



(19)  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 035 559 A1** 2010.02.11

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 035 559.3**

(22) Anmeldetag: **30.07.2008**

(43) Offenlegungstag: **11.02.2010**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01L 51/52** (2006.01)  
**H01L 51/44** (2006.01)

(71) Anmelder:  
**Goihl, Rupert, 93336 Altmannstein, DE**

(72) Erfinder:  
**gleich Anmelder**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
 gezogene Druckschriften:

**WO 2005/0 31 884 A1**  
**EP 19 28 039 A1**  
**WO 2007/0 39 062 A1**  
**WO 2005/1 14 748 A2**  
**US 69 95 502 B2**  
**US 71 22 955 B2**

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

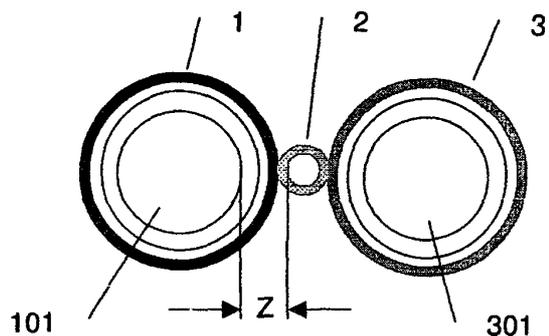
(54) Bezeichnung: **Elektrolumineszenz oder Photovoltaikquelle**

(57) Zusammenfassung: Elektrolumineszenz- und Photovoltaikquellen aus anorganischen Halbleitern sind bei hohen Effizienzen oft teuer herzustellen. Organische LED oder Photovoltaikquellen sind meist preiswerter zu fertigen, besitzen aber eine kürzere Lebensdauer und geringeren Wirkungsgrad. Gleichzeitig können z. B. LED oder Photovoltaikquellen kaum in ICs bei Abmessungen integriert werden, die nur im Bereich der Strukturgrößen der Halbleiterbauelemente auf dem IC liegen.

Durch eine Kombination von optischen Antennen mit Nano-Emittern bzw. Spannungsquellen können die erfindungsgemäßen Licht- oder Spannungsquellen erhöhte Quantenausbeuten bei minimalster Baugröße eines einzelnen Elements und gleichzeitig relativ geringem Fertigungsaufwand erzielen.

Die einzelnen Licht- oder Spannungsquellen bestehen dazu aus Partikeln 1, sowie damit im Abstand Z vom Kern 101 bzw. 301 elektrisch leitfähig verbundenen Medien 2 und optionalen Partikeln 3. Die Partikel 1 und 3 können mittels metallischer Kerne 101 oder 301 die Quantenausbeute des Elements 2 erhöhen und zugleich den elektrischen Kontakt zum Element 2 herstellen. Sie können z. B. mittels funktionalisierter Moleküle selbsttätig an verschiedene elektrische Leiterbahnen oder Leiterschichten gebunden werden.

Die erfindungsgemäßen Licht- bzw. Spannungsquellen lassen sich als Bausteine für ICs genauso wie für großflächige Leuchtmittel oder Photovoltaikzellen mit erhöhter Lebensdauer einsetzen.



**Beschreibung**

Technisches Gebiet:

**[0001]** Die Erfindung betrifft den Aufbau von Elektrolumineszenzquellen und gleichartigen Photovoltaikelementen gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 sowie Verfahren zu deren Herstellung.

Stand der Technik:

**[0002]** Bekannt sind aus vorwiegend anorganischen Halbleiterschichten aufgebaute Lumineszenzleuchtmitel und vergleichbar aufgebaute Photovoltaikelemente mit oder ohne integrierten Halbleiter-Quantenpunkten. Beispielsweise in der älteren GB 1499897 oder in US 5382813 werden Licht emittierende Dioden (LED) vorgestellt. Bei diesen LEDs oder Photovoltaikelementen erfolgt die Licht- bzw. Spannungserzeugung im Inneren von Halbleiterschichten mit hohem Brechungsindex und hohen Anforderungen an die Schichtqualitäten.

**[0003]** Nachteilig bei dieser Technik sind die einerseits hohen Herstellkosten der reinen Schichten bzw. die verringerte Quantenausbeute bei geringerer Halbleiter-Qualität, die z. B. durch strahlungslose Rekombinationen an Gitterdefekten hervorgerufen wird. Sowie die schwierige Extraktion des Lichts aus dem hochbrechenden Halbleiterelement aufgrund von Totalreflexionen an der Grenzschicht zur Umgebung.

**[0004]** Im Stand der Technik sind auch Lumineszenzleuchtmitel bzw. entsprechende Photovoltaikelemente, die aus vorwiegend organischen Halbleiterschichten mit oder ohne integrierten Nanokristallen bestehen. US 2005/0214967 zeigt z. B. ein derartiges Photovoltaikelement. In WO 2005/011013 oder WO 03/061026 sind dagegen entsprechende organische Elektrolumineszenzgeräte (OLED) beschrieben.

**[0005]** Von Nachteil bei diesen Lösungen sind die teilweise geringeren Wirkungsgrade bzw. Lichtausbeuten und die beschränkte Farbstabilität. OLEDs sind z. B. empfindlich gegenüber Verunreinigungen und bestimmte Emitterfarbstoffe altern schneller als andere. Es sind jedoch in der Regel keine Funktionselemente vorhanden, die diesen Veränderungen entgegensteuern könnten.

**[0006]** Offenbart sind auch Geräte zur Lichterzeugung wie in WO 99/16106 dargestellt, bei welchen durch organische Moleküle tunnelnde Elektronen verwendet werden, um die Moleküle zur Lumineszenz anzuregen.

**[0007]** Diese Geräte haben den Nachteil, dass die lumineszierenden organischen Moleküle mit den Elektroden nicht fest verbunden sind. Dies erschwert die Herstellung, weil z. B. der erforderliche Elektrodenabstand nicht zwangsläufig gewährleistet ist und bewirkt auch die Gefahr, dass sich Moleküle und Elektroden relativ zu einander verschieben. Dadurch kann aber die Lumineszenz gelöscht werden, wenn die Moleküle sich zu nahe an den Metallelektroden befinden. Auch kann durch die beschriebenen Elektroden die intrinsische Quantenausbeute der Moleküle nicht erhöht werden.

**[0008]** Weiterhin kennt man auch anorganischen LEDs ähnliche Geräte, die mit zusätzlichen Antennen versehen sind, um die Quantenausbeute zu steigern (z. B. J. S. Bitteen et al., „Plasmon-Enhanced Photoluminescence of Silicon Quantum Dots: Simulation and Experiment“, J. Phys. Chem. C 2007, 111, Seiten 13372 bis 13377)

**[0009]** Nachteile bei dieser Lösung sind das immer noch bestehende grundsätzliche Problem der Lichtextraktion aus dem Halbleiterkristall und die vergleichsweise hohen Herstellkosten bei konventionellen Herstellverfahren. Weiterhin ist das vorgestellte Konzept rel. wenig flexibel: Es ist nicht möglich z. B. einfach die Emittersubstanz (Si-Quantenpunkte) und zugehörige Antennen, die gemeinsam für eine bestimmte Emissionsfrequenz optimiert wurden, mit Emittersubstanz und Antennen anderer Wellenlängen zu mischen, weil die Antennen für den gesamten Halbleiterkristall ausgelegt sind. Die Herstellung von „mehrfarbigem“ Emittieren (z. B. für Weißlicht) ist somit erheblich erschwert. Außerdem besitzt die vorgestellte LED ein rel. großes Volumen, weil die Antennen nur die Verstärkung der strahlenden Zerfallsrate bewirken sollen. Das heißt, die Größe einer LED lässt sich weiter reduzieren, wenn zur el. Kontaktierung der Emittersubstanz keine separaten Funktionselemente erforderlich sind.

**[0010]** Schließlich kennt man auch OLEDs mit in die Halbleiterschichten integrierten metallischen Antennen, die mit el. isolierenden Abstandshaltern umhüllt sind (WO 2005/031884). Die Antennen erhöhen die Quantenausbeute von Emittieren, die im geeigneten Abstand zur metallischen Antennenoberfläche liegen. Die Abstandshalter verhindern eine Löschung der Lumineszenz bei zu geringen Abständen.

**[0011]** Diese Lösung hat aber den Nachteil, dass die Abstandshalter zwar den minimalen Abstand der Strahlungs-Emitter beschränken, den wirklichen Abstand aber nicht festlegen können. Es befindet sich also auch Emittersubstanz in erheblich größerer Entfernung von einer Antennenoberfläche in der OLED. Die Quantenausbeute nimmt bei zu großen Abständen aber wieder ab.

**[0012]** Ein weiterer Nachteil entsteht dadurch, dass die Ausrichtung der Emitterdipole (z. B. eines organischen Emittermoleküls) relativ zur Antennenoberfläche unbestimmt ist, d. h. der Emitterdipol sich in einer beliebigen Ausrichtung zur Antenne befinden kann. Aber nur bei senkrechter Ausrichtung des Emitterdipols kann die maximale Quantenausbeute erreicht werden. Ebenso ist es nicht möglich Emittersubstanz bestimmter Wellenlängen und zugehörige, für diese Emittersubstanz und Wellenlänge optimierte Antennen, effizient mit Emittern und Antennen anderer Wellenlängen zu mischen, weil die Emitter und Antennen nicht in einer Einheit kombiniert sind.

**[0013]** Der allgemeine Stand der Technik erlaubt zudem in der Regel nicht die direkte Erzeugung von polarisierter Lichtstrahlung, so dass für Anwendungen bei welchen diese benötigt wird, die Lichtausbeute durch Polarisationsfilter reduziert wird. Die Lichtquellen oder Photovoltaik Elemente des Stands der Technik lassen sich häufig auch nicht in integrierte Schaltungen von z. B. Mikrochips mit Abmessungen einbinden, die nur im Bereich der Strukturweiten liegen.

#### Darstellung der Erfindung:

**[0014]** Aufgabe der Erfindung ist es, die Lichtquellen bzw. Leuchtmittel oder Photovoltaik Elemente bzw. Spannungsquellen darzustellen, bei welchen die vorgenannten Nachteile nicht bestehen, sondern die eine erhöhte Quantenausbeute aufweisen, auch wenn die intrinsische Ausbeute – z. B. wegen geringerer Halbleiterqualitäten – reduziert ist. Durch die erfindungsgemäßen Lichtquellen und Photovoltaik Elemente werden Alterungserscheinungen und Farbveränderungen, wie sie z. B. bei OLEDs und PLEDs bekannt sind, erheblich reduziert, weil optische Antennen verminderte Wirkungsgrade der Emittersubstanzen ausgleichen und ihre vorzeitige Alterung verhindern können.

**[0015]** Eine weitere Aufgabe besteht darin, ein flexibles System zu präsentieren, bei dem einzelne Antennemitter aus verschiedensten Emittersubstanzen mit zugehörigen optischen Antennen kombiniert werden. Dazu werden optische Antennen und die Emittersubstanz in einer exakt definierten Entfernung voneinander durch einem el. Kontakt verbunden. Damit können nicht nur halbleitende Emittersubstanzen, sondern z. B. auch Metallcluster oder Karbonnanoröhren mit den Antennen kombiniert werden, so dass diese Emitter auch an Wechselspannung betrieben werden können.

**[0016]** Bestimmte Ausführungsvarianten dieser Erfindung erleichtern die Lichtauskopplung durch Lichterzeugung an der Oberfläche. Die Herstellung kann z. B. dabei durch Selbstorganisation der einzelnen Nano-Lichtquellen auf präparierten Substraten kostengünstiger als bei konventionellen Epitaxieverfahren erfolgen, weil einkristalline Schichten nicht erforderlich sind.

**[0017]** Zusätzlich kann die Größe der einzelnen Lichtquelle in dieser Erfindung minimal werden, weil der Stromtransport im Wesentlichen über die integrierten Antennenpartikel läuft und gleichzeitig die Lumineszenzlöschung vermieden wird, die durch el. Kontakte (insbesondere Metallkontakte) anderweitig erzeugt würde. Dadurch können z. B. Geräte realisiert werden, die bei einer Größe im mm-Bereich Millionen von individuell ansteuerbaren Antennenelementen besitzen, wenn sie – wie in bestimmten Ausführungsvarianten dargestellt – in Mikrochips integriert werden.

**[0018]** Und schließlich sind Emitter und Empfänger realisierbar, die selektiv polarisiertes Licht erzeugen bzw. absorbieren. Dadurch und weil durch die Antennen angeregte Zustände in den Emittersubstanzen schneller zerfallen, eignen sie sich für Hochfrequenzanwendungen z. B. auch im Bereich der Quantenkryptographie.

**[0019]** Diese Aufgaben werden durch Lichtquellen oder Photovoltaik Elemente mit den Merkmalen des Patentspruchs 1 sowie der Ansprüche 32 und folgend gelöst. Ausgestaltungen und Abwandlungen sind Gegenstand der jeweiligen abhängigen Ansprüche.

**[0020]** Die Lichtquellen und Photovoltaik Elemente der gegenständlichen Erfindung sind im Wesentlichen einander entsprechend aufgebaut, weshalb nachfolgend zur Abkürzung oft nur die Lichtquellen benannt sind, jedoch gleichwohl die Photovoltaik Elemente bzw. Spannungsquellen gemeint sind.

**[0021]** Die Lichtquellen bestehen aus elektrisch leitfähigen Kontaktpartikeln, die einzeln oder paarweise mit lumineszierenden (bzw. für Photovoltaik) absorbierenden Elementen gekoppelt sind. Diese lumineszierenden/absorbierenden Elemente können unterschiedlichster Art sein und werden im Folgenden nur einfach Lumophor genannt. Die elektrisch leitfähigen Kontaktpartikel können einen metallischen Kern besitzen. Im metallischen Kern des Kontaktpartikels können durch den Lumophor oder durch einfallendes Licht Oberflächenplasmonen angeregt werden, welche die Quantenausbeute der Lichtquelle bzw. des Photovoltaikelements steigern können. Deshalb werden die Kontaktpartikel im Weiteren oft nur noch als Antennen bezeichnet, auch wenn sie in einzelnen Ausführungsfällen keine metallischen Kerne besitzen müssen.

**[0022]** Um größere Leuchtmittel zu erzeugen wird eine Mehrzahl dieser Lichtquellen an elektrische Leiterbahnen bzw. Leiterschichten gekoppelt. Dies kann durch Ablagern (z. B. Sedimentieren aus einer Lösung) oder Aufwachsen (z. B. mittels PVD, CVD oder MOCDV) der einzelnen Lichtquellen oder ihrer Komponenten (den Antennen und Lumophoren) auf den Leiterschichten geschehen, so dass sie auf den Leiterschichten aufliegen. Oder es kann durch Immobilisieren auf Molekülen, die spezifische Ankergruppen für die einzelnen Lichtquellen bzw. ihre Komponenten besitzen und sich auf den Leiterbahnen befinden, geschehen. Auf die gleiche Weise können die Komponenten der Lichtquellen, also die Antennen und Lumophore, untereinander selbsttätig verknüpft werden.

**[0023]** Beispielsweise mittels der Methoden von [8] oder [18] können aus Nanopartikeln definiert Partikelketten erzeugt werden. Auf sphärischen Partikeln weisen die SAM-Schichten „Fehlstellen“ bzw. Pole auf. Solche Methoden können verwendet werden, um „vorgefertigte“ Antennenemitter herzustellen, die dann später auf z. B. einer Leiterschicht immobilisiert werden können. Es können z. B. ausgehend von einem Nanokristall als Lumophor Trimere aus einem Lumophor und zwei Antennen erzeugt werden.

**[0024]** Die Bausteine in dieser Erfindung können z. B. mittels der Techniken der selbstorganisierenden Monolagen (=SAM) und funktionalisierter molekularer Brücken zusammengefügt werden. Diese Moleküle können organische Drähte (z. B. konjugierte organische Polymere), biologische Materialien wie DNA aber auch anorganische Moleküle (z. B. Polysilane) sein. Weitere Beispiele an geeigneten Brückenmolekülen finden sich z. B. in WO 2004/022714 – dort werden molekulare Brücken vorgestellt, die sich z. B. zum Injizieren von Elektronen oder Löchern in einen Lumophor eignen – oder in US6979544, wo ebenfalls molekulare Drähte vorgestellt werden, die sich in dieser Erfindung eignen. In WO 02/020873, WO03/074510, WO2005/083435 finden sich weitere Details zum Erzeugen von SAM's auf verschiedenen Substraten. In DE 20 2005 012 142 z. B. findet sich eine vergleichbare Anwendung, bei der mittels molekularer Drähte Kontakte verbunden werden. WO 2006/093467, WO 03/041182 oder WO 95/02251 zeigen molekulare Dioden, welche wie in dieser Erfindung durch Ankergruppen polungsrichtig an Kontakte gebunden werden können, weshalb für weitere Informationen auf sie verwiesen sei. In [19] wird die Erzeugung von Nanostrukturen aus kolloidalen „Baulementen“ auf vorpräparierten Substraten – ähnlich wie in dieser Erfindung – aufgezeigt. Im Weiteren wird aber nur enger auf organische Brückenmoleküle eingegangen:

Durch die Brückenmoleküle können die lumineszierenden Materialien (z. B. Moleküle oder Nanokristalle) mittels zwischenmolekularer Kräfte fixiert und ausgerichtet werden. Die zwischenmolekularen Kräfte können entweder aus einer chemischen Bindung oder einer physikalischen Adhäsion zwischen dem Molekül und seiner Unterlage entstehen. Dabei werden die Moleküle, die aus einer Ankergruppe, einem verbindenden Molekülgerüst und einer funktionellen Gruppe bestehen, durch die Ankergruppe auf dem Substrat fixiert. Die funktionelle Gruppe kann z. B. eine weitere Ankergruppe für ein zweites Substrat darstellen oder eine spezielle Oberflächeneigenschaft – wie z. B. eine hydrophobe Oberfläche bei einer Methylgruppe – bewirken. Das Molekülgerüst trennt die Ankergruppe und die funktionelle Gruppe und stellt so einen definierten Abstand her.

**[0025]** Die funktionelle Gruppe kann z. B. die Lumophore binden in dem sie eine weitere Ankergruppe für den Lumophor besitzt, oder sie kann selbst lumineszierende Funktion besitzen. Folgende Anker- bzw. Endgruppen sind beispielsweise üblich, um die Moleküle bei der SAM auf den verschiedenen Unterlagen zu fixieren oder die Bausteine des Antennenemitters untereinander zu verbinden:

- Silane, Silikate, Siloxane für Unterschichten aus Metalloxiden z. B. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Glas, SiO<sub>2</sub>, Quarz, GaAs, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, GaN, AlN, Si
- Phosphonsäuren für Oxide wie ITO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, SnO, SnO<sub>2</sub>
- Karbonsäuren für Metalloxide z. B. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, SnO, SnO<sub>2</sub>, Ag
- Fettsäuren für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AgO, Ag
- Thiole für Au, Ag, Fe, Cu, CdS, CdSe, InAs, GaAs, Pt
- Sulfide und Disulfide für Au, Ag, Cu, GaAs, AlGaAs
- Amine für Pt
- Methyl-, Carboxyl-, Hydroxyl-, Aminogruppen und viele andere (siehe z. B. WO03/041182 Seite 11), um

Kontakte zu anderen Kopplungsgruppen herzustellen, die sich z. B. an Lumophormolekülen befinden oder um eine Oberfläche zum selektiven Beschichten mit MOCVD vorzubereiten.

**[0026]** Die Verbindung des Brückenmoleküls zu anderen Komponenten, wie dem Lumophor, kann durch eine beliebige chemische Reaktion erfolgen, die eine Bindung erzeugt. Durch Schutzgruppen können Ankergruppen vorübergehend inaktiviert werden, so dass z. B. eine Polymerisation von Antennen oder Lumophoren vermieden werden kann (siehe auch siehe z. B. WO03/041182). Die Länge des Molekülgerüsts (z. B. eines organischen Rests), das als Distanzhalter wirkt, und der zusätzlichen optionalen Funktionsgruppe bestimmt dann den Abstand z. B. der Antenne vom damit verbundenen Lumophor.

**[0027]** Die elektrische Leitfähigkeit der molekularen Brücke kann angepasst werden. Wenn der organische Rest der SAM-Moleküle z. B. aus einer Alkylgruppe mit C-C Einfachbindungen besteht, so ergibt sich ein guter Isolator, wegen der großen Energiedifferenz der  $\sigma$  und  $\sigma^*$  Orbitale. Dieser kann auf kurze Distanz (ca. 1 nm) jedoch trotzdem durchtunnelt werden.

**[0028]** Werden aber statt dessen z. B. Moleküle mit C=C Doppelbindungen und aromatische Verbindungen verwendet (z. B. Benzolringe), so ergibt sich wegen der geringeren Energiedifferenz der  $\pi$  und  $\pi^*$  Orbitale ein besserer el. Leiter. Es ergeben sich Moleküle, bei welchen sich Einfach- und Mehrfachbindungen abwechseln, und die deshalb als konjugiert bezeichnet werden. Entsprechende halbleitende Moleküle ohne Ankergruppen werden z. B. auch für OLEDs verwendet.

**[0029]** Vergleichbar wie bei anorganischen Halbleitern werden die konjugierten Polymere gedopt, um ihre el. Leitfähigkeit zu verbessern. Das Dopen geschieht z. B. durch Oxidation (p-Dotierung mit z. B. NO<sub>2</sub>) oder Reduktion (n-Dotierung mit z. B. NH<sub>3</sub> oder Metallen) des Polymers, um in der Polymerkette Ladungsverschiebungen zu erzeugen. Die Doperaten liegen bei rund 10 bis 30%, d. h., dass jede 10. bis dritte Monomereinheit oxidiert bzw. reduziert wird. Es kann auch zur Bildung von Charge-Transfer-Komplexen in den Brückenmolekülen bzw. den Verbindungen mit den z. B. metallischen Lumophorpartikeln kommen. Solche Charge-Transfer-Komplexe können wiederum zur Lichterzeugung unter Stromfluss bei den Ausführungsvarianten als Lichtquelle bzw. zur Lichtabsorption und Spannungserzeugung bei den Photovoltaikelementen führen.

**[0030]** SAM-Schichten können ebenfalls durch Dopen nachträglich von einer isolierenden Form in die el. leitfähige gebracht werden. Durch einen unsymmetrischen Aufbau lassen sich auch Moleküle erzeugen, die als molekulare Dioden wirken können. Sie bestehen normalerweise aus einem durch eine Barriere vom Donor getrennten Akzeptor. Beispiele zu molekularen Dioden finden sich auch in z. B. WO03/041182. Die dort vorgestellten molekularen Dioden sind ebenfalls als Gleichrichterioden, Lichtemitter (molekulare Leucht-Diode) und auch als Photodiode geeignet. Die dort dargestellten molekularen Leuchtdioden können z. B. als Lumophor in dieser Erfindung an die Antennen gebunden werden.

**[0031]** Durch Variation der Kettenlänge der molekularen Brücke können die Abstände der verbundenen Komponenten (z. B. der Abstand Lumophor-Antenne) angepasst werden. Für erforderliche große Abstände können entweder längere Moleküle oder Multilagen (mehrere SAM Schichten übereinander) verwendet werden. Durch einen Austausch der Endgruppe können sich die Moleküle an verschiedene Substrate binden.

**[0032]** Weil zur Verminderung des die Lumineszenz dämpfenden strahlungslosen Energietransfers vom Lumophor zur Metallantenne ein Mindestabstand des Lumophors zur Antenne von ca. 3 bis 10 nm einzuhalten ist, müssen die Moleküle relativ lang und gestreckt ausgerichtet auf der Antenne sitzen. Dazu müssen sich die Molekülketten durch gegenseitige Abstoßung stabilisieren. Reine Alkylketten können nur bis ca. 16 Kohlenstoffatomen (entspricht ca. 3,6 nm Länge) gestreckt auf einem Nanopartikel vorliegen, weil durch die radial zunehmenden Abstände der Moleküle voneinander die gegenseitigen Abstoßungskräfte abnehmen. Als Lösung für dieses Problem können:

- Die Abstandshaltermoleküle auf Antenne und Lumophor verteilt werden, so dass sie jeweils nicht so lang sein müssen.
- Die Molekülketten können durch geladene Seitengruppen zusätzliche gegenseitige Abstoßung erfahren. Aromatische bzw. konjugierte SAM-Moleküle (z. B. Oligophenyldithiole) besitzen außerdem ein steiferes „Rückgrat“ als Alkan-Ketten. Dadurch lassen sich längere Abstände überbrücken.
- Durch Polymerisation können die Moleküle sich auf der Antenne stabilisieren, dadurch dass Querverbindungen zwischen den Molekülen entstehen. Damit können auch erheblich dickere Schichten erzeugt werden.
- Die Molekülschichten können durch dünne dielektrische Schichten oder dickere Halbleiterschichten um die Antennen ergänzt werden.

– Die Molekülschichten können durch Halbleiterschichten und dicke dielektrische Schichten um die Antennen-Partikel ergänzt werden. Hierbei übernehmen die Halbleiterschichten dann den Stromtransport zum und vom Lumophor.

**[0033]** Auf den Partikeln können auch z. B. durch einen nachfolgenden Ligandenaustausch gemischte Molekülhüllen aus verschiedenen Molekülen mit verschiedenen Ankergruppen erzeugt werden. Dadurch kann z. B. die Zahl der Anbindungen von Lumophoren begrenzt werden.

**[0034]** Der Ablauf bei der „SAM“ ist grob folgender:

– Molekulare Brücken, die 2 Kopf- bzw. Ankergruppen aufweisen und in einem Lösungsmittel (z. B. Ethanol, Hexan etc.) gelöst sind, werden mit dem Lumophor (z. B. Nanokristall) bzw. den Antennen oder dem Emittersubstrat in Kontakt gebracht. Dazu kann z. B. das Substrat mit der Lösung betropft oder eingetaucht werden. Um Veränderungen der Partikel, des Substrats und der Moleküllösungen (z. B. Oxidation) zu vermeiden, müssen die Materialien in Schutzgas aufbewahrt und die Arbeiten ebenso unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt werden.

– Die Ankergruppen verbinden sich mit dem Substrat und den Partikeln oder Molekülen. Die Molekülketten ordnen sich später innerhalb einiger Stunden etwa parallel zueinander (auf ebenen Substraten) in einem bestimmten Winkel je nach Substrat und Brückenmolekül – z. B. bei Thiolaten auf Ag  $0^\circ$ , auf Au  $30^\circ$ - zur Oberflächennormalen des Substrats an. Die Moleküle sind so eng wie möglich (Abstand von rund 0,3 nm auf Ag und Au) angeordnet.

– In weiteren Prozessschritten kann sich die zweite Ankergruppe mit einem weiteren Partikel verlinken usw.

**[0035]** Außer rein linearen molekularen Brücken können z. B. zur automatischen Verbindung der Emitterbestandteile in einer Matrix trigonale, tetrahedrale usw. molekulare Brücken verwendet werden.

**[0036]** Um eine größere Flexibilität, eine günstigere elektronische Verbindung zwischen den Komponenten (Antenne, Leiterbahn, Lumophor) oder unterschiedliche Oberflächeneigenschaften bei gleichen Materialien zu erlangen, können die Komponenten der Lichtquelle auch vor dem Verknüpfen mit zusätzlichen Schichten beschichtet werden. Schichten zur Veränderung der Oberflächeneigenschaften können aus dielektrischen, metallischen, halbleitenden oder auch organischen Schichten (z. B. einer SAM mit spezifischen Funktionsgruppen) bestehen. Beispielsweise kann eine Antenne mit „Oberflächenmodifikationsschichten“ aus z. B. Silizium oder Kohlenstoff beschichtet werden, um statt einer Thiol-Ankergruppe eine C-C oder C-Si Bindung des Brückenmoleküls mit z. B. einer Gold-Antenne zu erreichen. Dies kann die elektrische Kontaktbarriere reduzieren [5]. Oder es kann eine Antenne oder eine Leiterbahn mit einer chemisch verschiedenen Oberfläche ausgestattet werden, um zu erreichen, dass nur die Antenne mit dieser Oberfläche sich an eine bestimmte Leiterbahn binden kann. Um zu gewährleisten, dass ein Lumophor (z. B. eine molekulare Diode) sich nur richtig herum gepolt an die Antennen bindet, können ebenfalls spezifische Oberflächen genutzt werden. Es kann z. B. zwischen einer Antenne **1** mit einer Oberfläche **1** und einer Antenne **2** mit einer Oberfläche **2** ein Lumophor mit zwei Ankergruppen **1\*** und **2\*** lagerichtig so an die Antennen gebunden werden, dass die Ankergruppe **1\*** sich nur an die Oberfläche **1** der Antenne **1** und die Ankergruppe **2\*** sich nur an die Oberfläche **2** der Antenne **2** bindet und umgekehrt. Die Oberfläche **1** kann z. B. eine Silber-Oberfläche sein und die Oberfläche **2** eine durch eine SAM-Schicht modifizierte Silber-Oberfläche.

