

Beschreibung

Elektro-optische Einrichtung, Halbleitereinrichtung und Halbleitervorrichtung, elektro-optische Anordnung und Verwendung

5

Die Erfindung betrifft eine Elektro-optische Einrichtung, insbesondere Photodetektor oder Modulator. Darüber hinaus betrifft die Erfindung eine Halbleitereinrichtung mit einem Chip und wenigstens einer elektro-optischen Einrichtung, eine Halbleitervorrichtung mit einem Wafer und wenigstens einer elektro-optischen Einrichtung, eine elektro-optische Anordnung und eine Verwendung.

Es sind elektro-optische Einrichtungen, beispielsweise Photodetektoren oder elektro-optische Modulatoren, aus dem Stand der Technik vorbekannt. Diese umfassen beispielsweise einen Wellenleiter bzw. einen Längsabschnitt eines solchen und - im Falle eines Photodetektors - einen bzw. – im Falle eines elektro-optischen Modulators - zwei Filme aus Graphen als aktive Elemente. Solche Einrichtungen sind beispielsweise in der US 9,893,219 B2 offenbart. Das bzw. die aktiven Elemente übergreifen den Wellenleiterlängsabschnitt. Man kann auch von Wellenleiter-integrierten Photodetektoren bzw. Modulatoren sprechen. Das bzw. die aktiven Elemente stehen mit seitlich des Wellenleiters angeordneten Kontaktelement in Kontakt, über die ein Anschluss zu weiteren Komponenten erzielt werden. Die Kontaktelemente können beispielsweise durch Filme oder Schichten aus Metall gegeben sein, über die eine elektrische Kopplung des bzw. der aktiven Elemente mit weiteren Komponenten möglich ist. Im Betrieb kann eine Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung, die durch den Wellenleiter geführt wird, und dem bzw. den Graphenfilmen erfolgen. Der Bereich, in dem der Graphenfilm bzw. die Graphenfilme den Wellenleiter übergreifen kann auch als Wechselwirkungsbereich aufgefasst und bezeichnet werden.

Aus dem Aufsatz „CMOS-compatible graphene photodetektor covering all optical communication bands“ von A. Pospischil et al., Nature Photonics, 15 (2013), Seiten 892 bis 896, ist ein weiterer Graphen-Photodetektor mit einem Wellenleiterlängsabschnitt und einem durch einen Graphenfilm gegebenen aktiven Element, das den Abschnitt des Wellenleiters übergreift und mit zwei seitlich des Wellenleiters angeordneten Kontaktelementen in Kontakt steht, bekannt. Aus dieser Veröffentlichung geht hervor, zusätzlich zu den beiden seitlich angeordneten Kontaktelementen ein drittes Kontaktelement vorzusehen und zwar auf dem Graphenfilm oberhalb des Wellenleiters. Die drei Kontaktelemente dienen Masse- und Signalkontakte, konkret als ein mittlerer Signal-Kontakt und zwei seitliche Masse-Kontakte. Mit anderen Worten kann so eine Ground-Signal-Ground-Konfiguration (abgekürzt G-S-G- oder GND-S-GND-Konfiguration) erzielt werden, die Vorteile mit sich bringt. Der Hauptvorteil der Anordnung ist die symmetrische Erzeugung eines Hochfrequenzsignals wodurch sich eine gute Kopplung zu externen Geräten über koplanare und koaxiale Leiter erreichen lässt.

Der bekannte Photodetektor mit G-S-G-Konfiguration hat sich bewährt. Es wird jedoch teilweise als nachteilig erachtet, dass es durch das oberhalb des Wellenleiters angeordnete metallische Kontaktelement zur Lichtabsorption und damit einhergehend einer Abnahme der Performanz der Einrichtung kommen kann.

Ausgehend davon ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine alternativ gestaltete elektro-optische Einrichtung anzugeben, die den Vorteil einer G-S-G-Konfiguration bietet und gleichzeitig die Nachteile des Standes der Technik vermeidet oder zumindest reduziert.

- Diese Aufgabe wird gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung gelöst durch eine elektro-optische Einrichtung, insbesondere Photodetektor oder Modulator, mit zwei Wechselwirkungsbereichen, die jeweils einen Wellenleiterlängsabschnitt und eines oder zwei aktive Elemente, das oder das jeweils
- 5 wenigstens ein elektro-optisch aktives Material, insbesondere Graphen, umfasst oder daraus besteht, umfassen, wobei die Wellenleiterlängsabschnitte der beiden Wechselwirkungsbereiche voneinander beabstandet angeordnet sind, und sich das oder das jeweilige aktive Element zumindest abschnittsweise oberhalb und/oder unterhalb und/oder innerhalb des Wellenleiterlängsabschnitts des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches erstreckt, und
- 10 wobei zwei oder mehr Kontaktelemente vorgesehen sind, die jeweils mit wenigstens einem der aktiven Elemente in Kontakt stehen, wobei wenigstens ein inneres Kontaktelement, das zwischen den beiden beabstandeten Wellenleiterlängsabschnitten angeordnet ist und als innerer Signal-Kontakt dient,
- 15 und zwei äußere Kontaktelemente, die jeweils auf der in Bezug auf das innere Kontaktelement anderen Seite des jeweiligen Wellenleiterlängsabschnitts angeordnet sind und jeweils als ein äußerer Masse-Kontakt dienen, oder ein äußeres Kontaktelement, das zumindest abschnittsweise zumindest im Wesentlichen U-förmig mit zwei voneinander beabstandeten Armen und einem
- 20 die beiden Arme verbindenden Verbindungsabschnitt ausgebildet ist, und das die beiden Wellenleiterlängsabschnitte außenseitig umgreift, wobei die beiden Arme des äußeren Kontaktelementes zumindest abschnittsweise jeweils als ein äußerer Masse-Kontakt dienen, vorgesehen sind.
- 25 Der Erfindung liegt mit anderen Worten der Gedanke zugrunde, bei einer elektro-optischen Einrichtung, insbesondere einem Photodetektor oder Modulator, zwei Wechselwirkungsbereiche mit jeweils einem Wellenleiterlängsabschnitt vorzusehen. Die Wellenleiterlängsabschnitte sind dabei voneinander beabstandet, so dass zwischen diesen Platz zur Verfügung steht, um dort ein
- 30 zusätzliches Kontaktelement vorzusehen, welches nicht mit dem Nachteil

eines auf einem Wellenleiter angeordneten Kontaktelementes verbunden ist. Im Ergebnis kann eine G-S-G-Konfiguration mit einem zentralen Signal-Kontakt und zwei seitlichen Masse-Kontakten erzielt werden, ohne dass sich der Nachteil unerwünschter Wechselwirkungen zwischen Signal-Kontakt und Wellenleiter ergibt. Vor allem zur Anbindung von Hochfrequenzbauteilen an koplanare bzw. koaxiale Schnittstellen sind Anordnungen mit einem zentralen Signal- und äußeren Masse-Kontakten, insbesondere bezüglich Masse und Signal symmetrische Bauteile, vorteilhaft, da sich die Hochfrequenzsignale störungsfreier auf koplanare bzw. koaxiale Anordnungen übertragen lassen. Dies gilt vor allem auch für den Fall, dass eine elektro-optisch Einrichtung, etwa ein Photodetektor oder Modulator auf einer planaren Chipoberfläche angeordnet ist bzw. einen Bestandteil einer solchen bildet. Dann kann eine besonders störungsfreie Übertragung von der planaren Chipoberfläche auf koplanare bzw. koaxiale Anordnungen erzielt werden.

Für den Fall, dass ein inneres Kontaktelement, bevorzugt genau ein inneres Kontaktelement vorgesehen ist, steht dieses bevorzugt sowohl mit dem oder einem der aktiven Elemente des einen Wechselwirkungsbereichs als auch mit dem oder einem der aktiven Elemente des anderen Wechselwirkungsbereichs in Kontakt. Mit anderen Worten befindet sich zwischen den beiden Wellenleiterlängsabschnitten ein gemeinsames inneres Kontaktelement, das beiden Wechselwirkungsbereichen zugeordnet ist und insbesondere einen gemeinsamen elektrischen (Signal-)Anschluss zu dem oder einem der aktiven Elemente beider Wechselwirkungsbereiche bildet.

Sind zwei innere Kontaktelemente vorgesehen, gilt bevorzugt, dass dann eines der inneren Kontaktelemente mit dem oder einem aktiven Element des einen Wechselwirkungsbereichs und das andere innere Kontaktelement mit dem oder einem aktiven Element des anderen Wechselwirkungsbereichs in Kontakt steht. Die zwei inneren Kontaktelemente können elektrisch mitei-

ander und/oder mit einer gemeinsamen (Signal-)Anschlussstelle verbunden sein.

Weiterhin kann, wenn ein, bevorzugt genau ein äußeres Kontaktelement vorgesehen ist, dieses sowohl mit dem oder einem der aktiven Elemente des einen Wechselwirkungsbereichs als auch mit dem oder einem der aktiven Elemente des anderen Wechselwirkungsbereichs in Kontakt stehen.

Sind zwei äußere Kontaktelemente vorhanden, gilt bevorzugt, dass eines der äußeren Kontaktelemente mit dem oder einem aktiven Element des einen Wechselwirkungsbereichs und das andere äußere Kontaktelement mit dem oder einem aktiven Element des anderen Wechselwirkungsbereichs in Kontakt steht.

Als ganz besonders vorteilhaft hat sich erwiesen, wenn genau ein inneres, mit dem oder einem aktiven Element beider Wechselwirkungsbereiche verbundenes Kontaktelement und genau zwei äußere Kontaktelemente, von denen jedes nur mit dem oder einem aktiven Element jeweils eines der beiden Wechselwirkungsbereiche in Kontakt steht, vorhanden sind.

Die äußeren Kontaktelemente sind dann bevorzugt zu zwei gegenüberliegenden Seiten des inneren Kontaktelementes angeordnet. Das oder die äußeren Kontaktelement(e) und das oder die inneren Kontaktelement(e) sind besonders bevorzugt auf einer Linie angeordnet.

Bezüglich der beiden Wellenleiterlängsabschnitte gilt in weiterer vorteilhafter Ausgestaltung, dass sie Bestandteil eines Wellenleiters sind. Es handelt sich dann mit anderen Worten um zwei beabstandete Abschnitte eines Wellenleiters.

30

Ein besonders geeignetes Beispiel einer solchen Ausgestaltung ist durch einen Wellenleiter mit einer Gabelung mit zwei abzweigenden Armen gegeben, wobei je einer der Wellenleiterlängsabschnitte im Bereich eines Armes der Gabelung liegt. Dann ist bevorzugt ein Splitter vorgesehen, mit dem ein ankommendes Lichtsignal auf die beiden Arme der Gabelung verteilt werden
5 kann, bevorzugt zu gleichen Anteilen. Dann besteht zwischen den beiden Armen der Gabelung Platz für das wenigstens eine innere Kontaktelement zur Verfügung und es kann auf besonders geeignete Weise eine G-S-G-Konfiguration erhalten werden.

10

Es sei angemerkt, dass vorliegend unter Licht nicht nur elektromagnetische Strahlung aus dem für das menschliche Auge sichtbaren Spektralbereich zu verstehen ist, sondern auch solche außerhalb dieses, beispielsweise aus dem infraroten und/oder ultravioletten Wellenlängenbereich.

15

Besonders bevorzugt ist der Splitter als 50/50-Splitter ausgestaltet, mit dem aus einem Eingangssignal zwei gleich große Ausgangssignale erhalten werden können. Der Splitter kann beispielsweise als MMI-Splitter oder ein direk-
tionaler Koppler ausgebildet sein oder einen solchen umfassen. MMI steht
20 dabei für Multi Mode Interference.

Die Ausgestaltung mit einer Gabelung kann – insbesondere im Falle eines Detektors - den Vorteil einer symmetrischen Absorption bieten.

