauigkeit in Abhängigkeit von dem gewünschten Unterdrückungsgrad zu reproduzieren. Falls beispielsweise der Leistungspegel der störenden dritten Harmonischen gegenüber dem Referenzfall um 10 dB unterdrückt werden soll, kann eine Abweichung von  $\pm 0,05$  für die Übergang-Stufenfaktoren  $m_2$  akzeptabel sein. Um einen höheren Unterdrückungsgrad zu erzielen, kann eine geringere Abweichung von  $\pm 0,03$  oder sogar  $\pm 0,02$  wünschenswert sein. Ähnliche Überlegungen gelten für den Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  oder allgemein gesagt  $m_i$ .

**[0088]** Die Beziehung zwischen den simulierten PH3-Werten und dem Optimalwert (Kurve „A“) gilt auch für nichtgleiche Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J0,1}$ ,  $C_{J0,2}$ , die zu einer zunehmenden Exzentrizität der Ellipsen führen, wie bezüglich **Fig. 4a** beschrieben ist.

**[0089]** Im Folgenden wird die mathematische Ableitung der optimalen C(V)-Parameter zur Unterdrückung einer Dritte-Harmonische-Erzeugung auf drei ( $n = 3$ ) Paare 102, 104, 106 von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 und J5, J6 erweitert und weiter für n Paare verallgemeinert.

**[0090]** Unter Verwendung derselben Schritte, wie sie oben beschrieben sind, können die Bedingungen bestimmt werden, unter denen die Dritte-Harmonische-Erzeugung für drei Paare von anti-seriell geschalteten pn-Übergängen aufgehoben wird. In diesem Fall folgt der quadratische Koeffizient der Serienentwicklung des C(V)-Verhaltens wie folgt:

$$\kappa_2 = - \frac{1}{8 \left( \frac{1}{C_{J0,3}} + \frac{1}{C_{J0,2}} + \frac{1}{C_{J0,1}} \right)^4} \left[ \frac{1}{C_{J0,1}^3 V_{J1}^2} \left( m_1^2 - \frac{1}{2} m_1 \right) + \frac{1}{C_{J0,2}^3 V_{J2}^2} \left( m_2^2 - \frac{1}{2} m_2 \right) + \frac{1}{C_{J0,3}^3 V_{J3}^2} \left( m_3^2 - \frac{1}{2} m_3 \right) \right] \quad (31)$$

$$= 0$$

was wie folgt weiter vereinfacht werden kann:

$$\frac{1}{C_{J0,1}^3 V_{J1}^2} \left( m_1 - \frac{1}{4} \right)^2 + \frac{1}{C_{J0,2}^3 V_{J2}^2} \left( m_2 - \frac{1}{4} \right)^2 + \frac{1}{C_{J0,3}^3 V_{J3}^2} \left( m_3 - \frac{1}{4} \right)^2 \quad (32)$$

$$= \frac{1}{16} \left( \frac{1}{C_{J0,1}^3 V_{J1}^2} + \frac{1}{C_{J0,2}^3 V_{J2}^2} + \frac{1}{C_{J0,3}^3 V_{J3}^2} \right)$$

**[0091]** Dies ist ein dreidimensionales Ellipsoid mit der folgenden allgemeinen Form:

$$\frac{(m_1 - m_{0,1})^2}{r_1^2} + \frac{(m_2 - m_{0,2})^2}{r_2^2} + \frac{(m_3 - m_{0,3})^2}{r_3^2} = 1 \quad (33)$$

mit dem Mittelpunkt  $m_{0,i} = \frac{1}{4}$  für  $i \in \{1, \dots, n\}$  und den Radien:

$$r_1 = \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{C_{J0,1}}{C_{J0,2}} \right)^3 \left( \frac{V_{J1}}{V_{J2}} \right)^2 + \left( \frac{C_{J0,1}}{C_{J0,3}} \right)^3 \left( \frac{V_{J1}}{V_{J3}} \right)^2} + 1 \quad (34)$$

$$r_2 = \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{C_{J0,2}}{C_{J0,1}} \right)^3 \left( \frac{V_{J2}}{V_{J1}} \right)^2 + \left( \frac{C_{J0,2}}{C_{J0,3}} \right)^3 \left( \frac{V_{J2}}{V_{J3}} \right)^2} + 1 \quad (35)$$

$$r_3 = \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{C_{J0,3}}{C_{J0,1}} \right)^3 \left( \frac{V_{J3}}{V_{J1}} \right)^2 + \left( \frac{C_{J0,3}}{C_{J0,2}} \right)^3 \left( \frac{V_{J3}}{V_{J2}} \right)^2} + 1 \quad (36)$$

**[0092]** Verallgemeinerung für pn-Übergang-Paare: Alle Kombinationen von  $m_i$ , mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , die auf dem folgenden n-dimensionalen Ellipsoid liegen, führen zu einer Aufhebung der dritten Harmonischen.

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{m_i - \frac{1}{4}}{r_i} \right)^2 = 1 \quad (37)$$

wobei die Radien des Ellipsoids  $r_i$  mit  $i \in \{1, \dots, n\}$  definiert sind als:

$$r_i = \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{C_{J0,j}}{C_{J0,i}} \right)^3 \left( \frac{V_{Jj}}{V_{Ji}} \right)^2} \quad (38)$$

**[0093]** Im Folgenden werden unterschiedliche Aspekte des vorliegenden Konzepts der Halbleitervorrichtung 100, wie sie aus den obigen Auswertungen ableitbar sind, ausführlich beschrieben, wobei die Halbleitervor-

richtung 100 n (zumindest zwei) Paare 102, 104 (...) von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2, J3, J4 (...) mit eingestellten Übergang-Stufenfaktoren  $m_1$  bis  $m_n$  aufweist, zum Bereitstellen einer zumindest reduzierten oder einer minimalen Erzeugung einer störenden ungeradzahigen Harmonischen, zum Beispiel einer dritten Harmonischen für einen vorbestimmten Eingangsleistungspegel  $P_{IN}$ .

**[0094]** Wie aus den obigen Auswertungen für die Halbleitervorrichtung 100 mit n Paaren 102, 104 (...) von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 (...) mit eingestellten Übergang-Stufenfaktoren  $m_1$  bis  $m_n$  ableitbar ist, basiert jeder des ersten bis n-ten Parameters „ $a_1$  bis  $a_n$ “ auf den n Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J0,1}$  -  $C_{J0,n}$  und auf den n Übergang-Spannungspotentialen  $V_{J1}$ - $V_{Jn}$  der n Paare von pn-Übergang-Strukturen.

**[0095]** Wie aus den obigen Auswertungen für die Halbleitervorrichtung 100 ableitbar ist, erfüllen der erste bis n-te Parameter „ $a_1$  bis  $a_n$ “ die folgende Gleichung:

$$a_i = \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{C_{J0,i}}{C_{J0,j}} \right)^3 \left( \frac{V_{Jj}}{V_{Ji}} \right)^2}.$$

**[0096]** Basierend auf den obigen Auswertungen für die Halbleitervorrichtung 100 und mit Bezugnahme auf die Fig. 4g-j zeigen die simulierten graphischen Darstellungen der jeweiligen Leistungspegel PH3 der dritten Harmonischen für die Halbleitervorrichtung 100 in Abhängigkeit von dem ersten und zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$ ,  $m_2$  und die theoretischen Aufhebungslinien zusammen mit der allgemeinen Ableitung weiter oben, dass die Werte für den ersten bis „n-ten“ Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  dahingehend eingestellt werden können, dass dieselben zu einem Dritte-Ordnung-Schnittpunkt IP3 von zumindest 50 dBm, 55 dBm oder sogar 60 dBm führen. Ein Dritte-Ordnung-Schnittpunkt IP3 von 50 dBm entspricht beispielsweise einem PH3-Leistungspegel von -70 dBm bei 10 dBm Eingangsleistung. Hier kann einer der Übergang-Stufenfaktoren, zum Beispiel  $m_1$ , auf  $m_1 < 0,50$ , vorzugsweise auf  $m_1 \leq 0,48$  eingestellt sein, wobei letzteres vom Herstellungsstandpunkt aus vorteilhaft ist, wie bereits oben erwähnt ist.

**[0097]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Halbleitervorrichtung 100 sind zumindest zwei des ersten bis n-ten Übergang-Stufenfaktors  $m_1$  bis  $m_n$  unterschiedlich. Genauer gesagt, weisen die n Paare von pn-Übergängen zumindest ein erstes Paar 102 mit einem pn-Übergang vom ersten Typ mit Stufenfaktor  $m_1$  und ein zweites Paar 104 mit einem pn-Übergang vom zweiten Typ mit Stufenfaktor  $m_2$  auf.

**[0098]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel der Halbleitervorrichtung 100 sind für  $C_{J01} = C_{J02}$ , und  $V_{J1} = V_{J2}$  pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ J1, J2 dahingehend angeordnet, einen ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1 = 0,33 \pm 0,10$  aufzuweisen, und wobei die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ J3, J4 dahingehend angeordnet sind, einen zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 = 0,59 \pm 0,03$ . Der Letztere kann einen Übergang mit nahezu linearem Gradienten darstellen.

**[0099]** Basierend auf den obigen Auswertungen für einige Ausführungsbeispiele der Halbleitervorrichtung 100, mit  $i \in \{1, 2\}$ , entsprechen die Parameter  $a_1$  und  $a_2$  (= Radien  $r_1$ ,  $r_2$ ) der Ellipsengleichung den folgenden Gleichungen:

$$a_1 = \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{C_{J0,1}}{C_{J0,2}} \right)^3 \left( \frac{V_{J1}}{V_{J2}} \right)^2 + 1} \text{ und}$$

$$a_2 = \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{C_{J0,2}}{C_{J0,1}} \right)^3 \left( \frac{V_{J2}}{V_{J1}} \right)^2 + 1}.$$

**[0100]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel sind die pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4 des ersten und des zweiten Typs/Paars 102, 104 dahingehend angeordnet, ein Verhältnis der Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J0,1}$ ,  $C_{J0,2}$  aufzuweisen, das die folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{1}{4} < \frac{C_{J0,1}}{C_{J0,2}} < 4.$$

**[0101]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel bildet die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ eine Diodenstruktur vom i-ten Typ mit einer Anodenregion und einer Kathodenregion. Ferner kann die Halbleitervorrichtung 100 einen ersten Verbindungsanschluss 107 und einen zweiten Verbindungsanschluss 108 aufweisen, wobei die „n“ Paare 102, 104 (...) von pn-Übergang-Strukturen J1-J4 (...) zwischen den ersten und zweiten Anschluss 107, 108 geschaltet sind.

**[0102]** Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel sind die „n“ Paare 102, 104 (...) von pn-Übergang-Strukturen J1-J4 (...) in einer gestapelten Konfiguration in einem Halbleitersubstrat angeordnet. Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel erstrecken sich unterschiedlich dotierte Halbleiterregionen der pn-Übergang-Strukturen bezüglich einer Hauptoberflächenregion des Halbleitersubstrats vertikal in das Halbleitersubstrat, wobei der Hauptabschnitt der Fläche des metallurgischen pn-Übergangs ein planarer pn-Übergang ist, der sich parallel zu einer Hauptoberflächenregion des Halbleitersubstrats erstreckt. Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel können die zwei pn-Übergang-Strukturen des i-ten Paares zusammen in einer gestapelten Konfiguration in dem Halbleitersubstrat angeordnet sein. Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel kann eine der zwei pn-Übergang-Strukturen des ersten Paares in dem Halbleitersubstrat in einer gestapelten Konfiguration mit einer der zwei pn-Übergang-Strukturen des zweiten Paares angeordnet sein. Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel kann die gestapelte Konfiguration eine npn-Struktur mit einer floatenden Basisregion in dem Halbleitersubstrat aufweisen.

**[0103]** Fig. 5a zeigt eine schematische Querschnittsansicht der Halbleitervorrichtung 100 gemäß einem Ausführungsbeispiel, die beispielsweise die vier anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2, J3, J4 gemäß einem Ausführungsbeispiel (siehe zum Beispiel Fig. 1a) aufweist, wobei der erste Stapel oder das erste Paar 102 die pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ J1, J2 ( $i = 1$ ) aufweist, und wobei der zweite Stapel oder das zweite Paar 104 die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ J3, J4 ( $i = 2$ ) aufweist.

**[0104]** Wie in Fig. 5a gezeigt ist, weist die Halbleitervorrichtung 100 das Halbleitersubstrat 120 mit einem ersten Hauptoberflächenabschnitt 120a und einem zweiten Hauptoberflächenabschnitt 120b auf gegenüberliegenden Hauptseiten des Halbleitersubstrats 120 auf.

**[0105]** Die folgende beispielhafte Beschreibung der unterschiedlichen Schichten und Regionen des Halbleitersubstrats 120 erstreckt sich im Wesentlichen von dem zweiten Hauptoberflächenabschnitt 120b zu dem ersten Hauptoberflächenabschnitt 120a des Halbleitersubstrats 120. Die unterschiedlichen Regionen und Strukturen in dem Halbleitersubstrat 120 können beispielsweise während der so genannten FEOL (front end of line, vorderes Ende der Linie)-Prozessstufe hergestellt werden.

**[0106]** Das Halbleitersubstrat 120 kann ein niederohmiges n-Typ-Substrat 120-1 aufweisen. Eine p-Typ-Halbleiter-Schicht 120-2 ist auf dem n-Typ-Substrat 120-1 angeordnet. Die p-Typ-Halbleiter-Schicht 120-2 (z. B. p-Epi-Schicht 120-2) kann epitaktisch auf das n-Typ-Substrat 120-1 aufgebracht werden. Die p-Typ-Halbleiter-Schicht 120-2 weist eine vergrabene p-Typ-Halbleiter-Schicht 120-3 (P-vergrabene-Schicht 120-3) auf. Die vergrabene p-Typ-Halbleiter-Schicht 120-3 kann beispielsweise in Form einer Blanket-Implantierung (nicht maskierte Implantierung) eines p-Typ-Dotierungsstoffs in der Halbleiterschicht 120-2 gebildet sein.

**[0107]** Eine weitere p-Typ-Schicht 120-4 (z. B. p-Epi-Schicht 120-4) ist auf der p-Typ-Schicht 120-2 mit der vergrabenen p-Typ-Schicht 120-3 angeordnet. Die p-Typ-Halbleiter-Schicht 120-4 kann epitaktisch auf die p-Typ-Schicht 120-2 aufgebracht werden. Alternativ kann die Schicht 120-4 auch durch eine i-Typ-Schicht (d. h. intrinsische und nicht beabsichtigt dotierte Schicht) verwirklicht werden.

**[0108]** In der zweiten epitaktischen Schicht 120-4 kann eine p-Typ-Wanne-Region 120-5 (p-Wanne 120-5) angeordnet sein. Die p-Typ-Wanne-Region 120-5 kann gebildet werden, nachdem eine LOCOS-Oxidation der Hauptoberflächenfläche 120a der p-Typ-Schicht 120-4 des Halbleitersubstrats 120 durchgeführt wurde und indem ein Blanket-Implantierungsschritt durchgeführt wird. Auf Basis dieses Ansatzes wäre keine lithographische Lackmaske auf der Oberflächenfläche 120a der p-Typ-Schicht 120-4 erforderlich, jedoch könnte ein selbstausgerichteter Implantierungsprozess aufgrund der LOCOS-Oxidation auf der Oberfläche 120a durchgeführt werden. Ein LOCOS-Prozess (LOCOS = LOCAL Oxidation of Silicon, lokale Oxidation von Silizium) ist ein Mikroherstellungsprozess, bei dem Siliziumdioxid in ausgewählten Flächen auf einem Siliziumwafer gebildet wird, d. h. dem Halbleitersubstrat 120, mit der Si-SiO<sub>2</sub>-Schnittstelle an einem niedrigeren Punkt oder einer niedrigeren Ebene als dem Rest der Silizium-Hauptoberflächenfläche 120a. Natürlich kann eine p-Wanne 102-5 auch durch Verwenden eines lithographischen Verfahrens gebildet werden, das im Stand der Technik allgemein bekannt ist.

**[0109]** Wie in **Fig. 5a** gezeigt ist, können die pn-Übergang-Strukturen J1, J3 und die pn-Übergang-Strukturen J2, J4 in getrennten Halbleiterflächen 122, 124 des Halbleitersubstrats 120 angeordnet sein, wobei die getrennten Flächen 122, 124 mittels so genannter tiefer Isoliergräben 130 erzielt werden können, die die Halbleiterregionen 122, 124 mit den pn-Übergang-Strukturen J1, J3 und J2, J4 lateral begrenzen und/oder lateral umgeben. Die tiefen Isoliergräben 130 können beispielsweise mittels RIE-Prozessschritten (RIE = reactive ion etching, reaktives Ionenätzen) in dem Halbleitersubstrat 120 gebildet werden, wobei die erzielten Gräben 130 mit einem Oxidmaterial 134, z. B. einem SiO<sub>2</sub>-Liner, mit Hilfe eines Graben-Liner-Oxidationsprozess ausgekleidet werden können und mittels eines Halbleitermaterials 132, z. B. Polysilizium, gefüllt werden können.

**[0110]** Die Halbleitervorrichtung 100 weist ferner hochdotierte n-Typ-Kontaktregionen 120-7 in Form von Implantierungsregionen auf, die zu der Oberflächen der p-Typ-Wanne 120-5 benachbart sind. Eine n-Typ-Kontaktregion 120-7 kann bei manchen Ausführungsbeispielen auch einfach als eine flache n-Region 120-7 oder als eine Emitter-Region betrachtet werden. Die n-Typ-Kontaktregionen 120-7 können mit Hilfe eines n-Kontakt-Implantierungs-Prozessschritts gebildet werden, z. B. mit Hilfe einer Blanket-Implantierung, die mit Hilfe des (oben beschriebenen) LOCOS-Prozesses selbstausgerichtet sein kann, so dass keine lithographische Lackmaske erforderlich ist.

**[0111]** Als ein weiterer (z. B. finaler) Prozessschritt des FEOL-Prozesses zum Verarbeiten des Halbleitersubstrats 120 kann ein Oxidmaterial 128 auf der ersten Hauptoberfläche 120a des Halbleitersubstrats 120 abgeschieden werden. Die Halbleitervorrichtung 100 kann ferner einen Kontakt- und Metallisierungsschichtstapel 140 (BEOL-Stapel, BEOL = back end of line, hinteres Ende der Linie) auf der ersten Hauptoberfläche 120a des Halbleitersubstrats 120 aufweisen, um Zwischenverbindungen 110 (zum Beispiel Kontaktstecker oder -durchgänge) und Zwischenbindungsschichten 107, 108 für die Halbleitervorrichtung(en) 100 und optional für weitere Schaltungselemente (nicht in **Fig. 5a** gezeigt) in dem Halbleitersubstrat 120 bereitzustellen. Die Kontaktstrukturen und (strukturierten) Metallisierungsschichten des Metallisierungsstapels 140 können mit Hilfe von BEOL-Prozessschritten gebildet werden. Letztlich können die Halbleitervorrichtungen 100 gehäust und getrennt (vereinzelnd) werden, falls eine Mehrzahl von Halbleitervorrichtungen 100 in dem Halbleitersubstrat 120, beispielsweise einem Halbleiter-Wafer 120, hergestellt wird. Ein Beispiel ist ein Chip-Größen-Häusungsprozess, der beispielsweise das Bilden von Elektroden (oder Pads) als die obere Schicht des Metallisierungsstapels 140 und einen Vereinzelungsprozess aufweist.

**[0112]** Wie in **Fig. 5a** gezeigt ist, bilden die n-Typ-Kontaktregion 120-7 (= Kathodenregion) und die p-Typ-Wanne-Region 120-5 (= Anodenregion) die pn-Übergang-Struktur vom ersten Typ J1 bzw. J2 in den unterschiedlichen Halbleitersubstratflächen 122 und 124. Darüber hinaus bilden die vergrabene p-Typ-Schicht 120-3 (= Anodenregion) und das n-Typ-Substrat 120-1 (= Kathodenregion) die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ J3 bzw. J4 in den getrennten Halbleiterregionen 122, 124 des Halbleitersubstrats 120.

**[0113]** **Fig. 5b** zeigt eine schematische berechnete Darstellung eines beispielhaften Dotierungsprofils der Halbleitervorrichtung 100 von **Fig. 5a**, wobei unterschiedliche Dotierungskonzentrationen in der p-Typ-Wanne 120-5 durch unterschiedliche Implantationsdosen erzielt werden können, die mit „36“ bis „42“ bezeichnet sind. Die Darstellung von **Fig. 5b** enthält ferner eine beispielhafte Angabe der ungefähren Erstreckung der unterschiedlichen Schichten und/oder Regionen des Halbleitersubstrats 120 von **Fig. 5a**. Der metallurgische Übergang zwischen n-Typ-Region 120-7 und p-Typ-Region 120-5 fällt in die abfallende Steigung des p-Typ-Implantierungsprofils von Region 120-5. Mit einer ausreichend steilen Neigung der n-Typ-Implantierung von n-Typ-Region 120-7 können die C(V)-Eigenschaften des pn-Übergangs, der durch die Regionen 120-5 und 120-7 gebildet wird, einen hyper-abrupten Charakter zeigen und somit einen Stufenfaktor  $m_1 > 0,5$  aufweisen.

**[0114]** **Fig. 6a** zeigt eine schematische Querschnittsansicht der Halbleitervorrichtung 100 entlang der Schnittlinie A-B-C-D in der schematischen Draufsicht durch die Halbleitervorrichtung 100 von **Fig. 6b**. Die Halbleitervorrichtung 100 weist zum Beispiel die vier anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen J1, J2, J3, J4 gemäß einem Ausführungsbeispiel auf (siehe zum Beispiel **Fig. 1a**). Die pn-Übergang-Strukturen J1, J3 (vertikale Vorrichtung 1) können eine erste npn-Struktur mit einer ersten floatenden Basisregion in dem Halbleitersubstrat 120 aufweisen, wobei die pn-Übergang-Strukturen J2, J4 eine zweite npn-Struktur mit einer zweiten floatenden Basisregion in dem Halbleitersubstrat 120 aufweisen. Die floatenden Basisregionen werden jeweils durch die P-Typ-Teile zwischen dem n-Typ-Substrat 120 und der n-Typ-Kontaktregion 120-7 gebildet, d. h. beispielsweise durch p-Typ-Regionen 120-2 bis 120-5.

**[0115]** Wie bezüglich **Fig. 5a-b** erörtert wurde, können in Bezug auf das erste und zweite Paar 102, 104 von pn-Übergang-Strukturen J1, J2 und J3, J4, die anti-seriell geschaltet sind, die pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ J1 und J2 (im Wesentlichen) dasselbe Layout und Dotierungsprofil aufweisen und den Stufenfaktor  $m_1$  haben, wobei die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ J3 und J4 ebenfalls (im Wesentlichen) dasselbe Layout und Dotierungsprofil aufweisen und den zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  haben können.

**[0116]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel bildet die Halbleitervorrichtung zum Beispiel eine diskrete ESD-Vorrichtung (ESD = electrostatic discharge, elektrostatische Entladung) mit einer TVS-Funktionalität.

**[0117]** Gemäß weiteren Ausführungsbeispielen kann die Halbleitervorrichtung 100 n (zumindest zwei) Paare von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen 102, 104 (...) mit eingestellten Übergang-Stufenfaktoren  $m_1, m_2 \dots m_n$  aufweisen, wobei (zumindest) eines der n Paare 102, 104 (...) der pn-Übergang-Strukturen J1-J4 (...) eine „zusammengesetzte“ Diodenstruktur aufweist, um ein erwünschtes Verhalten bezüglich der Durchbruchspannung der Vorrichtung 100 anzupassen und zu erhalten und um eine zumindest reduzierte oder eine minimale Erzeugung von störenden ungeradzahigen Harmonischen bereitzustellen, zum Beispiel von dritten Harmonischen. Die Vorrichtung 100 kann beispielsweise für TVS(Transient Voltage Suppressor, Überspannungsbegrenzer)-Vorrichtungen verwendet werden.

