



(10) **DE 10 2008 049 395 B4** 2020.08.20

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 049 395.3**
(22) Anmeldetag: **29.09.2008**
(43) Offenlegungstag: **16.04.2009**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **20.08.2020**

(51) Int Cl.: **H01L 21/302** (2006.01)
H01L 33/32 (2010.01)
H01L 33/16 (2010.01)

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).

(30) Unionspriorität:

2007-98320	28.09.2007	KR
2008-86063	01.09.2008	KR

(73) Patentinhaber:

**Samsung Electronics Co., Ltd., Suwon-si,
Gyeonggi-do, KR**

(74) Vertreter:

**Grünecker Patent- und Rechtsanwälte PartG
mbB, 80802 München, DE**

(72) Erfinder:

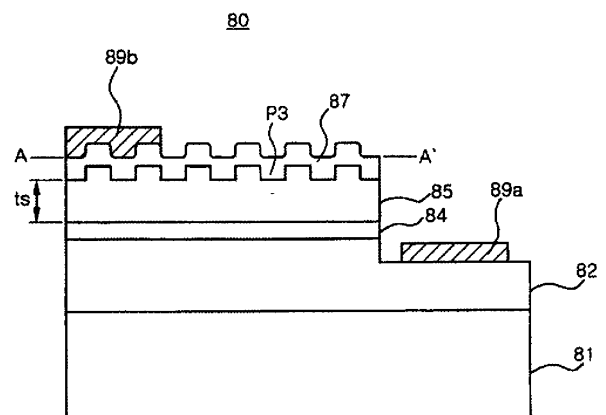
**Lee, Jong Ho, Suwon, Kyonggi, KR; Park, Moo
Youn, Gwangmyeong, Kyonggi, KR; Hwang, Soo
Ryong, Gunpo, Kyonggi, KR; Jung, Il Hyung,
Seoul, KR; Lee, Gwan Su, Suwon, Kyonggi, KR;
Kim, Jin Ha, Seoul, KR**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	2005 / 0 161 681	A1
US	2006 / 0 081 834	A1
US	2006 / 0 186 418	A1
US	5 293 392	A
JP	2007- 116 057	A

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Ausbilden eines feinen Musters und Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Ausbilden eines feinen Musters, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
Vorsehen eines c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls;
Ausbilden einer Maske mit einem vorbestimmten Muster auf dem c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristall;
Trockenätzen des c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls unter Verwendung der Maske, um ein erstes feines Muster auf dem c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristall auszubilden; und
Nassätzen des c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristall einschließlich des ersten feinen Musters, um das erste feine Muster in einer horizontalen Richtung zu erweitern und dadurch ein zweites feines Muster zu bilden;
wobei das durch das Nassätzen des c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls erhaltene zweite feine Muster eine untere Fläche und eine Seitenwand aufweist, die jeweils singuläre Kristallebenen aufweisen,
eine durch das Ausbilden des ersten feinen Musters erhaltene untere Fläche dieselbe c-Ebene aufweist wie eine durch das Ausbilden des zweiten feinen Musters erhaltene untere Fläche,
das Muster der Maske eine Vielzahl von feinen Löchern umfasst, und
das zweite feine Muster eine Vielzahl von hexagonalen feinen Löchern umfasst.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ausbilden eines feinen Musters und insbesondere ein Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED, die feine Muster aufweist, um die Lichtausbeute zu verbessern.

[0002] Es werden verschiedene Halbleiterbauelemente wie etwa LEDs, Laserdioden, Photodioden und Transistoren auf der Basis von Halbleitern hergestellt.

[0003] Für spezielle Funktionen muss ein Halbleiterbauelement unter Umständen feine Muster wie etwa periodische/nichtperiodische Muster in einem vorbestimmten Bereich aufweisen. Derartige feine Muster können durch das Ätzen einer Halbleiteroberfläche unter Verwendung eines bekannten Ätzverfahrens ausgebildet werden.

[0004] Bei einer Nitridhalbleiter-LED ist die Lichtextraktionseffizienz aufgrund einer Differenz in dem Brechungsindex zwischen der Außenseite und einem Nitridhalbleiter begrenzt. Um diese Begrenzung zu überwinden, kann eine fein gemusterte Struktur in einer Oberfläche der Nitridhalbleiter-LED ausgebildet werden.

[0005] Eine photonische Kristallstruktur mit feinen, periodischen Gittermustern wird derzeit untersucht, um die Leuchtdichte einer Halbleiter-LED zu verbessern. Außerdem werden ähnliche feine Gittermuster für ein Verfahren zum Verbessern der Leuchtdichte unter Verwendung des Prinzips der Oberflächenplasmonresonanz verwendet.

[0006] Der in diesem Musterungsverfahren verwendete Ätzprozess ist jedoch hinsichtlich der Ausbildung von feinen Mustern auf einer Halbleiteroberfläche beschränkt. Diese Beschränkung kann je nach dem verwendeten Ätzverfahren variieren.

[0007] Zum Beispiel können mit einem Trockenätzen wie etwa einem reaktiven Ionenätzen (RIE) und einem reaktiven Ionenätzen mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-RIE) präzise und reproduzierbare Muster sichergestellt werden, weil diese Verfahren eine Steuerung der Leistung gestatten und eine Anisotropie aufweisen. Das Trockenätzen weist jedoch den Nachteil auf, dass sich die Eigenschaften einer Halbleiteroberfläche aufgrund einer physikalischen Bombardierung mit Ionen oder neutralen Atomen während des Trockenätzens verschlechtern. Auch wenn ein dünner Materialfilm, der kein p-GaN ist, auf einer p-GaN-Schicht aufgetragen und dann unter Verwendung eines Trockenätzens gemustert wird, ist es schwierig, eine Beschädigung der p-GaN-Schicht an einem Teil, an dem der Film entfernt wurde, zu vermeiden.

[0008] Die durchgezogene Linie von **Fig. 1** gibt eine Strom-Spannung (I-V)-Kennlinie einer Nitridhalbleiter-LED an, die absichtlich durch ICP-RIE unter Verwendung eines Halogengases beschädigt wurde, bevor eine Elektrode auf einer p-GaN-Oberfläche ausgebildet wurde. Die durch X angegebene Strichlinie gibt eine I-V-Kennlinie einer Nitridhalbleiter-LED vor der Beschädigung an, die sich von der durch **◆** angegebenen I-V-Kennlinie einer unbeschädigten Nitridhalbleiter-LED unterscheidet. In der durch das Trockenätzen beschädigten Nitridhalbleiter-LED beginnt ein Strom mit einer niedrigen Spannung zu fließen. Dieser Strom ist jedoch nicht der Strom, der durch eine normale Rekombination von Trägern erzeugt wird, sondern ein Leckstrom, der beinahe kein Licht erzeugt.

[0009] Deshalb wird weiterhin nach einem Verfahren zum Wiederherstellen des ursprünglichen Zustands eines Kristalls nach einer durch ein Trockenätzen verursachten Beschädigung gesucht. Weil kein Stickstoff vorhanden ist, erfährt eine p-GaN-Schicht während eines Ätzprozesses eine Veränderung in ihrer Leitfähigkeit zu einem n-Typ. Aus diesem Grund kann eine Nachbearbeitung allgemein nicht zu der Wiederherstellung des beschädigten Kristalls beitragen. Die Umwandlung des Leitfähigkeitstyp stellt einen fatalen Defekt in einer Diode mit einem p-n-Übergang dar.

[0010] Im Gegensatz zu einem Trockenätzen verursacht ein Nassätzen keine Beschädigung einer Halbleiteroberfläche wie etwa p-GaN. Das Nassätzen weist jedoch den Nachteil auf, dass eine spezifische Ebene (z.B. eine c-Ebene) eines Nitrideinkristalls beinahe überhaupt nicht geätzt wird, sodass es schwierig ist, eine präzise Musterung zu erzielen. Und wenn die Ätztiefe übermäßig ist, wird das obere Ende eines Dünnschicht vollständig entfernt, sodass eine als Maske dienende Photoresistschicht abgetrennt wird.

[0011] Die JP 2007 - 116 057 A zeigt ein Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterelements. Das Halbleiterelement wird unter Verwendung einer epitaktisch gewachsenen GaN-Schicht gebildet, welche eine (0001)-Fläche als Hauptfläche aufweist. Das Halbleiterelement weist ein Substrat auf und die epitaktisch gewachsene Schicht ist auf dem Substrat ausgebildet. Eine Seitenwand mit einer m-Fläche, die senkrecht zu der (0001)-Fläche ist, wird in der epitaktisch gewachsenen Schicht durch Nassätzen ausgebildet.

[0012] Die US 2006 / 0 186 418 A1 zeigt eine Leuchtdiode, die eine Trägerstruktur und eine Mesa einer Gruppe-III-Nitrid-Licht emittierenden aktiven Struktur auf der Trägerstruktur enthält. Die Seitenwände der Mesa befinden sich entlang einer indizierten Kristallebene des Nitrids der Gruppe III. Es wird auch ein Verfahren zum Ausbilden der Diode gezeigt, das die Schritte des Entfernens eines Substrats von ei-

ner Gruppe-III-Nitrid-Lichtemissionsstruktur, die eine Sub-Mount-Struktur auf der dem Substrat gegenüberliegenden Gruppe-III-Nitrid-Lichtemissionsstruktur enthält, und des anschließenden Ätzens der Oberfläche des Nitrids der Gruppe III, von dem das Substrat durch anisotropes Ätzen entfernt wurde, umfasst, um Kristallfacetten auf der Oberfläche zu entwickeln, in der sich die Facetten entlang einer Indexebe-ne des Nitrids der Gruppe III befinden. Das Verfahren kann auch das Ätzen der lichtemittierenden Struktur mit einem anisotropen Ätzen umfassen, um eine Mesa mit Kanten entlang einer Indexebe-ne des Nitrids der Gruppe III zu bilden.

[0013] Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zum Ausbilden eines feinen Musters sowie ein verbessertes Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED zur Verfügung zu stellen.

[0014] Die Aufgabe wird durch die Gegenstände der unabhängigen Patenansprüche gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche

[0015] Ein Aspekt der vorliegenden Erfindung gibt ein Verfahren zum Ausbilden von feinen Mustern an, mit dem der durch ein Trockenätzen beschädigte Bereich minimiert werden kann, indem eine horizontale Ätzeigenschaft eines {0001}-c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls nach dem Trockenätzen genutzt wird.

[0016] Weiterhin gibt ein Aspekt der Erfindung ein Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED mit feinen Mustern und einer verbesserten optische Ausgabe unter Verwendung des Verfahrens zum Ausbilden von feinen Mustern an.

[0017] Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Ausbilden eines feinen Musters angegeben, das umfasst: Vorsehen eines c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls; Ausbilden einer Maske mit einem vorbestimmten Muster auf dem Halbleiterkristall; Trockenätzen des Halbleiterkristalls unter Verwendung der Maske, um ein erstes feines Muster auf dem Halbleiterkristall zu bilden; und Nassätzen des Halbleiterkristalls einschließlich des ersten feinen Musters, um das erste feine Muster in einer horizontalen Richtung zu erweitern und dadurch ein zweites feines Muster zu bilden. Das durch das Nassätzen des Halbleiterkristalls erhaltene zweite feine Muster kann eine untere Fläche und eine Seitenwand aufweisen, die jeweils singuläre Kristallebenen aufweisen. Die durch das Ausbilden des ersten feinen Musters erhaltene untere Fläche weist dieselbe c-Ebene auf, wie eine durch das Ausbilden des zweiten feinen Musters erhaltene untere Fläche. Das Muster der Maske umfasst eine Vielzahl von feinen Löchern

und das zweite feine Muster umfasst eine Vielzahl von hexagonalen feinen Löchern.

[0018] Das Halbleiterkristallsubstrat kann aus einem p-Nitridhalbleiter ausgebildet werden, das durch das Trockenätzen beschädigt werden kann.

[0019] Eine Innenwand des Lochs kann eine Kristallebene aufweisen, die mit der Zeit des Nassätzens, das ein sekundärer Ätzvorgang ist, variiert. Das Ausbilden eines zweiten feinen Musters kann das Durchführen eines Nassätzens umfassen, sodass die Seitenwand des zweiten feinen Musters eine m-Ebenenkomponente und eine s-Ebenenkomponente aufweist. Indem das Nassätzen fortgesetzt wird, kann eine innere Seitenwand des Lochs eine r-Ebenenkomponente aufweisen, die stabiler ist und eine niedrigere Deckung vorsehen kann.

[0020] Das zweite feine Muster kann einen Säulenaufbau aufweisen.

[0021] Je nach Bedarf kann das Ausbilden des zweiten feinen Musters vor oder nach der Entfernung der Maske durchgeführt werden.

[0022] Gemäß einem anderen Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED angegeben, das vorteilhaft auf eine photonische Kristallstruktur, die feine Muster aufweisen soll, oder auf eine das Prinzip der Oberflächenplasmonresonanz verwendende Struktur angewendet werden kann.

[0023] Das Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED umfasst folgende Schritte: Vorsehen einer mehrschichtigen Halbleiterstruktur einschließlich einer Halbleiterschicht eines ersten Leitfähigkeitstyps, einer Halbleiterschicht eines zweiten Leitfähigkeitstyps und einer aktiven Schicht zwischen den Halbleiterschichten des ersten und des zweiten Leitfähigkeitstyps; Ausbilden einer Maske mit einem vorbestimmten Muster auf der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps der mehrschichtigen Halbleiterstruktur; Trockenätzen der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps unter Verwendung der Maske, um ein erstes feines Muster auf der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps auszubilden; Nassätzen der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps einschließlich des ersten feinen Musters, um das erste feine Muster in einer horizontalen Richtung zu erweitern und dadurch ein zweites feines Muster zu bilden; und Ausbilden einer ersten Elektrode und einer zweiten Elektrode in einem Zustand, in dem die Maske entfernt wurde, wobei die erste und die zweite Elektrode jeweils mit den Halbleiterschichten des ersten und des zweiten Leitfähigkeitstyps verbunden sind. Die Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps ist ein c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristall, und das durch das Trockenät-

zen der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps erhaltene zweite feine Muster weist eine untere Fläche und eine Seitenwand auf, die jeweils singuläre Kristallebenen aufweisen. Das Muster der Maske umfasst eine Vielzahl von feinen Löchern und das zweite feine Muster umfasst eine Vielzahl von feinen hexagonalen Löchern.

[0024] Das an der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps ausgebildete zweite feine Muster kann als eine photonische Kristallstruktur dienen, die die Lichtextraktionseffizienz verbessert, indem sie den Totalreflexionseffekt vermindert, der durch einen niedrigen Brechungsindex der Umgebungsluft oder eines Dichtungsmittels verursacht wird, wenn an der aktiven Schicht erzeugtes Licht durch eine Oberfläche der p-Nitridhalbleiterschicht nach außen extrahiert wird.