25 Bei einer weiteren besonders vorteilhaften Ausgestaltung zeichnet sich der Wellenleiter zumindest abschnittsweise durch einen zumindest im Wesentlichen U-förmigen Verlauf mit zwei voneinander beabstandeten, sich bevorzugt zumindest im Wesentlichen parallel zueinander erstreckenden, insbesondere geradlinigen Armen und einem die beiden Arme verbindenden, be-
vorzugt geradlinigen Verbindungsabschnitt aus, und es liegt je einer der bei-
30

den Wellenleiterlängsabschnitte im Bereich eines der Arme. Dann steht innerhalb des U-förmigen Abschnitts Platz für das wenigstens eine innere Kontaktelement zur Verfügung und es kann auf weitere besonders geeignete Weise eine G-S-G-Konfiguration erhalten werden.

5

Die vorgenannte Aufgabe wird gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung ferner gelöst durch eine elektro-optische Einrichtung, insbesondere Photodetektor oder Modulator, mit einem Wechselwirkungsbereich, der einen zumindest im Wesentlichen U-förmigen Wellenleiterlängsabschnitt mit zwei

10 voneinander beabstandeten Armen und einem die beiden Arme verbindenden Verbindungsabschnitt, und ein oder zwei zumindest abschnittsweise zumindest im Wesentlichen U-förmige aktive Elementen mit zwei voneinander beabstandeten Armen und einem die beiden Arme verbindenden Verbindungsabschnitt, wobei das oder das jeweilige aktive Element wenigstens

15 ein elektro-optisch aktives Material, insbesondere Graphen, umfasst oder daraus besteht, umfasst, wobei sich das oder das jeweilige aktive Element zumindest abschnittsweise oberhalb und/oder unterhalb und/oder innerhalb des Wellenleiterlängsabschnitts erstreckt, und wobei zwei oder mehr Kontaktelemente vorgesehen sind, die jeweils mit dem oder einem der aktiven

20 Elemente in Kontakt stehen, wobei wenigstens ein inneres Kontaktelement, das innerhalb des zumindest abschnittsweise zumindest im Wesentlichen U-förmigen Wellenleiterlängsabschnitt angeordnet ist und als innerer Signal-Kontakt dient, und zwei äußere Kontaktelemente, die jeweils auf der in Bezug auf das innere Kontaktelement anderen Seite des jeweiligen Armes des

25 Wellenleiterlängsabschnitts angeordnet sind und jeweils als ein äußerer Masse-Kontakt dienen, oder ein äußeres Kontaktelement, das zumindest abschnittsweise zumindest im Wesentlichen U-förmig mit zwei voneinander beabstandeten Armen und einem die beiden Arme verbindenden Verbindungsabschnitt ausgebildet ist, und das den Wellenleiterlängsabschnitt au-

30 ßenseitig umgreift, wobei die beiden Arme des äußeren Kontaktelementes

zumindest abschnittsweise jeweils als ein äußerer Masse-Kontakt dienen, vorgesehen sind.

5 Mit anderen Worten kann anstelle von zwei separaten, voneinander beabstandeten Wechselwirkungsbereichen mit beabstandeten Wellenleiterlängsabschnitten und separaten aktiven Elementen auch ein durchgehender Wechselwirkungsbereich zumindest im Wesentlichen U-förmiger Ausgestaltung vorliegen, innerhalb dem dann Platz für das wenigstens eine innere Kontaktelement zur Verfügung steht. Bei dem zweiten Aspekt sind auch das
10 bzw. das jeweilige aktive Element im Wesentlichen U-förmig und das bzw. die aktiven Elemente erstrecken sich zweckmäßiger Weise nicht nur im Bereich der Arme des Wellenleiterlängsabschnitts über- und/oder innerhalb dieses sondern auch im Bereich des die Arme verbindenden Verbindungsabschnitts.

15 Der zumindest im Wesentlichen U-förmige Wellenleiterlängsabschnitt ist in Weiterbildung Bestandteil eines nicht ringförmig geschlossenen Wellenleiters. Er ist insbesondere Bestandteil eines offenen Wellenleiters. Unter einem ringförmig geschlossenen Wellenleiter ist dabei insbesondere ein solcher zu verstehen, der durch die ringförmige Anordnung weder Anfang noch
20 Ende aufweist, so dass sich eingekoppeltes Licht in diesem Resonator ausbreitet und mit sich selbst interferiert. Bei einem offenen Wellenleiter ist dies nicht der Fall, sondern Licht propagiert entlang des Verlaufs des Wellenleiters und wird nicht auf sich selbst zurückgeführt, so dass es nicht mit sich
25 selbst interferiert.

In weiterer ganz bevorzugter Ausgestaltung ist die Querschnittsfläche im Bereich des einen Armes des Wellenleiters größer ist als die Querschnittsfläche im Bereich des anderen Armes des Wellenleiters. Die Querschnittsfläche ist dann zweckmäßiger Weis in dem in Lichtausbreitungsrichtung be-
30

trachtet ersten Arm größer als in dem in Lichtausbreitungsrichtung betrachtet zweiten Arm.

Während ein U-förmiger Wellenleiterabschnitt sehr gut geeignet ist, um Platz
5 für wenigstens einen inneren Signal-Kontakt zu bieten, kann mit diesem ein
Nachteil hinsichtlich der Symmetrie des elektrischen Signals verbunden sein.
Die Absorption der elektromagnetischen Strahlung entlang der Ausbreitungs-
richtung führt nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz dazu, dass in dem bzw.
den aktiven Elementen im Bereich des ersten Armes mehr absorbiert wird als
10 in dem oder denjenigen des zweiten. Dann kann die Hochfrequenzmode un-
vorteilhafter Weise asymmetrisch angeregt werden. Um dieses Problem zu
umgehen, kann der Wellenleiterquerschnitt im U-förmigen Bereich des Wel-
lenleiters gezielt so angepasst werden, dass die Interaktion des Lichts pro
Länge entlang der Ausbreitungsrichtung mit dem bzw. den aktiven Elemen-
15 ten im ersten Arm genau so viel geringer im Vergleich zum zweiten Arm ist,
dass die absorbierte Leistung in beiden Armen gerade identisch wird bzw. ist.
Dazu kann beispielsweise der Wellenleiterquerschnitt im ersten Arm verbrei-
tert werden, um die optische Mode weiter im Inneren des Wellenleiters zu
führen und damit die Interaktion im ersten Arm zu reduzieren. Ziel der An-
20 passung ist, im ersten Arm verglichen mit der am Anfang zur Verfügung ste-
henden Leistung die Hälfte der Leistung zu absorbieren.

Auch bei dem zweiten Aspekt kann, wenn wenigstens ein, bevorzugt genau
ein inneres Kontaktelement vorgesehen ist, dieses sowohl mit dem einen Arm
25 des oder eines der aktiven Elemente als auch dem anderen Arm des oder
eines der aktiven Elemente in Kontakt stehen.

Alternativ dazu ist es natürlich auch möglich, dass, wenn zwei innere Kon-
taktelemente vorgesehen sind, eines der beiden inneren Kontaktelemente
30 mit dem einen Arm des oder eines der aktiven Elemente und das andere in-

nere Kontaktelement mit dem anderen Arm des oder eines der aktiven Elemente in Kontakt steht.

Weiterhin kann für den Fall, dass ein, insbesondere genau ein äußeres Kontaktelement vorgesehen ist, dieses sowohl mit dem einen Arm des oder eines der aktiven Elemente als auch dem anderen Arm des oder eines der aktiven Elemente in Kontakt stehen.

Sind zwei äußere Kontaktelemente vorhanden, gilt bevorzugt, dass eines der äußeren Kontaktelemente mit dem einen Arm des oder eines der aktiven Elemente und das andere äußere Kontaktelement mit dem anderen Arm des oder eines der aktiven Elemente in Kontakt steht.

Sowohl für die erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung nach dem ersten Aspekt als auch für die erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung nach dem zweiten Aspekt gilt, wenn sie als insbesondere elektro-optischer Modulator ausgebildet ist, dass der oder der jeweilige Wechselwirkungsbereich zwei aktive Elemente umfassen kann. Dann steht bevorzugt mit dem einen aktiven Element des oder des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches das oder eines der inneren Kontaktelemente und mit dem anderen aktiven Element des oder des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches das oder eines der äußeren Kontaktelemente in Kontakt. Das jeweilige Kontaktelement kann insbesondere an einer Seite des jeweiligen aktiven Elementes mit diesem in Kontakt stehen.

25

Alternativ zu zwei aktiven Elementen kann auch vorgesehen sein, dass der oder der jeweilige Wechselwirkungsbereich ein aktives Element und eine (konventionelle) Elektrode umfasst, bevorzugt, wobei mit dem aktiven Element des oder des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches das oder eines der inneren Kontaktelemente und mit der Elektrode des oder des jeweiligen

30

Wechselwirkungsbereiches das oder eines der äußeren Kontaktelemente in Kontakt steht oder umgekehrt. Das jeweilige Kontaktelement kann insbesondere an einer Seite des jeweiligen aktiven Elementes bzw. der jeweiligen Elektrode mit diesem bzw. dieser in Kontakt stehen.

5

Umgekehrt bedeutet dabei, dass die bzw. die jeweilige Elektrode mit dem bzw. einem inneren und das bzw. das jeweilige aktive Element mit dem bzw. einem äußeren Kontaktelement in Kontakt steht.

- 10 Sind anstelle von zwei aktiven Elementen ein aktives Element und eine Elektrode vorhanden, kann auch für die Elektrode in Weiterbildung gelten, dass diese zumindest abschnittsweise zumindest im Wesentlichen U-förmig mit zwei Armen und einem die Arme verbindenden Verbindungsabschnitt ausgebildet ist. Die Arme können geradlinig sein und sich parallel zueinander
15 erstrecken. Auch der Verbindungsabschnitt kann gradlinig sein.

- Zweckmäßiger Weise gilt dann ferner, dass die beiden aktiven Elemente oder das aktive Element und die Elektrode des oder des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches voneinander beabstandet und derart versetzt zueinander
20 angeordnet sind, dass sie in einem Überlappungsbereich abschnittsweise übereinander liegen.

- Mit anderen Worten fluchtet bzw. überlappt dann ein Abschnitt des einen aktiven Elementes mit einem Abschnitt des anderen aktiven Elementes bzw.
25 der Elektrode, dies zweckmäßiger Weise ohne, dass sich diese berühren. Bevorzugt gilt zumindest im Bereich des Übereinanderliegens, mit anderen Worten im Überlappungsbereich, dass sich die oder die jeweiligen beiden aktiven Elemente bzw. das oder das jeweilige aktive Element und die oder die jeweilige Elektrode bzw. zumindest Abschnitte dieser zumindest im We-
30 sentlichen parallel zueinander erstrecken.

Die Ausdehnung des Überlappungsbereiches in Querrichtung liegt in weiterer besonders vorteilhafter Ausgestaltung im Bereich von 10 nm bis 1000 nm. Bevorzugt entspricht sie der Breite des Wellenleiters.

5

Für den Fall, dass die oder einer der Wellenleiterlängsabschnitte wenigstens einen Spalt aufweisen, gilt bevorzugt, dass der Überlappungsbereich ober- oder unterhalb des oder wenigstens eines der Spalte angeordnet ist.

- 10 Ist ein Element bzw. Abschnitt zumindest im Wesentlichen U-förmig mit zwei Armen und einem Verbindungsabschnitt ausgebildet, können die Arme sich in Weiterbildung zumindest im Wesentlichen parallel zueinander erstrecken und/oder geradlinig sein. Der Verbindungsabschnitt kann ebenfalls gradlinig ausgebildet sein.

15

- In Weiterbildung sowohl des ersten als auch des zweiten Aspektes kann ferner ein Wellenleiter-Bypassabschnitt vorgesehen sein, der den einen Wechselwirkungsbereich oder der die beiden Wechselwirkungsbereiche überbrückt, so dass insbesondere von der gleichen Quelle stammendes Licht
- 20 durch den Wellenleiter-Bypassabschnitt an dem einen Wechselwirkungsbe-
reich oder an den beiden Wechselwirkungsbereichen vorbeigeführt werden kann. Weiter bevorzugt gilt dann, dass die Einrichtung als Interferometer o-
der als Bestandteil eines Interferometers ausgestaltet ist. Alternativ oder zu-
sätzlich kann ein Splitter vorgesehen sein, mittels dem Licht einerseits auf
- 25 den Wellenleiter-Bypassabschnitt und andererseits den Wellenleiterlängsab-
schnitt des Wechselwirkungsbereiches oder die Wellenleiterlängsabschnitte
der Wechselwirkungsbereiche aufgeteilt werden kann.

