



EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC,
NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG,
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich unter anderem auf ein Verfahren zum Herstellen einer Einzelphotonenquelle (100) mit einem vorgegebenen Betriebsverhalten. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass das vorgegebene Betriebsverhalten der Einzelphotonenquelle (100) durch ein gezieltes Einstellen der Feinstrukturaufspaltung (FSS) des exzitonischen Energieniveaus mindestens eines Quantenpunkts (160', 520) festgelegt wird, indem der mindestens eine Quantenpunkt mit einer der einzustellenden Feinstrukturaufspaltung entsprechenden Quantenpunktgröße hergestellt wird.

Beschreibung

Einzelphotonenquelle und Verfahren zu deren Herstellung und Betrieb

5

Die Erfindung bezieht sich auf Einzelphotonenquellen und Verfahren zu deren Herstellung und Betrieb. Unter dem Begriff Einzelphotonenquelle werden nachfolgend Photonenquellen verstanden, die einzelne Photonen, insbesondere mit einer definierten bzw. vorgegebenen Polarisierung, verschränkte Photonen und Kaskaden von korrelierten Photonen emittieren können.

Einzelphotonenquellen sind unter anderem das Kernelement der Quantenkryptographie. Diese ist herkömmlichen Verschlüsselungstechnologien weit überlegen. Beim Austausch sensibler Daten, wie z.B. bei online-Geschäften, bietet sie einen auf den Gesetzen der Quantenmechanik beruhenden, absoluten Abhörschutz. Zunächst werden die Daten mit einem herkömmlichen Verfahren verschlüsselt. Der Schlüssel, mit dem diese wieder dekodiert werden können, wird dann getrennt und beispielsweise zeitlich vor den eigentlichen Daten übermittelt. Geschieht dies mit einer Einzelphotonenquelle unter Verwendung quantenkryptographischer Schemata, so wird ein nicht autorisiertes Abhören bemerkt. Nur wenn der Schlüssel nachweislich nicht abgehört wurde, wird das verschlüsselte Datenpaket auf herkömmliche Weise übermittelt. Somit können auch größere Datenmengen wie Bilder oder Filme, die als schützenswert eingestuft werden, abhörsicher in gewohnter Geschwindigkeit übertragen werden, da die Einzelphotonenquelle nur für die Übermittlung des Schlüssels verwendet wird.

30

Eine ideale Einzelphotonenquelle („photon gun“) ist ein Bauelement, welches nach einem Triggersignal, und nur dann, ein einzelnes Photon emittiert („on demand“). Zentrales Element einer Einzelphotonenquelle ist optimaler Weise ein quantisiertes System mit diskreten Energieniveaus. Hierfür kommen z.B. isolierte Atome, Moleküle oder Quantenpunkte in Frage.

35

Quantenpunkte bieten dabei entscheidende Vorteile. Im Gegensatz zum isolierten Atom lassen sich die diskreten Energieniveaus eines Quantenpunkts auch nicht-resonant anregen. Eingebettet in eine geeignete Halbleiterstruktur lässt sich somit
5 eine elektrisch betriebene Struktur realisieren. Dies ist im Hinblick auf das Vermarktungspotential besonders wichtig, da die Systemintegration erheblich vereinfacht wird. Für eine optisch angeregte Struktur würden im Gegensatz dazu zusätzliche Komponenten benötigt werden, welche die Herstellung und
10 die spätere Wartung des Systems erschweren sowie die Kosten erhöhen würden.

Für die Realisierung einer Einzelphotonenquelle findet sich in der Literatur eine Reihe von Ansätzen. Im Folgenden sollen
15 aus der Vielzahl veröffentlichter Realisierungsmöglichkeiten drei Konzepte kurz erläutert werden, die „zumindest im Prinzip“ für eine Anwendung in der Quantenkryptographie in Frage kommen.

20 Eines der vorbekannten Konzepte verfolgt die Idee einer Leuchtdiode, deren Elektrolumineszenz auf der Emission eines einzelnen Quantenpunkts beruht (vgl. folgende Druckschriften: Xu, D. A. Williams, J. R. A. Cleaver, Appl. Phys. Lett., Vol. 85, No. 15 (11 October 2004); A. J. Shields, R. M. Stevenson,
25 R. M. Thompson, M. B. Ward, Z. Yuan, B. E. Kardynal, P. See, I, Farrer, C. Lobo, K. Cooper, D. A. Ritchie, phys. Stat. Sol. (b) 238, No. 2, 353-359 (2003); J. Seufert, M. Rambach, G. Bacher, A. Forchel, T. Passow, D. Hommel, Appl. Phys. Lett., Vol. 82, No. 22 (2. Juni 2003); A. Fiore, J. X. Chen,
30 M. Ilegems, Appl. Phys. Lett., Vol. 81, No. 10 (02. September 2002) und A. J. Bennet, D. C. Unnitt, P. See, A. J. Shields, P. Atkinson, K. Cooper, D. A. Ritchie, Appl. Phys. Lett., Vol. 86, No. 4 (25. April 2005). Trotz der elektrischen Anregung, die für eine kommerzielle Anwendung zu bevorzugen ist,
35 ist dieser Ansatz aufgrund seiner bescheidenen Effizienz nicht sehr attraktiv. Dies hat im Wesentlichen zwei Ursachen: Zum einen führt die fehlende Vorzugsrichtung für die Photo-

nen-Emission, welche wenig gerichtet erfolgt, zu geringer Effizienz; zum anderen ist die spontane Emissionsrate von Quantenpunkten aufgrund der vergleichsweise langen strahlenden Lebensdauer der Zustände ($\sim$ ns) sehr gering. Außerdem ist die Emission nicht polarisiert.