[0025] Für eine zu bevorzugende photonische Kristallstruktur kann eine lichtdurchlässige, leitende Schicht auf der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps einschließlich des zweiten feinen Musters ausgebildet werden. Zum Beispiel kann eine lichtdurchlässige Metallschicht oder eine lichtdurchlässige, leitende Oxidschicht wie etwa ITO ausgebildet werden.

[0026] Um eine Struktur unter Verwendung des Prinzips der Oberflächenplasmonresonanz auszubilden, kann das Ausbilden einer zweiten Elektrode das Ausbilden einer hochreflektiven Metallschicht aus etwa Ag auf der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps einschließlich des zweiten feinen Musters umfassen. Die hochreflektive Metallschicht kann eine mehrschichtige Struktur aufweisen.

[0027] Die Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps kann eine Dicke aufweisen, bei der die durch eine Rekombination eines Elektron-Loch-Paares erzeugte Energie zu der aktiven Schicht injiziert werden kann, um ein Oberflächenplasmon an der Schnittstelle zwischen der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps und der hochreflektiven Metallschicht zu erregen.

[0028] Die Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps kann eine Dicke von ungefähr 50 nm oder weniger zwischen dem zweiten feinen Muster und der aktiven Schicht aufweisen.

[0029] Das Herstellungsverfahren gemäß der vorliegenden Erfindung kann vorteilhaft auf eine LED angewendet werden, die die mehrschichtige Halbleiterstruktur eines Nitridhalbleiters umfasst. In diesem Fall kann die Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps eine p-Nitridhalbleiterschicht sein.

[0030] Vorstehend genannte und andere Aspekte, Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung

werden durch die folgende ausführliche Beschreibung mit Bezug auf die beigegeführten Zeichnungen verdeutlicht.

Fig. 1 ist ein Kurvendiagramm, das eine Strom-Spannung (I-V)-Kurve einer Nitridhalbleiter-LED einschließlich einer durch Trockenätzen beschädigten p-GaN-Schicht zeigt.

Fig. 2A bis **Fig. 2D** sind Querschnittsansichten, die einen Prozess zum Ausbilden eines feinen Musters unter Verwendung eines Nassätzens gemäß einer beispielhaften Ausführungsform erläutern.

Fig. 3A bis **Fig. 3C** sind Rasterelektronenmikroskop (REM)-Bilder, die Musterveränderungen über die Zeit eines horizontalen Nassätzens in einem Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern gemäß einer beispielhaften Ausführungsform (Ausführungsform 1A) zeigen.

Fig. 4A bis **Fig. 4D** sind REM-Bilder, die Musterveränderungen über die Zeit eines horizontalen Nassätzens in einem Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern gemäß einer anderen beispielhaften Ausführungsform (Ausführungsform 1B).

Fig. 5 ist ein REM-Bild eines dreidimensionalen Musters (Säulenstruktur), das gemäß einer weiteren beispielhaften Ausführungsform (Ausführungsform 1C) erhalten wird.

Fig. 6A und **Fig. 6B** sind REM-Bilder von feinen Mustern jeweils nach dem Trockenätzen und nach dem horizontalen Nassätzen in einem Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern gemäß einer weiteren beispielhaften Ausführungsform (Ausführungsform 1D) der vorliegenden Erfindung.

Fig. 7A und **Fig. 7B** sind REM-Bilder, die Musterveränderungen über die Zeit eines horizontalen Nassätzens in einem Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern gemäß einer weiteren beispielhaften Ausführungsform (Ausführungsform 1E) der vorliegenden Erfindung zeigen.

Fig. 8A ist eine Querschnittsansicht einer Nitridhalbleiter-LED (eines Anwendungsbeispiels einer photonischen Kristallstruktur), die durch ein Herstellungsverfahren gemäß einer beispielhaften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung erhalten wird.

Fig. 8B ist eine Draufsicht auf eine feine Musterschicht entlang der Linie A-A' der Nitridhalbleiter-LED von **Fig. 8A**.

Fig. 9 ist ein Kurvendiagramm, das eine I-V-Kurve einer Nitridhalbleiter-LED zeigt, die durch ein Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED gemäß einer beispielhaften Ausführungs-

form (Ausführungsform 2) der vorliegenden Erfindung erhalten wird.

Fig. 10 ist ein Kurvendiagramm, das eine optische Ausgabe in Bezug auf den Strom der Nitridhalbleiter-LED zeigt, die durch das Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED gemäß der beispielhaften Ausführungsform (Ausführungsform 2) der vorliegenden Erfindung erhalten wird.

Fig. 11 ist eine Querschnittansicht einer Nitridhalbleiter-LED (eines Anwendungsbeispiels einer Oberflächenplasmonresonanzstruktur), die durch ein Herstellungsverfahren gemäß einer weiteren beispielhaften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung erhalten wird.

Fig. 12 ist ein Kurvendiagramm, das eine I-V-Kurve einer Nitridhalbleiter-LED zeigt, die durch ein Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED gemäß einer weiteren beispielhaften Ausführungsform (Ausführungsform 3) erhalten wird.

Fig. 13 ist ein Kurvendiagramm, das eine optische Ausgabe in Bezug auf den Strom der Nitridhalbleiter-LED zeigt, die durch das Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED gemäß der weiteren beispielhaften Ausführungsform (Ausführungsform 3) erhalten wird.

[0031] Im Folgenden werden beispielhafte Ausführungsformen im Detail mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben.

[0032] **Fig. 2A** bis **Fig. 2D** sind Querschnittansichten, die einen Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern unter Verwendung eines horizontalen Nassätzens gemäß einer beispielhaften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung erläutern.

[0033] Wie in **Fig. 2A** gezeigt, beginnt der Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern gemäß der vorliegenden Ausführungsform mit dem Vorsehen eines c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls 11.

[0034] Der Halbleiterkristall 11 kann ein Nitridhalbleiter wie etwa ein GaN oder ein anderer bekannter Halbleiter in einem Hexagonalsystem sein. Insbesondere kann die Halbleiterbasis 11 eine p-Nitridschicht sein, die durch ein Trockenätzen beschädigt werden kann. Gemäß der vorliegenden Ausführungsform wird ein hexagonaler Halbleiterkristall mit einer als c-Ebene {0001} vorgesehenen oberen Fläche verwendet.

[0035] Danach wird wie in **Fig. 2B** gezeigt eine Maske 18 mit vorbestimmten Mustern auf dem Halbleiterkristall 11 ausgebildet.

[0036] Die Maske 18 kann ein Photoresistmuster sein. In diesem Prozess kann die Maske 18 mit gewünschten Mustern ausgebildet werden, indem ein Photoresist auf eine obere Fläche des Halbleiterkristalls 11 aufgetragen wird, wobei dann ein allgemeiner Lithographieprozess oder ein holographischer Lithographieprozess ausgeführt wird.

[0037] Die Muster können bei Bedarf periodische Muster sein, wobei die Muster der verwendeten Maske 18 aber auch variieren können. Zum Beispiel können die Muster periodische Muster wie etwa eindimensionale Linienmuster oder zweidimensionale dreieckige oder rechteckige Gittermuster, quasi-periodische Muster mit einer kurzen oder langen Periodizität oder nichtperiodische Muster sein.

[0038] Die Größe und die Form der Muster kann variieren, auch wenn die Periodizität oder Quasi-Periodizität aufrechterhalten wird. Der Grund hierfür ist, dass ein anisotroper Nassätzprozess (in der vorliegenden Erfindung in der horizontalen Richtung) nach dem Trockenätzen mit der Maske durchgeführt wird. Dies wird im Folgenden ausführlich mit Bezug auf **Fig. 2C** und **Fig. 2D** beschrieben.

[0039] Ein hybrider Ätzprozess, der eine Kombination aus einem primären Trockenätzen und einem sekundären Nassätzen ist, wird in dem vorliegenden Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern verwendet.

[0040] Wie in **Fig. 2C** gezeigt, wird der Halbleiterkristall 11 unter Verwendung der Maske 18 trocken-geätzt, um erste feine Linienmuster P1 zu bilden. Das erste feine Muster P1 wird in dem vorliegenden Prozess durch ein Trockenätzen des Halbleiterkristalls 11 bis zu einer Breite, die der Breite W1 einer Öffnung der Maske 18 entspricht, und bis zu einer vorbestimmten Tiefe d1 des Halbleiterkristalls 11 erhalten. Die Tiefe des durch das Trockenätzen erhaltenen ersten feinen Musters P1 ist beinahe gleich der Tiefe eines endgültigen feinen Musters P2 von **Fig. 2D**. Die Breite W1 des ersten Musters P1 (d.h. die Größe des Musters) dagegen ist kleiner als die Breite des endgültigen feinen Musters P2. Dies wird im Folgenden ausführlicher mit Bezug auf **Fig. 2D** beschrieben.

[0041] Wie oben beschrieben, verursachen in dem vorliegenden Prozess die in dem Trockenätzen verwendeten Ionen und neutralen Atome einen beschädigten Bereich D über der gesamten Oberfläche des ersten feinen Musters P1 des Halbleiterkristalls 11. Das heißt, ein Bereich D, in dem der Kristall direkt dem Trockenätzen ausgesetzt und dadurch beschädigt wird, ist nicht nur auf der unteren Fläche, sondern auch in einer Seitenwand des ersten feinen Musters P1 vorhanden. Dies kann jedoch durch den Nassätzprozess von **Fig. 2D** minimiert werden.

[0042] In einem Prozess von **Fig. 2D** wird der Halbleiterkristall **11** einschließlich der ersten feinen Muster **P1** nassgeätzt. In dieser Ausführungsform wird das Nassätzen durchgeführt, nachdem die Maske **18** entfernt wurde. Die vorliegende Ausführungsform ist jedoch nicht darauf beschränkt, sondern die Maske **18** kann auch nach dem Nassätzprozess entfernt werden.

[0043] Der Nassätzprozess schreitet in einer horizontalen Richtung des ersten feinen Musters **P1** fort, weil es die stabile c-Ebene beinahe überhaupt nicht beeinflusst. Das horizontale Nassätzen fährt fort, bis eine Seitenwand zu einer spezifischen Kristallebene wird. Weil die Ätzrate an der spezifischen Kristallebene wesentlich vermindert wird, kann das Nassätzen mit einer hohen Reproduzierbarkeit durchgeführt werden.

[0044] Das erste feine Muster **P1** wird in der horizontalen Richtung erweitert und kann dadurch zu einem zweiten feinen Muster **P2** mit einer Seitenwand einer singulären Kristallebene werden. Folglich kann das zweite feine Muster **P2** eine Tiefe d_2 aufweisen, die gleich der Tiefe d_1 des ersten feinen Musters **P1** ist, und eine Breite W_2 , die breiter als die Breite W_1 des ersten feinen Musters **P1** ist.

[0045] In diesem Prozess kann wie in **Fig. 2D** gezeigt kein beschädigter Bereich erzeugt werden oder wird ein beschädigter Bereich in neu freigelegten Seitenwänden und an einer unteren Fläche entfernt, die durch die horizontale Erweiterung des ersten feinen Musters **P1** erhalten werden. Deshalb bleibt der beschädigte Bereich D' auf einen Bereich beschränkt, der der unteren Fläche des ersten feinen Musters **P1** entspricht.

[0046] Das zweite feine Muster **P2** kann also dazu beitragen, das Verhältnis der beschädigten Fläche D' zu der gesamten freiliegenden Fläche zu minimieren. Unter Verwendung dieses Prinzips können ein Maskenmuster und ein Trockenätzprozess kontrolliert werden, um das Verhältnis der beschädigten Fläche weiter zu reduzieren.

[0047] Indem insbesondere die Breite W_1 der Maske **18** reduziert wird und die Tiefe d_1 des ersten feinen Musters **P1** vergrößert wird, kann ein durch das zweite feine Muster **P2** erhaltener neuer Bereich vergrößert werden, während ein Bereich der beschädigten unteren Fläche in Entsprechung zu dem ersten feinen Muster **P1** verkleinert wird.

[0048] Folglich wird das Verhältnis der beschädigten Fläche D' in Bezug auf die gesamte freiliegende Fläche des zweiten feinen Musters **P2** wesentlich reduziert, sodass Einflüsse wie etwa eine Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften aufgrund des

durch das Trockenätzen beschädigten Bereichs im Wesentlichen verhindert werden können.

[0049] Gemäß der vorliegenden Ausführungsform kann die durch das Trockenätzen erhaltene untere Fläche des ersten feinen Musters eine c-Ebene sein, die der oberen Fläche des Halbleiterkristalls entspricht. Weil die c-Ebene eine sehr stabile Kristallebene ist, wird die untere Fläche des ersten feinen Musters beinahe überhaupt nicht geätzt, auch wenn die Seitenwand nassgeätzt wird. Dementsprechend wird die Tiefe des zweiten feinen Musters durch die Tiefe des ersten feinen Musters bestimmt und kann die Tiefe des endgültigen feinen Musters präzise durch das Trockenätzen kontrolliert werden.

[0050] Außerdem weist das horizontale Nassätzen gemäß der vorliegenden Ausführungsform eine sehr niedrige Ätzrate auf, wenn eine durch das Nassätzen freigelegte Seitenwand zu einer spezifischen Kristallebene wird. Zum Beispiel kann bei einem Nitrideinkristall eine Seitenwand eine s-Ebene $\{1-101\}$, eine m-Ebene $\{1-100\}$ oder eine r-Ebene $\{1-102\}$ sein.

[0051] Weil also der Nassätzprozess ein sich selbst begrenzender Prozess ist, kann er eine vorteilhafte Gleichförmigkeit und eine hohe Reproduzierbarkeit sicherstellen.

[0052] Die Kristallausrichtung des Nassätzens und die Maskenmuster spielen eine wichtige Rolle dabei, die Form und die Größe des endgültigen Musters in der vorliegenden Ausführungsform zu erhalten. Die Kristallausrichtung kann durch ein Maskenmuster bestimmt werden, das auf einem zu ätzenden Halbleiterkristall ausgebildet wird.

[0053] Weil also die Nassätzraten in Übereinstimmung mit der Kristallebene variieren, können verschiedene Muster in Übereinstimmung damit erhalten werden, welche Kristallebene an einer Seitenwand eines durch ein Maskenmuster freigelegten Kristallmusters freiliegt (siehe die Ausführungsformen 1A und 1B).