**[0118]** **Fig. 7a** zeigt ein schematisches Diagramm der Halbleitervorrichtung 100 mit  $n = 2$  Paaren 102, 104 von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen, wobei (zumindest) ein Paar 102 der zumindest zwei Paare 102, 104 der pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen Übergang-Typ aufzuweisen, der hier als eine zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur (zusammengesetzte Diodenstruktur) beschrieben ist und mit Bezugnahme auf **Fig. 7b** weiter unten ausführlicher beschrieben wird.

**[0119]** **Fig. 7b** zeigt lediglich das erste Paar 102 der in **Fig. 7a** gezeigten Halbleitervorrichtung 100, das als ein Paar von zwei zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen 102-1, 102-2 gebildet ist. Die erste zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102-1 weist eine erste partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$  und eine zweite partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{12}$  auf, und die zweite zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102-2 weist eine erste partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{21}$  und eine zweite partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{22}$  auf. Das heißt, das erste Paar 102 von **Fig. 7a** und **7b** wird durch ein Paar von anti-seriell geschalteten zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen 102-1, 102-2 gebildet, von denen jede eine parallele Schaltung einer ersten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}, J_{21}$  und einer zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{12}, J_{22}$  aufweist. Die ersten partiellen pn-Übergang-Strukturen  $J_{11}, J_{21}$  weisen einen ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$ , ein erstes partielles Übergang-Spannungspotential  $V_{J11}$  und eine erste partielle Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J011}$  auf, wobei die zweiten partiellen pn-Übergang-Strukturen  $J_{12}, J_{22}$  einen zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{12}$ , ein zweites partielles Übergang-Spannungspotential  $V_{J12}$  und eine zweite partielle Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J012}$  aufweisen, die sich beispielsweise von dem ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$ , dem ersten partiellen Übergang-Spannungspotential  $V_{J11}$  und der ersten partiellen Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J011}$  unterscheiden können. Basierend auf einer Kombination des ersten und zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktors  $m_{11}, m_{12}$  ergibt sich ein erster effektiver Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  der jeweiligen zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 und 102-2. Das bedeutet, die zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen 102-1 und 102-2 verhalten sich wie pn-Übergang-Strukturen mit einem effektiven Übergang-Stufenfaktor  $m_1$ , einem effektiven Übergang-Potential  $V_{J1}$  und einer effektiven Null-Vorspannung-Übergang-Kapazität  $C_{J01}$ . Dieses effektive Verhalten der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 als einfache pn-Übergang-Struktur ist in **Fig. 7b** durch Entsprechung der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 mit der pn-Übergang-Struktur  $J_1$  und der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-2 mit der pn-Übergang-Struktur  $J_2$  angegeben. Dementsprechend können die spannungsabhängigen Kapazitätscharakteristika der zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen in vielen Fällen zufriedenstellend durch den obigen Ausdruck A1 beschrieben oder modelliert werden, wobei  $m_i$  als der effektive (kombinierte) Übergang-Stufenfaktor genommen wird, und ähnlich für das Übergang-Potential  $V_{Ji}$  und die Null-Vorspannung-Übergang-Kapazität  $C_{J0i}$ .

**[0120]** Anders gesagt, weist die Halbleitervorrichtung 100, wie sie in **Fig. 7a** und **7b** gezeigt ist, gemäß einem Ausführungsbeispiel eine erste Parallelschaltung 102-1 der ersten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$  und der zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{12}$  und eine zweite Parallelschaltung 102-2 der ersten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{21}$  und der zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{22}$  auf, wobei die erste und zweite Parallelschaltung 102-1, 102-2 anti-seriell geschaltet sind. Die anti-seriell geschaltete erste und zweite Parallelschaltung 102-1, 102-2 bilden das erste Paar 102 der pn-Übergang-Strukturen  $J_1, J_2$ , das mit dem zweiten Paar 104 der pn-Übergang-Strukturen  $J_3, J_4$  in Serie geschaltet ist, wie in **Fig. 7a** angegeben ist.

**[0121]** Das bedeutet, gemäß Ausführungsbeispielen der Halbleitervorrichtung 100 kann zumindest ein Paar 102 der n Paare 102, 104 (...) von pn-Übergang-Strukturen  $J_1$ - $J_4$  (...) dahingehend angeordnet sein, eine zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102 zu bilden, wie in **Fig. 7b** gezeigt ist, mit einer ersten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$ ,  $J_{21}$  und einer zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{12}$ ,  $J_{22}$ , die parallel geschaltet sind, wobei die ersten partiellen pn-Übergang-Strukturen  $J_{11}$ ,  $J_{21}$  einen ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$  aufweisen und wobei die zweiten partiellen pn-Übergang-Strukturen  $J_{12}$ ,  $J_{22}$  einen zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{12}$  aufweisen, der sich von dem ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$  unterscheidet. Der resultierende effektive Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 120 basiert auf einer Kombination des ersten und zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktors  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ .

**[0122]** Um das vorliegende Konzept in Form der beschriebenen Implementierungen und Ausführungsbeispiele der Halbleitervorrichtung 100 gemäß **Fig. 7a** und **7b** weiter zu erläutern, beziehen sich die folgenden Ausführungen zu den **Fig. 8a-c** auf die beispielhafte technische Analyse auf dem Gebiet von Halbleitervorrichtungen, zum Beispiel auf dem Gebiet von diskreten ESD-Schutzvorrichtungen bzw. TVS-Vorrichtungen, durch den Anmelder und die daraus resultierenden technischen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen.

**[0123]** Wie in **Fig. 7a** gezeigt ist, kann die Halbleitervorrichtung 100 mit den resultierenden Übergang-Stufenfaktoren  $m_1$ ,  $m_2$  des ersten 102 und zweiten Paares 104 von pn-Übergang-Strukturen mit einem großen Freiheitsgrad verwirklicht werden. Insbesondere kann eine pn-Übergang-Struktur mit großer Abstimmungs-freiheit der Durchbruchspannung mit einem Stufenfaktor  $m \geq 0,5$  als eine zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur verwirklicht und für die Halbleitervorrichtung 100 einiger Ausführungsbeispiele verwendet werden.

**[0124]** Bei den konventionellen Halbleitertechnologien ist es schwierig, hyper-abrupte Übergänge mit niedrigen Durchbruchspannungen unter 25 V oder sogar unter 16 V oder 12 V mit einem steuerbaren Stufenfaktor  $m \geq 0,5$  zu verwirklichen. Einige Ausführungsbeispiele verleihen die Halbleitervorrichtung 100 mit beiden gewünschten Eigenschaften, d.h. mit einer niedrigen Durchbruchspannung und einem einstellbaren Stufenfaktor von zumindest 0,5. Dies ist darauf zurückzuführen, dass herkömmlich verwendete Verfahrensschritte in der Halbleitertechnologie, wie z. B. Implantierung und Diffusion, Dotierungsstoffprofile ergeben, die in einem engen Bereich um den metallurgischen Übergang herum eine gewisse Stufung zeigen. Die Raumladungsregion, die das Kapazität/Spannung-Verhalten und die Durchbruchspannung eines pn-Übergangs bestimmt, erstreckt sich um den metallurgischen Übergang. Bei einer niedrigen Durchbruchspannung sind die Dotierungskonzentrationen hoch und die Ausdehnung der Raumladungsregion ist gering. Mit zunehmender Durchbruchspannung nimmt die Dotierungskonzentration an einer oder beiden Seiten des metallurgischen Übergangs ab und die Breite der Raumladungsregion nimmt zu. Aufgrund der unvermeidlichen Stufung in der Nähe des metallurgischen Übergangs sehen Übergänge mit niedriger Durchbruchspannung in der Praxis ein mehr oder weniger gestuftes Profil anstelle des gewünschten abrupten oder hyper-abrupten Dotierungsprofils. Daher ist die Kombination aus niedriger Durchbruchspannung und einem Stufenfaktor  $m \geq 0,5$  mit Halbleiterprozessen, die konventionell bei der Massenproduktion von Halbleitervorrichtungen und Schaltungen eingesetzt werden, schwer zu realisieren.

**[0125]** Zusammenfassend lässt sich sagen, dass höhere Dotierungspegel zu einer weniger ausgedehnten Raumladungsregion (= Verarmungsregion) und damit zu einer niedrig(er)en Durchbruchspannung  $V_{bd}$  führen. Darüber hinaus führt ein resultierendes linear gestuftes Übergang-Verhalten zu einem niedrig(er)en Stufenfaktor  $m$ .

**[0126]** Ein hoher bzw. höherer Stufenfaktor  $m \geq 0,5$  erfordert ein stärker (oder hyper-)abruptes Dotierungsprofil. Bei einem niedrigeren Dotierungspegel auf einer Seite eines metallurgischen Übergangs erstreckt sich die Verarmungsschicht weiter in diese schwächer dotierte Region. Daher ist die Verarmungsschicht nicht auf einen schmalen Bereich um den metallurgischen Übergang beschränkt, wie bei höheren Dotierungspegeln, bei denen das Dotierungsprofil in der Regel eine mehr oder weniger lineare Stufung aufweist. Da die Verarmungsregion sich im Falle eines niedrigeren Dotierungspegels über diese gestuften Region in der Nähe des metallurgischen Übergangs hinaus erstreckt, können die  $C(V)$ -Charakteristika einer schwächer dotierten Übergangs leichter an einen Stufenfaktor  $m \geq 0,5$  angepasst werden. Gleichzeitig führt ein niedrig(er)er Dotierungspegel zu einer höheren Durchbruchspannung  $V_{bd}$ .

**[0127]** Deshalb ist die Kombination aus niedriger Durchbruchspannung und einem Stufenfaktor  $m \geq 0,5$  mit der herkömmlichen Technologie schwer zu realisieren.

**[0128]** Um diese Einschränkung zu überwinden, führen die Ausführungsbeispiele, wie in **Fig. 7a** und **7b** gezeigt ist, ein Konzept ein, um einen Übergang (pn-Übergang-Struktur) mit beiden gewünschten Eigenschaften zu erhalten, d. h. eine vorbestimmte niedrige Durchbruchspannung von nicht mehr als 25 V und ein vorbestimmter Stufenfaktor über 0,5, indem der Übergang in zwei Flächen unterteilt wird, d. h. in partielle pn-Übergang-Strukturen, die zusammen eine zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur bilden:

(1) eine aktive Fläche mit einer höheren Wanne-Implantationsdosis, die zu einem Teil des pn-Übergangs  $J_{11}$ ,  $J_{21}$  mit einer niedrigen vorbestimmten Durchbruchspannung und einem Stufenfaktor  $m_{11} < 0,5$  führt, und

(2) eine andere aktive Fläche mit einer niedrigeren Wanne-Implantationsdosis, die zu einem Teil des pn-Übergangs  $J_{12}$ ,  $J_{22}$  mit einer Durchbruchspannung, die höher als die vorbestimmte ist, und einem Stufenfaktor  $m_{12} > 0,5$  führt.

**[0129]** Das Gesamtverhalten dieses zusammengesetzten pn-Übergangs 102-1 bzw. 102-2 zeigt eine Durchbruchspannung, die durch die höhere Wanne-Dotierung bestimmt wird, und der Stufenfaktor der Kapazität-/Spannung-Charakteristika wird durch die Parallelschaltung in den beiden Zweigen der ersten und zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$ ,  $J_{12}$  bzw.  $J_{21}$ ,  $J_{22}$  bestimmt.

**[0130]** Durch Einstellen (1) der Stufenfaktoren  $m_{11}$ ,  $m_{12}$  in den zwei Regionen der ersten und zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$ ,  $J_{12}$  und  $J_{21}$ ,  $J_{22}$  (durch Wanne-Implantationsdosis und Energie sowie durch weitere Diffusionsschritte) und durch Einstellen (2) des Flächenverhältnisses der zwei Regionen der ersten und zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$ ,  $J_{12}$  und  $J_{21}$ ,  $J_{22}$  mit unterschiedlicher Wannenimplantierung kann der resultierende effektive Stufenfaktor  $m_1$  der resultierenden zusammengesetzten Übergangsstruktur 102-1, 102-2 auf einen Zielwert eingestellt werden, der in der Nähe des Werts ist, der eine minimierte Dritte-Harmonische(H3)-Erzeugung ergibt. Bei einigen Ausführungsbeispielen kann für das Paar 102 der zusammengesetzten Übergänge 102-1 und 102-2 eine Null-Vorspannung-Kapazität ( $C_{J0}$ ) von  $J_{11}$  und  $J_{21}$  (sowie von  $J_{12}$  bzw.  $J_{22}$ .) dahingehend angeordnet sein, gleich zu sein, aus der Perspektive eines Bildens einer symmetrischen Vorrichtung 100 zum Unterdrücken ferner der Erzeugung von geradzahigen (z. B. zweiten) Harmonischen. Ähnliche Überlegungen gelten für die Übergang-Spannung-Potentiale ( $V_{J0}$ ) der partiellen pn-Übergang-Strukturen  $J_{11}$  und  $J_{21}$  (sowie  $J_{12}$  bzw.  $J_{22}$ ) sowie für die Flächenverhältnisse der partiellen pn-Übergang-Strukturen in jeder der zusammengesetzten Strukturen 102-1 und 102-2, die das Paar 102 von zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen bilden. Bei dem oben beschriebenen Konzept wird ein Paar von zusammengesetzten pn-Übergängen 102-1 und 102-2 verwirklicht, bei dem die Durchbruchspannung und der Netto-Stufenfaktor in einem wesentlich größeren Parameterbereich durch Technologie und physisches Design oder Layoutanpassungen gesteuert werden können.

**[0131]** **Fig. 8a** zeigt eine schematische simulierte Darstellung des resultierenden Übergang-Stufenfaktors  $m_1$  in Abhängigkeit von der Dotierungskonzentration, basierend auf unterschiedlichen Implantationsdosen. Genauer gesagt, sind die simulierten Kapazität/Spannung-Charakteristika des pn-Übergangs zwischen einer flachen Kontaktregion mit hoher n-Dotierung und der p-dotierten Wanne-Region in **Fig. 8a** für die Dotierungsprofile gezeigt, die in **Fig. 5b** (weiter oben ausführlicher beschrieben) für die Halbleiterregion 120-4 gezeigt werden, die Regionen 120-7 und 120-5 aufweist (vgl. zum Beispiel **Fig. 5a**), wobei gleiche Zahlen (36-42) entsprechende Dotierungsprofile bezeichnen. Aus dieser Figur ist ersichtlich, dass mit niedrigen Implantationsdosen für die p-Wanne hyper-abrupte Übergänge mit  $m > 0,5$  erhalten werden können.

**[0132]** **Fig. 8b** zeigt eine schematische simulierte Darstellung der resultierenden Durchbruchspannung in Abhängigkeit von der Dotierungskonzentration, basierend auf unterschiedlichen Implantationsdosen und Dotierungsprofilen, wie durch dieselben Zahlen wie in **Fig. 8a** und **5b** angegeben ist. Jedoch tendiert, wie oben erläutert wird, die Durchbruchspannung des Übergangs mit den niedrigsten p-Wanne-Dosen und höchsten Stufenfaktoren dazu, hohe Durchbruchspannungen aufzuweisen, wie in **Fig. 8b** gezeigt ist. Im Falle dieses Simulationsbeispiels wird gezeigt, dass, falls für eine minimale Dritte-Harmonische-Erzeugung ein Stufenfaktor zwischen 0,5 und 0,6 erforderlich ist, der Übergang eine Durchbruchspannung von 40 V oder höher aufweisen würde, ohne Verwendung einer zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur, wie oben erläutert wird.

**[0133]** **Fig. 8c** zeigt den resultierenden kombinierten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 (oder 102-2) in Abhängigkeit von dem Flächenverhältnis zwischen den aktiven Flächen der ersten und zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$  und  $J_{12}$  (oder  $J_{21}$  und  $J_{22}$ ) der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 (102-2), basierend auf zwei eingestellten partiellen Übergang-Stufenfaktoren  $m_{11}$  (von  $J_{11}$  oder  $J_{21}$ ) und  $m_{12}$  (von  $J_{12}$  oder  $J_{22}$ ). Die Dotierungsprofile der ersten und zweiten

partiellen pn-Übergang-Struktur entsprechen in diesem Fall den Zahlen 37 und 41, die in **Fig. 5b** gezeigt sind (siehe auch entsprechende Zahlen in **Fig. 8a** und **8b**). Wie oben erörtert wird, tendiert die Durchbruchspannung des Übergangs mit den niedrigsten p-Wanne-Dosen und höchsten Stufenfaktoren dazu, hohe Durchbruchspannungen aufzuweisen, wie in **Fig. 8b** gezeigt ist. Der relative Flächenbeitrag kann leicht durch das physische Design (Layout) der Vorrichtung gesteuert werden.

**[0134]** Allgemeiner gesagt, kann der oben beschriebene zusammengesetzte Übergang 102-1 als 120-i beschrieben werden, der als die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ platziert ist. Deshalb ist gemäß einem Ausführungsbeispiel die erste partielle pn-Übergang-Struktur dahingehend angeordnet, einen ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{i1} > 0,5$  aufzuweisen, und wobei die zweite partielle pn-Übergang-Struktur dahingehend angeordnet ist, einen zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{i2} < m_{i1}$  aufzuweisen, zum Beispiel kann  $m_{i1}$  zwischen 0,30 und 0,5 betragen.

**[0135]** Gemäß einem Ausführungsbeispiel sind die erste und zweite partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$ ,  $J_{21}$ , und  $J_{12}$ ,  $J_{22}$  in einem Halbleitersubstrat angeordnet, wobei die Kombination proportional von einem Flächenverhältnis zwischen einer aktiven Fläche parallel zu einer ersten Hauptoberfläche des Halbleitersubstrats der ersten und zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$  und  $J_{12}$  der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 sowie  $J_{21}$  und  $J_{22}$  der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-2 abhängt. Gemäß einem Ausführungsbeispiel können die erste und zweite partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$ ,  $J_{12}$  der ersten zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 und die erste und zweite partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{21}$ ,  $J_{22}$  der zweiten zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-2 zusammen in einer lateral isolierten gemeinsamen Region des Halbleitersubstrats angeordnet sein. Gemäß einem Ausführungsbeispiel erstrecken sich die erste und zweite partielle pn-Übergang-Struktur in einer Tiefenrichtung bezüglich einer ersten Hauptoberfläche des Halbleitersubstrats vertikal in das Halbleitersubstrat.

**[0136]** **Fig. 9a** und **9d** zeigen schematische Querschnittsansichten von weiteren beispielhaften Implementierungen der Halbleitervorrichtung 100, die ein Paar von zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen aufweist. **Fig. 9b** zeigt eine schematische simulierte Darstellung der unterschiedlichen beispielhaften Dotierungsprofile, die ebenfalls in **Fig. 5b** gezeigt sind und nun für die Halbleitervorrichtung von **Fig. 9a** verwendet werden. **Fig. 9c** zeigt eine schematische Draufsicht durch die Halbleitervorrichtung von **Fig. 9a** in der Ebene durch die pn-Übergang-Strukturen vom zusammengesetzten Typ, die zum Beispiel die „aktiven“ Flächen der ersten und zweiten partiellen Anodenregion 120-5, 120-6 der zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen  $J_1$  und  $J_2$  zeigen.

**[0137]** In den Figuren und der Anmeldung werden identische Elemente und Elemente mit derselben Funktionalität und/oder demselben technischen oder physikalischen Effekt mit denselben Bezugszeichen versehen oder mit demselben Namen gekennzeichnet. So richtet sich in der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele der Halbleitervorrichtung 100 in den **Fig. 9a** und **9d** ein Schwerpunkt auf die jeweiligen Unterschiede und Anpassungen zwischen den unterschiedlichen Implementierungen der Halbleitervorrichtung 100 im Vergleich zum Beispiel zu den Ausführungsbeispielen der Halbleitervorrichtung 100 in den **Fig. 5a-b** und **6a-b**.

**[0138]** Die **Fig. 9a** und **9d** zeigen unterschiedliche Querschnittsansichten der Halbleitervorrichtung 100, die zum Beispiel die zwei Paare von anti-seriell geschalteten pn-Übergang-Strukturen  $J_1$ ,  $J_2$  (= erstes Paar 102) und  $J_3$ ,  $J_4$  (= zweites Paar 104) gemäß einem Ausführungsbeispiel aufweist, wobei das erste Paar 102 die zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen 102-1, 102-2 aufweist und wobei das zweite Paar 104 die pn-Übergang-Strukturen  $J_3$ ,  $J_4$  aufweist (siehe zum Beispiel **Fig. 7a**), um beispielsweise ein erwünschtes TVS-Verhalten (TVS = transient voltage suppressor, Überspannungsbegrenzer) der Halbleitervorrichtung 100 bezüglich einer Durchbruchspannung und Übergang-Stufenfaktoren derselben einzustellen und zu erhalten.

**[0139]** Die erste zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102-1 weist die erste partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$  mit dem ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$  und die zweite partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{12}$  mit dem zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{12}$  auf. Die zweite zusammengesetzte pn-Übergangsstruktur 102-2 weist die dritte partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{21}$  (im Wesentlichen die gleiche Struktur wie  $J_{11}$ , auch in Bezug auf die Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J0}$  und das Übergang-Potential  $V_{J0}$ ), die ebenfalls den partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$  aufweist, und die partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{22}$  auf (im Wesentlichen die gleiche Struktur wie  $J_{12}$ , auch in Bezug auf die Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J0}$  und das Übergang-Potential  $V_{J0}$ ), die den partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{12}$  aufweist. Der resultierende Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  der ersten und zweiten zusammengesetzten pn-Übergangsstruktur 102-1, 102-2 basiert auf einer Kombination des ersten und zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktors  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ .

**[0140]** Wie in **Fig. 9a** gezeigt ist, kann die erste zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102-1 unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Implantierungsflächen 120-5, 120-6 in der Substratregion 122 implementiert werden. Somit ist die n-Typ-Kontaktregion 120-7 in der Substratregion 122 in die benachbarten Implantierungsflächen 120-5, 120-6 eingebettet. Die zweite zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102-2 kann unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Implantierungsflächen 120-5, 120-6 in der Substratregion 124 implementiert werden. Somit ist die weitere n-Typ-Kontaktregion 120-7 in der Substratregion 124 in die weiteren benachbarten Implantierungsflächen 120-5, 120-6 eingebettet.

**[0141]** Wie in **Fig. 9a** gezeigt ist, können die partiellen pn-Übergang-Strukturen  $J_{11}$ ,  $J_{12}$  in der Halbleiterfläche 122 des Halbleitersubstrats 120 (als angrenzende partielle pn-Übergang-Strukturen  $J_{11}$ ,  $J_{12}$ ) angeordnet sein, wobei die partiellen pn-Übergang-Strukturen  $J_{21}$ ,  $J_{22}$  in der weiteren Halbleiterfläche 124 des Halbleitersubstrats 120 (als angrenzende partielle pn-Übergang-Strukturen  $J_{21}$ ,  $J_{22}$ ) angeordnet sein können. Die getrennten Flächen 122, 124 können mittels so genannter tiefer Isoliergräben 130 erzielt werden, die die Halbleiterregionen 122, 124 lateral begrenzen und/oder lateral umgeben. Darüber hinaus bilden die vergrabene p-Typ-Schicht 120-3 (= Anodenregion) und das niederohmige n-Typ-Substrat 121 (= Kathodenregion) die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ  $J_3$  bzw.  $J_4$  in den getrennten Halbleiterregionen 122, 124 des Halbleitersubstrats 120.