Ein anderes vorbekanntes Konzept basiert auf einer resonanten Kopplung der energetischen Zustände eines Quantenpunkts mit den Moden einer Mikrokavität (vgl. folgende Druckschriften:

J. Vuckovic, D. Fattal, C. Santori, G. S. Solomon, Y. Yamamoto, Appl. Phys. Lett., Vol. 82, No. 21 (26. May 2002); J. M. Gerad, D. Barrier, J. Y. Marzin, R. Kuszelewicz, L. Manin, E. Costard, V. Thierry-Mig, T. Rivera, Appl. Phys. Lett., Vol. 69, No. 4 (22. July 1996); J. M. Gerad, D. Barrier, J. Y. Marzin, R. Kuszelewicz, L. Manin, E. Costard, V. Thierry-Mig, T. Rivera, Appl. Phys. Lett., Vol. 69, No. 4 (22. July 1996) und E. Moreau, I. Robert, J. M. Gerad, I. Abram, L. Manin, V. Thierry-Mieg, Appl. Phys. Lett., Vol. 69, No. 4 (22. July 1996). Dieses vorbekannte Konzept nutzt den Purcell-Effekt, welcher den Einfluss einer solchen Kopplung auf die spontane Emissionsrate beschreibt. Insgesamt ist wegen hoher optischer Verluste in der Mikrokavität auch dieses zweitgenannte Konzept für eine Einzelphotonenquelle noch sehr verbesserungsbedürftig.

Ein drittes vorbekanntes Konzept basiert auf stark abgeschwächten Lasern. Um Zwei-Photonen-Pulse unwahrscheinlich zu machen, werden die Laser-Pulse auf eine Intensität von kleiner als 0,1 Photon pro Takt abgedämpft. Das beschränkt die maximale Datenübertragungsrate, da $> 90\%$ der Takte „leer“ sind. Außerdem wird die Fehlerrate erhöht, da durch Verstärkerrauschen Photonen generiert und gemessen werden können, auch wenn der Takt eigentlich „leer“ war. Diese Beschränkung der Verstärkung limitiert die Reichweite der Übertragung. Des Weiteren können Zwei-Photonen-Pulse nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Solche Pulse bedeuten jedoch eine Lücke in der Sicherheit, da nun ein Mithörer mittels eines Strahltei-

lers ein Photon messen und das zweite Photon weiter an den Empfänger schicken kann (engl. photon number splitting - PNS) und so ein Abhörschutz nicht mehr gegeben ist. Problematisch ist auch die Polarisierung der emittierten Photonen: Ist nämlich der Polarisationszustand völlig unkontrolliert, muss ein Polarisationsfilter hinter die Einzelphotonenquelle geschaltet werden. Dadurch wird die Anzahl der Photonen und somit die Datenübertragungsrate weiter reduziert.

10 Ausgehend von dem aufgeführten vorbekannten Stand der Technik liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Herstellen einer Einzelphotonenquelle anzugeben, das sich einfach und reproduzierbar durchführen lässt.

15 Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen gemäß Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in Unteransprüchen angegeben.

20 Danach ist erfindungsgemäß ein Verfahren zum Herstellen einer Einzelphotonenquelle vorgesehen, bei dem ein vorgegebenes Betriebsverhalten durch ein gezieltes Einstellen der Feinstrukturaufspaltung des exzitonischen Energieniveaus mindestens eines Quantenpunkts festgelegt wird, indem der mindestens ei-
25 ne Quantenpunkt mit einer der einzustellenden Feinstrukturaufspaltung entsprechenden Strukturgröße (Quantenpunktgröße) hergestellt wird.

Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht die reproduzierbare
30 Herstellung von Quantenpunkten mit gewollten elektronischen Zuständen und damit die reproduzierbare Herstellung von Einzelphotonenquellen mit vorgegebenen Eigenschaften. Erfindungsgemäß wurde nämlich festgestellt, dass die Feinstrukturaufspaltung des exzitonischen Energieniveaus von Quantenpunkten
35 von Materialverspannungen abhängig ist. Auf dieser Erkenntnis baut die Erfindung auf, indem erfindungsgemäß vorgeschlagen wird, durch die Wahl der Strukturgröße des oder der Quanten-

punkte, also durch die Wahl der Quantenpunktgröße, den Grad der Verspannung innerhalb der Quantenpunkte und den Grad der Verspannung innerhalb der umgebenden Materialstruktur (z. B. Halbleiterstruktur) gezielt festzulegen. Dadurch werden auch
5 die Feinstrukturaufspaltung und ggf. die energetische Lage des exzitonischen Energieniveaus definiert, von dem aus die Photonen emittiert werden. Allein durch die Wahl der Größe bzw. des Volumens der Quantenpunkte - also allein durch die Anzahl der Atome, die den jeweiligen Quantenpunkt bilden -
10 lässt sich somit eine Einzelphotonenquelle mit den gewünschten Eigenschaften herstellen. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren lassen sich kompakte Einzelphotonenquellen herstellen, die definierte linear polarisierte Einzelphotonen, verschränkte Photonenpaaren oder Kaskaden von korrelierten Photonen emittieren können.
15

