

Beschreibung

Halbleitervorrichtung und Halbleitereinrichtung sowie Verfahren zur Herstellung solcher

5

Die Erfindung betrifft eine Halbleitervorrichtung und ein Verfahren zur Herstellung einer solchen. Darüber hinaus betrifft die Erfindung eine Halbleitereinrichtung und ein Verfahren zur Herstellung einer solchen.

10

Der Austausch von Daten innerhalb und insbesondere zwischen Chips kommt zunehmend an Kapazitätsgrenzen. Die Anzahl möglicher Anschlüsse ist durch die zur Verfügung stehende Chipfläche und durch technologische Faktoren, die sich auf die Herstellbarkeit auswirken, begrenzt. Zudem ist die

15 Bandbreite elektrischer Verbindungen durch mit der Frequenz stark zunehmende elektrische Verluste begrenzt. Für ein großes Anwendungsspektrum liegt der Bedarf an breitbandiger I/O Schnittstellen oberhalb der aktuellen Kapazitäten. Beispielhafte Anwendungen liegen im Bereich des sogenannten disaggregierten Computings (englisch: disaggregated computing), welches

20 insbesondere die konfigurierbare Vernetzung von CPU oder GPU und Speicher betrifft bzw. einschließt, der CPU-Speicher-Anbindung und IoT Netzwerken u.a. für autonome Mobilität. In den genannten Fällen ist oftmals eine extreme Bandbreite mit Gb/s bis Tb/s Datentransfer erforderlich.

25 Derzeit werden I/O-Schnittstellen im Wesentlichen elektronisch realisiert. Das trifft auf Speicheranbindung, Sensornetzwerke (IoT), und wesentliche Bereiche der Datenkommunikation zu. Die aktuell technisch mögliche I/O-Bandbreite reicht oftmals nicht aus, um gewünschte Transferraten zu erreichen. Physikalische, grundlegend begrenzend wirkende Zusammenhänge

30 wie Verluste und minimale Abmessungen von elektrischen Kontaktstellen

verhindern dabei eine wesentliche Steigerung der Performance. Die elektrischen Verluste spielen insbesondere bei hohen Frequenzen eine wesentliche Rolle (beispielsweise 10 dB/m im Bereich um 50 GHz für koaxiale Leiter), wohingegen die Verluste in Glasfasern im Bereich von 0.1 dB/km im Vergleich extrem klein sind. Der Wechsel zu optischen Schnittstellen kann das Problem der Bandbreite und Reichweite lösen. Die Herstellung kostengünstiger, leistungsfähiger, in sehr großen Stückzahlen verfügbarer Bauteile stellt hier jedoch eine große Herausforderung dar. Dazu ist gegenwärtig nur die Siliziumtechnologie in der Lage, die allerdings nur eingeschränkte photonische Funktionalität mit sich bringt. Besser geeignet, aber nicht monolithisch in die Si Technologie integriert sind III-V Halbleiter.

Neben I/O-Schnittstellen sind weitere Anwendungsgebiete denkbar. Es könnten auch optische Systeme wie Filter, Spektrometer oder neuronale Netze für maschinelles Lernen realisiert werden. Durch eine enge Integration von Photonik und Elektronik könnten neuartige Chiparchitekturen ermöglicht werden.

Optische Schnittstellen werden in gewissem Umfang für Datenkommunikation entweder durch Heterointegration oder Bondingtechniken elektronischer und optischer Chips erreicht. Das bedeutet, dass optische und elektronische Chips mit unterschiedlichen Technologien hergestellt und anschließend verbunden werden. Dazu werden üblicherweise auf III-V Übergangshalbleitern basierte optische Schaltungen auf Si Wafer mit elektronischen Steuerschaltungen gebondet. Der Vorteil ist, dass jede Schaltungsgattung in ihrem optimalen Prozess hergestellt werden kann. Der erhebliche Nachteil sind allerdings die hohen Kosten und die sequentielle und damit zeitintensive Fertigungstechnik für das Bonding (jeder Chip muss einzeln nacheinander auf den Wafer geklebt werden) und der Bruch der Herstellungslinie. Nachdem die einzelnen Chips auf den Wafer geklebt sind, kann der Wafer nicht weiter

insgesamt verarbeitet werden. Der Wafer wird im nächsten Schritt vereinzelt und die Chips separat zu Ende verarbeitet (der Hauptteil der Fertigungsschritte ist allerdings bereits erfolgt).

- 5 Alternativ kann Silizium als Ausgangsmaterial eingesetzt werden und es können elektronische und photonische Schaltungen auf einem Chip erreicht werden. Dabei ist allerdings die Kombination der Technologie für elektronische und photonische Schaltungen festgelegt, weil optische und elektronische Schaltungen in derselben Ebene hergestellt werden. Die Si Elektronik
10 und Photonik befindet sich auf einem Wafer, nebeneinander angeordnet. Dies ist beispielsweise aus dem Artikel „Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip“, Nature 556, Seiten 349-354 (2018), doi: 10.1038/s41586-018-0028-z bekannt. Vorteil ist, dass in dieser kombinierten Si-Technologie erhebliche Kosten und Zeiter-
15 sparnis gegenüber der die-attach oder bonding Strategie mit III-V Halbleitern erreicht werden können. Der Nachteil ist, dass die Si Photonik Bauteile üblicherweise weniger gute Performance aufweisen im Vergleich zu III-V Übergangshalbleitern. Ein weiterer erheblicher Nachteil ist die Festlegung der Elektronik- und Photonik-Technologie, so dass aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nur bestimmte Typen Mikrochips sinnvoll hergestellt
20 werden können.

- Aus der US 2014/0264400 A1 geht eine Halbleitervorrichtung mit integrierten Schaltkreisen hervor. Die Vorrichtung umfasst eine Mehrzahl von Chips, die
25 die integrierten Schaltkreise aufweisen und die beabstandet voneinander in Vertiefungen eines Trägersubstrates fixiert sind. Auf den Chips und der Substratoberfläche sind planare Schichten deponiert, die Wellenleiter und photonische Einrichtungen umfassen, um eine optische Intra-Chip-Verbindung für photonische Einrichtungen eines Chips oder eine optische In-

ter-Chip-Verbindung für photonische Einrichtungen verschiedener Chips zu gewährleisten.

Die vorbekannten Halbleitervorrichtungen haben sich prinzipiell bewährt. Es besteht jedoch weiterhin Bedarf an alternativen Vorrichtungen. Es besteht insbesondere Bedarf daran, einzelne Chips mit integrierter Photonik in großen Mengen mit vertretbarem Produktionsaufwand und somit zu vertretbaren Kosten erhalten zu können.

Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine alternative Halbleitervorrichtung zu schaffen, bei der eine Integration von elektronischen Schaltkreisen und photonischen Komponenten realisiert ist, und die es ermöglicht, Chips mit integrierter Photonik in hohen Stückzahlen mit vertretbarem Aufwand zu erhalten. Darüber hinaus ist es eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung einer solchen Vorrichtung zu erhalten.

Die erstgenannte Aufgabe wird gelöst durch eine Halbleitervorrichtung umfassend einen Wafer mit einem bevorzugt einteiligen Halbleiter-, insbesondere Siliziumsubstrat und wenigstens einem integrierten elektronischen Bauteil, das sich in und/oder auf dem Halbleitersubstrat erstreckt, wobei der Wafer ein das oder wenigstens eines der integrierten elektronischen Bauteile umfassendes Front-End-of-Line und ein darüber liegendes Back-End-of-Line aufweist, und eine auf der von dem Front-End-of-Line abgewandten Seite des Wafers hergestellte photonische Plattform, die wenigstens einen Wellenleiter und wenigstens eine elektro-optischen Einrichtung, insbesondere wenigstens einen Photodetektor und/oder wenigstens einen elektro-optischen Modulator, aufweist, wobei die oder wenigstens eine der elektro-optischen Einrichtungen der photonischen Plattform mit dem oder wenigstens einem der integrierten elektronischen Bauteile des Wafers verbunden ist.

Die zweitgenannte Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zum Herstellen einer Halbleitervorrichtung, umfassend die Schritte

- 5 – ein Wafer mit einem bevorzugt einteiligen Halbleiter-, insbesondere Siliziumsubstrat und wenigstens einem integrierten elektronischen Bauteil, das sich in und/oder auf dem Halbleitersubstrat erstreckt, wird bereitgestellt, wobei der Wafer ein das oder wenigstens eines der integrierten elektronischen Bauteile umfassendes Front-End-of-Line und
10 ein darüber liegendes Back-End-of-Line aufweist,
- es wird eine photonische Plattform auf der von dem Front-End-of-Line abgewandten Seite des Wafers hergestellt, die wenigstens einen Wellenleiter und wenigstens eine elektro-optischen Einrichtung, insbesondere wenigstens ein Photodetektor und/oder wenigstens ein
15 elektro-optischer Modulator, umfasst.

Der Grundgedanke der vorliegenden Erfindung besteht mit anderen Worten darin, unmittelbar auf dem Back-End-of-Line eines Wafers eine photonische Plattform mit wenigstens einem Wellenleiter und wenigstens einer elektro-optischen Einrichtung herzustellen, insbesondere direkt darauf aufzubauen.
20 en.

Unter einem Wafer ist dabei in aus dem Stand der Technik hinlänglich vorbekannter Weise eine Komponente bzw. ein Element bzw. eine Einrichtung zu verstehen, aus dem bzw. aus der durch Wafer-Dicing, das im Deutschen auch als Wafer-Zerkleinern bezeichnet wird, eine Mehrzahl von Chips erhalten wird. Das Dicing bzw. Zerkleinern kann beispielsweise ein (Laser-)Schneiden bzw. Sägen bzw. Ritzen bzw. Brechen des Wafers einschließen. Im Englischen wird ein einzelner bzw. vereinzelter Chip auch als
25 Die bezeichnet bzw. werden Chips im Plural auch als Dies oder Dice be-
30

zeichnet. Es sei angemerkt, dass die nach dem Dicen vorliegenden Chips teilweise auch als Nacktchips bzw. im Englischen bare chips oder bare dies bezeichnet werden. „Nackt“ bezieht sich dabei darauf, dass die Chips noch nicht in ein Gehäuse (englisch: package) eingesetzt wurden. Vorliegend werden auch „nackte“ Chips ohne Gehäuse kurz als Chips bezeichnet.

Wird ein Wafer im Querschnitt betrachtet, lässt sich sein vertikaler Aufbau in unterschiedliche Teilbereiche einteilen. Der unterste Teil ist das Front-End-of-Line oder kurz FEOL, das eines oder mehrere integrierte elektronische Bauteile umfasst. Bei dem bzw. den integrieren elektronischen Bauteilen kann es sich beispielsweise um Transistoren und/oder Kondensatoren und/oder Widerstände handeln. Über dem Front-End-of-Line befindet sich das Back-End-of-Line oder kurz BEOL, in dem in der Regel verschiedene Metallebenen liegen, mittels derer die integrierten elektronischen Bauteile des FEOL verschaltet werden.

Ein Wafer umfasst eine Mehrzahl von Bereichen, die im Anschluss an das Dicen/Zerkleinern/Vereinzeln jeweils einen Chip bzw. Die bilden. Diese Bereiche werden vorliegend auch als Chip- bzw. Die-Bereiche bezeichnet. Jeder Chipbereich des Wafers umfasst bevorzugt einen Abschnitt bzw. Teilbereich des insbesondere einteiligen Halbleitersubstrats des Wafers. Bevorzugt weist ferner jeder Chipbereich einen oder mehrere integrierte elektronische Bauteile auf, die sich in und/oder auf dem entsprechenden Bereich des Halbleitersubstrats – im Querschnitt betrachtet insbesondere im FEOL – erstrecken. Es sei betont, dass die Chipbereiche keine vereinzelter Chips darstellen, der Wafer also keine vereinzelter Chips umfasst.

Es kann sein, dass der bzw. die integrierten elektronischen Bauteile mehrerer, insbesondere aller Chipbereiche des Wafers gleich sind. Dann kann aus der erfindungsgemäßen Vorrichtung durch Dicen eine Mehrzahl identischer

Chips mit darauf hergestellter photonischer Plattform (bzw. jeweils einem Abschnitt dieser) erhalten werden.

Ein Wafer weist zweckmäßiger Weise eine oder mehrere Markierungen auf,
5 entlang der bzw. derer im Rahmen des Dicings das Zerteilen erfolgen kann
bzw. zu erfolgen hat.

Im Rahmen der vorliegenden Erfindung wird eine photonische Plattform un-
mittelbar auf dem Wafer aufgebaut, noch bevor ein Zerteilen (Dicing) des
10 Wafers in einzelne Chips erfolgt. Da bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung
eine photonische Plattform auf einem Wafer hergestellt, insbesondere auf-
gebaut ist bzw. wird, kann aus dieser anschließend durch bloßes Dicing eine
große Anzahl von Chips mit integrierter Photonik erhalten werden. Das Dicing
15 kann dabei genauso erfolgen, wie bei herkömmlichen Wafern ohne photoni-
sche Plattform auf dem Back-End-of-Line. Es können insbesondere auch
hierfür bestehende Einrichtungen bzw. Anlagen verwendet werden. Im Er-
gebnis können einzelne Chips mit Photonik mit vertretbarem Aufwand auch
in Massen produziert werden.

20 Die von dem Front-End-of-Line abgewandte Seite des Wafers, auf der die
photonische Plattform hergestellt ist bzw. wird, kann auch als Oberseite des
Wafers bezeichnet werden.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung zeichnet sich in zweckmäßiger Ausge-
staltung dadurch aus, dass sich oberhalb mehrerer, insbesondere jedes
25 Chipbereiches des Wafers ein darauf hergestellter Bereich der photonischen
Plattform erstreckt, wobei zweckmäßiger Weise jeder der Bereiche der Platt-
form wenigstens einen, bevorzugt mehrere Wellenleiter und wenigstens eine,
bevorzugt mehrere elektro-optisch Einrichtungen, die mit wenigstens einem
integrierten elektronischen Bauteil bzw. Schaltkreis des jeweilige darunter-
30 liegenden Chipbereiches verbunden sind, umfasst.

Die photonische Plattform umfasst zweckmäßiger Weise eine Vielzahl von funktionalen Einheiten, wobei besonders bevorzugt gilt, dass jedem Chipbereich des Wafers wenigstens eine, insbesondere genau eine der funktionalen Einheiten zugeordnet ist, die sich oberhalb des jeweiligen Chipbereichs erstreckt.

Die photonische Plattform wird erfindungsgemäß auf dem Back-End-of-Line des Wafers hergestellt, insbesondere, nachdem der (konventionelle) Herstellungsprozess des Wafers vollständig abgeschlossen ist. Insbesondere in diesem Falle wird es möglich, ohne eine Anpassung der (konventionellen) Wafer-Herstellungsschritte auszukommen. Die Herstellung der photonischen Plattform kann auch vollständig getrennt von der (konventionellen) Wafer-Fertigung erfolgen. Es ist somit ein hohes Maß an Flexibilität gegeben.

Dass sich ein integriertes elektronisches Bauteil in und/oder auf dem Halbleitersubstrat des Wafers der erfindungsgemäßen Vorrichtung erstreckt, bedeutet insbesondere, dass es innerhalb und/oder unmittelbar auf dem Substrat angeordnet ist. Natürlich kann es dabei sein, dass sich ein integriertes elektronisches Bauteil abschnittsweise innerhalb des Substrats erstreckt und abschnittsweise unmittelbar auf dem Substrat, etwa unmittelbar auf einer oder mehreren Seiten des Substrates.

Das Halbleitersubstrat der erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung ist bevorzugt einteilig. Es ist insbesondere ein monolithisches Substrat. Das Substrat in mehreren Lagen hergestellt worden sein.

Das Halbleitersubstrat kann sich ferner durch einen kreisrunden Umfang auszeichnen. Alternativ oder zusätzlich kann es einen Durchmesser im Bereich von 600 mm bis 50 mm, bevorzugt 500 mm bis 100 mm aufweisen. Als

beispielhafte Durchmesser seien 150 mm, 200 mm, 300 mm und 450 mm genannt.

5 Dass die photonische Plattform auf dem Backend hergestellt ist/wird und nicht in einer Ebene mit der Elektronik im Front-End-of-Line, bietet den großen Vorteil, dass dort kein zusätzlicher Platz (auch als „ Real-Estate“ bezeichnet) für die Photonik benötigt wird. Die teilweise bestehende Problematik eines begrenzten Real-Estate im Front-End wird also nicht weiter verschärft.

10

Dass die photonische Plattform auf dem Wafer hergestellt wird bzw. ist bedeutet, dass sie direkt auf diesem gefertigt wird bzw. wurde, was beispielsweise einen Materialaufbau bzw. eine Materialabscheidung direkt auf dem bzw. den Wafer einschließt. Die photonische Plattform zeichnet sich bevorzugt dadurch aus, dass sie auf der von dem Front-End-of-Line abgewandten Seite des Wafers abgeschiedenes Material umfasst. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren kann entsprechend vorgesehen sein, dass die Herstellung der photonischen Plattform einschließt, dass auf der von dem Front-End-of-Line abgewandten Seite des Wafers Material abgeschieden wird. Die photonische Plattform wird bzw. ist insbesondere nicht unabhängig von dem Wafer, etwa auf einem anderen Substrat, hergestellt (worden) und dann auf den Wafer übertragen und z.B. durch Bonding mit dem Wafer verbunden (worden). Sie wird bzw. wurde vielmehr auf diesem erhalten.

25 Es kann sein, dass die photonische Plattform der erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung, gegebenenfalls mit Ausnahmen einer oder mehrerer elektro-optischer Einrichtungen bzw. Komponenten wenigstens einer solchen, keine gebondeten Schichten aufweist.

In besonders vorteilhafter Ausgestaltung weist die photonische Plattform eine Planarisierungsschicht aus einem dielektrischen Material auf. Diese ist bevorzugt auf der von dem Front-End-of-Line abgewandten Seite des Wafers hergestellt. Weiter bevorzugt kann gelten, dass der oder wenigstens einer der Wellenleiter auf der von dem Wafer abgewandten Seite der Planarisierungsschicht hergestellt ist.

Entsprechend kann sich das erfindungsgemäße Verfahren in Weiterbildung dadurch auszeichnen, dass die Herstellung der photonischen Plattform einschließt, dass insbesondere auf der von dem Front-End-of-Line abgewandten Seite des Wafers eine Planarisierungsschicht aus einem dielektrischen Material hergestellt wird.

Die gemäß dieser Ausführungsformen vorgesehene Planarisierungsschicht der photonischen Plattform kann die Grundlage für eine oder mehrere photonische Schichten bzw. Ebenen bilden, die bevorzugt jeweils wenigstens einen Wellenleiter und/oder wenigstens eine elektro-optische Einrichtung umfassen.

Der oder wenigstens einer der Wellenleiter kann dann weiter bevorzugt auf der von dem Wafer abgewandten Seite der Planarisierungsschicht hergestellt sein bzw. werden.

Die Herstellung des wenigstens einen Wellenleiters kann darüber hinaus einschließen, dass ein Wellenleitermaterial insbesondere auf die von dem Wafer abgewandte Seite der Planarisierungsschicht aufgebracht, bevorzugt auf diese abgeschieden oder aufgeschleudert oder transferiert wird, und anschließend bevorzugt eine Strukturierung des aufgetragenen Wellenleitermaterials insbesondere mittels Lithografie und/oder reaktivem Ionenätzen durchgeführt wird. Es können beispielsweise die gleichen Abscheidungsver-

fahren zum Einsatz kommen, die im Folgenden im Zusammenhang mit der Planarisierungsschicht beschrieben sind.

Umfasst die photonische Plattform eine auf dem Back-End-Of-Line vorgese-
5 hen Planarisierungsschicht, gilt für diese, dass sie nicht unabhängig von dem
Wafer, etwa auf einem anderen Substrat hergestellt und dann auf den Wafer
übertragen und z.B. durch Bonding mit dem Wafer verbunden wurde bzw.
worden ist. Sie wird bzw. wurde vielmehr auf diesem erhalten. Man kann
dann auch sagen, dass die Planarisierungsschicht eine monolithische
10 Schicht ist, insbesondere eine mit bzw. zu dem Wafer monolithische Schicht.

Die Planarisierungsschicht zeichnet sich in Weiterbildung an ihrer vom Wafer
abgewandten Seite durch eine Rauheit von weniger als 2,0 nm RMS, bevor-
zugt weniger als 1,0 nm RMS, besonders bevorzugt weniger als 0,3 nm RMS
15 auszeichnet. Eine untere Grenze kann beispielsweise bei 0,01 nm RMS lie-
gen. Mit anderen Worten kann die Rauheit beispielsweise im Bereich von 2,0
nm RMS bis 0,01 nm RMS, bevorzugt im Bereich von 1,0 nm RMS bis 0,01
nm RMS, besonders bevorzugt im Bereich von 0,3 nm RMS bis 0,01 nm
RMS liegen. Die Abkürzung nm steht hier und im Folgenden in an sich be-
20 kannter Weis für Nanometer (10^{-9} m). Die Abkürzung RMS für root mean
squared. Die RMS-Rauheit wird im Deutschen auch als quadratische Rauheit
bezeichnet.

Bei einer weiteren Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung
25 umfasst die Planarisierungsschicht Spin-on-Glass und/oder wenigstens ein
Polymer und/oder wenigstens ein Oxid, insbesondere Siliziumdioxid,
und/oder wenigstens ein Nitrid oder besteht daraus. Das erfindungsgemäße
Verfahren kann entsprechend umfassen, dass eine Planarisierungsschicht
aus oder mit Spin-on-Glass und/oder wenigstens einem Polymer und/oder

wenigstens einem Oxid, insbesondere Siliziumdioxid, und/oder wenigstens einem Nitrid hergestellt wird.

Bei Spin-on-Glass handelt es sich in der Regel um einen flüssigen Stoff, mit dem Wafer durch aufschleudern beschichtet werden können. Nach dem Schleudern ergibt sich eine Schicht auf dem Wafer, deren Dicke von der Oberflächentopologie abhängt. Vertiefungen werden so zum Teil ausgeglichen und die Spin-on-Glass-Beschichtung hat eine planarisierende Wirkung. Spin-on-Glass wird in der Regel nach dem Aufbringen erhitzt und wird dadurch eine glasartige Schicht.