[0054] Insbesondere haben die Erfinder festgestellt, dass ein feines Muster eines hexagonalen Lochs erhalten werden kann, indem ein grobes kreisrundes Loch durch Trockenätzen ausgebildet wird, wobei dann ein Nassätzen in einer horizontalen Richtung durchgeführt wird. Das feine Muster weist eine Submikrometergröße auf und kann eine hexagonale Form aufweisen, bei der jede Seite einen Winkel von 120° in Bezug auf eine benachbarte Seite aufweist (siehe Ausführungsform 1C). Dies kann als besondere Eigenschaft der vorliegenden Ausführungsform betrachtet werden, die durch keines der Halbleiterätzverfahren aus dem Stand der Technik erzielt wird.

[0055] Weiterhin kann wie oben genannt jede in der Form eines Hexagons freiliegende Kristallebene durch das Nassätzen anders ausgebildet sein. Weil insbesondere die Kristallebene der Seitenwand in Übereinstimmung mit den Bedingungen des Nassätzens geneigt sein kann, kann eine Seitenwand mit einer das Auftragen eines Elektrodenmaterials unterstützenden Deckung vorgesehen werden.

[0056] Im Folgenden werden die Operationen und Effekte verschiedener Ausführungsformen ausführlicher beschrieben.

[0057] Gemäß einer Ausführungsform 1A wird eine Maske mit Linienmustern, die in einer $\langle 11-20 \rangle$ -Ausrichtung ausgebildet sind und in einer $\langle 1-100 \rangle$ -Ausrichtung angeordnet sind, auf einem c-Ebenen-GaN-Halbleiterkristall ausgebildet. Die Periode der Linienmuster ist mit ungefähr $0,6 \mu\text{m}$ gewählt. Anschließend wird ein Trockenätzen bis zu einer Tiefe von ungefähr $0,1 \mu\text{m}$ durchgeführt, wobei danach die Maske entfernt wird (siehe **Fig. 3A**).

[0058] Dann wird ein Nassätzen unter Verwendung einer wässrigen Lösung (4M KOH) bei ungefähr 100°C für ungefähr 10 Minuten durchgeführt, wobei dann eine Prüfung unter Verwendung eines Rasterelektrodenmikroskops durchgeführt wird und anschließend das Nassätzen für ungefähr 20 weitere Minuten fortgesetzt wird (das Nassätzen umfasst also insgesamt 30 Minuten).

[0059] Nach ungefähr 10 Minuten des Nassätzens wird eine zu Beginn etwas geneigte Seitenwand zu einer vertikalen Seitenwand wie sie in **Fig. 3B** gezeigt ist. Weil die Seitenwand zu einer $\{1-100\}$ -Ebene wird, die eine relativ stabile Kristallebene aus GaN, d.h. eine m-Ebene ist, wird die Seitenwand während des zusätzlichen Nassätzens von ungefähr 20 Minuten nicht weiter geätzt. Und natürlich wird eine Bodenfläche, die eine stabile c-Ebene ist, beinahe überhaupt nicht geätzt.

[0060] Gemäß der vorliegenden Ausführungsform wird ein aus dem Trockenätzen resultierender beschädigter Bereich von der Seitenwand und einem Teil einer unteren Fläche entfernt, sodass eine reine Kristallebene erhalten werden kann. Die Kristallebene kann einen hervorragenden elektrischen Kontakt in einem Halbleiterbauelement sicherstellen.

[0061] Gemäß einer Ausführungsform 1B wird ähnlich wie in der Ausführungsform 1A eine Maske mit einer Vielzahl von Linienmustern (Periode: ungefähr $0,6 \mu\text{m}$) auf einer c-Ebene eines GaN-Halbleiterkristalls ausgebildet, wobei jedoch die Ausrichtungen der Ausbildung und der Anordnung anders sind. In der vorliegenden Ausführungsform wird eine Vielzahl von Linienmustern in einer $\langle 1-100 \rangle$ -Ausrichtung ausgebildet und in einer $\langle 11-20 \rangle$ -Ausrichtung angeordnet.

Danach wird ein Trockenätzen bis zu einer Tiefe von ungefähr $0,1 \mu\text{m}$ durchgeführt, wobei dann die Maske entfernt wird (siehe **Fig. 4A**).

[0062] Danach wird ein Nassätzen unter Verwendung einer wässrigen Lösung (4M KOH) bei einer Temperatur von ungefähr 100°C für ungefähr 10 Minuten durchgeführt, wobei die resultierende Struktur unter Verwendung eines Rasterelektronenmikroskops (REM) geprüft wird (siehe **Fig. 4B**). Danach wird das Nassätzen für ungefähr 20 Minuten durchgeführt (insgesamt also 30 Minuten), wobei die resultierende Struktur unter Verwendung des REM geprüft wird (siehe **Fig. 4C**). Danach wird das Nassätzen für ungefähr 20 weitere Minuten (insgesamt also 50 Minuten) fortgesetzt, wobei die resultierende Struktur unter Verwendung des REM geprüft wird (siehe **Fig. 4D**).

[0063] Gemäß der vorliegenden Ausführungsform weist ein durch das Trockenätzen erhaltenes Muster (siehe **Fig. 4A**) eine ähnliche Form auf wie in der Ausführungsform 1A (siehe **Fig. 3A**).

[0064] Wie in **Fig. 4B** gezeigt, wird jedoch mit fortschreitendem horizontalen Nassätzen die Breite des Musters vergrößert (d.h. die Breite eines Musterstrukturteils wird allmählich vermindert). Wenn das Ätzen 30 Minuten oder länger durchgeführt wird, werden die Linienmuster zu Punktmustern, die wie in **Fig. 4C** gezeigt linear angeordnet sind. Wenn das Ätzen weiter fortschreitet, bleibt eine vollständig flache Ebene zurück (siehe **Fig. 4D**). Der Grund hierfür ist, dass sich die Mustern kontinuierlich in der Zeit ändern, weil das Nassätzen mit einer relativ hohen Ätzrate in einer $\langle 11-20 \rangle$ -Ausrichtung im Vergleich zu einer anderen stabilen Kristallebene durchgeführt wird.

[0065] Wie oben beschrieben können in gemäß der vorliegenden Ausführungsform ein eindimensionales Gitter und Punktmuster vorgesehen werden, die in der Länge und Breite variieren und eine relativ kleine Beschädigung aufweisen.

[0066] Die vorliegende Ausführungsform (horizontales Nassätzen eines Gitters mit einer $\langle 1-100 \rangle$ -Ausrichtung) macht deutlich, dass die c-Ebene, die gewöhnlich nicht nassgeätzt wird, zu einer vorbestimmten Dicke entfernt werden kann. Gemäß der vorliegenden Ausführung wird also ein Trockenätzen auf einer kleinen Fläche durchgeführt, um eine Rille zu bilden, wobei dann ein horizontales Nassätzen als folgender Prozess verändert wird. Außerdem kann die Dicke einer ursprünglichen Epitaxieschicht zu einer gewünschten Dicke reduziert werden, indem die Ätztiefe des anfänglichen Trockenätzens kontrolliert wird.

[0067] Insbesondere kann die Oberfläche einer p-GaN-Schicht nicht trocken geätzt werden, weil da-

durch eine Beschädigung verursacht würde, wobei sie aber auch nicht nassgeätzt werden kann, weil es sich um die c-Ebene handelt. Unter Verwendung des Prozesses gemäß der vorliegenden Ausführungsform kann die Dicke der p-GaN-Schicht jedoch reduziert werden, wobei gleichzeitig der beschädigte Teil minimiert wird.

[0068] Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Ausführungsformen 1A und 1B verwendet die im Folgenden beschriebene Ausführungsform 1C dreidimensionale Muster. Eine Vielzahl von kreisrunden Maskenmustern mit jeweils einer Größe von ungefähr 0,3 μm werden auf einem c-Ebenen-GaN-Halbleiterkristall ausgebildet. Die Vielzahl von kreisrunden Maskenmustern sind vertikal und horizontal mit einer Periode von ungefähr 0,6 μm angeordnet.

[0069] Danach wird ein Trockenätzen bis zu einer Tiefe von ungefähr 0,1 μm durchgeführt, wobei dann die Maske entfernt wird. Dann wird ein Nassätzen unter Verwendung einer wässrigen Lösung (4M KOH) bei ungefähr 100°C für ungefähr 10 Minuten durchgeführt, wobei die resultierende Struktur unter Verwendung eines REM geprüft wird. In **Fig. 5** ist zu erkennen, dass ein dreidimensionales Muster wie etwa eine Säulenstruktur (Durchmesser: ungefähr 130 nm) gebildet wird.

[0070] Gemäß einer Ausführungsform 1D wird ein dreidimensionales Muster wie etwa in der vorausgehenden Ausführungsform 1D verwendet, wobei aber eine Maske mit einer Vielzahl von kreisrunden Löchern mit einer Größe von ungefähr 100 nm auf einem c-Ebenen-GaN-Halbleiterkristall ausgebildet wird. Die Vielzahl der kreisrunden Löcher sind vertikal und horizontal mit dazwischen einer Periode von ungefähr 0,5 μm angeordnet.

[0071] Ein Trockenätzen (ungefähr 0,1 μm) wird auf der c-Ebenen-GaN-Fläche durch die Maske durchgeführt, um grobe, kreisrunde Lochmuster zu bilden, wobei die Maske dann entfernt wird (siehe **Fig. 6A**). Nachdem die kreisrunden Lochmuster ausgebildet wurden, wird ein Ätzen unter Verwendung einer wässrigen Lösung (4M KOH) bei ungefähr 108°C für ungefähr 30 Minuten durchgeführt. Wie in **Fig. 6B** gezeigt werden nach der Ausbildung von feinen Mustern mit einem Hexagonalloch mit einer Seite parallel zu einer {1-100}-m-Ebene die feinen Muster nicht weiter geätzt.

[0072] Eine Ausführungsform 1E ist der vorausgehenden Ausführungsform 1D ähnlich, wobei jedoch der Durchmesser der feinen Löcher größer vorgesehen ist, um die Beobachtung von Änderungen in einer Kristallebene an einer Seitenwand des endgültigen Loches zu vereinfachen. In der vorliegenden Ausführungsform ist die Periode der Löcher die gleiche wie in der vorausgehenden Ausführungsform 1D, wobei

jedoch der Durchmesser des Loches größer vorgesehen ist.

[0073] Ein Schnitt eines hexagonalen Loches, das aus dem horizontalen Nassätzen (100°C, wässrige Lösung (4M KOH)) resultiert, wird als REM-Bild erfasst. **Fig. 7A** zeigt das Ergebnis des Nassätzens von ungefähr 10 Minuten, und **Fig. 7B** zeigt das Ergebnis des Ätzens von 40 Minuten.

[0074] Mit fortschreitendem Nassätzen nimmt die durch eine s-Ebene eingenommene und weniger stabile Fläche ab, während die durch die m-Ebene eingenommene Fläche zunimmt. Insbesondere wird aus **Fig. 7A** deutlich, dass der Teil, an dem die m-Ebene auf die c-Ebene an der unteren Fläche trifft, die s-Ebene ist, wobei diese mit fortschreitendem Ätzen jedoch allmählich zu der r-Ebene und schließlich zu der c-Ebene verändert wird.

[0075] Eine Beobachtung des Schnitts des hexagonalen Lochs über die Zeit des Nassätzens ergibt, dass die Form der aus dem anfänglichen Trockenätzen erhaltenen Seitenwand mit fortschreitendem Nassätzen verändert wird, bis die stabile Kristallebene allmählich freiliegt. Insbesondere kann die Kristallebene der inneren Seitenwand des Lochs durch eine Kombination aus der {0001} c-Ebene an der unteren Fläche und der {1-101} s-Ebene, der {1-100} m-Ebene, der {1-102} r-Ebene oder ähnliches gebildet werden. Weil das Nassätzen nicht in der Richtung der c-Ebene fortschreitet, verändert sich die Tiefe des Loches nicht. Es ist jedoch anzunehmen, dass wenn die untere Fläche eine feine Unebenheit und Neigung aufweist, diese durch die horizontale Ätzoperation entfernt werden können.

[0076] Wie oben beschrieben sind in den gemäß der vorliegenden Erfindung erhaltenen feinen Mustern die durch das horizontale Ätzen freigelegten Kristallebenen die durch das Entfernen eines durch das Trockenätzen beschädigten Teils erhaltenen reinen Ebenen. Wenn also eine elektrische Kontaktschicht an der Kristallebene ausgebildet wird, kann eine hervorragende Ohmsche Eigenschaft sichergestellt werden. Und wenn ein Elektrodenmaterial aufgetragen wird, kann die Kontakteigenschaft verbessert werden, indem der Neigungsgrad der Kristallebene in Übereinstimmung mit der Kristallebene angepasst wird.

[0077] Der Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern kann angewendet werden, um Funktionsmuster verschiedener Halbleiterbauelemente auszubilden. Insbesondere kann er vorteilhaft angewendet werden, um ein Muster zum Verbessern der Lichtausbeute einer Halbleiter-LED auszubilden. Eine Ausführungsform von **Fig. 8A** ist mit einer Nitridhalbleiter-LED **80** assoziiert, die ein Anwendungsbeispiel eines photonischen Kristalls ist.

[0078] Wie in **Fig. 8A** gezeigt, umfasst eine Nitridhalbleiter-LED **80** ein Saphirsubstrat **81** sowie eine n-Nitridhalbleiterschicht **82**, eine aktive Schicht **84** und eine p-Nitridhalbleiterschicht **85**, die nacheinander auf dem Saphirsubstrat **81** ausgebildet werden.

[0079] Weiterhin umfasst die Nitridhalbleiter-LED **80** eine n-Elektrode **89a** und eine p-Elektrode **89b**. Die n-Elektrode **89a** und die p-Elektrode **89b** sind elektrisch jeweils mit der n-Nitridhalbleiterschicht **82** und der p-Nitridhalbleiterschicht **85** verbunden.

[0080] Periodische feine Muster **P3** sind auf der p-Nitridhalbleiterschicht **85** ausgebildet. Die feinen Muster **P3** können durch den mit Bezug auf **Fig. 2A** bis **Fig. 2D** beschriebenen Prozess (Ausführungsform 1D) erhalten werden. Das heißt, hexagonale Löcher können wie in **Fig. 8B** gezeigt periodisch angeordnet werden.

[0081] Gemäß der vorliegenden Ausführungsform und wie in **Fig. 8A** und **Fig. 8B** gezeigt ist weiterhin eine lichtdurchlässige leitende Schicht **87** auf der p-Nitridhalbleiterschicht **85** einschließlich der periodischen feinen Lochmuster **P3** ausgebildet. Die lichtdurchlässige leitende Schicht **87** kann aus einem beliebigen Material ausgebildet sein, das eine lichtdurchlässige Eigenschaft aufweist und gleichzeitig einen Ohmschen Kontakt sicherstellt. Zum Beispiel kann eine lichtdurchlässige Metallschicht wie etwa Ni/Au oder eine lichtdurchlässige leitende Oxidschicht wie etwa ITO verwendet werden.