Als vorteilhaft wird es angesehen, wenn das Material der Quantenpunkte sowie das Material der photonenführenden Bereiche der Photonenquelle so gewählt werden, dass die Wellenlänge der Photonen dem Dispersions- oder Absorptionsminimum bereits verlegter Telekomglasfasern (1,3 μm bzw. 1,55) entspricht. Dies lässt sich beispielsweise mit Quantenpunkten auf der Basis von In(Ga)As in Ga(In,Al)As oder In(Ga)P in Ga(In)P erreichen.
20

25

Das beschriebene Verfahren wird vorzugsweise unter Verwendung etablierter halbleitertechnologischer Verfahren durchgeführt.

Zur Herstellung einer Einzelphotonenquelle, die verschränkte Photonenpaare erzeugen kann, wird der mindestens eine Quantenpunkt bevorzugt mit 800 bis 5000 Atomen des Quantenpunktmaterials gebildet. Eine solch kleine Atomanzahl bzw. eine solch kleine Quantenpunktgröße führt zu einer derartigen Verspannung innerhalb des Quantenpunkts und innerhalb der umgebenden Materialstruktur, dass die Feinstrukturaufspaltung des exzitonischen Energieniveaus sehr klein wird oder - dies wäre ideal - Null beträgt; im Falle einer sehr kleinen oder nicht
30
35

vorhandenen Feinstrukturaufspaltung weisen die von den beiden „bright“-Zuständen des exzitonischen Energieniveaus aus emittierten Photonen identische Frequenzen auf und sind miteinander verschränkt.

5

Beispielsweise wird bei der Herstellung einer verschränkte Photonenpaare erzeugenden Einzelphotonenquelle durch die Wahl der Quantenpunktgröße eine Feinstrukturaufspaltung zwischen -100 μeV und +100 μeV eingestellt. Die Grundzustandsenergie
10 des mindestens einen Quantenpunkts liegt bevorzugt zwischen 1,27 eV und 1,33 eV.

Zur Herstellung einer Einzelphotonenquelle, die einzelne Photonen mit definierter Polarisierung erzeugen kann, wird der
15 mindestens eine Quantenpunkt vorzugsweise mit 40000 bis 125000 Atomen des Quantenpunktmaterials gebildet. Eine solch große Atomanzahl bzw. eine solch große Strukturgröße führt zu einer derartig großen Verspannung innerhalb des Quantenpunkts und innerhalb der umgebenden Materialstruktur, dass die Feinstrukturaufspaltung des exzitonischen Energieniveaus (bright-Exziton im Grundzustand) sehr groß wird; im Falle einer sehr großen Feinstrukturaufspaltung weisen die von den beiden Zuständen des exzitonischen Energieniveaus aus emittierten Photonen sehr unterschiedliche Emissionsfrequenzen auf, so dass
20 das „unerwünschte“ der beiden Photonen mit einem Filter ohne großen Aufwand weggefiltert oder unterdrückt werden kann.
25

Beispielsweise wird bei der Herstellung einer Einzelphotonenquelle, die einzelne Photonen mit definierter Polarisierung erzeugen kann, eine Feinstrukturaufspaltung von mindestens
30 +300 μeV eingestellt, indem die Strukturgröße des mindestens einen Quantenpunkts entsprechend - wie erwähnt - groß gewählt wird. Eine möglichst große Feinstrukturaufspaltung vereinfacht - wie bereits erwähnt - beispielsweise das „Wegfiltern“
35 des unerwünschten Zusatz-Photons.

Die Grundzustandsenergie des mindestens einen Quantenpunkts ist bei einer Einzelphotonenquelle, die einzelne Photonen mit definierter Polarisierung erzeugt, vorzugsweise kleiner als 1,1 eV.

5

Als selbständige Erfindung wird außerdem ein Verfahren zur Herstellung einer Einzelphotonenquelle angesehen, bei dem eine Kavität mit einer oder mehreren longitudinalen Resonanzfrequenzen hergestellt wird, wobei innerhalb der Kavität mehrere Quantenpunkte angeordnet werden, die während des Betriebs der Einzelphotonenquelle Photonen mit jeweils einer eigenen Emissionsfrequenz generieren, bei dem eine Ladungsträgerinjektionseinrichtung derart hergestellt und angeordnet wird, dass diese während des Betriebs der Einzelphotonenquelle Ladungsträger in den Bereich der Kavität injizieren kann und die Quantenpunkte zum Generieren der Photonen anregen kann, und bei dem die Dichte der Quantenpunkte so gering und die Streuung bezüglich Größe und Materialzusammensetzung der Quantenpunkte so groß gewählt wird, dass während des Betriebs der Einzelphotonenquelle ausschließlich die Emissionsfrequenz eines einzigen Quantenpunkts einer der longitudinalen Resonanzfrequenzen der Kavität entsprechen und aus der Kavität ausgekoppelt werden kann.

