

T17560DE / DE 10 2024 100 165.8  
Taiwan Semiconductor Manufacturing Co., Ltd.  
12.05.2025

## SELEKTIVE MASKENABSCHIEDUNG ZUR VERRINGERUNG VON NANOBLATTVERLUST

### ~~BEANSPRUCHUNG DER PRIORITÄT UND QUERVERWEISE~~

~~[0001]—Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der folgenden vorläufig eingereichten US-Patentanmeldung: Anmeldung Nr. 63/581 043, eingereicht am 7. September 2023 mit dem Titel „SELECTIVITY ANISOTROPIC DEPOSITION OF ALTERNATIVE DIELECTRIC METHODS FOR NANOSHEET LOSS AND STI-OXIDE PROTECTION“, wobei diese Anmeldung hiermit durch Bezugnahme hierin aufgenommen wird.~~

### HINTERGRUND

[000~~12~~] Halbleitervorrichtungen werden in einer Vielzahl von elektronischen Geräten verwendet, z. B. PCs, Mobiltelefonen, Digitalkameras und anderen elektronischen Produkten. Halbleitervorrichtungen werden üblicherweise hergestellt, indem nacheinander isolierende bzw. dielektrische Schichten, leitfähige Schichten und Halbleitermaterialsichten über einem Halbleitersubstrat abgeschieden und die verschiedenen Materialsichten unter Verwendung von Lithographie strukturiert werden, um Schaltungskomponenten und -elemente darauf auszubilden.

[000~~23~~] Die Halbleiterindustrie verbessert stetig die Integrationsdichte verschiedener elektronischer Komponenten (z. B. Transistoren, Dioden, Widerständen, Kondensatoren usw.) durch eine fortlaufende Verringerung der minimalen Elementgröße, wodurch mehr Komponenten auf einer bestimmten Fläche integriert werden können. Wenn die minimalen Elementgrößen verringert werden, treten jedoch neue Probleme auf und sollten gelöst werden.

[0003] Halbleitervorrichtungen mit nicht-konformen Verkappungsschichten sind beispielsweise aus der DE 10 2020 114 865 A1, der DE 10 2021 120 584 A1, der US 2021 / o 098 458 A1 und der US 2019 / o 385 916 A1 bekannt.

## **KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN**

[0004] Aspekte der vorliegenden Offenbarung werden am besten aus der folgenden detaillierten Beschreibung verstanden, wenn sie mit den beigefügten Zeichnungen gelesen wird. Es wird angemerkt, dass gemäß dem üblichen Vorgehen in der Branche verschiedene Elemente nicht maßstabsgetreu gezeichnet sind. Tatsächlich können die Abmessungen der verschiedenen Elemente zur Klarheit der Beschreibung beliebig vergrößert oder verkleinert sein.

[0005] Die Figuren 1 bis 3, 4A, 4B, 5, 6A, 6B, 6C, 7, 8A, 8B, 8C, 9A, 9B, 10A, 10B, 11A, 11B, 11C, 12A, 12B, 13A, 13B, 14A, 14B, 15A, 15B, 15C und 15D zeigen die Ansichten von Zwischenstufen bei der Ausbildung eines Gate-All-Around-Transistors (GAA-Transistors) gemäß einigen Ausführungsformen.

[0006] Figur 16 zeigt einen Prozessablauf zum Ausbilden eines GAA-Transistors gemäß einigen Ausführungsformen.

## **DETAILLIERTE BESCHREIBUNG**

[0007] Die Erfindung ist in den Ansprüchen definiert. Die folgende Offenbarung sieht viele verschiedene Ausführungsformen oder Beispiele vor, um verschiedene Merkmale der Erfindung zu implementieren. Spezielle Beispiele von Komponenten und Anordnungen sind unten beschrieben, um die vorliegende Offenbarung zu vereinfachen. Diese sind natürlich nur Beispiele und sollen nicht einschränkend wirken. Beispielsweise kann das Ausbilden eines ersten Elements über oder auf einem zweiten Element in der folgenden Beschreibung Ausführungsformen abdecken, in

denen das erste und das zweite Element in direktem Kontakt ausgebildet sind, und kann auch Ausführungsformen abdecken, in denen zusätzliche Elemente zwischen dem ersten und dem zweiten Element ausgebildet sein können, so dass das erste und das zweite Element nicht in direktem Kontakt stehen müssen. Zusätzlich kann die vorliegende Offenbarung Bezugszeichen und/oder Buchstaben in den verschiedenen Beispielen wiederholen. Diese Wiederholung dient dem Zweck der Einfachheit und Klarheit und erzwingt an sich keine Beziehung zwischen den verschiedenen beschriebenen Ausführungsformen und/oder Konfigurationen.

[0008] Weiter können räumlich relative Begriffe, wie „darunter liegend“, „unter“, „unterer“, „darüber liegend“, „oberer“ und ähnliche, hier der Einfachheit der Beschreibung halber verwendet werden, um die Beziehung eines Elements oder eines Abschnitts mit einem oder mehreren anderen Elementen oder Abschnitten zu beschreiben, wie in den Figuren gezeigt ist. Die räumlich relativen Begriffe sollen verschiedene Ausrichtungen der verwendeten oder betriebenen Vorrichtung zusätzlich zu der in den Figuren gezeigten Ausrichtung abdecken. Die Vorrichtung kann anders (um 90 Grad gedreht oder in einer anderen Ausrichtung) ausgerichtet sein und die räumlich relativen Begriffe, die hier verwendet werden, können auch dahingehend interpretiert werden.

[0009] Es sind ein Gate-All-Around-Transistor (GAA-Transistor) mit verringertem Verlust in der oberen Halbleiternanostruktur und verringertem Verlust im Flachgrabenisolationsbereich (STI-Bereich) sowie die zugehörigen Verfahren vorgesehen. Gemäß einigen Ausführungsformen wird eine erste dielektrische Schicht unter Verwendung eines konformen Abscheidungsprozesses auf einer vorstehenden Finne ausgebildet. Eine zweite dielektrische Schicht wird mithilfe eines anisotropen Abscheidungsprozesses auf der ersten dielektrischen Schicht ausgebildet. Die zweite dielektrische Schicht wird als Hartmaske verwendet und befindet sich auf der oberen

Fläche, jedoch nicht unbedingt auf den Seitenwänden der vorstehenden Finne. Die zweite dielektrische Schicht kann daher mit einem dickeren oberen Abschnitt ausgebildet werden, um einen besseren Schutz zu bieten, ohne den Raum zwischen benachbarten vorstehenden Finnen zu belegen. Es ist zu beachten, dass zwar GAA-Transistoren als Beispiel verwendet werden, die Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung jedoch auch auf andere Transistorarten wie Finnen-Feldeffekttransistoren (FinFETs) anwendbar sind.

[0010] Hier beschriebene Ausführungsformen sollen Beispiele angeben, um eine Herstellung oder Verwendung des Gegenstands dieser Offenbarung zu ermöglichen, und Fachleute werden leicht Modifikationen finden, die vorgenommen werden können, während sie innerhalb des in Betracht gezogenen Umfangs der verschiedenen Ausführungsformen bleiben. In den verschiedenen Ansichten und beispielhaften Ausführungsformen werden gleiche Bezugszeichen zum Bezeichnen gleicher Elemente verwendet. Obwohl Ausführungsformen des Verfahrens so beschrieben sein können, dass sie in einer bestimmten Reihenfolge ausgeführt werden, können andere Ausführungsformen des Verfahrens in jeder logischen Reihenfolge ausgeführt werden.

[0011] Die Figuren 1 bis 3, 4A, 4B, 5, 6A, 6B, 6C, 7, 8A, 8B, 8C, 9A, 9B, 10A, 10B, 11A, 11B, 11C, 12A, 12B, 13A, 13B, 14A, 14B, 15A, 15B, 15C und 15D zeigen die Ansichten von Zwischenstufen bei der Ausbildung eines GAA-Transistors gemäß einigen Ausführungsformen. Die entsprechenden Prozesse sind auch schematisch in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf wiedergegeben.