[0082] Die Dicke t_s der p-Nitridhalbleiterschicht **85** kann 50 nm oder weniger betragen. Wenn die Dicke t_s der p-Nitridhalbleiterschicht **85** übermäßig klein ist, d.h. wenn die Distanz von der aktiven Schicht **84** zu einer Gitterstruktur übermäßig kurz ist, nimmt der Leckstrom drastisch zu. Aus diesem Grund sollte die Dicke t_s der p-Nitridhalbleiterschicht **85** bei 10 nm oder mehr liegen.

[0083] Die an der p-Nitridhalbleiterschicht **85** ausgebildeten feinen Muster **P3** können als photonische Kristallstruktur dienen, die die Lichtextraktionseffizienz verbessert, indem sie einen Totalreflexionseffekt vermindert, der durch einen niedrigen Brechungsindex der Umgebungsluft oder eines Dichtungsmittels verursacht wird, wenn an der aktiven Schicht **84** erzeugtes Licht durch eine Oberfläche der p-Nitridhalbleiterschicht **85** nach außen extrahiert wird.

[0084] Der Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern gemäß der vorliegenden Erfindung kann mit einer hohen Präzision und einer hervorragenden Reproduzierbarkeit implementiert werden, weil die Ätzrate in Übereinstimmung mit der Kristallebene variiert, wenn ein Nassätzen verwendet wird. Dementsprechend kann der Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern vorteilhaft auf die Nitridhalbleiter-LED

mit einer photonischen Kristallstruktur von **Fig. 8A** angewendet werden.

[0085] Die Ausführungsform von **Fig. 8A** verwendet eine photonische Kristallstruktur auf einer spezifischen Halbleiterschicht wie etwa einer p-Nitridhalbleiterschicht. Die Ausführungsform von **Fig. 8A** kann jedoch auch vorteilhaft auf ein Verfahren zum Ausbilden von periodischen feinen Mustern für ein Oberflächenplasmon oder auf ein Verfahren zum Ausbilden von gewünschten feinen Mustern angewendet werden, auch wenn nichtperiodische ungleichmäßige Muster für die Lichtextraktion aus verschiedenen Materialien ausgebildet werden.

[0086] Die im Folgenden beschriebene Ausführungsform 2 nimmt auf ein Experiment Bezug, das mit einer LED mit einem photonischen Kristall durchgeführt wurde.

[0087] Gemäß der Ausführungsform 2 wird eine Nitridhalbleiter-LED mit einer aktiven Schicht einschließlich eines InGaN-Mehrfachquantentopfs mit einer grünen Wellenlänge hergestellt.

[0088] Für die gemäß der vorliegenden Ausführungsform hergestellte LED wird eine p-GaN-Schicht mit einer Dicke von 150 nm auf eine Dicke von ungefähr 54 nm unter Verwendung einer Maske mit kreisrunden Löchern unter ähnlichen Bedingungen wie in der Ausführungsform 1D trockengeätzt, wobei dann ein Nassätzen für ungefähr 10 Minuten durchgeführt wird, um hexagonale Lochmuster auszubilden. Danach wird ähnlich wie bei dem in **Fig. 8a** gezeigten Aufbau ein lichtdurchlässiges Elektrodenoxid wie etwa ITO auf der p-GaN-Schicht als lichtdurchlässige Elektrodenoxid zum Ausbilden eines p-Kontakts aufgetragen. Ein Mesa-Ätzen wird durchgeführt, um eine n-GaN-Schicht teilweise freizulegen, und ein n-Kontakt wird auf der freigelegten n-GaN-Schicht ausgebildet.

[0089] Um die Verbesserung der elektrischen Eigenschaften und der Lichtausbeute einer durch das oben beschriebene Verfahren hergestellten Halbleiter-LED zu bestätigen, wurden die elektrischen Eigenschaften und die Lichtausbeute einer Nitridhalbleiter-LED gemäß der Ausführungsform 2 gemessen. Die Messergebnisse sind in **Fig. 9** und **Fig. 10** im Vergleich zu einem Bezugsbeispiel „Ref“ angegeben. Das Bezugsbeispiel Ref wird durch eine LED erhalten, in der nur ein Ag-Kontakt auf einer p-Nitridhalbleiterschicht angeordnet ist und keine Muster auf derselben ausgebildet sind.

[0090] **Fig. 9** ist ein Kurvendiagramm, das eine I-V-Kurve einer Nitridhalbleiter-LED gemäß der vorliegenden Ausführungsform zeigt. **Fig. 10** ist ein Kurvendiagramm, das eine optische Ausgabe in Bezug

auf den Strom der Nitridhalbleiter-LED gemäß der aktuellen Ausführungsform zeigt.

[0091] Wie in **Fig. 9** gezeigt, weist die gemäß der Ausführungsform 2 hergestellte Nitridhalbleiter-LED im Gegensatz zu der Nitridhalbleiter-LED von **Fig. 1** eine I-V-Kennlinie auf, in der beinahe kein Leckstrom vorhanden ist, der durch eine durch das Trockenätzen erzeugte Beschädigung des Kristalls verursacht wird. Im Vergleich zu dem Bezugsbeispiel Ref weist die Nitridhalbleiter-LED eine höhere Spannung bei einem gleichen Strom auf, wobei die Differenz jedoch unerheblich ist. Das Flächenverhältnis einer durch das Nassätzen erhaltenen Kristallebene kann weiter erhöht werden, sodass der Kontaktwiderstand verbessert werden kann und bessere elektrische Eigenschaften als in der vorliegenden Ausführungsform erzielt werden können.

[0092] **Fig. 10** ist ein Kurvendiagramm, das eine optische Ausgabe in Bezug auf den Strom einer Nitridhalbleiter-LED zeigt, die gemäß der Ausführungsform 2 hergestellt wurde.

[0093] Aus **Fig. 10** wird deutlich, dass die Nitridhalbleiter-LED gemäß der vorliegenden Ausführungsform im Vergleich zu dem Vergleichsbeispiel Ref eine Erhöhung der Leuchtdichte von ungefähr 24% bei 350 mA aufgrund eines Beugungseffekts eines photonischen Kristalls erzielt. Das durch einen Ätzprozess gemäß der vorliegenden Ausführungsform erzeugte photonische Kristallmuster wird also mit einem präzisen Profil ausgebildet, sodass ein Teil des durch eine Totalreflexion in einem LED-Chip eingeschlossenen Lichts gebeugt wird und sich mit einem Winkel fortbewegt, der eine Emission aus dem Chip gestattet. Dadurch kann die Leuchtdichte der LED beträchtlich verbessert werden.

[0094] **Fig. 11** ist eine Schnittansicht einer Nitridhalbleiter-LED, die ein Anwendungsbeispiel des Prinzips der Oberflächenplasmonresonanz ist.

[0095] Ein für diese Anwendung verwendetes Oberflächenplasmon ist eine kollektive Ladungsdichtenoszillation von Elektronen auf einer Oberfläche eines Metalldünnsfilms. Ein durch die kollektive Ladungsdichtenoszillation erzeugte Oberflächenplasmonwelle ist eine elektromagnetische Oberflächenwelle, die sich entlang einer Grenzfläche zwischen einem Metall und einem Dielektrikum fortpflanzt. Wenn eine Kopplung zwischen dem Oberflächenplasmon und einer aktiven Schicht auftritt, wird eine spontane Emission an der aktiven Schicht durch das Oberflächenplasmon vergrößert und wird ein großer Teil des durch die spontane Emission erzeugten Lichts erregt, um das Oberflächenplasmon zu erzeugen. Eine Halbleiter-LED, die dieses Prinzip verwendet, um die Effizienz zu verbessern, kann als Oberflächenplasmon-Halbleiter-LED bezeichnet werden.

[0096] In **Fig. 11** ist eine Oberflächenplasmon-Nitridhalbleiter-LED **110** auf einem Submontagesubstrat **120** durch Löten montiert. Die Oberflächenplasmon-Nitridhalbleiter-LED **110** umfasst ein Nitridhalbleiter-Saphirsubstrat **111**, wobei eine n-Nitridhalbleiterschicht **112**, eine aktive Schicht **114** und eine p-Nitridhalbleiterschicht **115** aufeinander folgend auf dem Nitridhalbleiter-Saphirsubstrat **111** angeordnet sind.

[0097] Weiterhin umfasst die Nitridhalbleiter-LED **110** eine n-Elektrode **117** und eine p-Elektrode **118**, die jeweils elektrisch mit der n-Nitridhalbleiterschicht **112** und der p-Nitridhalbleiterschicht **115** verbunden sind.

[0098] Feine Muster **P4** mit einer Periodizität sind auf der p-Nitridhalbleiterschicht **115** ausgebildet. Diese feinen Muster **P4** können periodisch angeordnete hexagonale Lochmuster sein, die durch den mit Bezug auf **Fig. 2A** bis **Fig. 2D** erläuterten Prozess (Ausführungsform 1D) erhalten werden.

[0099] In der vorliegenden Ausführungsform wird wie in **Fig. 11** gezeigt eine hochreflektive Metallschicht als p-Elektrode **118** auf der p-Nitridhalbleiterschicht **115** einschließlich der periodischen feinen Lochmuster **115** ausgebildet. Die hochreflektive Metallschicht kann aus einem Material ausgebildet werden, das einen vorbestimmten Reflexionsgrad aufweist und gleichzeitig einen Ohmschen Kontakt sicherstellt. Zum Beispiel kann die hochreflektive Metallschicht aus einem einfach oder mehrfach geschichteten Material wie etwa Al, Ag, Au, Cr, Ni, Pd und Pt sein.

[0100] Weiterhin ist die Distanz zwischen der aktiven Schicht **114** und der hochreflektiven Metallschicht sehr wichtig für die Erzeugung einer Oberflächenplasmonresonanz. Dementsprechend muss die p-Nitridhalbleiterschicht **115** eine ausreichende Dicke aufweisen, damit das von der aktiven Schicht **114** emittierte Licht das Oberflächenplasmon an einer Schnittstelle zwischen der p-Nitridhalbleiterschicht **115** und der hochreflektiven Metallschicht erregen kann.

[0101] Die Dicke t_s der p-Nitridhalbleiterschicht **115** kann weniger als ungefähr 50 nm betragen. Wenn die Dicke t_s der p-Nitridhalbleiterschicht **115** nicht ausreicht, d.h. wenn die Distanz von der aktiven Schicht **114** zu einer Gitterstruktur übermäßig kurz ist, tritt eine drastische Erhöhung des Leckstroms auf. Aus diesem Grund kann die p-Nitridhalbleiterschicht **115** eine Dicke t_s von 10 nm oder mehr aufweisen.

[0102] Gemäß der vorliegenden Ausführungsform kann die Oberflächenplasmonresonanz für eine LED genutzt werden, um die Lichtemissionseffizienz zu verbessern.

[0103] Bei dieser Konfiguration müssen feine Muster **P4** mit einer periodischen Gitterstruktur an einer Schnittstelle zwischen der p-Nitridhalbleiterschicht **115** und der hochreflektiven Metallschicht vorgesehen werden, um das erregte Oberflächenplasmon zu Licht zurückzuwandeln. Insbesondere werden ein präzises Intervall und eine präzise Größe der feinen Muster **P4** auf der Basis einer durch die aktive Schicht **114** erzeugten Wellenlänge bestimmt.

[0104] Deshalb ist ein Trockenätzen zu bevorzugen. Wie weiter oben genannt, ist jedoch die Distanz zwischen der aktiven Schicht **114** und der hochreflektiven Metallschicht von großer Bedeutung unter den verschiedenen Bedingungen, die eine Oberflächenplasmonresonanz veranlassen, zu denen weiterhin etwa die Wellenlänge des einfallenden Lichts und der Brechungsindex eines das Metall kontaktierenden Materials gehören. Weil die Distanz allgemein 50 nm oder weniger beträgt und damit relativ kurz ist, verursacht eine Beschädigung der p-Nitridhalbleiterschicht **115** durch das Trockenätzen schwerwiegende Probleme. Der Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern kann jedoch den in den feinen Mustern **P4** in der endgültigen Form verbleibenden beschädigten Teil minimieren. Also auch wenn ein Nassätzen verwendet wird, kann der Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern eine hohe Präzision und eine hervorragende Reproduzierbarkeit erzielen, weil die Ätzrate in Übereinstimmung mit der Kristallebene variiert. Dementsprechend kann der Prozess zum Ausbilden von feinen Mustern vorteilhaft auf die Oberflächenplasmon-Nitridhalbleiter-LED von **Fig. 11** angewendet werden.

[0105] Gemäß einer Ausführungsform 3 wird ähnlich wie in der Ausführungsform 2 eine Nitridhalbleiter-LED mit einer aktiven Schicht aus einem InGaN-Mehrfachquantentopf mit einer grünen Wellenlänge hergestellt.

[0106] Die gemäß der vorliegenden Ausführungsform hergestellte LED umfasst hexagonale Lochmuster, die durch das Durchführen eines Trockenätzens bis zu einer Tiefe von ungefähr 33 nm unter Verwendung einer Maske mit kreisrunden Löchern auf einer p-GaN-Schicht mit einer Dicke von ungefähr 66 nm unter ähnlichen Bedingungen wie in der Ausführungsform 1D und durch das anschließende Durchführen eines Nassätzens für ungefähr 10 Minuten ausgebildet werden. Danach wird ähnlich wie bei dem in **Fig. 11** gezeigten Aufbau ein p-Kontakt ausgebildet, indem eine mehrschichtige Metallelektrode mit einer hochreflektiven Materialschicht, die eine Ag-Schicht auf der p-GaN-Schicht ist, aufgetragen wird, und wird ein n-Kontakt auf einer n-GaN-Schicht ausgebildet, indem ein Mesa-Ätzen durchgeführt wird, um die n-GaN-Schicht teilweise freizulegen.

[0107] Um die Verbesserung der elektrischen Eigenschaften und der Leuchtdichte der hergestellten Nitridhalbleiter-LED zu prüfen, wurden die elektrischen Eigenschaften und die Leuchtdichte der gemäß der Ausführungsform 3 erhaltenen Nitridhalbleiter-LED gemessen. Die Messergebnisse sind in **Fig. 12** und **Fig. 13** in Vergleich zu einem Bezugsbeispiel Ref angegeben. Das Bezugsbeispiel Ref wird durch eine LED erhalten, die eine mehrschichtige Metallelektrode enthält, die identisch mit derjenigen der Ausführungsform 3 ist, wobei jedoch keine Muster auf einer p-Nitridhalbleiterschicht vorgesehen sind.

[0108] **Fig. 12** ist ein Kurvendiagramm, das eine I-V-Kurve einer Nitridhalbleiter-LED gemäß der vorliegenden Ausführungsform zeigt. **Fig. 13** ist ein Kurvendiagramm, das eine optische Ausgabe in Bezug auf den Strom der Nitridhalbleiter-LED gemäß der aktuellen Ausführungsform zeigt.