25 Mit diesem Verfahren lassen sich in sehr einfacher Weise Einzelphotonenquellen herstellen, die elektrisch betrieben werden können und die zusätzlich aufgrund des Vorhandenseins einer Kavität das Konzept der resonanten Kopplung der exzitonschen Zustände der Quantenpunkte mit den Moden der Kavität verfolgen. Durch die Kavität wird eine Vorzugsrichtung für die Emission der Photonen vorgegeben, und außerdem wird die spontane Emissionsrate durch die Ausnutzung des Purcell-Effekts um ein Vielfaches erhöht.

35 Vorzugsweise wird die Kavität derart dimensioniert, dass die zur Auskopplung der Photonen verwendete longitudinale Eigenfrequenz der Kavität der Emissionsfrequenz desjenigen Quan-

tenpunkts entspricht, der von allen angeregten Quantenpunkten die kleinste Emissionsfrequenz aufweist. Dadurch wird verhindert, dass ein generiertes Photon unerwünscht wieder reabsorbiert werden kann.

5

Um zu erreichen, dass nur ein einziger Quantenpunkt „aktiv“ Photonen emittiert, wird die Flächendichte der Quantenpunkte bevorzugt kleiner als $5 \cdot 10^9$ pro Quadratzentimeter gewählt. Ein besonders bevorzugter Bereich liegt zwischen $1 \cdot 10^8$ und $5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$.

10

Die Streuung bezüglich Größe und Materialzusammensetzung der Quantenpunkte wird vorzugsweise so groß gewählt, dass die Emissionsfrequenzen der Quantenpunkte bei der Betriebstemperatur der Photonenquelle untereinander überlappungsfrei sind.

15

Im Übrigen wird es als vorteilhaft angesehen, wenn eine Strompfadbegrenzungseinrichtung hergestellt wird, die den Stromfluss und damit den Fluss der injizierten Ladungsträger im Bereich der Kavität derart bündelt, dass nur eine Teilgruppe der hergestellten Quantenpunkte innerhalb der Kavität angeregt wird. Eine solche Strompfadbegrenzungseinrichtung, die man auch als „Auswahleinrichtung für Quantenpunkte“ bezeichnen könnte, erleichtert es, auch bei einer sehr großen Anzahl an „anregbaren“ Quantenpunkten nur einen einzigen tatsächlich aktiv zu betreiben.

20

25

Des weiteren wird es als vorteilhaft angesehen, wenn eine Temperatureinstelleinrichtung hergestellt wird, mit der sich die Temperatur der Einzelphotonenquelle für deren Betrieb auf einen Temperaturwert absenken lässt, bei dem die Emissionsspektren der innerhalb der Kavität befindlichen Quantenpunkte überschneidungsfrei sind. Im Falle einer Temperaturreduktion verringert sich nämlich die Spektralbreite der Emissionsspektren der Quantenpunkte, so dass sehr dicht nebeneinander liegende Emissionsspektren, die sich bei Raumtemperatur überschneiden, getrennt werden können. Außerdem lässt sich durch

30

35

eine Temperaturabsenkung eine Blauverschiebung der Emissionsspektren erreichen, so dass - falls keines der Einzel-Emissionsspektren der Quantenpunkte mit einer der longitudinalen Resonanzfrequenzen der Kavität „von sich aus“ zusammenfällt - durch eine gezielte Temperaturänderung zumindest eines der Einzel-Emissionsspektren in einen Resonanz- und damit in einen „Auskoppelbereich“ verschoben werden kann.

Als selbständige Erfindung wird außerdem ein Verfahren zur Herstellung einer Einzelphotonenquelle angesehen, bei dem eine Kavität mit einer oder mehreren longitudinalen Resonanzfrequenzen hergestellt wird, wobei mindestens eine Quantenpunktschicht innerhalb der Kavität angeordnet wird, bei dem eine Anrecheinrichtung derart hergestellt und angeordnet wird, dass diese während des Betriebs der Einzelphotonenquelle zumindest einen Quantenpunkt zum Generieren der Photonen anregt, und bei dem an den längs zur Emissionsrichtung der Photonen verlaufenden Seitenwänden der Kavität eine hochreflektierende Schicht aufgebracht wird.

Wie oben ausgeführt, sollte der Durchmesser der Kavität möglichst klein sein, um maximale Purcell-Faktoren zu erreichen. Um zu vermeiden, dass es bei einer Reduzierung des Durchmessers der Kavität zu den sonst üblicherweise auftretenden optischen Verlusten kommt - vgl. obige Ausführungen zum Stand der Technik im Zusammenhang mit dem zweiten vorbekannten Konzept - wird hier eine hochreflektierende Schicht vorgeschlagen, die auf den Seitenwänden der Kavität aufliegt. Auf diese Weise lassen sich Kavitätsgüten und Purcell-Faktoren erreichen, die deutlich höher sind als die bei den eingangs vorgestellten Konzepten. Der Seitenwandrauigkeit dieser Metallschicht kommt eine besondere Bedeutung zu, da die hiermit verbundene Lichtstreuung massgeblich die realisierbaren Purcell-Faktoren begrenzt.