**[0037]** Die Antennen können – wie erwähnt – aus Metallen, Halbleitern oder Kombinationen bestehen. Die Beschichtung der Antennen kann auch einem verbesserten Korrosionsschutz dienen, die z. B. eine Oxidation des Metallkerns verhindert. Auch kann die Arbeitsfunktion der Antenne durch Beschichten mit Materialien, die eine niedrige oder höhere Austrittsarbeit aufweisen: z. B. Mg, Ca, verschiedene Halbleiter, ITO, BaO, CeB6 usw., optimiert werden.

**[0038]** Durch entsprechende Reaktionen können auf einer bereits aufgetragenen SAM-Schicht weitere Schichten aufgebracht werden. Dabei entstehen mehrere hochgeordnete Moleküllagen übereinander (Multilagen). Dies kann zur selektiven Beschichtung von Oberflächen verwendet werden. Bei einigen Ausführungsvarianten können damit z. B. Zwischenräume zwischen Partikeln aufgefüllt werden. Die SAM-Schichten können auch durch vielfältige Verfahren (z. B. Mikrokontaktdrucken, Lithographie, Verfahren wie in WO 03/033127 oder WO 2004/005587) strukturiert werden. Dadurch kann z. B. eine geordnete Abscheidung der Antennen auf dem Substrat für Anwendungen wie Displays, Bildsensoren etc. erreicht werden.

**[0039]** Die lumineszierenden und absorbierenden Elemente (hier Lumophore betitelt) in dieser Erfindung können grundsätzlich alle Medien sein (Singulett- und Triplett-Emitter), die sich durch einen el. Stromfluß zur Lumineszenz anregen lassen bzw. die bei Lichtabsorption eine elektronische Anregung erfahren. Aufgrund der

Wirkung der Antennen sind gerade auch Lumophore mit kleiner intrinsischer Quantenausbeute im Vorteil.

**[0040]** Es sind dies u. a.:

- Moleküle, die einen LUMO/HOMO Übergang besitzen, CT-Übergänge, Donor-Akzeptor-Kombinationen:
  - Donor-Akzeptor bzw. Donor-Bridge-Akzeptor-Systeme in einzelnen Molekülen oder in Übergängen (Beispiele: Donor-Bridge-Akzeptor-System in einer molekularen Diode oder im Übergang zwischen einem Brückenmolekül als Donor und einem daran gekoppelten Akzeptor z. B. Fulleren- oder Halbleiterpartikel, oder zwischen einem Donor-Partikel (z. B. Nanokristall) und einem z. B. daraufliegenden, durch Liganden getrennten Antennenpartikel, oder einer p-Halbleiterschicht, die auf eine mit Akzeptoren (z. B. C60) bedeckten Antenne beschichtet wurde)
  - Farbstoffmoleküle (z. B. Pyridine, Oxazine, Rhodamine, Perylen und Rubren, Stilbene...), Halbleitermoleküle (z. B. Polyfluorenderivate, Poly-(p-phenylenvinyl)-derivate (PPV), Aluminium(III)-tris-(8-hydroxychinolinat) (Alq3), 4-(Dicyanomethylen)-2-methyl-6-(p-dimethylaminostyryl)-4H-pyran (DCM), Spirobifluorenverbindungen, Polysilane usw.)
  - Beispiele aus WO 03/041182 oder WO 99/21935 und beliebige andere molekulare Dioden oder auch biologische Moleküle, die z. B. eine Ladungsverschiebung bei Lichtabsorption aufweisen.
  - Moleküle mit starkem Charge-Transfer-Übergang (CT) parallel zur Stromrichtung z. B. 4-Dimethylamino-4'-nitrostilbene, All-trans-Retinal (C<sub>20</sub>H<sub>28</sub>O)
  - Verbindungen von Molekülen insbesondere den Brückenmolekülen mit metallischen Clustern oder Quantenpunkten, Fullerenen oder Nanokristallen zur Bildung von Charge-Transfer Übergängen.
  - Metallorganische Phosphoreszenzemitter wie z. B. aus WO2004/026886 bekannt, Molekülquantenpunkte.
  - Moleküle, die sich zwischen den Antennen befinden und durch unelastische Stöße der tunnelnden Elektronen angeregt werden z. B. H2TBPP, HB-DC, MEH-PPV, Porphyrine usw. Diese Version ist auch für Wechsellspannung geeignet. Die Moleküle können z. B. auf el. leitenden Schichten verankert sein, die thermische Elektronen emittieren können (z. B. LaB6).
- Quantenpunkte (Nanokristalle) und Komplexe aus mehreren Quantenpunkten z. B.:
  - Halbleiter-Quantenpunkte (weitere Informationen zu verwendbaren Nanokristallen siehe z. B. WO 2005/017951 oder US 6,207,229). Die (Emissions) wellenlänge hängt u. a. von der Größe des Quantenpunkts ab. Das Material besteht aus Element- oder Verbindungshalbleitern z. B. p- oder n- dotiertes ZnS, ZnSe, MgSe; MgS, CaSe, CaS, CdS, CdSe, ZnO, TiO<sub>2</sub> usw., die durch z. B. kolloidale Synthese erzeugt wurden. Sie können auch mit anderen Halbleitern mit vorzugsweise größerer el. Bandlücke umhüllt sein, um die Lichtausbeute zu erhöhen. Aufgrund der Antennen können auch indirekte Halbleitermaterialien gute Quantenausbeuten erreichen. Die Umhüllung des Halbleiterquantenpunkts besitzt für Emitter vorzugsweise eine zum Kern symmetrische aber größere Bandlücke, für Empfänger bzw. Photovoltaik Elemente dagegen eine versetzte Bandlücke (siehe [21] S. 459).
  - Einzelne oder mehrere Metall-Cluster aus z. B. Ag oder Au. Cluster aus mehreren Metallmolekülen. Beispielsweise: Silbernanocluster Ag<sub>2</sub> bis Ag<sub>8</sub> [14]. Die Ag-Cluster können z. B. mittels molekularer Brücken an die Antennen gebunden werden. Derartige Emittoren sind ebenfalls für Wechsellspannung geeignet.
- Karbonnanoröhren. Sie zeigen z. B. eine geringe Lumineszenz-Quantenausbeute. Durch molekulare Linker können sie zwischen die Antennen gebracht werden. Antennen können ihre Quantenausbeute erhöhen.

**[0041]** Wenn der Lumophor durch Injektion von Elektronen in den LUMO bzw. das Leitungsband in den angeregten Zustand versetzt wurde, so kann es durch mehrere Umstände zu ungewollten nichtstrahlenden Rekombinationen kommen: indirekte Bandübergänge (z. B. wenn ein Si-Quantenpunkt verwendet wird), Auger-Rekombinationen, an Gitterfehlern und Verunreinigungen der Halbleitermaterialien der Quantenpunkte und Antennen – dies folgt z. B. aus den abweichenden Gitterkonstanten von Antennenkern und Umhüllung sowie durch Oberflächenrekombinationen an den Halbleiteroberflächen der Quantenpunkte und Antennen.

**[0042]** Die nichtstrahlenden Rekombinationen und Oberflächeneinflüsse auf den Lumophor und die Halbleiterschichten der Antennen können reduziert werden durch:

- Passivierung bzw. Beschichtung der Oberflächen. Beschichtung mit z. B. einem Halbleiter oder mit einer Molekülhülle. Die Molekülhülle, die gleichzeitig der Fixierung und Spannungsversorgung dient, kann die freien Oberflächenzustände reduzieren.
- Verwendung von optischen Antennen. Dadurch entstehen zusätzliche strahlende Zerfallskanäle und die strahlende Zerfallsrate wird erheblich gesteigert.

**[0043]** Neben den nichtstrahlenden Rekombinationen im Lumophor besteht auch noch das Problem der Löschung der Fluoreszenz. Die Antennen bestehen in der Mehrzahl der Ausführungsvarianten aus Metallen (z. B. Ag, Al, Au, Cu, Pd, Pt, Os). Weil der Lumophor sich nahe an der Metalloberfläche der Antenne befindet,

kann es durch einen resonanten Energietransfer (siehe auch FRET) und Fluoreszenzlöschung zu einer Verringerung der Quantenausbeute des Lumophors kommen. Diese strahlungslose Dämpfung steigt mit abnehmenden Abständen zur Metalloberfläche sehr stark an. Der resonante Energietransfer sinkt mit  $\text{Abstand}^6$  und ist deshalb nur für kleinste Abstände bedeutsam, die Fluoreszenzlöschung besitzt eine größere Reichweite bis etwa 5 nm von der Antenne.

**[0044]** Jedoch existiert auch ein gegenläufiger Effekt, der dadurch zustande kommt, dass die durch den Lumophor auf der Antenne angeregten Oberflächenplasmonen zusätzliche strahlende Zerfallskanäle für den Lumophor darstellen. Dadurch kann ein Lumophor beispielsweise statt einer nichtstrahlenden Oberflächenrekombination eine strahlende Rekombination über den Umweg der Oberflächenplasmonen erfahren, wodurch sich seine Quantenausbeute entsprechend erhöht. Dieser Vorteil wirkt sich besonders bei Lumophoren mit geringer intrinsischer Quantenausbeute aus, während im Gegensatz dazu Lumophore mit sehr hoher intrinsischer Ausbeute keine Verbesserung erfahren.

**[0045]** Zusätzlich können die Elektronen in der Metallantenne durch einfallendes Licht zu resonanten Schwingungen angeregt werden, die wiederum eine feldverstärkende Wirkung auf den Lumophor ausüben. Dadurch kann die Effizienz bei der Ausführung als Spannungsquelle gesteigert werden.

**[0046]** Die Wirkung der Antennen auf den Lumophor stellt also die Überlagerung von mehreren Effekten dar, wobei die Größe der einzelnen Effekte von der exakten Konstellation: Antennenmaterial, Abstand Antenne zu Lumophor, Ausrichtung des strahlenden Dipols des Lumophors zur Antennenoberfläche, Brechungsindex des umgebenden Dielektrikums, Antennenform und Emissionsfrequenz des Lumophors abhängen.

**[0047]** Dadurch ergibt sich u. a., dass die Quanteneffizienz des Lumophors bei einer bestimmten Entfernung zur Antennenoberfläche maximal wird. Und dass die maximale Quanteneffizienz nur erreicht wird, wenn der Dipol des Lumophors senkrecht zur Antennenoberfläche schwingt. Deshalb fließt der el. Strom in dieser Erfindung im Wesentlichen über die Antennen durch den Lumophor. Je nach verwendetem Lumophor ist dadurch die Richtung des strahlenden Dipols mehr (z. B. Molekül mit Dipol in Stromrichtung) oder weniger (z. B. Halbleiternanokristall) festgelegt.

**[0048]** Ein Einflussfaktor auf die Wirkung der Antenne ist also die Form und Größe der Antenne: Analog zu den im Mikro- oder Radiowellenbereich verwendeten z. B. Dipolantennen können vergleichbare Konstruktionen auch im optischen Bereich verwendet werden. Im Radiobereich bei einer Dipolantenne gelten z. B. bestimmte Regeln, nach welchen die Gesamtlänge der beiden Antennenschenkel ein Vielfaches von  $\lambda/(2 \cdot n_{\text{Medium}})$  sein soll, um die Antenne in Resonanz zu bringen.

**[0049]** Im optischen Wellenlängenbereich gelten zwar grundsätzlich gleiche Regeln, jedoch wirkt sich aufgrund der hohen Frequenzen des EM-Felds die Trägheit der Leitungselektronen aus. Die Länge der Antennenschenkel z. B. muss rel. zu  $\lambda/4$  sehr stark verkürzt werden.

**[0050]** Auch die Form der Antenne ist für ihre Funktion von großer Bedeutung. Oft werden z. B. so genannte „bowtie“ Antennen verwendet um die Fluoreszenz eines nahen Emitters zu steigern. Diese Antennen bestehen aus dreieckigen Antennenschenkeln, die sich mit einer Spitze gegenüberstehen, wobei die Feldverstärkung bei kleinerem Spitzenabstand stark zunimmt. Eine ähnliche Wirkung haben stabförmige oder elliptische Antennen, wenn sie dem Lumophor mit ihren spitzen Enden zugewandt sind. Auch hier können an den Spitzen höhere el. Feldstärken und Quantenausbeuten als z. B. bei sphärischen Antennen erreicht werden.

**[0051]** Wenn statt massiven Metall-Antennenkernen Hohlkugeln aus Metall um dielektrische Kerne verwendet werden, resultiert eine Rotverschiebung. Auch für längliche Antennen, sowie wenn zwei oder mehrere Antennenpartikel durch geringe Abstände gekoppelt werden, ergibt sich eine Rotverschiebung oder Blauverschiebung der Resonanzwellenlänge relativ zur einfachen Kugelantenne [3].

**[0052]** Durch die Kopplung zweier Antennen mit Abständen im Bereich von 20 oder 40 nm kann die Resonanzfrequenz der gekoppelten Antennen bis ca. 60 nm ins Rote verschoben werden, wenn das elektrische Feld parallel zur Verbindungsachse der Antennen liegt [3]. Aus zwei einzelnen Antennen wird dann eine große Dipolantenne. Dies ist der Fall bei einem durch einen Lumophor gekoppelten Antennenpaar wie in dieser Erfindung. Für höchste Resonanzfrequenzen kann deshalb eines der beiden Metall-Antennenpartikel entfallen. Wenn – ebenfalls wie in dieser Erfindung – Antennen „Seite an Seite“ stehen, d. h. das elektrische Feld senkrecht auf die Verbindungsachse der Antennen gerichtet ist, dann ergibt sich eine leichte Blauverschiebung der Resonanzfrequenz von etwa 15 nm. Dies ist der Fall z. B. bei nebeneinander liegenden Antennenpaaren, die

auf Leiterbahnen immobilisiert wurden.

**[0053]** Bei länglichen Antennen steigt die Resonanz-Wellenlänge z. B. bei abgeplatteten Antennen (kleine Halbachse 20 nm, Material Silber) von 650 nm bis ca. 1,2  $\mu\text{m}$ , wenn die große Halbachse der Antenne von 130 auf 320 nm vergrößert wird [1]. Durch die Veränderung der Antennenform kann also die Resonanzfrequenz und die Antennenverstärkung angepasst werden.

**[0054]** Ein weiterer bedeutsamer Einflussfaktor auf die Antenne resultiert aus dem die Antenne umgebenden Dielektrikum. Höhere Dielektrizitätswerte bzw. Brechungsindizes des Umgebungsmaterials bewirken ebenfalls eine Rotverschiebung der Resonanzfrequenz und damit der Frequenz, bei welcher in etwa die maximale Antennenverstärkung erfolgt. Denn die durch die Antenne bewirkte Polarisierung des Dielektrikums wirkt der Elektronenschwingung in der Antenne entgegen, weil die el. Felder um die Antenne, die ein „Zurückfedern“ der Elektronen bewirken wollen, durch das Dielektrikum geschwächt werden. Beispielsweise steigt die Wellenlänge der maximalen Polarisierbarkeit  $\alpha_{\text{eff}}$  (siehe Gleichung 1) einer einzelnen kugelförmigen Silber-Antenne, die einen Durchmesser von 50 nm besitzt, von ca. 300 nm in Luft ( $\epsilon_r = 1$ ), auf ca. 450 nm in Glas ( $\epsilon_r = 2,25$ ) und schließlich auf ca. 1020 nm in GaAs ( $\epsilon_r = 13$ )

**[0055]** Die effektive Polarisierbarkeit der einzelnen sphärischen Antenne in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  ist [3]:

$$\alpha_{\text{eff}}(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)(1 - \frac{\pi^2 \epsilon_m D^2}{10\lambda^2})}{1 - \frac{2\pi\epsilon_m}{D\lambda^2} \alpha(\lambda) - i \frac{4\pi^2 \epsilon_m^{3/2}}{3\lambda^3} \alpha(\lambda)} \quad (1)$$

mit Polarisierbarkeit  $\alpha$  in Abhängigkeit von Wellenlänge  $\lambda$ :

$$\alpha(\lambda) = \frac{\pi D^3}{2} \frac{\epsilon(\lambda) - \epsilon_m}{\epsilon(\lambda) + 2\epsilon_m} \quad (2)$$

und

$\epsilon(\lambda)$  = komplexe Dielektrizitätszahl der Metallkerns der Antenne  
 $\epsilon_m$  = Dielektrizitätszahl des umhüllenden Dielektrikums  
 $D$  = Durchmesser des kugelförmigen Metallkerns der Antenne

**[0056]** Berechnungen und Optimierungen zu Antennen in verschiedenen dielektrischen Umgebungen können auch z. B. nach [1], [2], [16], [15] vorgenommen werden.

**[0057]** Durch die Verwendung von Antennenumhüllungen mit verschiedenem Brechungsindex kann somit die Resonanzfrequenz der Antenne an die Erfordernisse angepasst werden. Die Antennen bestehen also z. B. aus einem Metallkern mit günstiger dielektrischer Funktion im Wellenlängenbereich des Emitters. Für viele Lumophore (z. B. Halbleiternanokristalle) ist es aber erforderlich, dass die elektrischen Zuleiter die Elektronen in den LUMO bzw. die Löcher in den HOMO des Lumophors injizieren können. Dazu können die Metall-Antennen mit organischen oder anorganischen Halbleitern kombiniert werden. Um trotz der el. leitenden Antennenumhüllung eine unerwünschte Rotverschiebung der Antennenresonanz zu verhindern, können mehrere verschiedene Wege gegangen werden:

- Kleinere Metall-Antennenkerne (ab ca. 40 nm Durchmesser) können verwendet werden.
- El. leitenden Schichten (z. B. organische Halbleiter) bzw. Brückenmoleküle mit einem rel. niedrigen Brechungsindex können benützt werden.
- Wenn die el. leitenden Schichten um die Antennenkerne aus Materialien mit höherem Brechungsindex (z. B. anorganischen Halbleitern) bestehen, können diese durch dielektrische Zwischenschichten von der Metallantenne entkoppelt werden. Beispielsweise können ca. 3 bis ca. 60 nm SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MgF<sub>2</sub>, KF usw. als eine niedrig brechende Zwischenschicht verwandt werden. Diese Schichten können dazu zusätzlich porös sein.

**[0058]** Eine Rotverschiebung bis in den IR-Bereich kann andererseits für die Ausführungsvarianten von Photovoltaik-elementen, Photosensoren usw. auch vorteilhaft sein.

## Berechnung der sphärischen Antennen:

**[0059]** Eine weitere Auslegung der Metallkerne von sphärischen Antennen kann nach [4] erfolgen. Es wird eine einzelne Antennenkugel in Luft betrachtet ( $\epsilon_m$  wurde gleich 1 gesetzt). Der Dipol des Lumophors kann grundsätzlich in jeder Lage relativ zur Antenne schwingen. Die senkrechte sowie die tangentielle Orientierung zur Antennenoberfläche stellen die Extremfälle dar, wobei die senkrechte Ausrichtung von deutlichem Vorteil ist. Die Resonanzfrequenz der Oberflächenplasmonen (vgl. auch Gleichung 1) sollte relativ zur Emissionsfrequenz des Lumophors mehr im Blauen liegen, um eine Löschung der Lumineszenz zu vermeiden.

**[0060]** Damit ergibt sich bei nur einem Antennenpartikel nahe dem Lumophor folgende Verstärkung  $V_s$  der strahlenden Zerfallsrate für den Fall eines senkrecht zu Antenne strahlenden Lumophors:

$$V_s = |1 + 2R^3/(R + Z)^3(\epsilon(\omega) - 1)/(\epsilon(\omega) + 2)|^2 \quad (3)$$

**[0061]**  $V_s$  beschreibt auch gleichzeitig die Verstärkung der Anregung eines Lumophors bei den Ausführungsvarianten von Spannungsquellen und Photovoltaikerelementen.

**[0062]** Auch wenn laut (3) eine beliebig große Antenne eine größere Verstärkung zu bewirken scheint, so ergibt sich im sichtbaren Wellenlängenbereich ein maximaler sinnvoller Durchmesser der Metallkugel von ca. 150 nm.

**[0063]** Für den tangentialen Fall ergibt sich für  $V_t$  dagegen:

$$V_t = |1 - R^3/(R + Z)^3(\epsilon(\omega) - 1)/(\epsilon(\omega) + 2)|^2 \quad (4)$$

**[0064]** Mit

- $V_s$  bzw.  $V_t$  = Verstärkung der strahlenden Zerfallsrate (relativ zur Situation ohne Antenne)
- $D$  = Durchmesser der kugelförmigen Antenne (nur Metallteil)
- $R = D/2$
- $Z$  = Abstand des Lumophors zur Oberfläche des Metallkerns der Antenne
- $\epsilon(\omega)$  = Dielektrische Funktion des Metall-Antennenmaterials bei Kreisfrequenz  $\omega$  des Emitters

**[0065]** Bei einem tangential liegenden Dipol ist die Verstärkung rel. geringer. Es kann zur Erhöhung der Quantenausbeute für Ausführungsvarianten mit z. B. Halbleiternanokristall-Lumophoren eine Umhüllung der Antenne mit einem Dielektrikum (z. B. mit Dielektrizitätszahl  $\epsilon_m$  ca. 2 bis ca. 6,5) die Quantenausbeute erhöhen, weil dadurch auch  $V_t$  steigt. Dies ergibt sich daraus, dass der Term „ $(\epsilon(\omega) - 1)/(\epsilon(\omega) + 2)$ “ in der Funktion für  $V$  eigentlich heißt „ $(\epsilon(\omega) - \epsilon_m)/(\epsilon(\omega) + 2\epsilon_m)$ “

**[0066]** Jedoch ergibt sich ferner, dass gleichzeitig das Ausmaß der Fluoreszenzlöschung durch die wachsende Energietransferrate  $T$  zum nahe Metall mit sinkendem Abstand zunimmt. Bei Ausrichtung des Dipols in Stromrichtung – senkrecht zur Antenne – ergibt sich für die Energietransferrate (folgend [4]):

$$T_s = 3/8 \operatorname{Im}((\epsilon(\omega) - 1)/(\epsilon(\omega) + 1)) * 1/Z^3 * c^3/\omega^3 \quad (5)$$

**[0067]** Im Fall eines tangential zur Antenne strahlenden Lumophors wird  $T_t$ :

$$T_t = 3/16 \operatorname{Im}((\epsilon(\omega) - 1)/(\epsilon(\omega) + 1)) * 1/Z^3 * c^3/\omega^3 \quad (6)$$

**[0068]** Mit

- $\epsilon(\omega)$  = Dielektrische Funktion des Metall-Antennenmaterials bei Kreisfrequenz  $\omega$  des Emitters
- $\lambda$  = Wellenlänge
- $c$  = Vakuumlichtgeschwindigkeit
- $Z$  = Abstand des Lumophors zur Oberfläche des Metallkerns der Antenne

**[0069]**  $T$  gibt den Teil der Verluste an, die dadurch entstehen, dass Teile der vom Lumophor abgegebene elektromagnetischen Energie in der Antenne schließlich in Wärme konvertiert werden. Es können im elektrisch kontaktierten Antennenemitter aber weitere Verluste u. a.: ohmsche Verluste in den molekularen Drähten, Energieflüsse zwischen dem Molekül und Elektron/Loch Anregungen in der Antenne usw. entstehen.

**[0070]** Für die Quantenausbeute des Systems mit einer Kugelantenne ergibt sich [4]:

$$Q_s = V_s / (V_s + T_s + (1 - Q_0) / Q_0) \quad (7)$$

bzw.

$$Q_t = V_t / (V_t + T_t + (1 - Q_0) / Q_0) \quad (8)$$

**[0071]** Mit

- $Q_0$  = intrinsische Quantenausbeute des Lumophors ohne einen störenden Einfluss (weit weg von metallischen Kontakten).
- $Q_t$  = Quantenausbeute im tangentialen Fall
- $Q_s$  = Quantenausbeute im radialen Fall

**[0072]** Für andere Emissionsfrequenzen und Materialien des Emitters können die Abmessungen z. B. nach vorigen Formel optimiert werden.

**[0073]** Für ein Empfängerelement ist die durch die Antenne bewirkte el. Feldverstärkung bedeutsam. Die entsprechende Steigerung der Anregungsrate kann z. B. nach Formel 3 berechnet werden.

**[0074]** Es reicht bereits eine Metall-Antenne aus, um die Quantenausbeute erheblich zu steigern. Deshalb kann auch auf eine der beiden Antennen verzichtet werden bzw. diese kann aus Halbleitern bestehen. Beispielsweise aus transparenten Oxiden und anderen Halbleitern (ZnO, GaN, organische Halbleiterschichten usw.). Oder sie kann aus mit Halbleitern beschichteten el. isolierenden Partikeln bestehen (z. B. SiO<sub>2</sub>-Kern mit beliebigem Halbleiter wie AlAs, ZnS, ZnO umhüllt). Jedoch kann die Emission erheblich weiter gesteigert werden, wenn der Lumophor zwischen zwei Metall-Antennenpartikeln liegt [6], [7].

Weitere Antennenformen:

**[0075]** Mit anderen Antennengeometrien kann die strahlende Zerfallsrate des Emitters weiter optimiert werden. Ein einfache mögliche Variante sind elliptische bzw. stabförmige Antennen: Bei länglichen Antennen überwiegt die Fluoreszenzverstärkung relativ zur nichtstrahlenden Dämpfung schon bei minimalsten Abständen des Lumophors zur Antenne. So erreicht die Quantenausbeute von elliptischen Gold-Partikeln mit einem Länge zu Breite Verhältnis von 6 bei einer Wellenlänge von 770 nm schon bei z. B. 3 nm Abstand ihr Maximum [9].

**[0076]** Es sind Länge zu Breite Verhältnisse von rund 1,5 bis 6 (und mehr) sinnvoll [9], [10].

**[0077]** Dieses Längenverhältnis muss für unterschiedlichen Wellenlängen jeweils z. B. mittels „finite-difference time-domain“ (FDTD)-Verfahren optimiert werden.

**[0078]** Übersicht über einige mögliche Antennen-Geometrien – teilweise nach [9]:

Wellenlänge [nm] ca. 480	Antennenmaterial Ag	Abstand A der Antennen voneinander oder Z [nm] ca. Z = 10	Antennenlänge [nm] ca. 60	Antennenbreite [nm] ca. 10
840	Au	A = 20	100	42
720	Au	A = 20	122	38
630	Au	A = 20	76	48
670	Au	A = 15	40	35
770	Au	Z = 3	60	10
> 900	Au	A = 10	120	38

**[0079]** Aufgrund seiner dielektrischen Funktion ist Ag für kürzere Wellenlängen besser als Au geeignet. Es können wie bei den kugelförmigen Antennen auch unterschiedliche Antennenmaterialien für beide Antennen verwendet werden sowie die Antennen mit z. B. dielektrischen und Halbleiterschichten versehen werden.

**[0080]** Kugelförmige, stabförmige, elliptische, pyramidale aber auch vieleckige Antennenformen sind möglich. Die Antennen können über „bottom up“ Methoden wie nasschemischen Verfahren (siehe auch [11], [12], [13], [17]), Gasphasensynthese, chemische Dampf Kondensation usw. oder durch Zerkleinern von größeren Partikeln hergestellt werden. Auch Antennen mit Metallkernen und dielektrischen oder Halbleiterhüllen können auf dieselbe Weise erzeugt werden (siehe z. B. [20]). Die Erzeugung von Halbleiterschichten auf den Metall-

kernen oder einer dielektrischen Umhüllung der Antennen führt u. a. zu Fehlern in der Halbleiterschicht durch abweichende Gitterkonstanten und freie Oberflächenzustände. Zur Reduzierung der freien Oberflächenzustände kann eine Hülle aus Brücken-Molekülen beitragen. Noch besser aber kann sein, wenn zusätzlich die Halbleiterhüllen um die Antennen aus Kombinationen verschiedenartiger Halbleiter mit versetzter oder größerer Bandlücke bestehen. Beispielsweise kann die n-leitenden Antennen umhüllung außen und innen mit Halbleiterschichten bedeckt sein, die eine nach oben versetzte Bandlücke aufweisen, und die p-leitenden Antennen umhüllungen können umgekehrt mit Schichten kombiniert werden, die eine nach unten versetzte Bandlücke aufweisen.