[0012] In Bezug auf Figur 1 ist eine Perspektivansicht eines Wafers 10 gezeigt, der ein Substrat 20 umfasst. Auf dem Substrat 20 ist eine Mehrschichtstruktur ausgebildet, die einen Mehrschichtstapel 22 aufweist. Gemäß einigen Ausführungsformen besteht das Substrat 20 aus einem Halbleitersubstrat oder weist dieses auf, das ein Siliziumsubstrat, ein Siliziumgermaniumsubstrat (SiGe-Substrat) oder dergleichen sein

kann, während andere Substrate und/oder Strukturen, wie Halbleiter-auf-Isolator (SOI), verspannter SOI, Siliziumgermanium-auf-Isolator oder dergleichen verwendet werden können. Das Substrat 20 kann als p-Halbleiter dotiert sein, obwohl es in weiteren Ausführungsformen als n-Halbleiter dotiert sein kann.

[0013] Gemäß einigen Ausführungsformen wird der Mehrschichtstapel 22 durch eine Folge von Abscheidungsprozessen zum Abscheiden abwechselnder Materialien ausgebildet. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 202 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Gemäß einigen Ausführungsformen weist der Mehrschichtstapel 22 erste Schichten 22A, die aus einem ersten Halbleitermaterial ausgebildet sind, und zweite Schichten 22B auf, die aus einem zweiten Halbleitermaterial ausgebildet sind, das sich von dem ersten Halbleitermaterial unterscheidet. Aufgrund der Epitaxie weisen die ersten Schichten 22A und die zweiten Schichten 22B die gleiche Gitterorientierung wie das Substrat 20 auf.

[0014] Gemäß einigen Ausführungsformen ist das erste Halbleitermaterial einer ersten Schicht 22A aus SiGe, Ge, Si, GaAs, InSb, GaSb, InAlAs, InGaAs, GaSbP, GaAsSb oder dergleichen ausgebildet oder enthält diese. Gemäß einigen Ausführungsformen erfolgt das Abscheiden der ersten Schichten 22A (beispielsweise SiGe) durch epitaktisches Züchten, und das entsprechende Abscheidungsverfahren kann aus Gasphasenepitaxie (VPE), Molekularstrahlepitaxie (MBE), chemische Gasphasenabscheidung (CVD), Niederdruck-CVD (LPCVD), Atomlagenabscheidung (ALD), Ultrahochvakuum-CVD (UHVCVD), CVD mit verringertem Druck (RPCVD) oder dergleichen bestehen.

[0015] Nachdem die erste Schicht 22A über dem Substrat 20 abgeschieden wurde, wird eine zweite Schicht 22B über der ersten Schicht 22A abgeschieden. Gemäß einigen Ausführungsformen sind die zweiten Schichten 22B aus einem zweiten Halbleitermaterial wie Si, SiGe, Ge, GaAs, InSb, GaSb, InAlAs, InGaAs, GaSbP,

GaAsSb, Kombinationen davon oder dergleichen ausgebildet oder enthalten diese, wobei das zweite Halbleitermaterial sich von dem ersten Halbleitermaterial der ersten Schicht 22A unterscheidet. Beispielsweise kann gemäß einigen Ausführungsformen, in denen die erste Schicht 22A aus Siliziumgermanium besteht, die zweite Schicht 22B aus Silizium ausgebildet sein oder umgekehrt. Es versteht sich, dass jede geeignete Kombination von Materialien für die ersten Schichten 22A und die zweiten Schichten 22B verwendet werden kann.

[0016] Gemäß einigen Ausführungsformen wird die zweite Schicht 22B epitaktisch auf der ersten Schicht 22A unter Verwendung einer Abscheidungstechnik gezüchtet, die der ähnelt, die zum Ausbilden der ersten Schicht 22A verwendet wird. Gemäß einigen Ausführungsformen wird die zweite Schicht 22B mit einer ähnlichen Dicke wie die erste Schicht 22A ausgebildet. Die zweite Schicht 22B kann jedoch auch mit einer Dicke ausgebildet werden, die sich von der ersten Schicht 22A unterscheidet.

[0017] Gemäß einigen Ausführungsformen werden die ersten Schichten 22A in den nachfolgenden Prozessen entfernt und werden in der gesamten Beschreibung alternativ als Opferschichten 22A bezeichnet. Gemäß alternativen Ausführungsformen sind die zweiten Schichten 22B Opferschichten und werden in den nachfolgenden Prozessen entfernt.

[0018] Gemäß einigen Ausführungsformen werden eine Pufferoxidschicht 12 und eine Hartmaskenschicht 14 über dem Mehrschichtstapel 22 ausgebildet. Die Pufferoxidschicht 12 kann Siliziumoxid, Siliziumkarbid oder dergleichen enthalten, während die Hartmaskenschicht 14 Siliziumnitrid enthalten kann, und auch andere Materialien können verwendet werden. Die Pufferoxidschicht 12 und die Hartmaskenschicht 14 werden so strukturiert, dass sie mehrere längliche Streifen bilden, die auch als Padoxide und Hartmasken bezeichnet werden.

[0019] Mit Bezug auf Figur 2 werden der Mehrschichtstapel 22 und ein Teil des darunterliegenden Substrats 20 in einem oder mehreren Ätzprozessen so strukturiert, dass Gräben (gefüllt mit Isolierbereichen 26) ausgebildet werden. Die Gräben erstrecken sich in das Substrat 20. Die verbleibenden Abschnitte der Mehrschichtstapel werden im Folgenden als Mehrschichtstapel 22' bezeichnet. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 204 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Unter den Mehrschichtstapeln 22' verbleiben einige Abschnitte des Substrats 20 und werden im Folgenden als Substratstreifen 20' bezeichnet. Zu den Mehrschichtstapeln 22' gehören die Halbleiterschichten 22A und 22B. Die Halbleiterschichten 22A werden alternativ als Opferschichten bezeichnet, und die Halbleiterschichten 22B werden im Folgenden alternativ als Nanostrukturen bezeichnet. Die Abschnitte der Mehrschichtstapel 22' und der darunterliegenden Substratstreifen 20' werden gemeinsam als Halbleiterstreifen 24 bezeichnet.

[0020] In den oben gezeigten Ausführungsformen können die GAA-Transistorstrukturen mit jedem geeigneten Verfahren strukturiert werden. Beispielsweise können die Strukturen unter Verwendung eines oder mehrerer Photolithographieprozesse wie beispielsweise Doppelstrukturierungs- oder Mehrfachstrukturierungsprozesse strukturiert werden. Im Allgemeinen kombinieren Doppelstrukturierungs- oder Mehrfachstrukturierungsprozesse Photolithographie- und selbstauserichtete Prozesse, so dass Strukturen erzeugt werden können, die beispielsweise Mittenabstände aufweisen, die kleiner als die sind, die sonst mit einem einzigen, direkten Photolithographieprozess erhalten werden können. Beispielsweise wird in einer Ausführungsform eine Opferschicht über einem Substrat ausgebildet und unter Verwendung eines Photolithographieprozesses strukturiert. Abstandshalter werden unter Verwendung eines selbstauserichteten Prozesses neben der strukturierten Opferschicht ausgebildet. Die Opferschicht wird dann entfernt und die

verbleibenden Abstandshalter können dann verwendet werden, um die GAA-Struktur zu strukturieren.

[0021] Als nächstes werden die Isolierbereiche 26 ausgebildet, die in der Beschreibung auch als Flachgrabenisolationbereiche (STI-Bereiche) bezeichnet werden können. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 206 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die STI-Bereiche 26 können ein Auskleidungsoxid (nicht gezeigt) aufweisen, das aus einem thermischen Oxid bestehen kann, das durch thermische Oxidation einer Oberflächenschicht des Substrats 20 ausgebildet wird. Das Auskleidungsoxid kann auch durch eine abgeschiedene Siliziumoxidschicht gebildet werden, die beispielsweise unter Verwendung von ALD, chemischer Gasphasenabscheidung im hochdichten Plasma (HDPCVD), CVD oder dergleichen ausgebildet wird. Die STI-Bereiche 26 können auch ein Dielektrikum über dem Auskleidungsoxid enthalten, wobei das Dielektrikum unter Verwendung von fließfähiger chemischer Gasphasenabscheidung (FCVD), Rotationsbeschichtung oder dergleichen ausgebildet werden kann. Nachfolgend kann ein Planarisierungsprozess wie beispielsweise ein chemisch-mechanischer Polierprozess (CMP-Prozess) oder ein mechanischer Schleifprozess durchgeführt werden, der die obere Fläche des Dielektrikums beispielsweise mit der oberen Fläche der Hartmaskenschicht 14 nivelliert, und die verbleibenden Abschnitte des Dielektrikums bilden die STI-Bereiche 26.