Die hochreflektierende Schicht kann beispielsweise durch eine Metallschicht, z. B. Goldschicht, realisiert werden.

Vorzugsweise wird über AlO_x -Aperturen innerhalb der Kavität die Feldverteilung darüber hinaus noch weiter optimiert, um die optischen Verluste im Seitenwandbereich der Kavität zu reduzieren.

Als selbständige Erfindung wird außerdem eine Einzelphotonenquelle zum Emittieren einzelner linear polarisierter Photonen oder verschränkter Photonenpaare, insbesondere zum Einsatz in der Quantenkryptografie, angesehen mit einem oder mehreren Quantenpunkten, die während des Betriebs der Einzelphotonenquelle Photonen mit jeweils einer Emissionsfrequenz generieren, mit einer Kavität, innerhalb derer die Quantenpunkte angeordnet sind, wobei die Kavität eine oder mehrere longitudinale Resonanzfrequenzen aufweist, und mit einer Ladungsträgerinjektionseinrichtung, die während des Betriebs der Einzelphotonenquelle in den Bereich der Kavität Ladungsträger injiziert und die Quantenpunkte zum Generieren der Photonen anregt, wobei während des Betriebs der Einzelphotonenquelle ausschließlich Photonen eines einzigen Quantenpunkts ausgekoppelt werden, nämlich die Photonen desjenigen Quantenpunkts, dessen Emissionsfrequenz einer der longitudinalen Resonanzfrequenzen der Kavität entspricht.

Vorteilhaft bei der vorgeschlagenen Einzelphotonenquelle ist, dass trotz des Vorhandenseins mehrerer prinzipiell „anregfähiger“ Quantenpunkte lediglich ein einziger Quantenpunkt tatsächlich Photonen emittieren kann, weil nämlich nur bei einem Quantenpunkt die Emissionsfrequenz zu einer Resonanzfrequenz der Kavität passt. Durch die Mehrzahl der zur Verfügung stehenden Quantenpunkte wird in vorteilhafter Weise eine Redundanz gewährleistet: Fällt nämlich der angeregte Quantenpunkt aus, so kann durch ein Verschieben der Emissionsfrequenzen der Quantenpunkte (z. B. durch ein Verändern der Temperatur) ein anderer Quantenpunkt, nämlich beispielsweise der energetisch nächstliegende, ausgewählt werden, indem dessen

Emissionsfrequenz mit einer der longitudinalen Resonanzfrequenzen der Kavität in Deckung gebracht wird.

Vorzugsweise ist die Kavität derart dimensioniert, dass die zur Auskopplung der Photonen verwendete longitudinale Eigenfrequenz der Kavität der Emissionsfrequenz desjenigen Quantenpunkts entspricht, der von allen angeregten Quantenpunkten die kleinste Emissionsfrequenz aufweist.

Die Einzelphotonenquelle weist bevorzugt eine Strompfadbegrenzungseinrichtung auf, die den Fluss der injizierten Ladungsträger im Bereich der Kavität bündelt und die Anzahl der tatsächlich angeregten Quantenpunkte reduziert.

Im Übrigen wird es als vorteilhaft angesehen, wenn die Einzelphotonenquelle eine Mehrzahl an Quantenpunkten aufweist, die in einer vorgegebenen Dichte angeordnet sind und eine vorgegebene Streuung ihrer Eigenschaften aufweisen.

Besonders bevorzugt ist die angeregte Teilgruppe der Quantenpunkte so klein und die vorgegebene Streuung der Eigenschaften der Quantenpunkte so groß, dass bei der Betriebstemperatur der Einzelphotonenquelle die Emissionsspektren der Quantenpunkte der Teilgruppe - zumindest einzelne davon, vorzugsweise jedoch alle - überschneidungsfrei sind.

Beispielsweise ist die Dichte der Quantenpunkte kleiner als $5 \cdot 10^9$ pro Quadratzentimeter. Ein besonders bevorzugter Bereich liegt zwischen $1 \cdot 10^8$ und $5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausgestaltung der Einzelphotonenquelle ist vorgesehen, dass eine Temperatureinstelleinrichtung vorhanden ist, die die Temperatur der Einzelphotonenquelle für deren Betrieb auf eine vorgegebene Betriebstemperatur absenkt, bei der die Emissionsspektren - zumindest einzelne davon, vorzugsweise jedoch alle - der innerhalb der Kavität befindlichen Quantenpunkte überschneidungsfrei sind.