- Für den Splitter kann in Weiterbildung das gleiche gelten, wie vorstehend für
- 30 die Variante mit der Gabelung beschrieben.

Der Wellenleiterlängsabschnitt des Wechselwirkungsbereiches oder die Wellenleiterlängsabschnitte der Wechselwirkungsbereiche können ferner Teil eines Wellenleiters sein, an dessen einem Ende eine Koppereinrichtung zur Ein- und/oder Auskopplung von Licht vorgesehen ist oder an dessen beiden Enden jeweils eine Koppereinrichtung zur Ein- und/oder Auskopplung von Licht vorgesehen ist.

Im Falle eines Modulators, bei dem den Wellenleiterlängsabschnitten jeweils zwei aktive Elemente zugeordnet sind, gilt weiter bevorzugt, dass die oder die jeweiligen beiden aktiven Elemente voneinander beabstandet und derart versetzt zueinander angeordnet sind bzw. werden, dass sie in einem Überlappungsbereich abschnittsweise übereinander liegen. Sind bei einem Modulator den Wellenleiterlängsabschnitten jeweils ein aktives Element und eine (konventionelle) Elektrode zugeordnet, kann analog in bevorzugter Ausgestaltung gelten, dass das oder das jeweilige aktive Element und die oder die jeweilige Elektrode voneinander beabstandet und derart versetzt zueinander angeordnet sind bzw. werden, dass sie in einem Überlappungsbereich abschnittsweise übereinander liegen. Mit anderen Worten fluchtet bzw. überlappt dann ein Abschnitt des einen aktiven Elementes mit einem Abschnitt des anderen aktiven Elementes bzw. der Elektrode, dies zweckmäßiger Weise ohne, dass sich diese berühren. Bevorzugt gilt zumindest im Bereich des Übereinanderliegens, mit anderen Worten im Überlappungsbereich, dass sich die oder die jeweiligen beiden aktiven Elemente bzw. das oder das jeweilige aktive Element und die oder die jeweilige Elektrode bzw. zumindest Abschnitte dieser zumindest im Wesentlichen parallel zueinander erstrecken.

Für den Fall, dass die oder einer der Wellenleiterlängsabschnitte wenigstens einen Spalt aufweisen, gilt bevorzugt, dass der Überlappungsbereich ober-

oder unterhalb des oder wenigstens eines der Spalte angeordnet ist und bevorzugt der Spaltbreite entspricht.

Unter einem Wellenleiterlängsabschnitt ist insbesondere ein Abschnitt eines
5 Wellenleiters zu verstehen, der sich nur über eine Teil der Gesamtausdehnung eines Wellenleiters in dessen bevorzugt mit der Lichtausbreitungsrichtung zusammenfallenden Längsrichtung erstreckt, und über den gesamten Querschnitt des Wellenleiters.

10 Eine erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung kann beispielsweise als Photodetektor oder insbesondere elektro-optischer Modulator ausgebildet sein. Sie kann auch in Form eines Interferometers, etwa eines Mach-Zehnder-Interferometers, vorliegen oder einem Bestandteil eines Interferometers, etwa eines Mach-Zehnder-Interferometers bilden. Beispielsweise
15 kann eine als Modulator ausgestaltete erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung Bestandteil eines Mach-Zehnder-basierten Phasenmodulatoranordnung sein.

Es sei angemerkt, dass ein Photodetektor insbesondere der Signalwandlung
20 zurück von der optischen in die elektronische Welt dienen kann. Ein elektro-optischer Modulator kann insbesondere zur optischen Signalcodierung verwendet werden. Ein elektro-optischer Modulator kann auch als Ringmodulator ausgebildet sein.

25 Das oder die aktiven Elemente der erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung umfassen wenigstens ein elektro-optisch aktives Material oder bestehen aus einem oder mehreren solchen.

Von einem elektro-optisch aktiven Material kann man insbesondere dann
30 sprechen, wenn das Material elektromagnetische Strahlung wenigstens einer

Wellenlänge absorbiert und infolge der Absorption ein elektrisches Photosignal erzeugt, und/oder sein Brechungsindex sich in Abhängigkeit einer Spannung und/oder dem Vorhandensein von Ladung und/oder einem elektrischen Feld ändert.

5

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 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 auszeichnen vorliegend als solche Materialien erachtet.

Es hat sich als ganz besonders geeignet erwiesen, wenn es sich bei dem wenigstens einen elektro-optisch aktiven Material wenigstens eines der aktiven Elemente um Graphen, ggf. chemisch modifiziertes Graphen, und/oder wenigstens ein Dichalkogenid, insbesondere zweidimensionales Übergangsmetall-Dichalkogenid, und/oder Heterostrukturen aus zweidimensionalen Materialien und/oder Germanium.

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
5 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.

10 Es kann sein, dass es sich bei dem wenigstens einen elektro-optisch aktiven Material wenigstens eines der aktiven Elemente um ein solches handelt, das elektromagnetische Strahlung einer Wellenlänge von 850 nm und/oder 1310 nm und/oder 1550 nm absorbieren und infolge der Absorption ein Photosig-
15 nal 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 Extended 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
20 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.

Alternativ oder zusätzlich kann vorgesehen sein, dass das oder wenigstens
25 eines der aktiven Elemente, das dem Wellenleiterlängsabschnitt und/oder dem weiteren Wellenleiterlängsabschnitt zugeordnet ist, 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 oder wenigstens eines der aktiven Elemente kann sich ferner durch einen quadratischen
30 oder rechteckigen Querschnitt auszeichnen.

Das oder wenigstens ein aktives Element kann auch 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 bzw. Schichten wenigstens eines solchen Materials gebildet sein. Auch kann vorgesehen sein, dass das oder wenigstens ein aktives Element als Film ausgebildet ist, der mehrere Lagen bzw. Schichten aus einem oder auch verschiedenen Materialien umfasst.

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.

Auch kann vorgesehen sein, dass wenigstens eines der aktiven Elemente eine oder mehrere Siliziumschichten umfassen bzw. daraus besteht.

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 sein, dass ein p- und ein n-dotierter Bereich und ein bevorzugt dazwischengeschalteter undotierter Bereich vorliegen bzw. vorgesehen werden. Dies wird auch als pin-Übergang bezeichnet, wobei das i für intrinsisch, also undotiert steht.

Dass ein Element oder auch eine Schicht oberhalb oder unterhalb eines Wellenleiterlängsabschnitts oder eines (anderen) Elementes oder einer (anderen) Schicht angeordnet ist oder sich erstreckt (dass es mit anderen Worten über oder unter einem Wellenleiterlängsabschnitts oder Element oder der

Schicht angeordnet ist bzw. sich erstreckt) umfasst sowohl, dass es sich direkt auf bzw. direkt unter dem Wellenleiterlängsabschnitt oder Element oder auch der Schicht befindet, und mit diesem bzw. dieser, etwa mit der Ober- oder Unterseite des Wellenleiterlängsabschnitts oder Elementes oder der Schicht in Kontakt steht, diese also berührt, oder auch, dass noch etwas, etwa wenigstens ein weiteres Element oder wenigstens eine weitere Schicht (ober- oder auch unterseitig), dazwischen liegt.

Oberhalb wenigstens eines der aktiven Elemente kann ferner eine Passivierungsschicht und/oder ein Cladding vorgesehen sein. 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. 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.

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

Die erfindungsgemäß vorgesehenen Kontaktelemente sind elektrisch leitfähige Elemente, die auch als Elektroden aufgefasst werden bzw. solche darstellen können. Sie sind zweckmäßiger Weise metallisch, umfassen insbesondere wenigstens ein Metall, bevorzugt Titan, Nickel, Palladium oder Alu-

minium, bzw. bestehen aus einem solchen. Die Kontaktelemente können in bevorzugter Ausgestaltung 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 umfassen oder aus einem oder mehreren dieser Metalle bestehen. Die Kontaktelemente können auch mehrere, beispielsweise zwei oder drei Lagen umfassen oder aus mehreren, beispielsweise zwei oder drei Lagen bestehen. Dann kann jede der Lagen beispielsweise eines oder mehrere der genannten Metalle umfassen oder aus einem oder mehreren der genannten Metalle bestehen. Im Falle mehrlagiger Kontaktelemente kann in Weiterbildung vorgesehen sein, dass die Lagen verschieden ausgestaltet sind. Beispielsweise kann das bzw. wenigstens ein oder auch jedes Kontaktelement eine, z.B. obere, Lage mit oder aus einem Metall bzw. mit oder aus einer Kombination von Metallen umfassen und eine weitere, z.B. untere, Lage mit oder aus einem anderen Metall bzw. mit oder aus einer anderen Kombination von Metallen. Beispielsweise kann eine Lage aus Nickel und eine Lage aus Aluminium vorgesehen sein oder auch eine Lage aus Titan und eine Lage aus Aluminium. Im Falle mehrerer Lagen kann es sein, dass nur eine der Lagen mit dem oder aktiven Element in Kontakt steht, beispielsweise eine untere Lage.

20

Die Kontaktelemente dienen bevorzugt dem Anschluss eines bzw. der Verbindung mit einem koaxialen bzw. koplanaren Leiter, wobei ein solcher in der Regel nicht direkt mit den Kontaktelementen in Verbindung gebracht wird, sondern eine Schnittstelle bzw. Anschlusseinrichtung für einen solchen, insbesondere zur Verbindung mit einem solchen zum Einsatz kommen kann, die dann mit den Kontaktelementen in Verbindung gebracht wird. Diese kann auch einer Größenanpassung dienen, da die Größenordnung der Dimensionierung einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung die Größenordnung der Dimensionierung beispielsweise eines herkömmlichen koaxialen

25

Leiters, etwa Koaxialkabels, bzw. koplanaren Leiters deutlich unterscheiden kann.

Unter einem koaxialen Leiter, etwa Kable, ist in an sich bekannter Weise ein
5 solcher zu verstehen, der ein längliches Innenleiterelement und ein dieses
umgebendes Außenleiterelement hohlzylindrischer Form aufweist, das auch
als Mantel bezeichnet wird. Unter einem koplanaren Leiter ist insbesondere
ein solcher zu verstehen, der ein längliches Innenleiterelement und zwei zu
beiden Seiten des Innenleiterelementes angeordnete längliche Außenlei-
10 terelemente aufweist, die sich zweckmäßiger Weise parallel zu dem Innen-
leiterelement erstrecken.

Zumindest eines der Kontaktelemente kann durch Abscheidung, insbeson-
dere chemische Gasphasenabscheidung (englisch: chemical vapor depositi-
15 on, 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 physi-
kalische Gasphasenabscheidung (englisch: physical vapor deposition, kurz:
20 PVD) eines Beschichtungsmaterials hergestellt werden bzw. worden sein.
Dies kann auch für alle Kontaktelemente gelten.

Es gibt unterschiedliche aus dem Stand der Technik vorbekannte Verfahren
der chemischen Gasphasenabscheidung, die allesamt im Rahmen der vor-
25 liegenden Erfindung zum Einsatz gekommen kommen können bzw. gekom-
men sein 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 gekommen sein bzw. 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.

10

Alternativ oder zusätzlich zu den vorgenannten Abscheidungsverfahren kommt auch die Atomlagenabscheidung (englisch: atomic layer deposition, kurz: ALD) in Frage, um die bzw. die jeweilige Gateelektrode zu erhalten. Im Rahmen dieser werden isolierende oder leitende Materialien (Dielektrika, Halbleiter oder Metalle) Atomlage für Atomlage sequenziell abgeschieden.

15

Auch ein Transferverfahren kann zur Anwendung kommen bzw. gekommen sein. Dies bedeutet insbesondere, dass das bzw. das jeweilige Element nicht monolithisch etwa auf einem Chip oder Wafer hergestellt wird/werden bzw. wurde/wurden, sondern separat hergestellt und dann transferiert, mit anderen Worten übertragen wird/werden bzw. wurde/wurden. 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, pages 101104 (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

20

25

30

1-17 bekannt. Eines dieser Verfahren kann auch im Rahmen der vorliegenden Erfindung angewendet werden, um eine oder mehrere Graphen- bzw. LiNbO- bzw. GaAs-Schichten/-Filme zu erhalten. An ein Transferverfahren kann sich eine Strukturierung anschließen.