[0022] Unter weiterer Bezugnahme auf Figur 3 werden die STI-Bereiche 26 vertieft, so dass die oberen Abschnitte der Halbleiterstreifen 24 höher als die oberen Flächen 26T der verbleibenden Abschnitte der STI-Bereiche 26 vorstehen, so dass vorstehende Finnen (Strukturen) 28 ausgebildet werden. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 208 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Zu den vorstehenden Finnen 28 gehören die Mehrschichtstapel 22' und die oberen Abschnitte der



Substratstreifen 20'. Das Vertiefen der STI-Bereiche 26 kann durch einen Trockenätzprozess erreicht werden, wobei beispielsweise  $\text{NF}_3$  und  $\text{NH}_3$  als Ätzgase verwendet werden. Während des Ätzprozesses kann Plasma erzeugt werden. Argon kann ebenfalls verwendet werden. Gemäß alternativen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung wird das Vertiefen der STI-Bereiche 26 durch einen Nassätzprozess erreicht. Die Ätzchemikalie kann beispielsweise HF enthalten. Die Pufferoxidschichten 12 und Hartmasken 14 werden entfernt.

[0023] Unter Bezugnahme auf die Figuren 4A und 4B wird eine dielektrische Verbundschicht 32 ausgebildet, zu der eine dielektrische Schicht 32A und eine dielektrische Schicht 32B gehört. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 210 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die dielektrische Schicht 32A wird auf den Seitenwänden und den oberen Flächen der vorstehenden Finnen 28 und auf den oberen Flächen der STI-Bereiche 26 abgeschieden. Figur 4A zeigt eine Perspektivansicht, und Figur 4B zeigt den vertikalen Querschnitt 4B-4B wie in Figur 4A gezeigt.

[0024] Gemäß einigen Ausführungsformen bildet die dielektrische Schicht 32A eine einzelne (homogene) Schicht, wobei die gesamte dielektrische Schicht 32A aus einem gleichen Material ausgebildet ist und eine gleiche Zusammensetzung aufweist. Wenn in der Beschreibung von der gleichen Zusammensetzung zweier Schichten die Rede ist, bedeutet dies, dass die beiden Schichten die gleichen Elemente enthalten und der Anteil der entsprechenden Elemente in den beiden Schichten der gleiche ist. Wenn umgekehrt in der Beschreibung von einer unterschiedlichen Zusammensetzung zweier Schichten die Rede ist, bedeutet dies, dass mindestens eine der beiden Schichten entweder mindestens ein Element enthält, das in der anderen Schicht nicht vorhanden ist, oder dass die beiden Schichten dieselben Elemente enthalten, aber die Anteile der Elemente in den beiden Schichten voneinander abweichen. Gemäß alternativen

Ausführungsformen bildet die dielektrische Schicht 32A eine Verbundschicht, die zwei oder mehr Teilschichten aufweist.

[0025] Gemäß einigen Ausführungsformen wird die dielektrische Schicht 32A unter Verwendung eines konformen Abscheidungsprozesses ausgebildet, so dass die vertikalen Abschnitte (auch als Seitenwandabschnitte bezeichnet) und die horizontalen Abschnitte (auch als obere Abschnitte bezeichnet) der dielektrischen Schicht 32A eine gleiche Dicke aufweisen, beispielsweise mit einer Abweichung von weniger als etwa 20 Prozent, weniger als etwa 10 Prozent oder weniger. Die Ausbildung wird durch einen konformen Ausbildungsprozess wie ALD, CVD oder dergleichen erreicht. Zu den Materialien der dielektrischen Schicht 32A können ein Oxid wie Siliziumoxid, Siliziumoxynitrid, Siliziumoxykarbid oder dergleichen gehören.

[0026] Nachfolgend wird die dielektrische Schicht 32B mithilfe eines nicht-konformen Abscheidungsprozesses, auch als anisotroper Abscheidungsprozess bezeichnet, auf der dielektrischen Schicht 32A abgeschieden. Die dielektrischen Schichten 32A und 32B werden im Folgenden gemeinsam als dielektrische Verbundschichten 32 bezeichnet. Die dielektrische Schicht 32B wird auch als Hartmaskenschicht bezeichnet, da sie das unerwünschte Ätzen bei nachfolgenden Dummy-Gatestrukturierungs- und -reinigungsprozessen verhindert. Wie in den Figuren 4A und 4B gezeigt, können zu der dielektrischen Schicht 32B horizontale Abschnitte über der oberen Fläche der vorstehenden Finnen 28 und der STI-Bereiche 26 gehören. Die dielektrische Schicht 32B kann frei oder im Wesentlichen frei von vertikalen Abschnitten an Seitenwänden der vorstehenden Finnen 28 sein.

[0027] Gemäß alternativen Ausführungsformen kann die dielektrische Schicht 32B vertikale Abschnitte an den Seitenwänden der vorstehenden Finnen 28 aufweisen. Die Dicke T2 der vertikalen Abschnitte ist jedoch deutlich geringer als die Dicke T1 der

horizontalen Abschnitte. Beispielsweise kann das Verhältnis  $T_2/T_1$  kleiner als etwa 0,2 oder kleiner als etwa 0,1 sein.

[0028] Figur 4B zeigt einige beispielhafte vertikale Abschnitte der dielektrischen Schicht 32B. Gemäß einigen Ausführungsformen weisen die Seitenwände der oberen Abschnitte der vorstehenden Finnen 28 Abschnitte der dielektrischen Schicht 32B darauf auf. Die Seitenwände der unteren Abschnitte der vorstehenden Finnen 28 weisen die dielektrische Schicht 32B nicht auf, und die entsprechenden unteren Abschnitte der dielektrischen Schicht 32A liegen frei. Gemäß alternativen Ausführungsformen bedecken die vertikalen Abschnitte der dielektrischen Schicht 32B alle Seitenwandabschnitte der dielektrischen Schicht 32A, wobei die Dicke  $T_2$  kleiner als die Dicke  $T_1$  ist.

[0029] Da die Abscheidung der dielektrischen Schicht 32B anisotrop ist, werden zwischen den eng beieinander liegenden vorstehenden Finnen 28 dünnere oder überhaupt keine vertikalen Abschnitte der dielektrischen Schicht 32B ausgebildet, was zu einer Verkleinerung des Prozessfensters führt.

[0030] Gemäß einigen Ausführungsformen kann die dielektrische Schicht 32B aus einem anderen Material als die dielektrische Schicht 32A ausgebildet sein. Beispielsweise kann die dielektrische Schicht 32A aus SiC, SiCN, SiN, SiO, SiOCN, SiON oder dergleichen oder Kombinationen davon ausgebildet sein oder diese enthalten. Es wird darauf hingewiesen, dass die Wertebereiche Beispiele darstellen und von den hier angegebenen abweichen können.

[0031] Gemäß alternativen Ausführungsformen weisen die dielektrischen Schichten 32A und 32B die gleichen Elemente auf, etwa Si, O und N oder Si, O, C und N, weisen jedoch beim Abscheiden und/oder nach nachfolgenden Wärmeprozessen unterschiedliche Anteile der entsprechenden Elemente auf. Beispielsweise können die Atomanteile von C und/oder N in der dielektrischen Schicht 32B höher als die der

dielektrischen Schicht 32A sein, und der Atomanteil von O in der dielektrischen Schicht 32A kann höher als der der dielektrischen Schicht 32B sein.