**[0081]** Die Erfindung wird im Weiteren anhand von Ausführungsbeispielen und Diagrammen erläutert.

**[0082]** Allgemeine Hinweise zu den dargestellten Figuren:

- Gleiche oder gleich wirkende Elemente sind in den Figuren mit gleichen Bezugszeichen versehen. Die Zeichnungen sind nicht als maßstabsgerecht anzusehen. Einzelne Elemente (z. B. Molekülbrücken rel. zu Antennen) sind zur Verdeutlichung übertrieben groß dargestellt.
- Bei verschiedenen Ausführungsvarianten werden transparente el. Leiter benötigt. Diese können z. B. aus der Gruppe der leitfähigen Oxide ausgewählt werden. Beispielsweise (Indiumzinnoxid, Indiumzinkoxid, Zinkoxid, Indiumtitanoxid usw.). Alternativ können aber auch sehr dünne Metallschichten (z. B. 2 nm Ag, Al, Au usw.) als transparente Elektroden verwandt werden.
- Die in den Ausführungsvarianten erwähnten anorganischen Halbleiter für Leiterbahnen, Halbleiterschichten um Antennen und für Lumophore in Form von Nanokristallen können grundsätzlich Element- und Verbindungshalbleiter sein. Die Verbindungshalbleiter können binär, ternär oder aus noch mehr Komponenten zusammengesetzt sein. So kommen Verbindungshalbleiter mit Elementen der Gruppen IV, III, V, II und VI in Frage. Selbst indirekte Halbleiter können aufgrund der Wirkung der Antennen als Lumophor verwendet werden.
- Die anorganischen Halbleiterschichten in den [Fig. 14](#) bis [Fig. 22](#) und [Fig. 27](#) bis [Fig. 29](#) sind über ohmsche Kontakte mit metallischen Zuleitungen verbunden. Für nicht gepinnte Halbleiteroberflächen (ohne Oberflächenzustände) werden sie bei n-Halbleitern durch Metalle erzielt, deren Austrittsarbeit kleiner bzw. gleich groß der Elektronenaffinität des Halbleiters ist und umgekehrt für p-Halbleiter. Außerdem werden üblicherweise nicht einzelne Metalle, sondern Schichtsysteme verwendet, die u. a. gleichzeitig das Aufdotieren des Halbleitermaterials übernehmen oder z. B. als Diffusionsbarriere für Elemente wie Gold wirken. Die üblicherweise verwendeten Schichtsysteme sind z. B. für p-SiC Al und Al/Ti, für n-SiC Ni und Ni/Ti, bei n-GaAs Ni und Au/Ge-Au, bei n-GaN die Schichten Ti/Al/Ni/Au und so weiter. Bei den [Fig. 14](#) bis [Fig. 22](#) wird die Halbleiterschicht auf metallische Leiterbahnen aufgetragen, so dass die Schichten vor dem Beschichten der Halbleiterschichten aufgetragen werden müssen. Ähnliche Probleme, wie sie bei den Halbleiter-Metall-Kontakten existieren, entstehen auch an z. B. Heterokontakten zwischen einer Antenne, die mit einem bestimmten Halbleiter z. B. GaN beschichtet ist und einer Leiterbahn, die aus einem anderen Halbleiter z. B. Si, besteht. Wenn die SAM-Schicht an der Grenzfläche, z. B. die SAM, die Antennen und Leiterbahn verbindet, dünn (z. B. ca. 1 nm) und gleichzeitig el. isolierend ist, kann die Ladungsträgerverarmung im Kontakt verringert und damit der Kontakt verbessert werden.

Übersicht über die Abbildungen:

**[0083]** [Fig. 1](#): Darstellung der Quantenausbeute eines Emitters mit einer wirksamen Silber-Antenne in Abhängigkeit des Abstands Lumophor zu Antenne. Berechnet nach [2] mit  $C1 = \alpha_{\text{eff}}/\alpha$ .

**[0084]** [Fig. 2](#): Darstellung der Quantenausbeute eines Emitters mit einer wirksamen Silber-Antenne in Abhängigkeit der Wellenlänge. Berechnet nach [2] mit  $C1 = \alpha_{\text{eff}}/\alpha$ .

**[0085]** [Fig. 3](#): Darstellung der Quantenausbeute eines Emitters mit einer wirksamen Gold-Antenne in Abhängigkeit des Abstands Lumophor zur Antenne. Berechnet nach [4] bzw. Formel (3) ff.

**[0086]** [Fig. 4](#): effektive Polarisierbarkeit einer einzelnen Metall-Antenne zur Bestimmung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Brechzahl des Dielektrikums. Berechnet nach [3].

**[0087]** [Fig. 5](#): einzelner Antennenemitter bzw. Empfänger in einem ersten Ausführungsbeispiel.

**[0088]** [Fig. 6](#): einzelner Antennenemitter bzw. Empfänger in einem zweiten Ausführungsbeispiel.

**[0089]** [Fig. 7](#): einzelner Antennenemitter bzw. Empfänger in einem dritten Ausführungsbeispiel.

- [0090] [Fig. 8](#): einzelner Antennenemitter bzw. Empfänger in einem vierten Ausführungsbeispiel.
- [0091] [Fig. 9](#): einzelner Antennenemitter bzw. Empfänger in einem fünften Ausführungsbeispiel.
- [0092] [Fig. 10](#): einzelner Antennenemitter bzw. Empfänger in einem sechsten Ausführungsbeispiel.
- [0093] [Fig. 11](#): einzelner Antennenemitter bzw. Empfänger in einem siebten Ausführungsbeispiel.
- [0094] [Fig. 12](#): einzelner Antennenemitter bzw. Empfänger in einem achten Ausführungsbeispiel.
- [0095] [Fig. 13](#): optionale Reflektorschicht unter den Antennenelementen zur Modifikation der Abstrahl- bzw. Empfangscharakteristik.
- [0096] [Fig. 14](#): prinzipieller Aufbau der Oberflächen-Emitter bzw. Empfänger
- [0097] [Fig. 15](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem ersten Ausführungsbeispiel.
- [0098] [Fig. 16](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem zweiten Ausführungsbeispiel.
- [0099] [Fig. 17](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem dritten Ausführungsbeispiel.
- [0100] [Fig. 18](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem vierten Ausführungsbeispiel.
- [0101] [Fig. 19](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem fünften Ausführungsbeispiel.
- [0102] [Fig. 20](#): Emitter und Empfänger in einem sechsten Beispiel als Optokoppler kombiniert.
- [0103] [Fig. 21](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem siebten Ausführungsbeispiel.
- [0104] [Fig. 22](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem achten Ausführungsbeispiel.
- [0105] [Fig. 23](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem neunten Ausführungsbeispiel.
- [0106] [Fig. 24](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem zehnten Ausführungsbeispiel.
- [0107] [Fig. 25](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem elften Ausführungsbeispiel.
- [0108] [Fig. 26](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem zwölften Ausführungsbeispiel.
- [0109] [Fig. 27](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem dreizehnten Ausführungsbeispiel.
- [0110] [Fig. 28](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem vierzehnten Ausführungsbeispiel.
- [0111] [Fig. 29](#): Emitter bzw. Empfänger bestehend aus einer Mehrzahl von Einzelemittlern/Empfängern in einem fünfzehnten Ausführungsbeispiel.

## Detaillierte Beschreibung der Figuren:

[0112] [Fig. 1](#) skizziert die Abhängigkeit der Quantenausbeute eines Emitters mit einer einzelnen wirksamen Silber-Antenne in Abhängigkeit vom Abstand des Lumophors zur Oberfläche des Metallkerns. Berechnet wurde die Darstellung nach [2], jedoch mit  $C1 = \alpha_{\text{eff}}/\alpha$ . Der Lumophor besitzt eine intrinsische Quantenausbeute von 10%. Die Durchmesser der Metallkerne der Antennenpartikel betragen 40 bis 100 nm, wobei die Wellenlänge des Emitters bei 480 bis 600 nm liegt. Die Antenne ist dabei in ein Dielektrikum mit einer effektiven Brechzahl von 1,6 gehüllt. Dies ergibt sich z. B. aus einer Kombination von einer SiO<sub>2</sub>-Schicht mit darauffliegender Halbleiterschicht. Es ist insbesondere ersichtlich, dass es für optimale Quantenausbeuten bestimmte optimale Abstände gibt.

[0113] [Fig. 2](#) zeigt die Quantenausbeute eines Emitters mit einer wirksamen Silber-Antenne in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Berechnet wieder nach [2] mit  $C1 = \alpha_{\text{eff}}/\alpha$ . Der Antennenkern ist dabei in ein Dielektrikum mit  $n = 1,5$  gehüllt und der Dipol des Lumophors steht senkrecht zur Antenne. Die intrinsische Quantenausbeute des Lumophors beträgt 1% und er ist 8 nm von der Oberfläche des Metallkerns mit Durchmessern von 10 bis 80 nm entfernt.

[0114] In [Fig. 3](#) ist die Quantenausbeute eines Emitters mit einer wirksamen Gold-Antenne in Abhängigkeit des Abstands von Lumophor zum Antennenkern dargestellt. Die Antenne befindet sich im Dielektrikum Luft. Der Lumophor besitzt eine intrinsische Quantenausbeute von 30% bei einer Wellenlänge von 600 nm. Berechnet wurde die Figur nach [4] bzw. Formel (3) ff. Eingezeichnet ist auch der Effekt bei zwei wirksamen Metallkernen: die Quantenausbeute erreicht ihr Maximum bereits bei kleineren Abständen vom Antennenkern. Eine ähnliche Wirkung ergibt sich durch die Verwendung von länglichen Antennen.

[0115] [Fig. 4](#) gibt die effektive Polarisierbarkeit einer einzelnen Silber-Antenne zur Bestimmung der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Brechzahl des Dielektrikums an. Berechnet nach [3] bzw. Formel 1. Dargestellt sind einige Antennendurchmesser von 40 bis 100 nm bei zwei Resonanzfrequenzen 350 und 550 nm. Etwas im Roten von diesen Resonanzfrequenzen liegt die optimale Antennenverstärkung. Bei identischem Antennenkern verschiebt sich diese Frequenz mit zunehmendem Brechungsindex des umgebenden Dielektrikums ins Rote. Umgekehrt, wenn die Anregungsfrequenz gleich bleibt, so kann die effektive Polarisierbarkeit und damit auch die verstärkende Wirkung der Antenne durch die Brechzahl des Dielektrikums modifiziert werden.

[0116] Die folgenden [Fig. 5](#) bis [Fig. 12](#) und [Fig. 19](#) stellen schematisch Beispiele der einzelnen erfindungsgemäßen Licht- bzw. Spannungsquellen, der Antennen A, dar. Ihre Herstellung erfolgt grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen:

- Lithographische Erzeugung der Antennen, die an el. Zuleitungen gekoppelt sind Darstellung siehe [Fig. 19](#)) und anschließend dann Herstellung der el. Verbindung dieser Antennen über Lumophore, die z. B. in Form von kolloidalen Halbleiter-Partikeln oder Halbleitermolekülen vorliegen. Dazu kann z. B. ein Tropfen mit in einem Lösungsmittel gelösten Lumophoren auf die Antennen aufgetragen und verdunstet werden. Die Moleküle können sich dabei richtig gepolt an den Antennen mit z. B. verschiedener Oberfläche verankern.
- Erzeugen der separaten Antennenpartikel und Lumophore z. B. durch chemische Synthese. Anschließend entweder Fertigung von kompletten Antennen, die z. B. aus einem einzelnen Antennenpartikel und angekoppelten Lumophoren bestehen. Die Lumophore und Antennenpartikel können hierbei durch molekulare Brücken miteinander verbunden werden. Es werden dazu z. B. Antennenpartikel in eine Lösung mit den Lumophoren gegeben, die sich dann selbsttätig auf den Antennen verankern. Oder es werden die Antennenpartikel und Lumophore erst bei der Herstellung des z. B. Emitters auf den Leiterbahnen vereint. Das kann wieder durch die Brückenmoleküle selbsttätig ablaufen oder die Partikel können z. B. mittels Sedimentation aus einer Lösung aufeinander und den Leiterbahnen abgeschieden werden.

[0117] In der [Fig. 5](#) ist ein erstes Beispiel für ein Antennenelement A, das als Emitter wie auch als Empfänger (Spannungsquelle, Photovoltaikelement...) eingesetzt werden kann, dargestellt. Zur Vereinfachung für andere Ausführungsvarianten ist das gesamte Antennenelement, das aus den Funktionselementen **1**, **2** und **3** besteht, mit A bezeichnet.

[0118] Es besteht in dieser Variante u. a. aus einem Partikel **1** mit einer Molekül-Hülle **102** und dem Kern **101**. Der Kern **101** kann aus einem massiven Metallpartikel oder auch aus einer Metallschale um einen dielektrischen Kern bestehen. Im Falle, dass er aus einer dünnen Metallschale um einen dielektrischen Kern besteht, kann rel. zu einem massiven Kern z. B. die Resonanzfrequenz mehr ins Rote verschoben werden. Der Kern

**101** kann wie gezeichnet eine Kugelform oder aber auch jede andere Form besitzen. Der Kern kann auch mit zusätzlichen Schichten zur Oberflächenmodifikation (nicht dargestellt) bedeckt sein. Diese Oberflächenmodifikationsschicht kann aus dünnen anorganischen Schichten (z. B. Metalle, C, Si, SiO<sub>2</sub>, Halbleitern...) oder aus einer organischen SAM-Hülle bestehen. Dadurch kann z. B. die Anbindung der Brückenmoleküle **102** mit ihren Ankergruppen **102A** nur auf dieser Antenne erfolgen, auch wenn der Antennenkern **101** aus dem gleichen Material wie **301** besteht. Oder es kann durch die Beschichtung die Austrittsarbeit des Antennenpartikels verändert werden. Diese Oberflächenmodifikationsschicht ist entweder el. leitfähig oder sehr dünn (bis ca. 1 nm), so dass sie durchtunnelt werden kann. Die Brückenmoleküle **102** können z. B. durch einen Ligandenaustausch auf ein kolloidales Partikel **101** aufgebracht worden sein, wobei die das Partikel stabilisierenden Liganden zum Teil oder ganz ersetzt wurden. Die Brückenmoleküle **102** müssen also nicht wie gezeichnet den Partikelkern **101** vollständig umhüllen, sondern es können auch noch weitere Moleküle vorhanden sein, die z. B. keine Ankergruppe **102B** für Lumophore besitzen. Der Kern kann z. B. aus einem Metall wie Ag, Au, Al, Cu oder aber auch aus Halbleitern (z. B. ZnO, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oder leitfähigen Keramiken (z. B. TiN, Boride LaB<sub>6</sub> usw.) bestehen. Nur im Fall, dass ein metallischer Kern verwandt wird, unterstützt dieser Oberflächenplasmonen, die entsprechend die Wirkung des Lumophors **2** verstärken können. Die Brückenmoleküle **102** können die Abstände Z zum Lumophor sicherstellen und mit ihren Ankergruppen **102B** das Antennenpartikel **1** auch auf einer Unterlage (z. B. Leiterbahn oder Lumophor **2**) immobilisieren und elektrisch leitfähig verbinden. Die Brückenmoleküle **102** können dotiert oder undotiert sein, sowie organisch oder anorganisch. Die Brückenmoleküle können also z. B. aus dotierten  $\pi$ -konjugierten Kohlenwasserstoffen bestehen. Die Brückenmoleküle sind vorzugsweise bei der Mehrzahl der Lumophore auf dem Antennenpartikel n-dotiert, das auch an den n-dotierten Leiter gekoppelt ist bzw. sie sind p-dotiert am zweiten Antennenpartikel, das am p-dotierten Leiter anliegt. Die HOMO (das höchste besetzte Orbital) bzw. LUMO (das niedrigste unbesetzte Orbital) der Brückenmoleküle können an den Lumophor angepasst werden. Das heißt, es können Halbleitermoleküle für die Brückenmoleküle verwendet werden, die an den Lumophor angepasste Leitungs- bzw. Valenzbänder besitzen, um kleine el. Widerstände zu erreichen. Je nach Ausführung des Lumophors **2** kann ein anderer Fall vorteilhaft sein. Beispielsweise kann durch eine entsprechende n-Dotierung des Moleküls **102** die Injektion von Elektronen in den LUMO eines Lumophors ermöglicht werden. Ein p-dotiertes Molekül **302** könnte gleichzeitig ein Loch in den Lumophor transportieren.

**[0119]** Der Lumophor **2** ist hier ebenfalls mit einer Ligandenhülle **202**, die ihn mit den Ankergruppen **102B** sowie **302B** verbindet, gezeichnet. Dies braucht aber nicht unbedingt so zu sein. Beispielsweise kann sich eine Ankergruppe **102B** auch direkt mit der Oberfläche des Lumophors **2** verbinden. Oder es können sich die Liganden **202** des Lumophors durch einen Ligandenaustausch auch direkt an die Oberfläche der Partikel **1** und **3** binden. Lumophore, die aus Molekülen bestehen (z. B. molekulare Dioden oder organische Halbleitermoleküle) benötigen bzw. besitzen auch keine Ligandenhülle. Die Moleküle **202** können ebenfalls dotiert sein. Seine Aufgabe (Lichtemission unter Stromfluss bzw. Lichtabsorption unter Spannungserzeugung) kann der Lumophor **2** alleine oder in Kombination mit den Brückenmolekülen **102** und **302** (z. B. bei einem Charge-Transferkomplex) erfüllen. Es können – im Gegensatz zur Zeichnung – auch mehrere Lumophore an die Antennen angebunden sein, das gesamte Partikel **1** oder **3** kann z. B. komplett mit Lumophoren umhüllt sein. Dabei können die Lumophore z. B. verschieden dotiert sein. Des Weiteren kann die Funktion des Lumophors **2** auch komplett von z. B. halbleitenden Brücken-Molekülen übernommen werden, welche die Antennen **1** und **3** direkt verbinden – der Lumophor **2** kann also auch entfallen. Bestimmte Lumophore (z. B. Halbleitermoleküle – nicht jedoch z. B. Halbleiternanokristalle als Emitter), die mit Ankergruppen an die Antennenpartikel gebunden sind, stehen mit ihrem strahlenden Dipol senkrecht zu den Antennen. Dies garantiert eine maximale Steigerung der Quantenausbeute. Außerdem ist durch die Fixierung des Lumophors auch gleichzeitig sein strahlender Dipol fixiert. Dadurch erzeugt bzw. absorbiert die Antenne Licht nur mit der entsprechenden Polarisation.

**[0120]** Ein Beispiel für die Wirkungsweise eines Antennenempfängers A ist z. B. folgendes: Bei Bestrahlung mit Licht im Bereich der Resonanzwellenlänge der Antenne A und der Bandlücke des Lumophors **2** werden in den Antennenkernen **101** und **301** Plasmonenschwingungen induziert. Diese bewirken eine Verstärkung des el. Feldes, das auf den Lumophor wirkt. Im Lumophor wird dabei ein Elektron vom HOMO in den LUMO des Lumophors angeregt. Dieses Elektron kann dann in den tiefer liegenden LUMO des Brückenmoleküls **302** und schließlich auf das noch tiefere Niveau im Antennenkern **301** wechseln. Der Antennenkern **301** könnte dazu z. B. aus Al oder Ag bestehen oder mit einem n-leitenden Halbleiter beschichtet sein. Gleichzeitig kann das entstehende Loch vom HOMO des Lumophors über das höher gelegenen HOMO des Brückenmoleküls **102** in den Antennenkern **101** gelangen. Der Kern **101** könnte z. B. aus Au bestehen oder mit einem p-Halbleiter bedeckt sein. Die Antennen **1** bzw. **3** ihrerseits sind wieder an Leiterbahnen (nicht dargestellt) gebunden, über die der Stromkreis geschlossen werden kann. Dieser Vorgang kann für einen Antennenemitter gerade umgekehrt ablaufen.

**[0121]** Zur Erzeugung einer Potentialdifferenz zwischen den Antennen oder einer ohmschen Anbindung der Brückenmoleküle kann die Austrittsarbeit der Antennenpartikel **1** und **3** angepasst werden durch:

- unterschiedliche Metalle des Kerns (z. B. **101** = Ag, **301** = Au oder **101** = Al, **301** = Au usw.)
- entsprechende Beschichtungen der Antennenpartikel mit Materialien welche die geeignete Austrittsarbeit für eine möglichst ohmsche Anbindung der Brückenmoleküle besitzen (z. B. **101** ist Al beschichtet, **301** ist mit Au beschichtet, **101** besteht aus Ag, **301** ist p-ZnO beschichtet usw.) oder
- durch Verwendung eines Metallkerns **101** in Verbindung mit einem massiven anorganischen Halbleiterpartikel **301** (z. B. In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, GaN, TiO<sub>2</sub>, SiC usw.).

**[0122]** Bei Beschichtung mit Metallen (z. B. Ag auf Au) wirkt sich dies natürlich auch auf die Oberflächenplasmonenresonanz aus, weil sich Oberflächenplasmonen nur bis einige nm unter die Oberfläche erstrecken.

**[0123]** Das Antennenpartikel **3** mit seinem Kern **301** und der Hülle **302** entspricht im Wesentlichen dem Partikel **1**. Jedoch können – wie erwähnt – unterschiedliche Materialien und Beschichtungen als bei Partikel **1** vorteilhaft sein, um die Gesamtfunktion der Antenne A zu garantieren. Dadurch, dass ein zweites Antennenpartikel verwendet wird, besteht die Möglichkeit die Quantenausbeute bzw. die el. Feldverstärkung weiter zu steigern.

**[0124]** [Fig. 6](#) zeigt einen ähnlichen Antennen-Emitter bzw. Empfänger A wie [Fig. 5](#). Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass auf das zweite Antennenpartikel komplett verzichtet wurde. Der el. Strom fließt deshalb über das Partikel **1**, den Lumophor **2** und einen Kontakt **4**. Bei diesem Kontakt **4** handelt es sich z. B. um einen organischen Halbleiter, der auf die Antenne mit den Lumophoren beschichtet werden kann. Dazu können auch zur Vermeidung von „Kurzschlüssen“ mit der Antenne mehrere Lagen von Lumophoren auf die Antenne **1** aufgetragen werden (nicht dargestellt). Alternativ kann der Kontakt **4** auch eine zweite Leiterbahn sein. Wie in [Fig. 5](#) können die Brückenmoleküle **102** und der Kontakt **4** aus dotierten Halbleitern bestehen, um die Injektion von Elektronen und Löchern in den Lumophor zu leisten. Der Antennenkern **101** kann auch wieder aus einem Material mit verschiedener Austrittsarbeit bestehen wie sie der Kontakt **4** bzw. die Elektrode (nicht dargestellt), die an Kontakt **4** angrenzt, besitzt. Beispielsweise kann der Kern **101** aus Silber bestehen, die Moleküle **102** können gleichzeitig n-dotiert sein und mit ihrem LUMO an die Antenne bzw. nicht gezeichnete Leiterbahn angepasst sein. Der Kontakt **4** kann dann ein Lochleiter sein, der an ITO angrenzt. Eine umgekehrte Variante kann z. B. aus einer Gold-Antenne **101** mit p-dotierten Molekülen **102** und einem n-dotierten Kontakt **4** bestehen. Das Partikel **101** kann ebenfalls wie in [Fig. 5](#) mit zusätzlichen Schichten versehen sein (Zweck siehe Beschreibung zur [Fig. 5](#)). Die Brückenmoleküle **102** stellen auch hier die Einhaltung des Abstandes Z sicher, der für die maximale Quantenausbeute ausschlaggebend ist.

**[0125]** In [Fig. 7](#) wird eine dritte Variante von Antennenemittern bzw. Empfängern dargestellt. Das gesamte Element ist wieder mit A bezeichnet. Es besteht aus einem Partikel **1**, dem Lumophor **2** sowie dem Partikel **3**. Beide Antennenpartikel **1** und **3** besitzen massive oder schalenförmige Kerne **101** und **301**, die vorzugsweise aus Metallen wie Ag, Al, Au, Cu mit geeigneter dielektrischer Funktion bestehen, um im beabsichtigten Wellenlängenbereich eine Plasmonenresonanz zu erreichen. Die Kerne müssen nicht wie gezeichnet kugelförmig sein. Sondern es können auch z. B. stabförmige oder ovale Formen verwendet werden. Die Antennen-Kerne können auch aus voneinander verschiedenen Metallen bestehen. Die Partikel **1** bzw. **3** können auch entgegen der Darstellung komplett mit Lumophoren **2** umhüllt sein, wobei dann z. B. nur einige von Strom durchflossen werden. Es können dabei auch verschiedene Lumophore (z. B. n- und p-dotierte Nanokristalle) gemischt verwendet werden.

**[0126]** Die Kerne sind umgeben von dielektrischen Schichten **103** und **303**. Diese bestehen aus Dielektrika mit einer geeigneten Brechzahl und Dicke. Die Dielektrika können z. B. aus Oxiden wie SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> usw., Fluoriden wie MgF<sub>2</sub>, SrF<sub>3</sub>, KF usw., Nitriden und Halbleitern bestehen. Sie sollen vorzugsweise transparent im angestrebten Wellenlängenbereich sein. Die dielektrischen Schichten beider Partikel **1** und **3** können voneinander verschieden sein. Die Aufgaben der dielektrischen Schichten sind u. a.: Zusammen mit den weiteren Schichten, welche die Partikel umgeben (Halbleiterschichten **104** und **304**, Molekülhüllen **102** und **302**, Leiterbahnen im Leuchtmittel usw.) schaffen sie für die Antennenkerne eine dielektrische Umgebung mit einer effektiven Dielektrizitätskonstante, die eine Antennenresonanz im angestrebten Wellenlängenbereich erlaubt. Zusätzlich können sie als Gitteranpassungsschicht zwischen den Kernen und den anorganischen Halbleiterschichten fungieren. Und gemeinsam mit den weiteren Schichten stellen sie den erforderlichen Abstand Z des Lumophors **2** zum Antennenkern her. Nachdem die erforderliche Dielektrizitätszahl z. B. mit den Formeln 1 oder den Verfahren aus [1] ermittelt wurde, kann in Abhängigkeit von den Halbleiterschichten **104** und **304** z. B. mittels der effektive Mediumtheorie eine erforderliche Dicke und Brechzahl der dielektrischen Schicht ermittelt und optimiert werden, wobei die radial abnehmende elektrische Feldstärke

zu berücksichtigen ist. Die Dicken der dielektrischen Schichten liegen dann bei einigen nm bis einigen 10 nm. Auf diese Weise ist es z. B. möglich, dass Antennenresonanzen im blauen Spektralbereich trotz hochbrechender Halbleiterschichten **104** und **304** erzielt werden. Oder es kann die Antennenresonanz mittels hoher Brechzahlen der dielektrischen Schichten z. B. ins Infrarote verschoben werden.

**[0127]** Auf den dielektrischen Schichten befinden sich die halbleitenden Schichten **104** und **304**. Diese halbleitenden Schichten können beide aus heterogenen oder gleichartigen anorganischen oder organischen Halbleitern bestehen. Im Falle, dass es sich um organische Halbleitermoleküle handelt, können diese z. B. aus einer SAM bzw. halbleitenden Mono- oder Multilag bestehen, die gleichzeitig auch noch die Funktion der Brückenmoleküle übernehmen können. Oder sie bestehen aus einzelnen oder mehreren Schichten von anorganischen Element- oder Verbindungshalbleitern wie Si, SiC, ZnO, GaP, AlP, GaN, InN, ZnS, MgS usw. Sie haben die Aufgabe, die elektrische Verbindung des Lumophors mit den Leiterbahnen zu ermöglichen. Es können wahlweise die Bandlücken der Halbleiterschichten **104** bzw. **304** größer als die Bandlücken bzw. HOMO-LUMO-Abstände der Lumophore **2** gewählt werden, wobei weitere Halbleiter-Hüllschichten mit versetzten Bandlücken als Umhüllung für die Halbleiterschichten **104/304** dienen können. N-dotierte Halbleiterschichten können zur Injektion von Elektronen und p-dotierte Schichten zur Injektion von Löchern in der Lumophor verwandt werden. Die Halbleiterschichten sollten im angezielten Frequenzbereich möglichst transparent sein und sie können rel. hoch dotiert sein, um die Breite der Raumladungszone an der Oberfläche zu reduzieren. Die Gitterkonstanten der anorganischen Halbleiterschichten sollten mit der unterhalb liegender Schichten möglichst übereinstimmen.