**[0142]** **Fig. 9b** zeigt eine schematische simulierte Darstellung von unterschiedlichen beispielhaften Dotierungsprofilen für die Halbleitervorrichtung 100 von **Fig. 9a**. Die unterschiedlichen Dotierungskonzentrationen der Implantierungsflächen 120-5, 120-6 in der p-Typ-Schicht 120-4 können unter Verwendung unterschiedlicher Implantierungsdosen erzielt werden, was in **Fig. 9b** mit „36“ bis „42“ angegeben sind. Die Darstellung enthält außerdem eine Angabe der ungefähren Erstreckungen der unterschiedlichen Schichten und/oder Regionen des Halbleitersubstrats 120. Wie in **Fig. 9a** gezeigt ist, weist die erste zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102-1 mit der ersten und zweiten partiellen pn-Übergang-(Dioden-)Struktur  $J_{11}$ ,  $J_{12}$  zwei p-Typ-Wanne-Regionen 120-5, 120-6 auf. Ein Dotierungskonzentrationsprofil der p-Wanne 120-5 (A) führt beispielsweise zu dem ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$ . Ein Dotierungskonzentrationsprofil der p-Wanne 120-6 (B), das niedriger als die Dotierungskonzentration der p-Wanne 120-5 (A) sein kann, führt zu dem zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{12}$ , z. B. mit  $m_{12} > m_{11}$ . Basierend auf dem ersten und zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{11}$ ,  $m_{12}$  kann ein effektiver Netto-Stufenfaktor  $m_1$  des zusammengesetzten Übergangs 102-1 erzielt werden.

**[0143]** Da höhere Dotierungspegel zu einer weniger ausgedehnten Raumladungsregion (= Verarmungsregion) und damit zu einer niedrig(er)en Durchbruchspannung  $V_{bd}$  führen, führt ein resultierendes stärker linear gestuftes Übergang-Verhalten zu einem niedrig(er)en Stufenfaktor  $m$ . Ein hoher bzw. höherer Stufenfaktor  $m$  erfordert ein stärker (oder hyper-) abruptes Dotierungsprofil. Jedoch bestehen praktische Schwierigkeiten beim Erzeugen von „idealen“ abrupten Profilen. Deshalb kann zum Bilden einer pn-Übergang-Struktur mit einem Stufenfaktor  $m \geq 0,50$  eine breit(er)e Raumladungsregion mit einem niedrig(er)en Dotierungspegel erforderlich sein. Ein niedrig(er)er Dotierungspegel führt zu einer hohen bzw. höheren Durchbruchspannung  $V_{bd}$ .

**[0144]** Die obigen Auswertungen bezüglich der schematischen simulierten Darstellung von unterschiedlichen beispielhaften Dotierungsprofilen sind entsprechend auf die zweite zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102-2 des ersten Paares von pn-Übergang-Strukturen 102 und den resultierenden effektiven Netto-Stufenfaktor  $m_1$  anwendbar.

**[0145]** **Fig. 9c** zeigt eine schematische Draufsicht eines möglichen Layouts der Halbleitervorrichtung 100 von **Fig. 9a**, die die Erweiterung der „aktiven“ Flächen der ersten partiellen Anodenregion 120-5 (mit der höheren p-Wanne-Dotierung-Implantierung) und der zweiten partiellen Anodenregion 120-6 (mit der niedrigeren p-Wanne-Dotierung-Implantierung) der pn-Übergang-Struktur vom zusammengesetzten Typ 102-1 und 102-2 zeigt. Das beispielhafte Flächenverhältnis beträgt ungefähr 40 % der ersten partiellen Anodenregion 120-5 und 60 % der zweiten partiellen Anodenregion 120-6.

**[0146]** Durch Optimieren des Layouts kann das Verhältnis der Flächen, die durch die niedrigere und höhere Dotierungsstoffkonzentration der p-Wanne-Regionen 120-6, 120-5 definiert sind, angepasst werden, um den (optimalen) Zielwert des Übergang-Stufenfaktor  $m_1 > 0,5$ , z. B.  $m_1 \sim 0,55$  zu erzielen, während eine Durchbruchspannung von nicht mehr als 25 V beibehalten wird.

**[0147]** Wie in **Fig. 9d** gezeigt ist, kann das erste Paar von partiellen pn-Übergang-Strukturen  $J_{11}$ ,  $J_{12}$  in der Halbleiterfläche 122 des Halbleitersubstrats 120 angeordnet sein, wobei das zweite Paar von partiellen pn-

Übergang-Strukturen  $J_{21}$ ,  $J_{22}$  in der weiteren Halbleiterfläche 124 des Halbleitersubstrats 120 angeordnet sein kann. Die getrennten Flächen 122, 124 können mittels so genannter tiefer Isoliergräben 130 erzielt werden, die die Halbleiterregionen 122, 124 lateral begrenzen und/oder lateral umgeben.

**[0148]** Wie in Fig. 9d gezeigt ist, ist eine p-Typ-Wanne-Region 120-5 (p-Wanne 120-5) in der zweiten epitaktischen p-Typ-Schicht 120-4 in den Halbleiterregionen 122 und 124 angeordnet, wobei die p-Typ-Wanne 120-5 die hochdotierten n-Typ-Kontaktregionen 120-7 in der p-Typ-Schicht 120-4 des Halbleitersubstrats 120 lediglich teilweise umgibt. Somit bilden in der Halbleiterregion 122 die hochdotierten n-Typ-Kontaktregionen 120-7 und die zweite epitaktische p-Typ-Schicht 120-4 die erste partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$ , wobei die p-Typ-Wanne-Region 120-5 und hochdotierte n-Typ-Kontaktregion 120-7 die zweite partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{12}$  bilden (als angrenzende partielle pn-Übergang-Strukturen  $J_{11}$ ,  $J_{12}$ ). Dementsprechend bilden in der Halbleiterregion 124 die hochdotierten n-Typ-Kontaktregionen 120-7 und die zweite epitaktische p-Typ-Schicht 120-4 die dritte partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{21}$ , wobei die p-Typ-Wanne-Region 120-5 und die hochdotierten n-Typ-Kontaktregion 120-7 die vierte partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{22}$  bilden (als angrenzende partielle pn-Übergang-Strukturen  $J_{21}$ ,  $J_{22}$ ). Somit weisen die erste und dritte partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{12}$ ,  $J_{21}$  zum Beispiel keine p-Typ-Wanne-Region auf. Wie oben erwähnt ist, kann die Schicht 120-4 auch durch eine i-Typ-Schicht (d. h. intrinsische und nicht beabsichtigt dotierte Schicht) verwirklicht werden.

**[0149]** Alternativ kann ein Dotierungsprofil in der Schicht 120-4 dahingehend eingestellt werden, einen vorbestimmten Stufenfaktor  $m_{12}$  in einer partiellen pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$  bzw.  $J_{12}$  zu erhalten, indem der Dotierungspegel während des epitaktischen Wachstums der Schicht 120-4 stufenweise eingestellt wird. Mit anderen Worten kann ein hyper-abruptes Übergang-Verhalten in partiellen pn-Übergängen  $J_{11}$  und  $J_{12}$  verwirklicht werden, indem eine Tiefenabhängigkeit des Dotierungspegels in der epitaktischen Schicht erzeugt wird, mittels Steuerung des Gasstroms von Dotierungsstoffquellgas während des epitaktischen Schichtwachstums

**[0150]** Darüber hinaus bilden die vergrabene p-Typ-Schicht 120-3 (= Anodenregion) und das n-Typ-Substrat 121 (= Kathodenregion) die pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ  $J_3$  bzw.  $J_4$  in den getrennten Halbleiterregionen 122, 124 des Halbleitersubstrats 120.

**[0151]** Die p-Typ-Wanne-Region 120-5 (p-Wanne 120-5) kann in der zweiten epitaktischen p-Typ-Schicht 120-4 angeordnet werden, indem das erforderliche Dotierungsprofil in der p-Typ-Halbleiterschicht 120-4 gebildet wird, zum Beispiel während eines epitaktischen Wachstums oder unter Durchführung eines Implantierungsschritts.

**[0152]** Fig. 9e zeigt eine Konfiguration einer zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 gemäß einem anderen Ausführungsbeispiel. Die zusammengesetzte pn-Übergang-Struktur 102-1 weist einen pn-Übergang zwischen einer n+-Region 120-7 und einer p-Wanne-Region 120-5 und eine andere angrenzende spannungsabhängige Kapazität auf, die bei diesem Ausführungsbeispiel durch eine Inversionsladungsschicht 120-8 an einer Schnittstelle 135 zwischen einer Oxidschicht und einer Bulk- oder Epi-Schicht 120-4 aus Halbleitermaterial gebildet sein kann. Das Bulk-Halbleitermaterial oder die Epi-Schicht 120-4 kann beispielsweise p-dotiert oder intrinsisch (d. h. nicht absichtlich dotiert) sein. Eine Elektrode (der Kathode entsprechend) dieser spannungsabhängigen Kapazität wird durch die Inversionsladungsschicht 120-8 gebildet, die durch das Vorhandensein von festen Oxidladungen 136 an oder in der Nähe der Halbleiter/Oxid-Schnittstelle 135 bewirkt wird. Direkt angrenzend an die Inversionsladungsschicht 120-8 ist das Volumen des Halbleitermaterials bezüglich mobiler Ladungen aufgebraucht, wie durch die Verarmungsregion 120-9 in Fig. 9e angegeben ist, und das nicht aufgebrauchte Halbleitermaterial unterhalb der verarmten Zone bildet die andere Elektrode (der Anode entsprechend) der spannungsabhängigen Kapazität. Die Verarmungszone ist in Fig. 9e durch gestrichelte Linien 137 dargestellt, die die Grenzen der Verarmungsschicht schematisch darstellen.

**[0153]** Bei einigen Ausführungsbeispielen ist das Dotierungsprofil der p-Wanne 120-5 nahe den Kanten und den Halbleiter/Oxid-Schnittstellen 135 so eingestellt, dass auch in dieser Region eine Inversionsladungsschicht 120-8 vorliegt und eine elektrische Verbindung zwischen der n+-Region 120-7 und der umgebenden Inversionsladungsschicht 120-8 eingerichtet ist.

**[0154]** Die Charakteristika der spannungsabhängigen Kapazität, die aufgrund der Elektronen-Inversionsladungsschicht 120-8 gebildet wird, können gemäß der obigen Formel (A1) gebildet werden, die einen Stufenfaktor, eine Null-Vorspannung-Kapazität und ein Übergang-Potential auch für diese Art von spannungsabhängiger Kapazität definiert. In dieser Hinsicht wird die spannungsabhängige Kapazität, die aufgrund des Vorhandenseins der Inversionsladungsschicht 120-8 gebildet wird, wie oben beschrieben ist, auch als eine

partielle pn-Übergang-Struktur  $J_{11}$ ,  $J_{12}$  /  $J_{21}$ ,  $J_{22}$  im Kontext der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1, 102-2 betrachtet.

**[0155]** Der effektive Stufenfaktor der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur 102-1 gemäß diesem Ausführungsbeispiel ist eine Kombination des Stufenfaktors des pn-Übergangs und des Stufenfaktors der spannungsabhängigen Kapazität, die aufgrund des Vorhandenseins der Elektronen-Inversionsladungsschicht 120-8 gebildet wird. Der relative Beitrag beider Stufenfaktoren kann durch (1) die Dotierungsprofile der jeweiligen Regionen, die den pn-Übergang und die spannungsabhängige Kapazität 120-8 definieren, und (2) die relativen Flächen des pn-Übergangs und der spannungsabhängigen Kapazität 120-8 eingestellt werden.

**[0156]** Die spannungsabhängige Kapazität 120-8 kann von einer Kanal-Stopp-Region 120-10 umgeben sein, wodurch verhindert wird, dass Regionen außerhalb der beabsichtigten Region, in der die spannungsabhängige Kapazität 120-8 gebildet wird, zu der spannungsabhängigen Kapazität beitragen.

**[0157]** Die Durchbruchspannung  $V_{bd}$  einer derartigen Struktur wird durch die pn-Übergang-Struktur zwischen der n+-Region und der p-Wanne-Region bestimmt.

**[0158]** Fig. 9f zeigt ein noch weiteres Ausführungsbeispiel der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur. Die spannungsabhängige Kapazität des Ausführungsbeispiels, das in Fig. 9e gezeigt ist, wird in Fig. 9f durch eine Inversionsschicht 120-8<sub>v</sub>, die auf den vertikalen Seitenwänden einer tiefen Isoliergraben-Struktur 130 gebildet ist, weiter erweitert. Die anderen Besonderheiten sind denen, die bezüglich Fig. 9e beschrieben werden, ähnlich und werden hier nicht wiederholt.

**[0159]** Als Teil der vorliegenden Offenbarung ist außerdem ein Verfahren zur Herstellung einer Halbleitervorrichtung beschrieben, die zumindest ein erstes Paar von pn-Übergang-Strukturen eines ersten Typs und ein zweites Paar von pn-Übergang-Strukturen eines zweiten Typs aufweist. Das Verfahren kann einen Designschritt eines Bestimmens eines ersten Stufenfaktors für die pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ und eines zweiten Stufenfaktors der pn-Übergang-Struktur vom zweiten Typ aufweisen, wobei der erste Stufenfaktor sich von dem zweiten Stufenfaktor unterscheidet und wobei der erste Stufenfaktor kleiner als 0,50 und der zweite Stufenfaktor größer als 0,50 ist, wobei die Stufenfaktoren dahingehend bestimmt werden, eine Erzeugung von störenden dritten Harmonischen durch die Halbleitervorrichtung zu unterdrücken.

**[0160]** Beispiele der vorliegenden Offenbarung können eine Halbleitervorrichtung bereitstellen, die folgende Merkmale aufweist:

„n“ Paare von pn-Übergang-Strukturen, wobei n eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ anti-seriell geschaltet sind,

wobei die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ dahingehend angeordnet ist, einen i-ten Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  aufzuweisen,

wobei zumindest ein erstes Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_1 < 0,50$ , und ein zweites Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0,00, 0,50\}$ , und

wobei die Übergang-Stufenfaktoren  $m_1$ ,  $m_2$  des ersten und zweiten Paares der n Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend eingestellt sind, zu einer Erzeugung eines Störende-Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung mit einem Signalleistungspegel (PH3) zu führen, der zumindest 10dB niedriger als ein Referenz-Signalleistungspegel (PH3) des Störende-Dritte-Harmonische-Signals ist, der für einen Referenzfall erhalten wird, bei dem der erste und zweite Übergang-Stufenfaktor  $m_1$ ,  $m_2$  0,25 sind.

**[0161]** Gemäß einem Beispiel erfüllen der erste bis n-te Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 0,05$  die folgende Ellipsengleichung:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{m_i - 0,25}{a_1} \right)^2 = 1, \text{ mit } \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{a_1} \right)^2 = 16,$$

wobei die Parameter  $a_i$  basierend auf einer Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J0i}$  und einem Übergang-Spannungspotential  $V_{Ji}$  der pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ bestimmt werden.

**[0162]** Weitere Beispiele können eine Halbleitervorrichtung bereitstellen, die folgende Merkmale aufweist:

„n“ Paare von pn-Übergang-Strukturen, wobei  $n$  eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergang-Strukturen vom i-ten Typ anti-seriell geschaltet sind,

wobei die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ dahingehend angeordnet ist, einen i-ten Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  aufzuweisen,

wobei der erste bis n-te Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 0,05$  die folgende Ellipsengleichung erfüllen:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{m_i - 0,25}{a_i} \right)^2 = 1, \text{ mit } \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{a_i} \right)^2 = 16,$$

wobei zumindest ein erstes Paar der  $n$  Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_1 < 0,50$ , und ein zweites Paar der  $n$  Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet ist, einen zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$ , aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0, 00, 0,50\}$ , wobei die Parameter  $a_i$  basierend auf einer Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J0i}$  und einem Übergang-Spannungspotential  $V_{Ji}$  der pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ bestimmt werden.

**[0163]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel ist das erste Paar der  $n$  Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet, den ersten Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \leq 0,48$ .

**[0164]** Erfindungsgemäß ist das zweite Paar der  $n$  Paare von pn-Übergang-Strukturen dahingehend angeordnet, den zweiten Übergang-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 > 0,50$ .

**[0165]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel wird jeder des ersten bis n-ten Parameters „ $a_1$  bis  $a_n$ “ basierend auf den Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J0,1}$ - $C_{J0,n}$  und auf den  $n$  Übergang-Spannungspotentialen  $V_{J1}$ - $V_{Jn}$  der  $n$  Paare von pn-Übergang-Strukturen bestimmt.

**[0166]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel erfüllen der erste bis n-te Parameter „ $a_1$  bis  $a_n$ “ die folgende Gleichung:

$$a_i = \frac{1}{4} \sqrt{\left( \frac{C_{J0,i}}{C_{J0,j}} \right)^3 \left( \frac{V_{Ji}}{V_{Jj}} \right)^2}.$$

**[0167]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel sind die Werte für den ersten bis „n-ten“ Übergang-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  dahingehend eingestellt, dass dieselben zu einem Dritte-Ordnung-Schnittpunkt IP3 von zumindest 50dBm führen.

**[0168]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel sind für  $n = 2$  die pn-Übergang-Strukturen des ersten und zweiten Typs dahingehend angeordnet, ein Verhältnis der Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J0,1}$ ,  $C_{J0,2}$  aufzuweisen, das die folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{1}{4} < \frac{C_{J0,1}}{C_{J0,2}} < 4.$$

**[0169]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel bildet die pn-Übergang-Struktur vom i-ten Typ eine Diodenstruktur vom i-ten Typ mit einer Anodenregion und einer Kathodenregion.

**[0170]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel kann die Halbleitervorrichtung ferner einen ersten Verbindungsanschluss und einen zweiten Verbindungsanschluss aufweisen, wobei die „n“ Paare von pn-Übergang-Strukturen zwischen den ersten und zweiten Anschluss geschaltet sind.

- [0171]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel sind die „n“ Paare von pn-Übergang-Strukturen in einer gestapelten Konfiguration in einem Halbleitersubstrat angeordnet.
- [0172]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel erstrecken sich unterschiedlich dotierte Halbleiterregionen der pn-Übergang-Strukturen bezüglich einer Hauptoberflächenregion des Halbleitersubstrats vertikal in das Halbleitersubstrat, und wobei der Hauptabschnitt der Fläche des metallurgischen pn-Übergangs ein planarer pn-Übergang ist, der sich parallel zu einer Hauptoberflächenregion des Halbleitersubstrats erstreckt.
- [0173]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel sind die zwei pn-Übergang-Strukturen des i-ten Paares zusammen in einer gestapelten Konfiguration in dem Halbleitersubstrat angeordnet.
- [0174]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel ist eine der zwei pn-Übergang-Strukturen eines ersten Paares der n Paare von pn-Übergang-Strukturen in dem Halbleitersubstrat in einer gestapelten Konfiguration mit einer der zwei pn-Übergang-Strukturen eines zweiten Paares der n Paare von pn-Übergang-Strukturen angeordnet.
- [0175]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel weist die gestapelte Konfiguration eine npn-Struktur mit einer floatenden Basisregion in dem Halbleitersubstrat auf.
- [0176]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel ist zumindest ein Paar der n Paare von pn-Übergang-Strukturen als ein Paar von zwei zusammengesetzten pn-Übergang-Strukturen angeordnet, von denen jede eine erste partielle pn-Übergang-Struktur und eine zweite partielle pn-Übergang-Struktur aufweist, wobei die erste partielle pn-Übergang-Struktur einen ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{i1}$  aufweist und wobei die zweite partielle pn-Übergang-Struktur einen zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{i2}$  aufweist, der von dem ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{i1}$  verschieden ist, wobei der Übergang-Stufenfaktor  $m_i$  der zusammengesetzten pn-Übergang-Struktur auf einer Kombination des ersten und zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktors  $m_{i1}$ ,  $m_{i2}$  basiert.
- [0177]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel sind die erste und zweite partielle pn-Übergang-Struktur in einem Halbleitersubstrat angeordnet, wobei die Kombination proportional von einem Flächenverhältnis zwischen einer aktiven Fläche parallel zu einer ersten Hauptoberflächenfläche des Halbleitersubstrats der ersten und zweiten partiellen pn-Übergang-Struktur abhängt.
- [0178]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel sind die erste und zweite partielle pn-Übergang-Struktur der pn-Übergang-Struktur vom ersten Typ und die erste und zweite partielle pn-Übergang-Struktur der pn-Übergang-Struktur vom zweiten Typ zusammen in einer lateral isolierten gemeinsamen Region des Halbleitersubstrats angeordnet.
- [0179]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel ist die erste partielle pn-Übergang-Struktur dahingehend angeordnet, einen ersten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{i1} > 0,50$  aufzuweisen, und wobei die zweite partielle pn-Übergang-Struktur dahingehend angeordnet ist, einen zweiten partiellen Übergang-Stufenfaktor  $m_{i2}$  zwischen 0.30 und 0,5 aufzuweisen.
- [0180]** Gemäß einem beispielhaften Ausführungsbeispiel erstrecken sich die erste und zweite partielle pn-Übergang-Struktur in einer Tiefenrichtung bezüglich einer ersten Hauptoberflächenfläche des Halbleitersubstrats vertikal in das Halbleitersubstrat.
- [0181]** Obwohl manche Aspekte im Zusammenhang mit einer Vorrichtung beschrieben wurden, versteht es sich, dass eine derartige Beschreibung auch als eine Beschreibung entsprechender Merkmale eines Verfahrens betrachtet werden kann. Obwohl manche Aspekte als Merkmale im Zusammenhang eines Verfahrens beschrieben wurden, versteht es sich, dass eine derartige Beschreibung auch als eine Beschreibung entsprechender Merkmale bezüglich der Funktionalität einer Vorrichtung betrachtet werden kann.
- [0182]** In der vorstehenden ausführlichen Beschreibung ist ersichtlich, dass verschiedene Merkmale zur Vereinfachung der Offenbarung in Beispielen zusammengefasst sind. Diese Art der Offenbarung ist nicht so zu interpretieren, dass sie die Absicht widerspiegelt, dass die beanspruchten Beispiele mehr Merkmale erfordern, als in jedem Anspruch ausdrücklich erwähnt werden. Vielmehr kann der erfinderische Gegenstand, wie die folgenden Ansprüche zeigen, in weniger als allen Merkmalen eines einzelnen offenbarten Beispiels liegen. Daher werden hiermit die folgenden Ansprüche in die ausführliche Beschreibung aufgenommen, wobei

jeder Anspruch für sich allein als separates Beispiel stehen kann. Während jeder Anspruch als separates Beispiel für sich allein stehen kann, ist zu beachten, dass sich zwar ein abhängiger Anspruch in den Ansprüchen auf eine bestimmte Kombination mit einem oder mehreren anderen Ansprüchen beziehen kann, andere Beispiele aber auch eine Kombination des abhängigen Anspruchs mit dem Gegenstand jedes anderen abhängigen Anspruchs oder eine Kombination jedes Merkmals mit anderen abhängigen oder unabhängigen Ansprüchen beinhalten können. Solche Kombinationen werden hierin vorgeschlagen, es sei denn, es wird angegeben, dass eine bestimmte Kombination nicht beabsichtigt ist.