Alternativ oder zusätzlich kann vorgesehen sein, dass die Planarisierungsschicht eine durch Abscheidung, insbesondere chemische Gasphasenabscheidung (englisch: chemical vapor deposition, kurz CVD), bevorzugt Niederdruck chemische Gasphasenabscheidung (englisch: low pressure chemical vapor deposition, kurz: LPCVD) und/oder plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (englisch plasma enhanced chemical vapor deposition, kurz: PECVD), und/ oder durch physikalische Gasphasenabscheidung (englisch: physical vapor deposition) eines Beschichtungsmaterials auf der vom Front-End-of-Line abgewandten Seite des Wafers und bevorzugt anschließendes Bearbeiten des abgeschiedenen Materials auf der vom Wafer abgewandten Seite mittels chemisch-mechanischen Polierens und/oder mittels Resistplanarisierung erhaltene Schicht ist.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren kann entsprechend vorgesehen sein, dass im Rahmen der Herstellung der Planarisierungsschicht wenigstens ein Beschichtungsmaterial auf die von dem Front-End-of-Line abgewandte Seite des Wafers abgeschieden wird, insbesondere durch chemische Gasphasenabscheidung, bevorzugt Niederdruck chemische Gasphasenabscheidung, und/oder plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung

und/oder durch physikalische Gasphasenabscheidung. Bevorzugt wird das abgeschiedene Material an der vom Wafer abgewandten Seite anschließend chemisch-mechanisch poliert und/oder Resist-planarisiert, besonders bevorzugt derart, dass eine Rauheit von weniger als 2,0 nm, bevorzugt weniger als 1,0 nm RMS, besonders bevorzugt weniger als 0,3 nm RMS erhalten wird. Das chemisch-mechanische Polieren und/oder die Resistplanarisierung können insbesondere derart durchgeführt werden, dass eine Rauheit im Bereich von 2,0 nm RMS bis 0,01 nm RMS, bevorzugt im Bereich von 1,0 nm RMS bis 0,01 nm RMS, besonders bevorzugt im Bereich von 0,3 nm RMS bis 0,01 nm RMS erhalten wird.

Rauheiten in diesen Bereichen haben sich als besonders geeignet erwiesen. Sie sind insbesondere vorteilhaft, um Stress und Verspannungen in darüber liegenden Schichten zu vermeiden. In diesem Zusammenhang sei auch auf den Aufsatz „ Identifying suitable substrates for high-quality graphene-based heterostructures“ von L. Banszerus et al, 2D Mater., Vol. 4, No. 2, 025030, 2017 verwiesen.

Als Messverfahren zur Bestimmung der Rauheit kann die Rasterkraftmikroskopie (englisch: atomic force microscopy, kurz: AFM) zum Einsatz kommen, insbesondere, wie in der Norm EN ISO 25178 beschrieben. Die Rasterkraftmikroskopie ist vor allem in dem sich mit Messmethoden zur Rauheitsbestimmung beschäftigten Teil 6 (EN ISO 25178-6:2010-01) dieser Norm erörtert.

Es gibt unterschiedliche aus dem Stand der Technik vorbekannte Verfahren der chemischen Gasphasenabscheidung, die allesamt im Rahmen der vorliegenden Erfindung zum Einsatz kommen können. Allen gemein ist in der Regel eine chemische Reaktion von eingeleiteten Gasen, die zu einer Abscheidung des gewünschten Materials führen.

Auch bezüglich der physikalischen Gasphasenabscheidung gilt, dass alle aus dem Stand der Technik vorbekannten Varianten zum Einsatz kommen können. Rein beispielhaft sei das Elektronenstrahlverdampfen genannt, bei dem mittels eines Elektronenstrahls Material geschmolzen und verdampft wird, sowie das thermische Verdampfen, bei dem Material mittels einer Heizung bis zum Schmelzpunkt erwärmt und auf ein Zielsubstrat gedampft wird, sowie die Kathodenzerstäubung (englisch: sputter deposition), bei der mittels eines Plasmas Atome aus einem Materialträger herausgeschlagen und auf einem Zielsubstrat abgeschieden werden.

Alternativ oder zusätzlich zu den vorgenannten Abscheidungsverfahren kommt auch die Atomlagenabscheidung in Frage. Im Rahmen dieser werden isolierende oder leitende Materialien (Dielektrika, Halbleiter oder Metalle) Atomlage für Atomlage sequenziell abgeschieden.

Beim chemisch-mechanischen Polieren wird ein zu polierendes Objekt, etwa ein Wafer in der Regel durch eine rotierende Bewegung zwischen Schleifpads poliert. Die Politur erfolgt zum einen chemisch und zum anderen physikalisch mittels einer Schleifpaste. Durch die Kombination der chemischen und physikalischen Wirkung können auf sub-nm-Skala glatte Oberflächen erhalten werden.

Die Resistplanarisierung schließt insbesondere ein einmaliges oder wiederholtes Spin-on-Glass-Aufschleudern und anschließendes Ätzen, bevorzugt reaktives Ionenätzen (englisch: reactive ion etching, kurz: RIE), mit ein. Soll eine Oberfläche, etwa eine SiO₂-Oberfläche, die Höhenunterschiede aufweist, planarisiert werden, kann das mittels Spin-On-Glass aufschleudern und Ätzen erfolgen. Die Spin-on-Glass-Schicht gleicht teilweise die Höhenunterschiede aus, d.h. Täler der Topologie weisen nach der

Spin-on-Glass-Beschichtung eine höhere Schichtdicke auf als benachbarte Erhöhungen. Die Ätzrate von Spin-on-Glass und beispielsweise SiO_2 ist in einem angepassten RIE-Prozess ähnlich oder gleich. Unter angepasst ist hier insbesondere zu verstehen, dass der Druck, der Gasfluss, die Zusammensetzung des Gasgemisches und die Leistung entsprechend gewählt werden. Wird nach der Spin-on-Glass-Beschichtung die gesamte Spin-on-Glass-Schicht per RIE geätzt, hat sich der Höhenunterschied wegen der planarisierenden Wirkung der Spin-on-Glass-Schicht reduziert. Durch Wiederholung kann der Höhenunterschied weiter reduziert werden. Die konsumierte SiO_2 -Schichtdicke muss beim Aufbringen der SiO_2 Schicht berücksichtigt werden, so dass nach Abschluss des letzten Ätzschritts die gewünschte SiO_2 Schichtdicke erreicht wird. Es sei betont, dass die Resistplanarisierung nicht auf SiO_2 beschränkt ist, sondern auch für andere Materialien in Frage kommt. Zweckmäßig ist, wenn eine Ätzrate des Materials erzielt werden kann, die derjenigen von Spin-On-Glass ähnelt bzw. zumindest im Wesentlichen mit dieser übereinstimmt. Für SiO_2 und Spin-On-Glass ist diese Bedingung erfüllt. Es sei angemerkt, dass beispielsweise auch Materialien, deren Ätzrate von derjenigen von Spin-On-Glass um einen Faktor 2 abweicht, möglich sind, wobei dann in der Regel mehrere Durchgänge nötig sind. Als flüssiges Material aufgebracht, insbesondere aufgeschleudert werden kann beispielsweise Wasserstoff-Silsesquioxan und/oder ein Polymer. Dieses verglast bei einem anschließenden Ausheizen, weshalb es auch als Spin-on-Glas bezeichnet wird. Bei Wasserstoff-Silsesquioxan (englisch: hydrogen silsesquioxane, kurz: HSQ) handelt es sich um eine Klasse anorganischer Verbindungen mit der Formel $[\text{HSiO}_{3/2}]_n$.

In weiterer vorteilhafter Ausgestaltung umfasst die photonische Plattform wenigstens eine weitere Planarisierungsschicht. Die oder – im Falle mehrerer – wenigstens eine der weiteren Planarisierungsschichten kann dann bevorzugt aus dem gleichen Material gefertigt sein bzw. werden wie die Planarisie-

rungsschicht. Sie kann auch auf die gleiche Weise hergestellt sein bzw.
 werden wie die Planarisierungsschicht. Dies ist jedoch optional und nicht
 einschränkend zu verstehen.

- 5 Die oder – im Falle mehrerer - eine der weiteren Planarisierungsschichten
 kann auf dem wenigstens einen Wellenleiter und/oder der Planarisierungs-
 schicht angeordnet bzw. hergestellt sein.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren kann entsprechend vorgesehen sein,
 10 dass wenigstens eine weitere Planarisierungsschicht bevorzugt im Anschluss
 an die Herstellung des wenigstens einen Wellenleiters hergestellt wird. Die
 Herstellung der wenigstens einen weiteren Planarisierungsschicht schließt
 besonders bevorzugt ein, dass ein Beschichtungsmaterial auf die von dem
 Wafer abgewandte Seite des wenigstens einen Wellenleiters und/oder der
 15 Planarisierungsschicht aufgebracht, insbesondere abgeschieden wird.

Das Beschichtungsmaterial der weiteren Planarisierungsschicht kann – in
 völliger Analogie zu der Planarisierungsschicht - zumindest an seiner von
 dem Wafer abgewandten Seite einer Planarisierungsbehandlung unterzogen,
 20 insbesondere chemisch-mechanisch poliert und/oder Resist-planarisiert
 werden bzw. worden sein. Dies erfolgt bzw. erfolgte wiederum bevorzugt
 derart, dass eine Rauheit der von dem Wafer abgewandten Seite von weni-
 ger als 2,0 nm, bevorzugt weniger 1,0 nm RMS, besonders bevorzugt weni-
 ger als 0,3 nm RMS erhalten wird. Auch bezüglich der wenigstens einen
 25 weiteren Planarisierungsschicht gilt bevorzugt, dass das che-
 misch-mechanische Polieren und/oder die Resistplanarisierung derart
 durchgeführt werden, dass eine Rauheit im Bereich von 2,0 nm RMS bis 0,01
 nm RMS, bevorzugt im Bereich von 1,0 nm RMS bis 0,01 nm RMS, beson-
 ders bevorzugt im Bereich von 0,3 nm RMS bis 0,01 nm RMS erhalten wird.

Die Herstellung der Planarisierungsschicht und/oder der weiteren Planarisierungsschicht kann ferner einschließen, dass im Anschluss an die Planarisierungsbehandlung ein weiteres Beschichtungsmaterial auf die behandelte Seite aufgebracht wird. Die behandelte Seite kann auch als Oberseite bezeichnet werden.

Weiterhin kann vorgesehen sein, dass die Planarisierungsschicht und/oder die bzw. eine weitere Planarisierungsschicht eine oder mehrere Decklagen umfassen, die bevorzugt auf der der Planarisierungsbehandlung unterzogenen Oberfläche vorgesehen sind bzw. werden und bei denen es sich beispielsweise um Dichalkogenidlagen oder Dichalkogenid-Heterostrukturen oder auch Bornitridlagen handeln kann. Diese Materialien werden bevorzugt abgeschieden oder transferiert ohne das es eines weiteren chemisch-mechanischen Polierens bzw. weiteren Resistplanarisierens bedarf, wobei auch nicht ausgeschlossen ist, dass dies nochmals erfolgt.

Natürlich ist es möglich, dass die photonische Plattform neben einer oder mehreren Planarisierungsschichten und/oder einer oder mehreren Deckschichten noch weitere Schichten umfasst.

Eine Schicht kann nur genau eine oder auch mehrere Lagen umfassen. Sie kann aus nur einem Material bestehen oder auch mehrere Materialien umfassen. Beispielsweise kann eine Schicht zwei oder mehr Lagen aus zwei oder mehr verschiedenen Materialien aufweisen. Es kann natürlich auch sein, dass eine Schicht mehrere Lagen aufweist, die jedoch alle aus demselben Material bestehen. Eine Schicht mit mehr als einer Lage kann insbesondere erhalten werden bzw. vorliegen, weil für deren Herstellung mehrere Lagen, beispielsweise mehrere Atomlagen, vorgesehen, beispielsweise abgeschieden werden bzw. wurden.

- Weiterhin gilt auch bezüglich des bzw. der Wellenleiter der erfindungsgemäßen Vorrichtung, dass diese nicht mit der darunter liegenden Schicht gebondet sind bzw. werden, sondern diese werden bzw. wurden vielmehr auf der darunter liegenden Schicht, insbesondere der Planarisierungsschicht, oder
- 5 auch dem Wafer, hergestellt. Beispielsweise wird bzw. wurde ein geeignetes Wellenleitermaterial auf der Planarisierungsschicht vorgesehen, etwa darauf aufgebaut bzw. abgeschieden und dann gegebenenfalls strukturiert, um den oder die Wellenleiter zu erhalten, beispielsweise durch Lithografie und/oder Ätzen. Lithografie schließt bevorzugt in an sich bekannter Weise ein, dass
- 10 ein photoempfindlicher Lack aufgetragen, insbesondere aufgeschleudert und mit Licht, insbesondere UV Licht, belichtet wird. Nicht zu belichtende Teile werden zweckmäßiger Weise mit einer Maske abgedeckt. Nach dem Entwickeln ist die Struktur auf der Maske in die Lackschicht übertragen.
- 15 Es kann sein, dass der oder wenigstens einer der oder auch alle Wellenleiter in eine Schicht eingebettet sind und/oder sich zwischen zwei Schichten erstrecken. Für einen oder mehrere Wellenleiter kann beispielsweise gelten, dass diese in die bzw. wenigstens eine der weiteren Planarisierungsschichten eingebettet sind. Einer oder mehrere Wellenleiter, die sich zwischen zwei
- 20 Schichten erstrecken und in eine Schicht eingebettet sind, kann bzw. können beispielsweise erhalten werden bzw. worden sein, indem der oder die Wellenleiter auf der von dem Wafer abgewandten Seite der Planarisierungsschicht hergestellt werden bzw. wurden und dann eine weitere Planarisierungsschicht auf dem oder den Wellenleitern hergestellt wird bzw. wurde,
- 25 wobei die Herstellung mit einschließt bzw. eingeschlossen hat, dass ein Beschichtungsmaterial auf den oder die Wellenleiter und die nicht verdeckten Bereiche der darunter liegenden Planarisierungsschicht aufgebracht, insbesondere abgeschieden wird bzw. wurde.

- Der oder – im Falle mehrerer - wenigstens einer der Wellenleiter der photoni-
schen Plattform umfasst in bevorzugter Ausgestaltung wenigstens ein Ma-
terial, das für elektromagnetische Strahlung einer Wellenlänge von 850 nm
und/oder 1310 nm und/oder 1550 nm transparent ist oder besteht aus einem
5 solchen. Besonders bevorzugt ist es für elektromagnetische Strahlung im
Wellenlängenbereich von 800 nm bis 900 nm und/oder von 1260 nm bis
1360 nm (sogenanntes Original Band bzw. kurz O-Band) und/oder 1360 nm
bis 1460 nm (sogenanntes Extend Band oder kurz E-Band) und/oder 1460
nm bis 1530 nm (sogenanntes Short Band oder kurz S-Band) und/oder von
10 1530 nm bis 1565 nm (sogenanntes Conventional Band bzw. kurz C-Band)
und/oder 1565 nm bis 1625 nm (sogenanntes Long Band bzw. kurz L-Band)
transparent. Diese Bänder sind aus dem Bereich der Nachrichtentechnik
vorbekannt.
- 15 Der oder – im Falle mehrerer - wenigstens einer der Wellenleiter der photo-
nischen Plattform der erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung kann in wei-
terer vorteilhafter Ausgestaltung Titandioxid und/oder Aluminiumnitrid
und/oder Tantalpentoxid und/oder Siliziumnitrid und/oder Aluminiumoxid
und/oder Siliziumoxynitrid und/oder Lithiumniobat und/oder Silizium, insbe-
20 sondere Polysilizium, und/oder Indiumphosphit und/oder Galliumarsenid
und/oder Indiumgalliumarsenid und/oder Aluminiumgalliumarsenid und/oder
wenigstens ein Dichalkogenid, insbesondere zweidimensionales Über-
gangsmetall-Dichalkogenid, und/oder Chalkogenidglas und/oder Harze bzw.
Harz enthaltende Materialien, insbesondere SU8, und/oder Polymere bzw.
25 Polymere enthaltende Materialien, insbesondere OrmoComp, umfassen oder
aus einem oder mehreren dieser Materialien bestehen. Im Rahmen des er-
findungsgemäßen Verfahrens wird bevorzugt wenigstens ein Wellenleiter mit
oder aus einem dieser Materialien bzw. mit oder aus einer Kombination eines
oder mehrerer dieser Materialien hergestellt.

Der wenigstens eine Wellenleiter besteht zweckmäßiger Weise aus einem Material, dessen Brechungsindex sich von dem Brechungsindex eines bzw. des Materials der Planarisierungsschicht und/oder der ggf. vorhandenen weiteren Planarisierungsschicht unterscheidet bzw. umfasst eine solches.

5 Dies insbesondere, wenn der wenigstens eine Wellenleiter mit der Planarisierungsschicht und/oder der weiteren Planarisierungsschicht eine gemeinsame Grenzfläche hat.

Als rein beispielhafte Paare von Brechungsindices seien genannt 3,4 (Si) für den bzw. die Wellenleiter und 1,5 (SiO₂) für die Planarisierungsschicht(en) oder, im Falle von Dielektrika, 2,4 (TiO₂) für den bzw. die Wellenleiter und 1,5 (SiO₂) für die Planarisierungsschicht(en) oder 2 (SiN) für den oder die Wellenleiter und 1,47 Planarisierungsschicht(en).

10

Ist wenigstens eine weitere Planarisierungsschicht vorgesehen, kann auch bezüglich dieser gelten, dass sie aus einem Material besteht bzw. ein Material umfasst, dessen Brechungsindex sich von dem Brechungsindex des Materials des wenigstens einen Wellenleiters unterscheidet. Dies insbesondere, wenn sie mit wenigstens einem Wellenleiter in Kontakt steht, also eine gemeinsame Grenzfläche mit diesem hat bzw. bildet.

15

20

Besonders bevorzugt gilt, dass der Brechungsindex des Materials des oder der Wellenleiter um mindestens 20 %, bevorzugt mindestens 30 % größer ist als der Brechungsindex des Materials der Planarisierungsschicht und/oder der weiteren Planarisierungsschicht.

25

Bei diesen Ausführungsformen ist bzw. wird mit anderen Worten einen Brechungsindexkontrast zwischen wenigstens einem Wellenleiter und der Planarisierungsschicht und/oder wenigstens einem Wellenleiter und der gegebenenfalls vorhandenen weiteren Planarisierungsschicht realisiert.

30

Unter einem Wellenleiter ist ein Element bzw. eine Komponente zu verstehen, die eine elektromagnetische Welle, insbesondere Licht, leitet. Um die Welle zu leiten wird zweckmäßiger Weise ein von der Wellenlänge abhängiger Querschnitt eines für mindestens diese Wellenlänge optisch transparenten Materials, das sich von einem benachbarten Material, das ebenfalls für diese Wellenlänge transparent ist, durch einen Brechungsindexkontrast auszeichnet, vorgesehen. Ist der Brechungsindex des umgebenden Materials niedriger, wird das Licht im Bereich des höheren Brechungsindex geführt.

10 Für den besonderen Fall einer Schlitzmode sind zwei Bereiche hohen Brechungsindex von einem bezüglich der Wellenlänge schmalen Bereich niedrigen Brechungsindex getrennt und das Licht wird im Bereich des niedrigen Brechungsindex geführt. Um niedrige Verluste durch Streuung zu erreichen, ist eine geringe Seitenwandrauheit vorteilhaft.

15

Was die Abmessungen des bzw. der Wellenleiter angeht, kann insbesondere das Folgende gelten. Die Dicke liegt bevorzugt im Bereich von 150 Nanometern bis 10 Mikrometer. Die Breite und Länge der Wellenleiter, also die laterale Ausdehnung parallel zu der Wafer-Oberfläche, kann sich insbesondere im Bereich von 100 Nanometer und 10 Mikrometer bewegen.

20

Einer oder mehrere Wellenleiter können beispielsweise als Streifenwellenleiter ausgebildet sein, die sich beispielsweise durch einen rechteckigen oder quadratischen Querschnitt auszeichnen. Einer oder mehrere Wellenleiter können alternativ oder zusätzlich auch als Rippenwellenleiter mit T-förmigem Querschnitt ausgebildet sein. Weiter alternativ oder zusätzlich ist es möglich, dass einer oder mehrere Wellenleiter durch Schlitzwellenleiter gegeben sind.

25

Einer oder mehrere Wellenleiter der erfindungsgemäßen Vorrichtung können, beispielsweise im Querschnitt betrachtet, mehrere Abschnitte bzw. Segmen-

30

te umfassen und mehrteilig ausgebildet sein, etwa ein erstes, beispielsweise unteres oder linkes, und ein zweites, beispielsweise oberes oder rechtes Segment, mit anderen Worten Teil bzw. Abschnitt, umfassen oder daraus bestehen. Es kann sein, dass eines oder mehrere Wellenleitersegmente sich
5 durch einen rechteckigen oder quadratischen Querschnitt auszeichnen. Weist ein Wellenleiter zwei oder mehr Segmente auf bzw. besteht daraus, können diese aneinander anliegen oder ineinander übergehen oder auch – etwa unter Bildung eines Spaltes bzw. Schlitzes (englisch: slot) - zueinander beabstandet sein.

10

Die erfindungsgemäß vorgesehene photonische Plattform umfasst zweckmäßiger Weise mehrere Wellenleiter. Dann kann weiterhin vorgesehen sein, dass sich zumindest zwei Wellenleiter zumindest abschnittsweise übereinander erstrecken. Mit anderen Worten existieren dann zwei oder mehr
15 Ebenen von Wellenleitern bzw. diese sind „ übereinandergestapelt“, wodurch weiter Platz eingespart werden kann und komplexere Schaltungen mit erweiterter Funktion erhalten werden können.

Zudem können passive Strukturen aus Wellenleitern hergestellt werden, z.B.
20 ein Multimode-Interferenzkoppler (MMI) also ein auf Interferenz basierender 50:50 Splitter, oder ein direktonaler Koppler, bei dem über eine gewisse Länge zwei Wellenleiter nebeneinander laufen und das Licht vom einen in den anderen koppelt. Man kann beispielsweise auch Mach-Zehnder-Interferometer erhalten (2 x 50/50 MMI als Splitter und da-
25 zwischen zwei Arme).