**[0128]** Die Halbleiterschichten wiederum können von Oberflächenmodifikationsschichten (nicht dargestellt) bedeckt sein, welche die gleiche Aufgabe wie in [Fig. 5](#) erfüllen. Zusätzlich können durch diese Oberflächenmodifikationsschicht die freien Oberflächenzustände der Halbleiterschichten **104/304** reduziert werden. Diese optionalen Schichten können schließlich mit den Brückenmolekülen **102** und **302** bedeckt sein. Diese Moleküle entsprechen grundsätzlich denen in [Fig. 5](#). Jedoch ist ihre Länge aufgrund der darunter liegenden Schichten entsprechend kürzer als in [Fig. 5](#), um die gleichen Abstände  $Z$  einzuhalten. Wenn die Partikel im späteren Emitter- bzw. Photovoltaikelement nur lose auf einander abgelagert werden sollen, so können die Brückenmoleküle **102**, **202** und **302** entfallen. Die dielektrischen und halbleitenden Schichten sind dann für ein gleiches Maß  $Z$  entsprechend dicker auszuführen.

**[0129]** Zwischen den Antennenpartikeln **1** und **3** befinden sich ein oder mehrere Lumophore **2**, die eine Molekülhülle mit Ankergruppen für die Oberflächen der Antennenpartikel besitzen können.

**[0130]** Ein möglicher Funktionsablauf ist:

Über eine n-dotierte Leiterbahn (nicht dargestellt), die z. B. aus dem gleichen Halbleitermaterial wie eine elektronenleitende Schicht **104** besteht, fließen Elektronen in die halbleitende Hülle des Partikels **1** und von dort in den LUMO des Lumophors **2**. Umgekehrt erreichen gleichzeitig Löcher über eine p-dotierte Leiterbahn (nicht dargestellt) und die p-leitende Leiterschicht **304** den HOMO des Lumophors. Statt z. B. strahlungslos zu rekombinieren, werden durch die Ladungsverschiebung im Lumophor Oberflächenplasmonen in den Antennen angeregt, die dann strahlend zerfallen.

**[0131]** Das Antennenelement A in [Fig. 8](#) ist analog zu dem in [Fig. 7](#) aufgebaut. Jedoch wurde wieder auf eine wirksame Antenne verzichtet. A besteht also aus dem Partikel **1** mit Metallkern **101** und den entsprechenden Hüllen wie bei [Fig. 7](#), sowie aus dem mindestens einen Lumophor **2** und einem Kontakt **4**. Analog zu [Fig. 6](#) kann der Kontakt **4** z. B. aus einer über die Lumophore beschichteten Halbleiterschicht (nicht dargestellt), einem massiven Halbleiterpartikel ohne Metallkern oder aus einer Leiterbahn (nicht dargestellt) bestehen, die an die Lumophore anbindet. Die Lumophore **2** können wieder mit organischen Hüllen bedeckt sein, die dotiert sein können und Ankergruppen für die Oberfläche der Antenne **1** besitzen können. Ein möglicher Funktionsablauf ist:

Durch einfallendes Licht werden im Antennenkern **101** Oberflächenplasmonen angeregt. Das daraus resultierende EM-Feld hebt Elektronen in den Lumophoren **2** vom Valenz- in die Leitungsbänder. Diese Elektronen können über den n-dotierten Halbleiter, der entweder die Schicht **104** oder der Kontakt **4** sein kann, in die angrenzende Leiterbahn (nicht dargestellt) gelangen. Gleichzeitig können die Löcher aus dem Valenzband des Lumophors über den p-dotierten Halbleiter, der umgekehrt Kontakt **4** oder die Schicht **104** sein kann, in die zweite Leiterbahn (nicht dargestellt) gelangen. Der Stromkreis kann über eine externe Last geschlossen werden. Der Antennenkern **101** wirkt dabei wie ein makroskopischer Spiegel, wodurch ein großer Teil des einfallenden Lichts auf den Lumophor **2** konzentriert wird.

**[0132]** [Fig. 9](#) stellt eine Variation des Antennenemitters bzw. Empfängers aus [Fig. 7](#) dar. Das gesamte An-

tennenelement, das wieder mit A bezeichnet ist, besteht im Gegensatz zu [Fig. 7](#) aus Antennenkernen **101** und **301**, die direkt mit Halbleiterschichten **104** und **304** (z. B. CdSe, GaN, ZnO usw.) bedeckt sind. Die zusätzlichen dielektrischen Schichten fehlen also. Bei Verwendung von Halbleiterschichten **104** bzw. **304** aus n- bzw. p-dotierten anorganischen Halbleitern liegen die Antennenresonanzen in der Regel im langwelligen Roten bis Infraroten Bereich aufgrund der hohen Dielektrizitätszahlen der Halbleiterschichten. Die Partikel **1**, **2** und **3** können wie bei den vorigen Ausführungsvarianten wieder mit Molekülschichten **102**, **202** und **302** bedeckt sein. Diese Molekülschichten können mittels spezieller Ankergruppen die Partikel selbständig verbinden oder die Partikel auf Leiterbahnen immobilisieren. Die für die optimale Quantenausbeute erforderlichen Abstände Z werden durch die Dicken der Schichten **104** bzw. **304** und die Länge der optionalen Molekülbrücken **102**, **202** und **302** eingehalten.

[0133] In [Fig. 10](#) ist eine Ausführungsvariante eines Antennenelementes A dargestellt, die ohne metallische Antennenkerne auskommt. Die Einhaltung des Abstandes Z ist deshalb nicht mehr erforderlich. Das komplette Antennenelement A besteht aus einem Partikel **1** mit einem Halbleiterkern **104** und optionaler Molekülhülle **102**. Des Weiteren besteht es aus dem Lumophor **2**, der ebenfalls eine optionale Molekülhülle **202** besitzt. Und endlich besteht es aus einem Partikel **3** mit Halbleiterkern **304** und Molekülhülle **302**. Die optionalen Molekülhüllen erfüllen wieder die Aufgabe, die Partikel untereinander und mit Leiterbahnen selbständig zu verknüpfen. Die Partikelkerne **104** und **304** bestehen aus beliebigen anorganischen Halbleitern und sind verschieden dotiert. Beispielsweise kann **104** aus einem n-dotierten Halbleiter (z. B. n-GaP, n-GaAs, n-Si, n-ZnS usw.) bestehen und **304** aus einem p-dotierten Halbleiter (z. B. p-AIP, p-AISb, p-InGaAs p-ZnS usw.). Der Lumophor **2** kann hier eine sehr hohe intrinsische Quantenausbeute besitzen, die keiner Antennenverstärkung bedarf. Als Vorteile bleiben auch ohne Metall-Antennen immer noch: Die emittierte Strahlung kann ohne Totalreflexion in die Umgebung gelangen und die Emitter bzw. Empfänger A können mit molekularen Lumophoren polarisiertes Licht erzeugen bzw. selektiv eine Polarisationsrichtung absorbieren.

[0134] Ein Funktionsablauf könnte hier sein: aus einer n-dotierten Leiterbahn gelangen Elektronen in den n-dotierten Kern **104**, der eine größere Bandlücke als Lumophor **2** besitzen kann. Von dort gelangen sie in das Leitungsband bzw. den LUMO des Lumophors **2**, wo sie strahlend rekombinieren mit den Löchern, die gleichzeitig aus einer p-dotierten Leiterbahn über den p-dotierten Kern **304** in den HOMO bzw. das Valenzband des Lumophors gelangen.

[0135] [Fig. 11](#) stellt das entsprechende Antennenelement A wie [Fig. 10](#) dar. Es wurde jedoch auf den Lumophor verzichtet und es existiert nur ein n-p Übergang durch die gegensätzlich gedopten Halbleiterpartikel **104** und **304**.

[0136] [Fig. 12](#) stellt schließlich eine letzte Ausführungsvariante eines Antennenemitters bzw. Empfängers A dar. Hier bestehen die metallischen Antennenkerne **101** und **301** aus länglichen Partikeln. Die Variante in [Fig. 12](#) ist analog zur Ausführungsvariante in [Fig. 5](#) dargestellt. Jedoch können längliche, stabförmige, vieleckige und andere Partikelformen auch mit allen anderen Ausführungsvarianten verwendet werden. Längliche Antennen ermöglichen höhere Quantenausbeuten und Antennenverstärkungen als sphärische Antennen, jedoch bei höheren Wellenlängen. Auch bei länglichen Antennen können die Abstände Z durch dielektrische und Halbleiter-Schichten auf den Metallkernen sowie durch Brückenmoleküle eingehalten werden.

[0137] In [Fig. 13](#) ist die prinzipielle Funktion der optionalen metallischen Reflektorschicht unter den Antennenelementen A dargestellt. Alle Ausführungsvarianten benötigen eventuell eine Abstrahl- bzw. Empfangscharakteristik, die das Licht in bestimmte Raumrichtungen konzentriert abstrahlt bzw. daraus auffängt. Lumophore, deren strahlender Dipol rel. zur Antenne festliegt, können zusammen mit den Antennenpartikeln Dipolantennen bilden. Unter den Dipolantennen kann eine metallische (z. B. Al, Ag, Au usw.) Reflektorschicht R angebracht werden. Es kommt zur Überlagerung der Wellen mit dem Spiegeldipol und aus dem Dipol-Rundstrahler wird ein Strahler, der nur noch in eine Halbebene emittiert. Dazu ist bei Emittieren erforderlich, dass der strahlende Dipol relativ zu den Antennenkernen festliegt. Dies kann durch die Fixierung von molekularen Lumophoren (z. B. vom Donor-Akzeptor-Typ) auf den Antennen durch molekulare Brücken erreicht werden. Das Antennenelement A liegt im Abstand d über der metallischen Reflektorschicht R. Dabei ist A von R durch ein Dielektrikum D mit der Brechzahl n getrennt. Über den Antennen A liegt das Dielektrikum D2 mit der Brechzahl n2. Der gesamte Emitter ist umgeben von Luft **13\_3** mit der Brechzahl 1. Der Emitter emittiert Licht mit der Wellenlänge  $\lambda_0$  in Luft. Dabei ergibt sich im Dielektrikum D eine Wellenlänge  $\lambda = \lambda_0/n$ . **13\_1** skizziert nun grob die Antennenkeule für  $d/\lambda = 0,125$ . **13\_2** zeigt die Abstrahlung für  $d/\lambda = 0,35$  und **13\_4** deutet die Abstrahlcharakteristik für  $d/\lambda = 0,25$  an. Das Antennenelement A ist in Stromflussrichtung dargestellt.

[0138] Die folgenden [Fig. 14](#) bis [Fig. 29](#) stellen allesamt Beispiele für Geräte dar, in welchen die Antennen-

elemente A aus den [Fig. 5](#) bis [Fig. 12](#) verbaut sind. Diese Geräte können als Emitter (z. B. Lichtquellen, Displays) und Empfänger (z. B. Sensoren, Bildsensoren, Photovoltaik Elemente usw.) verwendet werden. Um farbiges Licht zu erzeugen bzw. um nur eine Wellenlänge zu absorbieren, können Lumophore bzw. Antennen A verwendet werden, die nur bei dieser Wellenlänge arbeiten. Alternativ können Lumophore bzw. Antennen A für verschiedene Wellenlängen gemischt werden, um z. B. weißes Licht zu erzeugen. Die Antennen und Lumophore können geordnet oder regellos angebracht sein, um entsprechend selektiv oder unselektiv z. B. Licht einer Polarisationsrichtung zu absorbieren. Für Anwendungen bei welchen einzelne Bereiche angesteuert werden müssen (z. B. Displays, Bildsensoren) müssen die Leiterbahnen und Leiterschichten für einzelne Pixel aufgeteilt werden. Es ist auch möglich, dass die Emitter bzw. Empfänger in den [Fig. 14](#) bis [Fig. 20](#) selektiv angesteuerte Antennen enthalten, die jeweils verschiedene Wellenlängen emittieren bzw. empfangen. Damit können z. B. in Verbindung mit einem Lichtleiter Datenübertragungseinrichtungen mit einer sehr hohen Zahl an Kanälen kostengünstig hergestellt werden. Für andere Anwendungen können z. B. alle gleichen Leiterbahnen parallelgeschaltet und mit einer externen Spannungsversorgung oder Last verbunden werden.

**[0139]** [Fig. 14](#) stellt in einer dreidimensionalen Ansicht und einer zugehörigen Vorderansicht den prinzipiellen Aufbau der Emitter- bzw. Empfängerelemente dar, bei welchen sich die Antennen A mit den Lumophoren an der Oberfläche befinden. Dazu benötigen die Geräte elektrische Zuleitungen, die im Substrat integriert sind und die mittels der in der Halbleiterelektronik üblichen Verfahren hergestellt werden können. Die Antennen A befinden sich im el. Kontakt mit den Leiterbahnen L1 und L2. Diese bestehen aus anorganischen Halbleitern (polykristalline, amorphe oder monokristalline Element- und Verbindungshalbleiter (III-V, II-VI, I-III-VI Halbleiter usw.: z. B. ZnO, GaN, SiC, InP, GaP, GaAs, Si, Ge, AlGaAs, transparente Oxide) oder auch aus metallischen Schichten (wie z. B. Al, Au, TiN, LaB6 usw., wenn die Antennen mit ausreichend dicken dielektrischen Schichten bedeckt sind). Die Leiterbahnen L1 und L2 können wie die Oberflächen der Antennen mit „Oberflächenmodifikationsschichten“ bedeckt werden, um z. B. eine Selektivität für SAM-Schichten zu erzeugen. Die Leiterbahnen L1 können z. B. n-dotiert und die Leiterbahnen L2 p-dotiert sein und aus den gleichen oder auch verschiedenartigen Halbleitern wie die Hüllen der Antennen bestehen. Die Leiterbahnen L1 und L2, die z. B. n- bzw. p-dotiert sind, stehen in Kontakt mit den metallischen Zuleitungen L1\_Z und L2\_Z. Dabei wurde bei der Kontaktierung der Leiterschichten L1 und L2 durch übliche Verfahren ein ohmscher Kontakt erzeugt. Dazu werden einerseits Halbleiterschichten und Metallschichten passender Fermienergie kombiniert und andererseits die Dotierung der Halbleiter ausreichend hoch gewählt. Die Dotierung der Leiterschichten L1 und L2 kann z. B. durch Beschichten der Leiter L1\_Z und L2\_Z mit zusätzlichen Dotierstoffen (z. B. bei Si für n-Dotierung P und für p-Dotierung Al) enthaltenden Schichten erreicht werden, die im Anschluss durch eine Wärmebehandlung in die Leiterbahnen L1 bzw. L2 diffundieren können. Die Zuleitungen L1\_Z und L2\_Z bestehen in dieser Figur aus zwei Leiterschichten, die durch Stege („Vias“) mit den Leiterbahnen L1 und L2 verbunden sind. Es können aber auch beliebige andere Ausführungen und Abwandlungen verwendet werden. Die Leiterschichten L1\_Z und L2\_Z bestehen bevorzugt aus Metallen und Halbmetallen mit guter el. Leitfähigkeit wie z. B. Al, Ag, Cu, Au, W, aber auch aus keramischen Schichten wie TiN. Die Schichten können auf ein Substrat Sub beschichtet werden. Das Substrat kann aus Halbleitern (z. B. Si, GaAs..), Isolatoren wie (Gläsern, Keramiken, Kunststoffen) oder Metallen bestehen. Die el. leitenden Schichten sind durch Isolationsschichten D voneinander getrennt. Diese bestehen z. B. aus z. B. Oxidschichten (z. B. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gläser) oder anderen keramischen Schichten (z. B. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Weitere Schichten z. B. Sperrschichten (z. B. SiN), Kontakt- und Haftsichten (z. B. TiW), Diffusionsbarrierschichten (z. B. TiN), Ätzstoppschichten (z. B. SiC) sind vorteilhaft, aber nicht dargestellt. Die Schichten können mittels gängiger Lithographie und Beschichtungsverfahren (CVD, MOCVD, PVD, verschiedene Epitaxieverfahren usw.) erzeugt werden.

**[0140]** Die Herstellung kann entweder dadurch erfolgen, dass zuerst die Leiterbahnen L1\_Z/L2\_Z und Isolationsschichten D auf ein einkristallines Halbleitersubstrat beschichtet werden, welches anschließend gewendet wird und auf ein z. B. Metall- oder Glassubstrat gebondet wird. Die Halbleiterbahnen L1 und L2 können dann durch Ätzen des oben liegenden Halbleitersubstrats erzeugt werden. Alternativ können auf ein Substrat zuerst die Leiterschichten L1\_Z/L2\_Z und als letztes die Leiterbahnen L1 und L2 beschichtet werden. Die Morphologie der Leiterbahnen kann dann polykristallin sein.

**[0141]** [Fig. 15](#) stellt einen Ausschnitt aus einer Lichtquelle bzw. einer Spannungsquelle, die eine Mehrzahl an Antennenelementen A verwendet, dar. Bei den Antennen A handelt es sich um Ausführungen mit einer aktiven Antenne (siehe auch [Fig. 6](#) und [Fig. 8](#)). Die Leiterbahnen L1, die z. B. aus n-dotierten anorganischen Halbleitern bestehen, sind über einen ohmschen Kontakt mit der metallischen Leiterschicht L1\_Z verbunden. Entsprechend sind die Leiterbahnen L2, die z. B. aus p-dotierten anorganischen Halbleitern bestehen, mit der Leiterschicht L2\_Z verbunden. Die Leiterschichten L1\_Z und L2\_Z können an eine externe Spannungsquelle oder einen Verbraucher angeschlossen sein. Die Leiterschichten sind durch dielektrische Schichten D aus z. B. SiO<sub>2</sub> voneinander isoliert.

**[0142]** Die Leiterbahnen L1 besitzen eine spezifische Oberfläche **1**, auf der selektiv eine SAM S1 erzeugt werden kann, die mit ihren Ankergruppen auf der Leiterbahn L1 fixiert ist. Die funktionalen Gruppen dieser Moleküle können spezifisch so gestaltet sein, dass der Lumophor sich richtig gepolt auf ihnen ankoppeln kann. Entsprechend können optional auf den Leiterbahnen L2 Lumophore in richtiger el. Polung immobilisiert werden. Zur Vermeidung von direkten Kontakten der Antenne mit den Leiterbahnen können auch mehrere Schichten von Lumophoren aufgetragen werden. Um zu verhindern, dass sich auch an nicht vorgesehenen Stellen – wie den Oberseiten der Leiterbahnen – Lumophore oder Antennen verankern können, können diese Flächen mit einer zusätzlichen Schicht **15\_1** bedeckt sein. Diese Schicht besitzt eine Oberfläche, die den Ankergruppen der Brückenmoleküle keine Haftmöglichkeit erlaubt. Sie kann z. B. aus SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oder Fotolack bestehen. Die Antennen A können schließlich auf den Lumophoren immobilisiert werden. Dazu besitzen die Lumophore z. B. Ankergruppen für die Oberfläche der Antennen oder umgekehrt. Durch z. B. Kapillarkräfte beim Verdunsten des Lösungsmittels, in dem sich die Antennenpartikel befinden, können sich dichte Ketten der Antennen A auf den Leiterbahnen bilden.

**[0143]** Der fertige Emitter ist durch ein transparentes Dielektrikum D2, das z. B. durch Spinn-Coating aufgetragen wurde und aus Kunststoffen oder Gläsern bestehen kann, vor Umwelteinflüssen geschützt.

**[0144]** In [Fig. 16](#) ist ein Querschnitt durch einen Teil eines Oberflächenemitters- bzw. Empfängers dargestellt, der je zwei Antennenpartikel kombiniert mit Lumophoren verwendet. Der Substrataufbau ist identisch mit der Ausführung in [Fig. 15](#) mit dem Unterschied, dass die Strukturgröße (z. B. Leiterbahnabstände) etwa doppelt so groß sein kann. Die obere Leiterschicht L1\_Z wirkt gleichzeitig als Reflektorschicht R. Durch Variierung des Abstands d kann die Abstrahlcharakteristik verändert werden. Die Leiterschichten L1 und L2, sowie die Schicht **15\_1** entsprechen wiederum denen in [Fig. 15](#).

**[0145]** Auf Leiterbahn L1 wird z. B. eine SAM S1 mit Ankergruppen für die Leiterbahn **1** erzeugt. Falls die Leiterbahnen L1 und L2 aus dem gleichen Material bestehen, bzw. die identische Oberflächeneigenschaft für die SAM besitzen, so kann eine Leiterbahn z. B. mit Fotolack abgedeckt sein. Auf der SAM S1 können anschließend die ersten Antennenpartikel immobilisiert werden. Es kann sich eine dichte Kette von Antennenpartikeln auf der Leiterbahn L1 z. B. durch Kapillarkräfte beim Verdunsten des Lösungsmittels bilden. Schließlich können die Lumophore mit ihren Ankergruppen für die Oberfläche des Antennenpartikels richtig gepolt auf dem ersten Antennenpartikel abgeschieden werden. Und endlich wird das zweite Antennenpartikel durch die SAM S2 auf der Leiterbahn L2 immobilisiert. Durch die Wahl eines Leitungsbahnabstandes zwischen L1 und L2 etwas kleiner als der zweifache Antennendurchmesser wird ein el. Kontakt zwischen den Partikeln gewährleistet. Alternativ kann die Antenne A auch komplett vorgefertigt als Dimer vorliegen und richtig gepolt auf SAM-Schichten S1 und S2 immobilisiert werden. Eine transparente Schicht D2 bedeckt wie in [Fig. 15](#) wieder zum Schutz das fertige Element.

**[0146]** [Fig. 17](#) zeigt einen Teil eines Querschnitts durch eine weitere Variante eines Emitters oder Empfängers mit einer einzigen aktiven Antenne. Das Substrat Sub mit den Leiterschichten L1\_Z, L2\_Z und dem isolierenden Dielektrikum D entspricht dem aus den vorhergehenden Figuren. Die Leiterbahnen L1 und L2, die wieder z. B. aus dotierten Halbleitern bestehen, sind in der Höhe versetzt angeordnet und voneinander durch ein Dielektrikum D isoliert. Die Leiterbahnen L2, die über einen ohmschen Kontakt mit L2\_Z verbunden sind, liegen tiefer als die Leiterbahnen L1. Dadurch bildet sich eine „Wanne“ aus, in der durch Sedimentation oder Immobilisierung auf SAM-Schichten S2 eine oder mehrere Schichten von Lumophoren richtig gepolt abgeschieden werden können. Die Antennen A können durch molekulare Ankergruppen an den SAM-Schichten S1 bzw. den Leiterbahnen L1 und gleichzeitig auf den Lumophoren el. leitend befestigt werden. Alternativ können die Antennenpartikel auch durch Sedimentation auf den Lumophoren abgeschieden werden, so dass sie die gesamte Oberfläche der „Wanne“ bedecken. Die Oberseite der Leiterbahnen L1 ist wieder mit einer Schicht **15\_1** bedeckt, die eine Immobilisierung von Partikeln an dieser Stelle verhindert. Die transparente Schutzschicht D2 bedeckt wie in den vorhergehenden Ausführungsvarianten die Antennen und Leiterbahnen.

**[0147]** [Fig. 18](#) zeigt wieder einen Teil eines Emitters bzw. Empfängers, der aus zwei Antennenpartikeln besteht. Das Substrat Sub, die Leiterschichten L1\_Z und L2\_Z, sowie die dielektrischen bzw. Isolierschichten D und D2 entsprechen denen in den vorherigen Ausführungsvarianten.

**[0148]** Die Leiterbahnen sind wieder wie in den vorhergehenden Ausführungsvarianten aufgebaut und an ihrer Oberseite mit einer Schicht **15\_1** bedeckt, die z. B. aus Fotolack, SiO<sub>2</sub> oder einem beliebigen Material besteht, auf dem die SAM-Schichten S1 und S2 nicht haften können. Die SAM-Schicht S1 kann sich also nur an den Seiten der Leiterbahnen L1 und die SAM S2 an den Seiten der Leiterbahnen L2 bilden. Die Antennenpartikel, die beide eine verschiedene Oberfläche besitzen können, können sich deshalb nur an den zugehörigen

Leiterbahnen anlagern. Jedoch besitzen die Leiterbahnen L1 und L2 Abstände B, die möglicherweise – ebenso wie die Durchmesser der Antennen – aufgrund von Fertigungstoleranzen in einem größeren Bereich schwanken. Die Lumophore, die nur einen sehr kleinen Toleranzbereich zu überbrücken in der Lage sind, können trotzdem einen elektrischen Kontakt zwischen den Antennenpartikeln herstellen. Dazu können z. B. Lumophore mit zwei Ankergruppen, von denen eine Ankergruppe durch Schutzgruppen geschützt ist, mit der anderen Ankergruppe auf einer Antenne abgeschieden werden. Nach Entschützen der Schutzgruppen ist auch die zweite Ankergruppe der angelagerten Lumophore bereit. Dadurch können z. B. weitere Lumophore an die ersten, bereits angelagerten Lumophore angedockt werden. Dieser Prozess kann wiederholt werden, bis der Zwischenraum zwischen den Antennen gefüllt ist.

**[0149]** In [Fig. 19](#) ist ein Teil eines Querschnitts durch eine weitere Variante eines Antennenemitters bzw. Empfängers, der eine Mehrzahl an Antennen A enthält, dargestellt. Während der grundsätzliche Aufbau von Substrat Sub, Leiterschichten L1\_Z und L2\_Z, Leiterbahnen L1 und L2 und der Isolationsschichten D und D2 dieser Ausführung mit dem der vorhergehenden Varianten übereinstimmt, ist die Art bzw. das Herstellverfahren der Antennen A verschieden:

Im Gegensatz zu den vorigen Ausführungsvarianten sind hier auch die Partikel **1** und **3** durch ein Lithographieverfahren hergestellt worden. Die Partikel **1** und **3**, die im Querschnitt dargestellt sind, können beliebige z. B. stabförmige, ovale oder dreieckige Oberseiten besitzen. Es können damit z. B. auch „bow-tie“-Antennen hergestellt werden. Ihre Länge liegt im Bereich von 100 nm und ist deshalb mittels neuerer Lithographieverfahren beherrschbar. Ihre Abstände jedoch liegen im Bereich von z. B. einigen nm bis 10 nm. Diese kleinen Abstände können trotzdem mit herkömmlichen Verfahren erzeugt werden. Ein möglicher Weg ist folgender: Es können die Antennen **1** und **3** z. B. als metallische Schichten auf einem (100) Si-Wafer abgeschieden werden (z. B. Schicht für Partikel **1** = Al, Schicht für Partikel **3** = Au). Auf den Antennenschichten können die Leiterbahnen L1, L2, sowie die Leiterschichten L1\_Z und L2\_Z mit den Isolationsschichten D über mehrere Beschichtungs- und Ätzschritte erzeugt werden, wobei die Strukturgrößen z. B. im 100 nm-Bereich liegen. Nach Wenden und Bonden auf ein z. B. Glassubstrat kann die Erzeugung des Spaltes zwischen den Partikeln **1** und **3** vorbereitet werden. Dazu können mittels eines anisotropen KOH-Ätzverfahrens im (100) Si-Wafer keilförmige Ätzgruben **19\_1** mit einem Keilwinkel von  $54,7^\circ$  erzeugt werden. Dabei werden nur Masken mit einer Strukturgröße benötigt, die erheblich größer als der spätere Spalt zwischen den Antennen ist. Die Si-Wafer können dazu vorher bereits durch z. B. isotropes Ätzen ausreichend abgetragen worden sein. Nachdem die Oberfläche der Antennenschichten in der gewünschten Breite freigelegt wurde, können die Trennspalte z. B. durch Ätzen der Metallschicht der Antennen **1** und **3** erzeugt werden, wobei die Si-Schicht **19\_1** als Maske verwandt wird. Die erforderlichen Abstände der Lumophoren von den Antennen können dann z. B. durch Beschichten mit Halbleiter- oder SAM-Schichten auf den Antennen erzwungen werden. Der Spalt zwischen den Antennen kann abschließend durch Auffüllen mit Lumophoren oder Anbinden von Lumophoren mit molekularen Ankergruppen wie in den vorhergehenden Ausführungsvarianten überbrückt werden. Oder es können z. B. durch ein MOCVD-Verfahren Halbleiterquantenpunkte im Spalt erzeugt werden. Die Antennen sind dann el. leitend über den Lumophor verbunden.

**[0150]** [Fig. 20](#) stellt einen Ausschnitt eines z. B. Mikrochips in der Draufsicht dar. Es sind dargestellt die Leiterbahnen L1\_1 mit der SAM-Schicht S1\_1, sowie die Leiterbahn L2\_1 mit der SAM-Schicht S2\_1. Gegenüber liegen die Leiterbahnen L1\_2 mit der SAM-Schicht S1\_2 und die Leiterbahn L2\_2 mit der SAM-Schicht S2\_2. An den Leiterbahnen können nun Antennenelemente A\_1 und A\_2 immobilisiert werden, wobei Masken und z. B. Schichten **15\_1** als Hilfe verwendet werden können, damit sich die Antennen nur in den vorgesehenen Bereichen anlagern können. Das Antennenelement A\_1 kann durch Stromfluss zur Lichtemission angeregt werden. Das Antennenelement A\_2 kann durch dieses Licht bzw. durch das direkte elektrische Feld der Antenne A\_1 seinerseits eine el. Spannung erzeugen. Damit lässt sich ein Optokoppler realisieren. Der Aufbau der Antennen A\_1 und A\_2 kann natürlich auch wie in den anderen Varianten von [Fig. 14](#) bis [Fig. 19](#) ausgeführt sein.