Als selbständige Erfindung wird außerdem eine Einzelphotonenquelle zum Emittieren einzelner linear polarisierter Photonen oder verschränkter Photonenpaare - insbesondere zum Einsatz
5 in der Quantenkryptografie - angesehen, mit mindestens einem Quantenpunkt, der während des Betriebs der Einzelphotonenquelle Photonen mit einer Emissionsfrequenz generiert, mit einer Kavität, innerhalb derer der mindestens eine Quantenpunkt angeordnet ist und die eine Filtercharakteristik aufweist derart, dass nur eine resonante Kopplung zwischen einem
10 einzigen der Quantenpunkte und der Kavität erfolgt, und mit einer Anrecheinrichtung, die während des Betriebs der Einzelphotonenquelle den mindestens einen Quantenpunkt zum Generieren der Photonen anregt, wobei an den längs zur Emissionsrichtung der Photonen verlaufenden Seitenwänden der Kavität
15 eine hochreflektierende Schicht, insbesondere eine Metallschicht, aufgebracht ist.

Wie bereits erwähnt, kann durch die hochreflektierende
20 Schicht der Durchmesser der Kavität verkleinert und der Purcell-Faktor vergrößert werden, ohne dass sich die optischen Verluste der Kavität signifikant vergrößern.

Als selbständige Erfindung wird auch ein Verfahren zum Ansteuern einer Einzelphotonenquelle angesehen, bei dem die
25 Temperatur der Einzelphotonenquelle derart eingestellt wird, dass die Emissionsfrequenz desjenigen Quantenpunkts, der von allen angeregten Quantenpunkten die kleinste Emissionsfrequenz aufweist, mit einer longitudinalen Eigenfrequenz einer
30 Kavität der Einzelphotonenquelle übereinstimmt.

Als selbständige Erfindung wird außerdem auch ein Verfahren zum Ansteuern einer Einzelphotonenquelle angesehen, bei dem das Emissionsspektrum einer für die optische Anregung verwendeten Anrecheinrichtung so eingestellt wird, dass das Emissionsspektrum energetisch oberhalb der Zustände des „aktiven“
35

Quantenpunktes liegt und außerdem in einem Bereich liegt, in dem die Kavität der Einzelphotonenquelle transparent ist.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert; dabei zeigen beispielhaft:

Figur 1 schematisch die Erzeugung von Photonen durch einen Quantenpunkt anhand eines schematischen Energiediagramms für ein Exziton X und ein Biexziton XX;

Figur 2 die gemessene Feinstrukturaufspaltung des bright-Exzitons im Grundzustand als Funktion der Exzitonen-Energie und der Quantenpunktgröße;

Figuren 3A, 3B die Emission von definiert polarisierten Photonen mit hoher Emissionsrate und die Emission polarisationsverschränkter Photonenpaare;

Figur 4 ein erstes Ausführungsbeispiel für eine erfindungsgemäße Einzelphotonenquelle;

Figur 5 den Stromfluss innerhalb der Einzelphotonenquelle gemäß Figur 4;

Figur 6 das Reflexionsspektrum eines unteren Bragg-Spiegelpakets und eines oberen Bragg-Spiegelpakets der Einzelphotonenquelle gemäß Figur 4;

Figur 7 das Reflexionsspektrum einer Kavität der Einzelphotonenquelle gemäß Figur 4 im Detail;

- Figur 8 Lumineszenzeigenschaften zweier Quantenpunkte der Einzelphotonenquelle gemäß Figur 4 bei unterschiedlichen Temperaturen;
- 5 Figur 9 Lumineszenzeigenschaften eines Ensembles von Quantenpunkten bei der Einzelphotonenquelle gemäß Figur 4 bei unterschiedlichen Temperaturen;
- 10 Figuren 10a)-c) das Auskoppeln der Photonen desjenigen Quantenpunktes mit der geringsten Emissionsfrequenz durch eine gezielte Temperatursteuerung;
- 15 Figur 11 ein weiteres Ausführungsbeispiel für eine erfindungsgemäße Einzelphotonenquelle; und
- Figur 12 das Lumineszenzspektrum eines Quantenpunktes und die Elektrolumineszenz einer Anregungs-LED der Einzelphotonenquelle gemäß
- 20 Figur 11 bei tiefen Temperaturen.

In den Figuren 1 bis 12 werden für identische bzw. vergleichbare Elemente der Übersicht halber identische Bezugszeichen

25 verwendet.

Figur 1 zeigt ein schematisches Energiediagramm für ein Exziton X und ein Biexziton XX in einem Quantenpunkt. Die Feinstrukturaufspaltung FSS des exzitonischen Zustandes ergibt

30 sich zu $FSS = E_2 - E_1$. Die beiden senkrecht aufeinander stehenden Polarisationsrichtungen ($\pi+$, $\pi-$) der emittierten Photonen sind eingezeichnet.