Eine weitere Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass die photonische Plattform neben der wenigstens einen elektro-optischen Einrichtung auch wenigstens eine optische Einrichtung, insbesondere wenigstens ein
30 Interferometer, etwa Mach-Zehnder-Interferometer, und/oder wenigstens ei-

nen Interferenzkoppler, etwa Multimode-Interferenzkoppler, und/oder wenigstens einen direktionalen Koppler und/oder wenigstens einen Polarisationskonverter und/oder wenigstens einen Splitter und/oder wenigstens einen Ringresonator umfasst. Die wenigstens eine optische Einrichtung umfasst
5 bevorzugt einen oder mehrere Wellenleiter und/oder Wellenleiterabschnitte bzw. wird dadurch gebildet. Sie kann insbesondere in Längsrichtung des Wellenleiters betrachtet nur einen Teil bzw. Abschnitt des Wellenleiters umfassen, mit anderen Worten einen Längsabschnitt. Eine als Ringresonator ausgebildete optische Einrichtung umfasst zweckmäßiger Weise einen be-
10 vorzugt in sich geschlossenen, ringförmigen Wellenleiter, der einen Resonator bildet, und einen damit gekoppelten, bevorzugt geraden Wellenleiterabschnitt. Die Kopplung kann über einen direktionalen Koppler realisiert sein, der bevorzugt einen Bereich umfasst bzw. durch einen Bereich gebildet wird, in dem der Abstand zwischen dem ringförmigen Wellenleiter und dem gera-
15 den Wellenleiterabschnitt derart ist, dass Licht zwischen den beiden koppelt.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann sich entsprechend dadurch auszeichnen, dass wenigstens eine optische Einrichtung hergestellt wird, bevorzugt wenigstens ein Interferometer, etwa Mach-Zehnder-Interferometer,
20 und/oder wenigstens Interferenzkoppler, etwa Multimode-Interferenzkoppler, und/oder wenigstens ein direktionaler Koppler und/oder wenigstens ein Polarisationskonverter und/oder wenigstens ein Splitter und/oder wenigstens ein Ringresonator.

25 Auch kann die photonische Plattform eine oder mehrere thermo-optische Einrichtungen aufweisen. Ein solche umfasst beispielsweise ein Heizelement und einen Längsabschnitt eines Wellenleiters, wobei das Heizelement derart relativ zu dem Wellenleiterabschnitt angeordnet ist, dass es dieses erwärmen kann. Bei dem Heizelement kann es sich beispielsweise um ein solches
30 handeln, dessen Temperatur sich erhöht, wenn es von Strom durchflossen

- wird. Das Heizelement kann beispielsweise in der Nähe des Wellenleiters angeordnet sein. Durch eine Erwärmung des Wellenleiters mittels des Heizelementes kann der Brechungsindex des Wellenleiters verändert werden. Dieser Effekt kann beispielsweise zur Phasenanpassung genutzt werden.
- 5 Eine thermo-optische Einrichtung kann auch einem Interferometer der photonischen Plattform zugeordnet sein bzw. einen Teil eines solchen bilden.

Bei einer weiteren Ausführungsform weist die photonische Plattform an ihrer vom Wafer abgewandten Seite eine Passivierungsschicht und/oder ein Cladding auf. Die photonische Plattform schließt bevorzugt mit einer Passivierungsschicht und/oder einem Cladding ab. Dann bildet die Passivierungsschicht und/oder das Cladding mit anderen Worten die letzte(n) bzw. oberste(n) Schicht(en) der photonischen Plattform.

- 15 Ein Cladding ist insbesondere dazu geeignet bzw. ausgebildet, den Indexkontrast etwas geringer zu machen, so dass sich Rauheiten an den Seitenwänden nicht ganz so stark auswirken; üblicherweise gehen die Verluste in den bzw. die Wellenleiter zurück.

- 20 Eine Passivierungsschicht dient bevorzugt dem Zweck, die Anordnung bzw. Schaltung vor Umwelteinflüssen, insbesondere Wasser, zu schützen. Eine Passivierungsschicht kann beispielsweise aus einem dielektrischen Material bestehen. Als besonders geeignet haben sich Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Siliziumdioxid (SiO_2) erwiesen.

- 25 Eine obere, abschließende Passivierungsschicht weist zweckmäßiger Weise Öffnungen bzw. Unterbrechungen zu darunterliegenden Kontakten auf, um einen elektrischen Anschluss zu ermöglichen. Öffnungen bzw. Unterbrechungen in einer Passivierungsschicht können beispielsweise durch Litho-

graphie und/oder Ätzen, insbesondere reaktives Ionenätzen, erhalten werden bzw. worden sein.

Das reaktive Ionenätzen ist ein Trockenätzverfahren, bei dem in der Regel
5 mittels spezieller gasförmiger Chemikalien, die zu einem Plasma angeregt werden, ein selektives und gerichtetes Ätzen einer Substratoberfläche ermöglicht wird. Eine Lackmaske kann dabei nicht zu ätzende Teile schützen. Die Ätzchemie und die Parameter des Prozesses entscheiden in der Regel über die Selektivität des Prozesses, also die Ätzraten unterschiedlicher Ma-
10 terialien. Diese Eigenschaft ist entscheidend, um einen Ätzvorgang in der Tiefe zu begrenzen und damit Schichten voneinander getrennt zu definieren.

In weiterer vorteilhafter Ausgestaltung zeichnet sich die erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung dadurch aus, dass das Back-End-of-Line des Wafers
15 und die photonische Plattform Verbindungselemente aufweisen, über welche der oder wenigstens einer der integrierten Schaltkreise des Wafers mit der oder wenigstens einer der elektro-optischen Einrichtungen der photonischen Plattform verbunden ist.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren kann entsprechend in vorteilhafter Weiterbildung vorgesehen sein, dass das Back-End-of-Line des breitgestellten Wafers Verbindungselemente aufweist, die mit dem oder wenigstens einem der integrierten Schaltkreise des Front-End-of-Line verbunden sind, und in der photonischen Plattform Verbindungselemente hergestellt werden, die
25 einerseits mit den Verbindungselementen des Back-End-of-Line und andererseits mit der oder wenigstens einer der elektro-optischen Einrichtungen verbunden sind.

Bei den Verbindungselementen kann es sich insbesondere um vertikale
30 elektrische Verbindungen handeln, die im Englischen auch als Vertical Inter-

connect Access, kurz Via bzw. VIA bezeichnet werden. Die VIAs werden in der Regel durch Lithografie definiert und mittels RIE trockenchemisch geätzt. Danach wird bevorzugt metallisiert und die metallisierte Oberfläche mittels CMP (Damascene-Prozess) oder mittels Lithografie und RIE strukturiert.

5

Die Verbindungselemente umfassen bzw. bestehen zweckmäßiger Weise aus wenigstens einem elektrisch leitenden Material, insbesondere Metall, wie etwa Kupfer und/oder Aluminium und/oder Wolfram.

- 10 In weiterer Ausgestaltung kann auch für die elektro-optische(n) Einrichtung(en) bzw. zumindest Teile dieser gelten, dass sie auf einem oder mehreren der Wellenleiter und/oder der von dem Wafer abgewandten Seite der Planarisierungsschicht und/oder der von dem Wafer abgewandten Seite einer gegebenenfalls vorhandenen weiteren Planarisierungsschicht hergestellt
15 werden bzw. worden sind.

Bei der bzw. den elektro-optischen Einrichtungen der erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung kann es sich prinzipiell um jede Einrichtung handeln, die dazu ausgebildet ist, optische Signale zu erzeugen und/oder zu übermitteln und/oder zu empfangen. Es kann bzw. können insbesondere Einrichtungen der optischen Datenkommunikation sein, und/oder Spektrometer, und/oder einstellbare elektro-optische Filter und/oder Schalter und/oder Abschwächer insbesondere für maschinelles Lernen. Es können auch nichtlineare optische Elemente enthalten sein.

20

Eine als Filter ausgestaltete elektro-optische Einrichtung kann beispielsweise einen Ringresonator umfassen, bevorzugt in Kombination mit einem Modulator.

Die bzw. im Falle mehrere wenigstens eine oder auch jede elektro-optische Einrichtung umfasst in zweckmäßiger Ausgestaltung wenigstens zwei Kontakte bzw. Kontaktelemente, die insbesondere der Kontaktierung des bzw. jeweils eines aktiven Elementes mit einem Verbindungselement dienen.

5

Bevorzugt weist die bzw. im Falle mehrere wenigstens eine oder auch jede elektro-optische Einrichtung ferner wenigstens ein aktives Element auf. Eine elektro-optische Einrichtung kann neben wenigstens einem aktiven Element einen Abschnitt, insbesondere Längsabschnitt eines Wellenleiters umfassen.

10 Es ist auch möglich, dass ein aktives Element einer elektro-optischen Einrichtung bzw. ein Abschnitt eines solchen einen Wellenleiter oder zumindest einen Abschnitt, insbesondere Längsabschnitt eines Wellenleiters bildet.

Auch können mehrere, beispielsweise zwei aktive Elemente oder Abschnitte solcher zusammen einen Wellenleiter bzw. Abschnitt, insbesondere Längs-

15 abschnitt eines Wellenleiters, beispielsweise Rippenwellenleiters, bilden.

Dann besteht das aktive Element bzw. bestehen die aktiven Elemente zweckmäßiger Weise aus einem Material, welches für elektromagnetische Strahlung wenigstens einer Wellenlänge, bevorzugt wenigstens eines Wellenlängenbereichs transparent ist. Bevorzugt gilt dann, dass das wenigstens

20 eine Material für elektromagnetische Strahlung einer Wellenlänge von 850 nm und/oder 1310 nm und/oder 1550 nm transparent ist. Besonders bevorzugt ist es für elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von

800 nm bis 900 nm und/oder von 1260 nm bis 1360 nm (sogenanntes Original Band bzw. kurz O-Band) und/oder 1360 nm bis 1460 nm (sogenanntes

25 Extend Band oder kurz E-Band) und/oder 1460 nm bis 1530 nm (sogenanntes Short Band oder kurz S-Band) und/oder von 1530 nm bis 1565 nm (sogenanntes Conventional Band bzw. kurz C-Band) und/oder 1565 nm bis 1625 nm (sogenanntes Long Band bzw. kurz L-Band).

- Ist wenigstens ein aktives Element vorgesehen, gilt bevorzugt, dass dieses wenigstens ein Material umfasst bzw. aus wenigstens einem Material besteht, das elektromagnetische Strahlung wenigstens einer Wellenlänge, bevorzugt wenigstens eines Wellenlängenbereichs, absorbiert und infolge der
- 5 Absorption ein elektrisches Photosignal erzeugt und/oder dessen Brechungsindex sich in Abhängigkeit einer Spannung und/oder dem Vorhandensein von Ladung(en) und/oder einem elektrischen Feld ändert. Bevorzugt gilt dann, dass das wenigstens eine Material elektromagnetische Strahlung einer Wellenlänge von 850 nm und/oder 1310 nm und/oder 1550 nm ab-
- 10 sorbieren und infolge der Absorption ein Photosignal erzeugen kann. Besonders bevorzugt gilt, dass es elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 800 nm bis 900 nm und/oder von 1260 nm bis 1360 nm (sogenanntes Original Band bzw. kurz O-Band) und/oder 1360 nm bis 1460 nm (sogenanntes Extend Band oder kurz E-Band) und/oder 1460 nm bis 1530
- 15 nm (sogenanntes Short Band oder kurz S-Band) und/oder von 1530 nm bis 1565 nm (sogenanntes Conventional Band bzw. kurz C-Band) und/oder 1565 nm bis 1625 nm (sogenanntes Long Band bzw. kurz L-Band) absorbieren und infolge der Absorption ein Photosignal erzeugen kann.
- 20 Darunter, dass ein Material seinen Brechungsindex ändert ist insbesondere zu verstehen, dass es seine Dispersion (insbesondere Brechzahl) und/oder seine Absorption ändert. Die Dispersion bzw. Brechzahl ist in der Regel durch den Realteil und die Absorption durch den Imaginärteil des komplexen Brechungsindex gegeben. Unter Materialien, deren Brechungsindex sich in
- 25 Abhängigkeit einer Spannung und/oder dem Vorhandensein von Ladung(en) und/oder einem elektrischen Feld ändert, sind vorliegend insbesondere solche zu verstehen, die sich durch den Pockels-Effekt und/oder den Franz-Keldysh-Effekt und/oder den Kerr-Effekt auszeichnen. Darüber hinaus werden auch Materialien, die sich durch den Plasmodispersions-Effekt aus-
- 30 zeichnen vorliegend als solche Materialien erachtet.

Beispielhaft für Materialien für das bzw. die aktiven Elemente seien Graphen, ggf. chemisch modifiziertes Graphen, und/oder Germanium und/oder Lithiumniobat und/oder elektro-optische Polymere und/oder Silizium und/oder Verbindungshalbleiter, wie etwa III-V-Halbleiter und/oder II-VI-Halbleiter, und/oder Dichalkogenide, insbesondere zweidimensionale Übergangsmetall-Dichalkogenide, und/oder Heterostrukturen aus zweidimensionalen Materialien genannt. Andere 2D-Materialien als Graphen sind somit ebenfalls möglich, sowohl alternativ als auch zusätzlich. Unter elektro-optischen Polymeren sind insbesondere Polymere zu verstehen, die sich dadurch auszeichnen, dass sie einen starken linearen elektro-optischen Koeffizienten (Pockels-Effekt) haben. Unter einem starken linearen elektro-optischen Koeffizienten ist bevorzugt ein solcher zu verstehen, der mindestens 150 pm/V, bevorzugt mindestens 250 pm/V beträgt. Dann ist der elektro-optische Koeffizient mindestens etwa fünfmal so groß wie derjenige von Lithiumniobat.

Es gibt unterschiedliche Chalkogenide. Im Rahmen der vorliegenden Erfindung haben sich insbesondere Übergangsmetall-Dichalkogenide als zweidimensionale Materialien, wie MoS₂ oder WSe₂, als besonders geeignet erwiesen.

Es sei angemerkt, dass Lithiumniobat und elektro-optische Polymere auf dem elektro-optischen, insbesondere dem Pockels-Effekt basieren, d.h. das E-Feld ändert den Brechungsindex (wie z.B. der Pockels-Effekt in der Pockelszelle genutzt wird). Bei Germanium ist es der Franz-Keldysh-Effekt, d.h. das Feld verschiebt die Valenz und Leitungsbandkanten gegeneinander, so dass sich die optischen Eigenschaften ändern. Diese Effekte sind feldbasierte Effekte. Bei Silizium oder Graphen ist es der ladungsträgerbasierte Plasmodispersions-Effekt, d.h. Ladungsträger (Elektronen oder Löcher) werden in den Bereich der optischen Mode gebracht (entweder befindet sich

in der Anordnung ein Kondensator, der aufgeladen wird, oder eine Diode mit einer Sperrschicht, die verarmt und angereichert wird). Der Brechungsindex (Realteil vom Index) und die Absorption (Imaginärteil des Indexes, führt zu free carrier absorption) ändern sich mit der Ladungsträgerkonzentration.

5

Bei III-V-Halbleitern bzw. handelt es sich in an sich bekannter Weise um Verbindungshalbleiter, die aus Elementen der Hauptgruppe III und V bestehen. Bei II-VI-Halbleitern bzw. handelt es sich in an sich bekannter Weise um Verbindungshalbleiter, die aus Elementen der Hauptgruppe II bzw. Gruppe-12-Elementen und Elementen der Hauptgruppe VI bestehen.

10

Als besonders geeignetes Material für das bzw. die aktiven Elemente der elektro-optische(n) Einrichtung(en) der erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung hat sich u.a. Graphen erwiesen.

15

Viele Materialien zeichnen sich sowohl dadurch aus, dass sich ihr Brechungsindex in Abhängigkeit einer Spannung und/oder dem Vorhandensein von Ladung und/oder einem elektrischen Feld ändert, als auch dadurch, dass sie elektromagnetische Strahlung wenigstens einer Wellenlänge absorbieren und infolge der Absorption ein elektrisches Photosignal erzeugen. Für Graphen beispielsweise ist dies der Fall. Graphen ist entsprechend sowohl für die aktiven Elemente von Photodetektoren als auch Modulatoren geeignet. Dies gilt ebenfalls für Dichalkogenide, etwa zweidimensionale Übergangsmetall-Dichalkogenide, Heterostrukturen aus zweidimensionalen Materialien, Germanium, Silizium sowie Verbindungshalbleiter, insbesondere III-V-Halbleiter und/oder II-VI-Halbleiter. Lithiumniobat beispielsweise ist in der Regel nur für Modulatoren geeignet. Da es transparent ist, erfüllt es nicht die absorbierende Eigenschaft und kommt daher für Photodetektoren nicht in Frage.

25
30

Es kann sein, dass das wenigstens eine aktive Element von einer oder auch mehreren elektro-optischen Einrichtungen in Form eines Films vorliegt. Ein Film zeichnet sich bevorzugt in an sich bekannter Weise durch eine deutlich größere laterale Ausdehnung als Dicke aus. Das wenigstens eine aktive
5 Element einer oder mehrerer elektro-optischer Einrichtungen kann sich ferner durch einen quadratischen oder rechteckigen Querschnitt auszeichnen.

Eines oder mehrere aktive Elemente können eine oder mehrere Lagen bzw. Schichten aus wenigstens einem Material, dessen Brechungsindex sich ändert und/oder das absorbiert, umfassen oder aus einer oder mehreren Lagen
10 bzw. Schichten wenigstens eines solchen gebildet sein. Insbesondere kann vorgesehen sein, dass wenigstens ein aktives Element als Film ausgebildet ist, der mehrere Lagen bzw. Schichten aus einem oder auch verschiedenen Materialien umfasst.

15 Als besonders geeignet haben sich Filme aus Graphen, ggf. chemisch modifiziertem Graphen, oder auch Dichalkogenid-Graphen-Heterostrukturen bestehend aus mindestens einer Lage Graphen und mindestens einer Lage eines Dichalkogenids oder Anordnungen aus mindestens einer Lage Bornitrid und mindestens einer Lage Graphen erwiesen.
20

Aktive Elemente können beispielsweise auch eine oder mehrere Siliziumschichten umfassen bzw. dadurch gegeben sein. Insbesondere in diesem Fall kann vorgesehen sein, dass eines oder mehrere aktive Elemente bzw.
25 Abschnitte dieser einen Wellenleiter(abschnitt) bilden.

Das oder die aktiven Elemente können ferner dotiert sein bzw. dotierte Abschnitte bzw. Regionen aufweisen, beispielsweise p-dotiert und/oder n-dotiert sein bzw. entsprechende Abschnitte bzw. Regionen umfassen. Es kann auch
30 sein, dass ein p- und ein n-dotierte Bereich und ein bevorzugt dazwischen-

liegender undotierter Bereich vorliegen bzw. vorgesehen werden. Dies wird auch als pin-Übergang bezeichnet, wobei das i für intrinsisch, also undotiert steht.

- 5 Eine weitere vorteilhafte Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass ein aktives Element vorgesehen ist, dass einen p- und einen n-dotierten Bereich aufweist, wobei die beiden dotierten Bereiche nebeneinanderliegen oder sich ein undotierter Bereich zwischen diesen befindet, und die beiden dotierten Bereiche gegebenenfalls zusammen mit dem etwaig dazwischen-
- 10 liegenden undotierten Bereich gemeinsam einen Wellenleiter bzw. einen Abschnitt eines solchen bilden.

- Auch kann zwischen zwei aktiven Elementen, beispielsweise aus dotiertem Silizium, ein Element bzw. eine Schicht aus einem elektro-optischen Polymer
- 15 vorgesehen sein.

- Weiterhin kann vorgesehen sein, dass zum Erhalt von aktiven Elementen für eine Mehrzahl von elektro-optischen Einrichtungen wenigstens ein sich gegebenenfalls über die gesamte laterale Ausdehnung des Wafers erstreckender Film bzw. Schicht (mit einer oder auch mehreren Lagen) vorgesehen,
- 20 beispielsweise abgeschieden wird bzw. wurde, und aus diesem großen Film durch ein geeignetes Strukturierungsverfahren, das beispielsweise Lithografie und/oder Ätzen einschließen kann, eine Mehrzahl von in einer Ebene nebeneinander liegenden kleineren Film- bzw. Schicht-förmige aktive Elemente
- 25 für die Mehrzahl der Einrichtungen erhalten wird bzw. wurde. So können mit vergleichsweise geringem Aufwand viele aktive Elemente für eine Vielzahl von elektro-optischen Einrichtungen erhalten werden.

- Alternativ oder zusätzlich kann das oder wenigstens eines der aktiven Elemente durch ein Transfervorgang vorgesehen werden bzw. worden sein.
- 30

Dies bedeutet insbesondere, dass das bzw. das jeweilige Element nicht monolithisch auf dem Wafer bzw. einer darauf hergestellten Schicht hergestellt wird/werden bzw. wurde/wurden, sondern separat hergestellt und dann transferiert, mit anderen Worten übertragen wird/werden bzw. wurde/wurden.

- 5 Ein Transferverfahren für Graphen ist beispielsweise aus den Aufsätzen "Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils" von Li et al., Science 324, 1312, (2009) und "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes" von Bae et al, Nature Nanotech 5, 574-578 (2010) bzw. für LiNbO aus dem Aufsatz "Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages", Nature volume 562, pages101104 (2018) bzw. U.a. für GaAs aus dem Aufsatz "Transfer print techniques for heterogeneous integration of photonic components", Progress in Quantum Electronics Volume 52, March 2017, Pages 1-17 bekannt. Eines dieser Verfahren kann
- 10 auch im Rahmen der vorliegenden Erfindung angewendet werden, um eine oder mehrere Graphen- bzw. LiNbO- bzw. GaAs-Schichten/-Filme zu erhalten.

Auch an ein Transferverfahren kann sich eine Strukturierung anschließen.

- 20 Bei einer weiteren Ausführungsform ist vorgesehen, dass die oder wenigstens eine der elektro-optischen Einrichtungen durch einen Modulator gegeben ist, der ein aktives Element mit oder aus wenigstens einem Material, dessen Brechungsindex sich in Abhängigkeit einer Spannung und/oder dem
- 25 Vorhandensein von Ladung und/oder einem elektrischen Feld ändert, und ein weiteres aktives Element mit oder aus wenigstens einem Material, dessen Brechungsindex sich in Abhängigkeit einer Spannung und/oder dem Vorhandensein von Ladung und/oder einem elektrischen Feld ändert, oder eine Elektrode umfasst, wobei die beiden aktiven Elemente bzw. das aktive Ele-
- 30 ment und die Elektrode bevorzugt voneinander beabstandet und derart ver-

- setzt zueinander angeordnet sind, dass sie abschnittsweise übereinander liegen. Bei dem wenigstens einen entsprechenden Material des einen bzw. der beiden aktiven Elemente kann es sich um Graphen, und/oder wenigstens ein Dichalkogenid, insbesondere zweidimensionales Übergangsmetall-Dichalkogenid, und/oder Heterostrukturen aus zweidimensionalen Materialien und/oder Germanium und/oder Lithiumniobat und/oder wenigstens ein elektro-optischer Polymer und/oder Silizium und/oder wenigstens ein Verbindungshalbleiter, insbesondere wenigstens ein III-V-Halbleiter und/oder wenigstens ein II-VI-Halbleiter, handeln.
- 10 Mit anderen Worten genügt bei einem Modulator alternativ zu zwei aktiven Elementen auch ein aktives Element und eine konventionelle Elektrode. Die Elektrode besteht dann insbesondere nicht aus wenigstens einem Material, dessen Brechungsindex sich ändert, bzw. umfasst kein solches, sondern
- 15 wenigstens ein elektrisch leitfähiges Material. Ist anstelle eines der aktiven Elemente eine Elektrode vorgesehen, kann diese – in Analogie zum aktiven Element – in Form eines ggf. mehrlagigen Filmes vorliegen, etwa als ein- oder mehrlagiger Metallfilm.
- 20 Auch im Falle des Modulators gilt für das oder die aktiven Elemente, dass sie bevorzugt Graphen, ggf. chemisch modifiziertes Graphen, und/oder wenigstens ein Dichalkogenid, insbesondere zweidimensionales Übergangsmetall-Dichalkogenid, und/oder Heterostrukturen aus zweidimensionalen Materialien und/oder Germanium und/oder Lithiumniobat und/oder wenigstens ein
- 25 elektro-optisches Polymer und/oder Silizium und/oder wenigstens einen Verbindungshalbleiter, insbesondere wenigstens einen III-V-Halbleiter und/oder wenigstens einen II-VI-Halbleiter, umfassen oder auch daraus bestehen können.