[0032] Gemäß weiteren alternativen Ausführungsformen besteht die dielektrische Schicht 32B aus einer Verbundschicht, zu der eine untere Teilschicht und eine obere Teilschicht gehören (als Teilschichten 32B1 und 32B2 bezeichnet, nicht gezeigt). Die Teilschichten 32B1 und 32B2 sind für einen Abschnitt der dielektrischen Schicht 32B gezeigt, obwohl sie in jedem der gezeigten Abschnitte der dielektrischen Schicht 32B vorhanden sein können. Jede der Teilschichten 32B1 und 32B2 kann aus einem anderen Dielektrikum als dem der dielektrischen Schicht 32A ausgebildet sein oder ein solches enthalten. Während sich die Materialien der Teilschichten 32B1 und 32B2 voneinander unterscheiden, kann jede der Teilschichten 32B1 und 32B2 aus einem Material (wie oben beschrieben) ausgebildet sein, das bei der nachfolgenden Strukturierung und Reinigung der Dummy-Gateelektroden 34 eine niedrigere Ätzrate als die dielektrische Schicht 32A aufweist. Beispielsweise kann jede der Teilschichten 32B1 und 32B2 aus derselben Gruppe von Kandidatenmaterialien ausgewählt sein, zu der SiC, SiOC, SiON, SiCN, SiN, SiOCN oder dergleichen gehören können.

[0033] Gemäß weiteren alternativen Ausführungsformen, in denen die dielektrische Schicht 32B eine Verbundschicht bildet, kann jede der Teilschichten 32B1 und 32B2 eine einheitliche Zusammensetzung aufweisen. Wenn die dielektrische Schicht 32B eine einzelne Schicht ist, kann die gesamte dielektrische Schicht 32B als einheitlicher Verbundstoff abgeschieden werden. Gemäß alternativen Ausführungsformen weist die dielektrische Schicht 32B eine stufenweise veränderte Zusammensetzung auf, wobei verschiedene Abschnitte dieselben Elemente (etwa Silizium, Sauerstoff und Stickstoff) enthalten, während sich von unten nach oben der Anteil der Elemente allmählich ändert. Beispielsweise kann der untere Abschnitt der dielektrischen Schicht 32B  $\text{SiO}_x$  enthalten, während der obere Abschnitt  $\text{SiAE}_y$  (oder  $\text{SiOAE}_y$ ) enthalten kann, wobei

„AE“ für ein oder mehrere alternative Elemente wie C und/oder N steht. Von der Unterseite der dielektrischen Schicht 32B zur Oberseite der dielektrischen Schicht 32B nehmen die Atomanteile y des Elements AE allmählich zu. Dies kann beim Einsatz von CVD beispielsweise durch eine schrittweise Änderung der Flussrate der Vorläufer erreicht werden.

[0034] Gemäß einigen Ausführungsformen wird die dielektrische Schicht 32 unter Verwendung eines ersten und eines zweiten Vorläufers ausgebildet. der ersten Vorläufer enthält einen siliziumhaltigen Vorläufer, zu dem Silan, Disilan, Aminosilan, Di-sec-Butylaminosilan (DSBAS), Bis(tert-butylamino)silan (BTBAS) oder dergleichen oder Kombinationen davon gehören können. Der zweite Vorläufer kann andere Elemente wie C, N und/oder O enthalten und kann im Folgenden als O/C/N-haltiger Vorläufer bezeichnet werden. Beispielsweise kann der zweite Vorläufer Ammoniak enthalten, wenn N in die dielektrische Schicht aufgenommen werden soll.

[0035] Gemäß einigen Ausführungsformen wird die dielektrische Schicht 32B unter Verwendung eines anisotropen Abscheidungsprozesses wie eines plasmaverstärkten Atomlagenabscheidungsprozesses (PEALD-Prozesses), ausgebildet, bei dem Plasma erzeugt wird. Während des PEALD-Abscheidungsprozesses wird eine Vorspannungsleistung angelegt. Die angelegte Vorspannungsleistung kann höher als etwa 150 Watt sein und im Bereich zwischen etwa 10 Watt und etwa 500 Watt liegen.

[0036] Das Plasma kann während und/oder nach dem Pulsen der Vorläufer wie des siliziumhaltigen Vorläufers und des O/C/N-haltigen Vorläufers angewendet werden und kann beispielsweise nach dem Spülen eines Vorläufers und vor dem Pulsen des nächsten Vorläufers angewendet werden. Beispielsweise kann das Plasma während des Pulsens des siliziumhaltigen Vorläufers ausgeschaltet und zu einem Zeitpunkt nach dem Pulsen des siliziumhaltigen Vorläufers und vor dem Pulsen des O/C/N-haltigen Vorläufers eingeschaltet werden. In ähnlicher Weise kann das Plasma während des

Pulsens des O/C/N-haltigen Vorläufers ausgeschaltet und zu einem Zeitpunkt nach dem Pulsen des O/C/N-haltigen Vorläufers und vor dem Pulsen des siliziumhaltigen Vorläufers eingeschaltet werden. Das Plasma kann aus dem Spülgas wie beispielsweise Argon, N<sub>2</sub> oder dergleichen erzeugt werden.

[0037] Durch die Verwendung von PEALD und das Anlegen der Vorspannungsleistung ist die dielektrische Schicht 32B nicht konform, wobei die Dicke T1 der horizontalen Abschnitte größer als die Dicke T2 der vertikalen Abschnitte ist. Um die anisotrope Abscheidungswirkung weiter zu verbessern, werden die Prozessbedingungen des PEALD angepasst, um sicherzustellen, dass die Abscheidung im Diffusionsmodus erfolgt. Der Diffusionsmodus kann durch Verringerung der Pulszeit (Zufuhrzeit), Verringerung der Spülzeit und Verringerung der Plasmabehandlungszeit erreicht und verbessert werden. Der Diffusionsmodus kann auch durch Erhöhen des Kammerdrucks während des Pulsens der Vorläufer und/oder beim Einschalten des Plasmas verbessert werden.

[0038] Gemäß einigen Ausführungsformen kann die Pulszeit (Zufuhrzeit) jedes der Vorläufer im Bereich zwischen etwa 0,01 Sekunden und etwa 0,2 Sekunden liegen. Dies ist kürzer als bei der üblichen Abscheidung im Nichtdiffusionsmodus, bei der die Pulszeit im Bereich zwischen etwa 0,2 Sekunden und etwa 3 Sekunden liegen kann. Die Plasmabehandlungszeit jedes der Vorläufer kann im Bereich zwischen etwa 0,1 Sekunden und etwa 0,3 Sekunden liegen. Dies ist kürzer als bei der üblichen Abscheidung im Nichtdiffusionsmodus, bei der die Plasmabehandlungszeit im Bereich zwischen etwa 0,3 Sekunden und etwa 2 Sekunden liegen kann. Die Spülzeit jedes Vorläufers kann auf einen Bereich zwischen etwa 0,5 Sekunden und etwa 1,5 Sekunden verringert werden.

[0039] Gemäß alternativen Ausführungsformen wird die dielektrische Schicht 32B unter Verwendung von physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD) abgeschieden,

wobei eine Vorspannung angelegt wird, um die anisotrope Abscheidung zu erreichen. Beispielsweise kann die Vorspannungsleistung im Bereich zwischen etwa 1.000 Watt und etwa 3.000 Watt liegen.

[0040] Unter Bezugnahme auf Figur 5 wird eine Dummy-Gateelektrodenschicht 34 abgeschieden. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 212 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Nachfolgend wird ein Planarisierungsprozess durchgeführt, um die obere Fläche der Dummy-Gateelektrodenschicht 34 einzuebnen. Die Dummy-Gateelektrodenschicht 34 kann beispielsweise unter Verwendung von Polysilizium oder amorphem Silizium ausgebildet werden, und es können auch andere Materialien wie amorpher Kohlenstoff verwendet werden. Eine (oder mehrere) Hartmaskenschichten 36 werden außerdem über der Dummy-Gateelektrodenschicht 34 ausgebildet. Die Hartmaskenschichten 36 können aus Siliziumnitrid, Siliziumoxid, Siliziumkarbonitrid, Siliziumoxykarbonitrid oder Mehrfachschichten davon ausgebildet sein.

[0041] Unter Bezugnahme auf die Figuren 6A, 6B und 6C werden die Hartmaskenschicht 36 und die Dummy-Gateelektrodenschicht 34 so strukturiert, dass Dummy-Gatestapel 37 ausgebildet werden, zu denen Hartmasken 36 und Dummy-Gateelektroden 34 gehören. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 214 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die Figuren 6B und 6C zeigen die vertikalen Querschnitte 6B–6B bzw. 6C–6C in Figur 6A. Gemäß einigen Ausführungsformen wird der Strukturierungsprozess durch einen anisotropen Ätzprozess erreicht. Das Ätzgas kann ein sauerstoffhaltiges Gas wie eine Mischung aus HBr, Cl<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> enthalten, oder kann andere Prozessgase wie Fluor (F<sub>2</sub>), Chlor (Cl<sub>2</sub>), Chlorwasserstoff (HCl), Bromwasserstoff (HBr), Brom (Br<sub>2</sub>), C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> oder Kombinationen davon enthalten. Das Ätzen wird unter Verwendung der dielektrischen Schicht 32B als Ätzstoppschicht ausgeführt.