5

Die vorgenannten Verfahren können auch für den Erhalt des bzw. der aktiven Elemente und/oder des Wellenleiterlängsabschnitts des bzw. des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung zum Einsatz kommen bzw. gekommen sein.

10

In Weiterbildung kann ferner vorgesehen sein, dass wenigstens einem der Kontaktelemente, bevorzugt jedem der Kontaktelemente wenigstens ein mit diesem in Kontakt stehendes Verbindungselement zugeordnet ist. Über das bzw. die die Verbindungselemente kann beispielsweise ein Anschluss an
15 eines oder mehrere integrierte elektronische Bauteile, wie Transistoren, etwa aus dem Front-End-of-Line eines Chips oder Wafers, erzielt werden bzw. realisiert sein. Unter verbunden sein ist dabei zweckmäßiger Weise elektrisch leitfähig verbunden zu verstehen.

20

Insbesondere einem zumindest abschnittsweise zumindest im Wesentlichen U-förmigen Kontaktelement sind in bevorzugter Ausgestaltung mehrere Verbindungselemente zugeordnet, mit denen das Kontaktelement zweckmäßiger Weise in Kontakt steht. Es kann beispielsweise jedem Arm eines solchen Kontaktelementes wenigstens ein Verbindungselement zugeordnet sein, mit
25 dem der jeweilige Arm zweckmäßiger Weise in Kontakt steht. Insbesondere zusätzlich kann auch dem Verbindungsabschnitt eines solchen Kontaktelements eines oder mehrere Verbindungselemente zugeordnet sein. Mehrere Kontaktelemente können insbesondere zu dem Zwecke vorgesehen sein, ein besonders gleichmäßiges Massenpotential herzustellen. Sind einem Kon-
30 taktelement mehrere Verbindungselemente zugeordnet, die mit dem Kon-

taktelement zweckmäßigerweise in Kontakt stehen, sind diese weiter bevorzugt zumindest im Wesentlichen gleichmäßig beanstandet voneinander angeordnet.

- 5 Bei dem bzw. den Verbindungselementen handelt es sich bevorzugt um vertikale elektrische Verbindungen, die im Englischen auch als Vertical Interconnect Access, kurz Via bzw. VIA, bezeichnet werden. VIAs werden in der Regel durch Lithografie definiert und insbesondere mittels reaktivem Ionenätzen (kurz: RIE) trockenchemisch geätzt. Danach wird bevorzugt metallisiert
10 und die metallisierte Oberfläche mittels CMP (Damascene-Prozess) oder mittels Lithografie und RIE strukturiert. Das reaktive Ionenätzen ist ein Trockenätzverfahren, bei dem in der Regel mittels spezieller gasförmiger Chemikalien, die zu einem Plasma angeregt werden, ein selektives und gerichtetes Ätzen einer Substratoberfläche ermöglicht wird. Eine Lackmaske kann
15 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 Materialien. Diese Eigenschaft ist entscheidend, um einen Ätzvorgang in der Tiefe zu begrenzen und damit Schichten voneinander getrennt zu definieren.

20

- Die Verbindungselemente umfassen bzw. bestehen zweckmäßiger Weise aus wenigstens einem elektrisch leitenden Material, insbesondere Metall, wie etwa Kupfer und/oder Aluminium und/oder Wolfram. Die Verbindungselemente können sich beispielsweise vertikal durch einen Chip oder Wafer bzw.
25 ein Substrat, insbesondere Halbleitersubstrat erstrecken, oberhalb dem eine oder mehrere erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtungen angeordnet sind. Die Wellenleiterlängsabschnitte dieser können beispielsweise auf einer Substratoberfläche angeordnet sein.

- Das oder wenigstens eines der aktiven Elemente des bzw. des jeweiligen Wechselwirkungsbereichs ist bzw. wird zweckmäßiger Weise derart relativ zu dem Wellenleiterlängsabschnitt des bzw. des jeweiligen Wechselwirkungsbereichs angeordnet, dass es zumindest abschnittsweise dem evaneszenten
- 5 Feld von elektromagnetischer Strahlung, die mit diesem geführt wird, ausgesetzt ist. Bevorzugt ist oder wird das oder wenigstens ein aktives Element in einem Abstand kleiner gleich 50 nm, besonders bevorzugt kleiner gleich 30 nm zu dem Wellenleiterlängsabschnitt angeordnet, beispielsweise in einem Abstand von 10 nm.
- 10 Das oder wenigstens eines der aktiven Elemente zeichnet sich weiterhin bevorzugt durch eine Ausdehnung in Längsrichtung im Bereich von 5 bis 500 Mikrometern aus.
- 15 Das oder wenigstens eines der aktiven Elemente erstreckt sich zumindest abschnittsweise oberhalb und/oder innerhalb eines dem (jeweiligen) zugeordneten Wellenleiterlängsabschnitt, im letztgenannten Falle beispielsweise zwischen zwei Teilen bzw. Segmenten dieses.
- 20 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,
- 25 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.
- Es existieren vier Effekte in Graphen, die zu einem Photosignal führen. Einerseits der bolometrischer Effekt, gemäß dem durch die absorbierte Energie
- 30

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 thermoelektrischer 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 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.

15

Im Falle eines Modulators kann, wie vorstehend dargelegt, eine Elektrode, insbesondere elektrische Steuerelektrode und ein dazu zweckmäßiger Weise isoliertes aktives Element mit oder aus wenigstens einem elektro-optisch aktiven Material, insbesondere Graphen, vorgesehen sein bzw. auch zwei aktive Elemente, die im Betrieb 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 beiden 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, können diese nicht

30

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 zwischen absorbierend und transparent hin und her geschaltet. Ein kontinuierlich leuchtender Laserstrahl 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 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.

15

Ein Wellenleiter bzw. ein Wellenleiterlängsabschnitt ist eine Komponente, die eine elektromagnetische Welle, etwa Licht, leitet und hierzu entsprechend ausgebildet ist. Um die Welle zu leiten wird zweckmäßiger Weise ein von der Wellenlänge abhängiger Querschnitt eines 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. 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.

25

In der Regel wird bzw. werden – beispielsweise auf einem Chip oder einem Wafer – einer oder mehrere Wellenleiter vorgesehen sein. Teil einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung wird in der Regel nur ein Längsabschnitt eines Wellenleiters sein, etwa ein Längsabschnitt, der sich unterhalb eines aktiven Elementes dieses erstreckt. Selbstverständlich ist aber auch nicht ausgeschlossen, dass ein Wellenleiter über seinen gesamte Längsausdehnung als Bestandteil eines erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung erachtet wird. Mit anderen Worten kann eine solche zusätzlich zu dem sich insbesondere unterhalb eines aktiven Elementes erstreckenden Längsabschnitt eines Wellenleiters auch den Rest eines solchen umfassen.

Ein Wellenleiter kann beispielsweise als Streifenwellenleiter ausgebildet sein, der sich zum Beispiel durch einen rechteckigen oder quadratischen Querschnitt auszeichnet, was dann auch für einen Längsabschnitt eines solchen gilt. Ein Wellenleiter kann alternativ oder zusätzlich auch als Rippenwellenleiter mit T-förmigem Querschnitt ausgebildet sein. Weiter alternativ oder zusätzlich ist es möglich, dass ein Wellenleiter durch einen Schlitzwellenleiter gegeben ist, der wenigstens einen Spalt aufweist.

Ein Wellenleiter bzw. Längsabschnitt eines solchen kann ferner im Querschnitt betrachtet mehrere Abschnitte bzw. Segmente umfassen und mehrteilig ausgebildet sein, etwa ein erstes, beispielsweise unteres oder linkes, und ein zweites, beispielsweise oberes oder rechtes Segment umfassen oder daraus bestehen. Ein Schlitzwellenleiter bzw. Längsabschnitt eines solchen beispielsweise kann ein linkes und rechtes Segment haben, zwischen denen der Schlitz bzw. Spalt gebildet wird. Es kann sein, dass eines oder mehrere Wellenleitersegmente sich durch einen rechteckigen oder quadratischen Querschnitt auszeichnen. Auch ist es möglich, dass sich ein Wellenleiter(längsabschnitt) bzw. eines oder mehrere Segmente eines solchen zu-

mindest abschnittsweise durch einen sich verjüngenden Querschnitt und/oder zumindest abschnittsweise durch einen sich verbreiternden Querschnitt auszeichnet. Sind mehrere Segmente vorhanden, können diese sowohl voneinander beabstandet angeordnet sein als auch direkt aneinander
5 liegen und in Kontakt miteinander stehen, beispielsweise, weil ein Segment unmittelbar auf einem anderen Segment hergestellt wurde.

Was die Abmessungen des Wellenleiterlängsabschnitts und/oder des weiteren Wellenleiterlängsabschnitts angeht, kann beispielsweise das Folgende
10 gelten. Die Dicke kann z.B. im Bereich von 150 Nanometern bis 10 Mikrometer liegen. Die Breite und Länge kann sich insbesondere im Bereich von 100 Nanometern und 10 Mikrometern bewegen.

Der bzw. die Wellenleiterlängsabschnitte umfassen in zweckmäßiger Ausgestaltung wenigstens ein Material, das für elektromagnetische Strahlung einer
15 Wellenlänge von 850 nm und/oder 1310 nm und/oder 1550 nm transparent ist oder besteht aus einem 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
20 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 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 Be-
25 reich der Nachrichtentechnik vorbekannt.

Als Materialien für Wellenleiter haben sich beispielsweise als besonders geeignet erwiesen: Titandioxid und/oder Aluminiumnitrid und/oder Tantalpentoxid und/oder Siliziumnitrid und/oder Aluminiumoxid und/oder Siliziumoxynitrid
30 und/oder Lithiumniobat und/oder Silizium, insbesondere Polysilizium,

und/oder Indiumphosphit und/oder Galliumarsenid und/oder Indiumgalliumarsenid und/oder Aluminiumgalliumarsenid und/oder wenigstens ein Dichalkogenid, insbesondere zweidimensionales Übergangsmetall-Dichalkogenid, und/oder Chalkogenidglas und/oder Heterostrukturen aus zweidimensionalen Materialien und/oder Harze bzw. Harz enthaltende Materialien, insbesondere SU8, und/oder Polymere bzw. Polymere enthaltende Materialien, insbesondere OrmoClad und/oder OrmoCore. Dabei kann der Wellenleiterlängsabschnitt und/oder der weitere Wellenleiterlängsabschnitt eines oder mehrere dieser Materialien umfassen oder auch aus einem dieser Materialien oder aus einer Kombination von zwei oder mehr dieser Materialien bestehen.

Weist der bzw. der jeweilige Wellenleiterlängsabschnitt im Querschnitt betrachtet mehrere Segmente auf, können diese alle das oder die gleichen Materialien umfassen bzw. aus dem oder den gleichen Materialien bestehen. Es ist aber natürlich auch möglich, dass sich zwei oder mehr Segmente bezüglich ihres Materials bzw. ihrer Materialien unterscheiden. Es kann zum Beispiel sein, dass wenigstens ein Segment sich durch einen Brechungsindex auszeichnet, der größer ist als der Brechungsindex wenigstens eines weiteren Segmentes. Beispielsweise können für den Fall, dass mehrere Segmente sandwich- bzw. stapelartig übereinander liegen, die äußeren Segmente einen geringeren Brechungsindex aufweisen. Dann wird das Licht in der Mitte der Wellenleiteranordnung gebündelt. Rein Beispielfür zugehörige Materialien seien ein oberes und unteres Segment aus Aluminiumoxid mit einem zwischen diesen befindlichen mittleren Segment aus Titanoxid genannt.

Unterschiedliche Materialien der Segmente können auch aus dem Grunde vorteilhaft sein, dass sich diese durch verschiedene Ätzraten auszeichnen.

Dies kann Vorteile im Rahmen der Herstellung bieten, etwa für erforderliche Strukturierungen.

Der Wellenleiterlängsabschnitt des bzw. des jeweiligen Wechselwirkungs-
5 Bereichs besteht weiter bevorzugt aus wenigstens einem Material, dessen Brechungsindex sich von dem Brechungsindex eines ihn umgebenden Materials unterscheidet bzw. er umfasst wenigstens ein solches.