Die beiden aktiven Elemente bzw. das eine aktive Element und die Elektrode sind bevorzugt voneinander beabstandet und/oder derart versetzt zueinander angeordnet, dass sie abschnittsweise übereinanderliegen. Mit anderen Worten fluchtet bzw. überlappt dann ein Abschnitt des einen aktiven Elementes mit einem Abschnitt des anderen aktiven Elementes bzw. der Elektrode, dies ggf. auch ohne dass sich diese berühren. Bevorzugt gilt zumindest im Bereich des Übereinanderliegens, mit anderen Worten im Überlappungsbereich, dass sich die beiden aktiven Elemente bzw. das aktive Element und die Elektrode bzw. zumindest Abschnitte dieser zumindest im Wesentlichen parallel zueinander erstrecken.

Auch bei einem Modulator mit zwei aktiven Elementen bzw. einem aktiven Element und einer konventionellen Elektrode kann ferner gelten, dass das jeweilige aktive Element bzw. das eine aktive Element und die Elektrode als Film ausgebildet ist.

Ein elektro-optischer Modulator kann insbesondere zur optischen Signalcodierung verwendet werden. Ein elektro-optischer Modulator kann auch als Ringmodulator ausgebildet sein.

Alternativ oder zusätzlich kann die oder wenigstens eine der elektro-optischen Einrichtungen durch einen Photodetektor gegeben sein, der ein, bevorzugt genau ein aktives Element mit oder aus wenigstens einem Material, das elektromagnetische Strahlung wenigstens einer Wellenlänge, bevorzugt wenigstens eines Wellenlängenbereichs, absorbiert und infolge der Absorption ein elektrisches Photosignal erzeugt, insbesondere Graphen und/oder wenigstens ein Dichalkogenid, insbesondere zweidimensionales Übergangsmetall-Dichalkogenid, und/oder Heterostrukturen aus zweidimensionalen Materialien und/oder Germanium und/oder Silizium und/oder we-

nigstens ein Verbindungshalbleiter, insbesondere wenigsten ein III-V-Halbleiter und/oder wenigstens ein II-VI-Halbleiter, umfasst.

Bei einem Photodetektor ist das wenigstens eine elektro-optisch aktive Material zweckmäßiger Weise geeignet, Licht zu absorbieren.

Ein Photodetektor kann insbesondere der Signalwandlung zurück von der optischen in die elektronische Welt dienen.

Die oder wenigstens eine elektro-optische Einrichtung – sowohl im Falle eines Modulators als auch im Falle eines Detektors – kann ferner als solche mit plasmonischer Kopplung ausgebildet sein bzw. – im Falle des erfindungsgemäßen Verfahrens – hergestellt werden.

Dann ist bzw. wird zweckmäßiger Weise auf oder oberhalb des oder wenigstens eines der aktiven Elemente wenigstens eine plasmonische Struktur aus oder mit einem plasmonisch aktiven Material, bevorzugt Gold und/oder Silber und/oder Aluminium und/oder Kupfer, vorgesehen. Die plasmonische Struktur umfasst bevorzugt wenigstens ein Paar von nebeneinander angeordneten plasmonischen Elementen aus oder mit dem plasmonisch aktiven Material. Die plasmonischen Elemente können sich durch einen sich in Richtung des jeweils anderen plasmonischen Elementes verjüngende Abschnitt auszeichnen. Die plasmonischen Elemente können sich beispielsweise durch eine dreieckige Form auszeichnen.

25

Es kann auch sein, dass längliche plasmonische Elemente vorgesehen sind bzw. werden, dies bevorzugt im Falle eines Modulators. Längliche plasmonische Elemente können zumindest im Wesentlichen parallel zu einem Wellenleiter angeordnet sein bzw. werden. Dann werden mit anderen Worten optische und plasmonische Wellenleiter parallel am aktiven Element vorbei-

30

geführt, wie in der Publikation „ Efficient electro-optic modulation in low-loss graphene-plasmonic slot waveguides“, von Zhu et al., Optics Communications (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124559> beschrieben.

- 5 Die Responsivität von insbesondere Graphen umfassenden Photodetektoren kann durch plasmonisch verstärkte Absorption erhöht werden. Dabei werden beispielsweise wie in Ma et al., “Plasmonically Enhanced Graphene Photodetector Featuring 100 Gbit/s Data Reception, High Responsivity, and Compact Size”, ACS Photonics 2019, 6, Seiten 154 bis 161 (2018), gezeigt
- 10 plasmonische Strukturen auf einem Graphenkanal als aktiven Element, der auf einem Wellenleitervorgesehen ist, hergestellt. Durch die optische Mode werden resonant Dichteschwankungen in den plasmonischen Strukturen angeregt. Diese kollektive Bewegung der Elektronenverteilung wird als Plasmon bezeichnet und pflanzt sich in der plasmonischen Struktur fort.
- 15 Kennzeichnend ist u.a. eine höhere elektrische Feldstärke gegenüber der optischen Mode. Daraus ergibt sich eine stärkere Absorption in Graphen oder im Allgemeinen in einem absorbierenden Material.

- Eine weitere Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass an wenigstens einer Seite des oder wenigstens eines der aktiven Elemente ein Wellenleiter mit einem sich in Richtung des oder des wenigstens einen aktiven Elementes verjüngenden, bevorzugt in einer Spitze auslaufenden Endabschnitt vorgesehen ist. Der sich verjüngende Endabschnitt kann sich bis an das bzw. das wenigstens eine aktive Element erstrecken. Alternativ oder zusätzlich kann vorgesehen sein, dass zu zwei Seiten des sich verjüngenden Abschnitts jeweils ein Kontaktelement vorgesehen ist, das mit dem aktiven Element verbunden ist und welches einen neben dem sich verjüngenden Endabschnitt des Wellenleiters liegenden, sich in entgegengesetzter Richtung verjüngenden Abschnitt aufweist.

Auch kann vorgesehen sein, dass zu zwei Seiten des oder des wenigstens einen aktiven Elementes jeweils ein Wellenleiter mit einem sich in Richtung des aktiven Elementes verjüngenden, bevorzugt in einer Spitze auslaufenden Endabschnitt vorgesehen ist. Dann kann für beide Endabschnitte gelten,
5 dass sie sich bis an das oder das wenigstens eine aktive Element erstrecken. Auch kann zu zwei Seiten des jeweiligen sich verjüngenden Abschnitts jeweils ein Kontaktelement vorgesehen sein, das mit dem oder dem wenigstens einen aktiven Element verbunden ist und welches einen neben dem jeweiligen sich verjüngenden Endabschnitt des Wellenleiters liegenden, sich in
10 entgegengesetzter Richtung verjüngenden Abschnitt aufweist. Es kann sein, dass zwei Kontaktelemente vorgesehen sind und jedes Kontaktelement zwei sich verbreiternde Abschnitte aufweist, bevorzugt an gegenüberliegenden Seiten und für jeden Endabschnitt einen. Der bzw. der jeweilige sich verbreiternde Abschnitt des Kontaktelementes folgt bevorzugt der Verjüngung des
15 bzw. des Jeweiligen Wellenleiterendabschnittes. Er kann so folgen, dass der Abstand zwischen dem sich verjüngenden Wellenleiterende und den zu beiden Seiten daneben liegenden, sich verbreiternden Kontaktelementabschnitten in Richtung des aktiven Elementes gleich bleibt. Er kann aber auch, zumindest in einem gewissen Maße, zu- oder abnehmen.

20 Insbesondere bei dieser Ausführungsform kann ferner vorgesehen sein, dass das aktive Element wenigstens einen elektro-optischen Polymer umfasst bzw. daraus besteht (vgl. auch die Publikation „ Silicon-Organic Hybrid (SOH) and Plasmonic-Organic Hybrid (POH) Integration“, von Koos et al., Journal of
25 Lightwave Technology, Vol. 34, No. 2, 2016).

Die plasmonische Kopplung kann mit anderen Worten auch ohne Wellenleiter unter dem absorbierenden Material erfolgen, d.h. es findet ein Übergang der optischen in eine plasmonische Mode statt, wobei die plasmonische Mode dann mit dem absorbierenden Material wechselwirkt. Dies ist – im Zu-

sammenhang mit einem Photodetektor - auch in der Publikation "Ultra-compact integrated graphene plasmonic photodetector with bandwidth above 110 GHz" von Ding, Y., Cheng, Z., Zhu, X., et al. (2019), Nanophotonics, doi:10.1515/nanoph-2019-0167 beschrieben. Im Zusammenhang mit

5 Modulatoren sei ferner auf die Publikation „Efficient electro-optic modulation in low-loss graphene-plasmonic slot waveguides“ von Ding et al., Nanoscale, 2017, 9, 15576 verwiesen.

Insbesondere ein Modulator als elektro-optische Einrichtung kann ferner alternativ oder zusätzlich zwei aktive Elemente aufweisen, die jeweils durch

10 einen Siliziumfilm bzw. eine Siliziumschicht gegeben sind. Es kann sich beispielsweise um eine Schicht bzw. einen Film mit oder aus Polysilizium und einen mit oder aus kristallinem Silizium handeln. Es können auch beide aktiven Elemente Polysilizium umfassen oder daraus bestehen. Von den bei-

15 den aktiven Elementen ist dann bevorzugt eines p- und das andere n-dotiert. Durch die unterschiedliche Dotierung ergibt sich eine Kapazität. Die beiden aktiven Elemente sind bzw. werden dann bevorzugt derart versetzt zueinander angeordnet, dass sie abschnittsweise übereinanderliegen. Der Überlappungsbereich bildet dann bevorzugt einen Wellenleiter bzw. Wellenleiterabschnitt.

20 Durch Anlegen einer Spannung kann die Ladungsträgerkonzentration im Bereich des Wellenleiters bzw. Wellenleiterabschnitts, also im Betrieb der der optischen Mode, variiert werden und damit ein optisches Signal codiert werden. Ein entsprechender, Silizium-basierter Modulator ist auch in der Veröffentlichung "An efficient MOS-capacitor based silicon modulator and

25 CMOS drivers for optical transmitters," von M. Webster et al., 11th International Conference on Group IV Photonics (GFP), Paris, 2014, pp. 1-2. doi: 10.1109/Group4.2014.6961998, offenbart.

Wenn die oder wenigstens eine der elektro-optischen Einrichtungen als

30 Modulator ausgebildet ist bzw. Wird, kann darüber hinaus vorgesehen sein,

dass sie einen Diode oder Kapazität umfasst. Es kann sich insbesondere um einen integrierten III-V Halbleiter Modulator handeln, wie er in dem Aufsatz „ Heterogeneously integrated III- V/Si MOS capacitor Mach- Zehnder modulator „ von Hiaki, Nature Photonics volume 11, pages 482- 485 (2017) beschrieben ist.

Ist bzw. wird für die oder wenigstens eine elektro-optische Einrichtung eine Diode vorgesehen, kann diese beispielsweise eine Mehrzahl von Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung von beispielsweise InGaAsP umfassen, insbesondere, um einen pn-Übergang und zwei Kontaktgebiete zu erzeugen.

Das bzw. die aktiven Elemente und gegebenenfalls die Elektrode einer oder mehrerer elektro-optischer Einrichtungen kann bzw. können beispielsweise auf der von dem Wafer abgewandten Seite der Planarisierungsschicht oder einer weiteren, insbesondere auf dem oder den Wellenleitern hergestellten Planarisierungsschicht vorgesehen sein bzw. werden. Das bzw. das jeweilige Element kann an einer Seite oder auch jeweils an gegenüberliegenden Seiten mit einem Kontakt bzw. Kontaktelement verbunden sein. Die Kontakte bzw. Kontaktelemente können durch Verbindungselemente, insbesondere VIAs mit einem oder mehreren elektronischen Bauteilen aus dem Front-End-of-Line verbunden sein bzw. werden. Die Verbindungselemente, insbesondere VIAs können sich durch die Planarisierungsschicht, die ggf. vorhandene weitere Planarisierungsschicht und das Halbleitersubstrat bis zu dem oder den elektronischen Bauteilen erstrecken. Unter verbunden sein ist zweckmäßiger Weise elektrisch leitfähig verbunden zu verstehen.

Es sei angemerkt, dass insbesondere im Falle eines Detektors mit nur einem aktiven Element vorgesehen sein kann, dass dieses – insbesondere zur Verbindung mit einem oder mehreren elektronischen Bauteilen aus dem Front-End-of-Line - mit zwei Kontakten bzw. Kontaktelementen in Kontakt

steht, bevorzugt an gegenüberliegenden Seiten, und im Falle eines Modulators mit zwei aktiven Elementen bzw. einem aktiven Element und einer Elektrode gilt, dass diese – insbesondere zur Verbindung mit einem oder mehreren elektronischen Bauteilen aus dem Front-End-of-Line – jeweils mit
5 einem Kontakt bzw. Kontaktelement in Kontakt steht. Dies bevorzugt an denjenigen Endbereichen bzw. Enden, die von dem Bereich abgewandt sind, indem sie abschnittsweise übereinanderliegen bzw. überlappen.

Es ist auch möglich, dass wenigstens ein aktives Element auf der vom Wafer
10 abgewandten Seite eines oder mehrerer Wellenleiter vorgesehen ist/sind bzw. wird/werden. Dies bietet den Vorteil, dass das aktive Element näher an dem bzw. den Wellenleitern ist. Dann kann mehr Interaktion zwischen dem bzw. den aktiven Elementen und einer optischen Mode im Wellenleiter erzielt werden. Da eine weitere Planarisierungsschicht in diesem Falle nicht erforderlich
15 ist, kann ferner ein kürzeres Bauteil erhalten werden und es sind weniger Prozessschritte erforderlich.

Eine weitere Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass das aktive Element bzw. die aktiven Elemente auf der von dem Wafer abgewandten
20 Seite einer oder mehrerer Steuerelektroden vorgesehen ist/sind bzw. wird/werden, bevorzugt auf der von dem Wafer abgewandten Seite einer oder mehrerer Steuerelektroden, die ihrerseits auf der von dem Wafer abgewandten Seite eines oder mehrerer Wellenleiter hergestellt werden bzw. worden sind.

25
Es sei angemerkt, dass die von dem Wafer abgewandte Seite eines Elementes auch als Oberseite dieses bezeichnet werden kann. So kann etwa die von dem Wafer abgewandte Seite einer Planarisierungsschicht, einer weiteren Planarisierungsschicht, eines Wellenleiters, einer Wellenleiterbasis,
30 von abgeschiedenem Material, einer Graphenschicht, einer Steuerelektrode

und/oder einer photonischen Plattform auch als Oberseite bezeichnet werden kann.

Im Falle eines Modulators mit zwei aktiven Elementen oder einem aktiven Element und einer Elektrode kann ferner vorgesehen sein, dass zwischen den beiden aktiven Elementen bzw. zwischen dem aktiven Element und der Elektrode eine Passivierungsschicht vorgesehen ist bzw. wird. Eine Passivierungsschicht besteht zweckmäßigerweise aus einem dielektrischen Material. Sie kann entsprechend auch als dielektrische Schicht bezeichnet werden. Sie kann gleichzeitig einen Ätzschutz bilden. Als Materialien für eine solche Schicht sind besonders Oxide oder Nitride geeignet. Als besonders geeignet haben sich Aluminiumoxid, Siliziumnitrid bzw. Hafniumoxid erwiesen. Ist eine Passivierungsschicht zwischen den beiden aktiven Elementen bzw. dem aktiven Element und der Elektrode vorgesehen, liegt bevorzugt ein sandwichartiger Aufbau mit aktivem Element, Passivierungsschicht und aktivem Element bzw. Elektrode vor, wobei die beiden aktiven Elemente bzw. das aktive Element und die Elektrode bevorzugt seitlich versetzt zueinander sind.

Es ist auch möglich, dass sich das aktive Element bzw. die aktiven Elemente und eine ggf. vorhandene Elektrode wenigstens einer elektro-optischen Einrichtung abschnittsweise auf einem oder mehreren Wellenleitern und abschnittsweise auf der Planarisierungsschicht bzw. der oder einer weiteren Planarisierungsschicht bzw. einer oder mehreren Steuerelektroden erstrecken.

Ferner kann es sein, dass eines oder mehrere aktive Elemente zumindest abschnittsweise, ggf. auch vollständig innerhalb des oder wenigstens eines der Wellenleiter bzw. zwischen zwei Teilen eines Wellenleiters vorgesehen sind bzw. werden.

Das oder wenigstens eines der aktiven Elemente ist zweckmäßiger Weise derart relativ zu wenigstens einem Wellenleiter angeordnet, dass es zumindest abschnittsweise dem evaneszenten Feld von elektromagnetischer Strahlung, die mit dem Wellenleiter geführt wird, ausgesetzt ist. Bevorzugt ist wenigstens ein aktives Element in einem Abstand kleiner gleich 50 nm, besonders bevorzugt kleiner gleich 30 nm zu wenigstens einem Wellenleiter angeordnet, beispielsweise in einem Abstand von 10 nm.

Bei Wellenleitern gilt, dass ein Teil der elektromagnetischen Strahlung, insbesondere des Lichts, evaneszent außerhalb des Wellenleiters geführt wird. Die Grenzfläche des Wellenleiters ist dielektrisch und entsprechend wird die Intensitätsverteilung durch die Randbedingungen gemäß Maxwell mit einem exponentiellen Abfall beschrieben. Wird ein elektro-optisch aktives Material, beispielsweise Graphen auf den bzw. in die Nähe des Wellenleiters in das evaneszente Feld gebracht, können Photonen mit dem Material, insbesondere Graphen in Wechselwirkung treten.

Ein Photodetektor weist zweckmäßiger Weise ein aktives Element mit oder aus wenigstens einem solchen Material und zwei Kontakte auf.

Es existieren vier Effekte in Graphen, die zu einem Photostrom führen. Einerseits der bolometrischer Effekt, gemäß dem durch die absorbierte Energie der Widerstand des Graphens steigt und sich ein angelegter DC Strom reduziert. Die Änderung des DC Stroms ist dann das Photosignal. Ein weiterer Effekt ist die Photoleitfähigkeit. Dabei führen absorbierte Photonen zu einer Erhöhung der Ladungsträgerkonzentration und die zusätzlichen Ladungsträger reduzieren den Widerstand des Graphens wegen der Proportionalität des Widerstands zur Ladungsträgerkonzentration. Ein angelegter DC Strom erhöht sich und die Änderung ist das Photosignal. Es existiert auch ein ther-

moelektrische Effekt, gemäß dem sich durch einen pn Übergang und einen Temperaturgradienten an diesem Übergang wegen unterschiedlicher Seebeckkoeffizienten für das p und n Gebiet eine Thermospannung ergibt. Der Temperaturgradient entsteht durch die Energie des absorbierten optischen
5 Signals. Diese Thermospannung ist dann das Signal. Der vierte Effekt ist dadurch gegeben, dass an einem pn Übergang die angeregten Elektron-Lochpaare getrennt werden. Der resultierende Photostrom ist das Signal.

Im Falle eines Modulators kann, wie vorstehend dargelegt, eine elektrische
10 Steuerelektrode und ein dazu zweckmäßiger Weise isoliertes aktives Element mit oder aus wenigstens einem Material, dessen Brechungsindex sich in Abhängigkeit einer Spannung bzw. von Ladungen bzw. einem elektrischen Feld ändert, insbesondere aus Graphen vorgesehen sein bzw. auch die Elektrode aus einem entsprechenden Material, insbesondere Graphen, be-
15 stehen, so dass im Betrieb dann zwei aktive Elemente gemeinsam im evaneszenten Feld sind und die elektro-optische Funktion ausführen. Graphen beispielsweise kann durch eine Steuerspannung seine optischen Eigenschaften ändern. Im besonders vorteilhaften Fall einer Graphen-Dielektrikum-Graphen-Anordnung entsteht eine Kapazität und die bei-
20 den Filme Graphen beeinflussen sich gegenseitig. Durch eine Spannung wird die Kapazität bestehend aus den Graphen-Elektroden bildenden beiden aktiven Elementen geladen und die Elektronen besetzen Zustände im Graphen. Daraus ergibt sich eine Verschiebung der Fermi-Energie (Energie des letzten besetzten Zustands im Kristall) zu höheren Energien (oder wegen Symmetrie zu niedrigeren). Erreicht die Fermi-Energie die halbe Energie der Photonen,
25 können diese nicht mehr absorbiert werden, weil die für den Absorptionsvorgang erforderlichen freien Zustände bei der richtigen Energie bereits besetzt sind. In diesem Zustand ist das Graphen folglich transparent, weil die Absorption verboten ist. Durch Wechsel der Spannung wird das Graphen zwi-
30 schen absorbierend und transparent hin und her geschaltet. Ein kontinuier-

lich leuchtender Laserstahl wird in seiner Intensität moduliert und kann so zur Informationsübertragung eingesetzt werden. Ebenfalls ändert sich der Realteil des Brechungsindex mit der Steuerspannung. Durch Wechsel der Spannung kann über den sich ändernden Brechungsindex die Phasenlage
5 eines Lasers moduliert und so Phasenmodulation erreicht werden. Bevorzugt wird die Phasenmodulation in einem Bereich betrieben, in dem alle Zustände bis über der halben Photonenenergie besetzt sind, so dass das Graphen transparent ist und sich maßgeblich der Realteil des Brechungsindex verschiebt und die Änderung der Absorption eine untergeordnete Rolle spielt.