[0109] Aus **Fig. 12** wird deutlich, dass die gemäß der Ausführungsform 3 hergestellte Nitridhalbleiter-LED eine I-V-Kennlinie aufweist, in der während des Trockenätzens beinahe kein Leckstrom erzeugt wird. Etwas unregelmäßige Kurven sind in der I-V-Kennlinie der vorliegenden Ausführungsform zu beobachten, die eine sehr dünne n-Nitridhalbleiterschicht im Vergleich zu der allgemeinen Nitridhalbleiter-LED aufweist.

[0110] Im Vergleich zu dem Bezugsbeispiel Ref weist die Nitridhalbleiter-LED gemäß der vorliegenden Ausführungsform eine beinahe konstante Spannung bei einem gleichen Strom auf. Bessere elektrische Eigenschaften als in der aktuellen Ausführungsform können erzielt werden, wenn das Flächenverhältnis der durch das Nassätzen erhaltenen Kristallebene vergrößert wird und dadurch der Kontaktwiderstand verbessert wird.

[0111] **Fig. 13** ist ein Kurvendiagramm, das die optische Ausgabe in Bezug auf den Strom einer Nitridhalbleiter-LED gemäß der Ausführungsform 3 zeigt.

[0112] Aus **Fig. 13** wird im Vergleich zu dem Bezugsbeispiel Ref deutlich, dass die Nitridhalbleiter-LED gemäß der vorliegenden Ausführungsform eine Leuchtdichte aufweist, die aufgrund des Oberflächenplasmoneneffekts um ungefähr 64% bei einem Strom von 350 mA verbessert ist. Das heißt, die hergestellte feine Gitterstruktur wird mit einem präzisen Profil ausgebildet, sodass die Energie eines in einen Mehrfachquantentopf in einem LED-Chip injizierten Elektronen-Loch-Paars durch das Medium des Oberflächenplasmons zu Licht gewandelt wird und das Licht aus dem LED-Chip nach außen emittiert wird.

[0113] Weiterhin wird ein Teil des durch eine Selbstemission ohne Verwendung des Oberflächenplas-

mons als Medium erzeugten und durch die Totalreflexion eingeschlossenen Lichts gebeugt, um die Fortpflanzungsrichtung des Lichts zu einem Winkel zu wandeln, der eine Emission des Lichts aus dem Chip heraus gestattet. Dadurch kann die Leuchtdichte der LED beträchtlich verbessert werden.

[0114] Gemäß der vorliegenden Erfindung wird nur ein minimaler Teil einer gewünschten Musterfläche trockengeätzt, wobei dann ein Nassätzen in einer horizontalen Richtung zum Ausbilden einer Struktur durchgeführt wird, sodass die durch das Trockenätzen verursachte Beschädigung minimiert wird. Weiterhin werden die Kristallausrichtung (Musterbildungsrichtung) und die Nassätzbedingungen (wie etwa die Zeit) korrekt gesteuert, sodass eine hohe Reproduzierbarkeit der feinen Muster sichergestellt werden kann, während die Höhe und die Größe der feinen Muster fein kontrolliert werden. Es kann eine Halbleiter-LED mit einer hervorragende Lichtausbeute erhalten werden, wenn derartige feine Muster auf eine photonische Kristallstruktur oder auf eine das Oberflächenplasmonprinzip verwendende Struktur angewendet werden.

[0115] Weiterhin wird die spezifische geometrische Form der feinen Muster gemäß der vorliegenden Erfindung während des folgenden Nassätzprozesses auf natürliche Weise in Übereinstimmung mit dem hexagonalen Kristallsystem ausgebildet. Die feinen Muster weisen also singuläre Kristallebenen wie etwa die c-Ebene, die m-Ebene, die s-Ebene und/oder die r-Ebene auf, in denen beinahe keine Beschädigung auftritt. Weil die Kristallebene in einem direkten Kontakt zu einer Elektrodenschicht aus Metall oder einem leitenden Oxid in der Halbleiter-LED sein kann, ist dies vorteilhafter für die Ausbildung eines Ohmschen p-Kontakts.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Ausbilden eines feinen Musters, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
Vorsehen eines c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls;
Ausbilden einer Maske mit einem vorbestimmten Muster auf dem c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristall;
Trockenätzen des c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls unter Verwendung der Maske, um ein erstes feines Muster auf dem c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristall auszubilden; und
Nassätzen des c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls einschließlich des ersten feinen Musters, um das erste feine Muster in einer horizontalen Richtung zu erweitern und dadurch ein zweites feines Muster zu bilden;
wobei das durch das Nassätzen des c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristalls erhaltene zweite feine Mus-

ter eine untere Fläche und eine Seitenwand aufweist, die jeweils singuläre Kristallebenen aufweisen, eine durch das Ausbilden des ersten feinen Musters erhaltene untere Fläche dieselbe c-Ebene aufweist wie eine durch das Ausbilden des zweiten feinen Musters erhaltene untere Fläche, das Muster der Maske eine Vielzahl von feinen Löchern umfasst, und
das zweite feine Muster eine Vielzahl von hexagonalen feinen Löchern umfasst.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der aus c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristall einem p-Nitridhalbleiter ausgebildet ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Ausbilden des zweiten feinen Musters das Durchführen eines Nassätzens umfasst, sodass die Seitenwand des zweiten feinen Musters eine m-Ebenenkomponente und eine s-Ebenenkomponente aufweist.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Ausbilden des zweiten feinen Musters das Durchführen eines Nassätzens umfasst, sodass die Seitenwand des zweiten feinen Musters eine r-Ebenenkomponente aufweist.

5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Ausbilden des zweiten feinen Musters durchgeführt wird, nachdem die Maske entfernt wurde.

6. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Ausbilden des zweiten feinen Musters durchgeführt wird, bevor die Maske entfernt wurde.

7. Verfahren zum Herstellen einer Halbleiter-LED, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
Vorsehen einer mehrschichtigen Halbleiterstruktur, die eine Halbleiterschicht eines ersten Leitfähigkeitstyps, eine Halbleiterschicht eines zweiten Leitfähigkeitstyps und eine aktive Schicht zwischen den Halbleiterschichten des ersten und des zweiten Leitfähigkeitstyps enthält, wobei die mehrschichtige Halbleiterstruktur aus einem Nitridhalbleiter ausgebildet ist;
Ausbilden einer Maske mit einem vorbestimmten Muster auf der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps der mehrschichtigen Halbleiterstruktur;
Trockenätzen der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps unter Verwendung der Maske, um ein erstes feines Muster auf der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps auszubilden;
Nassätzen der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps einschließlich des ersten feinen Musters, um das erste feine Muster in einer horizontalen Richtung zu erweitern und dadurch ein zweites feines Muster zu bilden; und
Ausbilden einer ersten Elektrode und einer zweiten Elektrode in einem Zustand, in dem die Maske entfernt wurde, wobei die erste und die zweite Elektro-

de jeweils mit den Halbleiterschichten des ersten und des zweiten Leitfähigkeitstyps verbunden sind; wobei die Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps ein c-Ebenen-Hexagonal-Halbleiterkristall ist und das durch das Nassätzen der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps erhaltene zweite feine Muster eine untere Fläche und eine Seitenwand aufweist, die jeweils singuläre Kristallebenen aufweisen, eine durch das Ausbilden des ersten feinen Musters erhaltene untere Fläche dieselbe c-Ebene aufweist wie die durch das Ausbilden des zweiten feinen Musters erhaltene untere Fläche, das Muster der Maske eine Vielzahl von feinen Löchern umfasst, und das zweite feine Muster eine Vielzahl von feinen hexagonalen Löchern umfasst.

8. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das Ausbilden der zweiten Elektrode das Ausbilden einer transparenten Elektrodenschicht auf der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps einschließlich des zweiten feinen Musters umfasst.

9. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das Ausbilden der zweiten Elektrode das Ausbilden einer hochreflektiven Metallschicht auf der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps einschließlich des zweiten feinen Musters umfasst.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps eine Dicke aufweist, die gestattet, dass das an der aktiven Schicht emittierte Licht ein Oberflächenplasmon an einer Schnittstelle zwischen der Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps und der hochreflektiven Metallschicht erregt.

11. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps eine Dicke von ungefähr 50 nm oder weniger aufweist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, wobei die Halbleiterschicht des ersten Leitfähigkeitstyps und die Halbleiterschicht des zweiten Leitfähigkeitstyps jeweils eine n-Nitridhalbleiterschicht und eine p-Nitridhalbleiterschicht sind.

13. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das Ausbilden des zweiten feinen Musters das Durchführen eines Nassätzens umfasst, sodass die Seitenwand des zweiten feinen Musters eine m-Ebenenkomponente und eine s-Ebenenkomponente aufweist.

14. Verfahren nach Anspruch 7, wobei das Ausbilden des zweiten feinen Musters das Durchführen eines Nassätzens umfasst, sodass die Seitenwand des zweiten feinen Musters eine r-Ebenenkomponente aufweist.

15. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die Maske zwischen dem Ausbilden des ersten feinen Musters

und dem Ausbilden des zweiten feinen Musters entfernt wird.

16. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die Maske entfernt wird, nachdem das zweite feine Muster ausgebildet wurde.