**[0151]** In [Fig. 21](#) ist eine letzte Variante eines Emitters oder einer Spannungsquelle dargestellt, bei welcher sich die Antennen an der Oberfläche befinden. Die Leiterbahnen bestehen wieder z. B. aus n- oder p-dotierten anorganischen Halbleiterschichten von Element- oder Verbindungshalbleitern. **21\_1** zeigt ein Substrat (z. B. aus einkristallinem Halbleitermaterial, Saphir, Glas usw.), das wechselweise mit p-dotierten, isolierenden und n-dotierten Schichten z. B. per Epitaxie oder CVD beschichtet wurde. Im Bild **21\_2** wurde das Substrat in Scheiben geschnitten und poliert, im Bild **21\_3** wurde die Isolationsschicht geätzt. Im Schritt **21\_4** wurden die p-dotierten Leiterbahnen selektiv mit isolierenden z. B. SAM-Schichten bedeckt, so dass im nächsten Arbeitsgang (nicht dargestellt) die n-dotierten Leiterbahnen über einen ohmschen Kontakt mit den el. Zuleitungen verbunden werden können. Das Entsprechende kann auf der anderen Substratseite für die zweiten Leiterschichten geschehen. Bild **21\_5** zeigt ein fertiges Element aus Leiter und Isolatorschichten, die an ihre el. Kontakte

angeschlossen sind. Im letzten Bild **21\_6** wurden schließlich die Antennen mittels el. leitender Brückenmoleküle an den Leiterschichten immobilisiert. Die Schichtdicken der Isolatorschichten sind gerade so groß, dass ein Kontakt der Antennenpartikel erzwungen wird, wobei eine oder beide Antennen mit Lumophoren bedeckt sind. Eine transparente Einkapselung aus z. B. diffusionsdichten Kunststoffen oder Gläsern kann das Element wieder vor Beschädigung bewahren (nicht dargestellt).

**[0152]** Die folgenden **Fig. 22** bis **Fig. 26** stellen Ausführungsvarianten dar, bei welchen die Antennen durch organische Halbleiterschichten kontaktiert werden. Skizziert sind jeweils Querschnitte durch Emitter- bzw. Photovoltaik-elemente. Die Figuren stellen jeweils nur eine mögliche Bauform von vielen Varianten dar. Beispielsweise können weitere Schichten hinzugefügt werden oder statt einer transparenten Anode eine transparente Kathode verwendet werden. Die Schicht **22\_1** könnte sich auch z. B. zwischen der ETL-Schicht und der Antenne befinden. Im Kern bestehen alle Varianten jedoch aus Antennen, die auf mindestens einer Seite mit organischen Halbleitern kontaktiert werden. Die Herstellung der organischen Schichten und das Aufbringen der Antennen kann z. B. mittels Spin-Coating erfolgen. Durch die el. Kontaktierung der Kathoden und Anoden, die jedoch in keiner Figur dargestellt ist, können die Geräte betrieben werden.

**[0153]** In **Fig. 22** werden Lumineszenz- bzw. Spannungsquellen aus einzelnen Antennen A verwendet, die mit Lumophoren bedeckt sind (vergleiche auch **Fig. 6** und **Fig. 8**). Dabei wurden die Lumophore in einem vorangehenden Arbeitsgang mittels molekularer Ankergruppen auf den Antennen fixiert. Die Antennen A sind – was ihr Material, ihre Abmessungen, ihre Hüllen und die Emissions- bzw. Absorptionsfrequenz des Lumophors betrifft – entsprechend der angezielten Wellenlänge optimiert. Es können also Antennen A mit verschiedenen Emissions- oder Absorptionsfrequenzen vorgefertigt und z. B. in einem Emitter kombiniert werden, um Weißlicht zu erzeugen.

**[0154]** Die individuellen Antennen A können daher in diesem erfindungsgemäßen Emitter unterschiedliche Größen, Materialien, Lumophore usw. aufweisen. Die Lumophore können z. B. aus Halbleiternanokristallen bestehen. Ein möglicher Funktionsablauf kann sein: aus einer lochleitenden Polymerschicht HTL wandert ein Loch durch das Valenzband eines Lumophors in die ebenfalls lochleitende Antennenhülle und von dort in das Valenzband eines Lumophors, der an die elektronenleitende Schicht ETL angrenzt. Gleichzeitig gelangt eine Elektron aus der ETL-Schicht in das Leitungsband des Nanokristalls. Das entstandene Exciton kann schließlich mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit strahlend zerfallen. Der metallische Antennenkern kann die strahlende Zerfallrate dabei erhöhen.

**[0155]** Der el. Strom soll im Wesentlichen über die Antenne fließen, anstatt dass es zu einem „Kurzschluß“ zwischen der ETL und HTL-Schicht kommt. Dies wird erreicht durch:

- eine lückenlose Schicht aus Antennen A, so dass kein Kontakt HTL mit ETL möglich ist (nicht dargestellt). Die Schichten **22\_1** und **22\_2** können entfallen.
- Im Fall von Lücken zwischen den Antennen durch die zusätzliche Verwendung einer el. isolierenden Schicht **22\_2**.

**[0156]** Die Schicht **22\_2** wird selektiv zwischen die Antennenpartikel beschichtet. Sie kann z. B. aus Sol-Gel-Schichten (z. B. Organosilikatschichten), organischen Polymerschichten (z. B. Polystyrol, Polymethylmethacrylat, Polyvinylbutanol, aliphatischen Kohlenwasserstoffen), SAM-Schichten (z. B. Mono- oder Multilagigen aus Alkyl- oder Phenyl-Molekülen), MOCVD-Schichten (z. B. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht) bestehen. Damit die Schicht **22\_2** nicht auf den Antennen sondern nur zwischen ihnen abgeschieden wird, muss die untenliegende Schicht HTL oder die optionale Schicht **22\_1** eine relativ zur Antennenoberfläche bzw. den Hüllmolekülen der Antenne und der Lumophore verschiedene Oberflächeneigenschaft aufweisen. Zur selektiven Beschichtung mit Sol-Gel-Schichten oder Polymerschichten können die Schichten HTL bzw. **22\_1** z. B. eine hydrophobe Oberfläche besitzen, während die Molekülhülle der Antenne sich hydrophil verhält. Dann kann die Schicht **22\_2** mittels eines unpolaren Lösungsmittels (z. B. Toluol) aufgetragen werden oder umgekehrt. Damit die Oberfläche der Antenne bzw. der Molekülhülle z. B. einen hydrophoben Charakter besitzt, können ihre Molekülhüllen als funktionale Gruppen z. B. Methylgruppen besitzen oder z. B. Hydroxyl- od. Carboxylgruppen für eine hydrophile Oberfläche. Wenn Nanokristalle z. B. mit einer Hülle aus Tri-n-oktylphosphinoxid (TOPO) verwendet werden, das hydrophob ist, kann nachträglich ein Phasentransfer an den Nanokristallen durchgeführt werden. Andere Lumophore wie organische Halbleitermoleküle können ebenfalls über entsprechende funktionale Gruppen verfügen, um eine hydrophobe oder hydrophile Antennenoberfläche zu erzeugen.

**[0157]** Um selektiv SAM-Schichten zwischen den Antennen abzuschneiden, besitzen die HTL-Schicht bzw. die Schicht **22\_1** funktionale Gruppen (z. B. Amino-, Thiolgruppen usw.) an die sich die SAM mit ihren Kopplungsgruppen (z. B. Carboxylgruppen, Alkylhalide usw.) binden kann, wobei die Antennenhüllen dann eine Oberflä-

che besitzen, an welche die SAM nicht koppeln kann.

**[0158]** Um z. B. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schichten selektiv mittels MOCVD zwischen den Antennen abzuscheiden, kann z. B. die Schicht **22\_1** funktionelle OH-Gruppen besitzen, an welchen der Precursor zerfallen kann.

**[0159]** Eine Funktion der Schicht **22\_1** ist also die Bereitstellung einer spezifischen Oberfläche zur Erzeugung der Schicht **22\_2**.

**[0160]** Der allgemeine Aufbau des Emitter- bzw. das Photovoltaikelements in [Fig. 22](#) ist wie folgt: Auf ein transparentes Substrat Sub (z. B. Gläser, Kunststoffe) wurde eine transparente Anode An aus vorzugsweise transparenten leitfähigen Oxiden (z. B. ITO) beschichtet. Alternativ können einige nm dicke Goldschichten für transparente Anoden verwendet werden. Auf diesen transparenten Oxiden befinden sich optional eine Lochinjektionsschicht (z. B. Kupfer-phthalocyanin, Polyanilin usw. nicht dargestellt).

**[0161]** Die lochleitende Schicht HTL besteht aus p-dotierten konjugierten oder aromatischen Polymeren (z. B. Poly-Phenyl-Vinyl-Derivate, Triarylamin-Derivate, Poly(3,4-Ethylendioxythiophen), Polypyrrole usw.). Diese Schicht kann auch aus mehreren verschiedenen Halbleiterschichten zusammengesetzt sein, um die Anpassung an den Lumophor zu optimieren. Auf der HTL-Schicht kann sich optional (nicht dargestellt) eine Elektronenblockierschicht aus z. B. Poly(9-vinylcarbazol) oder Bathocuproin befinden. Darauf liegt die optionale Schicht **22\_1**. Die Aufgabe der Schicht **22\_1** ist einerseits die Lochinjektion in den Lumophor und andererseits die Bereitstellung einer spezifischen Oberfläche zur Erzeugung der Schicht **22\_2**. Die Schicht **22\_1** besteht aus einem p-dotierten organischen Halbleiter (z. B. Polythiophen-Derivaten wie PEDOT, Poly-Phenyl-Vinyl-Derivate, Triarylamin-Derivate usw.) wie andere Lochleiterschichten auch. Gleichzeitig jedoch besitzt die Schicht **22\_1** rel. zu den Antennen A eine verschiedene Oberfläche. Die elektronenleitende Schicht ETL (aus z. B. Aluminium-tris-8-hydroxychinolinolat, metallgedopten organische Halbleitern) wurde z. B. mittels Aufdampfen oder Spin-Coating auf die Antennen beschichtet. Die Schicht ETL kann auch z. B. Fullerene oder Metall/Halbleiterquantenpunkte enthalten, um CT-Übergänge, oder Donor-Akzeptor Verbindungen zwischen der Antenne A (= Partikel **1** mit Lumophor **2**) und der Schicht ETL (= Kontakt **4**) zu ermöglichen. Zwischen der ETL Schicht und der Kathode Ka können sich noch Elektroneninjectionsschichten **22\_3** z. B. LiF, MgO, NaF usw. befinden. Die Kathode Ka schließlich besteht aus einem Metall mit geringer Austrittsarbeit wie Al, Mg, Ca, Ag, Mg/Ag usw. Das gesamte Element ist schließlich in einem diffusionsdichten Gehäuse aus z. B. Glas gekapselt (nicht dargestellt).

**[0162]** [Fig. 23](#) stellt eine Variante zu dem in [Fig. 22](#) offenbarten Element dar. Die Schicht **22\_1** entspricht der Lochtransportschicht HTL. Darauf befindet sich mindestens eine vollständige Schicht an Lumophoren. Nanokristalle können z. B. mittels Sedimentation oder Spincoating aufgetragen werden. Halbleitende Polymere in Form von z. B. Aluminium-tris-8-hydroxychinolinolat können ebenfalls durch z. B. Aufdampfen auf die HTL-Schicht beschichtet werden. Molekulare Dioden dagegen können in richtiger Polung an einer entsprechend funktionalisierten Schicht **22\_1** verankert werden. Dabei besitzt die Schicht **22\_1** wieder funktionale Gruppen wie bei Ausführungsvariante **22** bzw. wie z. B. in WO 03/0411182 beschrieben. Die molekularen Dioden besitzen dann die passende Koppelgruppe. Im Falle, dass mind. eine lückenlose Schicht aus Antennen A auf die Lumophore aufgetragen wurde, kann die Isolationsschicht **22\_2** auch hier entfallen. Ansonsten wird eine Schicht **22\_2**, die der Schicht **22\_2** aus [Fig. 22](#) entspricht, selektiv auf die Lumophore beschichtet. Der Ablauf ist analog zu [Fig. 22](#). Beispielsweise kann eine isolierende Phenyl-SAM mit Ankergruppen für die Oberfläche der Lumophore erzeugt werden. Bezüglich der weiteren Schichten siehe Beschreibung zu [Fig. 22](#).

**[0163]** Eine alternative Ausführungsform des in [Fig. 23](#) dargestellten Elements kann dadurch zustande kommen, dass die Lumophore in mind. einer dichten Schicht auf der HTL-Schicht abgeschieden werden. Darauf kann eine elektronenleitende Schicht **22\_1** mit Dicken (z. B. 5 nm) erzeugt werden, die gleichzeitig zumindest einen Teil des Abstands Z zum Metallkern der Antennenpartikel herstellt. Die Antennenpartikel, die dann auf die Schicht **22\_1** beschichtet werden, besitzen eine entsprechend dünnere el. leitende Hülle (z. B. 5 nm) aus z. B.  $\pi$ -konjugierten organischen Molekülen.

**[0164]** In [Fig. 24](#) ist ein Emitter bzw. ein Photovoltaikelement dargestellt, das analog zu [Fig. 22](#) ausgeführt ist, jedoch aus Antennen A mit jeweils zwei Antennenpartikeln **1** und **3** besteht. Die Antennen A sind mit Lücken auf der optionalen Unterschicht **22\_1** bzw. der HTL-Schicht angebracht. Die Schicht **22\_2**, die entsprechend wie die Schicht **22\_2** in [Fig. 22](#) aufgebaut ist, übernimmt hier nicht nur die Isolation zwischen der HTL und der ETL-Schicht, sondern auch die Isolation des Antennenpartikels **3** gegen die HTL-Schicht. Auf die lochleitenden Schichten HTL oder optional **22\_1** wird das erste Antennenpartikel **1** z. B. durch eine Sedimentation beschichtet. Die Zwischenräume zwischen den Partikeln **1** werden anschließend analog zu [Fig. 22](#) mit isolierenden

Schichten aus z. B. Polystyrol gefüllt. Die Lumophore befinden sich entweder bereits auf der Oberfläche des Antennenpartikels **1**, oder sie werden nach dem Auftragen des Partikels **1** mittels molekularer Brücken auf demselben immobilisiert, oder alternativ befinden sich die Lumophore auf der Oberfläche des Antennenpartikels **3**. Im letzten Fall z. B. besitzen die Lumophore, die sich auf dem Partikel **3** befinden, freie Ankergruppen (z. B. Aminogruppen), mit denen sie sich an den Antennenpartikeln **1** anbinden können. Vor der Aufbringung der elektronenleitenden Schicht ETL, muss das Antennenpartikel **1** mit einer el. isolierenden Schicht **24\_1** bedeckt werden, um eine direkte Verbindung zwischen der Schicht ETL und Partikel **1** zu unterbinden. Diese Isolationschicht kann z. B. durch eine selektive MOCVD-Beschichtung von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> auf dem Partikel **1** erfolgen. Das Partikel **1** kann dazu eine Molekülhülle besitzen, an der sich der Prekursor bei der MOCVD zersetzt (z. B. OH-Gruppen). Alternativ können el. isolierende SAM-Schichten aus z. B. Alkyl- oder Phenylketten auf der Oberfläche des Partikels **1** verankert werden. Diese isolierenden Moleküle können dazu z. B. ebenfalls über Aminoankergruppen verfügen. Die metallische Kathodenschicht Ka befindet sich in einem Abstand *d* (nicht dargestellt) von der Antenne A, der etwa im Bereich von 0,125 bis 0,35 mal Wellenlänge liegt (vgl. [Fig. 13](#)) und wirkt gleichzeitig als Reflektorschicht R. Der restliche Aufbau entspricht dem aus [Fig. 22](#) und [Fig. 23](#).

**[0165]** Auch in [Fig. 25](#) ist ein Querschnitt durch ein Gerät dargestellt, bei welchem die Antennen A aus zwei Partikeln **1** und **3** bestehen. Dadurch entspricht es weitgehend der in [Fig. 24](#) skizzierten Ausführungsvariante. Der Unterschied besteht darin, dass die Antennen A hier in einer vertikalen Anordnung vorliegen. Die Schicht **22\_2** erfüllt deshalb neben ihrer Isolationsaufgabe auch noch die Funktion einer Maske bei der Immobilisierung des Antennenpartikels **3**. Die Schicht **22\_1** besteht aus einem organischen Lochleiter, der so modifiziert wurde, dass er funktionale Gruppen, z. B. OH-Gruppen, enthält, die eine veränderte Oberflächeneigenschaft relativ zu der Oberfläche des Partikels **1** bewirken. An diesen funktionalen Gruppen können beispielsweise SAM-Schichten und darauf aufbauend SAM-Multilagern erzeugt werden, welche die Schicht **22\_2** darstellen. Oder es werden mittels eines MOCVD-Verfahrens selektiv auf der frei liegenden Schicht **22\_1** Metalloxidschichten (z. B. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> usw.) erzeugt (siehe auch z. B. [22] oder [23]). Die Schicht **22\_1** besitzt durch die Hydroxyl- oder Carboxyl-Gruppen beispielsweise einen hydrophilen Charakter, während die molekularen Brücken um das Antennenpartikel **1** methylierterminiert und damit hydrophob sind.

**[0166]** Der Schichtaufbau bis zur Schicht **22\_1** verläuft wie bei den [Fig. 22](#) bis [Fig. 24](#). Auf die Schicht **22\_1** werden Antennenpartikel **1** z. B. mittels einer Sedimentation aus einer kolloidalen Lösung abgeschieden, wobei die Partikel zufallsmäßig verteilt sind. Die Freiräume zwischen den Partikeln **1** werden dann z. B. durch MOCVD soweit beschichtet, dass die Schichtdicke der Schicht **22\_2** etwas größer als die Höhe der Partikel **1** ist. Dadurch können im folgenden Arbeitsgang die Lumophore bzw. Antennenpartikel **3** mittels molekularer Anker nur oberhalb der Partikel **1** immobilisiert werden. Der weitere Aufbau mit der elektronenleitenden Schicht ETL, der Elektroneninjectionsschicht **22\_2**, der Metallkathode und der Schutzverkapselung des Gerätes entspricht den [Fig. 22](#) bis [Fig. 24](#).

**[0167]** [Fig. 26](#) stellt eine Abwandlung des Gerätes aus [Fig. 25](#) dar. Der Aufbau ist somit identisch mit [Fig. 25](#) mit dem Unterschied, dass auf die abgeschiedenen Antennenpartikel **1** und **3** jeweils mittels eines selektiven MOCVD-Prozesses weiteres „Antennenkern“-Material z. B. Ag oder Au beschichtet wurde, so dass längliche Antennen entstehen.

**[0168]** In den [Fig. 27](#) bis [Fig. 29](#) sind Antennen-Emitter oder Spannungsquellen gezeichnet, in welchen die Antennen in verschiedenen anorganische Halbleiterschichten aus Element- oder Verbindungshalbleitern eingeschlossen bzw. kontaktiert sind. Die Antennen können gleichzeitig – neben ihrer Aufgabe zur Steigerung der Quantenausbeute – auch als Streuzentren wirken und so die Lichtextraktion aus dem Halbleiterelement verbessern. Die Geräte sind jeweils stark vereinfacht dargestellt. Statt z. B. nur einzelnen p- bzw. n-dotierten Schichten wie dargestellt, können ganze Schichtsysteme verwendet werden, um z. B. Bandanpassungen an die Lumophore und Antennen durchzuführen.

**[0169]** [Fig. 27](#) skizziert eine Variante, bei der eine dichte Packung von mit Lumophoren bedeckten Antennen A auf einer z. B. p-dotierten Halbleiterschicht **27\_3** (z. B. p-ZnO, p-GaN, p-InGaAs usw.) z. B. mittels Sedimentation abgeschieden wurde. Auf den Antennen A wurde eine weitere Halbleiterschicht **27\_4** z. B. durch eine MOCVD-Beschichtung erzeugt. Sie ist entgegengesetzt zur Schicht **27\_3** dotiert, also z. B. n-dotiert. Oberhalb der Schichten **27\_3** und **27\_4** sind die Schichten **27\_2** bzw. **27\_5** aufgetragen. Sie sind entsprechend höher dotiert als die zugehörigen Schichten **27\_3** und **27\_4** um einen ohmschen Kontakt zu den metallischen Kontaktschichten **27\_1** und **27\_6** herzustellen. Beispielsweise kann Gold für den p-dotierten und Indium für den n-dotierten Halbleiter verwendet werden. Das Substrat Sub besteht z. B. aus transparenten Materialien wie Saphir, wobei die Kontaktschicht **27\_6** dann nicht transparent ist, oder sie besteht z. B. aus GaAs und die Schicht **27\_6** ist sehr dünn bzw. perforiert, um den Lichtaustritt/Eintritt zu erlauben. Durch Mischen von Antennen mit

unterschiedlicher Resonanzfrequenz und zugehörigen Lumophoren kann die Lichtfarbe eingestellt werden.

**[0170]** [Fig. 28](#) entspricht der Ausführung in [Fig. 27](#), jedoch sind die Lumophore getrennt als dichte Schicht auf der ebenfalls dichten Antennenschicht aus Antennen A z. B. mittels Sedimentation aus einer Kolloidlösung aufgetragen worden. Dazu werden zuerst Antennenpartikel aufgetragen und anschließend eine oder mehrere Schichten an Lumophoren auf die Antennen beschichtet, bevor die Schichten [27\\_4](#), [27\\_5](#) und [27\\_6](#) erzeugt werden. Die Lichtfarbe kann durch Mischung von Lumophoren verändert werden. Die Antennen können z. B. für eine mittlere Wellenlänge aller in einem Emitter verwendeten Lumophoren ausgelegt werden.

**[0171]** In [Fig. 29](#) schließlich wurden die z. B. durch MOCVD erzeugten rel. hochwertigen Halbleiterschichten durch Halbleiterpartikel aus entsprechenden anorganischen n- bzw. p-dotierten Halbleitern ersetzt. Diese Partikelschichten können der Reihe nach aufeinander durch molekulare Anker immobilisiert oder z. B. durch Sedimentation oder Verdunstung einer Kolloidlösung erzeugt werden. Die Gitterfehler und Oberflächenzustände der Partikel können einerseits zwar z. B. die strahlende Rekombinationsrate reduzieren, das kann aber durch die Antennen kompensiert werden. Zusätzlich wird die Extraktion des Lichts aus der Partikelschicht wegen der mehrfachen Streuung an den Antennen und Partikeln erleichtert.

**[0172]** Natürlich sind neben den ausführlich beschriebenen Ausführungsvarianten noch zahlreiche weitere möglich. Beispielsweise können Antennen aus einem Edelmetall z. B. bereits auf einer Leiterschicht immobilisiert sein und die Lumophore in Form von Halbleiternanokristallen können durch einen dreidimensionalen Inselwachstums-Mode selektiv mit MOCVD direkt auf der Oberfläche der Antennen erzeugt werden. Kolloidale Nanopartikel und Kristalle können rel. einfach mittels SAM auf dem Substrat immobilisiert werden. Alternativ ist es in den Ausführungsvarianten aber auch möglich, die Antennen-Partikel direkt auf dem Substrat oder einer SAM-Schicht wachsen zu lassen. Beispielsweise können Nanorods über chemische Verfahren oder mittels PVD/CVD oder ähnlicher Verfahren direkt auf einem Substrat erzeugt werden.

**[0173]** Oder Antennenemitter bzw. Spannungsquellen können in molekularelektronische Anwendungen integriert werden. Emitter und Empfänger für polarisierte Strahlung können pixelweise verschiedene Polarisationsrichtungen erzeugen oder absorbieren, wenn die Ausrichtung der Antennen in den Pixeln entsprechend ist. Mit den Antennenemittern können Einphotonenquellen kostengünstig hergestellt werden usw.

**[0174]** Selbstverständlich können die beschriebenen Varianten also in vielfältiger Weise durch einen Fachmann modifiziert werden, ohne dass dies grundsätzlich außerhalb des Bereiches dieser Erfindung fällt.