10

Die oder wenigstens eine der elektro-optischen Einrichtungen kann ferner wenigstens eine, bevorzugt zwei Gateelektroden umfassen. Insbesondere bei einer als Photodetektor ausgebildeten elektro-optischen Einrichtung können bevorzugt zwei Gateelektroden dem aktiven Element zugeordnet
15 sein. Diese sind dann bevorzugt derart ausgestaltet und angeordnet, dass über diese die Ladungsträgerkonzentration im aktiven Element, beispielsweise Graphenfilm, eingestellt und so z.B. ein pn-Übergang erzielt werden kann. Die Gateelektroden sind dann bevorzugt in einem geeigneten Abstand zu dem aktiven Element angeordnet und von diesem elektrisch isoliert, bei-
20 spielsweise über eine dielektrische Schicht. Es kann sein, dass auf dem aktivem Element eine dielektrische Schicht vorgesehen ist und die Gateelektroden auf dieser angeordnet sind.

Eine weitere besonders vorteilhafte Ausführungsform zeichnet sich dadurch
25 aus, dass die erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung, insbesondere deren photonische Plattform wenigstens eine Koppeleinrichtung umfasst, die wenigstens einem, bevorzugt genau einem der Wellenleiter zugeordnet ist. Die (jeweilige) Koppeleinrichtung dient dann zweckmäßiger Weise der Einkopplung elektromagnetischer Strahlung, insbesondere im infraroten und/oder
30 sichtbaren Wellenlängenbereich, in wenigstens einen der Wellenleiter der

photonischen Plattform, dem die (jeweilige) Koppeleinrichtung zugeordnet ist, und/oder der Auskopplung elektromagnetischer Strahlung, insbesondere im infraroten und/oder sichtbaren Wellenlängenbereich, aus wenigstens einem der Wellenleiter der photonischen Plattform, dem die (jeweilige) Koppeleinrichtung zugeordnet ist. Hierfür kann sie entsprechend ausgebildet und angeordnet sein. Es sei angemerkt, dass für Si-Photonik gilt, dass diese wegen der Bandlücke in der Regel nur für den infraroten Wellenlängenbereich geeignet ist, da alle Wellenlängen kürzer als 1100 nm in Si absorbiert werden. Für Dielektrika ist das in der Regel nicht der Fall, diese sind auch im sichtbaren Wellenlängenbereich transparent, weswegen sie gut für Spektroskopie geeignet sind.

Besonders bevorzugt ist die oder wenigstens eine der Koppeleinrichtungen derart ausgebildet und angeordnet, dass mittels dieser elektromagnetische Strahlung, insbesondere im infraroten und/oder sichtbaren Wellenlängenbereich, aus einer Glasfaser in wenigstens einen der Wellenleiter der photonischen Plattform, eingekoppelt werden kann, und/oder dass mittels dieser elektromagnetische Strahlung, insbesondere im infraroten und/oder sichtbaren Wellenlängenbereich, aus wenigstens einem der Wellenleiter der photonischen Plattform in eine Glasfaser eingekoppelt werden kann. Glasfasern werden in der Regel einen größeren Durchmesser aufweisen als der oder die Wellenleiter und die Koppeleinrichtung bzw. Koppeleinrichtungen werden weiter bevorzugt ausgebildet sein, um die Ein- und/oder Auskopplung in einem solchen Fall zu ermöglichen.

Eine Koppeleinrichtung kann einen Abschnitt, insbesondere Endabschnitt, eines Wellenleiters umfassen, dem sie zugeordnet ist, beispielsweise einen sich zum Ende hin verjüngenden oder verbreiternden Endabschnitt.

Die wenigstens eine Koppeleinrichtung kann in Weiterbildung wenigstens eine Gitterstruktur aufweisen, die dann insbesondere derart ausgebildet und angeordnet ist, dass deren erste Beugungsordnung in dem zugeordneten Wellenleiter liegt. Eine solche Koppeleinrichtung kann man auch als Gitter-

5 koppeleinrichtung bzw. kurz Gitterkoppler bezeichnen. Im Zusammenhang mit dem Aufbau und der Funktionsweise von Gitterkopplern sei auch auf den Aufsatz "CMOS-compatible high efficiency double-etched apodized waveguide grating coupler", Optics Express 21, 7868-7874, 2013, verwiesen.

10 Ist wenigstens eine Koppeleinrichtung durch einen Gitterkoppler gegeben, gilt weiter bevorzugt, dass diese einen Reflektor umfasst bzw. dieser ein Reflektor zugeordnet ist. Ein Reflektor ist besonders geeignet, da er so angeordnet sein bzw. werden kann, dass die maximale Kopplung erreicht wird. Wenn kein Reflektor vorhanden ist, ergibt sich in der Regel das Interface/die

15 Grenzfläche zwischen Back-End-Of-Line und Planarisierung automatisch als Reflektor, weil dort ein Brechungsindexsprung existiert. Ist ein Gitterkoppler vorgesehen, ist ein Reflektor auch aus dem Grunde besonders vorteilhaft, weil dann die Situation – im Gegensatz zu derjenigen beim Interface – genau definiert ist. Als Reflektor kann beispielsweise eine Metallfolie bzw. dün-

20 ne Metallschicht oder ein dielektrischer Schichtstapel, so dass eine Bragg-Reflektor entsteht, dienen.

Ein Reflektor ist bevorzugt in der Planarisierungsschicht angeordnet. Ein Reflektor kann aus Metall bestehen bzw. solches umfassen, z.B. Aluminium,

25 und/oder sich durch eine rechteckige Form auszeichnen und/oder etwas größer als der Gitterkoppler sein und/oder in einem geeigneten Abstand zu dem Gitterkoppler, bevorzugt unterhalb dieses, angeordnet sein.

Alternativ oder zusätzlich kann wenigstens eine der Koppeleinrichtungen als

30 Seitenkoppeleinrichtung (kurz Seitenkoppler) ausgebildet sein. Die Koppe-

leinrichtung weist dann zweckmäßiger Weise wenigstens ein Koppелеlement auf, welches derart ausgebildet und angeordnet ist, dass in dieses seitlich elektromagnetische Strahlung eingekoppelt und/oder dass aus diesem seitlich elektromagnetische Strahlung ausgekoppelt werden kann. Unter seitlich ist dabei insbesondere seitlich in Bezug auf die laterale Ausdehnung des Wafers, insbesondere in Bezug auf die vom Front-End-of-Line abgewandte Seite des Wafers, zu verstehen.

Im Zusammenhang mit dem Aufbau und der Funktionsweise von Gitterkopp-
lern sei auch auf den Aufsatz "Ultra-low-loss inverted taper coupler for silicon-on-insulator ridge waveguide", Optics Communications Volume 283, Issue 19, Oktober 2010, Seiten 3678-3682, verwiesen.

Eine Gitterkoppelinrichtungen kann ferner derart ausgebildet und angeordnet sein, dass die einzukoppelnde elektromagnetische Strahlung von (schräg) oben insbesondere auf ein Gitter dieser einfallen kann bzw. die auszukoppelnde elektromagnetische Strahlung nach (schräg) oben insbesondere von einem Gitter dieser ausgekoppelt wird. Sie kann weiter bevorzugt derart ausgebildet und angeordnet sein, dass eine Einkopplung unter einem Winkel im Bereich von 0° bis 30° , insbesondere von 10° bezogen auf das Lot auf die von dem Front-End-of-Line abgewandte Seite des Wafers bzw. der erfindungsgemäßen Vorrichtung erfolgen kann.

Gitterkoppelinrichtungen mit Ein- bzw. Abstrahlung von bzw. nach (schräg) oben hin bieten gegenüber Seitenkoppelinrichtungen in der Regel den Vorteil, dass diese bereits vor dem Dicen auf ihre Funktion überprüft werden können. Bei Seitenkoppelinrichtungen hingegen kann es sein, dass die Seite bzw. Kante des Elementes, an welcher elektromagnetische Strahlung eintreten bzw. aus welcher elektromagnetische Strahlung austreten soll, erst nach dem Dicen freiliegt und daher erst dann ein Test erfolgen kann.

In Weiterbildung kann vorgesehen sein, dass wenigstens zwei Koppeleinrichtungen vorgesehen sind, wobei wenigstens eine als Seitenkoppeleinrichtung (kurz Seitenkoppler) und wenigstens eine als Gitterkoppeleinrichtung (kurz Gitterkoppler) ausgebildet ist. Sind beide Kopplertypen vorgesehen, kann ein Gitterkoppler genutzt werden, um die Bauteile während der Herstellung zu vermessen und dann ein Seitenkoppler, wenn alles fertig ist. Bevorzugt gilt, dass wenigstens einem Wellenleiter zwei Koppler, jeweils einer des einen und einer des anderen Typs zugeordnet sind.

10

Die Koppeleinrichtung bzw. Koppeleinrichtungen werden bevorzugt zusammen mit dem wenigstens einen Wellenleiter hergestellt, dem sie zugeordnet sind hergestellt. Die Herstellung kann einschließen, dass sie – in Analogie zu den Wellenleitern – lithographisch definiert und durch Ätzen, insbesondere trockenchemisches Ätzen, strukturiert werden.

15

Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Herstellung wenigstens einer Halbleitereinrichtung, bei dem eine erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung bereitgestellt und zerteilt, mit anderen Worten gediced wird. Durch das Zerteilen/Dicen wird wenigstens ein Chip, werden in der Regel eine Mehrzahl von Chips mit darauf aufgebauter Photonik erhalten, die jeweils eine erfindungsgemäße Halbleitereinrichtung darstellen. Dieser bzw. diese „ nackten“ Chips mit Photonik können dann beispielsweise jeweils in ein Gehäuse (package) eingesetzt werden. Es sei angemerkt, dass die erfindungsgemäßen Halbleitereinrichtungen, die einen konventionellen, integrierte Schaltkreise aufweisenden Chip und den darauf aufgebauten Abschnitt der photonischen Plattform umfassen, ihrerseits auch wieder als Chip bezeichnet werden kann.

20

25

Gegenstand der Erfindung ist ferner eine Halbleitereinrichtung, die durch Zerteilen, mit anderen Worten Dicen, einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung erhalten wurde.

- 5 Die erfindungsgemäße Halbleitereinrichtung, die durch Dicen einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung erhalten wurde, zeichnet sich durch eine photonische Plattform bzw. einen Abschnitt einer solchen aus, deren laterale Ausdehnung zumindest im Wesentlichen mit der lateralen Ausdehnung des darunter liegenden Chips bzw. Halbleiter-Substrats übereinstimmt.
- 10 Die photonische Plattform bzw. der Abschnitt einer solchen hat, genau wie das darunterliegende Substrat, seine Form und Ausdehnung durch das Dicen erhalten.

- Es kann sein, dass ein die Halbleitereinrichtung umgebendes Gehäuse vorgesehen ist. Dann gilt bevorzugt, dass diejenige Seite der Einrichtung, an der
- 15 das Front-End-of-Line liegt, innenseitig an dem Gehäuse anliegt.

- Hinsichtlich der Ausgestaltungen der Erfindung wird auch auf die Unteransprüche sowie auf die nachfolgende Beschreibung mehrerer Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die beiliegende Zeichnung verwiesen.
- 20

In der Zeichnung zeigt:

- Figur 1 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 25
- Figur 2 einen Teilschnitt durch die Halbleitervorrichtung aus Figur 1 in rein schematischer Darstellung;

- Figur 3 eine Aufsicht auf den Photodetektor aus Figur 2, 4 und 5 in rein schematischer Darstellung;
- 5 Figur 4 einen Teilschnitt durch ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 10 Figur 5 einen Teilschnitt durch ein drittes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 15 Figur 6 einen Teilschnitt durch ein viertes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 20 Figur 7 einen Teilschnitt durch ein fünftes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 25 Figur 8 einen Teilschnitt durch ein sechstes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- Figur 9 eine Aufsicht auf den Modulator aus Figur 8 in rein schematischer Darstellung;
- 30 Figur 10 einen Teilschnitt durch ein siebtes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;

- Figur 11 einen Teilschnitt durch ein achttes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 5 Figuren 12 fünf Beispiele möglicher Kontaktierungen der aktiven Elemente
 bis 16 der elektro-optischen Einrichtungen der Halbleitervorrichtungen in rein schematischer Darstellung;
- 10 Figur 17 einen Teilschnitt durch ein neuntes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 15 Figur 18 einen Teilschnitt durch ein zehntes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 20 Figur 19 einen Teilschnitt durch ein elftes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 25 Figur 20 einen Teilschnitt durch ein zwölftes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 25 Figur 21 eine Aufsicht auf ein erstes Ausführungsbeispiel eines Photodetektors mit plasmonischer Kopplung in rein schematischer Darstellung;

- Figur 22 eine Aufsicht auf ein zweites Ausführungsbeispiel eines Photodetektors mit plasmonischer Kopplung in rein schematischer Darstellung;
- 5 Figur 23 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel eines Modulators mit plasmonischer Kopplung in rein schematischer Darstellung;
- Figur 24 eine Aufsicht auf eine Beispiel einer Seitenkoppelrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 10 Figur 25 die Seitenkoppelrichtung aus Figur 24 in schematischer Schnittdarstellung;
- Figur 26 eine Aufsicht auf eine Beispiel einer Gitterkoppelrichtung in rein schematischer Darstellung;
- 15 Figur 27 die Gitterkoppelrichtung aus Figur 26 in schematischer Schnittdarstellung;
- 20 Figur 28 die Schritte des Verfahrens zur Herstellung der Vorrichtung gemäß Figur 1;
- Figur 29 eine Aufsicht auf drei erfindungsgemäße Halbleitereinrichtungen in rein schematischer Darstellung; und
- 25 Figur 30 eine rein schematische Schnittdarstellung durch eine erfindungsgemäße Halbleitereinrichtung aus Figur 29.

In den Figuren sind gleiche Komponenten bzw. Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen.

30

Die Figur 1 zeigt in rein schematischer, stark vereinfachter Darstellung eine Aufsicht auf eine erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung. Diese umfasst einen Wafer 1, der auch abschnittsweise in der Teilschnittdarstellung gemäß

5 Figur 2 zu erkennen ist, und der ein einteiliges Siliziumsubstrat 2 und eine Mehrzahl von integrierten elektronischen Bauteilen 3, die sich bei dem gezeigten Beispiel in dem Halbleitersubstrat 2 erstrecken, umfasst. Die integrierten elektronischen Bauteile 3, bei denen es sich insbesondere um Transistoren und/oder Widerstände und/oder Kondensatoren handeln kann, sind

10 in der schematischen Figur 2 nur vereinfacht durch eine mit dem Bezugszeichen 3 versehene Linie mit Schraffur angedeutet. An entsprechender Stelle in dem Substrat 2 findet sich in hinlänglich vorbekannter Weise eine Vielzahl integrierter elektronischer Bauteile 3. Diese können in ebenfalls vorbekannter Weise Bestandteile von Prozessoren, etwa CPUs und/oder GPUs sein bzw.

15 solche bilden.

Bei dem Wafer 1 handelt es sich um eine Komponente bzw. Einrichtung, aus der in aus dem Stand der Technik hinlänglich vorbekannter Weise durch (Wafer-)Dicing, das im deutschen auch als Wafer-Zerkleinern bezeichnet

20 wird, eine Mehrzahl von Chips erhalten werden kann. Das Dicing bzw. Zerkleinern kann beispielsweise durch (Laser-)Schneiden bzw. Sägen bzw. Ritzen bzw. Brechen des Wafers 1 erfolgen. Ein Wafer umfasst entsprechend eine Mehrzahl von Bereichen, die im Anschluss an das Dicing jeweils einen Chip bilden. Diese Bereiche werden vorliegend als Chip-Bereiche 4 bezeichnet.

25

In der Figur 1 sind diese rein schematisch mit dünner Linie angedeutet. Jeder Chipbereich 4 des Wafers 1 umfasst einen Abschnitt bzw. Teilbereich des einteiligen Halbleitersubstrats 2 und in der Regel wenigstens eines, bevor-

30 zugt mehrere integrierte elektronische Bauteile 3. Je nach Ausgestaltung des

Wafers 1, die vom konkreten Anwendungsfall abhängt, können in jedem Chipbereich 4 beispielsweise bis zu zehn oder auch mehrere zehn, mehrere hundert oder mehrere tausend integrierte elektronische Bauteile 3 vorgesehen sein. Diese können nebeneinander und/oder übereinander angeordnet
5 sein.

Der Wafer 1 hat ein Front-End-of-Line (kurz FEOL) 5, in dem die Mehrzahl integrierter elektronischer Bauteile 3 angeordnet ist und ein darüber liegendes Back-End-of-Line (kurz BEOL) 6, in dem bzw. über das die integrierten
10 elektronischen Bauteile 3 des Front-End-of-Lines 5 mittels verschiedener Metallebenen verschaltet sind. Die integrierten elektronischen Bauteile 3 im FEOL 5 und die zugehörige Verschaltung im BEOL 6 bilden in hinlänglich vorbekannter Weise integrierte Schaltkreise des Wafers 1. Ein FEOL 5 wird teilweise auch als Transistor-Frontend und ein BEOL als Metall-Backend
15 bezeichnet. Die Metallebenen umfassen eine Mehrzahl von Verbindungselementen 7, die vorliegend durch sogenannte VIAs gegeben sind, was die Abkürzung für Vertical Interconnect Access ist. Die VIAs 7 bestehen aus Metall, beispielsweise Kupfer, Aluminium oder Wolfram.

Die dargestellte Halbleitervorrichtung 1 umfasst ferner eine photonische Plattform 8, die sich, wie in der Schnittdarstellung gemäß Figur 2 gut erkennbar, oberhalb des Wafers 1 befindet und erfindungsgemäß auf dessen Back-End-of-Line 6 hergestellt, konkret direkt darauf aufgebaut wurde. Es sei
20 angemerkt, dass die Chipbereiche 4 in der Figur 1 mit dünner Linie angedeutet sind, da diese in der Aufsicht unterhalb der photonischen Plattform 8 liegen.

Der Wafer 1 zeichnet sich bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel durch einen Durchmesser von 200 mm aus. Dies ist auch der Durchmesser der
30 photonischen Plattform 8 und der Halbleitervorrichtung als Ganzes (vgl. Figur

1), die den Wafer 1 und oberhalb von dem Wafer 1 die darauf hergestellte photonische Plattform 8 umfasst. Der Teilschnitt gemäß Figur 2 zeigt in vertikaler Richtung die gesamte Vorrichtung gemäß Figur 1 mit den übereinanderliegenden Komponenten bzw. Schichten bzw. Elementen dieser, in horizontaler Richtung jedoch nur einen sehr kleinen Teil der Vorrichtung, konkret nur einen kleinen Teile bzw. Abschnitt von einem der ihrerseits im Vergleich zur Gesamtausdehnung der Vorrichtung in horizontaler Richtung kleinen Chipbereiches 4. Für die weiteren Teilschnitte gilt dies gleichermaßen. Vorliegend zeichnen sich die Chipbereiche 4 in der Aufsicht durch eine rechteckige Form jeweils mit einer Kantenlänge von 2 mm in der einen und 3 mm in der anderen Richtung aus. Es sei angemerkt, dass diese in der rein schematischen Figur 1 lediglich aus Gründen der Vereinfachung quadratisch angedeutet sind.

Wie man der Figur 2 entnehmen kann, umfasst die erfindungsgemäß vorgesehene photonische Plattform 8 eine Planarisierungsschicht 10, die auf der von dem Front-End-of-Line 5 abgewandten Seite 9 des Wafers 1 hergestellt wurde und aus einem dielektrischen Material ist. Vorliegend besteht die Planarisierungsschicht 10 aus Siliziumdioxid (SiO_2), wobei dies beispielhaft zu verstehen ist und auch andere Materialien zum Einsatz kommen können.

Die Planarisierungsschicht 10 ist bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel eine durch Abscheidung des entsprechenden Beschichtungsmaterials, hier SiO_2 , auf der vom Front-End-of-Line 5 abgewandten Seite 9 des Wafers 1 und anschließende Planarisierungsbearbeitung des abgeschiedenen Materials auf der von dem Wafer 1 abgewandten Seite 11 erhaltene Schicht. Die Planarisierungsschicht 10 zeichnet sich aufgrund der Bearbeitung an ihrer von dem Wafer 1 abgewandten Seite 11 vorliegend durch eine Rauheit von 0,2 nm RMS aus, wobei dies beispielhaft zu verstehen ist.

30

Die Planarisierungsschicht 10 erstreckt sich bei dem dargestellten Beispiel über die gesamte von dem Front-End-of-Line 5 abgewandte Seite 9 des Wafers 1. Das Material der Planarisierungsschicht 10 wurde vollflächig auf der gesamten von dem Front-End-of-Line 5 abgewandten Seite 9 des Wafers 1 abgeschieden. Diese zeichnet sich durch daher einen Durchmesser aus, der zumindest im Wesentlichen mit demjenigen des Wafers 1 übereinstimmt.

Die photonische Plattform 8 umfasst ferner eine Mehrzahl von auf der von dem Wafer 1 abgewandten Seite 11 der Planarisierungsschicht 10 hergestellten Wellenleitern 12. Als Wellenleitermaterialien kommen insbesondere Dielektrika, vorzugsweise Titandioxid in Frage, welches auch bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel verwendet wurde. Alternativ oder zusätzlich können auch Wellenleiter 12 aus Aluminiumnitrid und/oder Tantalpentoxid und/oder Siliziumnitrid und/oder Aluminiumoxid und/oder Siliziumoxinitrid und/oder Lithiumniobat oder auch aus Halbleitern wie Silizium, Indiumphosphid, Galliumarsenid, Indiumgalliumarsenid, Aluminiumgalliumarsenid oder Dichalkogenide oder Chalkogenidglas oder Polymere wie Su8 oder OrmoComp vorgesehen sein.

Typische Abmessungen der Wellenleiter 12 sind eine Dicke im Bereich von 150 nm und 10 µm und in lateraler Ausdehnung, parallel zur Wafer-Oberfläche, Weiten zwischen 100 nm und 10 µm. Rein beispielhaft sei eine Dicke von 300 nm und eine Breite von 1,1 µm genannt. Die konkreten Abmessungen der Wellenleiter 12 können variieren. Sie sind insbesondere unterschiedlich breite, je nachdem, welche Funktion sie erfüllen.