Handelt es sich bei dem Wellenleiterlängsabschnitt des bzw. des jeweiligen
10 Wechselwirkungsbereichs um einen solchen, der zwei oder mehr Segmente umfasst, von denen wenigstens zwei unter Bildung eines Spaltes voneinander beabstandet sind, kann in vorteilhafter Ausgestaltung vorgesehen sein, dass der Spalt mit wenigstens einem dielektrischen Material gefüllt ist bzw.
15 wird, dessen Brechungsindex kleiner als der Brechungsindex des Materials der den Spalt definierenden Wellenleitersegmenten ist.

Als rein beispielhafte Paare von Brechungsindices in einem solchen Falle seien genannt 3,4 (Si) für den und/oder den weiteren Wellenleiterlängsabschnitt und 1,5 (SiO₂) für das umgebende Material oder, im Falle von Dielektrika, 2,4 (TiO₂) für den und/oder den weiteren Wellenleiterlängsabschnitt
20 und 1,5 (SiO₂) für das umgebende Material oder 2 (SiN) für den und/oder den weiteren Wellenleiterlängsabschnitt und 1,47 für das umgebende Material.

25 Besonders bevorzugt gilt, dass der Brechungsindex des Wellenleiterlängsabschnitts des bzw. des jeweiligen Wechselwirkungsbereichs um mindestens 20 %, bevorzugt mindestens 30 % größer ist als der Brechungsindex des umgebenden Material.

Der Wellenleiterlängsabschnitt des bzw. des jeweiligen Wechselwirkungs-
bereichs und/oder das oder wenigstens eines der aktiven Elemente kann ferner
oberhalb, bevorzugt auf einer Schicht, beispielsweise einer Schicht mit oder
aus wenigstens einem dielektrischen Material, beispielsweise Siliziumdioxid,
5 angeordnet sein. Das oder eines der aktiven Elemente kann beispielsweise
auf einer oberhalb, insbesondere auf dem Wellenleiterlängsabschnitt vorge-
sehenen, ggf. darauf hergestellten Schicht angeordnet, ggf. auch auf dieser
hergestellt worden sein. Insbesondere eine zwischen einem Wellenleiter-
längsabschnitt und aktiven Element vorgesehene Schicht mit oder aus einem
10 dielektrischen Material kann beispielsweise eine Dicke im Bereich von bis zu
50 nm, bevorzugt bis zu 30 nm, besonders bevorzugt 10 bis 20 nm haben.

Es kann sich um eine Planarisierungsschicht handeln, die sich bevorzugt an
derjenigen Seite, oberhalb derer bzw. auf der der oder der jeweilige Wellen-
15 leiterlängsabschnitt bzw. das oder das jeweilige aktive Element angerordnet
ist, zumindest abschnittsweise durch eine Rauheit im Bereich von 1,0 nm
RMS bis 0,1 nm RMS, insbesondere 0,6 nm RMS bis 0,1 nm RMS, bevor-
zugt 0,4 nm RMS bis 0,1 nm RMS aus. Die Abkürzung nm steht hier in an
sich bekannter Weis für Nanometer (10^{-9} m).

20 Rauheiten in den genannten Bereichen können beispielsweise durch che-
misch-mechanisches Polieren (CMP) und/oder Resistplanarisierung erhalten
werden bzw. worden sein.

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

30

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 SiO₂ 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 SiO₂-Schichtdicke muss beim Aufbringen der SiO₂ Schicht berücksichtigt werden, so dass nach Abschluss des letzten Ätzschritts die gewünschte SiO₂ Schichtdicke erreicht wird. Es sei betont, dass die Resistplanarisierung nicht auf SiO₂ 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 SiO₂ 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 $[\text{HSiO}_{3/2}]_n$. Die Resistplanarisierung ist auch in der ebenfalls auf die Anmelderin zurückgehenden früheren deutschen Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10 2020 102 533.5 beschrieben.
5 ben.

Rauheiten in den vorgenannten 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.
10 hang 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.
15 skopie (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.

Insbesondere bei einer als Modulator ausgebildeten erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung kann weiterhin vorgesehen sein, dass sie eine Diode oder Kapazität umfasst. Es kann sich dann beispielsweise 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.
20 Insbesondere bei einer als Modulator ausgebildeten erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung kann weiterhin vorgesehen sein, dass sie eine Diode oder Kapazität umfasst. Es kann sich dann beispielsweise 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.
25 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 eine Diode vorgesehen, kann diese beispielsweise eine Mehrzahl von Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung von beispielsweise
30 zahl von Schichten unterschiedlicher Zusammensetzung von beispielsweise

InGaAsP umfassen, insbesondere, um einen pn-Übergang und zwei Kontaktgebiete zu erzeugen.

Die Erfindung betrifft auch eine elektro-optische Anordnung, umfassend wenigstens eine erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung und eine Anschlusseinrichtung zur Verbindung mit einem koaxialen und/oder koplanaren Leiter, wobei die Anschlusseinrichtung eines oder mehrere als Massekontakt dienende innere Anschluss-Kontaktelemente und eines oder mehrere als Signalkontakt dienende äußere Anschluss-Kontaktelemente aufweist, und wobei das oder die inneren Kontaktelemente der elektro-optischen Einrichtung mit dem oder den inneren Anschluss-Kontaktelementen der Anschlusseinrichtung verbindbar oder verbunden sind, und wobei das oder die äußeren Kontaktelemente der elektro-optischen Einrichtung mit dem oder den äußeren Anschluss-Kontaktelementen der der Anschlusseinrichtung verbindbar oder verbunden sind.

Gegenstand der Erfindung ist ferner eine Halbleitereinrichtung umfassend einen Chip und wenigstens eine, bevorzugt mehrere erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtungen, insbesondere Photodetektoren und/oder Modulatoren, wobei die Einrichtung(en) bevorzugt auf dem Chip oder auf einer oberhalb des Chips angeordneten Schicht angeordnet sind.

Die oder die jeweilige erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung ist in besonders bevorzugter Ausgestaltung Bestandteil einer auf dem Chip hergestellten oder mit dem Chip gebondeten photonischen Plattform.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist eine Halbleitervorrichtung umfassend einen Wafer und wenigstens eine, bevorzugt mehrere erfindungsgemäße Einrichtungen, insbesondere Photodetektoren und/oder Modulatoren,

wobei der oder die Einrichtungen bevorzugt auf dem Wafer oder auf einer oberhalb des Wafers angeordneten Schicht angeordnet sind.

Die oder die jeweilige Einrichtung können insbesondere Bestandteil einer auf dem Wafer hergestellten oder mit dem Wafer gebondeten photonischen Plattform sein.

Unter gebondet ist dabei bevorzugt zu verstehen, dass der bzw. die Photodetektoren und/oder Modulatoren nicht auf oder oberhalb des Chips bzw. Wafers sondern separat von diesem hergestellt werden bzw. wurden und nach ihrer Herstellung – ggf. auch Als Bestandteil einer größeren Einheit – mit dem Chip bzw. Wafer verbunden werden bzw. wurden, etwa unter Verwendung einer geeigneten Zwischenschicht.

Wird ein Chip oder 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 in der Regel 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 Dicing/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 vereinzelt Chips darstellen, der Wafer also keine vereinzelt Chips umfasst.

5

Sowohl für eine erfindungsgemäße Halbleitereinrichtung als auch für eine erfindungsgemäße Halbleitervorrichtung kann gelten, dass diese mehrere baugleiche erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtungen, insbesondere Photodetektoren und/oder Modulatoren, umfasst oder auch mehrere verschieden gestaltete erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtungen, insbesondere Photodetektoren und/oder Modulatoren. Es können auch einige gleiche und zusätzlich einer oder mehrere davon verschiedene erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtungen vorhanden sein.

10

Des Weiteren kann bzw. können selbstverständlich auch für den Fall, dass eine oder mehrere erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtungen auf einem Chip bzw. Wafer angeordnet sind, eine oder mehrere Anschlusseinrichtungen zur Verbindung mit einem koaxialen und/oder koplanaren Leiter vorgesehen sein. Diese kann bzw. können sich dann ebenfalls auf dem Wafer/Chip oder auf einer oberhalb des Wafers/Chips angeordneten Schicht angeordnet sein. Es kann mit anderen Worten auch der Fall sein, dass eine erfindungsgemäße Halbleitereinrichtung oder Halbleitervorrichtung eine oder mehrere erfindungsgemäße elektro-optische Anordnungen umfasst. Die Anschlusseinrichtungen können alternativ dazu auch separat zu dem Chip bzw. Wafer angeordnet sein.

20

25

Schließlich betrifft die Erfindung die Verwendung einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung derart, dass das oder die inneren Kontaktelemente der elektro-optischen Einrichtung mit dem oder den Massekontakten eines koaxialen oder koplanaren Leiters oder einer Anschlusseinrichtung zur

30

Verbindung mit einem koaxialen oder koplanaren Leiter verbunden werden, und dass der oder die äußeren Kontaktelemente der elektro-optischen Einrichtung mit dem oder den Signalkontakten eines koaxialen oder koplanaren Leiters oder einer Anschlusseinrichtung zur Verbindung mit einem koaxialen oder koplanaren Leiter verbunden werden.

Die elektrisch leitfähige Verbindung zwischen der bzw. der jeweiligen elektro-optischen Einrichtung und der bzw. der jeweiligen Anschlusseinrichtung kann beispielsweise durch Drähte oder mittels Bonding realisiert sein bzw. werden.

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

15

In der Zeichnung zeigt:

Figur 1 eine Aufsicht auf einen Photodetektor gemäß dem Stand der Technik;

20

Figur 2 einen Teilschnitt durch eine Halbleitervorrichtung mit dem Photodetektor aus Figur 1;

Figur 3 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel einer als Photodetektor ausgestalteten erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung, die zwei Wechselwirkungsbereiche umfasst;

25

Figur 4 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel einer als Photodetektor ausgestalteten erfindungsgemäßen elektro-optischen Ein-

30

richtung gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung, die einen Wellenleiter mit einer Gabelung und zwei Wechselwirkungsbereiche umfasst;

- 5 Figur 5 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel einer als Photodetektor ausgestalteten erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung, die einen U-förmigen Wechselwirkungsbereich umfasst;
- 10 Figur 6 eine Aufsicht auf einen elektro-optischen Modulator gemäß dem Stand der Technik;
- Figur 7 einen Teilschnitt auf eine Halbleitervorrichtung mit dem elektro-optischen Modulator aus Figur 6;
- 15 Figur 8 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel einer als elektro-optischer Modulator ausgestalteten erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung, die zwei Wechselwirkungsbereiche umfasst;
- 20 Figur 9 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel einer als elektro-optischer Modulator ausgestalteten erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung, die einen U-förmigen Wechselwirkungsbereich umfasst;
- 25 Figur 10 eine Aufsicht auf ein Mach-Zehnder-Interferometer mit einem elektro-optischen Modulator gemäß dem Stand der Technik;
- 30 Figur 11 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Mach-Zehnder-Interferometers, das einen erfindungs-

gemäßen elektro-optischen Modulator mit zwei Wechselwirkungsbereichen umfasst;

- Figur 12 eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Mach-Zehnder-Interferometers, das einen erfindungsgemäßen elektro-optischen Modulator mit zwei Wechselwirkungsbereichen umfasst, in rein schematischer Darstellung;
- Figur 13 eine Aufsicht auf ein weiteres Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung, die als Photodetektor oder elektro-optischer Modulator ausgebildet sein kann;
- Figur 14 eine Aufsicht auf drei Kontaktelemente eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung, die mittels Drähten mit einer Anschlusseinrichtung für ein Koaxialkabel verbunden sind; und
- Figur 15 eine Schnittdarstellung, die Komponenten eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung zeigt, wobei deren Kontaktelemente durch eine Bondingschicht mit einer Anschlusseinrichtung für ein Koaxialkabel verbunden sind.