[0042] Nachfolgend können Reinigungsprozesse durchgeführt werden. Die Reinigung kann mit einem chemischen Reinigungsmittel wie verdünntem HF erfolgen. Gemäß einigen Ausführungsformen ist durch Auswahl der richtigen Kombination des Materials der dielektrischen Schicht 32B, der Chemie für die Strukturierung der Dummy-Gateelektrodenschicht 34 und der Reinigungsschemie die Ätzrate (Verlustrate) der dielektrischen Schicht 32B (während der Strukturierung und der Reinigung) niedriger als die Ätzrate der dielektrischen Schicht 32A, die Siliziumoxid enthalten kann. Beispielsweise kann das Ätzratenverhältnis  $ER_{32A}/ER_{32B}$  höher als etwa 5 oder höher als etwa 10 sein, wobei  $ER_{32B}$  die Ätzrate der dielektrischen Schicht 32B und  $ER_{32A}$  die Ätzrate der dielektrischen Schicht 32A ist. Infolgedessen verhindert die dielektrische Schicht 32B in den Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung das Ätzen besser als Siliziumoxid, bei dem es sich auch um das Gateoxid der E/A-Transistoren (die in demselben Wafer/Die wie die GAA-Transistoren ausgebildet sein können) handeln kann.

[0043] Da die oberen Abschnitte der dielektrischen Schicht 32A dicker sind und widerstandsfähiger gegenüber Ätzen und Reinigen sind, verringert sich die Wahrscheinlichkeit, dass der obere Abschnitt der dielektrischen Schicht 32B im Strukturierungsprozess vollständig entfernt wird. Dementsprechend ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass die darunterliegende obere Nanostruktur 22B geätzt wird, bzw. ist deren Verlust beim Ätzen geringer. Die erneute Oxidation der oberen Nanostruktur 22B, die auch als Deckschicht bezeichnet wird, wird verringert, und der Verlust der Deckschicht wird verringert.

[0044] Beim Ätz- und Reinigungsprozess können auch die vertikalen Abschnitte (siehe die Figuren 6B und 6C) der dielektrischen Schicht 32 ausgedünnt werden. Gemäß einigen Ausführungsformen werden die vertikalen Abschnitte der dielektrischen Schicht 32B (sofern vorhanden) aufgrund ihrer sehr geringen Dicke vollständig



entfernt. Gemäß alternativen Ausführungsformen werden die vertikalen Abschnitte der dielektrischen Schicht 32B (sofern ausgebildet) ausgedünnt, aber nicht vollständig entfernt.

[0045] Wie in Figur 7 gezeigt, werden als Nächstes Gateabstandshalter 38 an den Seitenwänden der Dummy-Gatestapel 37 ausgebildet. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 216 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Gemäß einigen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung sind die Gateabstandshalter 38 aus einem Dielektrikum wie Siliziumnitrid (SiN), Siliziumoxid (SiO<sub>2</sub>), Siliziumkarbonitrid (SiCN), Siliziumoxynitrid (SiON), Siliziumoxykarbonitrid (SiOCN) oder dergleichen ausgebildet und können eine Einzelschichtstruktur oder eine Mehrschichtstruktur mit mehreren dielektrischen Schichten aufweisen. Zu dem Ausbildungsprozess der Gateabstandshalter 38 können ein Abscheiden einer oder mehrerer dielektrischer Schichten und dann ein Durchführen eines oder mehrerer anisotroper Ätzprozesse an der einen oder den mehreren dielektrischen Schichten gehören. Die verbleibenden Abschnitte der einen oder mehreren dielektrischen Schichten bilden die Gateabstandshalter 38.

[0046] Die Figuren 8A, 8B und 8C zeigen die Ausbildung von Vertiefungen 42, aus denen Epitaxiebereiche ausgebildet werden. Figur 8A zeigt den vertikalen Querschnitt 8A–8A in Figur 8C, der durch die Abschnitte der vorstehenden Finnen 28 verläuft, die nicht von den Dummy-Gatestapeln 37 und Gateabstandshaltern bedeckt sind. In Figur 8A sind außerdem Finnenabstandshalter 38' gezeigt, die sich an den Seitenwänden der vorstehenden Finnen 28 befinden. Figur 8B zeigt den Referenzquerschnitt 8B–8B in Figur 8C, wobei der Referenzquerschnitt parallel zur Längsrichtung der vorstehenden Finnen 28 verläuft.

[0047] Wie in den Figuren 8A, 8B und 8C gezeigt, werden die freiliegenden Abschnitte der dielektrischen Schichten 32 geätzt. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 218

in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die Abschnitte der dielektrischen Schicht 32 und der vorstehenden Finnen 28, die direkt unter den Dummy-Gatestapeln 37 und den Gateabstandshaltern 38 liegen, bleiben nach dem Ätzprozess erhalten. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 220 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die verbleibenden Abschnitte der dielektrischen Schicht 32 werden als Teil der Dummy-Gatestapel 37 betrachtet. Gemäß einigen Ausführungsformen gehört zu dem Ätzprozess ein Trockenätzprozess, der unter Verwendung von  $\text{C}_2\text{F}_6$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{SO}_2$ , der Mischung aus  $\text{HBr}$ ,  $\text{Cl}_2$  und  $\text{O}_2$ , der Mischung aus  $\text{HBr}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_2$  und  $\text{CH}_2\text{F}_2$  oder dergleichen ausgeführt wird, um die mehrschichtigen Halbleiterstapel 22' und die darunterliegenden Substratstreifen 20' zu ätzen. Die Böden der Vertiefungen 42 liegen mindestens auf gleicher Höhe mit den Böden der mehrschichtigen Halbleiterstapel 22' oder können tiefer liegen. Das Ätzen kann anisotrop sein, so dass die den Vertiefungen 42 zugewandten Seitenwände der mehrschichtigen Halbleiterstapel 22' vertikal und gerade sind.

[0048] Mit Bezug auf Figur 8B werden die Opferhalbleiterschichten 22A seitlich vertieft, so dass seitliche Vertiefungen 41 ausgebildet werden, die von den Rändern der jeweiligen darüber- und darunterliegenden Nanostrukturen 22B zurückgesetzt sind. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 222 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Das seitliche Vertiefen der Opferhalbleiterschichten 22A kann durch einen Nassätzprozess unter Verwendung eines Ätzmittels erreicht werden, das selektiver gegenüber dem Material der Opferhalbleiterschichten 22A (beispielsweise Siliziumgermanium ( $\text{SiGe}$ )) als gegenüber dem Material der Nanostrukturen 22B und des Substrats 20 (beispielsweise Silizium ( $\text{Si}$ )) ist. Beispielsweise kann in einer Ausführungsform, bei der die Opferhalbleiterschichten 22A aus Siliziumgermanium ausgebildet sind und die Nanostrukturen 22B aus Silizium ausgebildet sind, der Nassätzprozess unter Verwendung eines Ätzmittels wie etwa

Salzsäure (HCl) ausgeführt werden. Der Nassätzprozess kann unter Verwendung eines Tauchprozesses, eines Sprühprozesses oder dergleichen ausgeführt werden. Gemäß alternativen Ausführungsformen wird das seitliche Vertiefen der Opferhalbleiterschichten 22A durch einen isotropen Trockenätzprozess oder eine Kombination aus einem Trockenätzprozess und einem Nassätzprozess erreicht.