Die photonische Plattform 8 umfasst vorliegend noch eine weitere Planarisierungsschicht 13, die aus dem gleichen Material besteht, wie die Planarisierungsschicht 10, also vorliegend ebenfalls aus SiO₂. Die weitere Planarisierungsschicht 13 zeichnet sich an ihrer vom Wafer 1 abgewandten Seite 14

durch eine Rauheit aus, die derjenigen der Planarisierungsschicht 10 entspricht. Deren Durchmesser entspricht zumindest im Wesentlichen demjenigen der darunterliegenden Planarisierungsschicht 10. Es sei betont, dass sich die Planarisierungsschicht 10 und die weitere Planarisierungsschicht 13 – wie vorliegend - durch das gleiche Material, die gleiche Ausdehnung und die gleiche Rauheit an ihren von dem Wafer 1 abgewandten Seiten 11 bzw. 14 auszeichnen können, dies jedoch nicht erforderlich und somit nicht einschränkend zu verstehen ist.

Die photonische Plattform 8 umfasst auch eine Mehrzahl von elektro-optischen Einrichtungen 15, bei denen es sich insbesondere um Photodetektoren und/oder Modulatoren handeln kann. Bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel umfasst die photonische Plattform 8 sowohl eine Mehrzahl von Photodetektoren 15 als auch eine Mehrzahl von Modulatoren 15.

In der Figur 2 ist beispielhaft eine der elektro-optischen Einrichtungen, konkret ein Photodetektor 15, schematisch dargestellt. Die Figur 3 zeigt – wiederum nur schematisch – eine Aufsicht auf einen Abschnitt der Vorrichtung aus Figur 1, konkret auf den Photodetektor 15 aus Figur 2.

Die Figuren 4 und 5 zeigen beispielhaft Teilschnitte durch weitere Ausführungsbeispiele erfindungsgemäßer Halbleitervorrichtungen, die in der Aufsicht derjenigen aus Figur 1 entsprechen können, und in denen jeweils Photodetektor 15 und darunterliegender Wellenleiter 12 zu erkennen sind, wobei hier jeweils der Photodetektor 15 und/oder der Wellenleiter 12 alternativ zu demjenigen aus Figur 2 ausgestaltet ist. Es sei angemerkt, dass die schematische Aufsicht aus Figur 3 auch zu den Detektoren 15 aus den Figuren 4 und 5 korrespondiert, mit der Maßgabe, dass von den Wellenleitern mit T-förmigem Querschnitt (vgl. Figur 4 und 5) nur der obere, schmale Teil dargestellt ist.

Die Figuren 6 und 7 zeigen Teilschnitte durch weitere Ausführungsbeispiele erfindungsgemäßer Halbleitervorrichtungen. Hier sind ebenfalls Photodetektoren 15 als elektro-optische Einrichtungen vorgesehen, die sich in ihrem Aufbau von denjenigen aus den Figuren 2, 4 und 5 unterscheiden.

Die Figuren 8, 10 und 11 zeigen Teilschnitte durch nochmals weitere Ausführungsbeispiele erfindungsgemäßer Halbleitervorrichtungen, in denen jeweils eine als Modulator 15 ausgestaltete elektro-optische Einrichtung erkennbar ist. Die Figur 9 zeigt eine Aufsicht auf den Modulator 15 aus Figur 8.

Die Photodetektoren 15 gemäß den Figuren 2 und 4 bis 7 umfassen jeweils ein aktives Element 16 aus einem Material, das elektromagnetische Strahlung wenigstens einer Wellenlänge, bevorzugt wenigstens eines Wellenlängenbereichs, absorbiert und infolge der Absorption ein elektrisches Photosignal erzeugt. Bei den Beispielen aus Figur 2 und 4 bis 7 sind die aktiven Elemente 16 der Photodetektoren 15 jeweils durch einen Graphenfilm 16 gegeben. Graphen kann auch seinen Brechungsindex (Brechzahl und/oder Absorption) in Abhängigkeit einer Spannung und/oder von Ladung und/oder einem elektrischen Feld ändern. Es ist auch möglich, dass die aktiven Elemente 16 durch Filme mit oder aus wenigstens einem anderen Material gegeben sind, beispielsweise Filme mit oder aus einer Dichalkogenid-Graphen-Heterostruktur bestehend aus mindestens einer Lage Graphen und mindestens einer Lage eines Dichalkogenids, oder durch Filme, die mindestens eine Lage Bornitrid und mindestens eine Lage Graphen umfassen. Es gibt unterschiedliche Chalkogenide, hier sind insbesondere Übergangsmetall-Dichalkogenide als zweidimensionale Materialien wie MoS₂, oder WSe₂ geeignet.

Die in den Figuren 2 und 4 gezeigten Anordnungen unterscheiden sich, wie ein Vergleich zeigt, alleine durch die Form des Wellenleiters 12. Während in der Figur 2 ein Streifenwellenleiter 12 mit rechteckigem Querschnitt vorgesehen ist, zeigt die Figur 4 – genau wie die Figur 5 – einen Rippenwellenleiter 12 mit einem T-förmigen Querschnitt mit einem ersten, oberen Wellenleitersegment 12a mit schmalere rechteckigen Querschnitt und einem zweiten, unteren Wellenleitersegment 12b mit deutlich breiterem rechteckigen Querschnitt. Das Beispiel aus Figur 5 unterscheidet sich von demjenigen aus Figur 4 nur dadurch, dass hier keine weitere Planarisierungsschicht 13 vorgesehen ist. Es sei angemerkt, dass der Wellenleiter 12 in dem Beispiel gemäß Figur 2 alternativ beispielsweise auch als sogenannter Schlitz- bzw. Slot-Wellenleiter mit zwei voneinander unter Bildung eines Schlitzes bzw. Spaltes beabstandeten Wellenleitersegmenten ausgestaltet sein könnte. Wenn ein Wellenleiter 12 mehr als ein Segment 12a, 12b umfasst, kann gelten, dass alle Segmente aus dem gleichen Material sind, wie es vorliegend der Fall ist. Dies muss jedoch nicht zwingend gelten sondern die Segmente können auch verschiedene Materialien umfassen bzw. aus verschiedenen Materialien bestehen.

Bei den Beispielen aus den Figuren 2, 4 und 5 erstreckt sich der Graphenfilm 16 der jeweiligen elektro-optischen Einrichtung 15 oberhalb eines Längsabschnittes des in den Figuren jeweils erkennbaren Wellenleiters 12. Dies kann auch gut der Aufsicht aus Figur 3 entnommen werden. Bei den Beispielen gemäß den Figuren 2 und 4 ist der bzw. der eine Graphenfilm 16, 16a jeweils auf der von dem Wafer 1 abgewandten Seiteite 14 der weiteren Planarisierungsschicht 13 hergestellt bzw. darauf vorgesehen. Wie man erkennt, erstreckt sich der Graphenfilm 16 hier jeweils im Bereich des insbesondere aufgrund der Resistplanarisierung trapezförmigen Abschnitts der weiteren Planarisierungsschicht 13 auf dieser. Bei dem in der Figur 5 gezeigten Beispiel befindet sich der Graphenfilm 16 direkt auf dem Wellenleiter 12.

Die Figuren 6 und 7 zeigen Beispiele, bei denen in Abweichung von den Figuren 2, 4 und 5 sich der Graphenfilm 16 nicht oberhalb sondern innerhalb (Figur 6) bzw. unterhalb (Figur 7) des jeweiligen Wellenleiters 12 erstreckt.

5 Was die Form der Wellenleiter 12 angeht, sind diese wiederum als Rippenwellenleiter 12 mit einem T-förmigen Querschnitt ausgebildet. Dabei umfasst der Wellenleiter 12 des Beispiels aus Figur 6 ein erstes, oberes Wellenleitersegment 12 a, ein mittleres 12b und unteres Wellenleitersegment 12c. Alle Wellenleitersegmente 12a, 12b, 12c haben einen rechteckigen Querschnitt,
10 wobei das mittlere und das untere Segment 12b, 12c erkennbar deutlich breiter sind. Das mittlere Wellenleitersegment 12b ist auf dem Graphenfilm 16 vorgesehen und dient sowohl als Passivierungsschicht für dieses als auch als Wellenleitersegment 12b (kann auch als Wellenleiter-Slab bezeichnet werden). Das auch als Passivierung dienende Segment 12b besteht vorlie-
15 gend aus Aluminiumoxid. Alternativ oder zusätzlich kann sie auch Dichalkogenide und/oder Dichalkogenid-Heterostrukturen und/oder SiO_2 und/oder Bornitrid umfassen bzw. daraus bestehen. Die beiden weiteren Segmente 12a, 12c können beispielsweise ebenfalls aus Aluminiumoxid oder auch Titandioxid bestehen bzw. dieses umfassen.

20

Das Beispiel aus Figur 7 unterscheidet sich von demjenigen aus Figur 6 dadurch, dass kein unteres Wellenleitersegment 12c vorhanden ist. Der Graphenfilm 16 ist hier direkt auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite 11 der Planarisierungsschicht 10 angeordnet.

25

Insbesondere im Falle einer als Photodetektor 15 ausgebildeten elektro-optischen Einrichtung können dem aktiven Element 16 ferner zwei Gateelektroden zugeordnet sein. Diese sind dann bevorzugt derart ausgestaltet und angeordnet, dass über sie die Ladungsträgerkonzentration im aktiven
30 Element, vorliegend Graphenfilm 16, eingestellt und so z.B. ein pn-Übergang

erzielt werden kann. Die Gateelektroden können beispielsweise oberhalb des Graphenfilms 16 angeordnet und über eine dielektrische Schicht von diesem elektrisch isoliert sein.

- 5 Die Modulatoren 15 gemäß den Figuren 8, 10 und 11 umfassen vorliegend jeweils zwei aktive Elemente, konkret ein unteres 16a und ein oberes 16b, die vorliegend jeweils durch einen Film 16 aus Graphen gegeben sind. Auch bei den Modulatoren 15 gilt, dass die aktiven Elemente auch anders ausgestaltet sein können, beispielsweise als Filme mit oder aus wenigstens einem
- 10 anderen Material. Die beiden Graphenfilme 16a, 16b erstrecken sich voneinander beabstandet und stehen nicht in elektrischem Kontakt miteinander. Sie sind vielmehr über eine dazwischen liegende Schicht 17 aus einem dielektrischen Material, bevorzugt einem Oxid oder Nitrid, vorliegend Aluminiumoxid, voneinander elektrisch isoliert. Die dielektrische Schicht 17 dient
- 15 auch als Passivierung und als Ätzschutz bzw. -stop. Wie ein Vergleich der Figuren 2 und 6 zeigt, stimmen die Anordnungen abgesehen davon, dass der Modulator 15 aus Figur 8 ein zweites aktives Element 16b umfasst und die zusätzliche dielektrische Schicht 17 vorgesehen ist, überein.
- 20 Die beiden Graphenfilme 16a, 16b sind derart versetzt zueinander angeordnet, dass sie abschnittsweise übereinanderliegen bzw. überlappen (ohne sich zu berühren). Im Überlappungsbereich gilt ferner, dass sich die beiden Graphenfilme 16a, 16b bzw. die entsprechenden Abschnitt dieser zumindest im Wesentlichen parallel zueinander erstrecken. Es sei angemerkt, dass al-
- 25 ternativ dazu, dass der Modulator 15 zwei aktive Elemente 16a, 16b umfasst, anstelle eines der aktiven Element auch eine Elektrode aus einem elektrisch leitfähigen Material, beispielsweise Kupfer oder Aluminium, vorgesehen sein kann.

Bei dem in Figur 8 dargestellten Beispiel ist der untere Graphenfilm 16a – genau wie der einzige Graphenfilm 16 des Detektors aus Figur 2 und 4 – auf der Seite 14 der weiteren Planarisierungsschicht 13 vorgesehen, wiederum im Bereich des trapezförmigen Abschnitts oberhalb des Wellenleiters 12.

5 Der zweite, obere Graphenfilm erstreckt sich auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite 18 der dielektrischen Schicht 17.

In Analogie zu den verschiedenen Beispielen aus den Figuren 2, 4 und 5 unterscheiden sich auch die Beispiele aus den Figuren 8, 10 und 11 im Wesentlichen dadurch, dass sich der Wellenleiter 12 durch eine andere Form auszeichnet und es keine zweite Planarisierungsschicht 13, hier weder in

10 Figur 10 noch Figur 11 gibt. Während das Beispiel aus Figur 8 einen Streifenwellenleiter 12 umfasst, ist bei denen gemäß den Figuren 10 und 11 jeweils einen Rippenwellenleiter 12 mit T-förmigem Querschnitt bzw. Profil vorgesehen. Dabei umfasst der Wellenleiter aus Figur 10 – im Querschnitt betrachtet - vier Wellenleitersegmente 12a, 12b, 12c, 12d und derjenige aus

15 Figur 11 drei Segmente 12a, 12b, 12c. Alle Segmente 12a bis 12d haben einen rechteckigen Querschnitt, wobei sich, wie man den Figuren entnehmen kann, das obere Segment 12a – in Analogie zu den Figuren 4 und 5 - eine

20 deutlich geringere Breite hat als die darunter liegenden Segmente 12b, 12c und im Falle von Figur 11, 12d. Die beiden bzw. drei unteren Segmente 12a, 12b, 12c zeichnen sich bei den gezeigten Beispielen jeweils durch die gleiche Breite aus. Das Segment 12d des Wellenleiters 12 aus Figur 10 kann auch als Wellenleiterbasis erachtet und bezeichnet werden.

25

Bei dem Beispiel aus Figur 11 erstreckt sich der untere Graphenfilm 16a zwischen der hier einzigen Planarisierungsschicht 10 und dem darüber liegenden Segment 12c des Rippenwellenleiters 12 und der obere Graphenfilm 16b zwischen den Segmenten 12b und 12c. Der obere Graphenfilm 16b erstreckt sich somit innerhalb des Wellenleiters 12. Der Untere Graphenfilm

30

16a wurde auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite 11 der Planarisierungsschicht hergestellt bzw. darauf vorgesehen und der Obere 16b auf dem Segment 12c.

- 5 Jedes der aktiven Elemente 16, 16a, 16b aller Detektoren und 15 und Modulatoren 15 der photonischen Plattform 8 sind derart relativ zu dem jeweiligen, in den Figuren erkennbaren und ihnen zugeordneten Wellenleiter 12 angeordnet, dass sie zumindest abschnittsweise dem evaneszenten Feld von elektromagnetischer Strahlung, die mit dem jeweiligen Wellenleiter 12 geführt
10 wird, ausgesetzt sind. Bevorzugt gilt zumindest für einen Abschnitt des jeweiligen aktiven Elementes 16, 16a, 16b, dass er sich in einem Abstand kleiner oder gleich 50 nm, bevorzugt kleiner oder gleich 30 nm zu dem jeweiligen Wellenleiter 12 erstreckt. Wie beispielsweise in der Figur 2 erkennbar, ist die weitere Planarisierungsschicht 13 zwischen dem Wellenleiter 12 und dem
15 Graphenfilm 16 entsprechend dünn bzw. gegenüber ihrer Dicke im verbleibenden Bereich „ausgedünnt“.

Jede der elektro-optischen Einrichtungen, konkret sowohl jeder Photodetektor 15 als auch jeder Modulator 15, ist bei den dargestellten Ausführungsbeispielen ferner mit wenigstens einem der integrierten elektronischen Bauteile 3 des Front-End-of-Lines 5 des jeweiligen Wafers 1 elektrisch leitend verbunden. Wie man in der schematischen Schnittdarstellungen gemäß den Figuren 2 bis 4 sowie 8, 10 und 11 erkennen kann, ist die Verbindung über die VIAs 7 des Back-End-of-Lines 6 des Wafers 1 sowie weitere VIAs 7, die
25 sich durch die Planarisierungsschicht 10 und ggf. weitere Schichten bzw. Elemente erstrecken, realisiert.

Konkret ist bei den Detektoren 15 der jeweilige Graphenfilm 16 an gegenüberliegenden Endbereichen über Kontakte bzw. Kontaktelemente 19 mit
30 dem oberen Ende von VIAs 7, die sich durch die Planarisierungsschicht 10

und ggf. weitere Schichten bzw. Elemente bis zum Back-End-of-Line 6 des Wafers 1 erstecken, elektrisch leitfähig verbunden. In der Aufsicht aus Figur 3 sind die mit den Kontaktelementen 19 in Verbindung stehenden VIAs 7, welche unterhalb Ersterer liegen, mit dünner Linie angedeutet.

5

Bei den Modulatoren 15 ist jeder der beiden Graphenfilme 16a, 16b an einem Endbereich mit einem Kontaktelement 19 und darüber mit einem VIA 7 verbunden.

10 Die Kontaktierung eines aktiven Elementes, vorliegen Graphenfilms 16, 16a, 16b einer elektro-optischen Einrichtung 15 mit einem Kontaktelement 19 kann prinzipiell unterschiedlich ausgestaltet sein. Die Figuren 12 bis 16 zeigen beispielhaft fünf verschiedene Möglichkeiten.

15 Gemäß der in Figur 12 dargestellten Option steht ein Endbereich des Graphenfilms 16, 16a, 16b mit einem Abschnitt der Unterseite des Kontaktelementes 19 in Kontakt. Das Kontaktelement 19 besteht hier zweckmäßiger Weise aus einem für Graphen optimierten Metall, beispielsweise Nickel und/oder Titan und/oder Aluminium und/oder Kupfer und/oder Chrom
20 und/oder Palladium und/oder Platin und/oder Gold und/oder Silber.

Das in Figur 13 dargestellte Beispiel unterscheidet sich von der Anordnung gemäß Figur 10 nur dadurch, dass das Kontaktelement 19 nicht nur eine sondern zwei Metalllagen 19a, 19b umfasst, wodurch eine bessere Performance für einen weiteren Anschluss erzielt werden kann, da die obere Lage 19b aus einem für einen weiteren Anschluss optimierten Metall bestehen kann. Die untere Lage 19a, die mit dem Graphenfilm 16, 16a, 16b in Kontakt steht, besteht zweckmäßiger Weise wiederum aus einem für Graphen optimierten Metall. Vorzugsweise besteht die Lage 19a aus Nickel und die Lage
25 19b aus Aluminium oder die Lage 19a aus Titan und die Lage 19b aus Alu-
30

minium. Andere Kombinationen aus Nickel und/oder Titan und/oder Aluminium und/oder Kupfer und/oder Chrom und/oder Palladium und/oder Platin und/oder Gold und/oder Silber sind ebenfalls möglich, dies sowohl für aktive Elemente mit oder aus Graphen als auch mit oder aus anderen elektro-optisch aktiven Materialien.

Bei dem in Figur 14 dargestellten Beispiel umfasst das Kontaktelement 19 noch eine dritte, untere Metalllage 19c, die als Haftvermittler dient. Diese Lage 19c kann beispielsweise aus Titan oder Chrom oder Aluminiumoxid bestehen. Die Lage 19a besteht beispielsweise aus Nickel und/oder Titan und/oder Aluminium und/oder Kupfer und/oder Chrom und/oder Palladium und/oder Platin und/oder Gold und/oder Silber. Die Lage 19b kann ebenfalls aus einem dieser Metalle bzw. einer Kombination dieser bestehen.

Bei den Ausführungsbeispielen gemäß den Figuren 15 und 16 erstreckt sich ein Endbereich des aktiven Elementes, vorliegend Graphenfilms 16, 16a, 16b zwischen einer ersten, unteren, für Graphen optimierten Metalllage 19a und einer zweiten, oberen, ebenfalls für Graphen optimierten Metalllage 19d des Kontaktelementes 19. Der Endbereich des aktiven Elementes 16 zeichnet sich hierfür durch einen S-förmigen Querschnitt aus. Die beiden Lagen 19a und 19d bestehen bevorzugt aus Palladium oder Nickel oder Gold, oder Platin oder aus einer Kombination aus Nickel und/oder Titan und/oder Aluminium und/oder Kupfer und/oder Chrom und/oder Palladium und/oder Platin und/oder Gold und/oder Silber.

Das Beispiel aus Figur 16 unterscheidet sich von demjenigen aus Figur 15 nur dadurch, dass das Kontaktelement 19 in Analogie zu Figur 14 eine dritte Metalllage 19b umfasst, die für einen weiteren Anschluss optimiert ist und beispielsweise wie die Lage 19b aus Figur 13 aus Aluminium bestehen kann.

Für alle Beispiele der Kontaktierung gilt, dass der Graphenfilm 16 von dem Kontaktelement 19 bzw. einer Lage 19a bis 19d dieses überdeckt werden kann, so dass der Strom in einem vertikalen Übergang flächig von dem Kontaktelement 19 bzw. einer Lage dieses in das Graphen übergeht (Topkontakt), oder der Graphenfilm 16 auch an der Kante des Kontaktelementes 19 bzw. einer Lage 19a-19d dieses enden kann, so dass der Strom seitlich in den Graphenfilm 16 übergeht (Seitenkontakt). Beispielsweise kann auch die Anordnung gemäß Figur 13 als Topkontakt ausgestaltet sein.

10 Bevorzugt oberhalb jedes aktiven Elementes, vorliegend also bevorzugt oberhalb jedes der Graphenfilme 16 ist eine Passivierungsschicht 25 vorgesehen. Diese ist nur in den Figuren 12 bis 16 zu erkennen, die jeweils einen Abschnitt eines Graphenfilms 16, 16a, 16b in vergrößerter Darstellung zeigen. Die Passivierungsschicht 25 ist vorliegend aus Aluminiumoxid. Alternativ oder zusätzlich dazu kann eine solche Passivierungsschicht 25 auch
15 Dichalkogenide und/oder Dichalkogenid-Heterostrukturen und/oder SiO_2 und/oder Bornitrid umfassen oder daraus bestehen. Die Passivierungsschicht 25 passiviert die aktiven Elemente, vorliegend die Graphenfilme und dient gleichzeitig als Ätzstoppschicht, so dass ein selektives Ätzen der Kontaktelemente 19 zur Verbindung mit den VIAs 7 möglich wird.
20

Es sei angemerkt, dass im Falle eines Modulators 15 die zwischen den beiden aktiven Elementen 16a, 16b vorgesehene dielektrische Schicht 17 (vgl. Figur 8) bereits der Passivierung des unteren Elementes 16b dienen kann.
25 Diesem muss dann nicht auch noch eine Passivierungsschicht 25 zugeordnet sein.

Weiterhin sei angemerkt, dass auch wenn bei den Beispielen gemäß den Figuren 12 bis 16 die aktiven Elemente 16, 16a, 16b durch Graphenfilme gegeben sind, die gezeigten Ausgestaltungen keineswegs auf dieses Materi-
30

al beschränkt sind. Auch für aktive Elemente 16 mit bzw. aus einem oder mehreren anderen Materialien kann die Kontaktierung entsprechend ausgestaltet sein.