Figur 2 stellt die gemessene Feinstrukturaufspaltung des

35 bright-Exzitons im Grundzustand am Beispiel von InAs/GaAs als Funktion der Exzitonen-Energie und der Quantenpunktgröße dar. Schematisch ist die Feinstrukturaufspaltung als energetischer

Abstand der beiden Exzitonen-Emissionslinien dargestellt. Man erkennt, dass die Größe von überwachsenen, epitaktischen Quantenpunkten direkt mit deren Verspannung korreliert ist und dass wiederum die Verspannung die Feinstrukturaufspaltung bestimmt; in der Figur 2 ist beispielhaft ein kleiner InAs-Quantenpunkt bestehend aus 2400 Atomen des Quantenpunktmaterials mit dem Bezugszeichen 10 und ein großer InAs-Quantenpunkt bestehend aus 40000 Atomen des Quantenpunktmaterials mit dem Bezugszeichen 15 gekennzeichnet. Aufgrund dieser Zusammenhänge ist es möglich, die Größe der Feinstrukturaufspaltung einzustellen, indem man Quantenpunkte 10 bzw. 15 der entsprechenden Größe herstellt. Die in der Figur 2 nur schematisch dargestellten Quantenpunkte weisen vorzugsweise die Form einer oben abgeschnittenen Pyramide mit quadratischer Grundfläche auf.

Einzelphotonenemitter, die auf Quantenpunkten beruhen, bieten den wesentlichen Vorteil gegenüber existierenden Lösungen - wie z. B. dem eingangs beschriebenen, abgeschwächten Laser -, dass sie im Prinzip Photonen "on-demand" produzieren können. Das bedeutet, dass jeder Puls bei 100 % Quanteneffizienz genau ein Photon erzeugt. Eine Einzelphotonenquelle, die für die Quantenkryptographie eingesetzt werden soll, muss „on-demand“ entweder Photonen eines definierten Polarisationszustandes oder Paare von polarisationsverschränkten Photonen emittieren können. Für die Erzeugung einzelner Photonen mit einer definierten Polarisation muss die Feinstrukturaufspaltung möglichst groß sein, um mit energetischen Filtern (z.B. einer angepassten Kavität) einen einzigen exzitonischen Zustand auswählen zu können. Für die Erzeugung von polarisationsverschränkten Photonenpaaren muss die Feinstrukturaufspaltung zumindest annähernd verschwinden. Es werden hierbei Photonen aus der Biexziton $\rightarrow$ Exziton $\rightarrow$ 0 Zerfallskaskade verwendet (siehe auch Figur 1). Ein zu großer energetischer Abstand zwischen den zwei vorhandenen exzitonischen Zuständen verhindert hingegen die Verschränktheit des emittierten Photonenpaares.

Die entscheidende Größe zur Herstellung von entsprechenden Einzelphotonenquellen basierend auf Quantenpunkten ist somit die Feinstrukturaufspaltung. Sie bestimmt die energetische Aufspaltung des exzitonischen Grundzustandes in zwei Zustände, die senkrecht zueinander polarisiert sind. Die Feinstrukturaufspaltung ist in den 90er Jahren das erste Mal bei epitaktischen Quantenpunkten beobachtet worden. Ohne Kontrolle über sie galt sie jedoch bis heute als störender Parameter, der verschränkte Photonenpaare unterbindet. Aufgrund des hier neu beschriebenen Verfahrens ist nun eine gezielte Größenkontrolle der Feinstrukturaufspaltung möglich. Das hier vorgestellte Verfahren erlaubt die Kontrolle der Feinstrukturaufspaltung direkt durch das Einstellen der Quantenpunktgröße während der Herstellung der Quantenpunkte. Die Feinstrukturaufspaltung hängt von der räumlichen Symmetrie des elektronischen Potentials eines Quantenpunktes ab. Verspannungen in den Quantenpunktstrukturen führen zu piezoelektrischen Feldern, die die Potentialsymmetrie und damit die Feinstrukturaufspaltung beeinflussen. Dabei gilt: je größer die Verspannung, desto größer die Feinstrukturaufspaltung. Da die Verspannung abhängig von der Größe der Quantenpunkte ist, kann man durch die Wahl einer bestimmten Quantenpunktgröße direkt die Größe der Feinstrukturaufspaltung auswählen.

Die Figuren 3A und 3B zeigen hierzu eine schematische Darstellung zweier Beispiele. Bei Wahl einer großen Feinstrukturaufspaltung (Figur 3A) wird durch eine Kavität die Emission von einem Exziton über den Purcell-Faktor verstärkt und von dem anderen unterdrückt. So resultieren definiert polarisierte Photonen mit hoher Emissionsrate. Durch elektrisches Pumpen ist somit die kontrollierte Erzeugung von Photonen einer definierten Polarisationsrichtung und hoher Emissionsrate möglich (z. B. für eine BB84-Anwendung (Quantenkryptographisches Übertragungsprotokoll)).

Nur wenn die Feinstrukturaufspaltung verschwindet (vgl. Figur 3B: Quantenpunkte mit $FSS=0$), können polarisationsverschränkte Photonenpaare erzeugt werden. Von einem entsprechenden Emitter kann je eines der verschränkten Photonen der Biexziton → Exziton → 0 Zerfallskaskade zu jeweils einem Empfänger 1 bzw. 2 geschickt werden (siehe Figur 3B). Bei verschränkten Photonenpaaren bestimmt die Messung der Polarisation eines Photons direkt das Messergebnis der Polarisation des anderen Photons. Durch Ausnutzen dieses quantenmechanischen Effektes kann also Information von einem zum anderen Empfänger übertragen werden, indem einer der beiden Empfänger Messungen an „seinem“ Photon vornimmt und so das Messergebnis des zweiten Empfängers bestimmt.