Es folgen 16 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

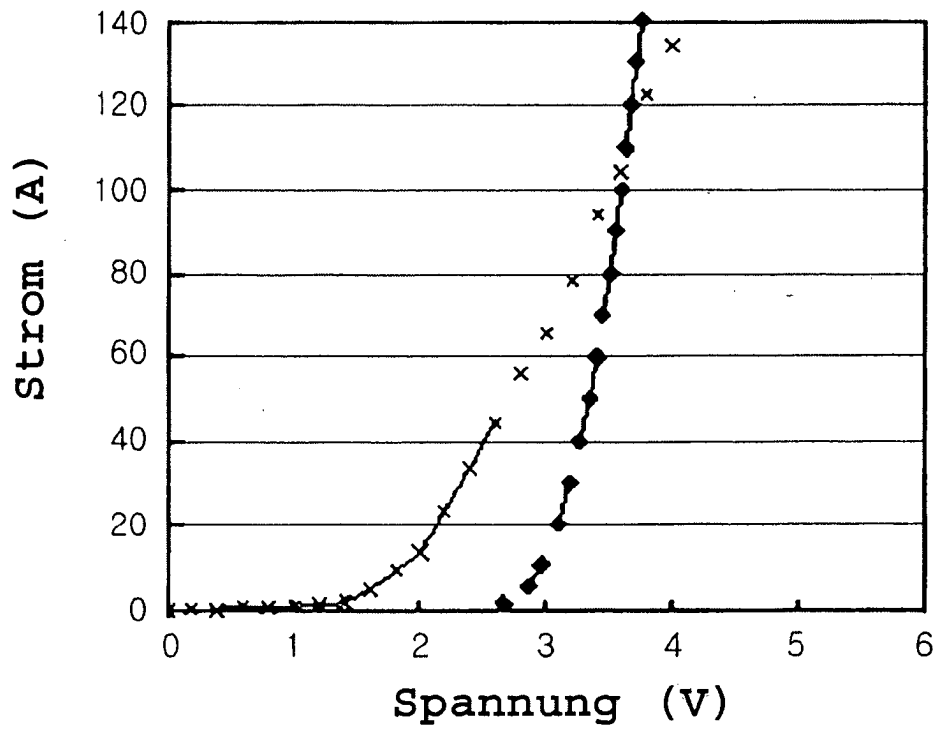


FIG. 1

Stand der Technik

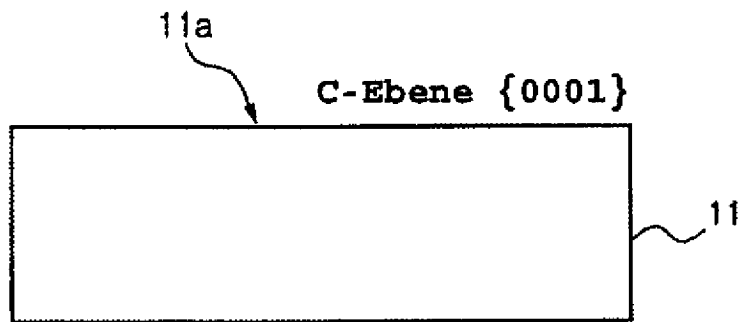


FIG. 2A

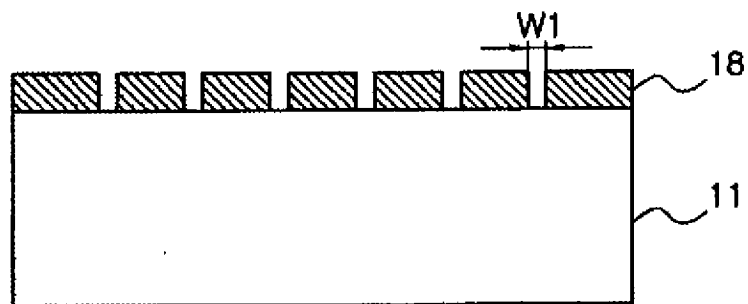


FIG. 2B

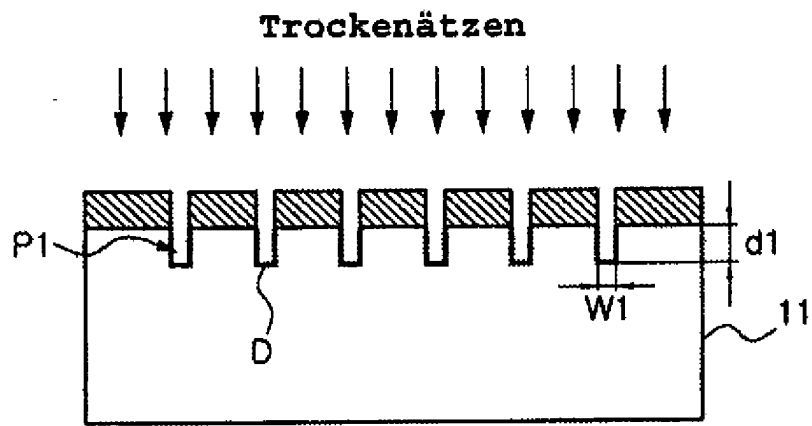


FIG. 2C

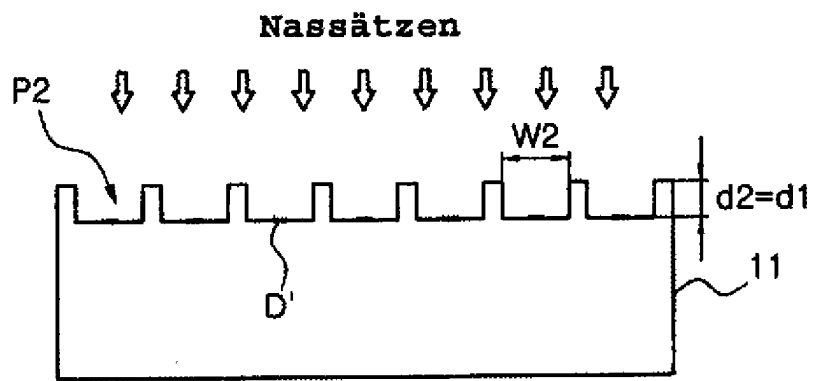


FIG. 2D

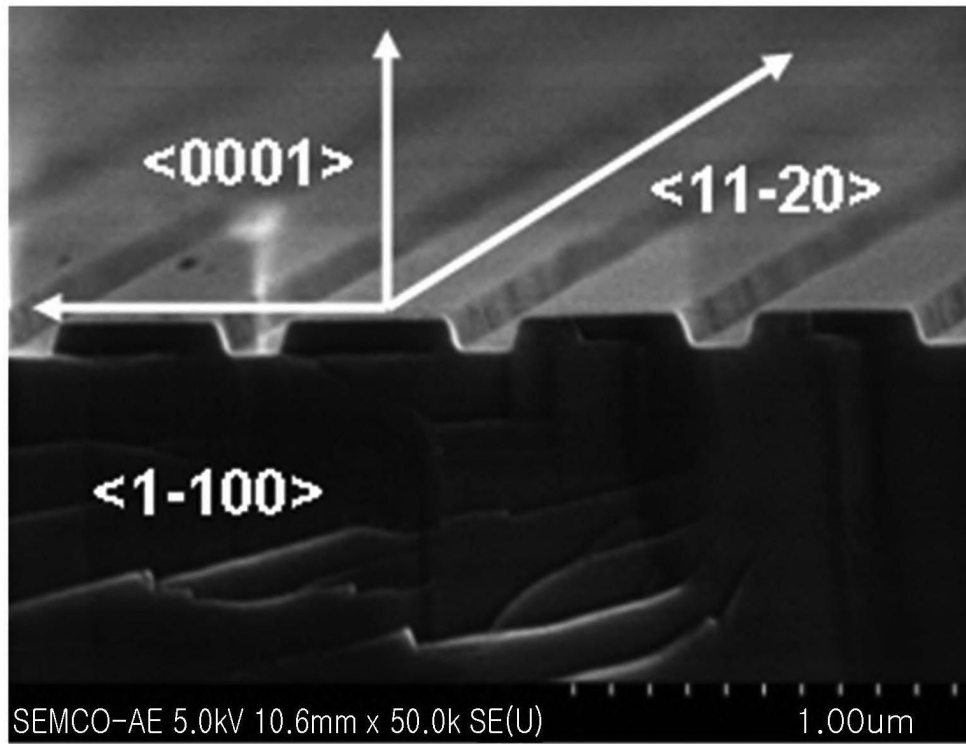


FIG. 3A

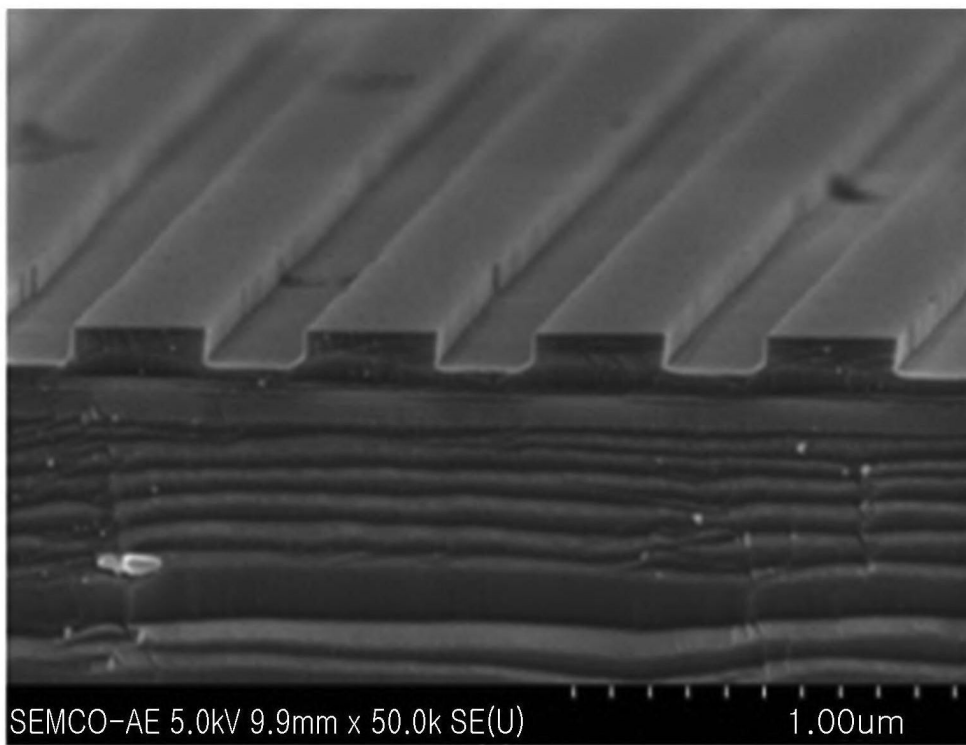