Alle Figuren zeigen rein schematische Darstellungen. In den Figuren sind gleiche Komponenten bzw. Elemente mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Die Figur 1 zeigt eine Aufsicht auf eine elektro-optische Einrichtung 1 gemäß dem Stand der Technik, die als Graphen-basierter Photodetektor ausgebildet ist. Der Figur 2 kann der Detektor im Schnitt entnommen werden. Dieser umfasst einen Wechselwirkungsbereich 2 mit einem Längsabschnitt 3 eines

- Wellenleiters 4 und einem aktiven Element 5 in Form eines Graphenfilms. Das aktive Element 5 erstreckt sich, wie man erkennt, abschnittsweise oberhalb des Wellenleiterlängsabschnitts 3, übergreift diesen konkret am rechten Ende des Wellenleiters 4. Da das aktive Element 5 den darunter liegenden
- 5 Wellenleiterlängsabschnitt 3 in der Aufsicht verdeckt, ist dieser in der Figur mit gestrichelten Linien dargestellt. Vorliegend besteht der Wellenleiter 4 und somit der zu dem Wechselwirkungsbereich 2 gehörige Längsabschnitt 3 dieses aus Titandioxid, wobei dies rein beispielhaft zu verstehen ist.
- 10 Das aktive Element 5 zeichnet sich durch eine größere Breite als der Wellenleiterlängsabschnitt 3 aus, so dass es zu beiden Seiten über diesen übersteht. An seinen seitlich des Wellenleiterlängsabschnitts 3 liegenden Seiten steht das aktive Element 5 jeweils mit einem von zwei beiden Seiten des Wellenleiterlängsabschnitts 3 angeordneten metallischen Kontaktelementen
- 15 6 in Kontakt. Die Kontaktelemente 6 können beispielsweise 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 umfassen oder aus einem oder mehreren dieser Metalle bestehen. Es kann sein, dass die Kontaktelemente mehrere Lagen aufweisen, die verschiedene Metalle umfassen
- 20 bzw. die aus verschiedenen Metallen bestehen können.
- Jedem der beiden dem Wechselwirkungsbereich 2 zugeordneten, mit dem aktiven Element 5 in Kontakt stehenden Kontaktelemente 6 ist jeweils ein Verbindungselement 7 zugeordnet, mit dem das jeweilige Kontaktelement 6
- 25 in Kontakt steht, konkret an seiner Unterseite. Das jeweilige Kontaktelement 6 verbindet mit anderen Worten das jeweilige aktive Element 5 mit einem Verbindungselement 7. Da die Verbindungselemente 7 in der Aufsicht von den Kontaktelementen 6 verdeckt sind, sind diese mit gestrichelten Linien dargestellt. Bei den Verbindungselementen 7 handelt es sich vorliegend um
- 30 vertikale elektrische Verbindungen, die im Englischen auch als Vertical In-

terconnect Access, kurz Via bzw. VIA bezeichnet werden. Die Verbindungselemente sind – genau wie die Kontaktelemente – metallisch, bestehen beispielsweise aus Kupfer, und erstrecken sich in vertikaler Richtung durch einen Chip oder Wafer oder ein Substrat, insbesondere Halbleitersubstrat, eines Chips oder Wafers, oberhalb von dem, insbesondere auf dem der Photodetektor 1 vorgesehen ist. Vorliegend befindet sich der Detektor 1 oberhalb eines Wafers 8 einer Halbleitervorrichtung, von der ein Teilschnitt in der Figur 2 gezeigt ist. Wafer 8 umfasst vorliegend einteiliges Siliziumsubstrat 9 und eine Mehrzahl von integrierten elektronischen Bauteilen 10, die sich bei dem gezeigten Beispiel in dem Halbleitersubstrat 9 erstrecken. Die integrierten elektronischen Bauteile 10, bei denen es sich insbesondere um Transistoren und/oder Widerstände und/oder Kondensatoren handeln kann, sind in der schematischen Figur 2 nur vereinfacht durch eine mit dem Bezugszeichen 10 versehene Linie mit Schraffur angedeutet. An entsprechender Stelle in dem Substrat 9 findet sich in hinlänglich vorbekannter Weise eine Vielzahl integrierter elektronischer Bauteile 10. Diese können in ebenfalls vorbekannter Weise Bestandteile von Prozessoren, etwa CPUs und/oder GPUs sein bzw. solche bilden.

Der Wafer 8 hat ein Front-End-of-Line (kurz FEOL) 11, in dem die Mehrzahl integrierter elektronischer Bauteile 10 angeordnet ist und ein darüber liegendes Back-End-of-Line (kurz BEOL) 12, in dem bzw. über das die integrierten elektronischen Bauteile 10 des Front-End-of-Lines 11 mittels verschiedener Metallebenen verschaltet sind. Die integrierten elektronischen Bauteile 10 im FEOL 11 und die zugehörige Verschaltung im BEOL 12 bilden in hinlänglich vorbekannter Weise integrierte Schaltkreise des Wafers 8. Ein FEOL 11 wird teilweise auch als Transistor-Frontend und ein BEOL 12 als Metall-Backend bezeichnet. Die Metallebenen umfassen eine Mehrzahl von weiteren Verbindungselementen 7, die vorliegend durch VIAs gegeben sind.

Auf dem Wafer 8 befindet sich eine Schicht 13 aus einem dielektrischen Material, vorliegend Siliziumdioxid (SiO_2), auf der sich der Wellenleiter 4 befindet. Es ist ferner eine weitere dielektrische Schicht 14 auf dem Wellenleiter 4 und der Schicht 13 vorgesehen, auf der das aktive Element 5 angeordnet ist.

5

Auf dem aktiven Element 5 ist noch eine obere Passivierungsschicht 15 vorgesehen, die vorzugsweise aus Al_2O_3 und/oder SiO_2 besteht.

Der Wellenleiter 4, das aktive Element 5, die Kontaktelemente 6, Verbindungselemente 7 und die Schichten 13, 14, 15 können auf aus dem Bereich der Chip- bzw. Waferherstellung vorbekannte Weise erhalten worden sein, beispielsweise durch (mehrschichtige) Materialabscheidung bzw. ein Transferverfahren und ggf. eine Strukturierung.

15 Entweder die dielektrische Schicht 13 oder die dielektrische Schicht 14 oder beide diese Schichten sind bei dem gezeigten Beispiel als Planarisierungsschichten ausgestaltet, die sich an ihrer in Figur 2 nach oben weisenden Seite durch eine Rauheit im Bereich von 1,0 nm RMS bis 0,1 nm RMS, insbesondere 0,6 nm RMS bis 0,1 nm RMS, bevorzugt 0,4 nm RMS bis 0,1 nm
20 RMS aus. Die Abkürzung nm steht hier in an sich bekannter Weise für Nanometer (10^{-9} m). Rauheiten in diesen genannten Bereichen können beispielsweise durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP) und/oder Resistplanarisierung, wie sie auch in der ebenfalls auf die Anmelderin zurückgehenden früheren deutschen Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10 2020 102
25 533.5 beschrieben ist, erhalten werden bzw. worden sein.

Wie man erkennt, wird über die mit den Kontaktelementen 6 des Photodetektors 1 verbundenen Verbindungselemente 7 und die Verbindungselemente 7 aus dem Wafer 8 ein Anschluss an eines oder mehrere der integrierten
30 elektronische Bauteile 10 realisiert sein.

Der gezeigte Photodetektor 1 dient in an sich bekannter Weise der Signalwandlung zurück von der optischen in die elektronische Welt. Es kann mit anderen Worten ein durch den Wellenleiter 4 geleitetes Lichtsignal in ein elektrisches Signal umgewandelt werden.

Das aktive Element ist derart relativ zu dem Wellenleiterlängsabschnitt 3 des Wechselwirkungsbereichs 2 angeordnet, dass es zumindest abschnittsweise dem evaneszenten Feld von elektromagnetischer Strahlung, die im Betrieb in dem Wellenleiter 4 und somit dem Längsabschnitt 3 geführt wird, ausgesetzt ist, so dass eine Wechselwirkung stattfinden kann. Vorliegend beträgt der Abstand zwischen der Oberseite des Wellenleiterlängsabschnitts 4 und der Unterseite des darüber liegenden Abschnitts des aktiven Elementes 5 etwa 10 nm. Die dielektrische Schicht

Die Figur 3 zeigt eine Aufsicht auf ein Ausführungsbeispiel einer ebenfalls als Photodetektor 1 ausgestalteten erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung. Diese zeichnet sich – im Gegensatz zu dem bekannten Photodetektor gemäß Figur 1 durch eine G-S-G-Konfiguration aus.

Konkret weist diese zwei Wechselwirkungsbereiche 2 auf, die jeweils einen Wellenleiterlängsabschnitt 3 und ein aktives Element 5, das oder das jeweils wenigstens ein elektro-optisch aktives Material, insbesondere Graphen, umfasst oder daraus besteht, umfassen. Bei dem gezeigten Beispiel ist das aktive Element 5 der erfindungsgemäßen Einrichtung ebenfalls durch einen Graphenfilm 13 gegeben. Es sei jedoch betont, dass es gemäß der Erfindung auch möglich ist, dass das aktive Element 13 durch einen Film mit oder aus wenigstens einem anderen bzw. weiteren elektro-optisch aktiven Material gegeben ist, beispielsweise einen Film mit oder aus einer Dichalkogenid-Graphen-Heterostruktur bestehend aus mindestens einer Lage Gra-

phen und mindestens einer Lage eines Dichalkogenids, oder durch einen Film, der mindestens eine Lage Bornitrid und mindestens eine Lage Graphen umfasst.

- 5 Die beiden Wellenleiterlängsabschnitte 3 der beiden Wechselwirkungsbereiche 2 des Photodetektors aus Figur 3 sind voneinander beabstandet angeordnet. Sie sind Bestandteil eines Wellenleiters 4. Der Wellenleiter 4 zeichnet sich abschnittsweise durch einen zumindest im Wesentlichen U-förmigen Verlauf mit zwei voneinander beabstandeten, sich zumindest im Wesentli-
- 10 chen parallel zueinander erstreckenden, geradlinigen Armen 4a, und einem die beiden Arme 4a verbindenden, geradlinigen Verbindungsabschnitt 4b aus und es liegt je einer der beiden Wellenleiterlängsabschnitte 3 im Bereich eines der Arme 4a.
- 15 In Analogie zu dem vorbekannten Detektor aus Figur 1 gilt für die hier zwei aktiven Elemente 5, dass sie sich zumindest abschnittsweise oberhalb des Wellenleiterlängsabschnitts des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches 2 erstrecken.
- 20 Es sind ferner nicht nur zwei sondern insgesamt drei Kontaktelemente 6 vorgesehen, die jeweils mit wenigstens einem der aktiven Elemente 5 in Kontakt stehen. Konkret ist ein inneres Kontaktelement 6, das zwischen den beiden beabstandeten Wellenleiterlängsabschnitten 3 angeordnet ist und als innerer Signal-Kontakt dient, und sind zwei äußere Kontaktelemente 6, die
- 25 jeweils auf der in Bezug auf das innere Kontaktelement 6 anderen Seite des jeweiligen Wellenleiterlängsabschnitts 3 angeordnet sind und jeweils als ein äußerer Masse-Kontakt dienen, vorgesehen. Das innere Kontaktelement 6 steht sowohl mit dem aktiven Element des einen der zwei Wechselwirkungsbereiche 2 als auch mit dem aktiven Element 5 des anderen der zwei
- 30 Wechselwirkungsbereichs 2 in Kontakt. Für die zwei äußeren Kontaktele-

mente 6 gilt, dass eines mit dem aktiven Element 5 des einen Wechselwirkungsbereichs 2 und das andere mit dem aktiven Element des anderen Wechselwirkungsbereichs 2 in Kontakt steht.

- 5 Das innere Kontaktelement 6 und die beiden äußeren Kontaktelemente 6 liegen, wie man erkennt auf einer Linie und fluchten miteinander. Sie bilden eine symmetrische G-S-G-Kontaktanordnung mit einem inneren Signal-Kontakt und zwei den inneren Signal-Kontakt einfassenden äußeren Masse-Kontakten. Im Ergebnis liegt eine bezüglich Masse und Signal sym-
- 10 metrische und dadurch sehr vorteilhafte Anordnung vor, von der sich Hochfrequenzsignale störungsfreier auf koaxiale Anordnungen übertragen lassen, worauf weiter unten noch eingegangen wird.