#### Verweise:

- [1] Hans Mertens, Controlling plasmon-enhanced luminescence, Thesis, Utrecht University 2007
- [2] H. Mertens, A. Polman, Strong luminescence quantum efficiency enhancement near prolate metal nanoparticles: dipolar versus higher-order modes, Center for Nanophotonics Niederland, 2007
- [3] U. Hakanson, M. Agio, S. Kühn, L. Rogobete, T. Kalkbrenner and V. Sandoghdar, Coupling of plasmonic nanoparticles to their environments in the context of van der Waals-Casimir interactions, Laboratory of Physical Chemistry, ETH Zurich, 8093 Zurich, Schweiz
- [4] Palash Bharadwaj and Lukas Novotny, Spectral dependence of single molecule fluorescence enhancement, OPTICS EXPRESS 14266, 17 October 2007/Vol. 15, No. 21
- [5] James R. Heath and Mark A. Ratner, Molecular Electronics, Physics Today, Mai 2003, Seite 46
- [6] Lavinia Rogobete, Franziska Kaminski, Mario Agio, and Vahid Sandoghdar, Design of plasmonic nanoantennae for enhancing spontaneous emission, June 15, 2007/Vol. 32, No. 12/OPTICS LETTERS
- [7] Mario Agio, Giorgio Mori, Franziska Kaminski, Lavinia Rogobete, Sergei Kuhn, Victor Callegari, Philipp M. Nellen, Franck Robin, Yasin Ekinci, Urs Sennhauser, Heinz Jäckel, Harun H. Solak, and Vahid Sandoghdar, Engineering gold nanoantennae to enhance the emission of quantum emitters, Proceedings of SPIE Vol. 6717, 67170R, (2007)
- [8] Gretchen A. DeVries, Markus Brunnbauer, Ying Hu, Alicia M. Jackson, Brenda Long, Brian T. Neltner, Oktay Uzun, Benjamin H. Wunsch, Francesco Stellacci, Divalent Metal Nanoparticles, SCIENCE Vol 315 Seite 358 ff., 2007
- [9] Lavinia Rogobete, Franziska Kaminski, Mario Agio, and Vahid Sandoghdar, Design of plasmonic nanoantennae for enhancing spontaneous emission, June 15, 2007/Vol. 32, No. 12/OPTICS LETTERS
- [10] Mario Agio, Giorgio Mori, Franziska Kaminski, Lavinia Rogobete, Sergei Kuhn, Victor Callegari, Philipp M. Nellen, Franck Robin, Yasin Ekinci, Urs Sennhauser, Heinz Jäckel, Harun H. Solak, and Vahid Sandoghdar, Engineering gold nanoantennae to enhance the emission of quantum emitters, Proceedings of SPIE Vol. 6717, 67170R, (2007)

- [11] Jorge Pérez-Juste, Isabel Pastoriza-Santos, Luis M. Liz-Marzán, Paul Mulvaney, Gold nanorods: Synthesis, characterization and applications, *Coordination Chemistry Reviews* 249 (2005) 1870–1901
- [12] Christina Debus, Elastische und inelastische Lichtstreuung an Edelmetall-Nanopartikeln und scharfen Goldspitzen, Dissertation, Universität Siegen, 2004
- [13] Nikhil R. Jana, Latha Gearheart and Catherine J. Murphy, Wet chemical synthesis of silver nanorods and nanowires of controllable aspect ratio, *Chem. Commun.*, 2001, 617–618
- [14] Tae-Hee Lee, SILVER NANOCUSTER SINGLE MOLECULE OPTOELECTRONICS AND ITS APPLICATIONS, Thesis, Georgia Institute of Technology Jan 2004
- [15] Jason Vielma and P. T. Leung, Nonlocal optical effects on the fluorescence and decay rates for admolecules at a metallic nanoparticle, *THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS* 126, 194704 (2007)
- [16] H. Mertens, A. F. Koenderink, and A. Polman, Plasmon-enhanced luminescence near noble-metal nanospheres: Comparison of exact theory and an improved Gersten and Nitzan model, *PHYSICAL REVIEW B* 76, 115123 (2007)
- [17] Chang Chen, Li Wang, Guohua Jiang and Haojie Yu, CHEMICAL PREPARATION OF SPECIAL-SHAPED METAL NANOMATERIALS THROUGH ENCAPSULATION OR INDUCEMENT IN SOFT SOLUTION, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 11 (2006) Seiten 1 bis 18
- [18] ZHIHONG NIE, DANIELE FAVA, EUGENIA KUMACHEVA, SHAN ZOU, GILBERT C. WALKER AND MICHAEL RUBINSTEIN, Self-assembly of metal-polymer analogues of amphiphilic triblock copolymers, *nature materials*, 2007; doi: 10.1038/nmat1954
- [19] Christian Krüger, Kolloidale Organisation auf lithographisch hergestellten Silanschichten: Neue Möglichkeiten der Strukturbildung auf Oberflächen, Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, 2001
- [20] Johanna Jacobs Penninkhof, Tunable plasmon resonances in anisotropic metal nanostructures, Ph. D. Thesis Utrecht University, September 2006
- [21] Joel van Embden, Jacek Jasieniak, Daniel E. Gómez, Paul Mulvaney, Michael Giersig, Review of the Synthetic Chemistry Involved in the Production of Core/Shell Semiconductor Nanocrystals, *Aust. J. Chem.* 2007, 60, 457–471
- [22] B.-C. Kang, D.-Y. Jung, R. A. Fischer, J.-H. Boo, Selective MOCVD of titanium Oxide and zirconium Oxide thin films using single molecular precursors on Si(100) substrates, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 69 (2008) 128–132
- [23] Carl-Christoph Winter, Chemische Dampfabscheidung von Gold, Kupfer und Aluminiumoxid auf Selbstorganisierten Monolagen, DISSERTATION, Ruhr-Universität Bochum, 2000

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- GB 1499897 [0002]
- US 5382813 [0002]
- US 2005/0214967 [0004]
- WO 2005/011013 [0004]
- WO 03/061026 [0004]
- WO 99/16106 [0006]
- WO 2005/031884 [0010]
- WO 2004/022714 [0024]
- US 6979544 [0024]
- WO 02/020873 [0024]
- WO 03/074510 [0024]
- WO 2005/083435 [0024]
- DE 202005012142 [0024]
- WO 2006/093467 [0024]
- WO 03/041182 [0024, 0025, 0026, 0030, 0040]
- WO 95/02251 [0024]
- WO 03/033127 [0038]
- WO 2004/005587 [0038]
- WO 99/21935 [0040]
- WO 2004/026886 [0040]
- WO 2005/017951 [0040]
- US 6207229 [0040]
- WO 03/041182 [0162]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- J. S. Bitteen et al., „Plasmon-Enhanced Photoluminescence of Silicon Quantum Dots: Simulation and Experiment“, J. Phys. Chem. C 2007, 111, Seiten 13372 bis 13377 [0008]
- Hans Mertens, Controlling plasmon-enhanced luminescence, Thesis, Utrecht University 2007 [0174]
- H. Mertens, A. Polman, Strong luminescence quantum efficiency enhancement near prolate metal nanoparticles: dipolar versus higher-order modes, Center for Nanophotonics Niederland, 2007 [0174]
- U. Hakanson, M. Agio, S. Kühn, L. Rogobete, T. Kalkbrenner and V. Sandoghdar, Coupling of plasmonic nanoparticles to their environments in the context of van der Waals-Casimir interactions, Laboratory of Physical Chemistry, ETH Zurich, 8093 Zurich, Schweiz [0174]
- Palash Bharadwaj and Lukas Novotny, Spectral dependence of single molecule fluorescence enhancement, OPTICS EXPRESS 14266, 17 October 2007/Vol. 15, No. 21 [0174]
- James R. Heath and Mark A. Ratner, Molecular Electronics, Physics Today, Mai 2003, Seite 46 [0174]
- Lavinia Rogobete, Franziska Kaminski, Mario Agio, and Vahid Sandoghdar, Design of plasmonic nanoantennae for enhancing spontaneous emission, June 15, 2007/Vol. 32, No. 12/OPTICS LETTERS [0174]
- Mario Agio, Giorgio Mori, Franziska Kaminski, Lavinia Rogobete, Sergei Kuhn, Victor Callegari, Philipp M. Nellen, Franck Robin, Yasin Ekinci, Urs Sennhauser, Heinz Jäckel, Harun H. Solak, and Vahid Sandoghdar, Engineering gold nanoantennae to enhance the emission of quantum emitters, Proceedings of SPIE Vol. 6717, 67170R, (2007) [0174]
- Gretchen A. DeVries, Markus Brunnbauer, Ying Hu, Alicia M. Jackson, Brenda Long, Brian T. Neltner, Oktay Uzun, Benjamin H. Wunsch, Francesco Stellacci, Divalent Metal Nanoparticles, SCIENCE Vol 315 Seite 358 ff., 2007 [0174]
- Lavinia Rogobete, Franziska Kaminski, Mario Agio, and Vahid Sandoghdar, Design of plasmonic nanoantennae for enhancing spontaneous emission, June 15, 2007/Vol. 32, No. 12/OPTICS LETTERS [0174]
- Mario Agio, Giorgio Mori, Franziska Kaminski, Lavinia Rogobete, Sergei Kuhn, Victor Callegari, Philipp M. Nellen, Franck Robin, Yasin Ekinci, Urs Sennhauser, Heinz Jäckel, Harun H. Solak, and Vahid Sandoghdar, Engineering gold nanoantennae to enhance the emission of quantum emitters, Proceedings of SPIE Vol. 6717, 67170R, (2007) [0174]

- Jorge Pérez-Juste, Isabel Pastoriza-Santos, Luis M. Liz-Marzán, Paul Mulvaney, Gold nanorods: Synthesis, characterization and applications, *Coordination Chemistry Reviews* 249 (2005) 1870–1901 [\[0174\]](#)
- Christina Debus, Elastische und inelastische Lichtstreuung an Edelmetall-Nanopartikeln und scharfen Goldspitzen, Dissertation, Universität Siegen, 2004 [\[0174\]](#)
- Nikhil R. Jana, Latha Gearheart and Catherine J. Murphy, Wet chemical synthesis of silver nanorods and nanowires of controllable aspect ratio, *Chem. Commun.*, 2001, 617–618 [\[0174\]](#)
- Tae-Hee Lee, SILVER NANOCLUSTER SINGLE MOLECULE OPTOELECTRONICS AND ITS APPLICATIONS, Thesis, Georgia Institute of Technology Jan 2004 [\[0174\]](#)
- Jason Vielma and P. T. Leung, Nonlocal optical effects on the fluorescence and decay rates for admolecules at a metallic nanoparticle, *THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS* 126, 194704 (2007) [\[0174\]](#)
- H. Mertens, A. F. Koenderink, and A. Polman, Plasmon-enhanced luminescence near noble-metal nanospheres: Comparison of exact theory and an improved Gersten and Nitzan model, *PHYSICAL REVIEW B* 76, 115123 (2007) [\[0174\]](#)
- Chang Chen, Li Wang, Guohua Jiang and Haojie Yu, CHEMICAL PREPARATION OF SPECIAL-SHAPED METAL NANOMATERIALS THROUGH ENCAPSULATION OR INDUCEMENT IN SOFT SOLUTION, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 11 (2006) Seiten 1 bis 18 [\[0174\]](#)
- ZHIHONG NIE, DANIELE FAVA, EUGENIA KUMACHEVA, SHAN ZOU, GILBERT C. WALKER AND MICHAEL RUBINSTEIN, Self-assembly of metal-polymer analogues of amphiphilic triblock copolymers, nature materials, 2007; doi: 10.1038/nmat1954 [\[0174\]](#)
- Christian Krüger, Kolloidale Organisation auf lithographisch hergestellten Silanschichten: Neue Möglichkeiten der Strukturbildung auf Oberflächen, Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, 2001 [\[0174\]](#)
- Johanna Jacobs Penninkhof, Tunable plasmon resonances in anisotropic metal nanostructures, Ph. D. Thesis Utrecht University, September 2006 [\[0174\]](#)
- Joel van Embden, Jacek Jasieniak, Daniel E. Gómez, Paul Mulvaney, Michael Giersig, Review of the Synthetic Chemistry Involved in the Production of Core/Shell Semiconductor Nanocrystals, *Aust. J. Chem.* 2007, 60, 457–471 [\[0174\]](#)
- B.-C. Kang, D.-Y. Jung, R. A. Fischer, J.-H. Boo, Selective MOCVD of titanium Oxide and zirconium Oxide thin films using single molecular precursors on Si(100) substrates, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 69 (2008) 128–132 [\[0174\]](#)
- Carl-Christoph Winter, Chemische Dampfabcheidung von Gold, Kupfer und Aluminiumoxid auf Selbstorganisierten Monolagen, DISSERTATION, Ruhr-Universität Bochum, 2000 [\[0174\]](#)

## Patentansprüche

1. Licht- bzw. Spannungsquelle, **dadurch gekennzeichnet**, dass:

- Sie aus einem oder mehreren Lumophoren **2** in Kombination mit mindestens einem el. leitfähigen Partikel **1** oder **3** besteht.
- Die Lichterzeugung im Falle einer Lichtquelle durch die elektrisch angeregte Lumineszenz der Lumophore **2** alleine oder in Verbindung mit den Partikeln **1** bzw. **3** erfolgt.
- Die el. Spannungserzeugung im Falle einer Spannungsquelle durch eine lichtbedingte Anregung der Lumophore **2** alleine oder in Verbindung mit den Partikeln **1** bzw. **3** erfolgt.
- Der el. Strom von bzw. zu den Lumophoren **2** im Wesentlichen über die elektrisch leitfähigen Partikel **1** sowie **3** oder den Kontakt **4** fließt.
- Die aktiven Lumophore **2**, d. h. Lumophore, welche Licht emittieren bzw. Spannung generieren, sich im Wesentlichen in einem definierten Abstand zur Oberfläche der Partikel **1** bzw. **3** befinden.
- Die elektrisch leitfähigen Partikel **1** und **3** Volumen zwischen  $3000 \text{ nm}^3$  und  $70 \cdot 10^6 \text{ nm}^3$  besitzen.
- Direkt zwischen den optional in den Partikeln **1** und **3** enthaltenen metallischen Kernen **101** und **301**, also unter Umgehung der Lumophore **2**, kein erheblicher Tunnelstrom fließt.

2. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Lumophore **2** aus folgender Aufzählung ausgewählt werden:

- $\pi$ -konjugierte Moleküle und Polymere
- Donor-Akzeptor bzw. Donor-Bridge-Akzeptor-Systeme in Molekülen und Übergängen (z. B. in molekularer Diode, im Übergang Ligand-Nanokristall oder Brückenmolekül-Fulleren usw.)
- molekulare Dioden
- Moleküle mit starkem Charge-Transfer-Übergang parallel zur Stromrichtung
- Charge-Transfer Übergänge zwischen Molekülen, z. B. den Brückenmolekülen **102**, **202**, **302**, S1, S2 und Metallen (z. B. Ionen, metallischen Clustern oder Quantenpunkten), Fullerenen, Halbleiternanokristallen und Halbleiterschichten, wobei die genannten Metalle, Fullerene, Halbleiternanokristalle und Halbleiterschichten auch Bestandteil des Kontakts **4** bzw. eines Partikels **1** oder **3** sein können.
- Metallorganische Phosphoreszenzemitter
- Halbleiter-Quantenpunkte (Nanokristalle) mit und ohne Halbleiterhüllen.
- Metall-Cluster z. B.  $\text{Ag}_2$  bis  $\text{Ag}_8$
- Moleküle, die über Ankergruppen an den Oberflächen der Partikel **1** bzw. **3** verankert sind und durch unelastische Stöße der zwischen Partikel **1** und **3** bzw. Leiterbahnen tunnelnden Elektronen angeregt werden.
- biologische Moleküle, die eine Ladungsverschiebung bei Lichtabsorption aufweisen.
- Farbstoffmoleküle
- Kohlenstoffnanoröhren
- Einen p-n-Übergang zwischen den Partikeln **1** und **3** oder einer Leiterbahn

3. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Mindestens eines der besagten elektrisch leitfähigen Partikel **1** und **3** als eine Antenne im Wellenlängenbereich des Lumophors **2** wirkt und dadurch die Wirkung des Lumophors **2** verstärkt. Wobei der Kern der besagten Antenne aus Metallen wie z. B. Au, Ag, Al, Cu besteht, die ausreichende Oberflächenplasmonen im Wellenlängenbereich des Lumophors **2** erlauben.
- Die Lumophore **2** sich im Wesentlichen in einem definierten Abstand Z von den besagten metallischen Kernen der Partikel **1** bzw. **3** befinden, der erhöhte Quantenausbeuten bzw. Anregungsfeldstärken des Lumophors **2** bei geringen strahlungslosen Verlusten gewährleistet.

4. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die elektrische Leitfähigkeit der Partikel **1** und **3** durch metallische Kerne **101** bzw. **301** in Kombination mit el. leitfähigen Molekülen **102** bzw. **302** entsteht.

5. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die elektrische Leitfähigkeit der Partikel **1** und **3** durch el. leitfähige Schichten um die Kerne entsteht.

6. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die elektrisch leitfähige Schicht aus mindestens einer anorganischen Halbleiterschicht **104** bzw. **304** besteht.

7. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die elektrisch leitfähige Schicht aus mindestens einer organischen Halbleiterschicht **104** bzw. **304** besteht.

8. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Mindestens eines der besagten el. leitfähigen Partikel **1** bzw. **3** komplett aus anorganischen Halbleitern besteht.

9. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Sie aus einem el. leitfähigen Partikel **1** oder **3**, mindestens einem Lumophor **2** und einem Kontakt **4** besteht. Wobei der Kontakt **4**, der in el. Kontakt mit dem Lumophor **2** steht, aus z. B. organischen oder anorganischen Leiterbahnen oder Leiterschichten besteht.

10. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Sie aus einem el. leitfähigen Partikel **1** und **3** und mindestens einem Lumophor **2** besteht.

11. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 4 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die el. Leitfähigkeit der besagten el. leitfähigen Moleküle **102** und **302**, Schichten **104** und **304**, Partikel **1**, **3** und Kontakt **4** auf einer p- oder n-Dotierung beruht.

12. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 4 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die Dotierung der besagten Partikel **1** und **3** bzw. des Kontakts **4** entgegengesetzt zueinander ist.

13. Licht- bzw. Spannungsquelle nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – die Partikel **1** bzw. **3** oder die Lumophore **2** el. leitfähig mit Leiterbahnen oder Leiterschichten verbunden sind.

14. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die besagten Leiterbahnen oder Leiterschichten vorzugsweise aus Halbleitern bestehen, wobei sie vorzugsweise die gleiche Dotierungsart wie die zugehörigen Partikel **1** bzw. **3**, mit welchen sie in direktem Kontakt stehen, aufweisen.  
 – Alternativ die besagten Leiterbahnen nicht aus Halbleitern bestehen, sondern z. B. entarteten Halbleitern wie z. B. ITO oder TiN, Metallen, Halbmetallen.

15. Licht- bzw. Spannungsquelle nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die Partikel **1**, **3** und die Lumophore **2** untereinander oder auch mit den besagten Leiterbahnen und Leiterschichten durch molekulare Brücken **102**, **202**, **302**, S1, S2 verbunden sind, die einen erforderlichen Abstand Z der Lumophore **2** von den besagten metallischen Kernen **101** und **301** einhalten können.

16. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die besagten molekularen Brücken aus organischen, anorganischen oder biologischen Molekülen bestehen, die durch spezifische Ankergruppen an den Oberflächen der Komponenten haften können.

17. Licht- bzw. Spannungsquelle nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die Oberfläche der besagten Partikel **1** und **3** oder der besagten Leiterbahnen oder Leiterschichten durch Oberflächenmodifikationsschichten verändert wurde, so dass ein el. Kontakt oder eine Ankoppelung der besagten molekularen Brücken an die besagte Oberfläche zustande kommen oder auch verhindert werden kann.

18. Licht- bzw. Spannungsquelle nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die besagten metallischen Kerne der Partikel **1** bzw. **3** durch mindestens eine dielektrische Schicht **103** bzw. **303** von den el. leitfähigen Schichten **104** bzw. **304** getrennt sind.

19. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die besagte dielektrische Schicht aus Molekülen besteht, die auf den besagten metallischen Kernen verankert sind. (z. B. Silane, PMMA, HPMA)

20. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass:  
 – Die besagte dielektrische Schicht aus anorganischen Dielektrika wie Oxiden, Fluoriden, Nitriden, Kohlenstoff z. B. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, AlN, MgF<sub>2</sub>, SrF<sub>3</sub>, KF, CaF<sub>2</sub>, LiF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, YF<sub>3</sub>, LaF<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Diamant besteht.

21. Licht- bzw. Spannungsquelle nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:
- Die besagten metallischen Kerne der Partikel **1** bzw. **3** etwa eine sphärische Form aufweisen.
22. Licht- bzw. Spannungsquelle nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:
- Die besagten metallischen Kerne der Partikel **1** bzw. **3** etwa eine längliche oder stabförmige Form aufweisen.
23. Licht- bzw. Spannungsquelle nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:
- Die besagten metallischen Kerne der Partikel **1** bzw. **3** etwa eine Bow-Tie Form aufweisen.
24. Licht- bzw. Spannungsquelle nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:
- Die besagten metallischen Kerne der Partikel **1** bzw. **3** etwa eine Polyeder-Form aufweisen.
25. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 21 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass:
- Die besagten metallischen Kerne der Partikel **1** bzw. **3** aus massivem Metall bestehen.
26. Licht- bzw. Spannungsquelle nach Anspruch 21 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass:
- Die besagten metallischen Kerne der Partikel **1** bzw. **3** aus Metallhüllen um dielektrische Kerne bestehen.
27. Licht- bzw. Spannungsquelle nach den Ansprüchen 2, 4, 15 und 16, dadurch gekennzeichnet, dass:
- die el. leitfähigen Moleküle **102**, **202**, **302**, S1, S2 aus  $\pi$ -konjugierten bzw. aromatischen Molekülen bestehen, die über mindestens eine Ankergruppe zur Anbindung an den Partikeln **1**, **3**, Lumophor **2** oder Leiterbahnen und Leiterschichten verfügen
28. Licht- bzw. Spannungsquelle nach den Ansprüchen 2, 15 und 16, dadurch gekennzeichnet, dass:
- die Moleküle **102**, **202**, **302**, S1, S2 über keine erhebliche el. Leitfähigkeit verfügen, aber dafür so kurz sind, dass sie von den Elektronen z. B. durchtunnelt werden können. Beispielsweise dass besagte Moleküle aus Tri-n-Oktylphosphinoxid, Tri-n-oktylphosfin oder kurzen aliphatischen Kohlenwasserstoffen bestehen.
29. Licht- bzw. Spannungsquelle nach den Ansprüchen 2, 4, 15, 16, 27, 28 dadurch gekennzeichnet, dass:
- die Moleküle **102**, **202**, **302**, S1, S2 über spezifische Ankergruppen für die Oberflächen bzw. Kontaktgruppen der zu verbindenden Partikel und Leiterbahnen verfügen, so dass die Partikel selektiv und richtig gepolt verknüpft werden. Beispielsweise, dass die Moleküle **102** über eine erste Ankergruppe zum Partikel **1** und eine zweite Ankergruppe für eine erste Koppelgruppe eines Lumophors **2** verfügen usw.
  - Alternativ, die Moleküle **102**, **302**, **202**, S1, S2 funktionale Endgruppen (z. B. Methyl-, Carboxyl-, Amino-, Hydroxylgruppen usw.) besitzen, die spezifische Oberflächeneigenschaften (z. B. eine hydrophobe oder hydrophile Oberfläche) erzeugen.
30. Ein Verfahren zu Herstellung der Antennen A gemäß der Ansprüche 1 bis 29, mit den folgenden Schritten:
- Herstellung der Partikel **1** und **3** sowie der Lumophore **2** z. B. durch nasschemische Verfahren
  - Herstellung von Brückenmolekülen **102**, **202** und **302** z. B. durch chemische Synthese
  - Vermengen der Partikel **1**, **3** mit den Lumophoren **2** und selbsttätiges Verknüpfen mittels der Brückenmoleküle **102**, **202**, **302**, so dass z. B. Partikel **1** umhüllt von Lumophoren **2** entstehen.
31. Ein Verfahren zu Herstellung der Antennen A gemäß der Ansprüche 1 bis 29, mit den folgenden Schritten:
- Herstellung der Partikel **1** und **3** sowie der Lumophore **2** z. B. durch nasschemische Verfahren
  - Verbindung der Partikel **1**, **3** mit den Lumophoren **2** durch Ablagern aufeinander (z. B. durch Sprühtrocknung, Sedimentieren, Verdampfen des Lösungsmittels), so dass ein el. Kontakt zwischen den Partikeln, Lumophoren **2** und Leiterbahnen oder Schichten erzeugt wird.
32. Ein Verfahren zu Herstellung der Antennen A gemäß der Ansprüche 1 bis 29, mit den folgenden Schritten:
- Herstellung der Antennenpartikel **1** und/oder **3** durch lithographische Verfahren
  - Herstellung der Lumophore **2** z. B. durch nasschemische Verfahren oder chem. Synthese.
  - Optionale Herstellung von Brückenmolekülen **102**, **202** und **302** durch chemische Synthese.

– Ablagern der Lumophore **2** zwischen den Antennenpartikeln **1** und **3** bzw. Kontakt **4** oder Verknüpfen der Antennenpartikel **1** und **3** mit den Lumophoren **2** durch die Brückenmoleküle **102, 202, 302**, S1, S2 durch selbsttätiges Anknüpfen.

33. Licht- oder Spannungsquelle, die Antennen A gemäß der Ansprüche 1 bis 32 als Licht- bzw. Spannungsquellen verwendet, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Leiterbahnen L1 und L2 verwendet werden, um die Antennen A zu kontaktieren, die zumindest über kurze Distanz parallel verlaufen.
- Die Leiterbahnen L1 und L2 an metallische Leiterstrukturen L1\_Z bzw. L2\_Z el. kontaktiert sind, die sich im Wesentlichen unterhalb der Leiterbahnen L1 und L2 erstrecken.
- Die Antennen A sich an der Oberfläche der gesagten Licht- oder Spannungsquellen befinden, wobei die Antennen A mit transparenten dielektrischen Schutzschichten bedeckt sein können.

34. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die Leiterbahnen L1 und L2 Abstände voneinander besitzen, die kleiner als die Breite einer Antenne A sind, wobei die Antenne A jeweils aus einem Partikeln **1** oder beiden Partikeln **1** und **3** bestehen kann.

35. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 33, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die Leiterbahnen L1 und L2 in der Höhe versetzt sind, so dass sich eine Wanne zwischen zwei Leiterbahnen L1 bilden kann, die mit Antennen A bzw. Lumophoren **2** bedeckt sein kann.
- Die Antennen A seitlich an die Leiterbahnen L1 und gleichzeitig nach unten an die Leiterbahnen L2 el. kontaktiert sind, wobei sich jeweils Lumophore **2** zwischen den Antennen A und den Leiterbahnen L1 und/oder L2 befinden können.

36. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 33 bis 35, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die Leiterbahnen L1 und L2 mit Molekülen S1 bzw. S2 bedeckt sind, die Lumophore **2** oder Partikel **1** bzw. **3** durch Ankergruppen immobilisieren können.
- Die Leiterbahnen L1 und L2 mit Molekülen S1 bzw. S2 bedeckt sind, die eine Anpassung der Austrittsarbeiten der Leiterbahnen L1 und L2 bewirken können.

37. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 36, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die Leiterbahnen L1 und L2 mit Schichten **15\_1** bedeckt sind, die das Anbinden von Molekülschichten **102, 202, 302**, S1, S2 unterbinden können.

38. Licht- oder Spannungsquelle, die Antennen A gemäß der Ansprüche 1 bis 32 verwendet, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Leiterschichten benutzt werden, um die Antennen A zu kontaktieren, die durch abwechselndes Beschichten eines Substrates mit el. Leitern und Isolatoren erzeugt wurden.

39. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 33 bis 37 und Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die Leiterbahnen L1 und L2 bzw. die gesagten Leiterschichten aus anorganischen Element- oder Verbindungshalbleitern bestehen, die über ohmsche Kontakte mit metallischen Leiterstrukturen (z. B. L1\_Z bzw. L2\_Z) verbunden sind.
- Die gesagten Element- oder Verbindungshalbleiter verschieden zueinander dotiert sind (z. B. L1 ist p-dotiert und L2 ist n-dotiert).

40. Licht- oder Spannungsquelle, die Antennen A gemäß der Ansprüche 1 bis 32 als Licht- bzw. Spannungsquellen verwendet. Wobei die Antennen A bzw. die dazugehörigen Lumophore **2** in organische loch- bzw. elektronenleitende Halbleiterschichten eingebettet sind, die sich zwischen metallischen oder transparenten Elektroden befinden, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Der el. Strom im Wesentlichen über die el. leitfähigen Antennen A fließt.
- Die Antennen A sich im bzw. am Übergangsbereich der genannten elektronenleitenden zur lochleitenden Schicht befinden.

41. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die Lumophore **2** sich in einer Schicht, die parallel zu der Schicht der Partikel **1** bzw. **3** der Antennen A ist, befinden.

42. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 40 und 41, dadurch gekennzeichnet, dass:

- Die Antennen A in mind. einer dichten Schicht abgeschieden wurden, so dass der el. Strom über die Antennen A fließt.
  
- 43. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die Antennen A jeweils aus Partikeln **1** und **3** bestehen, die etwa horizontal angeordnet sind, wobei Partikel **3** gegenüber der Unterlage und Partikel **1** gegenüber der daraufliegenden Schicht el. isoliert sind.
  - Die genannten Partikel **1** und **3** durch Lumophore **2** el. verbunden sind.
  
- 44. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die Antennen A jeweils aus Partikeln **1** und **3** bestehen, die etwa vertikal angeordnet sind, wobei die Partikel **1** und **3** durch Lumophore **2** el. verbunden sind.
  
- 45. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die genannten Partikeln **1** und **3** aus länglichen Partikeln bestehen.
  
- 46. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 40 bis 45, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die Antennen A nicht in einer dichten Schicht abgeschieden sind.
  - Die Zwischenräume zwischen den Antennen A durch eine el. isolierende Schicht **22\_2** aus z. B. organischen Polymeren, Sol-Gel-Schichten oder anorganischen Dielektrika gefüllt sind. Die Schicht **22\_2** kann dabei mittels einer selektiven Beschichtung auf z. B. hydrophobe oder hydrophile Unterschichten erzeugt worden sein.
  
- 47. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 33 bis 46, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die Antennen A jeweils auf elektrisch unterteilten Leiterbahnen und Leiterschichten liegen, so dass die Antennen A sich in einzelnen Flächenabschnitten separat betreiben lassen, wobei sich die Antennen optional in den jeweiligen separaten Flächenabschnitten z. B. durch verschiedene Wellenlängen oder Polarisationsrichtungen auszeichnen können.
  
- 48. Gerät nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Jeweils mind. eine Antenne A als Emitter und mind. eine Antenne A als Spannungsquelle in unmittelbarer Nähe zueinander betrieben werden, um z. B. eine Signalübertragung zwischen Emitter und Spannungsquelle zu leisten.
  
- 49. Licht- oder Spannungsquelle, die Antennen A gemäß der Ansprüche 1 bis 32 als Licht- bzw. Spannungsquellen verwendet. Wobei die Antennen A bzw. die dazugehörigen Lumophore **2** in anorganische p- bzw. n-dotierte Halbleiterschichten eingebettet sind, die über ohmsche Kontakte an metallische Zuleitungen gebunden sind, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Der el. Strom im Wesentlichen über die el. leitfähigen Antennen A fließt.
  - Die Antennen A sich im bzw. am Übergangsbereich der genannten n-dotierten zur p-dotierten Schicht befinden.
  
- 50. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 49, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die Lumophore **2** sich in einer Schicht, die parallel zu der Schicht der Partikel **1** bzw. **3** der Antennen A ist, befinden.
  
- 51. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 49 und 50, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die Antennen A in mind. einer dichten Schicht abgeschieden wurden, so dass der el. Strom über die Antennen A fließt.
  
- 52. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 49 bis 51, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die genannten anorganischen Halbleiterschichten, in welche die Antennen A gebettet sind, selbst aus anorganischen Halbleiterpartikeln bestehen.
  
- 53. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 33 bis 52, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Die Antennen A sich in geeignetem Abstand zu einer metallischen Reflektorschicht R befinden, um die Abstrahl- bzw. Empfangscharakteristik der Antennen A zu verändern.
  
- 54. Licht- oder Spannungsquelle nach Anspruch 33 bis 53, dadurch gekennzeichnet, dass:
  - Antennen A, die für verschiedene Wellenlängen ausgelegt wurden gemischt werden, um z. B. einen Weißlichtemitter zu erzeugen.