[0049] Die Figuren 9A und 9B zeigen die Ausbildung von inneren Abstandshaltern 44. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 224 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Zu dem Ausbildungsprozess gehören ein Abscheiden einer Abstandshalterschicht, die sich in die Vertiefungen 41 erstreckt, und ein Durchführen eines Ätzprozesses zum Entfernen der Abschnitte der inneren Abstandshalterschicht außerhalb der Vertiefungen 41, wodurch die inneren Abstandshalter 44 in den Vertiefungen 41 übrig bleiben. Die inneren Abstandshalter 44 können aus SiOCN, SiON, SiOC, SiCN oder dergleichen ausgebildet sein oder diese enthalten, wobei gemäß einigen Ausführungsformen das Ätzen der Abstandshalterschicht durch einen Nassätzprozess erreicht werden kann, bei dem die Ätzchemikalie  $H_2SO_4$ , verdünnte HF, Ammoniaklösung ( $NH_4OH$ , Ammoniak in Wasser) oder dergleichen oder Kombinationen davon enthalten kann.

[0050] Die Figuren 10A und 10B zeigen Querschnittsansichten von durch Epitaxie ausgebildeten Source/Drain-Bereichen 48 in den Vertiefungen 42. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 226 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Ein oder mehrere Source/Drain-Bereiche können eine Source oder einen Drain bezeichnen, einzeln oder gemeinsam, abhängig vom Kontext. Gemäß einigen Ausführungsformen können die Source/Drain-Bereiche 48 eine Spannung auf die Nanostrukturen 22B ausüben, die als Kanäle der entsprechenden GAA-Transistoren verwendet werden, wodurch die Leistung verbessert wird.

[0051] Gemäß einigen Ausführungsformen ist der entsprechende Transistor vom n-Typ, und die epitaktischen Source/Drain-Bereiche 48 werden dementsprechend durch Dotierung mit einem n-Dotierstoff als n-Typ ausgebildet. Beispielsweise kann Siliziumphosphor (SiP), Siliziumkohlenstoffphosphor (SiCP) oder dergleichen gezüchtet werden, um die epitaktischen Source/Drain-Bereiche 48 auszubilden. Gemäß alternativen Ausführungsformen ist der entsprechende Transistor vom p-Typ, und die epitaktischen Source/Drain-Bereiche 48 werden dementsprechend durch Dotierung mit einem p-Dotierstoff als p-Typ ausgebildet. Beispielsweise kann Siliziumbor (SiB), Siliziumgermaniumbor (SiGeB) oder dergleichen gezüchtet werden, um die epitaktischen Source/Drain-Bereiche 48 auszubilden. Nachdem die Vertiefungen 42 mit den Epitaxiebereichen 48 gefüllt sind, bewirkt ein weiteres epitaktisches Wachstum der Epitaxiebereiche 48, dass sich die Epitaxiebereiche 48 horizontal ausdehnen und sich Facetten bilden können. Das weitere Wachstum der Epitaxiebereiche 48 kann auch bewirken, dass benachbarte Epitaxiebereiche 48 miteinander verschmelzen.

[0052] Nach dem Epitaxieprozess können die Epitaxiebereiche 48 zusätzlich mit einer n-Verunreinigung oder einer p-Verunreinigung implantiert werden, um Source- und Drain-Bereiche auszubilden, die ebenfalls mit dem Bezugszeichen 48 gekennzeichnet sind. Gemäß alternativen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung wird der Implantationsprozess übersprungen, wenn die Epitaxiebereiche 48 während der Epitaxie vor Ort mit der n-Verunreinigung oder der p-Verunreinigung dotiert werden, und die Epitaxiebereiche 48 bilden auch die Source/Drain-Bereiche.

[0053] Die Figuren 11A, 11B und 11C zeigen die Querschnittsansichten und eine Perspektivansicht der Struktur nach der Ausbildung einer Kontaktätzstoppschicht (CESL) 50 und eines Zwischenschichtdielektrikums (ILD) 52. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 228 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die CESL 50 kann aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid, Siliziumkarbonitrid oder dergleichen

ausgebildet sein und kann unter Verwendung von CVD, ALD oder dergleichen ausgebildet werden. Das ILD 52 kann ein Dielektrikum enthalten, das beispielsweise unter Verwendung von FCVD, Rotationsbeschichtung, CVD oder einem anderen geeigneten Abscheidungsverfahren ausgebildet wird. Das ILD 52 kann aus einem sauerstoffhaltigen Dielektrikum ausgebildet sein, das aus einem Material auf Siliziumoxidbasis wie Siliziumoxid, Phosphorsilikatglas (PSG), Borsilikatglas (BSG), bordotiertem Phosphorsilikatglas (BPSG), undotiertem Silikatglas (USG) oder dergleichen bestehen kann.

[0054] Die Figuren 12A und 12B bis 15A und 15B zeigen den Prozess zur Ausbildung von Ersatz-Gatestapeln und Kontaktsteckern. In den Figuren 12A und 12B wird ein Planarisierungsprozess wie beispielsweise ein CMP-Prozess oder ein mechanischer Schleifprozess durchgeführt, um die obere Fläche des ILD 52 einzuebnen. Gemäß einigen Ausführungsformen kann der Planarisierungsprozess die Hartmasken 36 entfernen, so dass die Dummy-Gateelektroden 34 freigelegt werden, wie in Figur 12A gezeigt. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 230 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Gemäß alternativen Ausführungsformen kann der Planarisierungsprozess die Hartmasken 36 freilegen und wird auf diesen angehalten. Gemäß einigen Ausführungsformen sind nach dem Planarisierungsprozess die oberen Flächen der Dummy-Gateelektroden 34 (oder der Hartmasken 36), der Gateabstandshalter 38 und des ILD 52 innerhalb von Prozessschwankungen plan.

[0055] Als nächstes werden in dem in den Figuren 13A und 13B gezeigten Prozess die Dummy-Gateelektroden 34 (und die Hartmasken 36, falls noch vorhanden) in einem oder mehreren Ätzprozessen entfernt, so dass Vertiefungen 58 ausgebildet werden. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 232 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die Abschnitte der dielektrischen Schicht 32B liegen in Vertiefungen 58 frei.

[0056] Gemäß einigen Ausführungsformen kann das Entfernen der Dummy-Gateelektroden 34 durch einen Trocken- und/oder Nassätzprozess erreicht werden. Wenn beispielsweise Trockenätzen ausgeführt wird, kann das Ätzgas  $F_2$ ,  $Cl_2$ ,  $HCl$ ,  $HBr$ ,  $Br_2$ ,  $C_2F_6$ ,  $CF_4$ ,  $SO_2$  oder dergleichen oder Kombinationen davon enthalten.

[0057] Unter Bezugnahme auf die Figuren 14A und 14B werden die freiliegenden Abschnitte der Verbund-Gatedielektrika 32 geätzt. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 234 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die Abschnitte der Gatedielektrika 32, die direkt unter den Gateabstandshaltern 38 liegen, sind dagegen vor Entfernung geschützt.

[0058] Nachfolgend werden die Opferschichten 22A entfernt, so dass Vertiefungen 58 zwischen den Nanostrukturen 22B ausgebildet werden. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 236 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die Opferschichten 22A können durch Ausführen eines isotropen Ätzprozesses wie eines Nassätzprozesses unter Verwendung von Ätzmitteln entfernt werden, die selektiv für die Materialien der Opferschichten 22A sind, während die Nanostrukturen 22B, das Substrat 20, die STI-Bereiche 26 und die verbleibenden Gatedielektrika 32A im Vergleich zu den Opferschichten 22A relativ ungeätzt bleiben. Gemäß einigen Ausführungsformen, bei denen die Opferschichten 22A beispielsweise SiGe enthalten und die Nanostrukturen 22B beispielsweise Si oder kohlenstoffdotiertes Silizium enthalten, können Chemikalien wie Tetramethylammoniumhydroxid (TMAH), Ammoniumhydroxid ( $NH_4OH$ ) oder dergleichen zum Entfernen der Opferschichten 22A verwendet werden.

[0059] Unter Bezugnahme auf die Figuren 15A, 15B und 15C werden Gatestapel 70 ausgebildet. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 238 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Zuerst werden Gatedielektrika 62 ausgebildet. Gemäß einigen Ausführungsformen gehören zu jedem der Gatedielektrika 62 eine

Grenzflächenschicht 64 und eine High-k-Dielektrikumsschicht 66 auf der Grenzflächenschicht 64. Die Grenzflächenschicht 64 kann aus Siliziumoxid ausgebildet sein oder dieses enthalten, das durch einen konformen Abscheidungsprozess wie ALD oder CVD abgeschieden werden kann. Gemäß einigen Ausführungsformen gehören zu der High-k-Dielektrikumsschicht 66 eine oder mehrere Dielektrikumsschichten. Beispielsweise kann die High-k-Dielektrikumsschicht 66 ein Metalloxid oder ein Silikat aus Hafnium, Aluminium, Zirkonium, Lanthan, Mangan, Barium, Titan, Blei und Kombinationen davon enthalten.