- Während der U-förmige Wellenleiterabschnitt sehr gut geeignet ist, um Platz
- 15 für den inneren Signal-Kontakt zu bieten, kann mit diesem ein Nachteil hinsichtlich der Symmetrie des elektrischen Signals verbunden sein. Die Absorption der elektromagnetischen Strahlung entlang der Ausbreitungsrichtung führt nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz dazu, dass in dem bzw. den aktiven Elementen im Bereich des in Lichtausbreitungsrichtung ersten
- 20 Armes 4a, also dem in Figur 3 linken Arm 4a, mehr absorbiert wird als in dem aktiven Element 5 des zweiten, in Figur 3 rechten Armes 4a. Dann kann die Hochfrequenzmode unvorteilhafter Weise asymmetrisch angeregt werden. Dieses Problem wird vorliegend dadurch verhindert, dass der Wellenleiterquerschnitt im U-förmigen Bereich des Wellenleiters 4 gezielt so angepasst
- 25 ist, dass die Interaktion des Lichts pro Länge entlang der Ausbreitungsrichtung mit dem aktiven Elementen 5 im ersten Arm 4a genau so viel geringer im Vergleich zum zweiten Arm 4a ist, dass die absorbierte Leistung in beiden Armen 4a gerade identisch ist. Dazu ist der Wellenleiterquerschnitt im ersten, linken Arm 4a breiter als im zweiten, rechten Arm 4a. So wird die optische
- 30 Mode im ersten Arm 4a weiter im Inneren des Wellenleiters 4 geführt und

damit die Interaktion im ersten Arm 4a reduziert. Die Querschnittsfläche im Bereich des ersten, linken Armes 4a des U-förmigen Wellenleiterabschnitts ist mit anderen Worten größer als die Querschnittsfläche im Bereich des zweiten, rechten Armes 4a. Das Verhältnis ist vorliegend so gewählt, das im ersten, linken Arm 4a die Hälfte der Leistung des einfallenden Lichtes absorbiert wird.

Abgesehen davon, dass der erfindungsgemäße Detektor 1 aus Figur 3 einen Wellenleiter mit einem U-förmigen Abschnitt und einen zweiten Wechselwirkungsbereich 2 mit einem zweiten Wellenleiterlängsabschnitt 3 und zweiten aktiven Element 5 sowie ein drittes Kontaktelement aufweist, kann er im Übrigen mit demjenigen gemäß Figur 1 übereinstimmen. Insbesondere, was die vorstehend in Bezug auf Figur 1 genannten Materialien und Herstellungsmöglichkeiten angeht, kann Übereinstimmung mit der Anordnung aus Figur 1 bestehen bzw. ist Übereinstimmung gegeben. Auch der erfindungsgemäße Detektor 1 aus Figur 3 ist ferner oberhalb eines Wafers 8 und einer dielektrischen Schicht 13 angeordnet und es sind die Schichten 14 und 5 vorhanden, so dass insoweit Übereinstimmung mit der Figur 2 besteht. Der erfindungsgemäße Detektor 1 ist bei dem dargestellten Beispiel mit anderen Worten in eine einen Wafer 8 umfassende Halbleitervorrichtung integriert. Diese Halbleitervorrichtung ist ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung. Eine solche kann eine Mehrzahl, beispielsweise mehrere zehn, mehrere hundert oder auch mehrere tausend, erfindungsgemäßer elektro-optischer Einrichtungen umfassen, die baugleich oder auch verschieden sein können. Aus einer erfindungsgemäßen Halbleitervorrichtung mit einem Wafer 8 kann durch das aus dem Stand der Technik hinlänglich bekannte Dicing eine Vielzahl erfindungsgemäßer Halbleitereinrichtungen erhalten werden, die dann jeweils einen Chip und eine oder mehrere erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtungen umfassen. Die erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung bzw. die erfindungsgemäßen elekt-

ro-optischen Einrichtungen können Bestandteile einer integrierten photonischen Plattform sein.

Alternativ dazu, dass die beiden beabstandeten Wellenleiterlängsabschnitte 3 der beiden Wechselwirkungsbereiche 2 im Bereich der beiden Arme 4a eines U-förmigen Wellenleiterabschnitts liegen, kann auch eine Gabelung vorgesehen sein. Ein Beispiel für einen entsprechenden Photodetektor 1 ist in der Figur 4 in der Aufsicht gezeigt. Wie man erkennt umfasst der Wellenleiter 4 hier eine Gabelung mit zwei abzweigenden Armen 4c, 4d und es liegt je einer der Wellenleiterlängsabschnitte 3 der beiden Wechselwirkungsbereiche 2 im Bereich eines Armes 4c, 4d der Gabelung. Alternativ dazu, dass innerhalb eines U-förmigen Wellenleiterabschnitts Platz für wenigstens ein inneres, als Signal-Kontakt dienendes Kontaktelement 7 geschaffen wird, steht der Platz hier zwischen den Beiden gabelungsarmen 4c, 4d zur Verfügung. Es ist ferner ein Splitter 16 vorgesehen, mit dem ein ankommendes Lichtsignal auf die beiden Arme 4c, 4d der Gabelung verteilt werden kann, nämlich zu gleichen Anteilen. Es handelt sich somit um einen 50/50-Splitter. Dieser kann beispielsweise als MMI-Splitter oder ein richtionaler Koppler ausgebildet sein oder einen solchen umfassen.

Die Ausgestaltung mit einer Gabelung bietet den Vorteil einer symmetrischen Absorption. Ein abweichender Wellenleiterquerschnitt in den beiden Armen 4c, 4d ist somit nicht erforderlich.

Ein Ausführungsbeispiel eines Photodetektors 1 gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung ist in der Figur 5 gezeigt. Diese umfasst im Gegensatz zu den beiden Ausführungsbeispielen aus den Figuren 3 und 4 nicht zwei separate, voneinander beabstandete Wechselwirkungsbereiche sondern einen durchgehenden, zumindest im Wesentlichen U-förmigen Wechselwirkungsbereich 2. Dieser weist – in Analogie zu Figur 3 – einen zumindest im Wesentlichen

U-förmigen Wellenleiterlängsabschnitt 3 mit zwei voneinander beabstandeten Armen 4a und einem die beiden Arme 4a verbindenden Verbindungsabschnitt 4b, und ein ebenfalls zumindest im Wesentlichen U-förmiges aktives Element 5 mit zwei voneinander beabstandeten Armen 5a und einem die
5 beiden Arme 5a verbindenden Verbindungsabschnitt 5b auf. Der Wellenleiterlängsabschnitt 3 ist, wie man erkennt, Bestandteil eines nicht ringförmig geschlossenen sondern offenen Wellenleiters 4.

Das U-förmige aktive Element 5 umfasst wiederum wenigstens ein elekt-
10 ro-optisch aktives Material oder besteht daraus. Auch bei dem Ausführungsbeispiel gemäß Figur 5 ist das aktive Element 5 durch einen Graphenfilm gegeben, wobei dies wieder rein beispielhaft zu verstehen ist. Das aktive Element erstreckt sich abschnittsweise oberhalb des Wellenleiterlängsabschnitts 3. Es sind ferner zwei Kontaktelemente 6 vorgesehen, die jeweils mit
15 dem aktiven Element 5 in Kontakt stehen. Dabei ist genau ein inneres Kontaktelement 6 vorhanden, das innerhalb des zumindest abschnittsweise zumindest im Wesentlichen U-förmigen Wellenleiterlängsabschnitts 3 angeordnet ist und als innerer Signal-Kontakt dient, und es ist genau ein äußeres Kontaktelement 6 vorgesehen, das zumindest im Wesentlichen U-förmig mit
20 zwei voneinander beabstandeten Armen 6a und einem die beiden Arme 6a verbindenden Verbindungsabschnitt 6b ausgebildet ist, und den U-förmigen Wellenleiterlängsabschnitt 3 außenseitig umgreift. Die beiden Arme 6a des äußeren Kontaktelementes 6 dienen hier zumindest abschnittsweise jeweils als ein äußerer Masse-Kontakt. Wie man sieht, umgreift das U-förmige äu-
25 ßere Kontaktelement 6 das U-förmige aktive Element 5 komplett, mit anderen Worten über die gesamte Ausdehnung des U's. Der U-förmige Wellenleiterlängsabschnitt 3 wird fast vollständig umgriffen bzw. eingefasst.

Dem äußeren U-förmigen Kontaktelement ist nicht nur ein Verbindungsele-
30 ment 7 zugeordnet, sondern dieses steht, wie man erkennt, mit insgesamt

sechs solchen unterseitig in Kontakt. Über die mehreren Verbindungselemente 7 kann ein besonders gleichmäßiges Massepotential hergestellt werden. Die Verbindungselemente 7 sind zweckmäßiger Weise voneinander beabstandet angeordnet, insbesondere über die Ausdehnung des äußeren
5 Kontaktelementes 6 gleichmäßig verteilt.

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass es natürlich möglich ist, dass bei dem Ausführungsbeispiel aus Figur 3 anstelle der zwei separaten äußeren Kontaktelemente 6 ein durchgehendes, den U-förmigen Wellenleiterabschnitt außenseitig umgreifendes bzw. einfassendes äußeres Kontaktelement 6 vorgesehen sein könnte. Es könnte beispielsweise das U-förmige
10 äußere Kontaktelement 6 aus Figur 5 bei dem Detektor 1 aus Figur 3 zum Einsatz kommen. In analoger Weise ist es prinzipiell möglich, dass bei dem in Figur 5 gezeigten Beispiel anstelle des einen U-förmigen äußeren Kontaktelementes zwei separate äußere Kontaktelemente 6 vorgesehen werden,
15 wie sie in Figur 3 gezeigt sind.

Auch bei dem Beispiel gemäß Figur 5 gilt bevorzugt, dass die Querschnittsfläche des Wellenleiters 4 im Bereich des ersten, linken Armes 4a größer ist
20 als im Bereich des zweiten, rechten Armes 4a, insbesondere derart, dass im ersten Arm die Hälfte der Leistung absorbiert wird, und zwar aus den gleichen Gründen, wie vorstehend im Zusammenhang mit Figur 3 erläutert.

Für die Einkopplung von Licht in den Wellenleiter 4 ist jeweils eine Koppleinrichtung 17 vorgesehen, die sich an dem in den Figuren 1, 3, 4 und 5 linken Ende des Wellenleiters 4 befindet. Der Modulator 1 befindet sich jeweils
25 an dem anderen, in den Figuren jeweils rechten Ende des Wellenleiters 4. Der Wellenleiter endet jeweils hinter dem Modulator.

Alternativ dazu, dass eine erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung 1 als Photodetektor ausgebildet ist, kann es sich bei einer solchen beispielsweise auch um einen elektro-optischen Modulator handeln. Dann unterscheidet sie sich von einem Photodetektor im Wesentlichen dadurch, dass
5 der bzw. der jeweilige Wechselwirkungsbereich zwei aktive Elemente 5 oder eine aktives Element 5 und eine (konventionelle) Elektrode beispielsweise mit oder aus Titannitrid oder Indiumzinnoxid umfasst.

Beispiele erfindungsgemäßer elektro-optischer Modulatoren können den Figuren 8 und 9 entnommen werden. Die Figur 6 zeigt – in Analogie zu der
10 Figur 1 eine Aufsicht auf einen konventionellen elektro-optischen Modulator, wie er aus dem Stand der Technik vorbekannt ist. Die Figur 7 zeigt den vorbekannten Modulator aus Figur 6 im Schnitt. Dies in Analogie zu Figur 2 wieder als Bestandteil einer Halbleitervorrichtung mit einem Wafer 8.

15 Wie man insbesondere in der Schnittdarstellung aus Figur 7 erkennt, sind bei die beiden aktiven Elemente 5a, 5b in vertikaler Richtung voneinander beabstandet und das eine aktive Element 5a erstreckt sich abschnittsweise oberhalb des anderen aktiven Elementes 5b. Der Abstand kann beispielsweise
20 nm betragen. Zwischen den beiden aktiven Elementen 5a, 5b ist eine weitere Schicht 18 mit oder aus einem dielektrischen Material vorgesehen, deren Dicke zwischen den beiden aktiven Elementen 5a, 5b entsprechend ist.