- 5 Ausführungsbeispiele von Photodetektoren 15 bzw. Modulatoren 15 mit aktiven Elementen ohne Graphen sind in den Figuren 17 bis 20 gezeigt.

Dabei umfasst das Ausführungsbeispiel aus Figur 17 ein aktives Element 16, das von einer Schicht polykristallinem Silizium gebildet wird, die gleichzeitig
10 den Wellenleiter 12 bildet. Wie man erkennt, weist die Siliziumschicht 16 die Form eines Rippenwellenleiters mit T-förmigem Querschnitt auf. Die das aktive Element 16 und den Wellenleiter 12 bildenden Siliziumschicht hat vorliegend zwei dotierte Bereiche, nämlich einen p-dotierten Bereich 16p und einen n-dotierten Bereich 16n. Es sei angemerkt, dass alternativ auch ein
15 pin-Übergang vorliegen könnte, zwischen dem p- und dem n-dotierten Bereich also auch ein undotierter Bereich liegen könnte. Die Siliziumschicht 6 ist, wie die aktiven Elemente 16 der Beispiele aus den Figuren 2 und 4 bis 7 mit zwei Kontaktelementen 19 verbunden. Je nach Polarität einer angelegten Spannung ändert sich die Ladungsträgerkonzentration im Bereich der
20 Sperrschicht und damit auch die Absorption und der Brechungsindex des Wellenleiters 12. Man kann auch sagen, dass der Wellenleiter 12 hier als Diode ausgeführt ist, um einen Modulator zu erhalten.

Die Figur 18 zeigt ein weiteres Beispiel eines Siliziummodulators, der auch
25 unter dem SISCAP bekannt ist (vgl. auch die Publikation "An efficient MOS-capacitor based silicon modulator and CMOS drivers for optical transmitters," von M. Webster et al., 11th International Conference on Group IV Photonics (GFP), Paris, 2014, pp. 1-2. doi: 10.1109/Group4.2014.6961998). Hier sind zwei aktive Elemente 16a, 16b vorgesehen, die jeweils durch eine
30 Siliziumschicht gebildet werden, bevorzugt aus kristallinem Silizium oder Po-

lysilizium oder amorphem Silizium. Dabei ist das aktive Element 14a p- und das Element 16b n-dotiert. Die aktiven Elemente 16a, 16b sind ferner derart versetzt zueinander angeordnet, dass sie in einem Überlappungsbereich übereinanderliegen, dies in Analogie mit den aktiven Elementen 16 der Beispiel aus den Figuren 8, 10 und 11. Der Bereich der Überlappung bildet hier den Wellenleiter 12. Die Ladungsträgerkonzentration kann in diesem Bereich eingestellt werden und damit die optischen Eigenschaften des Wellenleiters 12.

Die Figur 19 zeigt ein weiteres Beispiel eines Silizium-Modulators 15. Dieser umfasst ebenfalls zwei aktive Elemente 16a, 16b, die durch Siliziumschichten gebildet werden, die p- bzw. n-dotiert sind. Diese liegen in einer Ebene nebeneinander und zwischen diesen ist ein Element aus einem elektro-optischen Polymer 26 vorgesehen. Die beiden aktiven Elemente 16a, 16b und das Element 29 aus einem elektro-optischen Polymer bilden einen Rippenwellenleiter 12 mit einem – von dem Element 26 gebildeten Spalt. Die Seitenwände des Spalts dienen hier mit anderen Worten als Elektroden einer Kapazität. Das Elektrische Feld im Spalt beeinflusst die optischen Eigenschaften des Polymers und ermöglicht eine Modulation eines optischen Signals.

In der Figur 20 ist ein Beispiel eines Modulators mit einer Diode 27 aus Verbindungshalbleitern gezeigt. Die Diode 27 besteht aus Schichten 27a bis 27d unterschiedlicher Zusammensetzung von Beispielsweise InGaAsP, um einen pn-Übergang und zwei Kontaktgebiete zu erzeugen. Die Kontaktgebiete sind mittels Elektroden 28 an die Kontaktelemente 19 und somit an integrierte Elektronische Bauteile 4 angeschlossen.

Die oder wenigstens eine elektro-optische Einrichtung – sowohl im Falle eines Modulators 15 als auch im Falle eines Detektors 15 - kann ferner als

solche mit plasmonischer Kopplung ausgebildet sein bzw. hergestellt werden.

Entsprechende Beispiele finden sich – jeweils in rein schematischer Aufsicht
5 - in den Figuren 21 bis 23.

Dabei zeigt die Figur 21 ein Beispiel eines Photodetektors 15, bei dem eine plasmonische Struktur 29 aus oder mit einem plasmonisch aktiven Material vorgesehen ist, konkret auf dem aktiven Element 16. Die plasmonische
10 Struktur 29 umfasst bei dem Beispiel drei Paare nebeneinander angeordneten plasmonischen Elemente 30 aus oder mit dem plasmonisch aktiven Material. Vorliegend bestehen die plasmonischen Elemente aus Gold. Als weitere geeignete Materialbeispiele seien Silber und/oder Aluminium und/oder Kupfer genannt. Die plasmonischen Elemente 30 bilden quasi Antennen auf
15 dem Wellenleiter 12 zur Erhöhung der Absorption (vgl. auch Ma et al., “Plasmonically Enhanced Graphene Photodetector Featuring 100 Gbit/s Data Reception, High Responsivity, and Compact Size”, ACS Photonics 2019, 6, Seiten 154 bis 161 (2018)). Eine solche plasmonische Struktur kann beispielsweise auf dem aktiven Element 16 einer Anordnung gemäß den Figu-
20 ren 2, 4 oder 5 vorgesehen sein bzw. werden.

Die Figur 22 zeigt ein Beispiel eines Photodetektors 15, bei dem kein Wellenleiter 12 bzw. Abschnitt eines solchen unter- oder oberhalb des aktiven Elementes 16 vorgesehen ist, sondern bei dem bevorzugt in einer Ebene mit
25 dem aktiven Element 16 und seitlich dieses ein Wellenleiter 12 vorgesehen ist, der einen sich V-förmig in Richtung des aktiven Elementes 16 verjüngenden Abschnitt 31 aufweist. Der Abschnitt 31 läuft in einer Spitze aus, die sich bis an die in Figur 22 linke Seite des aktiven Elementes 16, beispielsweise Graphenfilms, erstreckt. Wie man erkennt, umfassen die Kontaktele-
30 mente 19 hier Abschnitte 19e, die sich entgegengesetzter Richtung, also in

der Richtung weg vom aktiven Element 16 verjüngen. Die Kontaktelemente 19 folgen sozusagen abschnittsweise dem sich verjüngenden Endabschnitt 31 des Wellenleiters 12, was die plasmonische Kopplung ermöglicht.

- 5 Die Figur 23 zeigt einen analogen Modulator 15 mit plasmonischer Kopplung. Wie man erkennt sind hier zu zwei gegenüberliegenden Seiten des aktiven Elementes 16, etwa Graphenfilms, sich in dessen Richtung V-förmig verjüngende Wellenleiteranschnitte 31 vorgesehen und für beide zugehörige sich in umgekehrter Richtung verjüngende Abschnitte 19e der Kontaktelemente 19. Hier ist somit eine Kopplung einer optischen zu einer plasmonischen und wieder zurück zu einer optischen Mode möglich. Insbesondere bei dieser Ausführungsform kann ferner vorgesehen, dass das aktive Element wenigstens einen elektro-optischen Polymer umfasst bzw. daraus besteht (vgl. auch die Publikation „ Silicon-Organic Hybrid (SOH) and Plasmonic-Organic Hybrid (POH) Integration“, von Koos et al., Journal of Lightwave Technology, Vol. 34, No. 2, 2016).
- 10
15

- Die auf dem Wafer 1 einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung hergestellte photonische Plattform 8 wird in der Regel eine sehr große Anzahl elektro-optischer Einrichtungen 15 umfassen, die insbesondere durch Photodetektoren und/oder Modulatoren gegeben sein können. Dies ist auch bei dem dargestellten Ausführungsbeispiel der Fall. Insbesondere wird bereits jeder Abschnitt der photonischen Plattform 8, der sich oberhalb eines Chipbereiches 4 des Wafers 1 erstreckt, eine Mehrzahl elektro-optischer Einrichtungen 15 und eine Mehrzahl von Wellenleitern 12 umfassen. Beispielsweise können in jedem sich oberhalb eines Chipbereichs 4 erstreckenden Abschnitt der photonischen Plattform 8 jeweils bereits mehrere zehn, mehrere hundert oder auch mehrere tausend elektro-optische Einrichtungen 15 und/oder Wellenleiter 12 vorgesehen sein. Die Anzahl kann jeweils für den konkreten Anwendungsfall gewählt werden.
- 20
25
30

Bei den dargestellten Ausführungsbeispielen erfindungsgemäßer Halbleitervorrichtungen sind jeweils alle elektro-optischen Einrichtungen 15 und Wellenleiter 12 der photonischen Plattform 8 baugleich. Die Übereinstimmung ermöglicht dabei eine besonders einfache, zügige Herstellung. Es sei jedoch betont, dass es selbstverständlich auch möglich ist, dass eine erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung verschiedene der in den Figuren 2, 4 bis 8, 10, 11, und/oder 17 bis 23 dargestellten Beispiele umfasst, etwa sowohl Detektoren 15 mit darunterliegenden Wellenleitern 12 gemäß Figur 2 als auch Modulatoren 15 und Wellenleiter 12 gemäß Figur 8. Es können auch mehr als zwei verschiedene der Beispiele gemäß den Figuren 2, 4 bis 8, 10, 11 und/oder 17 bis 23 vorhanden sein, beispielsweise auch alle jeweils ein oder mehrmals.

Um sowohl Anordnungen mit einer weiteren Planarisierungsschicht 13 (vgl. z.B. die Figuren 2, 4 und 8) als auch Anordnungen ohne eine solche (vgl. z.B. die Figuren 5, 10 und 11) in einer photonischen Plattform 8 realisieren zu können, kann vorgesehen sein, dass nach der bevorzugt flächigen Herstellung der weitere Planarisierungsschicht 13 diese abschnittsweise, etwa durch Lithographie und anschließendes Ätzen, wieder entfernt wird, dies überall dort, wo eine Anordnungen ohne weitere Planarisierungsschicht gewünscht ist. Für andere Schichten, die nur an einigen Stellen jedoch nicht überall gewünscht sind, kann völlig analog vorgegangen werden bzw. worden sein.

Das bzw. die aktiven Elemente 16, 16a, 16b jeder elektro-optischen Einrichtung können auf eine der in den Figuren 12 bis 16 dargestellten Weisen mit einem, im Falle der Detektoren zwei Kontaktelementen 19 elektrisch leitfähig verbunden sein. Es ist möglich, dass sämtliche aktiven Elemente 16, 16a, 16b einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung auf die gleiche Weise mit

Kontaktelementen 19 kontaktiert sind. Alternativ dazu ist es natürlich auch möglich, dass verschiedene aktive Elemente 16 einer Vorrichtung auf verschiedene Weisen kontaktiert sind.

- 5 In den Figuren 3 und 9 sind neben dem bzw. den aktiven Elementen 16, 16a, 16b, den Wellenleitern 12 und Kontaktelementen 19 noch Koppeleinrichtungen 32 der photonischen Plattform 8 schematisch angedeutet, die der Einkopplung von Licht in den bzw. der Auskopplung von Licht aus dem Wellenleiter 12 dienen. Von diesen ist hier jeweils eines an gegenüberliegenden
10 Enden des jeweiligen Wellenleiters 12 angeordnet. Die Koppeleinrichtungen 32 sind vorliegend jeweils als Seiten- oder Gitterkoppeleinrichtungen ausgebildet. Die Figuren 24 bis 27 zeigen rein schematische Darstellungen von Beispielen solcher. Dabei ist in den Figuren 24 und 25 eine Seitenkoppeleinrichtung 32 in der Aufsicht und im Schnitt gezeigt und in den Figuren 26 und
15 27 eine Gitterkoppeleinrichtung 32 in der Aufsicht und im Schnitt.

- Es kann sein, dass mehreren, ggf. auch jedem der Wellenleiter 12 der photonischen Plattform 8 eine Koppeleinrichtung 32 zugeordnet ist bzw. zwei Koppeleinrichtungen 32 zugeordnet sind. Einem Wellenleiter 12 sind bzw.
20 werden insbesondere in dem Falle zwei Koppeleinrichtungen 32 zugeordnet, wenn Licht ein- und ausgekoppelt werden soll. Es ist aber auch möglich, dass nur ein ggf. auch erstmaliges Einkoppeln gewünscht ist. Dann kann eine Koppeleinrichtung 32 ausreichen.

- 25 Das in den Figuren 24 und 25 gezeigte Beispiel der Seitenkoppeleinrichtung 32 umfasst ein Seitenkoppelement 33 bestehend vorzugsweise aus Harzen bzw. Harz enthaltende Materialien, insbesondere SU8, oder/und Siliziumnitrid, oder/und Siliziumoxynitrid oder Dielektrika, deren Brechungsindex zwischen dem des Wellenleiters 12 (insbesondere $n = 2,4$) und dem des als
30 Modenfeldkonverters dienen Element 33 (SU8 $n = 1,56$) liegt, wie zum Bei-

spiel Aluminiumoxid ($n = 1,68$). Dieses zeichnet sich, wie man erkennt, sowohl durch eine Breite b als Höhe h aus, die die Ausdehnung des Wellenleiters 12 in entsprechenden Richtungen überschreitet, vorliegend jeweils einem Mehrfachen dieser entspricht. Die Seitenkoppereinrichtung 32 umfasst
5 ferner einen sich in das Seitenkoppелеlement erstreckenden Endbereich 34 des Wellenleiters 12, der sich, wie man in der Figur 24 gut erkennen kann, in Richtung seines Endes konisch verjüngt. Es sei angemerkt, dass in Figur 24 die Außenkontur des sich verjüngenden Abschnitts 34 mit dünner Linie angedeutet ist, da dieser in der Aufsicht von einem Abschnitt des Elementes 33
10 verdeckt ist. Das Element 33 bewirkt eine Anpassung des Modenfeldes vom Durchmesser einer Glasfaser (beispielsweise $5\text{ }\mu\text{m}$ bis $15\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser) auf die Größe des Wellenleiters 12 (beispielsweise 300 nm Höhe, $1,1\text{ }\mu\text{m}$ Breite). Die auslaufende Spitze 34 des Wellenleiters 12 bewirkt eine adiabatische Anpassung des effektiven Brechungsindex im Bereich des Modenfeldes, so dass die optische Mode von der Koppelstruktur zunehmend in den
15 Wellenleiter 12 überführt wird.

Die Gitterkoppereinrichtung 32 wird, wie man der Aufsicht aus Figur 26 entnehmen kann, durch einen Endabschnitt 35 des Wellenleiters 12 gebildet,
20 der sich zum Ende hin konisch verbreitert und, wie auch der Schnitt aus Figur 27 gut zeigt, an seiner von dem Wafer 5 abgewandten Seite eine Gitterstruktur 36 aufweist. Durch diese Aufweitung wird die Dimension des Wellenleiters 12 (beispielsweise 300 nm Höhe, $1,1\text{ }\mu\text{m}$ Breite) auf den Durchmesser des Modenfeldes in einer Glasfaser (beispielsweise $5\text{ }\mu\text{m}$ bis $15\text{ }\mu\text{m}$)
25 angepasst und so die Koppeffizienz gesteigert. In der Aufsicht gemäß Figur 26 ist die Gitterstruktur 36 nur vereinfacht durch mehrere parallele Linien angedeutet. Durch die gitterartige Anordnung von Brechungsindexstufen wird das einfallende Licht gebeugt. Die Abmessungen des Gitters sind zweckmäßiger Weise so berechnet, dass unter einem gegebenen Einfallswinkel die

erste Beugungsordnung im Wellenleiter 12 liegt und so das Licht in den Wellenleiter 12 eingekoppelt wird.

Die Koppeleinrichtungen 32 liegen in einer Ebene mit dem jeweiligen Wellenleiter 12, befinden sich vorliegend also auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite 11 der Planarisierungsschicht 10.

Auch die Wellenleiter 12, die in den Teilansichten umfassenden Figuren 21 bis 23 nur abschnittsweise gezeigt sind, können an ihren nicht erkennbaren Enden mit einer Koppeleinrichtung 32 versehen sein.

Neben den elektro-optischen Einrichtungen 15 kann die photonische Plattform 8 auch noch eine oder mehrere optische Einrichtungen umfassen. Hierbei kann es sich beispielsweise um eines oder mehrere Interferometer, etwa Mach-Zehnder-Interferometer, und/oder MMIs und/oder directionale Koppler und/oder Ringresonatoren und/oder Polarisationskonverter und/oder Splitter handeln. Die optischen Einrichtungen werden in der Regel durch mehrere Abschnitte von Wellenleitern 12 gebildet, die dann entsprechend angeordnet sind. Sie stellen insbesondere passive Strukturen aus Wellenleitern 12 bzw. Wellenleiterlängsabschnitten dar. Ein Abschnitt, insbesondere Abschnitt in Längsrichtung, also Längsabschnitt eines Wellenleiters 12, beispielsweise der in den Figuren 2, 4 bis 11 zu erkennenden Wellenleiter 12, kann jeweils Bestandteil einer solchen optischen Einrichtung sein, konkret ein Abschnitt, der in senkrecht zur Zeichenebene orientierter Richtung vor oder hinter der elektro-optischen Einrichtung 15 liegt.

Auch ist es möglich, dass die photonische Plattform 8 eine oder mehrere thermo-optische Einrichtungen aufweist. Eine solche umfasst beispielsweise ein Heizelement und einen Längsabschnitt eines Wellenleiters 12, wobei das Heizelement derart relativ zu dem Wellenleiterabschnitt angeordnet ist, dass

es dieses erwärmen kann. Durch eine Erwärmung des Wellenleiters 12 mittels des Heizelementes kann der Brechungsindex des Wellenleiters 12 in dem Längsabschnitt verändert werden. Dieser Effekt kann beispielsweise zur Phasenanpassung genutzt werden. Eine thermo-optische Einrichtung kann
5 auch einem Interferometer der photonischen Plattform zugeordnet sein bzw. einen Teil eines solchen bilden. Ein Längsabschnitt des in den Figuren 2, 4 bis 11 zu erkennenden Wellenleiters 12 kann beispielsweise jeweils Bestandteil einer thermo-optischen Einrichtung sein, wiederum ein Abschnitt, der in senkrecht zur Zeichenebene orientierter Richtung vor oder hinter der
10 elektro-optischen Einrichtung 15 liegt.

Die photonische Plattform 8 umfasst weiterhin noch eine Passivierungsschicht 37, die sich oberhalb der elektro-optischen Einrichtungen 15 erstreckt und bevorzugt den oberseitigen Abschluss der photonischen Plattform 8 und
15 der Halbleitervorrichtung (vgl. Figur 1) bildet. Die Passivierung 37 stellt gleichzeitig ein Cladding dar. Es sei angemerkt, dass die Passivierungsschicht 37 in den Aufsichten gemäß den Figuren 3 und 9 nicht gezeigt ist, sondern nur die darunterliegenden Einrichtungen 15.

20 Zum Erhalt der in Figur 1 dargestellten Halbleitervorrichtung wird in einem ersten Schritt S1 (vgl. Figur 28) der Wafer 1 mit den die integrierten elektronischen Bauteilen 3 und die Metallisierung einschließlich der VIAs 7 umfassenden integrierten Schaltungen bereitgestellt. Bei dem Wafer 1 kann es sich
25 um einen beliebigen Wafer 1 konventioneller Art handeln, der durch ein vorbekanntes Herstellungsverfahren erhalten wurde.

Anschließend wird die photonische Plattform 8 auf dem BEOL 6 des Wafers 1 hergestellt.

Konkret wird in einem zweiten Schritt S2 die Planarisierungsschicht 10 auf dem Back-End-of-Line 6 des Wafers 1 hergestellt. Hierfür wird ein Beschichtungsmaterial, vorliegend Siliziumdioxid (SiO_2), aufgebracht, was beispielsweise durch chemische Gasphasenabscheidung, etwa Niederdruck chemische Gasphasenabscheidung (LPCVD) oder plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD), oder physikalische Gasphasenabscheidung oder auch durch Aufschleudern von Spin-on-Glas erfolgen kann. Vorliegend kommt PECVD zum Einsatz. Nachdem das Beschichtungsmaterial deponiert wurde, wird die von dem Wafer 5 abgewandte Seite der erhaltenen Beschichtung einer Planarisierungsbehandlung unterzogen (Schritt S3), vorliegend einer Resistplanarisierung, wodurch eine von dem Wafer 5 abgewandte Seite 11 mit einer Rauheit von 0,2 nm RMS erhalten wird.

Die Resistplanarisierung schließt dabei ein einmaliges oder wiederholtes Spin-on-Glass-Aufschleudern und anschließendes Ätzen, vorliegend reaktives Ionenätzen (RIE), ein. Die Spin-on-Glass-Schicht gleicht teilweise die Höhenunterschiede aus, d.h. Täler der Topologie weisen nach der Spin-on-Glass-Beschichtung eine höhere Schichtdicke auf als benachbarte Erhöhungen. Wird nach der Spin-on-Glass-Beschichtung die gesamte Spin-on-Glass-Schicht, etwa per RIE geätzt, hat sich der Höhenunterschied wegen der planarisierenden Wirkung der Spin-on-Glass-Schicht reduziert. Durch Wiederholung kann der Höhenunterschied weiter reduziert werden, bis die gewünschte Rauheit erhalten ist.

Es sei angemerkt, dass eine von dem Wafer 5 abgewandte Seite 11 der Planarisierungsschicht 10 entsprechend geringer Rauheit alternativ beispielsweise auch über chemisch-mechanisches Polieren (CMP) erhalten werden kann.

In einem nächsten Schritt S4 werden die Wellenleiter hergestellt. Hierfür wird Wellenleitermaterial, vorliegend Titandioxid (TiO_2), abgeschieden, dies insbesondere flächig über die gesamte Seite 11 der erhaltenen Planarisierungsschicht 10. Die Aufbringung kann genau wie bei der Planarisierungsschicht durch PVD oder CVD, insbesondere PECVD oder LPCVD, oder
5 durch Aufschleudern erfolgen. Es kann auch eine Atomlagenabscheidung (ALD) durchgeführt werden oder ein Transfer-Printverfahren. Vorliegend kommt in Analogie zur Planarisierungsschicht 10 LPCVD zum Einsatz. Es erfolgt eine Lithographie und eine Strukturierung insbesondere mittels reaktivem Ionenätzen (RIE), um die einzelnen Wellenleiter 12 zu erhalten.
10

Zum Erhalt der Streifenwellenleiter 12 (vgl. z.B. die Figuren 3 und 8) wird dabei überall dort, wo kein Streifenwellenleiter 12 stehen bleiben soll, das Wellenleitermaterial komplett entfernt, mit anderen Worten bis zur darunter
15 liegenden Schicht 10 geätzt.