## Liste der Bezugszeichen

32 - 42	unterschiedliche Implantierungsdosen
100	Halbleitervorrichtung
102	erste Paare der pn-Übergang-Strukturen
102-1, 102-2	erste, zweite Parallelschaltung / zusammengesetzte pn-Übergang-Strukturen
104	zweites Paar der pn-Übergang-Strukturen
106	drittes Paar der pn-Übergang-Strukturen
107	erster Anschluss
108	zweiter Anschluss
110	Zwischenverbindungen
120	Halbleitersubstrat
120a, 120b	erster, zweiter Hauptoberflächenabschnitt
120-1	n-Typ-Substrat
120-2	p-Typ-Halbleiterschicht
120-3	vergrabene p-Typ-Halbleiterschicht
120-4	p-Typ-Halbleiterschicht
120-5	p-Typ-Wanne-Region
120-6	p-Typ-Wanne-Region
120-7	n-Typ-Kontaktregion
120-8	Inversionsladungsschicht
120-9	Verarmungsregion
120-10	Kanal-Stopp-Region
122	getrennte Halbleiterregion
124	getrennte Halbleiterregion
130	tiefe Isoliergräben
132	Halbleiterfüller
134	Liner-Oxid
135	Halbleiter/Oxid-Schnittstelle
136	fest Oxidladungen
137	Grenzen der Verarmungszone
$a_1, a_2$	Formparameter (= Radien $r_1, r_2$ ) der Ellipse
(A), (B)	höhere, schwächere p-Wanne-Dotierungskonzentration
$C_{J01}, C_{J02}$	erste, zweite Null-Vorspannung-Kapazitäten
$C_{J011}, C_{J012}$	erste, zweite partielle Null-Vorspannung-Kapazitäten
J1, J2	pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ

J3, J4	pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ
J <sub>11</sub> , J <sub>21</sub>	partielle pn-Übergang-Strukturen vom ersten Typ
J <sub>12</sub> , J <sub>22</sub>	partielle pn-Übergang-Strukturen vom zweiten Typ
m <sub>1</sub> , m <sub>2</sub>	erster, zweiter Übergang-Stufenfaktor
m <sub>11</sub> , m <sub>12</sub>	partieller Übergang-Stufenfaktor
S1, S2	erste, zweite Serienschaltung
V <sub>bd</sub>	Durchbruchspannung
V <sub>J1</sub> , V <sub>J2</sub>	erstes, zweites Übergang-Spannungspotential
V <sub>J11</sub> , V <sub>J12</sub>	erstes, zweites partielles Übergang-Spannungspotential
PH3	Signalleistungspegel der störenden dritten Harmonischen

### Patentansprüche

1. Eine Halbleitervorrichtung (100), die folgende Merkmale aufweist:

„n“ Paare von pn-Übergang-Strukturen, wobei n eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergangs-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergangs-Strukturen vom i-ten Typ anti-seriell geschaltet sind,

wobei die pn-Übergangs-Struktur vom i-ten Typ dahingehend ausgestaltet ist, einen i-ten Übergangs-Stufenfaktor  $m_i$  aufzuweisen,

wobei zumindest ein erstes Paar der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend ausgestaltet ist, einen ersten Übergangs-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_1 < 0,50$ ,

und ein zweites Paar der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend ausgestaltet ist, einen zweiten Übergangs-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_2 > 0,50$ , und

wobei die Übergangs-Stufenfaktoren  $m_1$ ,  $m_2$  des ersten und zweiten Paares der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend eingestellt sind, dass sie zu einer Erzeugung eines Störende-Dritte-Harmonische-Signals der Halbleitervorrichtung mit einem Signalleistungspegel (PH3) führen, der zumindest 10 dB niedriger als ein Referenz-Signalleistungspegel (PH3) des Störende-Dritte-Harmonische-Signals ist, der für einen Referenzfall erhalten wird, bei dem der erste und zweite Übergangs-Stufenfaktor  $m_1$ ,  $m_2$  gleich 0,25 sind.

2. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 1, wobei der erste bis n-te Übergangs-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 0,05$  die folgende Ellipsengleichung erfüllen:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{m_i - 0,25}{a_i} \right)^2 = 1, \text{ mit } \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{a_i} \right)^2 = 16,$$

wobei die Parameter  $a_i$  basierend auf einer Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J,i}$  und einem Übergangs-Spannungspotential  $V_{J,i}$  der pn-Übergangs-Struktur vom i-ten Typ bestimmt werden.

3. Eine Halbleitervorrichtung, die folgende Merkmale aufweist:

„n“ Paare von pn-Übergangs-Strukturen, wobei n eine Ganzzahl  $\geq 2$  ist, wobei das i-te Paar, mit  $i \in \{1, \dots, n\}$ , zwei pn-Übergangs-Strukturen vom i-ten Typ aufweist, wobei die zwei pn-Übergangs-Strukturen vom i-ten Typ anti-seriell geschaltet sind,

wobei die pn-Übergangs-Struktur vom i-ten Typ dahingehend angeordnet ist, einen i-ten Übergangs-Stufenfaktor  $m_i$  aufzuweisen,

wobei der erste bis n-te Übergangs-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  innerhalb eines Toleranzbereichs von  $\pm 0,05$  die folgende Ellipsengleichung erfüllen:

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{m_i - 0,25}{a_i} \right)^2 = 1, \text{ mit } \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{a_i} \right)^2 = 16,$$

wobei zumindest ein erstes Paar der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend ausgestaltet ist, einen ersten Übergangs-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \notin \{0,00, 0,50\}$  und  $m_1 < 0,50$ , und ein zweites Paar der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend ausgestaltet ist, einen zweiten Übergangs-Stufenfaktor  $m_2$  aufzuweisen, mit  $m_2 \notin \{0, 00, 0,50\}$  und  $m_2 > 0,50$ , wobei die Parameter  $a_i$  basierend auf

einer Null-Vorspannung-Kapazität  $C_{J0,i}$  und einem Übergangs-Spannungspotential  $V_{Ji}$  der pn-Übergangs-Struktur vom i-ten Typ bestimmt werden.

4. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 2 oder 3, wobei jeder des ersten bis n-ten Parameters  $a_1$  bis  $a_n$  basierend auf den Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J0,1}$ - $C_{J0,ni}$  und auf den n-Übergangs-Spannungspotentialen  $V_{J1}$ - $V_{Jn}$  der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen bestimmt wird.

5. Halbleitervorrichtung gemäß einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei der erste bis n-te Parameter  $a_1$  bis  $a_n$  die folgende Gleichung erfüllen:

$$a_i = \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{C_{J0,i}}{C_{J0,j}} \right)^3 \left( \frac{V_{Ji}}{V_{Jj}} \right)^2}.$$

6. Halbleitervorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das erste Paar der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen dahingehend ausgestaltet ist, den ersten Übergangs-Stufenfaktor  $m_1$  aufzuweisen, mit  $m_1 \leq 0,48$ .

7. Halbleitervorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Werte für den ersten bis n-ten Übergangs-Stufenfaktor  $m_1$  bis  $m_n$  dahingehend eingestellt sind, dass diese zu einem Dritte-Ordnung-Schnittpunkt IP3 von zumindest 50 dBm führen.

8. Halbleitervorrichtung gemäß einem der Ansprüche 2 bis 7, wobei für  $n = 2$  die pn-Übergangs-Strukturen des ersten und zweiten Typs dahingehend ausgestaltet sind, ein Verhältnis der Null-Vorspannung-Kapazitäten  $C_{J0,1}$ ,  $C_{J0,2}$  aufzuweisen, das die folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{1}{4} < \frac{C_{J0,1}}{C_{J0,2}} < 4.$$

9. Halbleitervorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die pn-Übergangs-Struktur vom i-ten Typ eine Diodenstruktur vom i-ten Typ mit einer Anodenregion und einer Kathodenregion bildet.

10. Halbleitervorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, die ferner einen ersten Verbindungsanschluss und einen zweiten Verbindungsanschluss aufweist, wobei die n Paare von pn-Übergangs-Strukturen zwischen den ersten und den zweiten Anschluss geschaltet sind.

11. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 10, wobei die n Paare von pn-Übergangs-Strukturen in einer gestapelten Konfiguration in einem Halbleitersubstrat angeordnet sind.

12. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 11, wobei unterschiedlich dotierte Halbleiterregionen der pn-Übergangs-Strukturen sich bezüglich einer Hauptoberflächenregion des Halbleitersubstrats vertikal in das Halbleitersubstrat erstrecken und wobei der Hauptabschnitt der Fläche des metallurgischen pn-Übergangs ein planarer pn-Übergang ist, der sich parallel zu einer Hauptoberflächenregion des Halbleitersubstrats erstreckt.

13. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 12, wobei die zwei pn-Übergangs-Strukturen des i-ten Paares zusammen in einer gestapelten Konfiguration in dem Halbleitersubstrat angeordnet sind.

14. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 12, wobei eine der zwei pn-Übergangs-Strukturen eines Paares der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen in dem Halbleitersubstrat in einer gestapelten Konfiguration mit einer der zwei pn-Übergangs-Strukturen eines anderen Paares der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen angeordnet ist.

15. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 13 oder 14, wobei die gestapelte Konfiguration eine npn-Struktur mit einer floatenden Basisregion in dem Halbleitersubstrat aufweist.

16. Halbleitervorrichtung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zumindest ein Paar der n Paare von pn-Übergangs-Strukturen als ein Paar aus zwei zusammengesetzten pn-Übergangs-Strukturen ausgestaltet ist, von denen jede eine erste partielle pn-Übergangs-Struktur und eine zweite partielle pn-Übergangs-Struktur aufweist,

wobei die erste partielle pn-Übergangs-Struktur einen ersten partiellen Übergangs-Stufenfaktor  $m_{i1}$  aufweist und wobei die zweite partielle pn-Übergangs-Struktur einen zweiten partiellen Übergangs-Stufenfaktor  $m_{i2}$  aufweist, der sich von dem ersten partiellen Übergangs-Stufenfaktor  $m_{i1}$  unterscheidet, wobei der Übergangs-Stufenfaktor  $m_i$  der zusammengesetzten pn-Übergangs-Struktur auf einer Kombination des ersten und zweiten partiellen Übergangs-Stufenfaktors  $m_{i1}$ ,  $m_{i2}$  basiert.

17. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 16, wobei die erste und zweite partielle pn-Übergangs-Struktur in einem Halbleitersubstrat angeordnet sind, wobei die Kombination proportional von einem Flächenverhältnis zwischen einer aktiven Fläche parallel zu einem ersten Hauptoberflächenbereich des Halbleitersubstrats der ersten und der zweiten partiellen pn-Übergangs-Struktur abhängt.

18. Halbleitervorrichtung gemäß Anspruch 16 oder 17, wobei die erste und zweite partielle pn-Übergangs-Struktur der pn-Übergangs-Struktur vom ersten Typ und die erste und zweite partielle pn-Übergangs-Struktur der pn-Übergangs-Struktur vom zweiten Typ zusammen in einer lateral isolierten gemeinsamen Region des Halbleitersubstrats angeordnet sind.

19. Halbleitervorrichtung gemäß einem der Ansprüche 16 bis 18, wobei die erste partielle pn-Übergangs-Struktur dahingehend ausgestaltet ist, einen ersten partiellen Übergangs-Stufenfaktor  $m_{i1} > 0,50$  aufzuweisen, und wobei die zweite partielle pn-Übergangs-Struktur dahingehend ausgestaltet ist, einen zweiten partiellen Übergangs-Stufenfaktor  $m_{i2}$  zwischen 0,30 und 0,5 zu aufzuweisen.

20. Halbleitervorrichtung gemäß einem der Ansprüche 16 bis 19, wobei die erste und zweite partielle pn-Übergangs-Struktur sich in einer Tiefenrichtung bezüglich eines ersten Hauptoberflächenbereichs des Halbleitersubstrats vertikal in das Halbleitersubstrat erstrecken.

Es folgen 27 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fall: 4 pn-Übergänge