Die beiden aktiven Elemente 5 sind ferner, wie man in der Schnittdarstellung
25 gut erkennt, in horizontaler Richtung derart versetzt zueinander angeordnet, dass sie in einem Überlappungsbereich abschnittsweise (mit Abstand in vertikaler Richtung) übereinander liegen. Der Überlappungsbereich liegt oberhalb des Wellenleiterlängsabschnitts. Für das erfindungsgemäße Ausführungsbeispiel gemäß Figur 8 gilt dann, dass in beiden Wechselwirkungsbe-
30 reichen 3 die aktiven Elemente entsprechend zueinander und relativ zu dem

Wellenleiterlängsabschnitt 3 angeordnet sind. Für das Ausführungsbeispiel gemäß Figur 9 gilt dies für den einen U-förmigen Wechselwirkungsbereich 2 und zwar über dessen gesamte Ausdehnung. In den Aufsichten aus den Figuren 6, 7 und 8 (und auch den Figuren 10 bis 12) ist der Versatz und abschnittsweise Überlapp der aktiven Elemente 5 durch entsprechende gestrichelte Linien angedeutet.

Im Falle eines Modulators mit zwei aktiven Elemente bzw. einem aktiven Element und einer Elektrode in dem bzw. in dem jeweiligen Wechselwirkungsbereich gilt dann zweckmäßiger Weise, dass mit dem aktiven Element 5a des oder des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches 2 das oder eines der inneren Kontaktelemente 6 und mit dem anderen aktiven Element 5b oder der Elektrode des oder des jeweiligen Wechselwirkungsbereiches 2 das oder eines der äußeren Kontaktelemente 6 in Kontakt steht oder umgekehrt.

Bei dem Beispiel aus Figur 8, das von seinem sonstigen Aufbau her zu demjenigen gemäß Figur 3 korrespondiert, steht das innere, zwischen den beiden Wellenleiterlängsabschnitten 3 der beiden Wechselwirkungsbereiche 2 angeordnete Kontaktelement 6 mit einem aktiven Element 5a, 5b von beiden Wechselwirkungsbereiche 2 in Kontakt, konkret an gegenüberliegenden Seiten. Bezüglich der beiden äußeren Kontaktelemente 6 gilt hier, dass diese jeweils nur mit einem aktiven Element 5a, 5b eines Wechselwirkungsbereichs 2 in Kontakt stehen.

Bei dem Beispiel aus Figur 9 mit nur einem durchgehenden, U-förmigen Wechselwirkungsbereich 2, das von seinem sonstigen Aufbau zu demjenigen gemäß Figur 5 korrespondiert, steht das innere Kontaktelement 6 mit dem einen 5a der beiden aktiven Elemente 5a, 5b und das eine äußere Kontaktelement 6 mit dem anderen 5b der beiden aktiven Elemente 5a, 5b in Kontakt.

Dies jeweils über den gesamten Innen- bzw. den gesamten Außenumfang des jeweiligen aktiven Elementes 5a, 5b.

Ein erfindungsgemäßer elektro-optischer Modulator kann insbesondere zur
5 optischen Signalcodierung verwendet werden.

Da das Lichtsignal nicht absorbiert sondern moduliert wird, sind Koppel-Einrichtungen 17 hier jeweils an beiden Enden des Wellenleiters 4 vorgesehen. Eine der Koppel-Einrichtungen dient im Betrieb der Einkopplung
10 und die andere der Auskopplung eines optischen Signals.

Eine erfindungsgemäße elektro-optische Einrichtung 1 kann auch als Bestandteil eines Interferometers, beispielsweise
Mach-Zehnder-Interferometers, etwa eines als Phasenmodulator dienenden
15 Mach-Zehnder-Interferometers, ausgestaltet sein. Dies insbesondere, wenn es sich bei der elektro-optischen Einrichtung 1 um einen Modulator handelt. Zugehörige Ausführungsbeispiele können den Figuren 11 und 12 entnommen werden. In Figur 10 ist – wiederum in Analogie zu den Figuren 1 und 6 mit aus dem Stand der Technik vorbekannten Detektoren und Modulatoren
20 – ein als Phasenmodulator dienendes Mach-Zehnder-Interferometer mit einem aus dem Stand der Technik vorbekannten elektro-optischen Modulator (vgl. Figur 6) dargestellt.

Das Interferometer aus Figur 11 umfasst, wie man erkennt, einen erfindungsgemäßen Modulator 1 der in Figur 8 gezeigten Ausgestaltung und
25 dasjenige aus Figur 12 einen erfindungsgemäßen Modulator 1 der in Figur 9 gezeigten Ausgestaltung. Sowohl für das Interferometer aus Figur 10 als auch die Interferometer aus den Figuren 11 und 12 gilt, dass diese zusätzlich zu den Modulatoren 1 aus den Figuren 6, 8 bzw. 9 einen Wellenleiter-Bypassabschnitt 19 umfassen, der den jeweiligen Modulator und somit
30

dessen Wechselwirkungsbereich 2 (Figuren 10 und 12) bzw. Wechselwirkungsbereiche 2 (Figur 11) sozusagen „überbrückt“, so dass insbesondere von der gleichen Quelle stammendes Licht durch den Wellenleiter-Bypassabschnitt 19 an dem Wechselwirkungsbereich 2 oder an den beiden Wechselwirkungsbereichen 2 vorbeigeführt werden kann. Der Wellenleiter 4 ist, wie man erkennt, kein ringförmig geschlossener Wellenleiter, sondern er hat zwei offene Enden, an denen optische Signale ein- und ausgekoppelt werden können, konkret mittels der Koppeleinrichtungen 17.

Der jeweilige Wellenleiter-Bypassabschnitt 19 bildet in an sich bekannter Weise einen von zwei Interferometerarmen und der obere Arm, in dem der jeweilige Modulator 1 liegt, den zweiten. Die beiden Interferometerarme haben, wie aus dem Stand der Technik hinlänglich vorbekannt, zweckmäßiger Weise verschiedene Wegstrecken.

An den Gabelungspunkten, von dem die Interferometerarme abgehen und wieder zusammenlaufen, befindet sich jeweils ein Splitter 16, der beispielsweise als MMI (Multimode Interferometer) oder direktonaler Koppler ausgebildet sein oder wenigstens einen solchen umfassen kann. Es kann sich insbesondere um ein reziprokes MMI oder einen reziproken direktonalen Koppler handeln. Das bedeutet, dass Licht von der Seite mit einem Arm kommend jeweils zu Hälfte auf die beiden auf der gegenüberliegenden Seite des MMI bzw. direktonalen Kopplers liegenden Wellenleiteranschlüsse aufgeteilt wird und umgekehrt, also Licht von der Seite mit zwei Armen kommend auf der Seite mit einem Anschluss kombiniert wird.

Am Eingang des Interferometers werden optische Signale aufgeteilt und in beispielsweise zwei Armen geführt. Über ein aktives oder mehrere aktive Bauteile, in Figur 11 und 12 beispielsweise für ein aktives Bauteil gezeigt, wird eine Phasenverschiebung des sich in beiden Armen ausbreitenden

Lichts erzeugt. Aktive Bauteile können sich in allen Armen eines Interferometers befinden. Am Ausgang des Interferometers werden die optischen Pfade zusammengeführt und das Licht überlagert. Aus der Phasenlage ergibt sich konstruktive oder destruktive Interferenz.

5

Es angemerkt, dass alternativ dazu, dass die Ein- und Auskopplung des optischen Signals von zwei gegenüberliegenden Seiten her erfolgt, wie in den Figuren 8, 9, 11 und 12 gezeigt, die Anordnung prinzipiell auch wie in Figur 13 dargestellt getroffen sein kann. Dann kann die Ein- und Auskopplung von
10 der gleichen Seite her erfolgen, was vorteilhaft bezüglich der Ankopplung von Glasfasern, die in Faserblöcken zu Gruppen vormontiert sein können, sein kann. Der Wellenleiter 4 kann dazu beispielsweise insgesamt zumindest im Wesentlichen U-förmig ausgebildet sein. In der stark vereinfachten, rein schematischen Figur 13 ist dies beispielhaft für eine erfindungsgemäße
15 elektro-optischen Einrichtung 1 gezeigt, von der nur ein inneres und zwei äußere Kontaktelemente 6 dargestellt sind. Wie man erkennt, liegen die an den beiden Enden des Wellenleiters 4 angeordneten Koppereinrichtungen 17 hier nebeneinander. Auch wenn hier beispielhaft zwei separate äußere Kontaktelemente 6 gezeigt sind, was zu den Figuren 8 und 11 korrespondiert,
20 versteht sich, dass die Ein- und Auskopplung von der gleichen Seite her, etwa mit dem Wellenleiterverlauf aus Figur 13, auch für den Fall eines U-förmigen äußeren Kontaktelementes 6 gewählt sein kann, wie es den Figuren 9 und 12 entnehmbar ist.

25 Die erfindungsgemäße G-S-G-Kontaktkonfiguration aller vorstehend beschriebener erfindungsgemäßer Ausführungsbeispiele bietet den großen Vorteil, dass sich Hochfrequenzsignale störungsfreier auf koplanare bzw. koaxiale Anordnungen übertragen lassen.

Beispielsweise kann wenigstens eine Anschlusseinrichtung 20 zur Verbindung mit einem koaxialen und/oder koplanaren Leiter vorgesehen sein bzw. werden, wie sie schematisch in Figur 14 in der Aufsicht und in Figur 15 im Schnitt dargestellt ist. Die Anschlusseinrichtung 20 umfasst ihrerseits drei
5 Anschluss-Kontaktelemente 21, konkret ein inneres, als Massekontakt dienendes Anschluss-Kontaktelement 21 und zwei äußere Anschluss-Kontaktelemente 21, die zu zwei Seiten des inneren Kontaktelementes angeordnet sind, dieses also praktisch einfassen, und als Signalkontakte dienen. Es liegt also eine G-S-G-Kontaktanordnung vor. Sie weist
10 ferner in der Figur nicht weiter dargestellte Anschlussmittel für das Anschließen eines Koaxialkabels und/oder eines koplanaren Leiters auf.

Die elektrisch leitfähige Verbindung einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung 1 mit einer Anschlusseinrichtung 20 zur Verbindung
15 mit einem koaxialen und/oder koplanaren Leiter, kann beispielsweise mittels Drähten 22 realisiert sein, wie es in Figur 14 gezeigt ist. Hierzu steht das eine freie Ende des jeweiligen Drahtes 22 mit einem der Kontaktelemente 6 der erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung 1 und dessen anderes
20 freie Ende mit einem der Anschluss-Kontaktelemente 21 der Anschlusseinrichtung 20 in Kontakt. Die Drähte können insbesondere aus Metall, beispielsweise Aluminium oder Gold sein.

Wie man erkennt, laufen die Anschluss-Kontaktelemente 21 der Anschlusseinrichtung 20 mit ihren in der Figur nach oben weisenden Enden auseinander,
25 der, was der Anpassung an die in der Regel größeren Dimensionen herkömmlicher Koaxialkabel oder koplanarer Leiter dienen kann.

Alternativ oder zusätzlich zu einer Verbindung mittels Drähten 22 kommt auch ein Bonding in Frage, wie es schematisch in Figur 15 gezeigt ist. In
30 diesem Fall ist jeweils ein Anschluss-Kontaktelement 21 der Anschlussein-

- richtung 20 oberhalb eines Kontaktelementes 6 einer erfindungsgemäßen Einrichtung 1 bzw. – was die Beispiele aus den Figuren 5, 9 und 12 mit einem durchgehenden, U-förmigen äußeren Kontaktelement 6 angeht, oberhalb eines der Arme des äußeren Kontaktelementes 6 angeordnet. Die
- 5 elektrisch leitfähige Verbindung ist hier über eine Bondingschicht 23 realisiert, über welche die Kontaktelemente 6, 21 miteinander gebondet sind. Die Bondingschicht kann aus leitfähigem Klebstoff, beispielsweise Silber oder Gold bestehen.
- 10 Es sei angemerkt, dass die in den Figuren 14 und 15 dargestellte Anordnung mit einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Einrichtung 1 und einer Anschlusseinrichtung 20 zur Verbindung mit einem koplanaren bzw. coaxialen Leiter ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen elektro-optischen Anordnung ist.