[0060] Gateelektroden 68 werden über den Gatedielektrika 62 ausgebildet. Beim Ausbildungsprozess werden zunächst leitfähige Schichten auf der High-k-Dielektrikumsschicht 66 ausgebildet, die die verbleibenden Anteile der Vertiefungen 58 füllen. Die Gateelektroden 68 können ein metallhaltiges Material wie etwa TiN, TaN, TiAl, TiAlC, Kobalt, Ruthenium, Aluminium, Wolfram, Kombinationen davon und/oder Mehrfachschichten davon enthalten. Die Gateelektroden 68 können auch ein Füllmetall wie Kobalt, Wolfram oder dergleichen enthalten. Die Gatedielektrika 62 und die Gateelektroden 68 füllen auch die Räume zwischen benachbarten Nanostrukturen 22B und füllen die Räume zwischen den unteren der Nanostrukturen 22B und den darunterliegenden Substratstreifen 20'. Nach dem Füllen der Vertiefungen 58 wird ein Planarisierungsprozess wie beispielsweise ein CMP-Prozess oder ein mechanischer Schleifprozess durchgeführt, um die überschüssigen Anteile der Gatedielektrika 62 und der Gateelektroden 68 zu entfernen, die sich über der oberen Fläche des ILD 52 befinden. Die Gateelektroden 68 und die Gatedielektrika 62 werden gemeinsam als Gatestapel 70 der resultierenden Nano-FETs bezeichnet.

[0061] Als nächstes werden die Gatestapel 70 vertieft, so dass Vertiefungen direkt über den Gatestapeln 70 und zwischen gegenüberliegenden Abschnitten der Gateabstandshalter 38 ausgebildet werden. Eine Gatemaske 74, zu der eine oder

mehreren Schichten aus Dielektrika wie Siliziumnitrid, Siliziumoxynitrid oder dergleichen gehören, wird in jede der Vertiefungen gefüllt, worauf ein Planarisierungsprozess folgt, um überschüssige Anteile der Dielektrika zu entfernen, die über dem ILD 52 vorstehen.

[0062] Wie in den Figuren 15A und 15B weiter gezeigt, wird ein ILD 76 über dem ILD 52 und über den Gatemasken 74 abgeschieden. Vor der Ausbildung des ILD 76 kann, muss aber keine Ätzstoppschicht (nicht gezeigt) abgeschieden werden. Gemäß einigen Ausführungsformen wird das ILD 76 durch FCVD, CVD, PECVD oder dergleichen ausgebildet. Das ILD 76 ist aus einem Dielektrikum ausgebildet, das aus Siliziumoxid, PSG, BSG, BPSG, USG oder dergleichen ausgewählt sein kann.

[0063] Das ILD 76, das ILD 52, die CESL 50 und die Gatemasken 74 werden geätzt, um Vertiefungen auszubilden (die durch Kontaktstecker 80A und 80B belegt werden), durch die die epitaktischen Source/Drain-Bereiche 48 und die Gatestapel 70 freigelegt werden. Die Vertiefungen können durch einen anisotropen Ätzprozess wie RIE, NBE oder dergleichen ausgebildet werden. Obwohl Figur 15B zeigt, dass die Kontaktstecker 80A und 80B in einem gleichen Querschnitt liegen, können die Kontaktstecker 80A und 80B in verschiedenen Ausführungsformen in unterschiedlichen Querschnitten ausgebildet werden, wodurch die Gefahr eines Kurzschlusses dazwischen verringert wird. Nachdem die Vertiefungen ausgebildet wurden, werden Silizidbereiche 78 über den epitaktischen Source/Drain-Bereichen 48 ausgebildet. Gemäß einigen Ausführungsformen werden die Silizidbereiche 78 durch Metallabscheidungs- und Temperprozesse ausgebildet.

[0064] Es werden Gatekontaktstecker 80A und Source/Drain-Kontaktstecker 80B ausgebildet. Der entsprechende Prozess ist als Prozess 240 in dem in Figur 16 gezeigten Prozessablauf 200 gezeigt. Die Gatekontakte 80A liegen über den Gateelektroden 68 und berühren diese. Über den Silizidbereichen 78 werden Source/Drain-Kontaktstecker



80B ausgebildet. Die Kontaktstecker 80A und 80B können jeweils eine oder mehrere Schichten aufweisen, beispielsweise eine Sperrschicht und ein Füllmaterial. Die Sperrschicht kann Titan, Titannitrid, Tantal, Tantalnitrid oder dergleichen enthalten. Das Füllmaterial kann Kupfer, eine Kupferlegierung, Silber, Gold, Wolfram, Kobalt, Aluminium, Nickel und/oder dergleichen enthalten. Ein Planarisierungsprozess wie beispielsweise ein CMP-Prozess kann durchgeführt werden, um überschüssiges Material von einer Oberfläche des ILD 76 zu entfernen. Somit ist der GAA-Transistor 82 ausgebildet.

[0065] Im fertigen GAA-Transistor 82 können beide dielektrischen Schichten 32A und 32B vorhanden sein. Ein Querschnitt 15D–15D (Figur 15C), der durch den Gateabstandshalter 38 verläuft, ist in Figur 15D gezeigt. Die dielektrische Schicht 32A kann eine konforme Schicht auf einer vorstehenden Finne bilden, zu der die Halbleiternanostrukturen 22B und der Gatestapel 70 zwischen benachbarten Halbleiternanostrukturen 22B gehören. Die Halbleiternanostrukturen 22B und die Abschnitte des Gatestapels 70 zwischen benachbarten Halbleiternanostrukturen 22B bilden gemeinsam eine vorstehende Finne, die höher als die oberen Flächen der STI-Bereiche 26 ist. Die dielektrische Schicht 32B kann einen ersten horizontalen Abschnitt über der vorstehenden Finne und einen zweiten horizontalen Abschnitt auf der oberen Fläche der STI-Bereich 26 aufweisen.

[0066] Die dielektrische Schicht 32B kann, muss aber keine Seitenwandabschnitte an den Seitenwänden der vorstehenden Finne aufweisen. Wenn die dielektrische Schicht 32B Seitenwandabschnitte aufweist, können die untersten Enden der Seitenwandabschnitte höher, auf gleicher Höhe oder niedriger als die Mitte der Höhe der vorstehenden Finne liegen. Die Seitenwandabschnitte der dielektrischen Schicht 32B können mit den zweiten horizontalen Abschnitten der zweiten dielektrischen

Schicht 32B verbunden sein oder von diesen beabstandet sein, wobei sich diese zweiten horizontalen Abschnitte auf der oberen Fläche der STI-Bereich 26 befinden.

[0067] Der Gateabstandshalter 38 kann einen Seitenwandabschnitt der dielektrischen Schicht 32A berühren und ist durch die dielektrische Schicht 32B vom oberen Abschnitt der dielektrischen Schicht 32A beabstandet. Alternativ dazu ist gemäß einigen Ausführungsformen, bei denen die dielektrische Schicht 32B auch Seitenwandabschnitte auf allen Seitenwandabschnitten der dielektrischen Schicht 32A (mit geringerer Dicke als die oberen Abschnitte) aufweist, der Gateabstandshalter 38 durch die dielektrische Schicht 32B vollständig von der dielektrischen Schicht 32A beabstandet.

[0068] Die Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung haben einige vorteilhafte Eigenschaften. Durch die Ausbildung einer dielektrischen Schicht unter Verwendung eines anisotropen Abscheidungsprozesses weist die dielektrische Schicht auf den vorstehenden Finnen und STI-Bereichen eine größere Dicke auf. Bei der Strukturierung zur Ausbildung von Dummy-Gates und den nachfolgenden Reinigungsprozessen fungiert die dielektrische Schicht als Hartmaske auf einer darunter liegenden konformen dielektrischen Schicht, so dass sie den Deckschichtverlust der Halbleiternanostrukturen verringern und den Verlust der STI-Bereiche verringern kann.