Die Koppereinrichtungen 32 einschließlich deren Wellenleiterenden 34, 35 gehören (vgl. die Figuren 3, 9 und 24 bis 27) werden vorliegend gemeinsam mit den Rippen- oder Streifenwellenleitern 12 hergestellt, wobei für den Fall
20 von Rippenwellenleitern 12 die seitliche Erweiterung des Wellenleiters 12 im Bereich der Koppelstelle trockenchemisch in einem separaten Ätzschritt entfernt werden kann. Wellenleiter 12, die aus übereinander angeordneten Schichten bestehen, können nach Fertigstellung des Schichtaufbaus mit der obersten Schicht 12a strukturiert werden, wobei für den Fall von Rippenwellenleitern 12 die seitliche Erweiterung des Wellenleiters im Bereich der Koppelstelle trockenchemisch in einem separaten Ätzschritt entfernt werden
25 kann. In allen Fällen können Modenkonverter zwischen Rippen- und Streifenwellenleitern 12 definiert werden und Teilbereiche der Rippenwellenleiter 12 mittels Lithografie und RIE als Streifenwellenleiter 12 ausgebildet werden.

30

Gitterkoppler 32 mit Gitterstrukturen 36 können lithografisch definiert und trockenchemisch strukturiert werden.

Für Seitenkoppелеlemente (Modenkonverter) 33 werden ein oder mehrlagig
5 Dielektrika und/oder Halbleiter und/oder Harze und/oder Polymere abgeschieden und mittels Lithographie oder/ und RIE strukturiert.

In einem nächsten Schritt S5 wird die weitere Planarisierungsschicht 13 auf den Wellenleitern 12 und der Seite 11 der Planarisierungsschicht 10 hergestellt. Diese wird vorliegend völlig analog zu der Planarisierungsschicht 10
10 durch Abscheidung mittels PECVD und Resistplanarisierung erhalten. Infolge der Resistplanarisierung ergibt sich der im Querschnitt trapezförmige Abschnitt der weiteren Planarisierungsschicht 13 oberhalb des Wellenleiters 12 (vgl. Figur 2).

15 Auch bezüglich der weiteren Planarisierungsschicht 13 gilt, dass alternativ zu LPCVD und CMP andere der vorstehend genannten Verfahren zum Einsatz kommen können und eine andere Planarisierungsbehandlung, etwa CMP, und/oder weitere Planarisierung möglich ist, wie vorstehend für die Planarisierungsschicht 10 beschrieben. Kommt CMP zum Einsatz, wird in der Regel
20 eine ebene Oberfläche erhalten, das heißt, dann liegt kein trapezförmiger Abschnitt oberhalb des Wellenleiters 12 vor, wie er in Figur 2 (und etwa auch den Figuren 4 und 9) zu erkennen ist.

25 Die Planarisierungsschicht 10 und weitere Planarisierungsschicht 13 können eine oder mehrere Decklagen umfassen, die bevorzugt auf der der Planarisierungsbehandlung unterzogenen Oberfläche vorgesehene sind bzw. werden und bei denen es sich beispielsweise um Dichalkogenidlagen oder Dichalkogenid-Heterostrukturen oder auch Bornitridlagen handeln kann.
30 Diese Materialien werden bevorzugt abgeschieden oder transferiert ohne das

es eines weiteren chemisch-mechanischen Polierens oder weiteren Resist-planarisierens bedarf, wobei auch nicht ausgeschlossen ist, dass dies nochmals erfolgt.

- 5 Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass für den Fall, dass eine erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung auch Bereiche ohne weitere Planarisierungsschicht 13 aufweisen soll, etwa auch Bereiche, in denen der Aufbau demjenigen gemäß den Figuren 5, 10 oder 11 entspricht, die weitere Planarisierungsschicht 13 (und gegebenenfalls darauf befindliche Schichten) anschließend partiell insbesondere durch Lithographie und ätzen wieder entfernt wird.

- In Schritt S6 werden die VIAs 7 durch die Planarisierungsschicht 10 und die weitere Planarisierungsschicht 13 hergestellt. Dies kann prinzipiell auf beliebige aus dem Stand der Technik vorbekannte Weise erfolgen. Insbesondere werden zunächst die Bereiche, in welchen sich diese erstrecken sollen bevorzugt durch Lithographie definiert und mittels RIE trockenchemisch geätzt. Danach wird metallisiert und die metallisierte Oberfläche beispielsweise mittels CMP (Damascene-Prozess) oder mittels Lithografie und RIE strukturiert.
- 20 Es ist sowohl möglich, dass die VIAs 7 nach der Fertigstellung der weiteren Planarisierungsschicht 13 durch beide Planarisierungsschichten 10, 13 hergestellt werden oder auch nach Fertigstellung der ersten Schicht 10 Abschnitte dieser durch die erste Planarisierungsschicht 10 und nach Fertigstellung der Zweiten 13 Abschnitte dieser durch die zweite Schicht 13.

- 25 Anschließend werden die elektro-optischen Einrichtungen 15 hergestellt.

- Hierfür werden in Schritt S7 die jeweils durch den Graphenfilm 16 gegebenen aktiven Elemente der Detektoren auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite 14 der weiteren Planarisierungsschicht 13 vorgesehen, beispielsweise
- 30

auf der Seite 14 deponiert, und anschließend in Schritt S8 die Kontaktelemente 19 (ein oder mehrlagig) erhalten.

Die Deponierung der Graphenfilme 16 kann beispielsweise über ein Transferverfahren erfolgen, wie es weiter oben näher beschrieben ist. Dann wird insbesondere jeweils ein auf einem separaten Substrat bzw. einer separaten Metallfolie bzw. einem separaten Germaniumwafer hergestellter Graphenfilm auf die weitere Planarisierungsschicht 13 übertragen. Es ist auch möglich, dass die Graphenfilme direkt auf der weiteren Planarisierungsschicht 13 hergestellt werden. Dies kann beispielsweise eine Materialabscheidung einschließen.

Kommt ein Transferverfahren zum Einsatz, ist es möglich, dass auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite des jeweiligen Graphenfilms 16 bereits die Passivierungsschicht 25 vorgesehen ist, diese etwa darauf abgeschieden oder deponiert wurde, und dann mit diesem transferiert wird. Alternativ dazu kann die Passivierungsschicht 25 auch nach dem Transferieren bzw. Herstellen des Graphenfilms 16 bzw. der Graphenfilme 16 abgeschieden bzw. deponiert werden.

Es auch ist möglich, dass zunächst ein vollflächiger Graphenfilm und/oder eine vollflächige Passivierungsschicht auf der weiteren Planarisierungsschicht 13 hergestellt wird, die sich über die gesamte Oberfläche der weiteren Planarisierungsschicht 13 erstrecken. In diesem Fall erfolgt dann noch eine Strukturierung, insbesondere durch Lithographie und RIE, um die einzelnen Graphenfilme 16 als aktive Elemente mehrerer elektro-optischer Einrichtungen 16 zu erhalten.

Die Kontaktelemente 19 bzw. deren Lagen 19a bis 19d werden anschließend hergestellt, bevorzugt, indem eine (Figur 12) oder mehrere Lagen (Figuren

13 bis 16) Metall vollflächig abgeschieden werden und dann eine Strukturierung mittels Lithographie und RIE erfolgt.

Auf die beschriebene Weise mit der Herstellungsreihenfolge erst die Graphenfilme 16 und dann Kontaktelemente 19 kann eine Kontaktierung erzielt werden, wie sie in den Figuren 12 bis 14 schematisch dargestellt ist.

Für die Kontaktierungsvarianten aus den Figuren 15 und 16 wird zunächst nur die untere Metalllage 19c bzw. 19a der Kontaktelemente 19 hergestellt, dann die Graphenfilme 16 und dann die weitere 19b, 19d bzw. die beiden weiteren Lagen 19a, 19b bzw. 19d, 19b. Dies kann ebenfalls über vollflächiges Abscheiden entsprechenden Metalls und anschließende Strukturierung mittels Lithographie und RIE erfolgen.

In einem vorletzten Schritt S9 wird die obere Passivierung 37 vorzugsweise aus Al_2O_3 und SiO_2 abgeschieden. In dieser werden dann zweckmäßiger Weise abschließend mittels Lithografie und RIE Öffnungen insbesondere zu Kontaktelementen hergestellt (Schritt S10). Es werden bevorzugt Öffnungen zu Kontaktelementen hergestellt, die der Verbindung der Photonik und/oder Elektronik nach außen dienen.

Über die vorstehend beschriebenen Schritte kann eine Halbleitervorrichtung mit Streifenwellenleitern 12 und elektro-optischen Einrichtungen 15 gemäß Figur 2 erhalten werden.

Soll eine Halbleitervorrichtung erhalten werden, die ausschließlich – oder auch zusätzlich – Bereiche aufweist, die wie in Figur 4 dargestellt aufgebaut sind, also Rippenwellenleiter 12 umfassen, muss lediglich der Schritt S4 dahingehend variiert werden, dass seitlich der Segmente 12a nur bis zu einer geringeren Tiefe geätzt wird, damit seitlich der Segmente 12a noch Wellen-

letermaterial stehen bleibt und die Segmente 12b, 12c erhalten werden, die die Streifenwellenleiter nicht aufweisen.

5 Zum Erhalt des Aufbaus gemäß Figur 5 muss lediglich die weitere Planarisierungsschicht 13 abschnittsweise wieder entfernt werden, bevor die Rippenwellenleiter 12 hergestellt werden. Soll eine Halbleitervorrichtung erhalten werden, die an keiner Stelle eine weitere Planarisierungsschicht 13 aufweist, kann auf deren Herstellung natürlich auch vollständig verzichtet werden.

10 Zum Erhalt des Beispiels aus Figur 6 wird auf der von dem Wafer abgewandten Seite der Planarisierungsschicht 10 zuerst das untere Wellenleitersegment 12c hergestellt, wobei die vorstehend beschriebenen Methoden, z.B. PECVD, zum Einsatz kommen können. Dann werden das aktive Element, vorliegend der Graphenfilm 16 und die Kontaktelemente 19 hergestellt, 15 wobei sich die Reihenfolge wieder danach richtet, welches der in den Figuren 12 bis 16 gezeigten Kontaktierungsschemata gewählt wird. Dann wird die Passivierungsschicht 25 auf dem Graphenfilm 16 hergestellt (nur in den Figuren 12 bis 16 zu erkennen) und dann die beiden Segmente 12b und 12a und die Schicht 37.

20 Zum Erhalt der Anordnung gemäß Figur 7 kann im Wesentlichen anlog vorgegangen werden, wobei lediglich der Schritt der Herstellung des Wellenleitersegmentes 12c wegfällt und der Graphenfilm 16 auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite 11 der Planarisierungsschicht 10 vorgesehen wird.

25 Auch für Herstellung einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung, welche einen oder mehrere Modulatoren 15 als elektro-optische Einrichtungen umfasst, unterscheidet sich die Vorgehensweise teilweise von derjenigen, die vorstehend im Zusammenhang mit Figur 2 beschrieben wurde.

30

Für das Beispiel gemäß Figur 8 beispielsweise kann bis zur Herstellung der weiteren Planarisierungsschicht 13 und den VIAs 7 durch die Planarisierungsschicht 10 und diese 13 prinzipiell gleich vorgegangen werden, die Schritte S1 bis S6 können also identisch sein.

5

Die Herstellung des bzw. des jeweiligen Modulators 15 umfasst dann jedoch, dass auf der weiteren Planarisierungsschicht 13 zunächst der eine, untere Graphenfilm 16a als eines der beiden aktiven Elemente vorgesehen und an dessen einem, in Figur 8 nach links weisenden Endbereich nur ein Kontaktelement 19 hergestellt wird. Die Herstellung kann genauso erfolgen, wie vorstehend im Zusammenhang mit Figur 2 für den einen Graphenfilm 16 und die beiden Kontaktelemente 19 beschrieben.

Anschließend wird die dielektrische Schicht 17 vorgesehen, beispielsweise durch Abscheidung vorzugsweise von Aluminiumoxid. Es ist auch möglich, dass die dielektrische Schicht 17 durch ein Transferverfahren vorgesehen wird.

Dann wird der zweite, obere Graphenfilm 16b hergestellt und das zweite Kontaktelement 19 an dessen in der Figur 6 nach rechts weisendem Endbereich. Die Herstellung kann wiederum genauso erfolgen, wie vorstehend im Zusammenhang mit Figur 2 für den einen Graphenfilm 16 und die beiden Kontaktelemente 19 beschrieben.

Dann können die vorstehend beschriebenen Schritte S8 und S9 folgen, um die obere Passivierung 37 und die Öffnungen darin zu erhalten.

Für den Aufbau gemäß Figur 10 können die Schritte S1 bis S6 ebenfalls identisch durchgeführt und dann die weitere Planarisierungsschicht 13 partiell wieder entfernt werden. Alternativ kann deren Herstellung, also der Schritt

30

S5 entfallen und in Schritt S6 Nur VIAs durch die Planarisierungsschicht 10 hergestellt werden.

5 Dann wird auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite 11 der Planarisierungsschicht 10 das Segment 12d, also die Wellenleiterbasis hergestellt, indem eine optisch transparente, vorzugsweise dielektische Schicht oder ein Halbleiter abgeschieden und mittels Lithographie und RIE strukturiert wird. Vorliegend wird TiO_2 abgeschieden.

10 Auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite der Wellenleiterbasis 12d wird der untere Graphenfilm 16a und anschließend das zu diesem gehörige Kontaktelement 19 hergestellt, darauf das Wellenleitersegment 12c, oberhalb dieses der obere Graphenfilm 16b mit zugehörigen Kontaktelement 19, darauf das Wellenleitersegment 12b und darauf das Wellenleitersegment 12a,
15 das sich durch eine deutlich geringere Breite auszeichnet als die weiteren Segmente 12b, 12c, 12d. Das Material für das Wellenleitersegment 12b kann beispielsweise mittels ALD oder durch eine mittels CVD oder Transfer erhaltenen Chalkogenidschicht und ALD, und/oder einer mittels PVD hergestellten Schicht dielektrischen oder halbleitenden Materials hergestellt und mit Litho-
20 grafie und RIE strukturiert werden. Im Anschluss wird das Segment 12a vorgesehen, wobei mittels ALD und/oder PVD und/oder PECVD und/oder LPCVD ein dielektrisches oder halbleitendes Material und/oder eine durch CVD oder Transfer erhaltenen Dichalkogenidschicht vorgesehen und unter Anwendung von Lithografie und RIE strukturiert wird.

25 Die Graphenfilme 16a, 16b und Kontaktelemente 19 können genauso hergestellt werden, wie vorstehend im Zusammenhang mit Figur 2 beschrieben.

Der obere Graphenfilm 16 erstreckt sich bei diesem Beispiel innerhalb des
30 Wellenleiters 12.

Abschließend können die Schritte S9 und S10 durchgeführt werden, wiederum, um die Passivierungsschicht 37 und Öffnungen in dieser zu erhalten.

- 5 Um die Anordnung gemäß Figur 11 zu erhalten kann überwiegend genauso vorgegangen werden, wie vorstehend im Zusammenhang mit Figur 10 beschrieben, mit dem einzigen Unterschied, dass die Herstellung des in Figur 10 untersten Wellenleitersegments 12d entfällt und der untere Graphenfilm 16a direkt auf der Seite 11 der Planarisierungsschicht 10 hergestellt wird.

10

- Zum Erhalt der Anordnung gemäß Figur 17 kann bis zur Fertigstellung der Planarisierungsschicht 10 (Schritte S1 bis S3) wieder gleich vorgegangen werden. Auf deren von dem Wafer 5 abgewandten Seite 11 wird dann die Siliziumschicht 16 als aktives Element hergestellt. Dies kann wiederum eine
- 15 Materialabscheidung, etwa über eines der vorgenannten Verfahren, beispielsweise ein CVD- oder PVD-Verfahren oder Aufschleudern, und eine anschließende Strukturierung (z.B. Lithographie und RIE) zum Erhalt der T-Form einschließen. Der erhaltene Rippenwellenleiter wird auf seiner einen Seite p- und auf seiner anderen Seite n-dotiert, um die Bereiche 16p und 16n
- 20 zu erhalten. Hierdurch wird der pn-Übergang erhalten. Dann können die Kontaktelemente 19 hergestellt werden.

- Für den in Figur 18 gezeigten Modulator 15, der als sogenannter SISCAP ausgebildet ist, können die Schritte S1 bis S3 wieder identisch sein und dann
- 25 werden die beiden jeweils ein aktives Element bildenden Siliziumschichten 16a und 16b hergestellt, was ebenfalls eine Materialabscheidung, etwa über eines der vorgenannten Verfahren, beispielsweise ein CVD- oder PVD-Verfahren oder Aufschleudern, und eine anschließende Strukturierung (z.B. Lithographie und RIE) einschließen kann, und die zugehörigen Kontaktelemente 19 hergestellt.
- 30

Für die Figur 19 kann prinzipiell vorgegangen werden, wie bei Figur 17, wobei dann zwischen den beiden Elementen 16a und 16b noch das Element 26 aus einem elektro-optischen Polymer hergestellt wird.

5

Zum Erhalt des Modulators 15 gemäß Figur 20 können die Schritte S1 bis S5 identisch sein, wie vorstehend im Zusammenhang mit Figur 2 beschrieben. Auf der von dem Wafer 5 abgewandten Seite 14 der weiteren Planarisierungsschicht 13 kann dann die erste Elektrode 28 mit zugehörigem Kontaktelement 19, dann die Diode 27 mit den Schichten 27a bis 27d und dann die
10 zweite Elektrode 28 mit zugehörigem Kontaktelement 19 hergestellt werden, wobei dies jeweils eine Materialabscheidung und anschließende Strukturierung einschließen kann.

15 Bei allen Beispielen aus den Figuren 17 bis 20 kann abschließend die Schicht 37 in Analogie zu den verbleibenden Beispielen hergestellt werden.

Wie man dem Vorstehenden entnehmen kann, wird die photonische Plattform 8 direkt auf dem BEOL 6 des Wafers 1 hergestellt. Man kann auch sagen, dass sie monolithisch auf dem Wafer 1 hergestellt wurde bzw. eine
20 monolithische Plattform 8 ist. Insbesondere die Schichten 10, 13, 37 und die Wellenleiter 12 werden direkt auf dem Wafer 1 hergestellt, indem jeweils entsprechendes Material auf das BEOL 6 des Wafers 1, bzw. darauf bereits hergestellte Schichten, aufgebracht wird. Es erfolgt keine separate Fertigung
25 der Schichten 10, 13, 37 bzw. Wellenleiter 12 und anschließende Verbindung durch Bonding.

Es sei angemerkt, dass die vorstehend beschriebenen Verfahren zur Herstellung erfindungsgemäßer Halbleitervorrichtungen Ausführungsbeispiele
30 des erfindungsgemäßen Verfahrens sind.

Nach der Fertigstellung einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung kann aus dieser auf einfache und schnelle Weise, konkret durch bloßes Dicen, mit anderen Worten Zerkleinern, eine Vielzahl von Chips mit integrierter Photonik
5 erhalten werden.

Bei der in Figur 1 dargestellten Halbleitervorrichtung kann ein Zerteilen, was beispielsweise ein (Laser-)Schneiden und/oder Sägen und/oder Brechen entlang der dargestellten, die Chipbereiche 4 definierenden Linien ein-
10 schließt, erfolgen. Das Dicen kann prinzipiell auf beliebige, aus dem Stand der Technik vorbekannte Weise erfolgen, insbesondere wie gemäß dem Stand der Technik bei herkömmlichen Wafers 1.

Die Figur 29 zeigt beispielhaft und rein schematisch drei durch ein solches
15 Dicen erhaltene Chips mit integrierter Photonik in der Aufsicht. Diese stellen Ausführungsbeispiele erfindungsgemäßer Halbleitereinrichtungen 38 dar. Jede dieser Halbleitereinrichtungen 38 umfasst einen Chip 39, dessen Ausdehnung einem Chipbereich 4 des Wafers 1 entspricht, und einen darüber liegenden Abschnitt 40 der photonischen Plattform 8, dessen laterale Aus-
20 dehnung aufgrund des Dicens zumindest im Wesentlichen mit der lateralen Ausdehnung des darunter liegenden Chips 39 übereinstimmt. Der Chip 39 und der darüber liegende Abschnitt 40 der photonischen Plattform 8 können der rein schematischen Schnittdarstellung aus Figur 30 entnommen werden.

25 Es sei angemerkt, dass in dieser stark vereinfachten Darstellung nur die beiden übereinander liegenden, durch den Chip 39 und die Photonik 40 definierten Bereiche angedeutet sind, jedoch keinen Schichten und Komponenten dieser.

Der Chip 39 umfasst u.a. eine Vielzahl von integrierten elektronischen Bauteilen 3, etwa Transistoren und/oder Kondensatoren und/oder Widerständen, die z.B. Teile eines Prozessors des Chips 39 sein können, und der Abschnitt 40 der photonischen Plattform 8 u.a. eine Vielzahl von elektro-optischen Einrichtungen 15, wie sie insbesondere den Figuren 2 bis 11, und 17 bis 23 entnommen werden können.

Die durch das Dienen einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung erhaltenen Halbleitereinrichtungen 38, die quasi jeweils einen Nacktchip mit monolithisch integrierter Photonik darstellen, können dann, wie es auch von herkömmlichen Nacktchips vorbekannt ist, in Gehäuse (englisch: Packages) eingesetzt und einer weiteren Nutzung zugeführt werden.

Der Abschnitt 40 der photonischen Plattform kann beispielsweise dazu dienen, elektrische Signale der integrierte elektrischen Bauteile des Chips 39 in optische Signal zu wandeln, so dass beispielsweise eine Kommunikation mit anderen Chips und/oder anderen integrierten elektronischen Bauteilen 4 des Einrichtung 38 auf optischem Wege erfolgen kann. Hierfür kann beispielsweise auf der einen Licht mit einem Modulator 15, der mit einem integrierten elektronischen Bauteil, etwa Transistor 4 gekoppelt ist, moduliert werden und das modulierte Lichtsignal kann beispielsweise von einem Photodetektor 15, der mit einem anderen integrierten elektronischen Bauteil, etwa Transistor 4 des gleichen oder eines anderen Chips verbunden ist, empfangen werden.