FIG. 3B

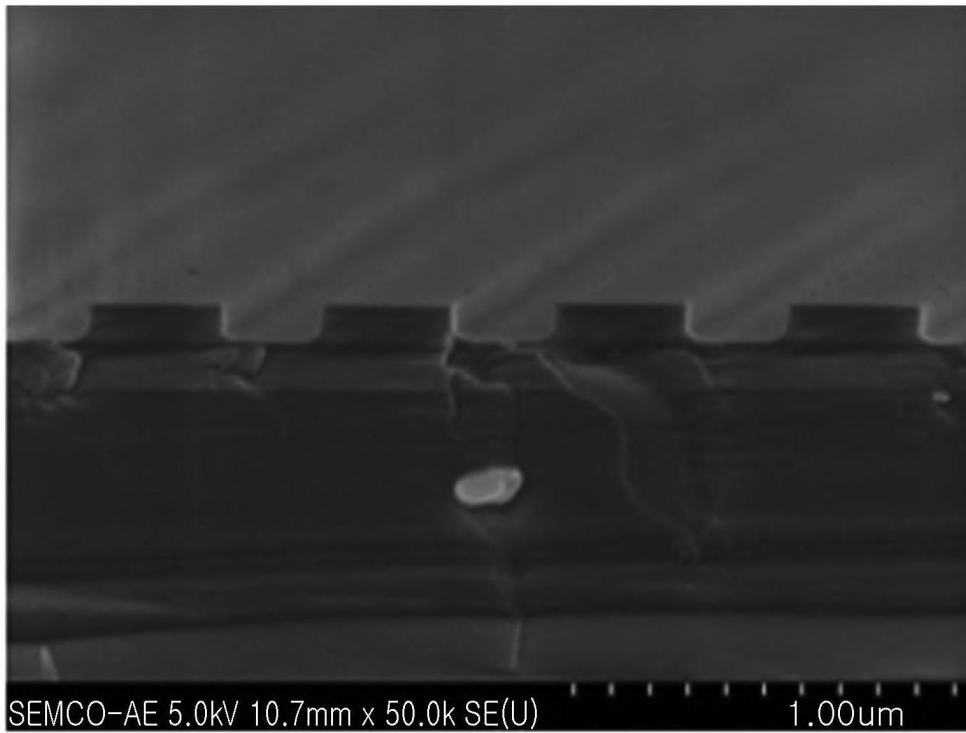


FIG. 3C

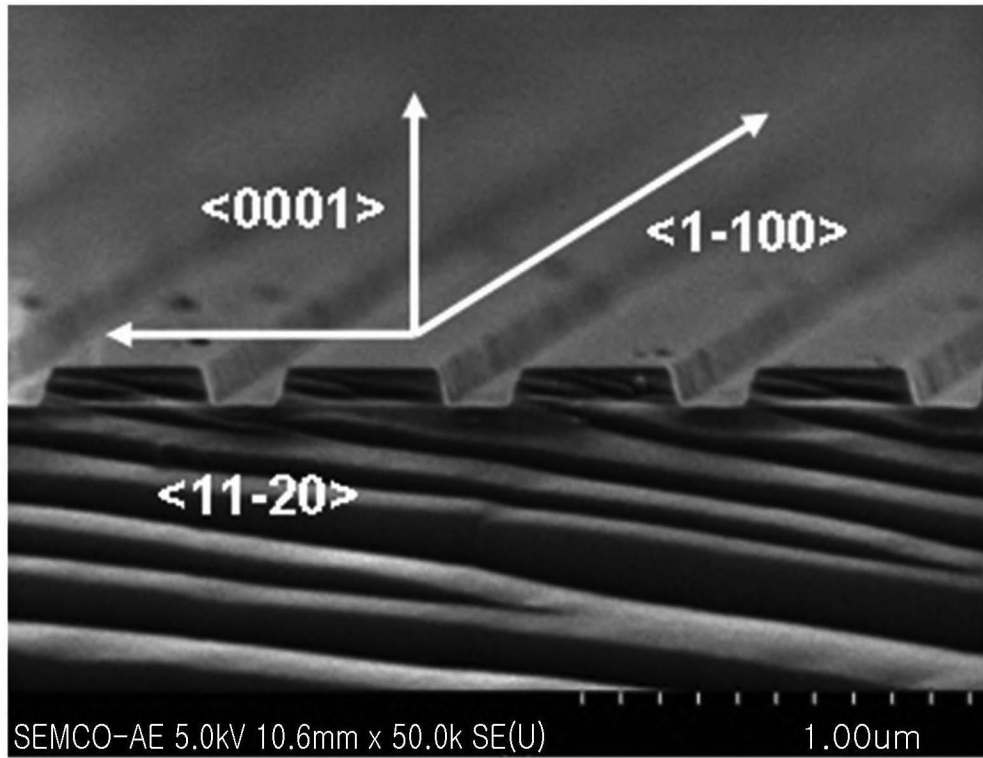


FIG. 4A

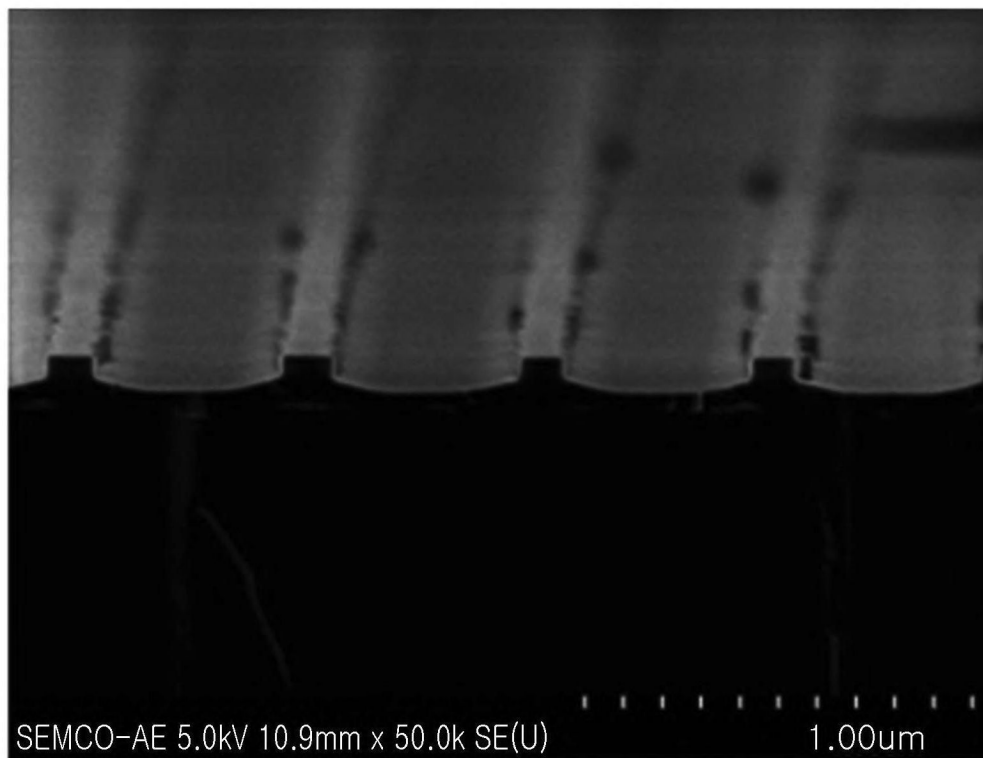


FIG. 4B

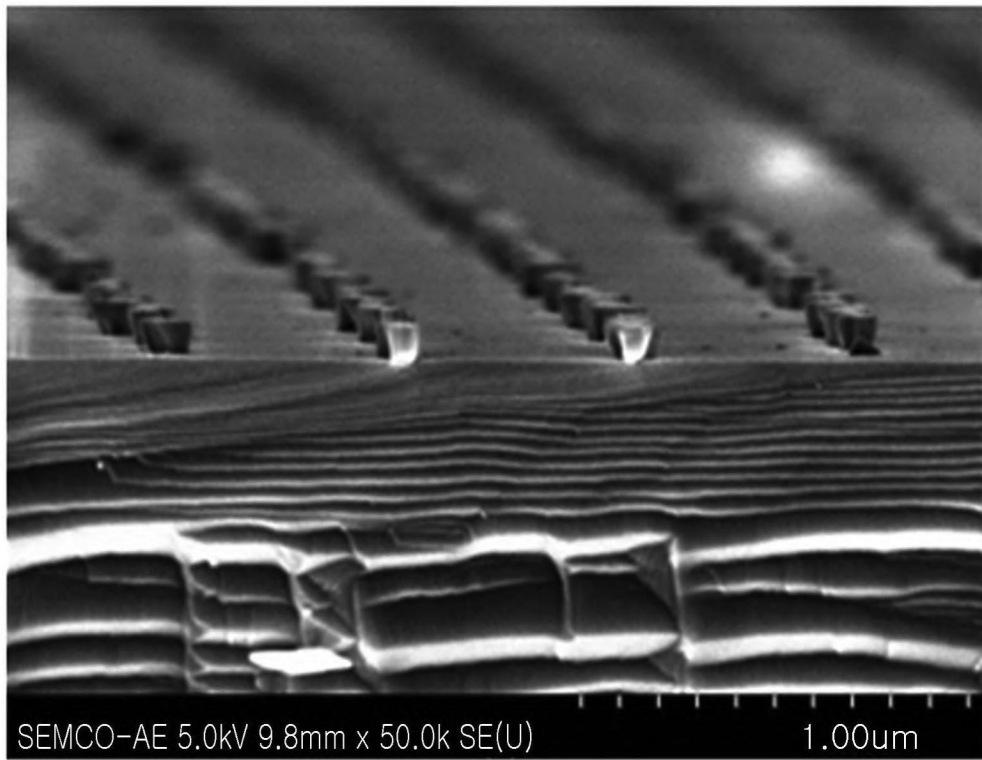


FIG. 4C

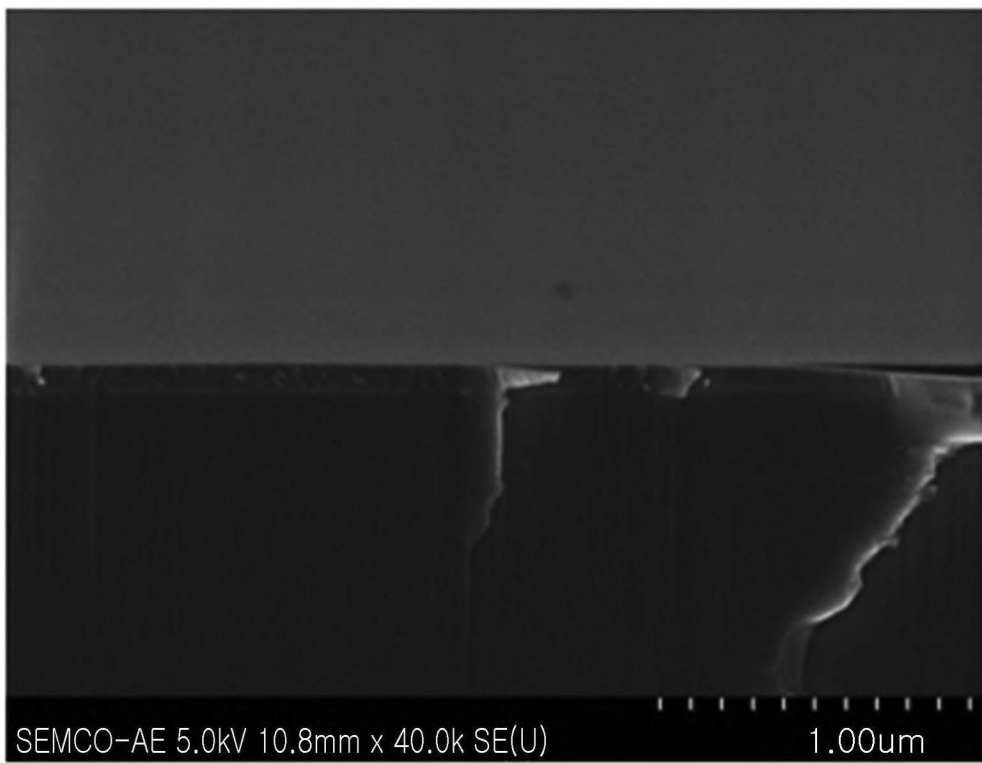


FIG. 4D

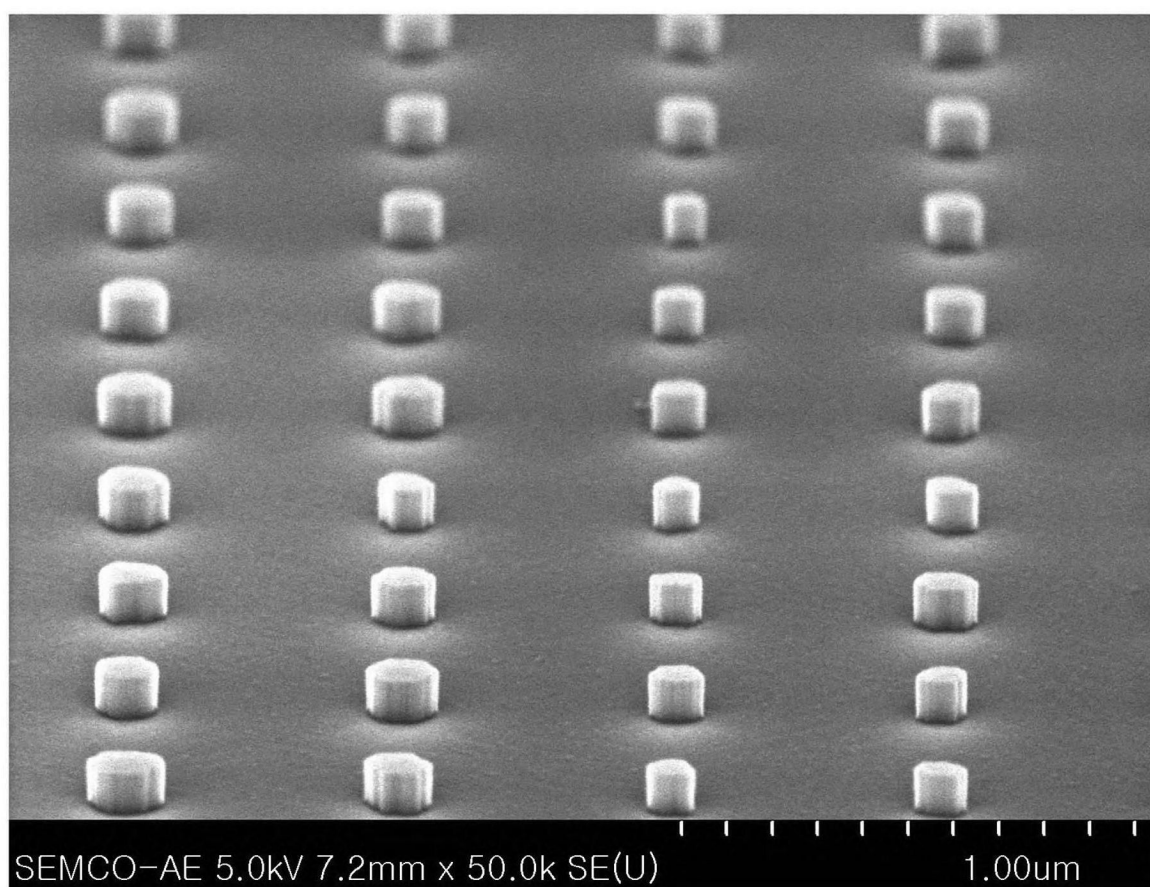


FIG. 5

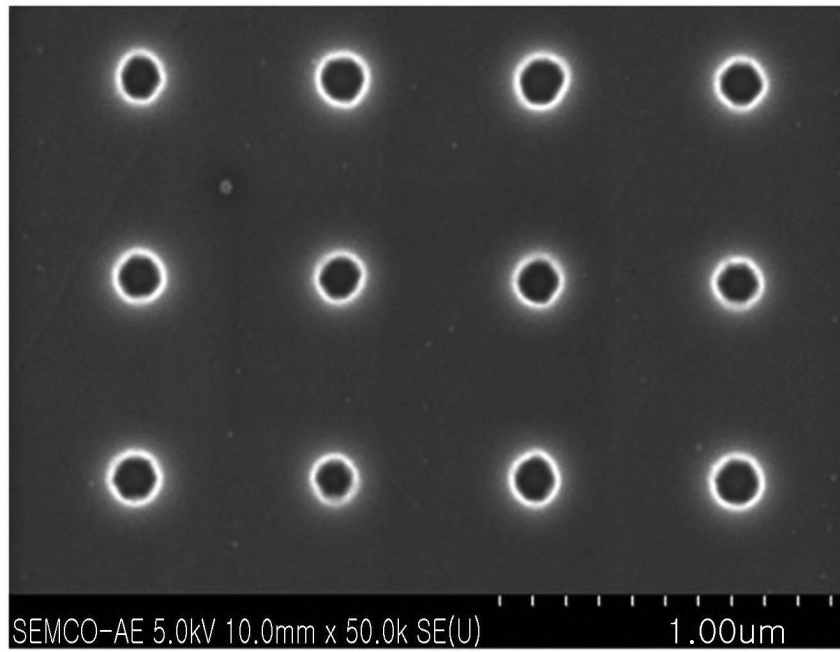


FIG. 6A

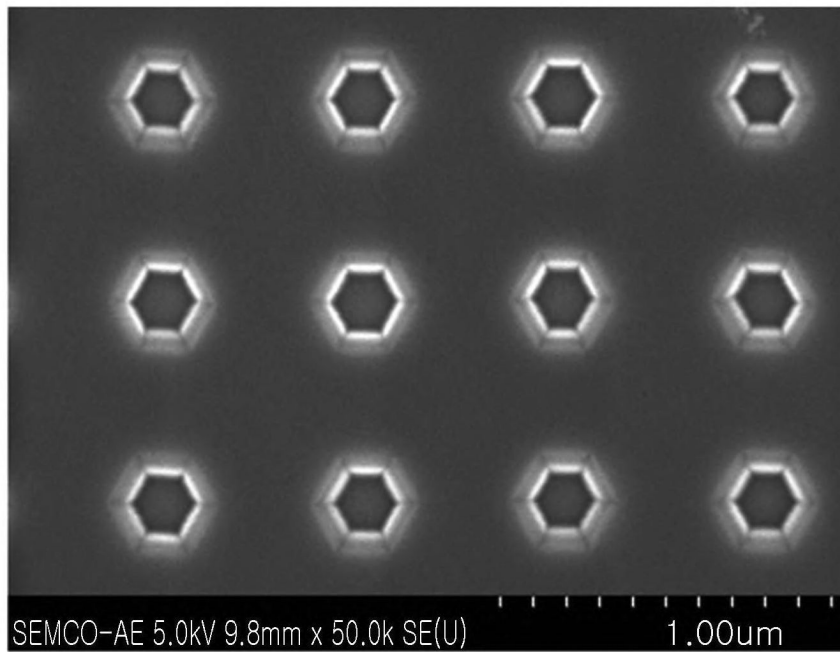


FIG. 6B

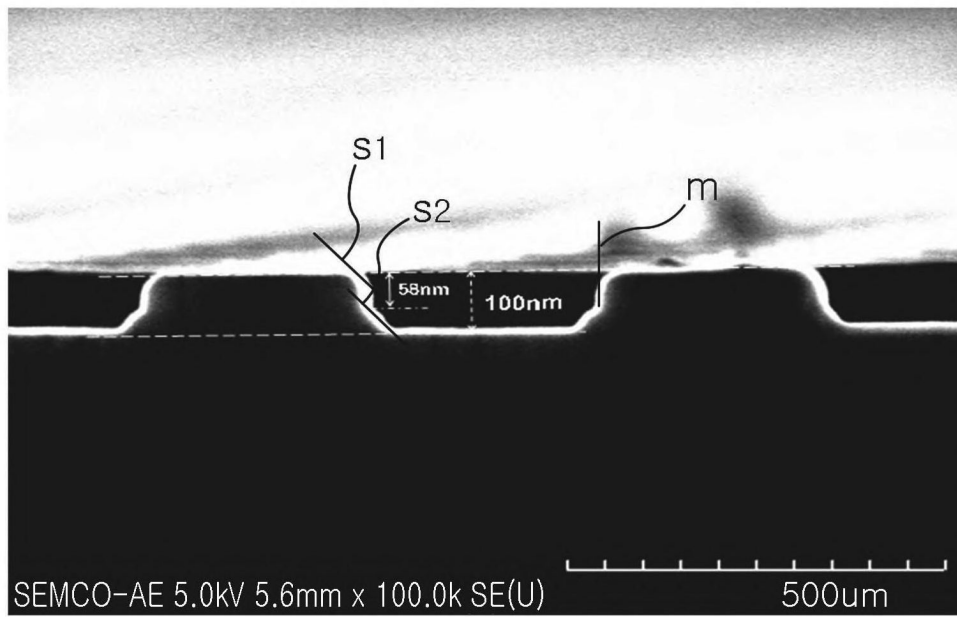