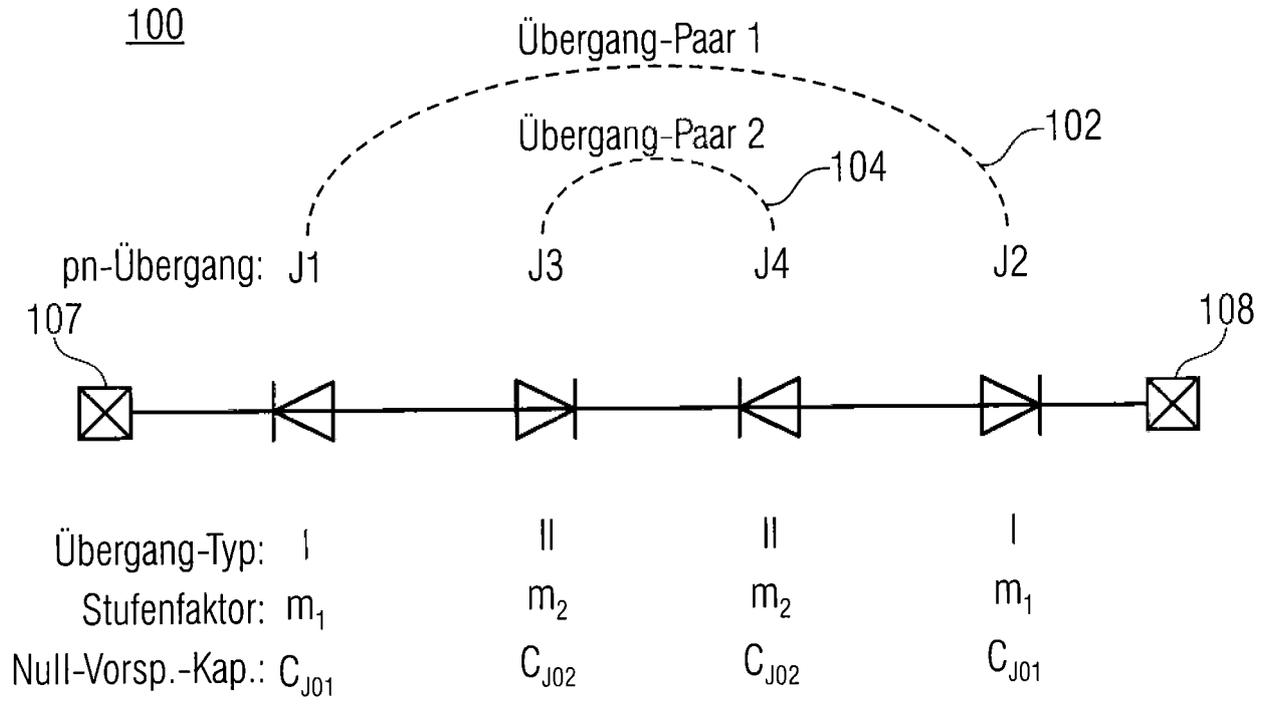


Fig. 1a

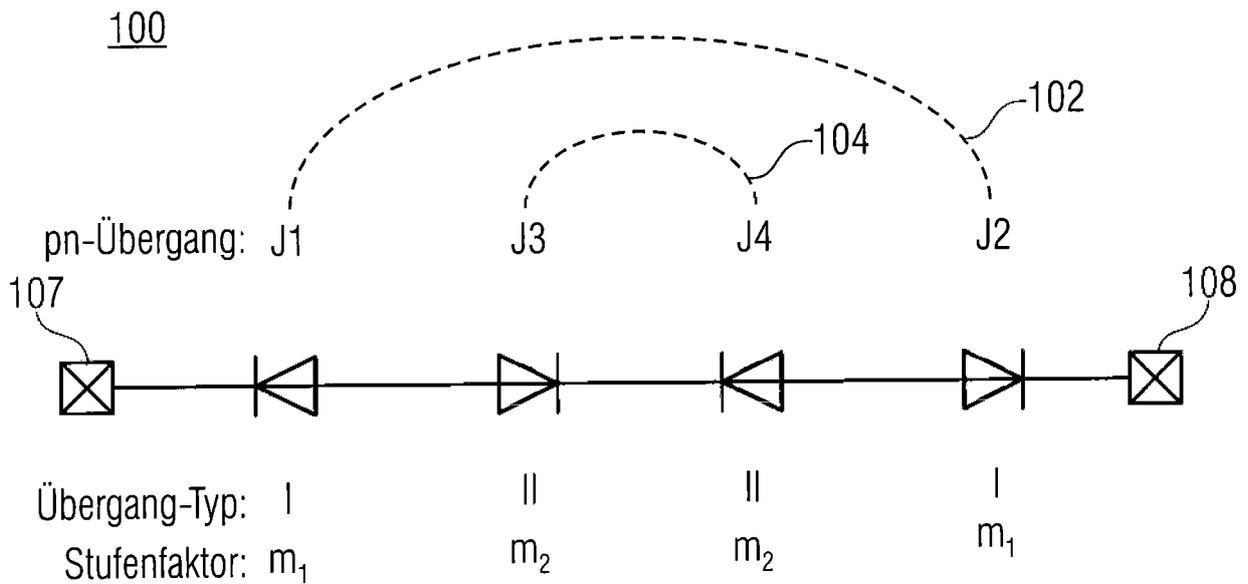


Fig. 1b

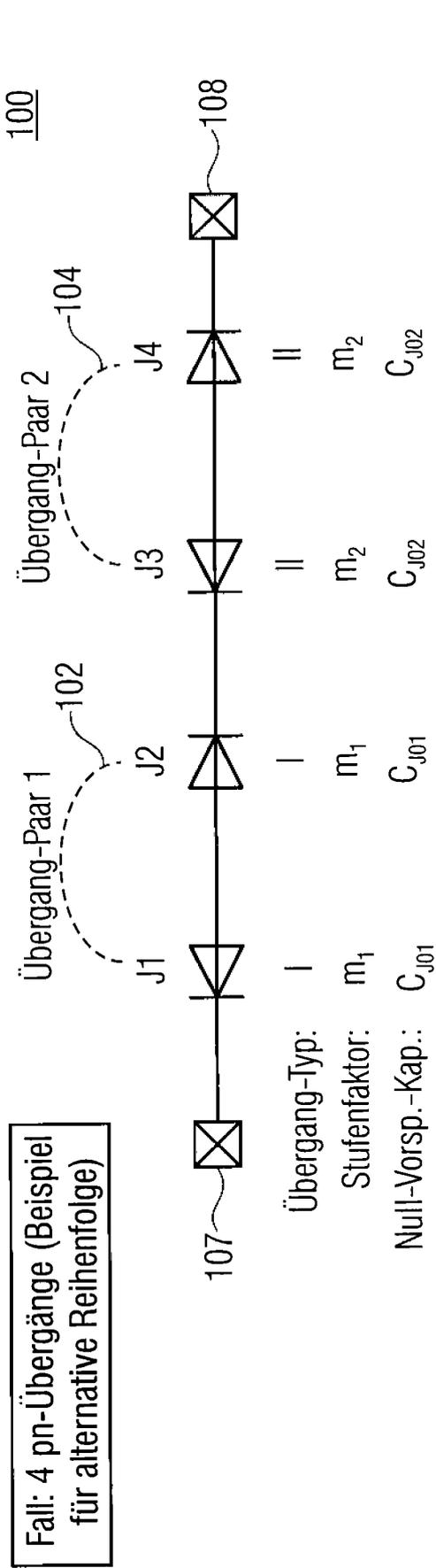


Fig. 1c

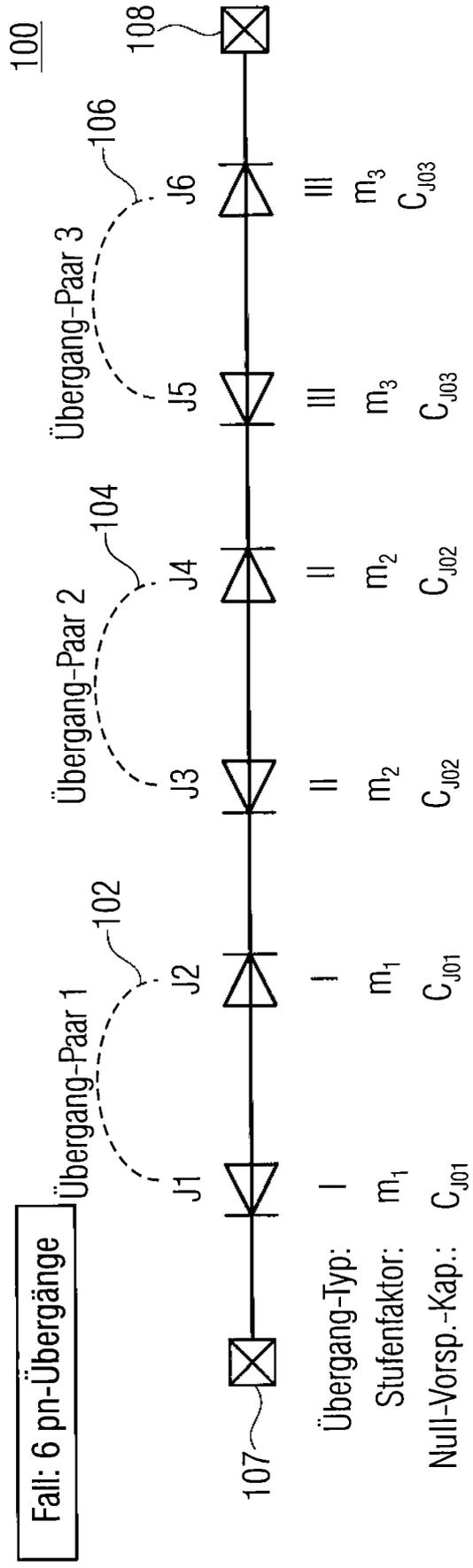


Fig. 1d

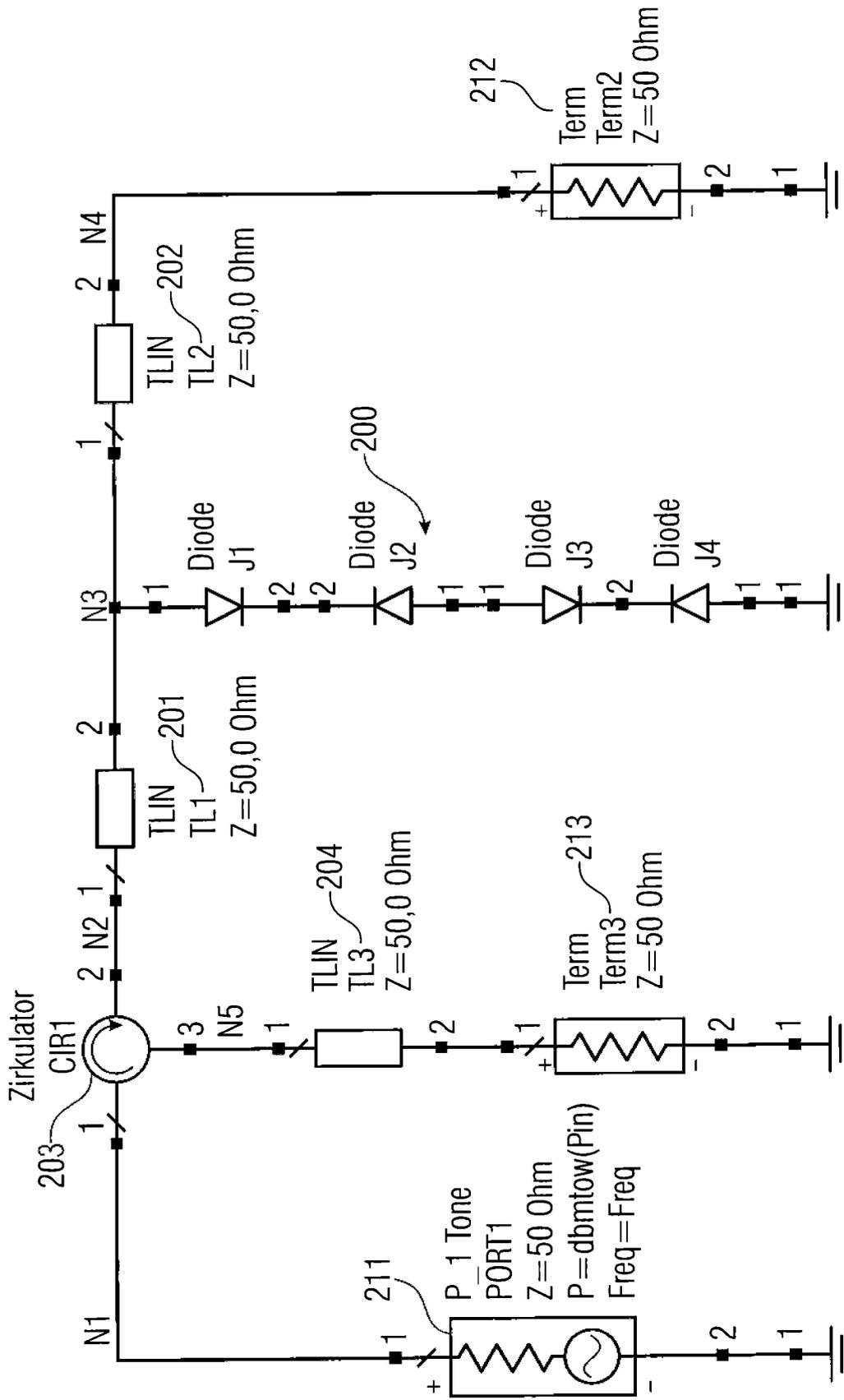


Fig. 2

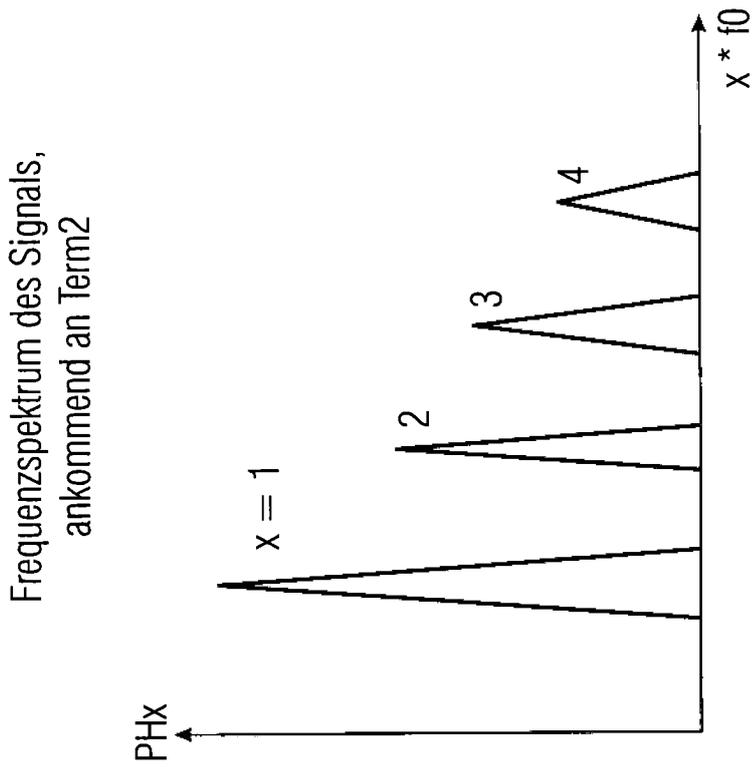


Fig. 3b

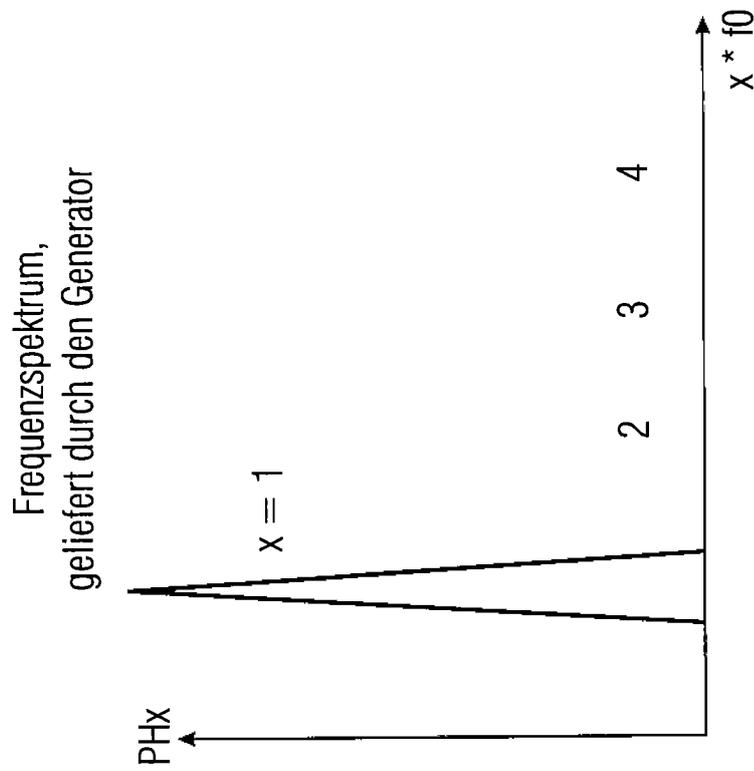


Fig. 3a

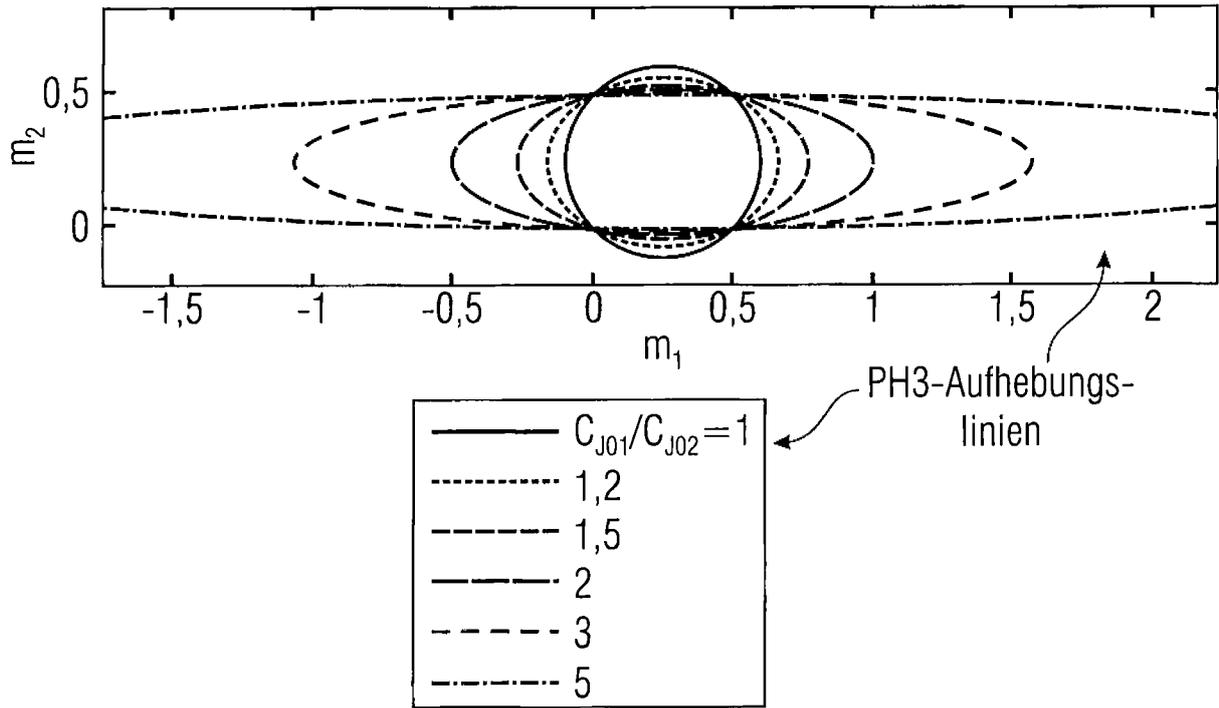


Fig. 4a

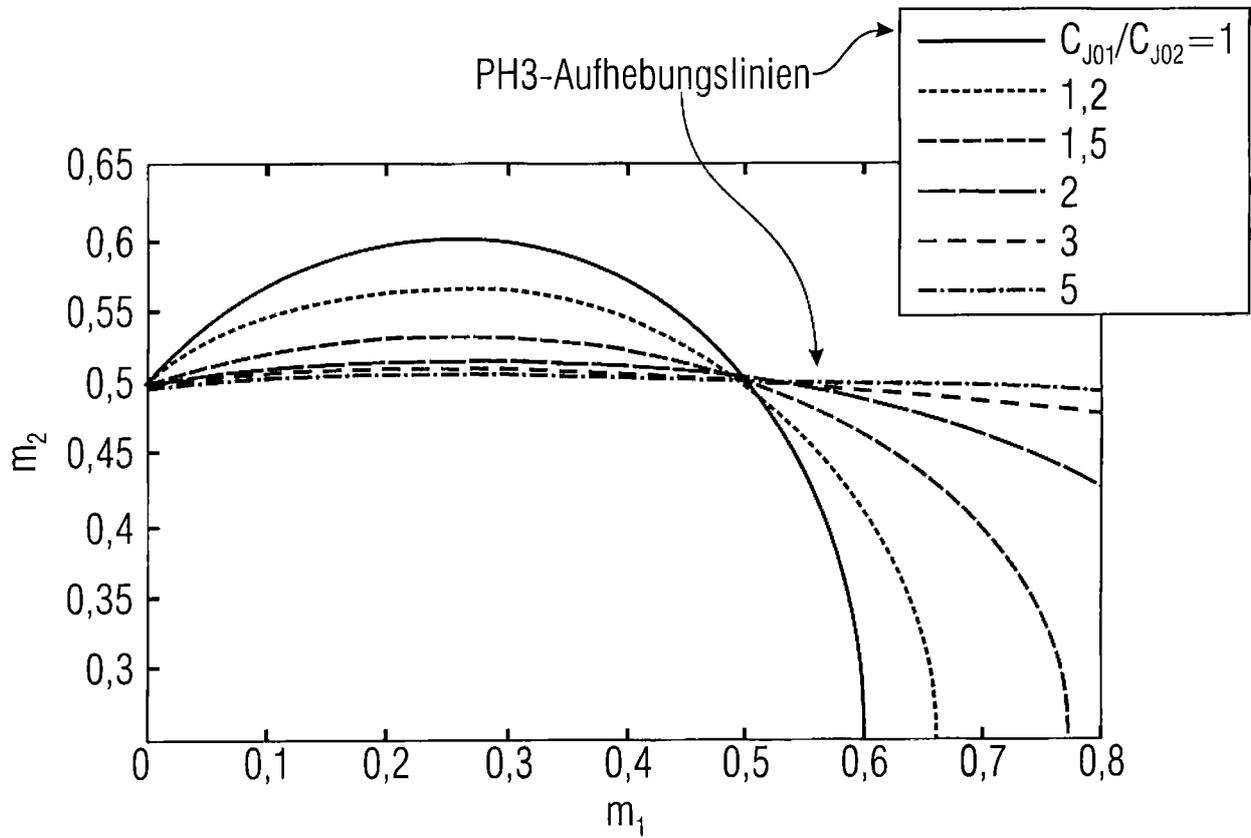


Fig. 4b

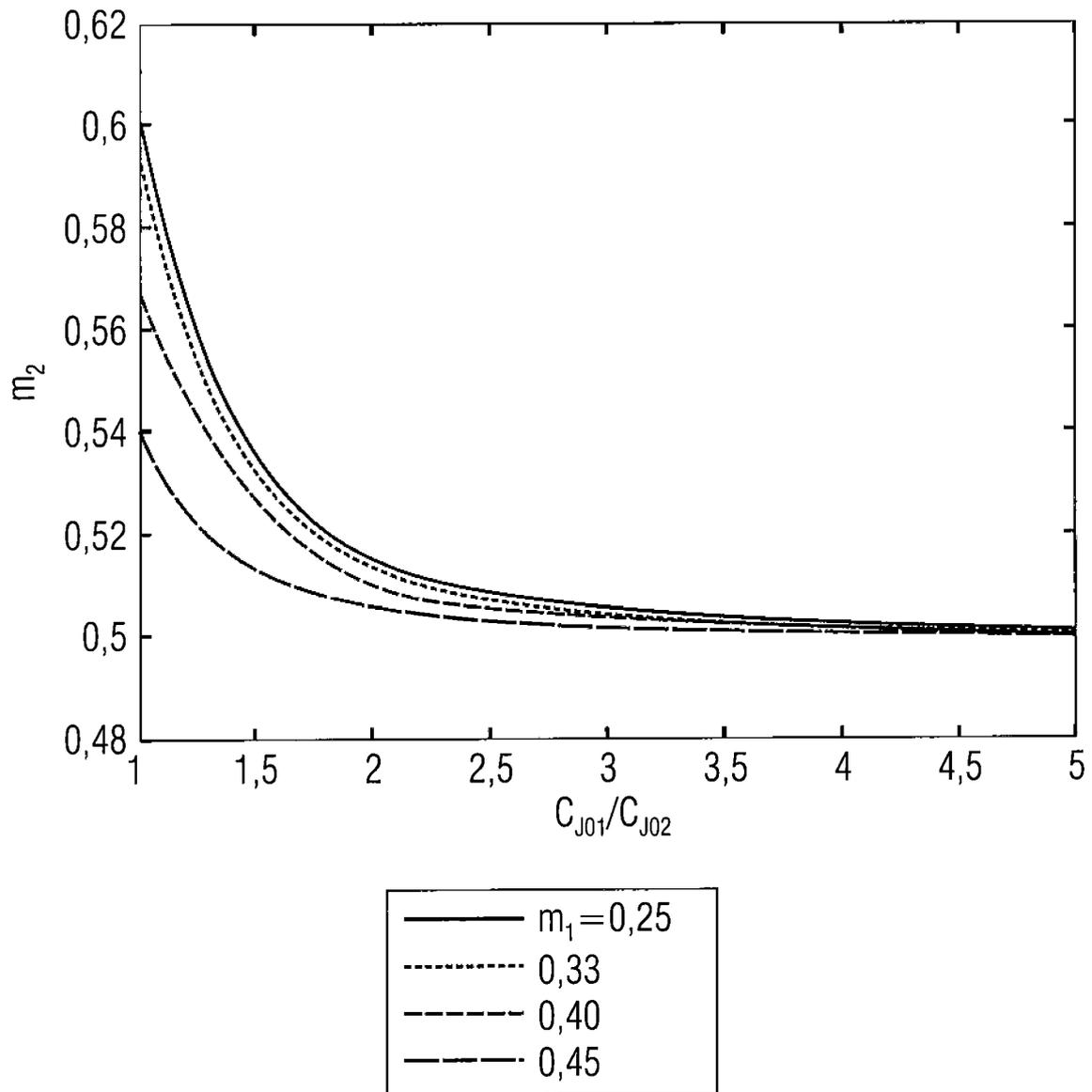


Fig. 4c

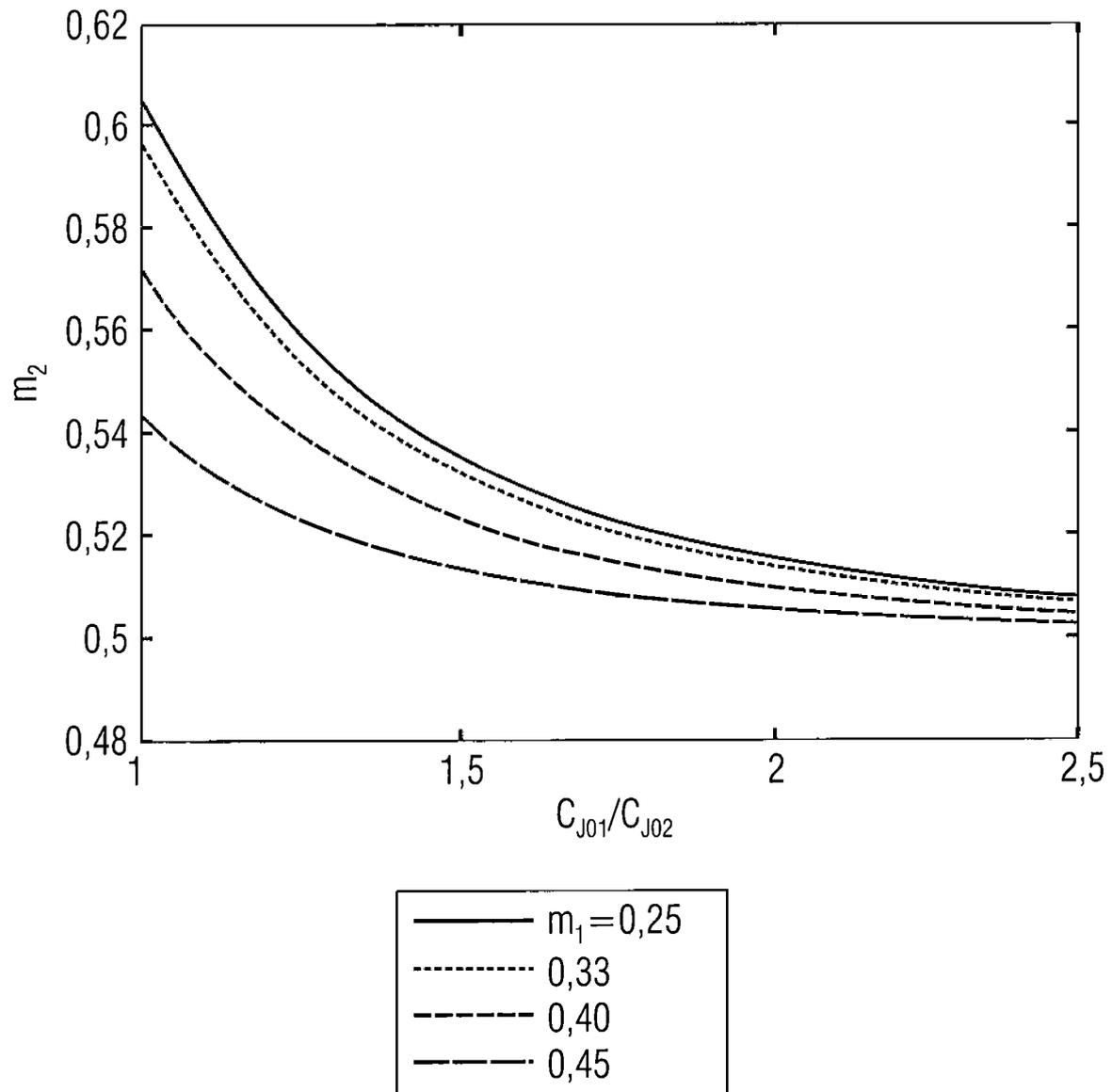