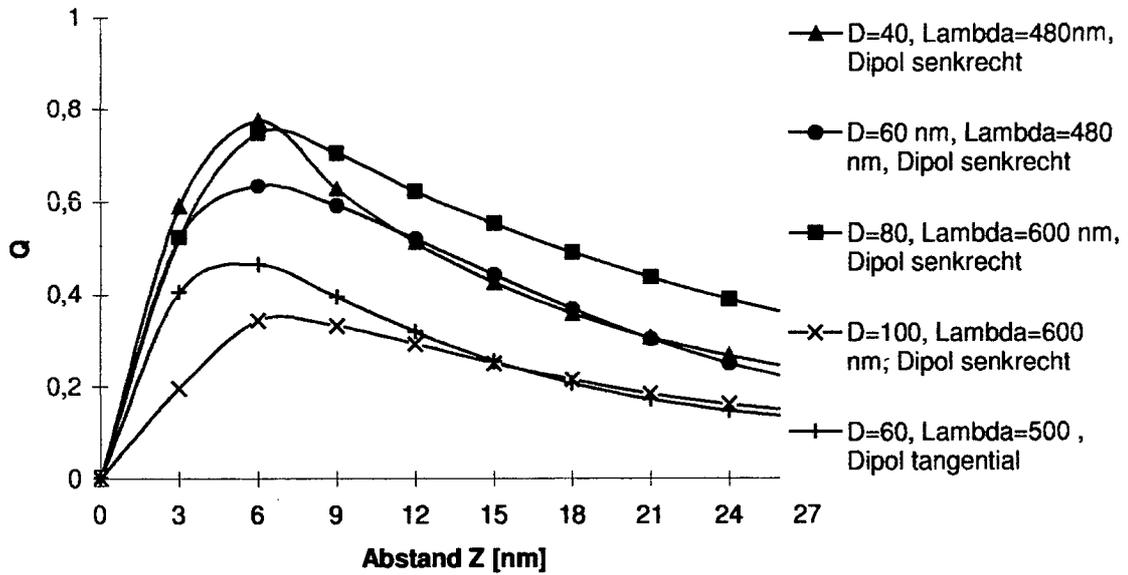
55. Ein Verfahren zu Herstellung der Licht- bzw. Spannungsquellen gemäß der Ansprüche 33 bis 54 mit den folgenden Schritten:

- Herstellung der Antennen A.
- Herstellung der Substrate mit den Leiterschichten oder Leiterbahnen z. B. durch Beschichtungsverfahren oder photolithographische Verfahren.
- Verbindung der Antennen A bzw. der Lumophore **2** mit den zugehörigen Leiterbahnen und Leiterschichten z. B. durch Ablagern aufeinander (z. B. durch Sprühtrocknung, Sedimentieren, Verdampfen des Lösungsmittels) oder polungsrichtiges Immobilisieren mithilfe von funktionalisierten Molekülschichten **102, 202, 302, S1, S2**.
- Optionales Füllen der Zwischenräume zwischen den Antennen A mit Schichten **22\_2**.
- Beschichten der Antennen A mit weiteren Leiterschichten, falls die Antennen A nicht an zwei separaten Leiterbahnen L1 und L2 anliegen.
- Optionales Verkapseln der erfindungsgemäßen Licht- bzw. Spannungsquellen mit transparenten dielektrischen Schutzschichten.

Es folgen 14 Blatt Zeichnungen

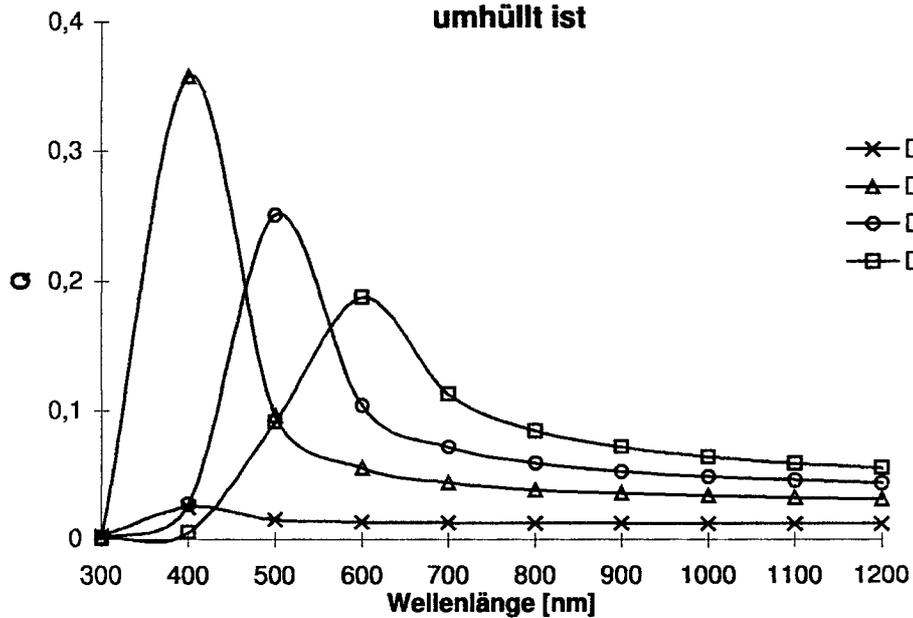
Abbildungen:

**Quantenausbeute eines Lumophors ( $q_0=0,1$ ) an einzelner Ag-Antenne eingebettet in Material mit  $n=1,6$**



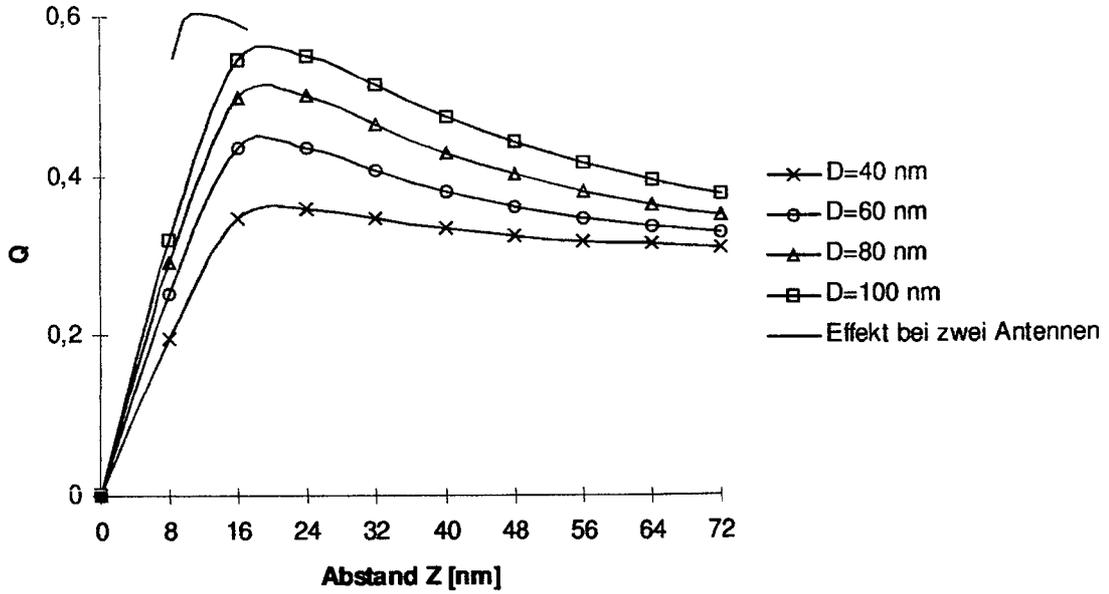
Figur 1

**Quantenausbeute eines Lumophors mit radialer Ausrichtung und  $q_0=0,01$  an einer einzelnen Ag-Antenne im Abstand von 8 nm, die mit Dielektrikum ( $n=1,5$ ) umhüllt ist**