FIG. 7A

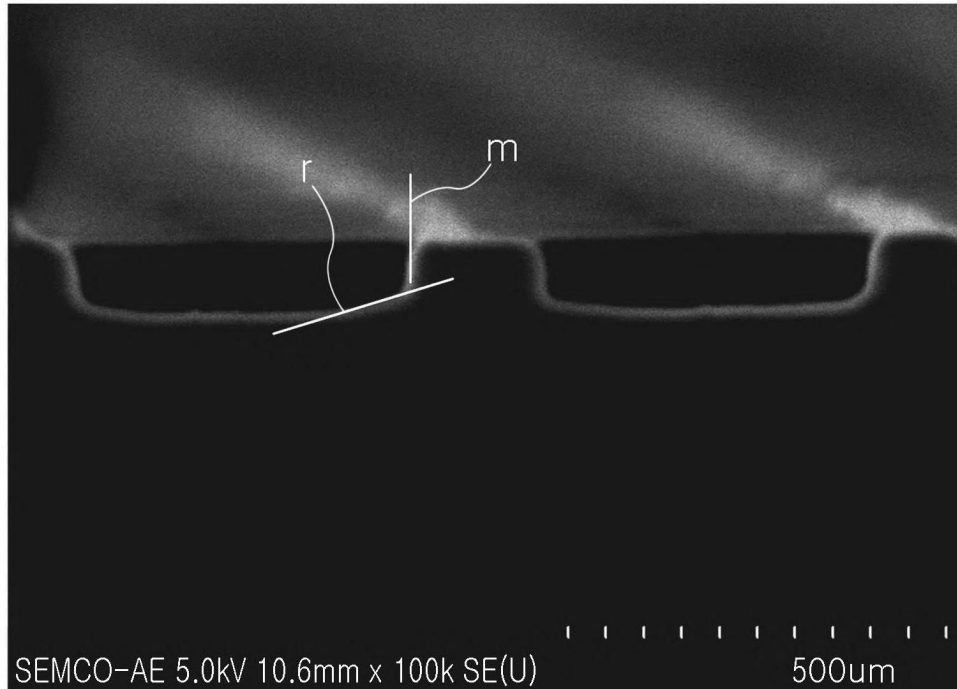


FIG. 7B

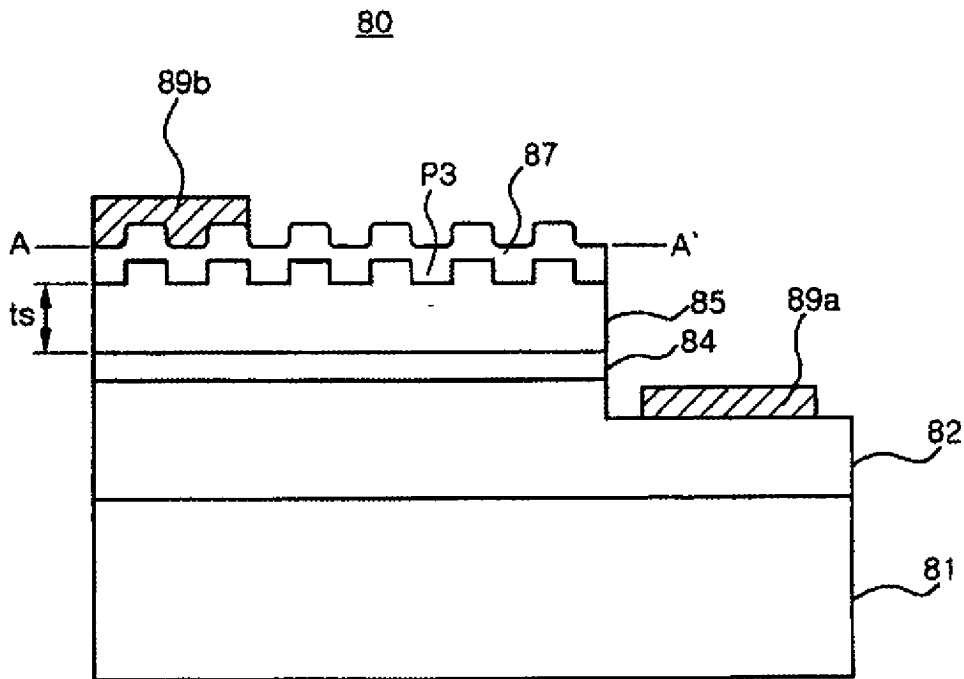


FIG. 8A

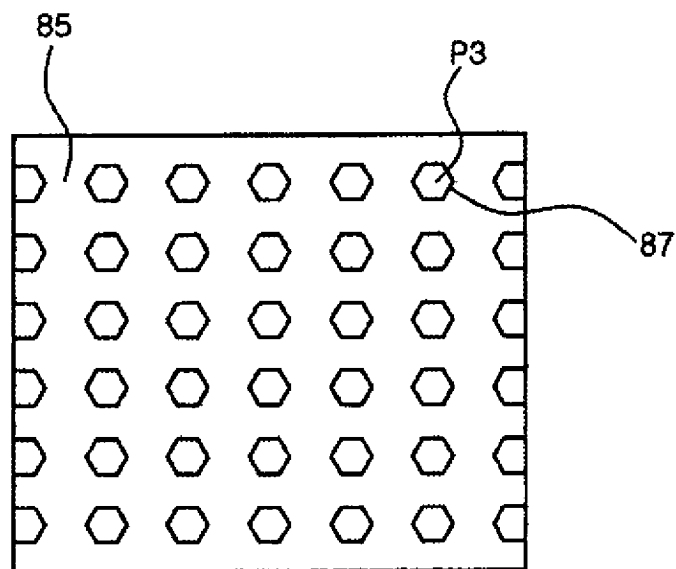


FIG. 8B

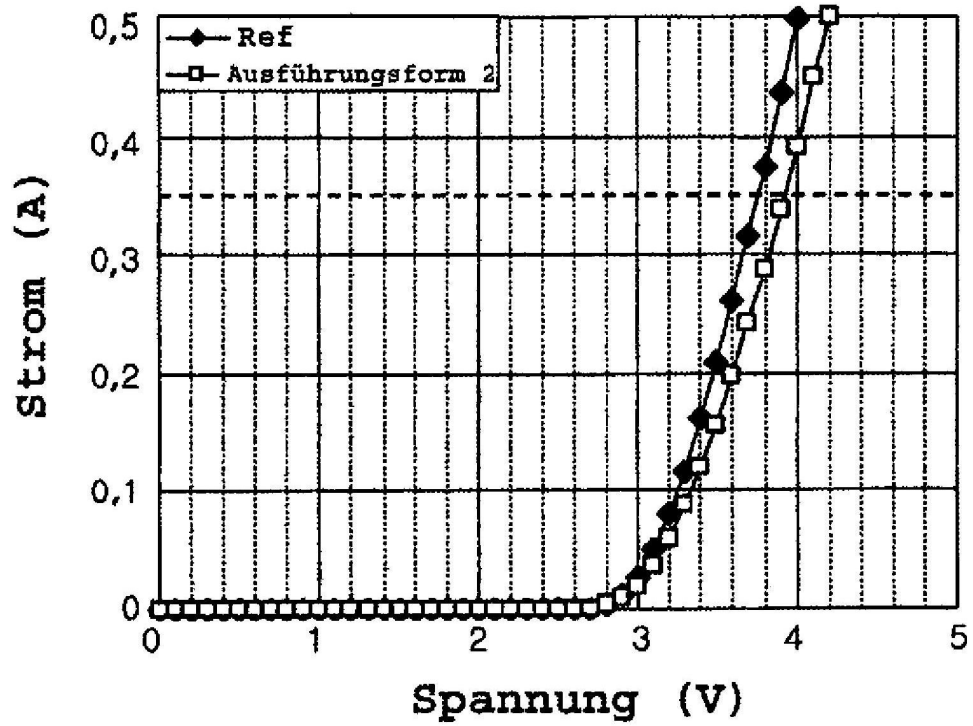


FIG. 9

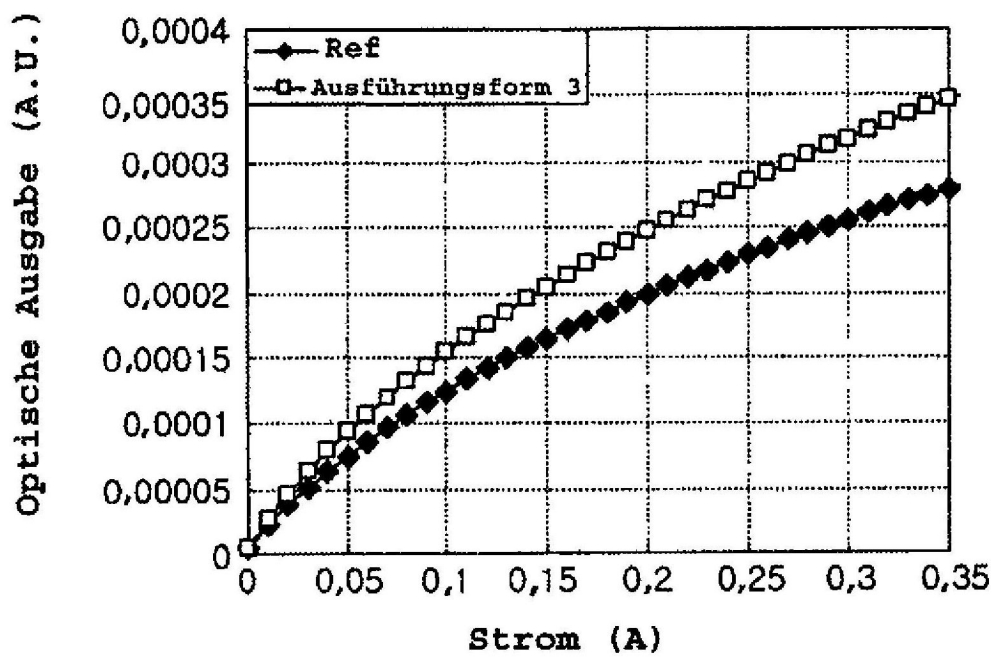


FIG. 10

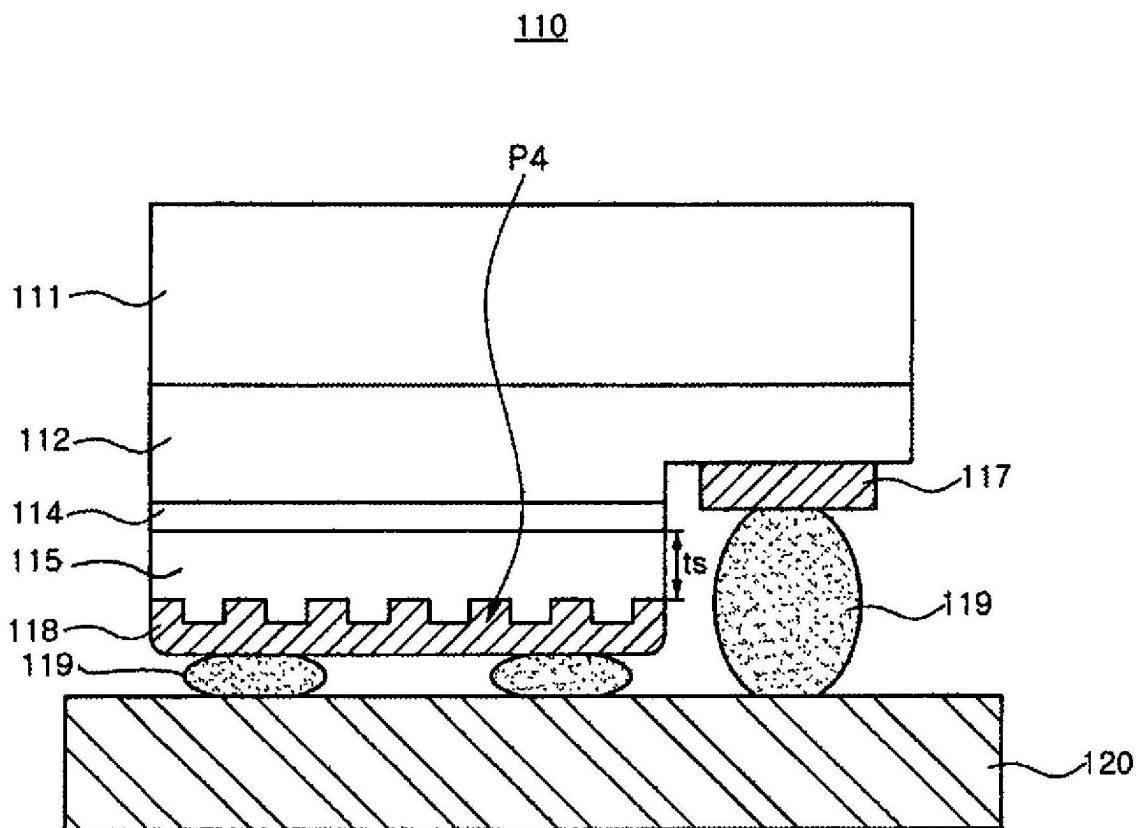


FIG. 11

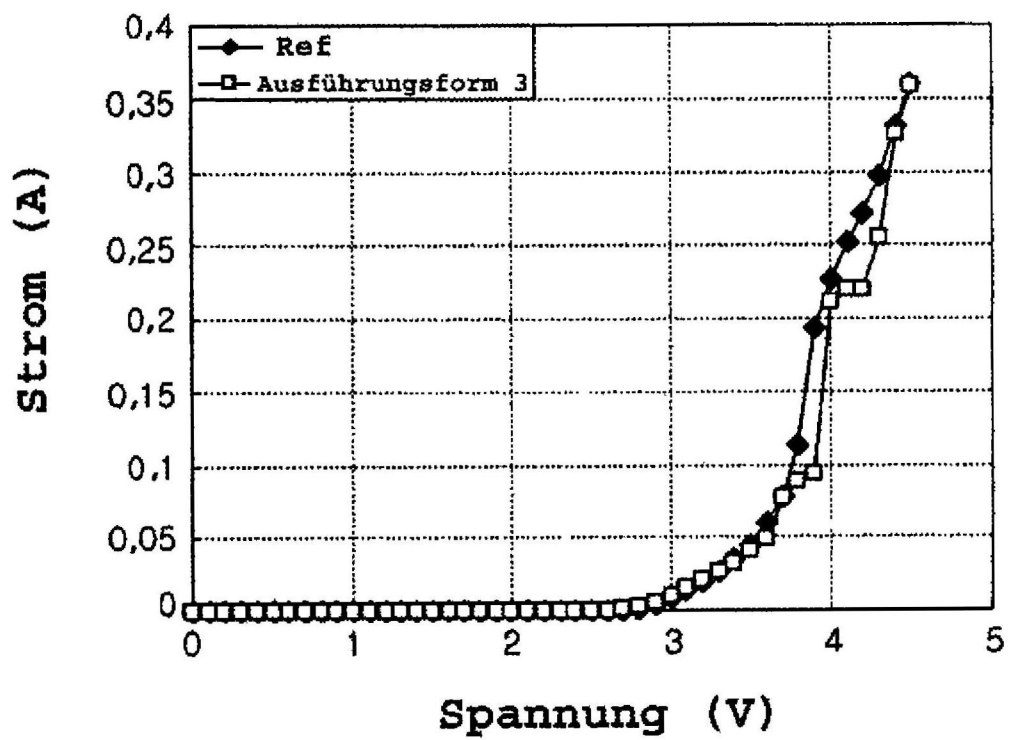


FIG. 12

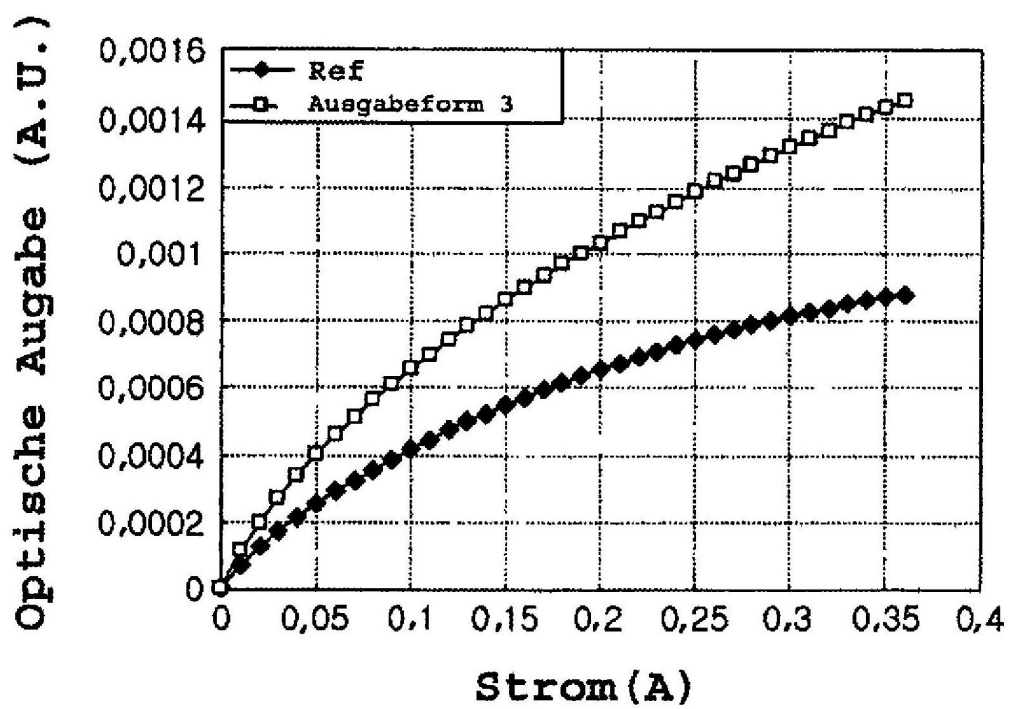


FIG. 13