Fig. 4d

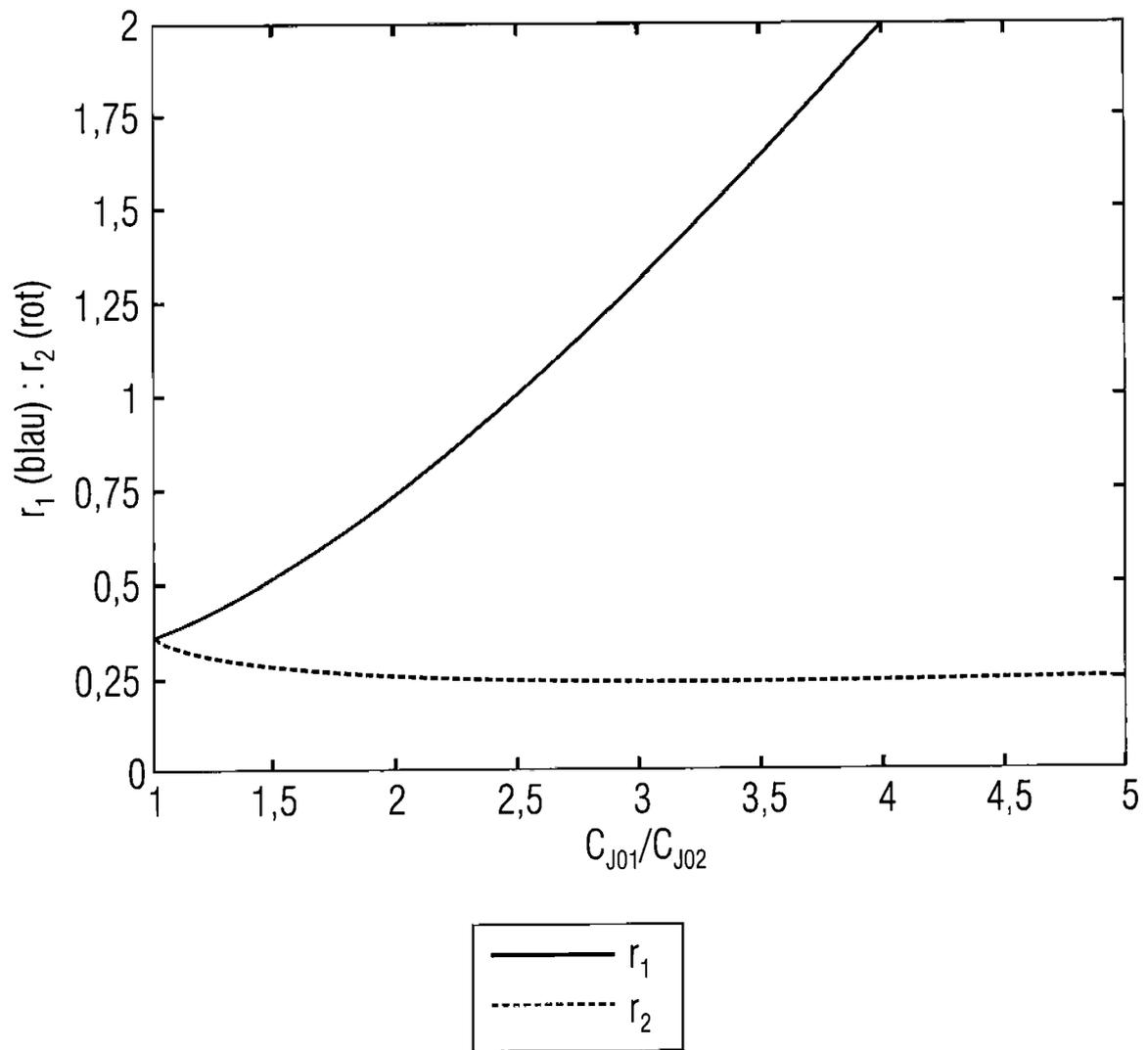


Fig. 4e

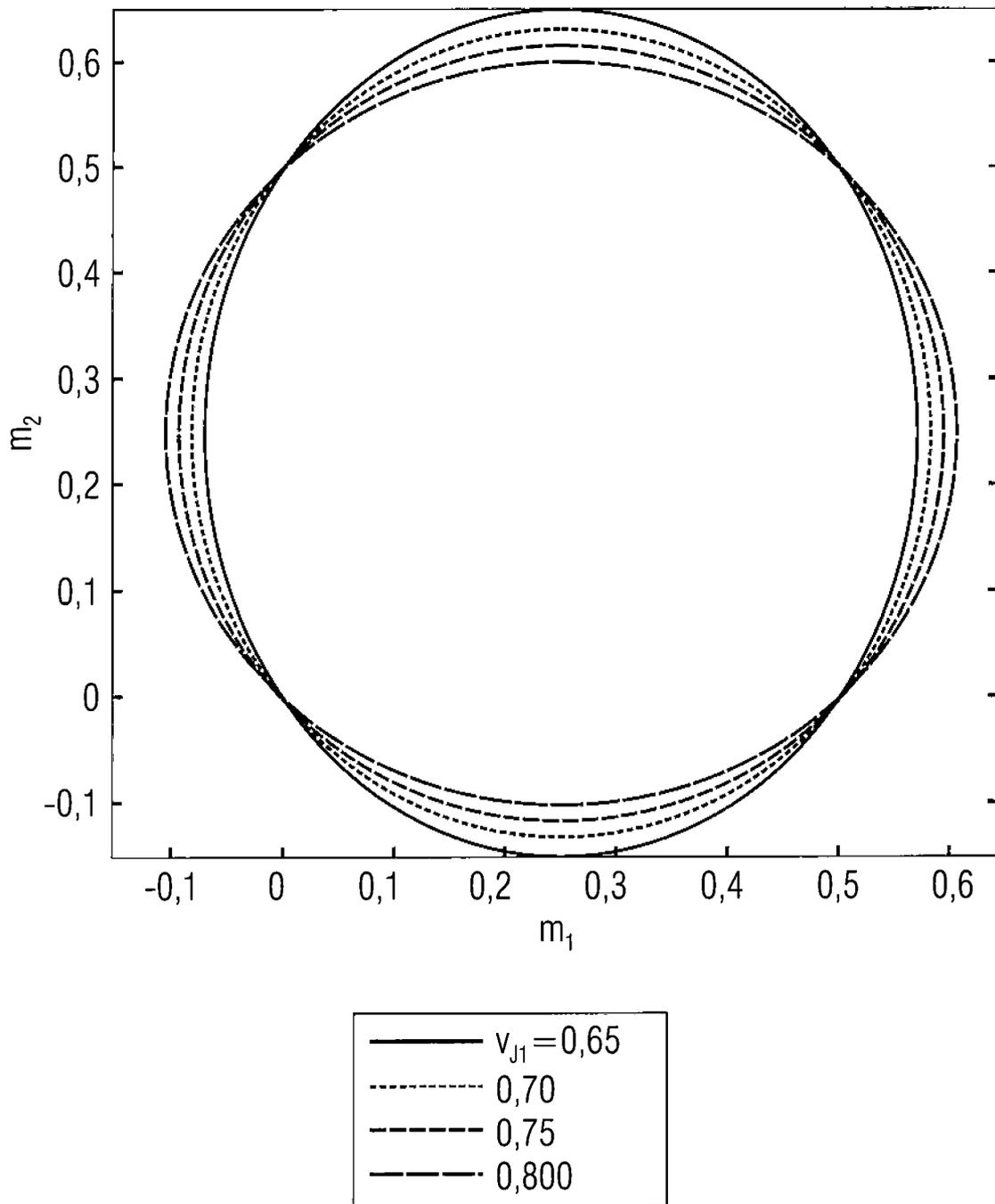


Fig. 4f

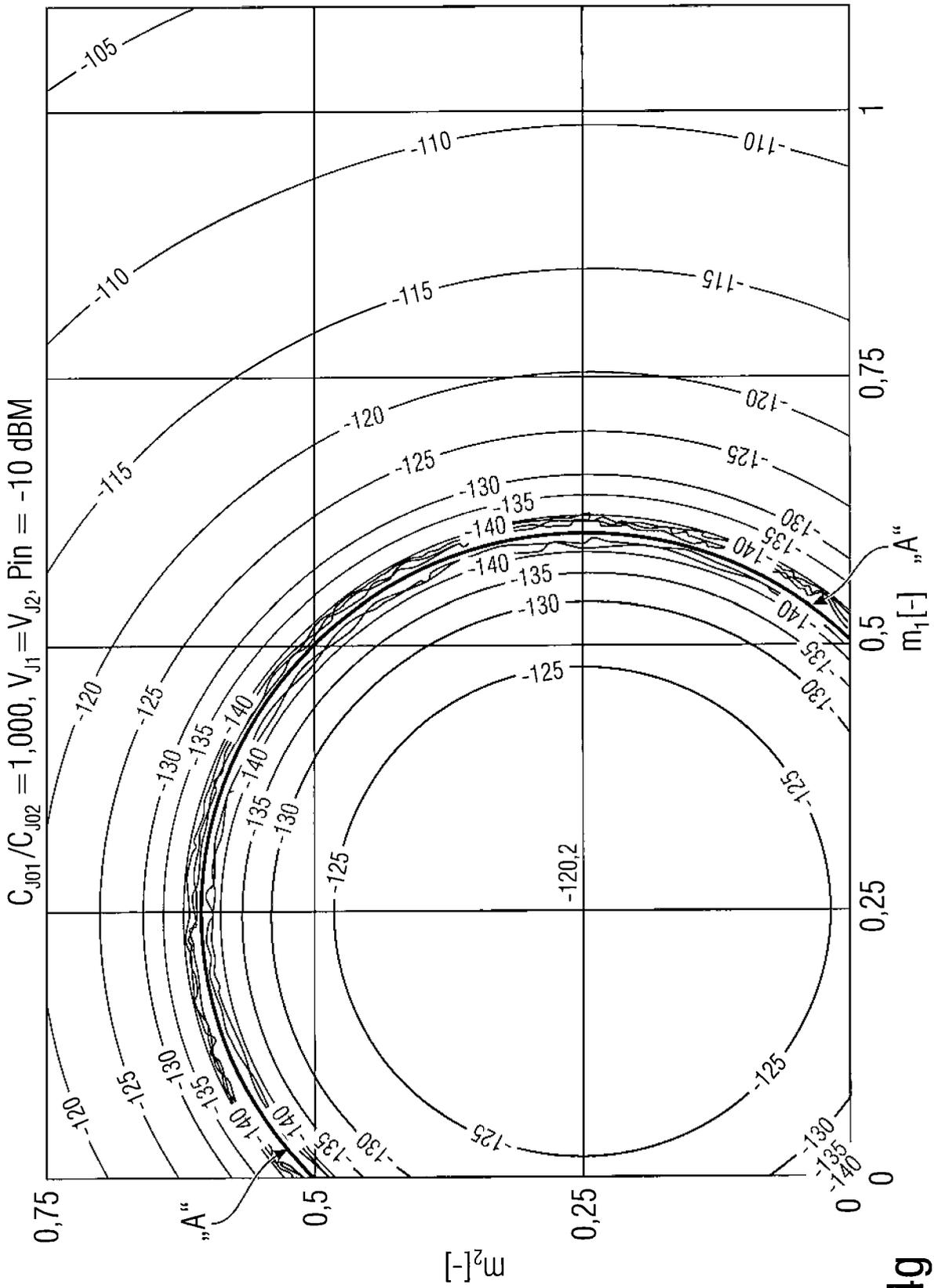


Fig. 4g

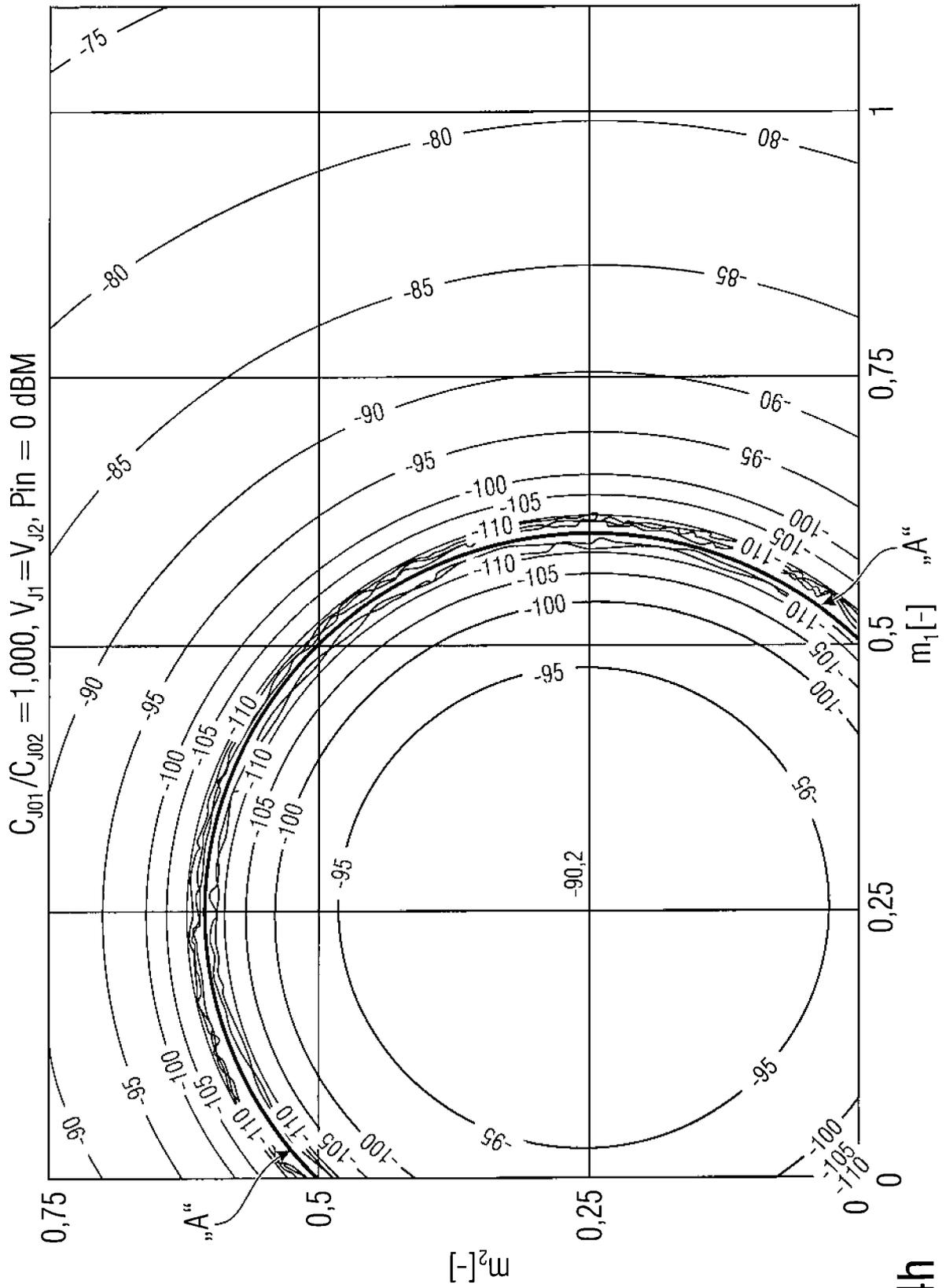


Fig. 4h

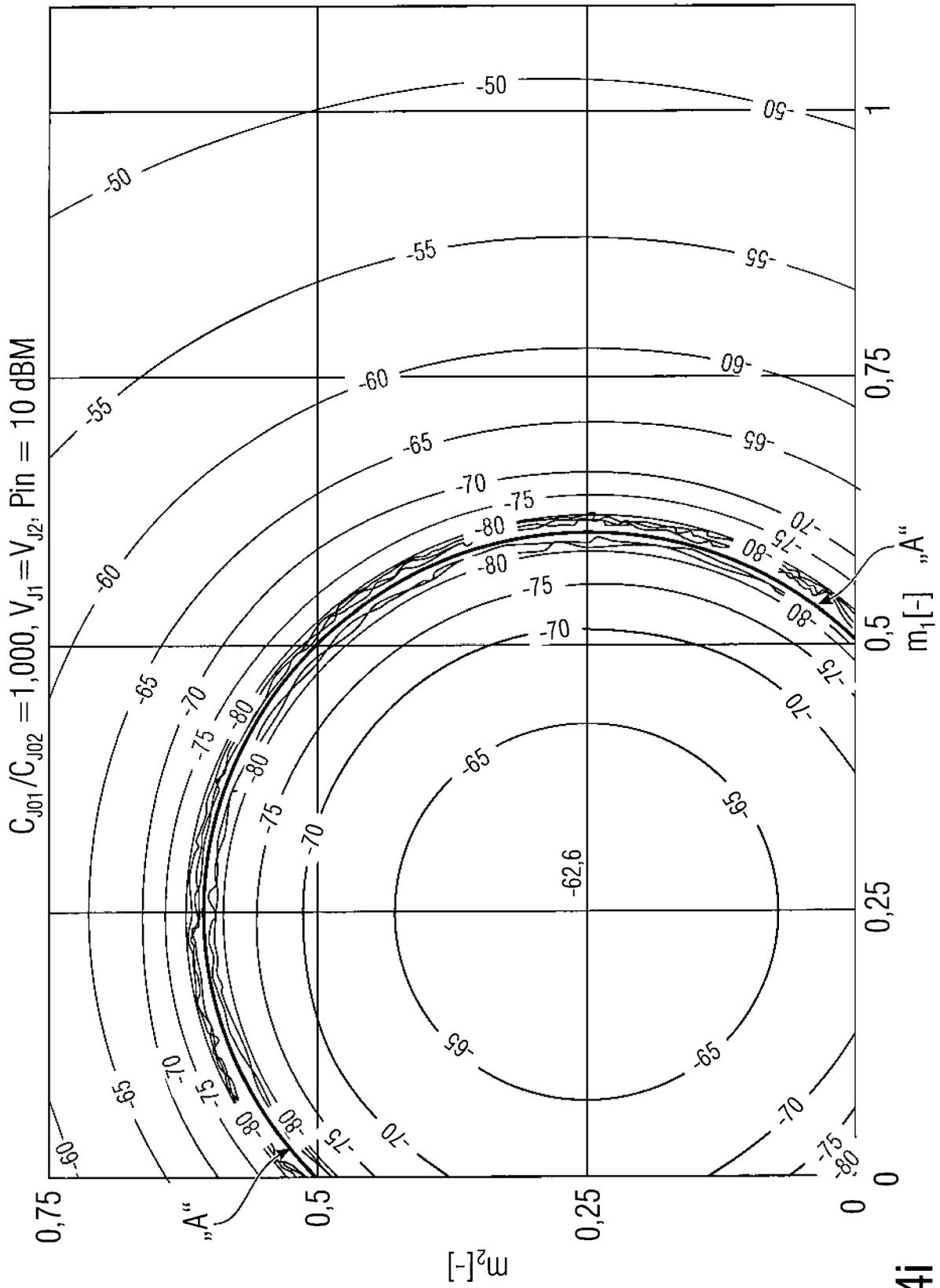


Fig. 4i

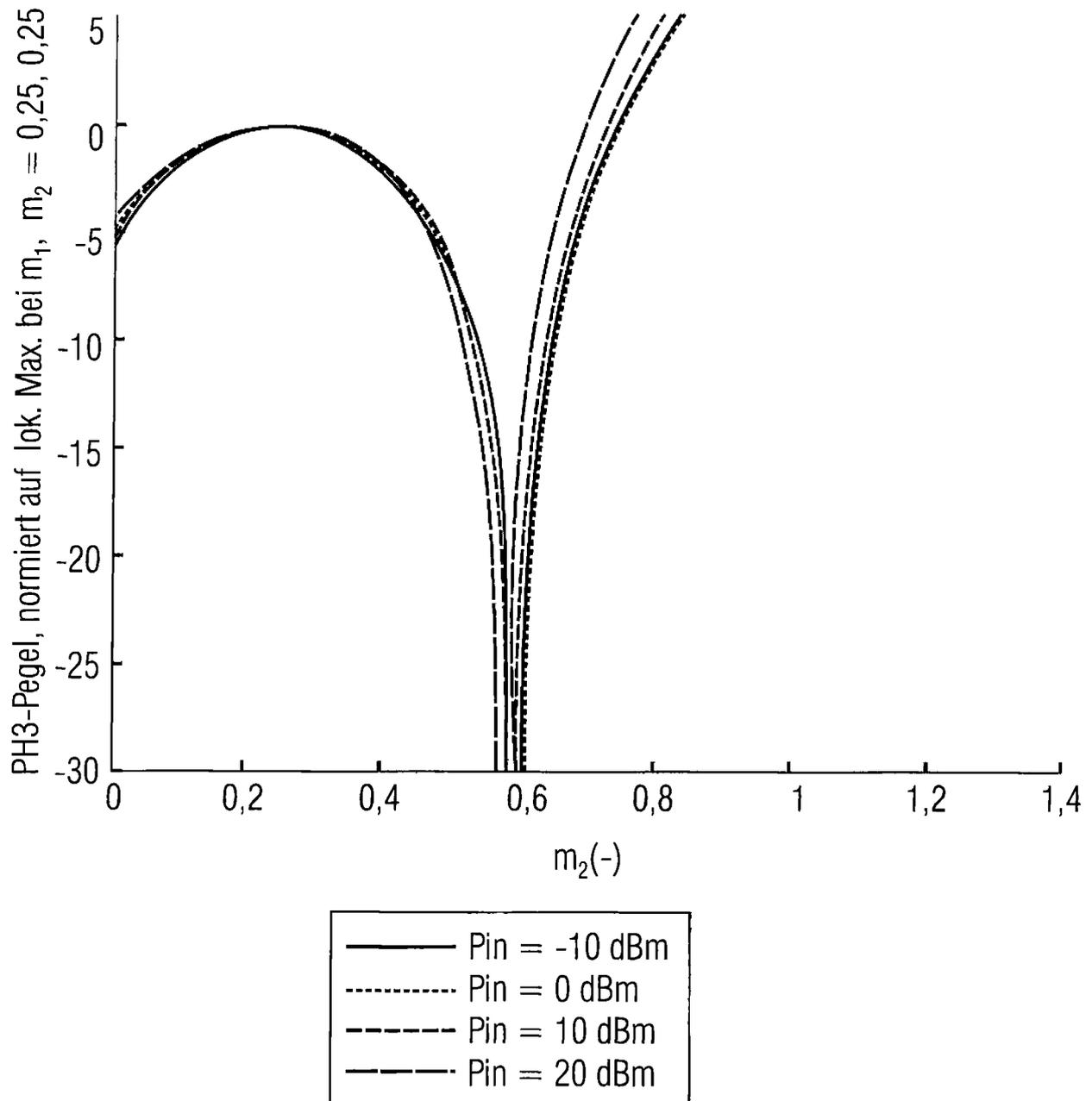
$C_{J0,1} = C_{J0,2}; m_1 = 0,25; \text{normierte PH3 in Abhängigkeit von } m_2$ 

Fig. 4j

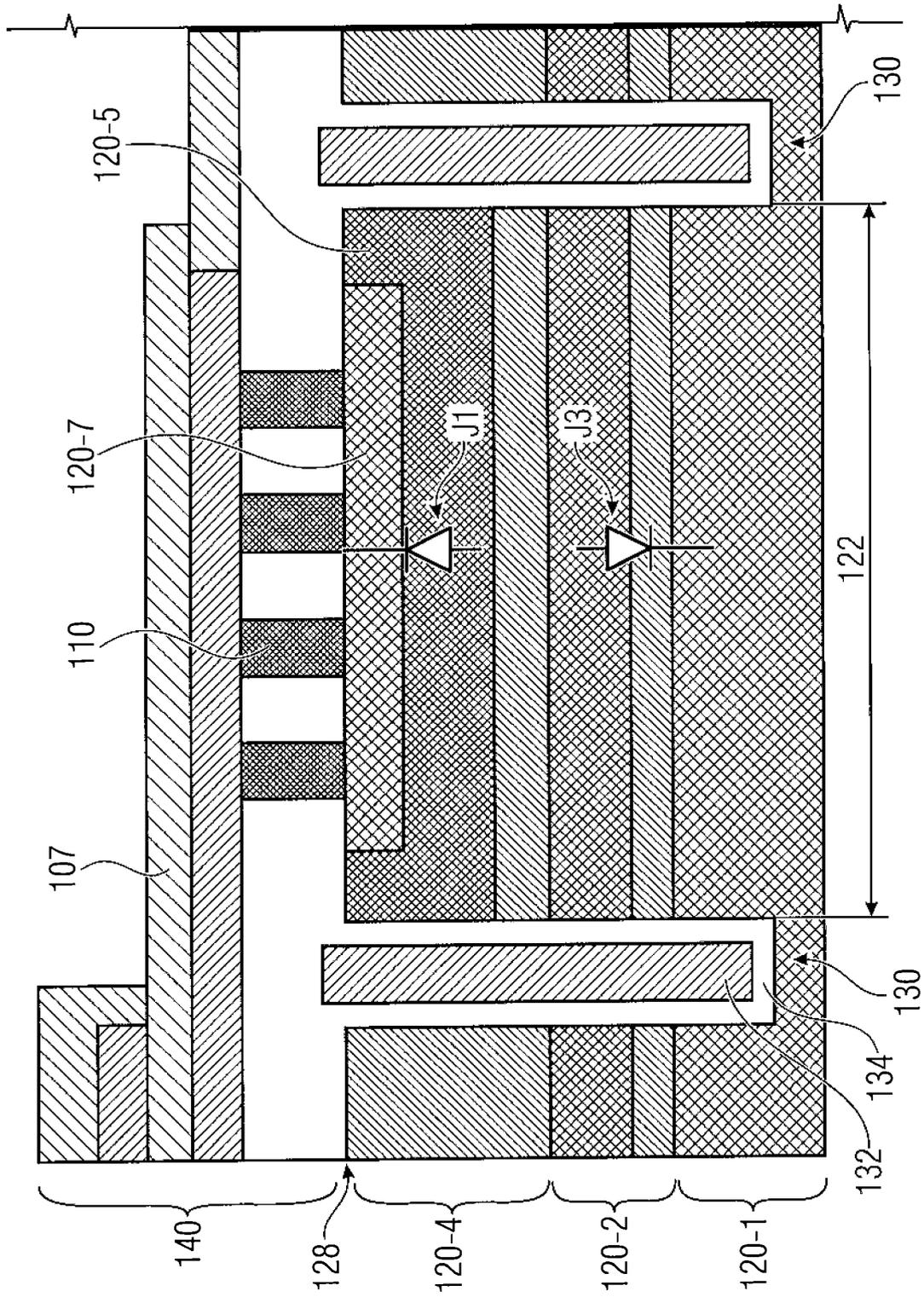


Fig. 5a (Teil 1)

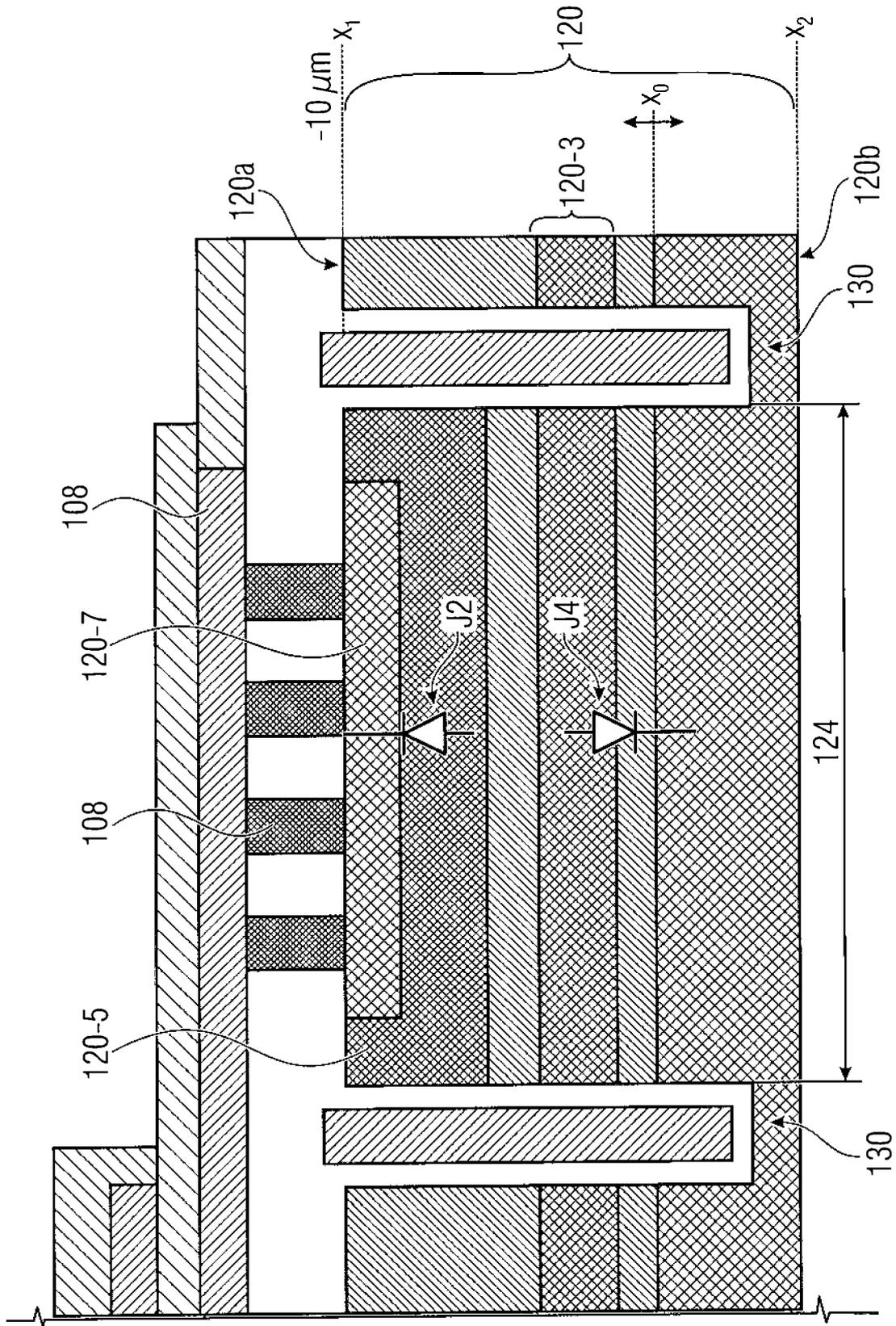


Fig. 5a (Teil 2)