[0069] Gemäß einigen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung umfasst ein Verfahren ein Ausbilden einer vorstehenden Finne; Ausbilden einer ersten dielektrischen Schicht, die einen ersten oberen Abschnitt auf einer oberen Fläche der vorstehenden Finne; und einen ersten Seitenwandabschnitt auf einer Seitenwand der vorstehenden Finne aufweist; Ausbilden einer zweiten dielektrischen Schicht über dem ersten oberen Abschnitt der ersten dielektrischen Schicht und der oberen Fläche der vorstehenden Finne, wobei die zweite dielektrische Schicht unter Verwendung eines

anisotropen Abscheidungsprozesses ausgebildet wird; Ausbilden einer Dummy-Gateelektrode auf der zweiten dielektrischen Schicht; Ausbilden eines Gateabstandshalters auf einer Seitenwand der Dummy-Gateelektrode; Entfernen der Dummy-Gateelektrode; und Ausbilden einer Ersatz-Gateelektrode in einem Raum, der von der Dummy-Gateelektrode hinterlassen wird. In einer Ausführungsform ist die zweite dielektrische Schicht frei von Abschnitten auf dem ersten Seitenwandabschnitt der ersten dielektrischen Schicht.

[0070] In einer Ausführungsform werden die erste dielektrische Schicht und die zweite dielektrische Schicht unter Verwendung unterschiedlicher Abscheidungsverfahren ausgebildet. In einer Ausführungsform wird die erste dielektrische Schicht unter Verwendung eines konformen Abscheidungsverfahrens abgeschieden. In einer Ausführungsform wird die zweite dielektrische Schicht unter Verwendung einer plasmaunterstützten Atomlagenabscheidung abgeschieden, wobei eine Vorspannung angelegt wird. In einer Ausführungsform umfasst das Verfahren ferner, nachdem die Dummy-Gateelektrode entfernt wurde und bevor die Ersatz-Gateelektrode ausgebildet wird, Ätzen freiliegender Abschnitte der ersten dielektrischen Schicht und der zweiten dielektrischen Schicht.

[0071] In einer Ausführungsform verbleiben, nachdem die freiliegenden Abschnitte der ersten dielektrischen Schicht und der zweiten dielektrischen Schicht geätzt wurden, ein erster Abschnitt der ersten dielektrischen Schicht und ein zweiter Abschnitt der zweiten dielektrischen Schicht direkt unter dem Gateabstandshalter. In einer Ausführungsform ist der zweite Abschnitt der zweiten dielektrischen Schicht, der direkt unter dem Gateabstandshalter liegt, nicht konform. In einer Ausführungsform weist die vorstehende Finne mehrere Halbleiternanostrukturen auf, die gestapelt und voneinander beabstandet sind, und wobei sich die Ersatz-Gateelektrode in Räume zwischen den mehreren Halbleiternanostrukturen erstreckt.

[0072] In einer Ausführungsform umfasst das Ausbilden der Dummy-Gateelektrode ein Abscheiden einer Polysiliziumschicht auf der zweiten dielektrischen Schicht und Strukturieren der Polysiliziumschicht, wobei das Strukturieren auf der zweiten dielektrischen Schicht anhält. In einer Ausführungsform weist die zweite dielektrische Schicht einen zweiten Seitenwandabschnitt auf dem ersten Seitenwandabschnitt auf, und wobei der zweite Seitenwandabschnitt in einem Reinigungsprozess entfernt wird, der durchgeführt wird, bevor der Gateabstandshalter ausgebildet wird.

[0073] Gemäß einigen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung weist eine Struktur einen dielektrischen Isolierbereich; mehrere Halbleiternanostrukturen neben dem dielektrischen Isolierbereich und höher als dieser, wobei höhere der mehreren Halbleiternanostrukturen entsprechende niedrigere der mehreren Halbleiternanostrukturen überlappen; einen Gatestapel, der einen ersten Abschnitt über einer oberen Nanostruktur der mehreren Halbleiternanostrukturen; und zweite Abschnitte zwischen benachbarten der mehreren Halbleiternanostrukturen aufweist, wobei die zweiten Abschnitte des Gatestapels und die mehreren Halbleiternanostrukturen gemeinsam eine vorstehende Finne bilden; eine erste dielektrische Schicht auf einer oberen Fläche und einer Seitenwand der vorstehenden Finne; eine zweite dielektrische Schicht, die einen ersten Teil über der ersten dielektrischen Schicht aufweist, wobei die zweite dielektrische Schicht weniger konform als die erste dielektrische Schicht ist, und wobei zumindest ein oberer Abschnitt des ersten Teils höher als eine obere Nanostruktur der mehreren Halbleiternanostrukturen liegt; und einen Gateabstandshalter über der zweiten dielektrischen Schicht auf.

[0074] In einer Ausführungsform ist die erste dielektrische Schicht konform, und der erste Teil der zweiten dielektrischen Schicht weist ein unterstes Ende auf, das im Wesentlichen auf gleicher Höhe mit einer obersten Fläche der oberen Nanostruktur

liegt. In einer Ausführungsform weist die zweite dielektrische Schicht ferner einen zweiten Abschnitt auf, der den dielektrischen Isolierbereich überlappt, wobei der erste Abschnitt und der zweite Abschnitt getrennte Abschnitte der zweiten dielektrischen Schicht sind. In einer Ausführungsform weist der erste Abschnitt der zweiten dielektrischen Schicht ferner einen zweiten Teil an einer Seitenwand der vorstehenden Finne auf, wobei der zweite Teil dünner als der erste Teil ist. In einer Ausführungsform liegt ein unterstes Ende des zweiten Teils höher als eine Mitte der Höhe der vorstehenden Finne.

[0075] Gemäß einigen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung weist eine Struktur ein Halbleitersubstrat; einen ersten dielektrischen Isolierbereich und einen zweiten dielektrischen Isolierbereich in dem Halbleitersubstrat; eine vorstehende Finne zwischen dem ersten dielektrischen Isolierbereich und dem zweiten dielektrischen Isolierbereich und höher als diese; eine erste dielektrische Schicht auf einer oberen Fläche und einer Seitenwand der vorstehenden Finne; eine zweite dielektrische Schicht über der ersten dielektrischen Schicht, wobei die zweite dielektrische Schicht einen ersten Abschnitt, der die vorstehende Finne überlappt; und einen zweiten Abschnitt aufweist, der den ersten dielektrischen Isolierbereich überlappt, wobei der erste Abschnitt und der zweite Abschnitt getrennte Abschnitte der zweiten dielektrischen Schicht sind; und einen Gateabstandshalter über der zweiten dielektrischen Schicht auf.

[0076] In einer Ausführungsform berührt der Gateabstandshalter physisch einen Seitenwandteil der ersten dielektrischen Schicht und ist durch den ersten Abschnitt der zweiten dielektrischen Schicht von einem oberen Teil der ersten dielektrischen Schicht beabstandet. In einer Ausführungsform enthält die erste dielektrische Schicht Siliziumoxid, und die zweite dielektrische Schicht enthält Silizium und ein Element, das aus der Gruppe bestehend aus N, C und Kombinationen davon ausgewählt ist. In

einer Ausführungsform weist die zweite dielektrische Schicht ferner einen ersten vertikalen Abschnitt auf einem zweiten vertikalen Abschnitt der ersten dielektrischen Schicht auf, und wobei der zweite vertikale Abschnitt auf der Seitenwand der vorstehenden Finne liegt.

~~[0077]—Das Vorangehende beschreibt Merkmale von verschiedenen Ausführungsformen, so dass Fachleute die Aspekte der vorliegenden Offenbarung besser verstehen können. Fachleute sollten anerkennen, dass sie die vorliegende Offenbarung leicht als Basis verwenden können, um weitere Prozesse und Strukturen zu entwerfen oder zu modifizieren, um die gleichen Ziele zu erreichen und/oder die gleichen Vorteile der hier eingeführten Ausführungsformen zu realisieren. Fachleute sollten auch erkennen, dass solche äquivalenten Konstruktionen nicht vom Geist und Umfang der vorliegenden Offenbarung abweichen und dass sie verschiedene Änderungen, Ersetzungen und Modifikationen hier vornehmen können, ohne vom Geist und Umfang der vorliegenden Offenbarung abzuweichen.~~