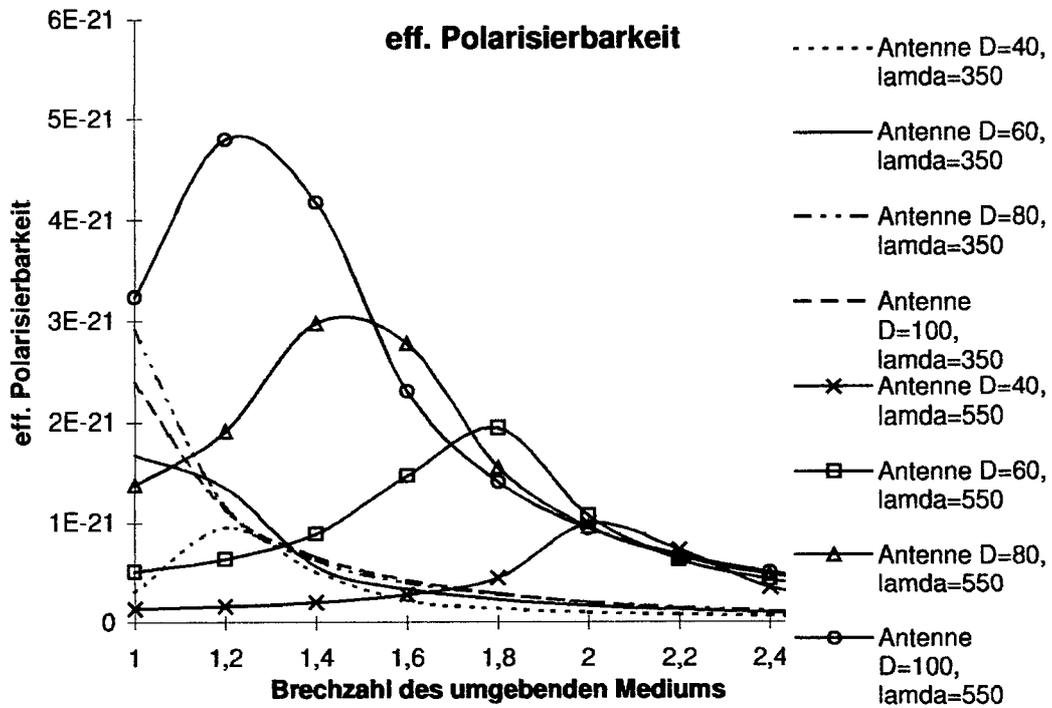


Figur 2

**Quantenausbeute eines radialen Lumophors ( $q_0=0,3$ ) an einer Au-Antenne bei Wellenlänge 600 nm in Luft**

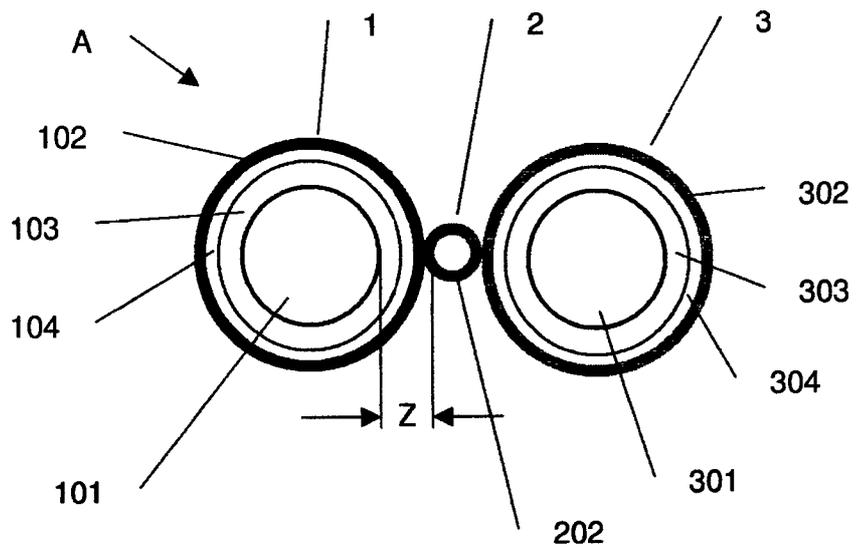


Figur 3

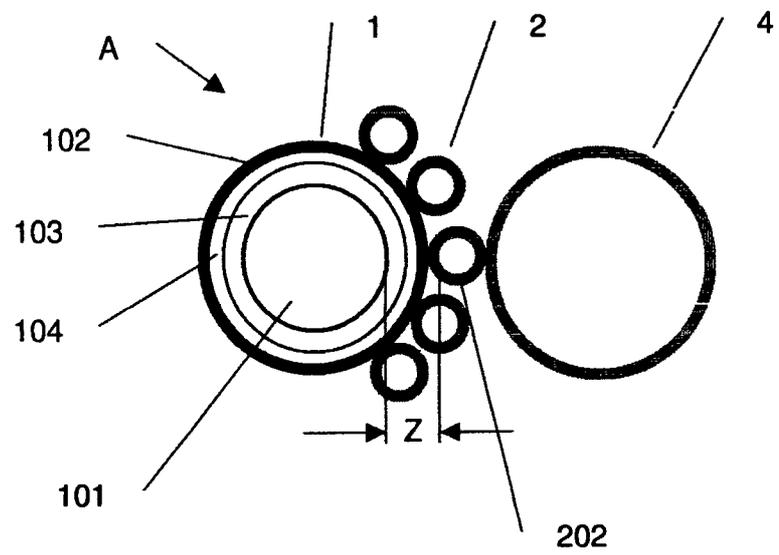


Figur 4

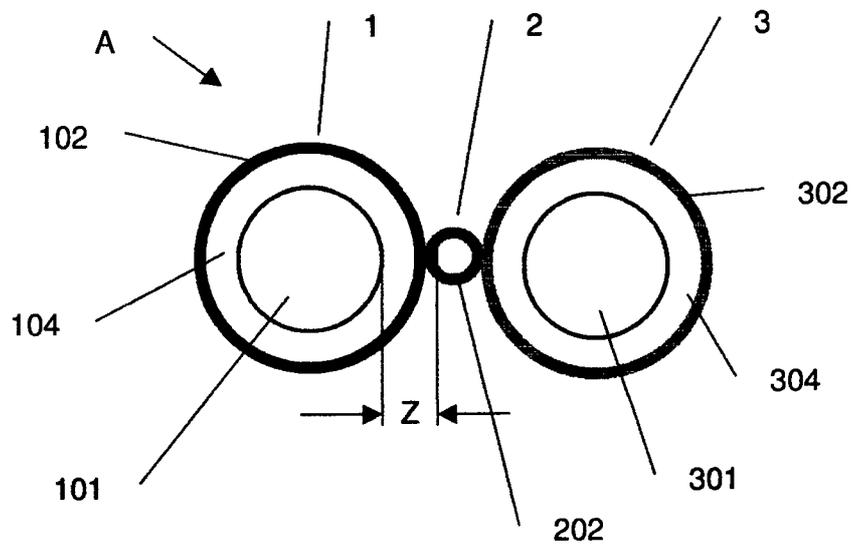




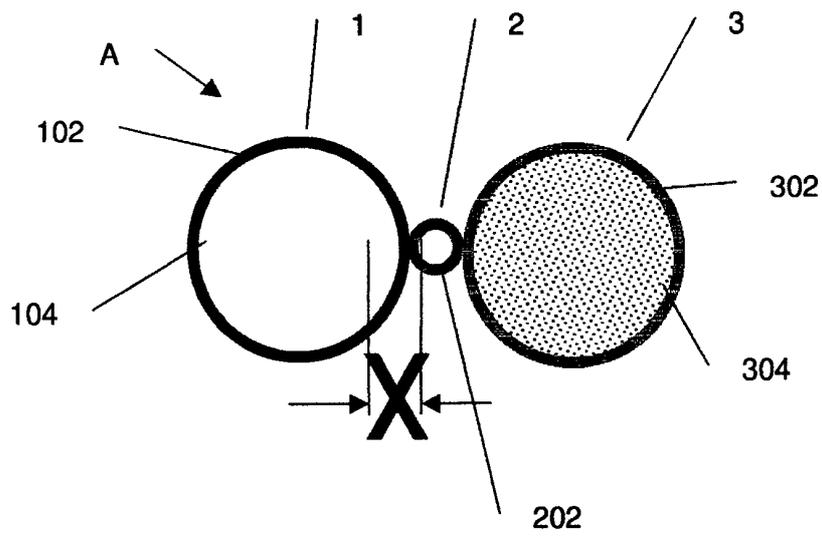
Figur 7



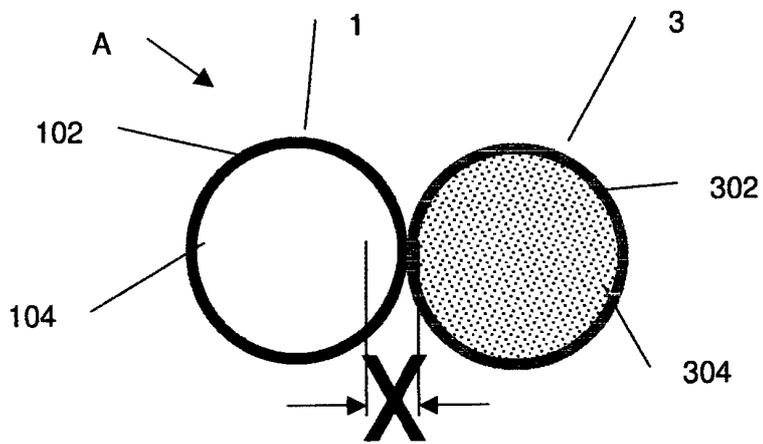
Figur 8



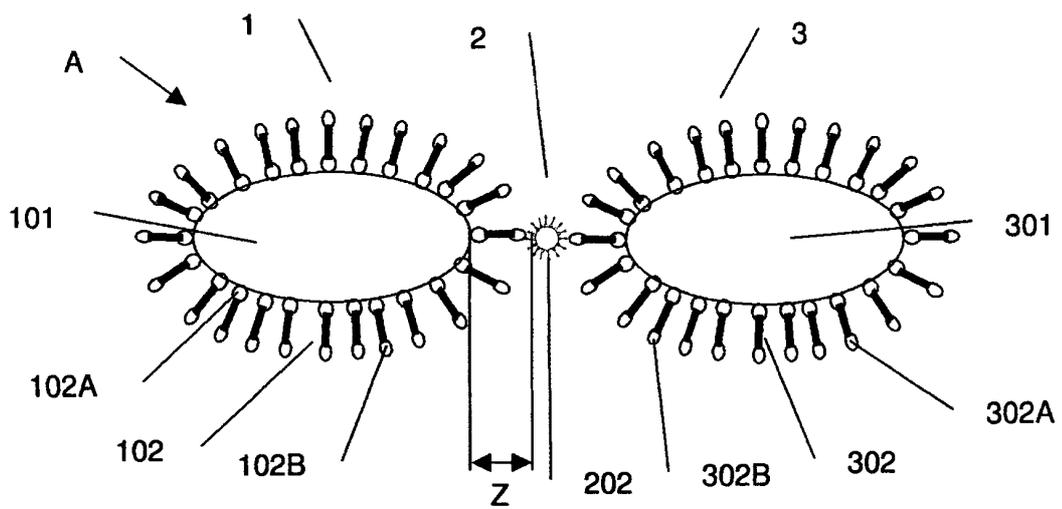
Figur 9



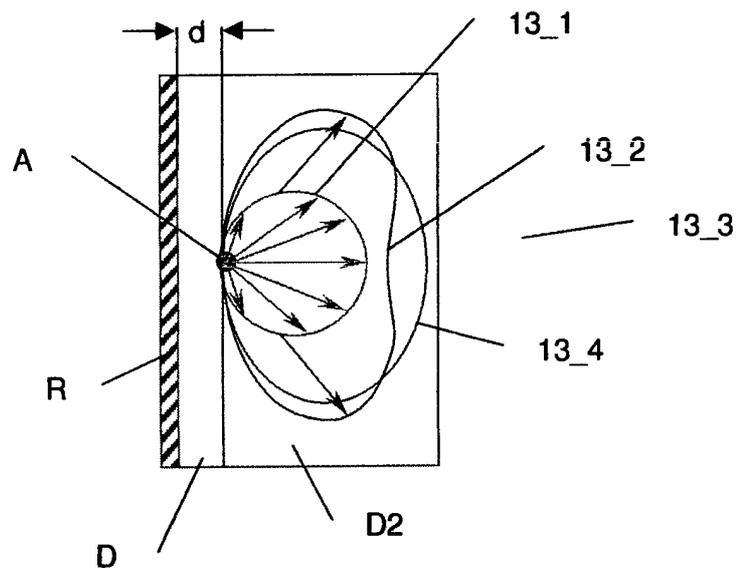
Figur 10



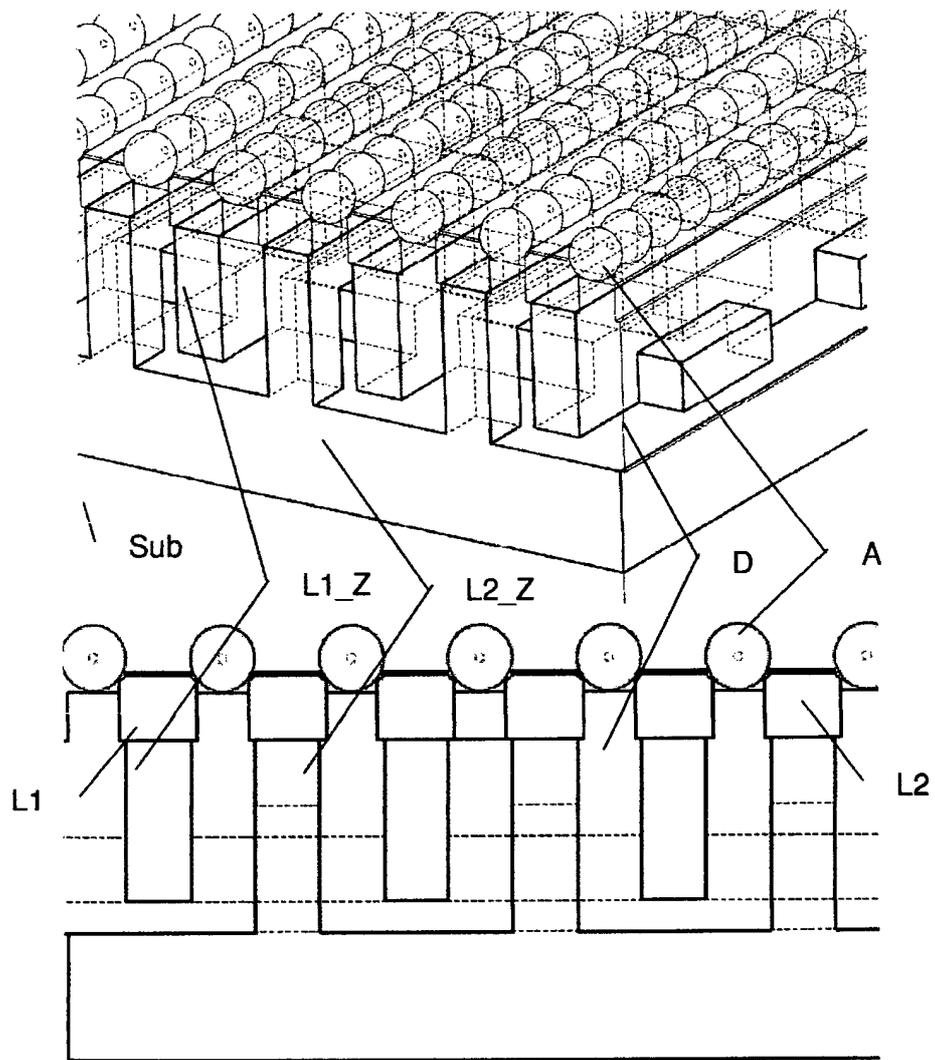
Figur 11



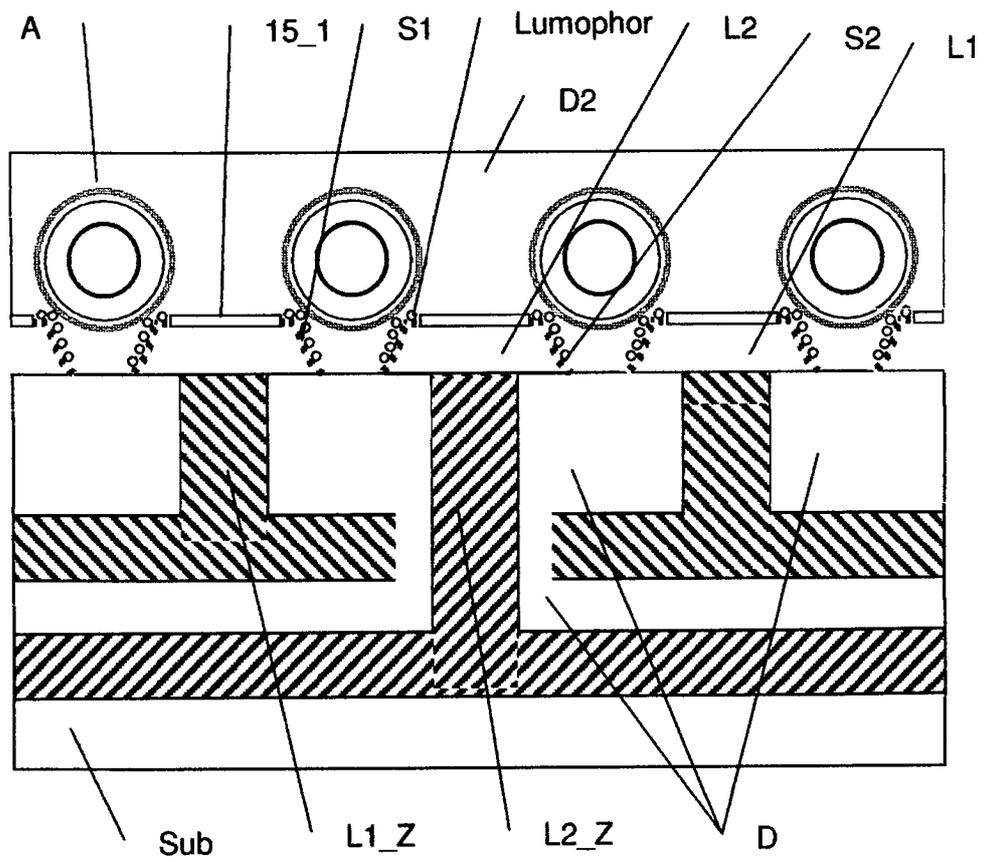
Figur 12



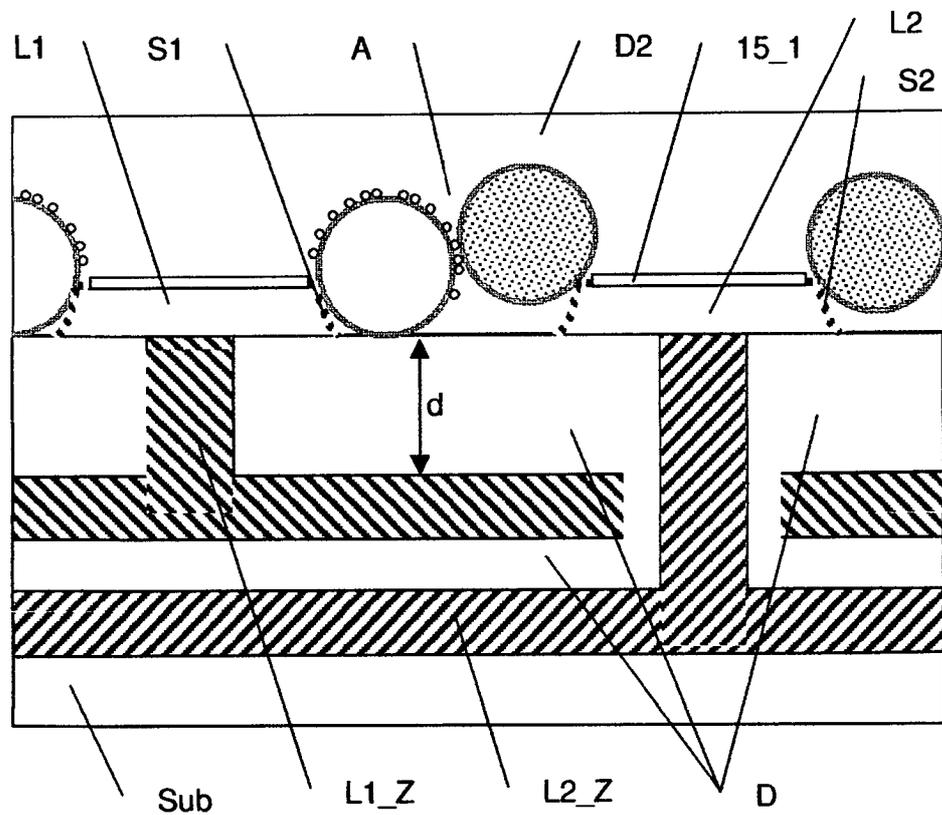
Figur 13



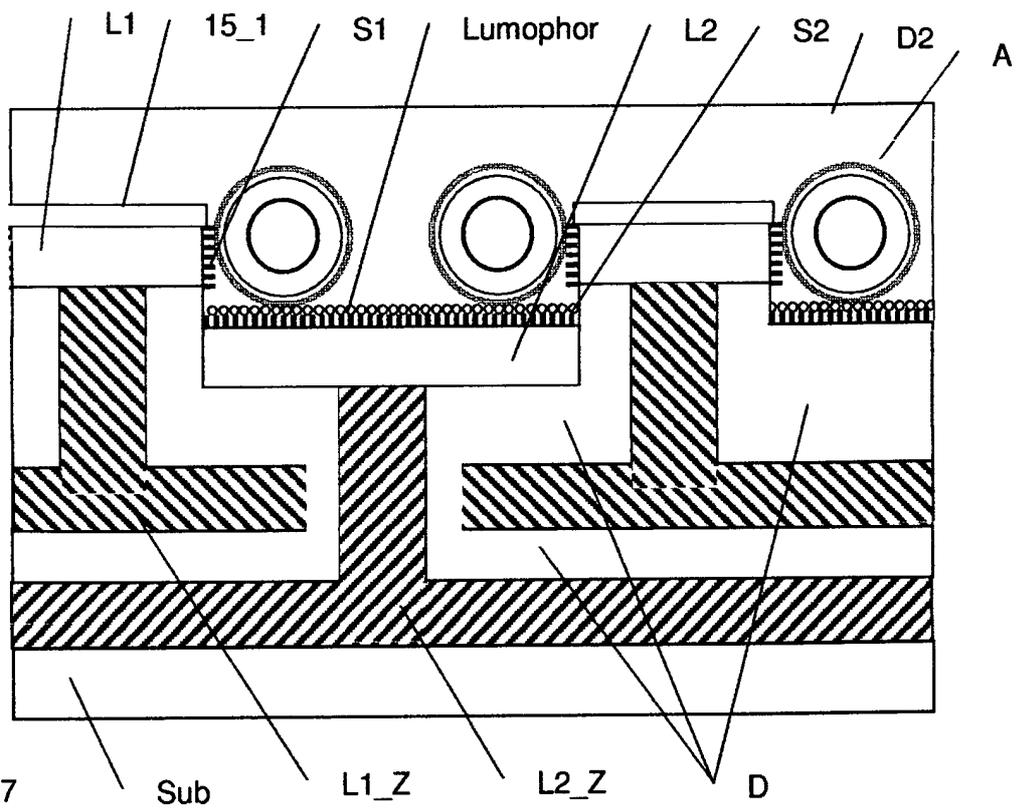
Figur 14



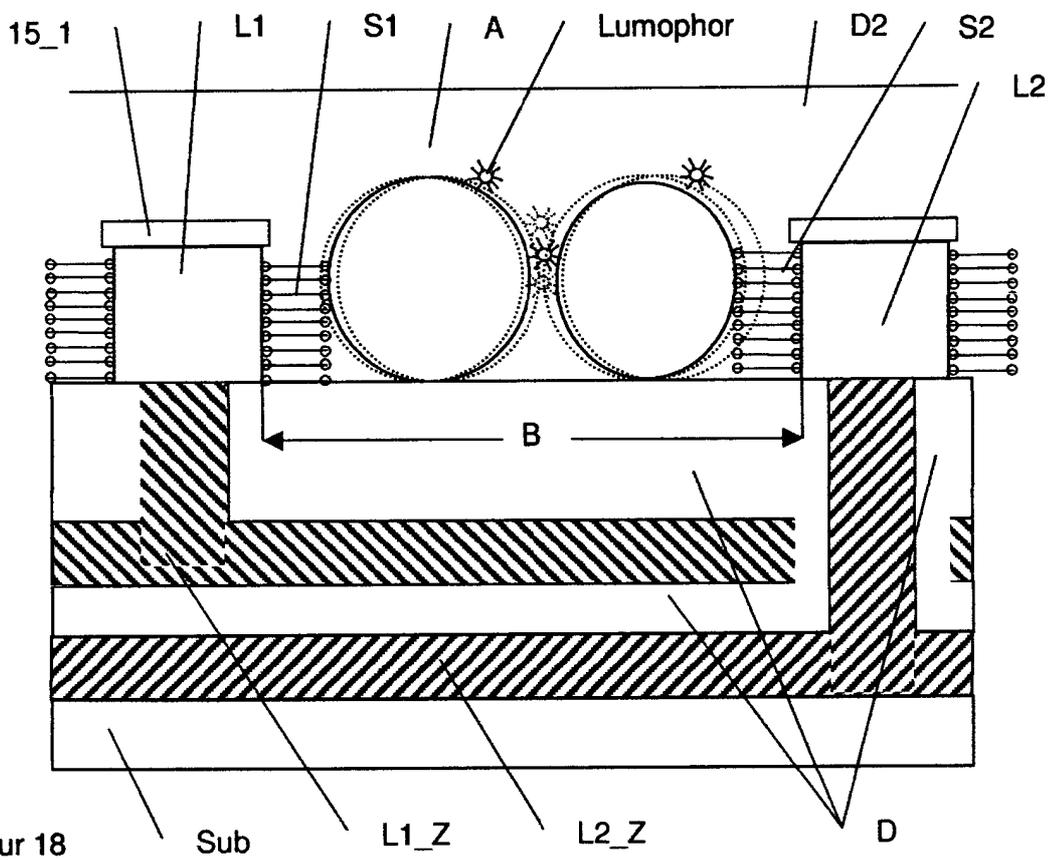
Figur 15



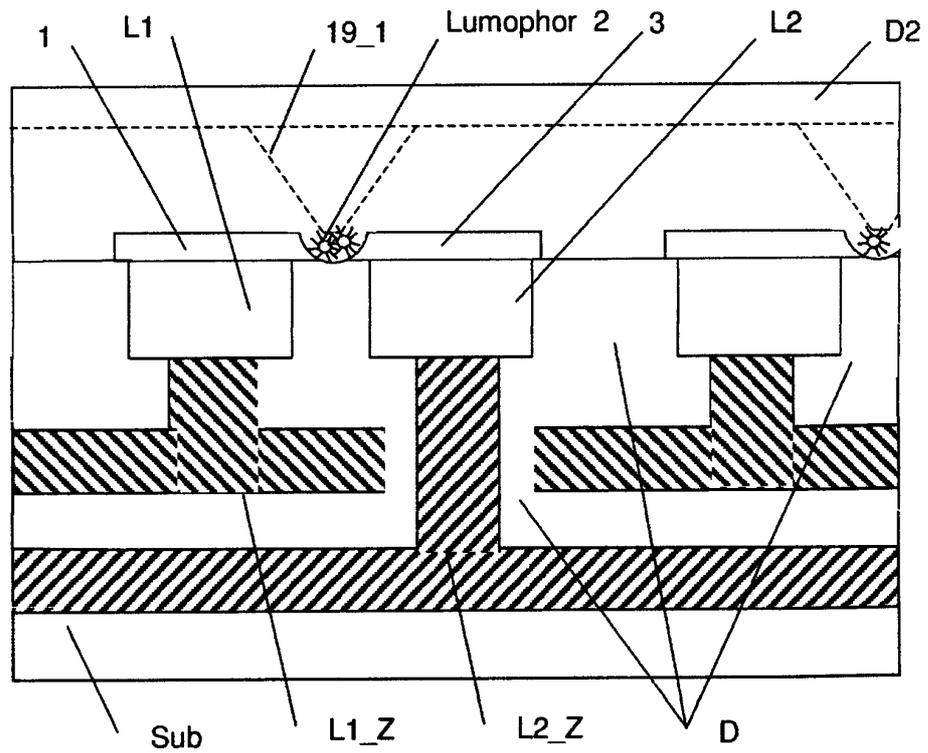
Figur 16



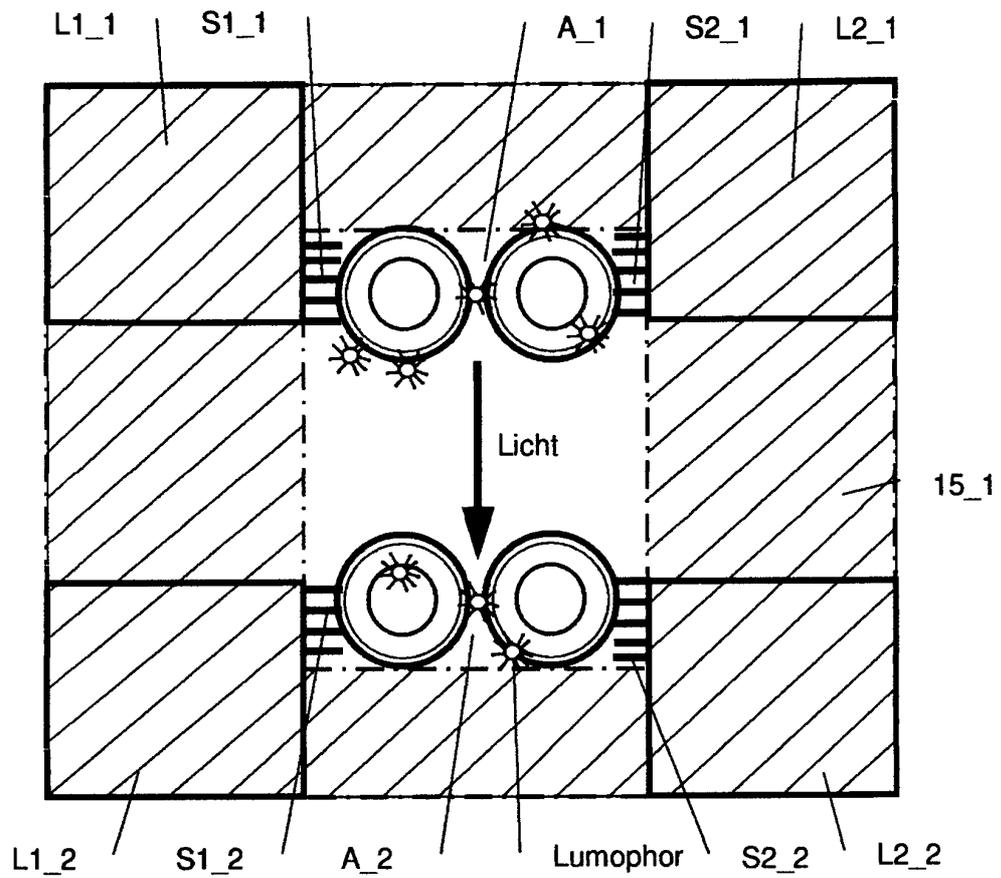
Figur 17



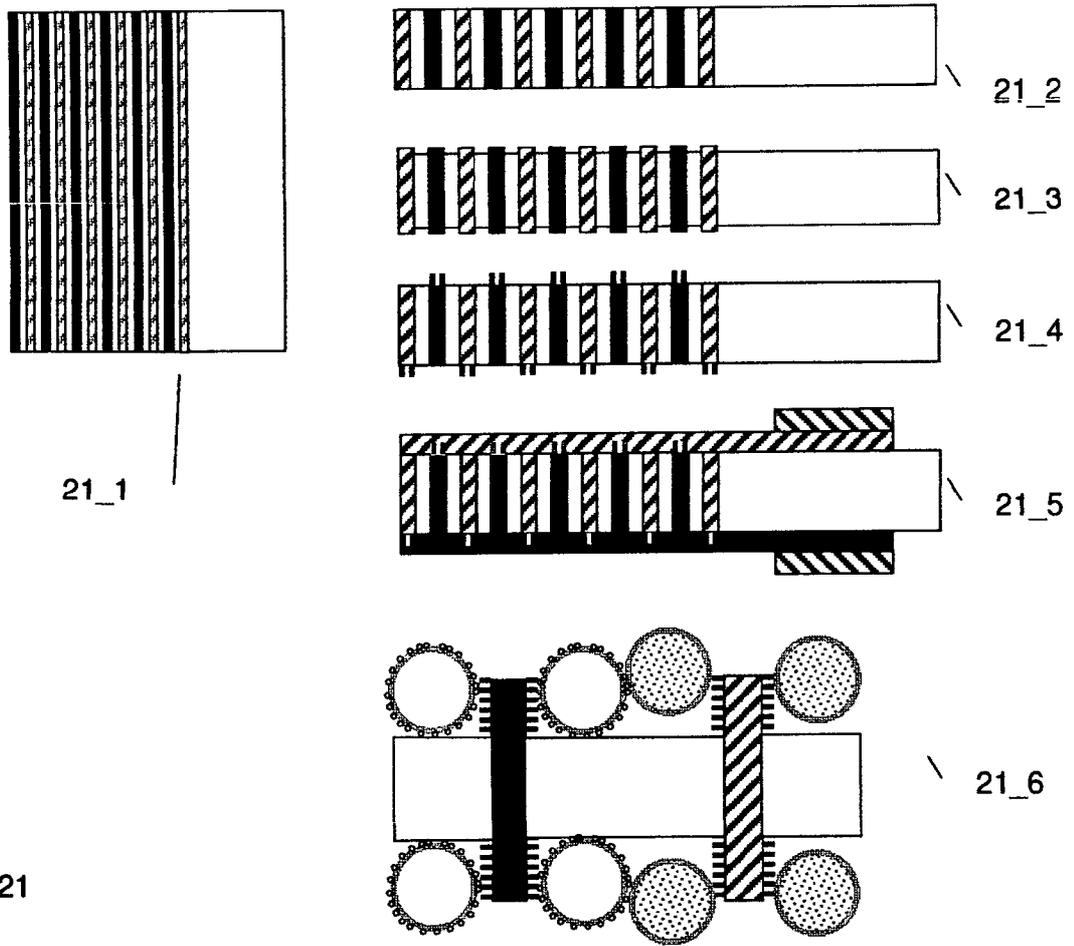
Figur 18



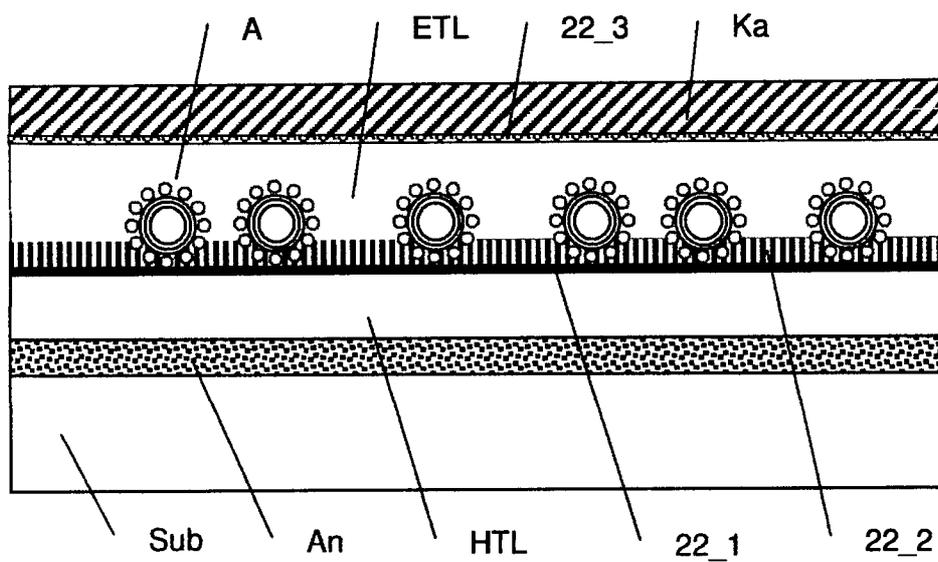
Figur 19



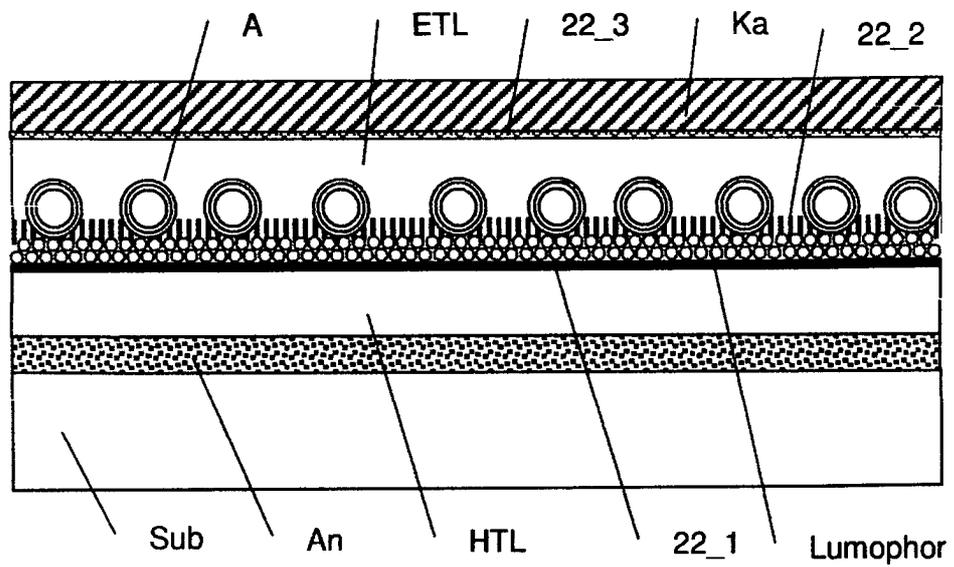
Figur 20



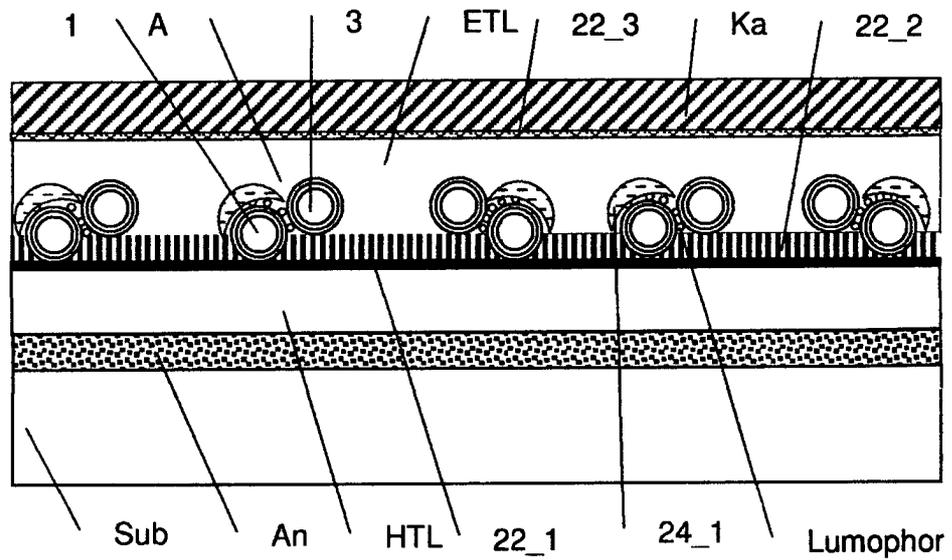
Figur 21



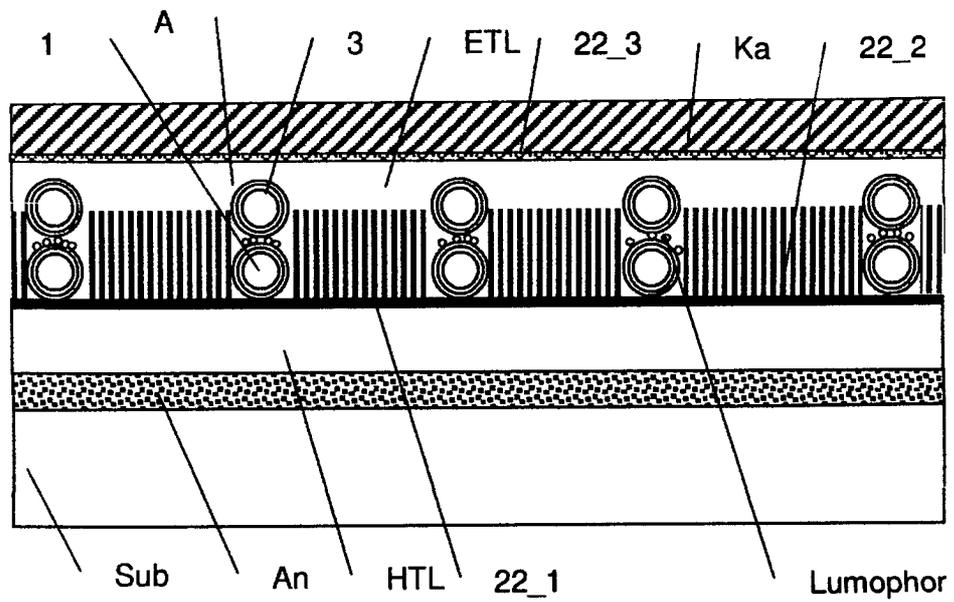
Figur 22



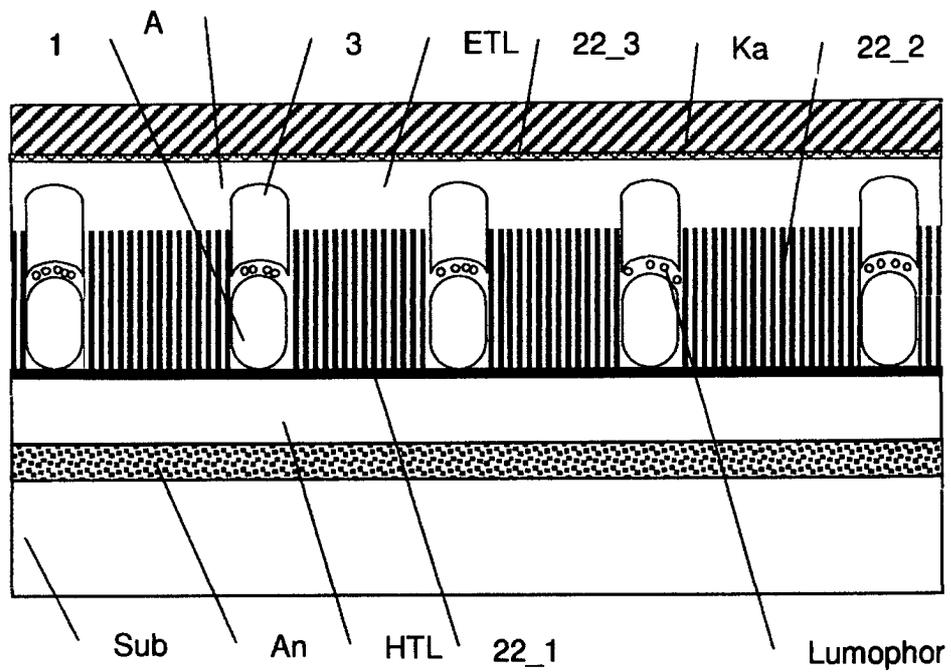
Figur 23



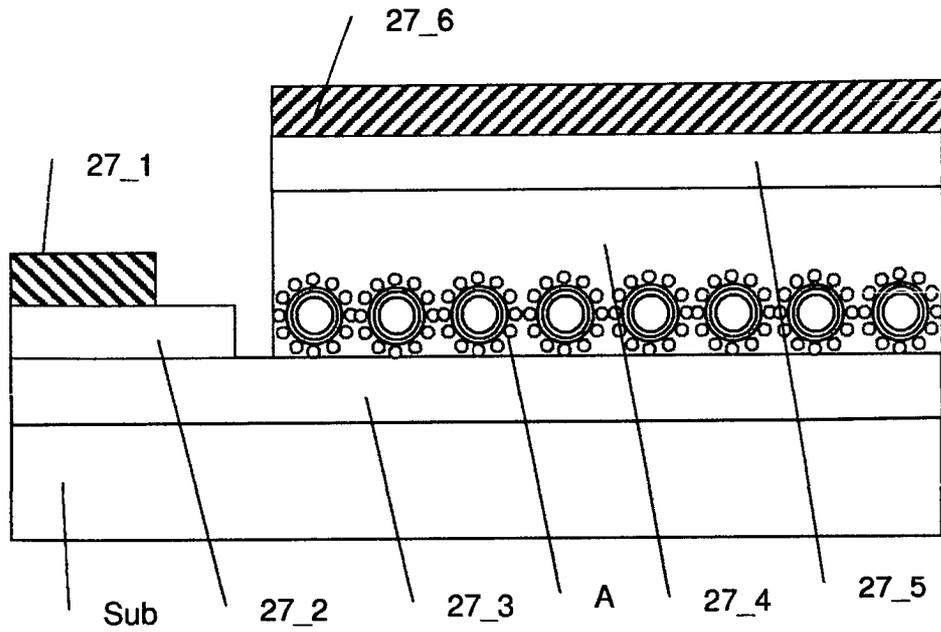
Figur 24



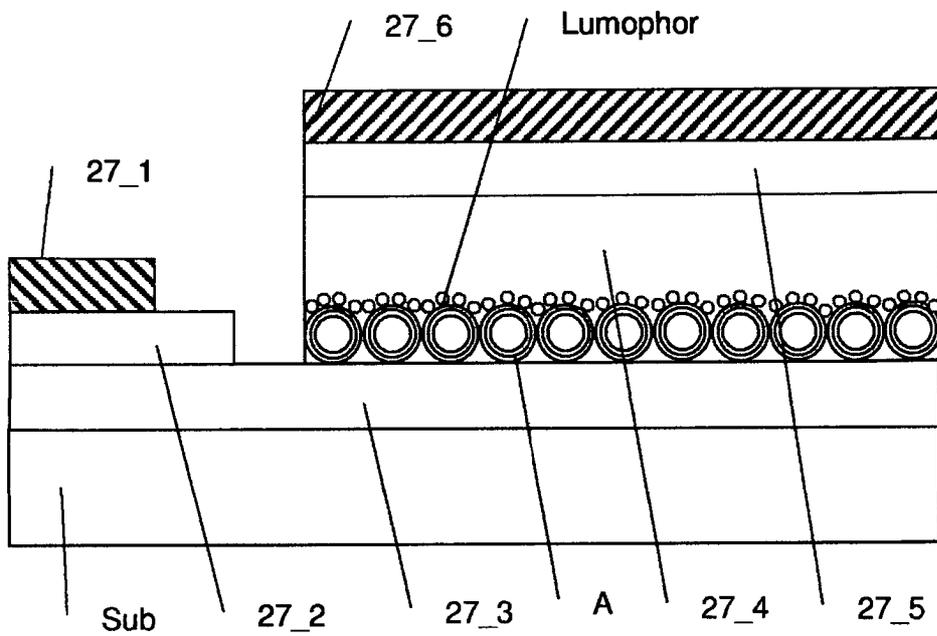
Figur 25



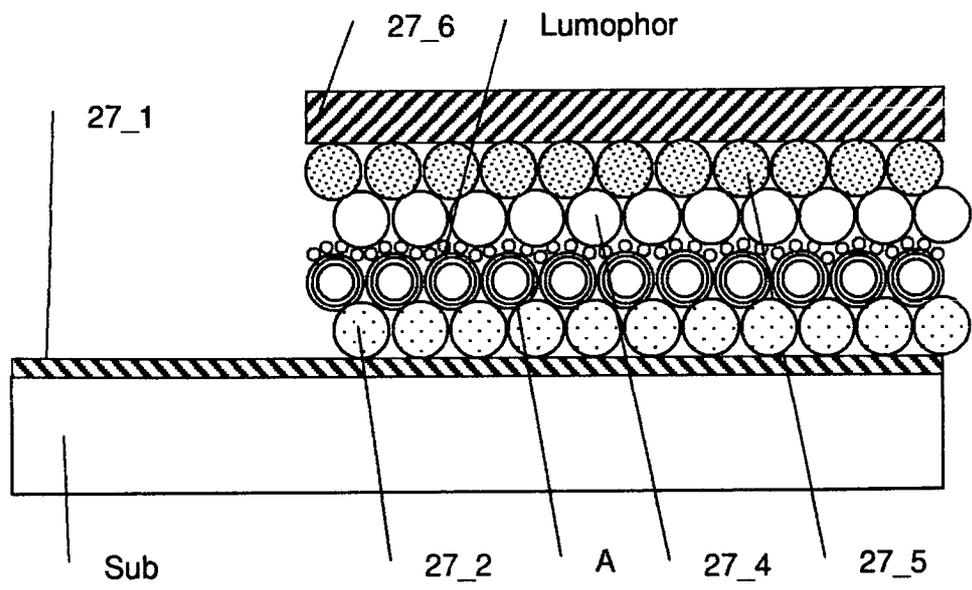
Figur 26



Figur 27



Figur 28



Figur 29