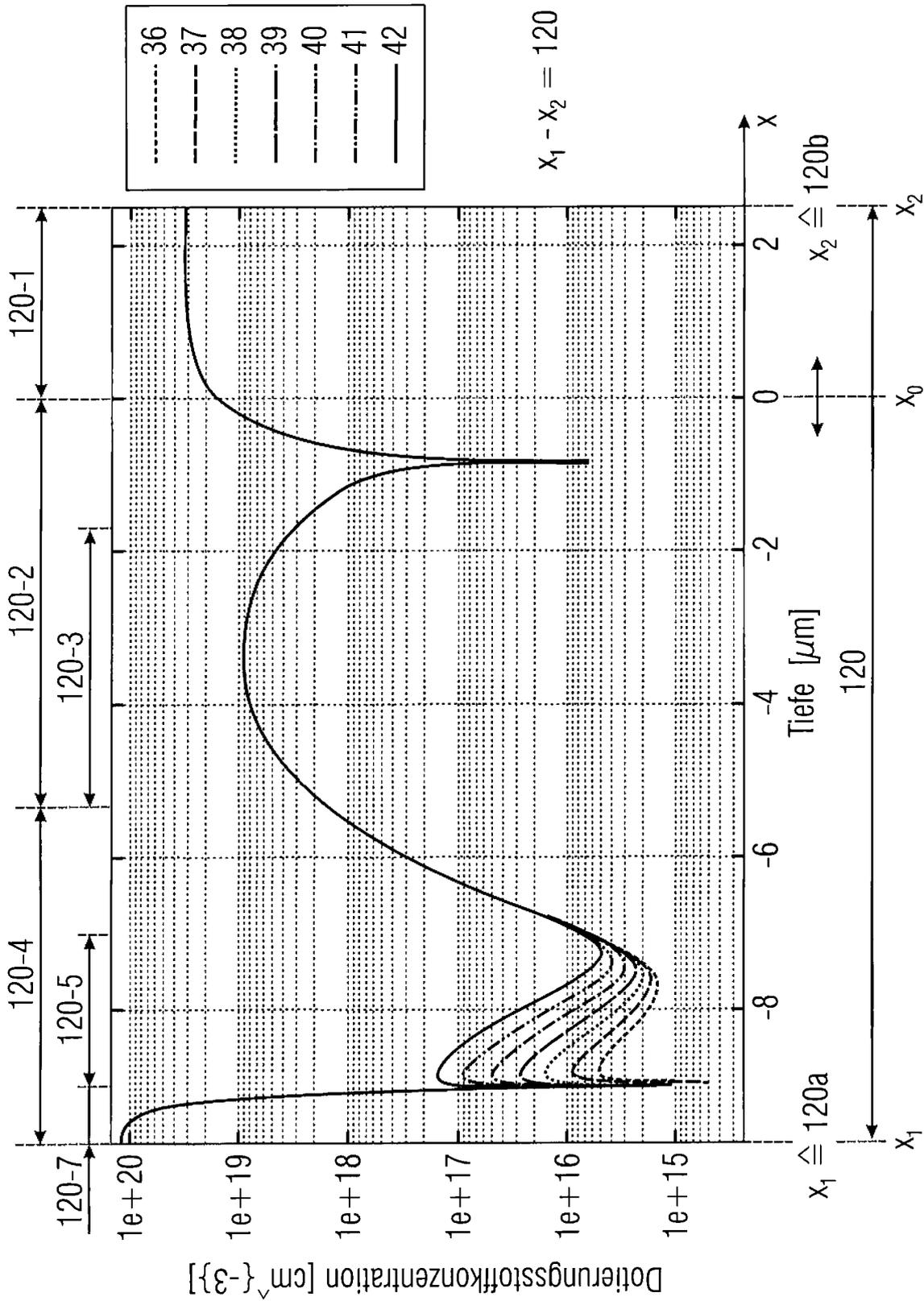


Fig. 5b



100

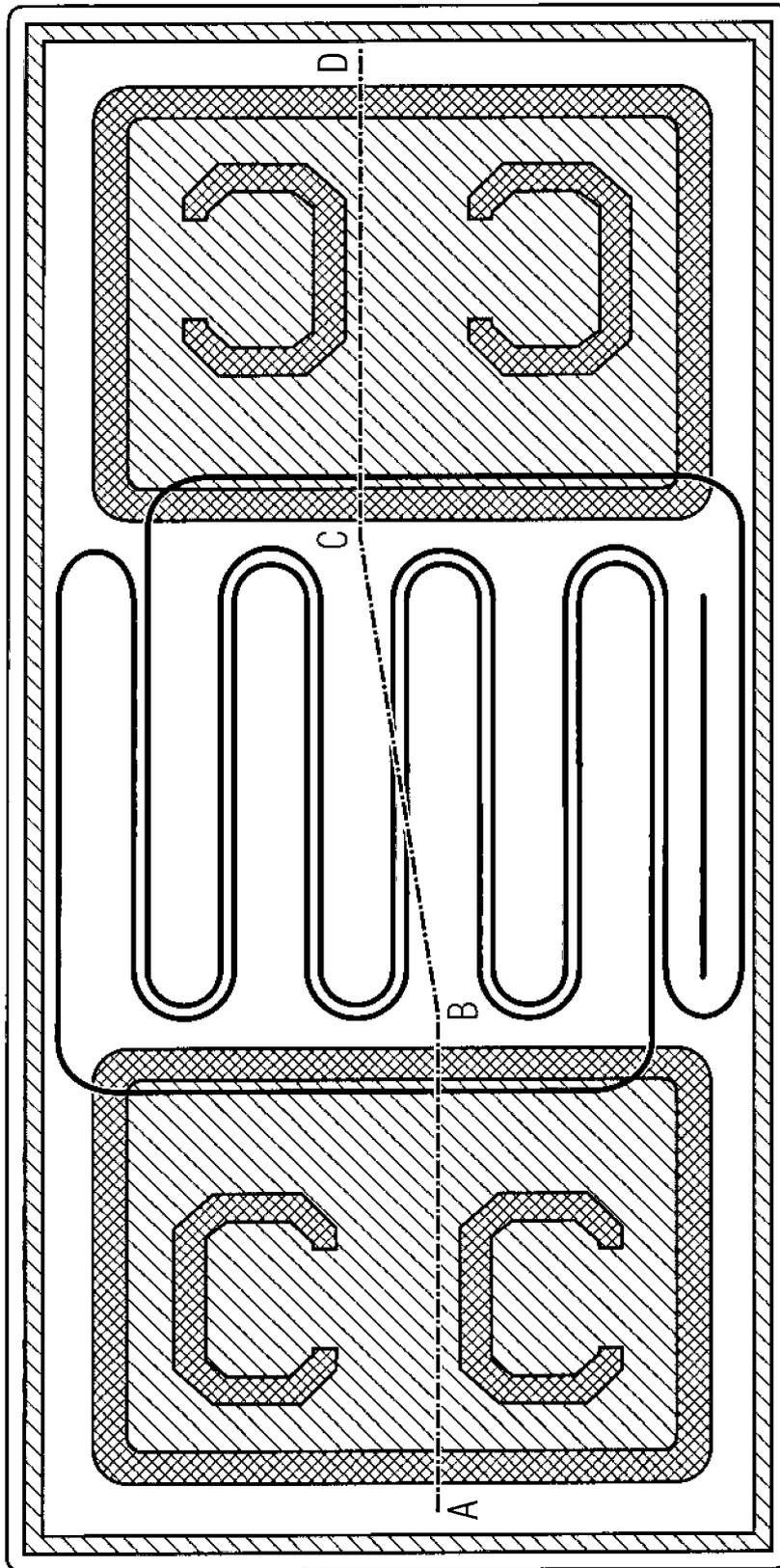


Fig. 6b

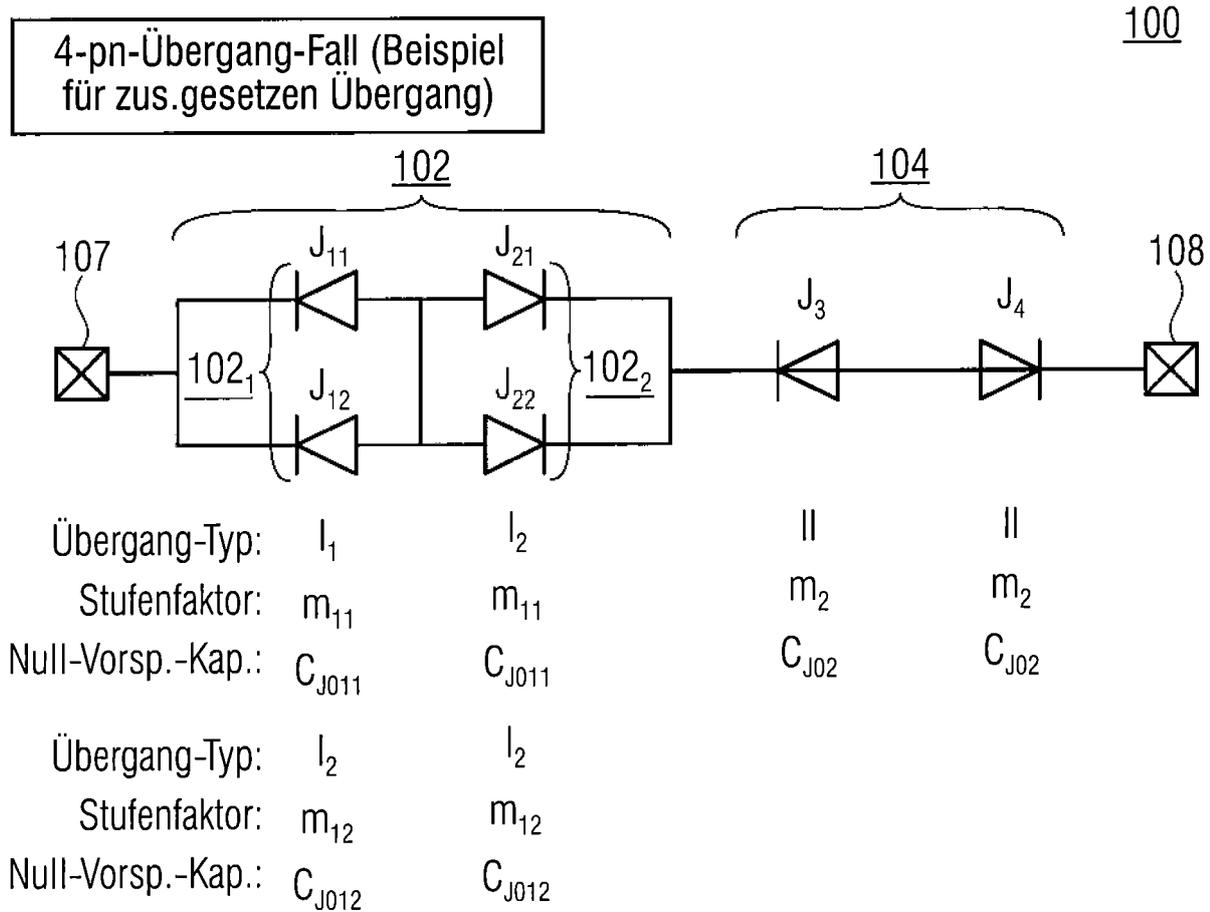


Fig. 7a

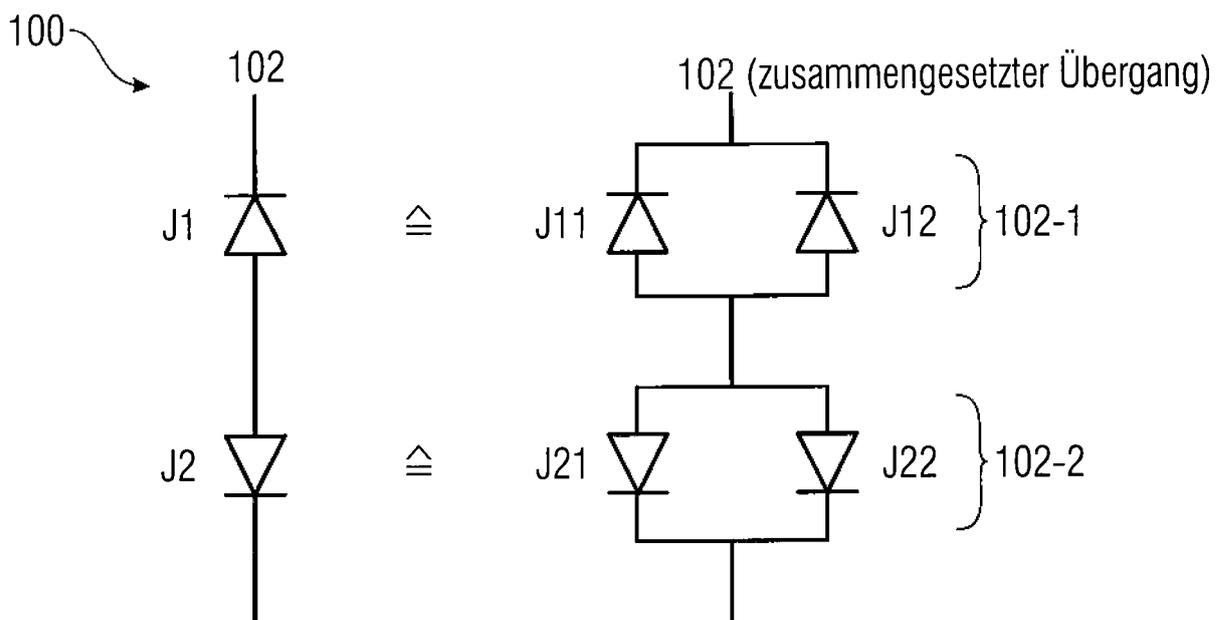


Fig. 7b

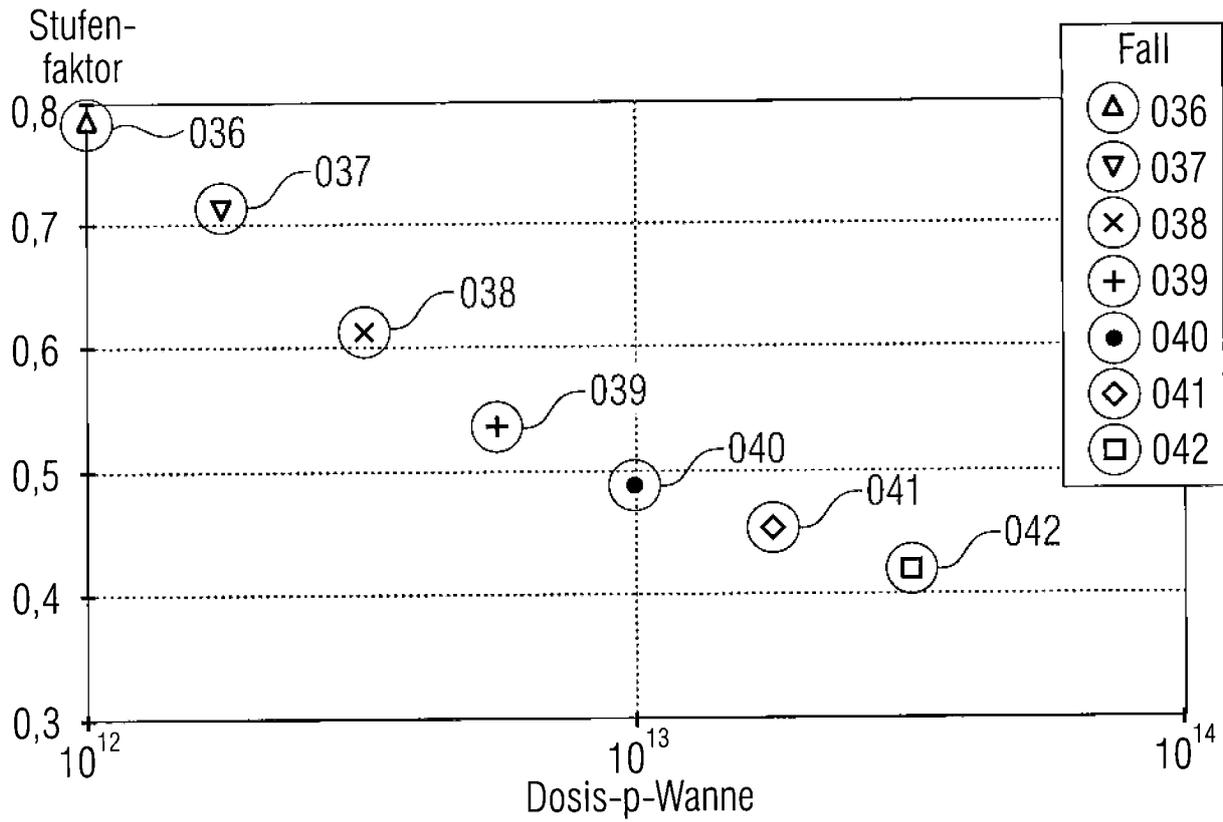


Fig. 8a

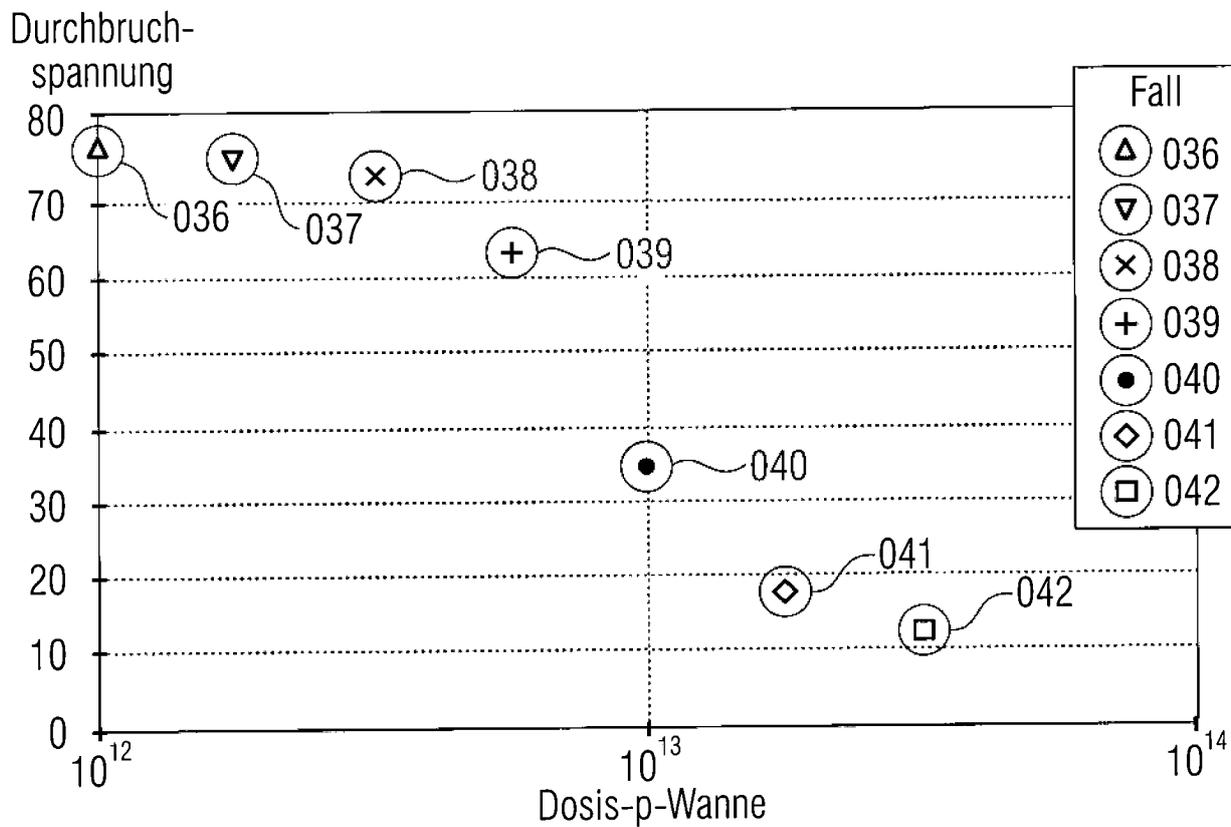


Fig. 8b

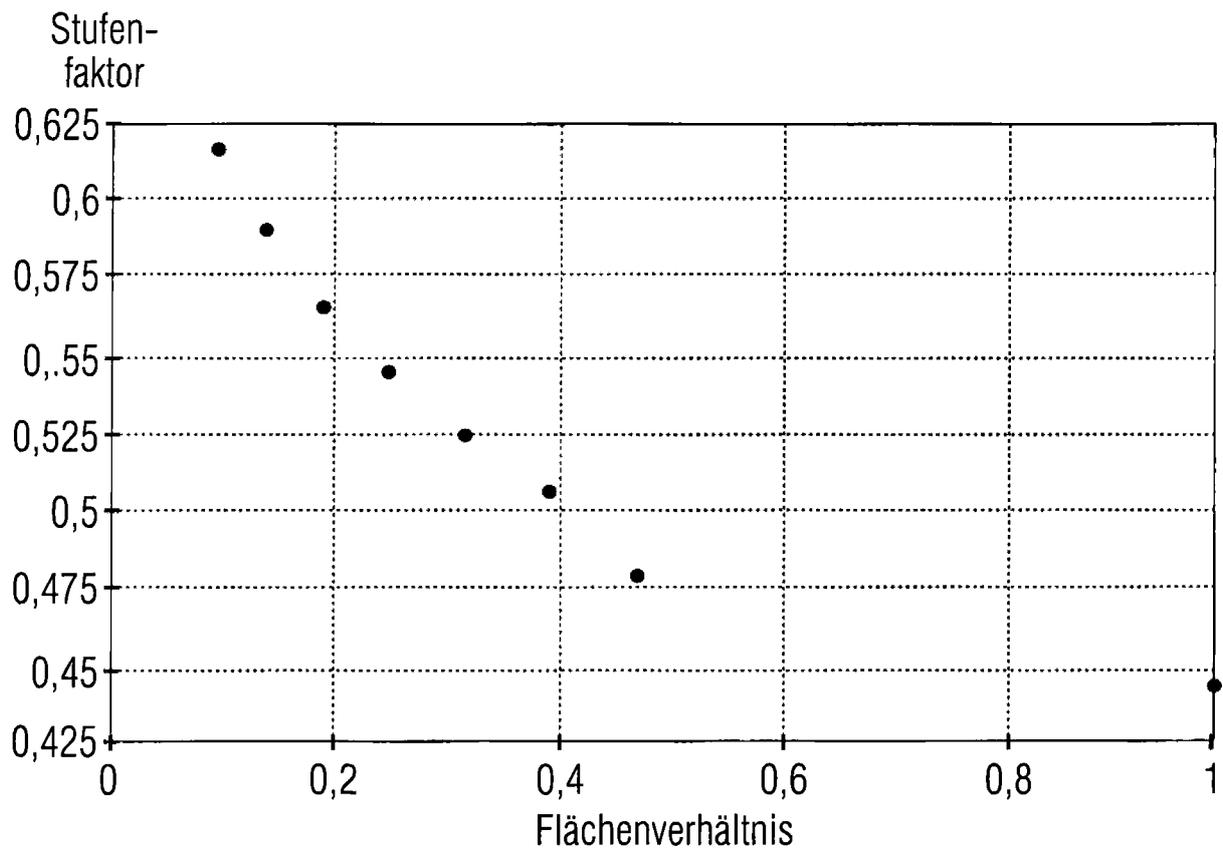


Fig. 8c

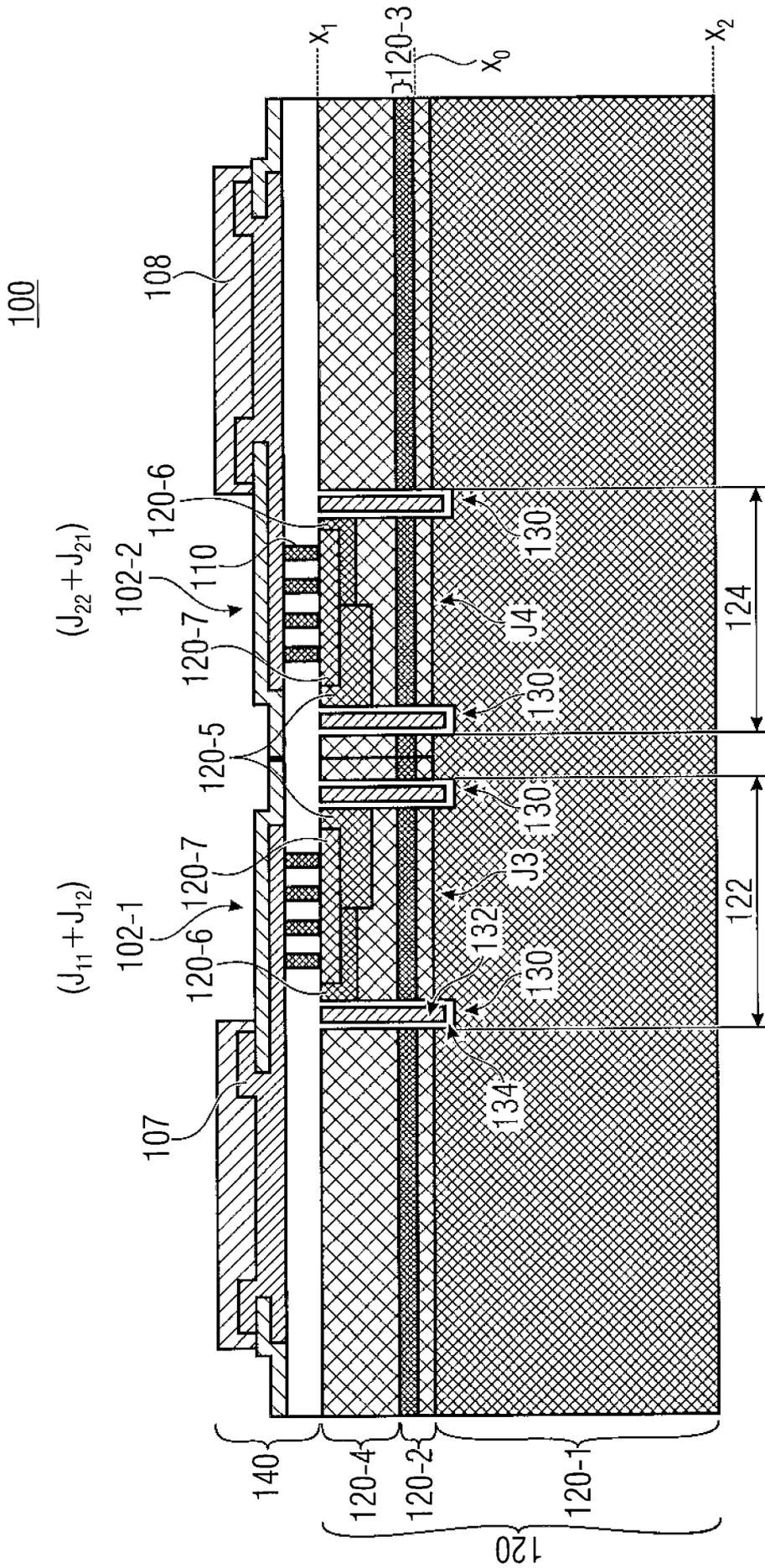
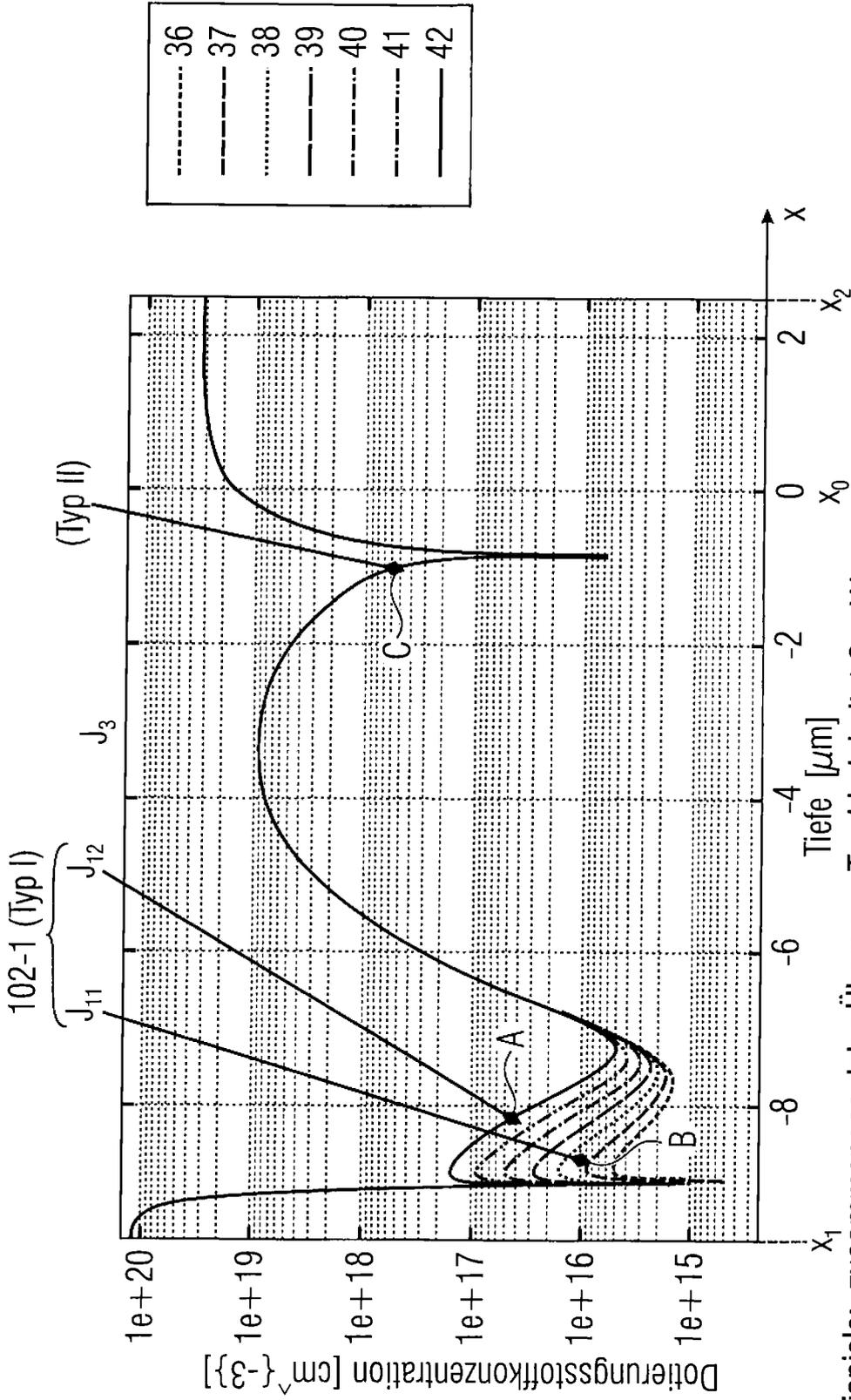


Fig. 9a



Beispiele: zusammengesetzter Übergang-Typ I beinhaltet 2 p-Wannen  
 A → höhere p-Wanne-Dotierung mit Stufenfaktor  $m=0,4-0,45$   
 B → Niedrigere p-Wanne-Dotierung: hyper-abrupt mit  $m > 0,5$   
 → Netto-Stufenfaktor des zusammengesetzten Übergangs beträgt  $\sim 0,55$   
 C → Übergang-Typ II weist linearen Gradienten mit Stufenfaktor  $m=0,33$  auf

Fig. 9b

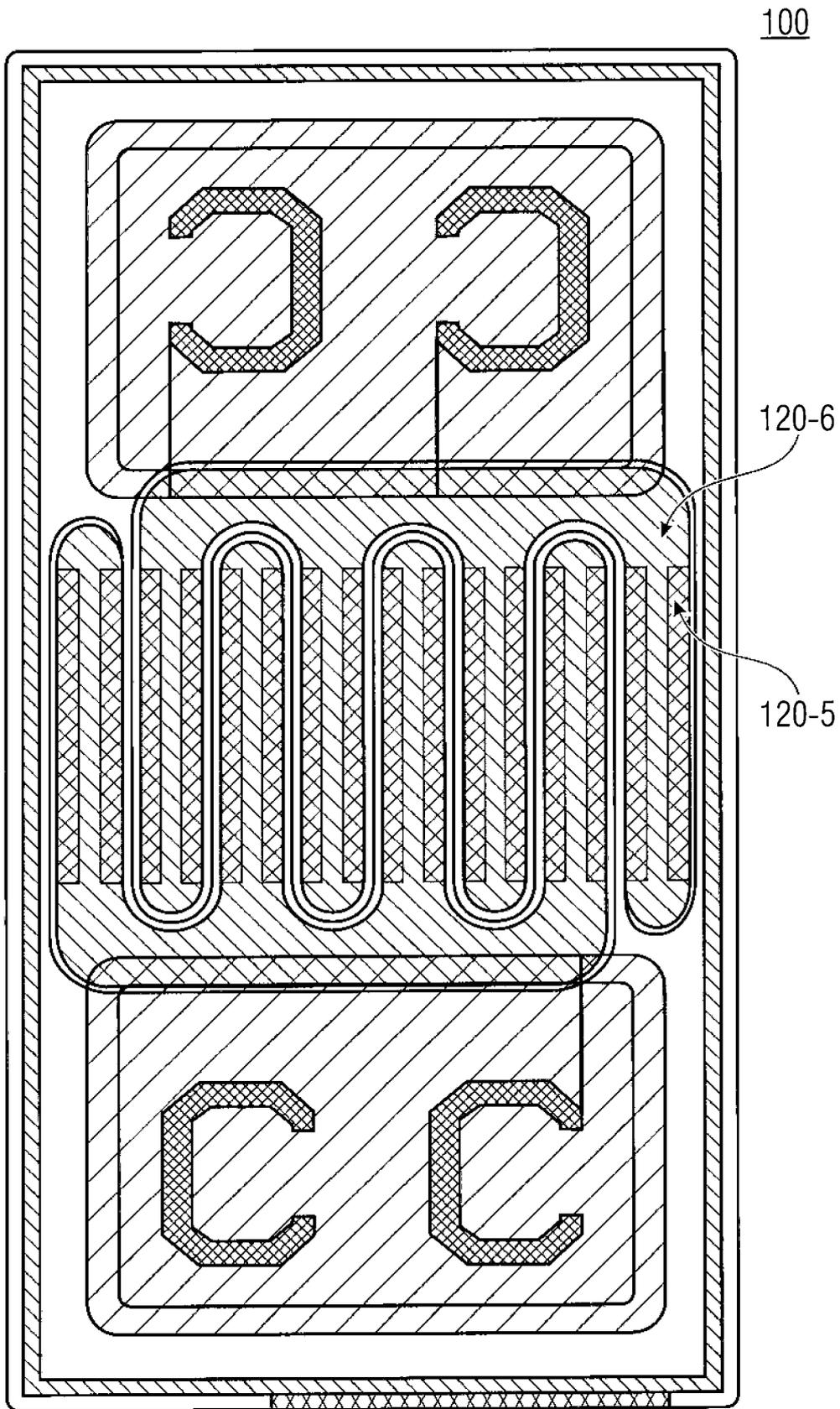


Fig. 9c

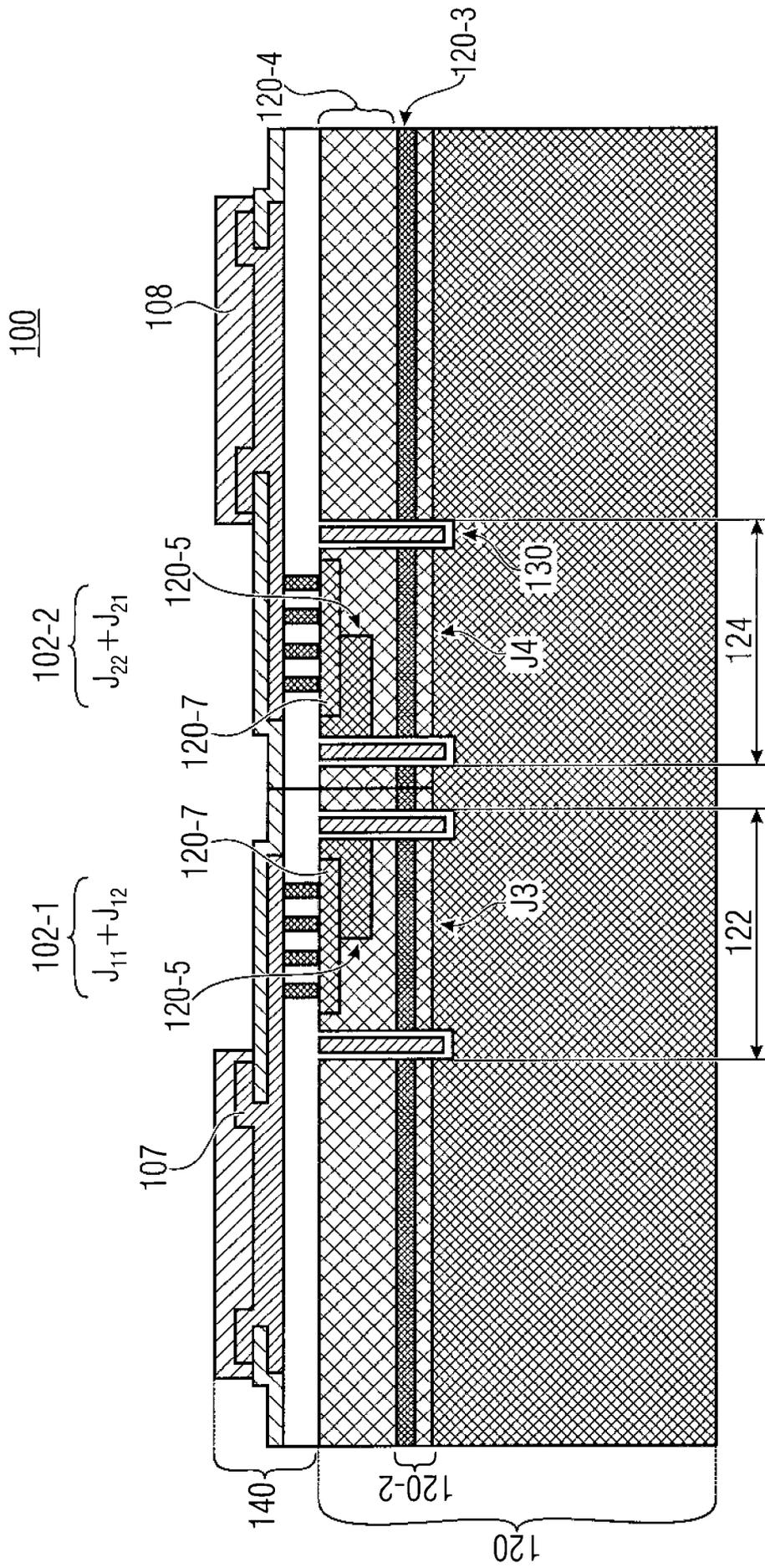


Fig. 9d

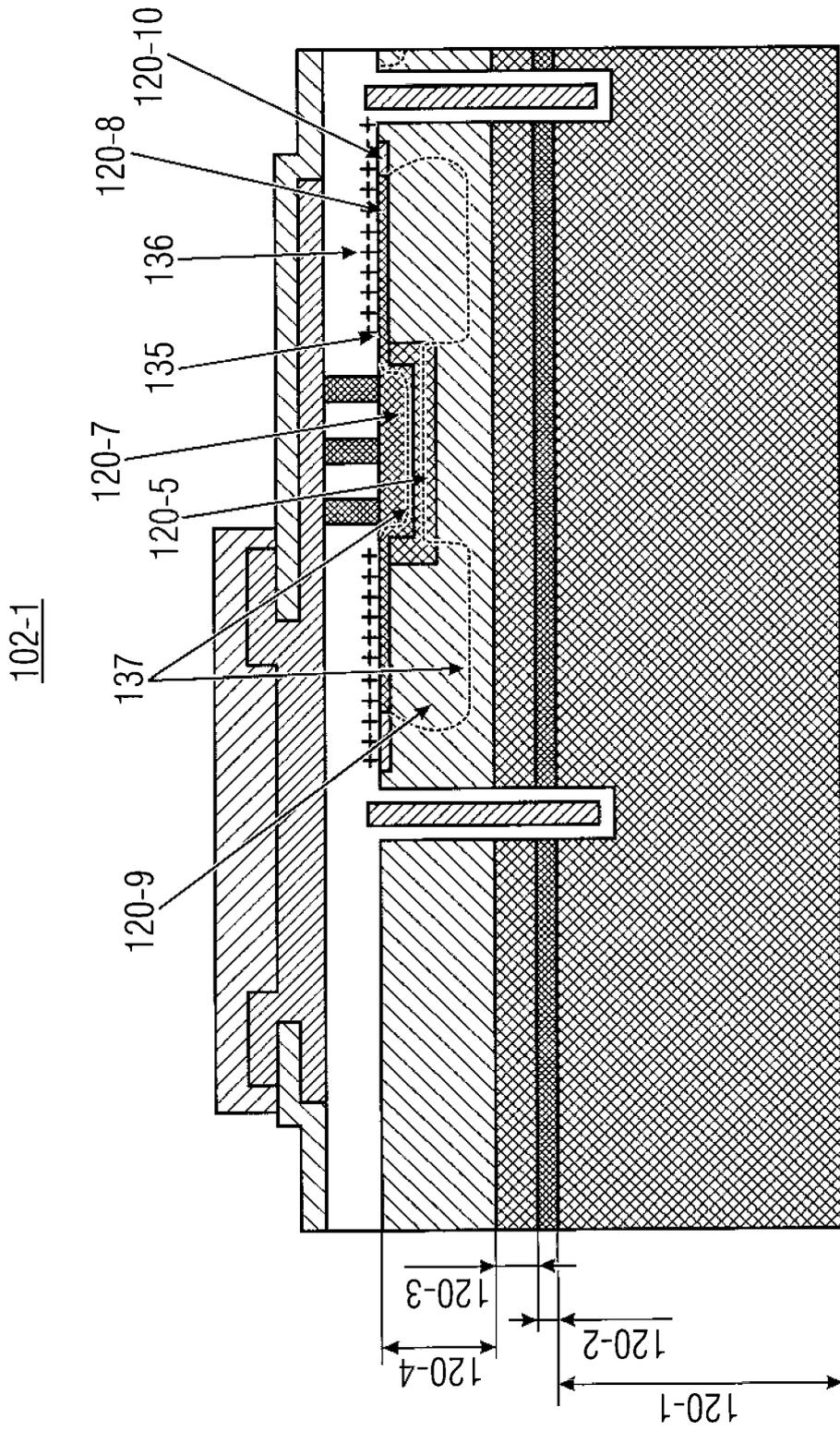


Fig. 9e

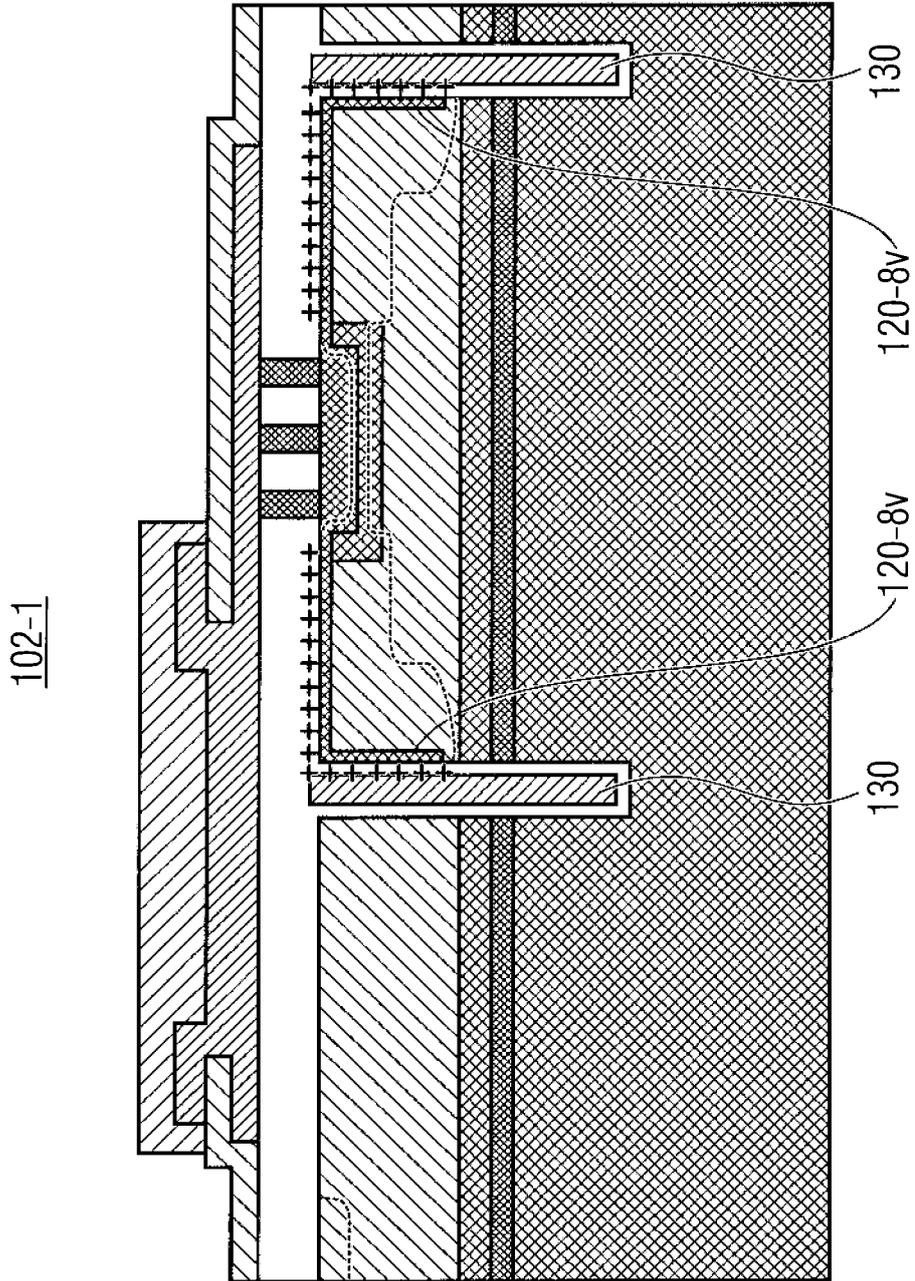


Fig. 9f