Figur 4 zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel für eine erfindungsgemäße Einzelphotonenquelle 100 im Detail. Man erkennt ein Substrat 105 aus beispielsweise GaAs-Material, auf dem ein unteres Bragg-Spiegelpaket 110 (vorzugsweise aus Oxidmaterial) mit Spiegelschichtpaaren 115 unterschiedlicher Brechzahl aufgebracht ist. Auf dem unteren Bragg-Spiegelpaket 110 befindet sich eine untere, beispielsweise n-dotierte, elektrische Kontaktschicht 120 einer durch eine pin-Diodenstruktur 130 gebildeten Ladungsträgerinjektionseinrichtung. Zwischen einer beispielsweise p-dotierten oberen elektrischen Kontaktschicht 140 der pin-Diodenstruktur 130 und der unteren elektrischen Kontaktschicht 120 befindet sich eine aktive Schicht 150 mit einer Vielzahl an Quantenpunkten 160 (z. B. aus In(Ga)As) in einer Monolage sowie eine n-dotierte Zwischenschicht 165. Die Quantenpunkte 160 weisen eine vorgegebene Dichte und damit einen vorgegebenen mittleren Abstand zueinander auf. Über der oberen elektrischen Kontaktschicht 140 der pin-Diodenstruktur 130 befindet sich ein oberes Bragg-Spiegelpaket 170, durch das Photonen 180 nach oben aus der Einzelphotonenquelle 100 austreten können. Das obere Spiegelpaket 170 besteht vorzugsweise aus Oxidmaterial.

Bezugszeichen 190 und 195 bezeichnen elektrische Anschlusskontakte der Einzelphotonenquelle 100; besonders bevorzugt handelt es sich bei den Kontakten 190 und 195 um Intrakavitätskontakte. Intrakavitätskontakte sind solche, die zwischen
5 den beiden Spiegelpaketen 110 und 170 angeordnet sind.

Über, unter oder innerhalb der aktiven Schicht 150 kann außerdem eine Verspannungsanpassungsschicht vorhanden sein, mit der sich die Materialspannung im Bereich der Quantenpunkte im
10 Hinblick auf die gewünschte Feinstrukturaufspaltung sowie im Hinblick auf die Einstellung der Emissionswellenlänge regulieren lässt.

Darüber hinaus erkennt man in der Figur 4 eine nichtleitende
15 Schicht 200 mit einer Öffnung 210; die nichtleitende Schicht 200 bildet eine Stromapertur 220, durch die der Strom I der pin-Diodenstruktur 130 hindurchfließt.

Der Stromfluss I ist in der Figur 5 näher gezeigt. Man sieht
20 in der Figur 5 rechts unten den oberen Teil der Einzelphotonenquelle 100 gemäß der Figur 4; links oben ist in der Figur 5 der Stromfluss in dreidimensionaler Sicht visualisiert. Es lässt sich erkennen, dass die Stromapertur 220 eine Strompfadbegrenzungseinrichtung der Einzelphotonenquelle 100 bil-
25 det, die den Strom derart begrenzt, dass von den Quantenpunkten 160 nur eine Teilgruppe 160' angeregt wird; die übrigen Quantenpunkte 160'' werden nicht angeregt, weil kein ausreichender Strom in deren Bereich fließt.

Der Strompfad des Stromes I wird bei dem Ausführungsbeispiel
30 gemäß der Figur 5 außerdem noch durch ein geeignetes Dotierungsprofil in der n-dotierten Zwischenschicht 165 und der p-dotierten Kontaktschicht 140 begrenzt. Die Dotierung steigt in beiden Schichten jeweils zu den Kontakten hin an und fällt
35 dementsprechend in Richtung zur aktiven Schicht 150 und in Richtung zu den Quantenpunkten 160 ab; dies wird in der Figur 5 durch die Pfeile P1 und P2 angedeutet. Allgemein gilt: je

höher die Dotierungslevel desto kleiner ist die Strompfadauf-
weitung und desto inhomogener wird die Apertur durchströmt.
Ziel der Strompfadbegrenzung ist es dabei, aus dem Quanten-
punkt-Ensemble 160 möglichst wenige Quantenpunkte 160' elekt-
5 risch anzuregen und möglichst viele Quantenpunkte 160'' unan-
geregt zu lassen.

In der Figur 6 ist das Reflexionsspektrum des unteren Bragg-
Spiegelpakets 110 und des oberen Bragg-Spiegelpakets 170 dar-
10 gestellt. Jedes Spiegelpaket ist grundsätzlich für eine Wel-
lenlänge λ ausgelegt. Es besteht aus Schichtpaaren eines Ma-
terials mit hohem Brechungsindex und eines Materials mit
niedrigem Brechungsindex, deren optische Dicke jeweils $\lambda/4$
beträgt. Je höher der Brechungsindexkontrast ist (vgl. Kurve
15 250 für einen hohen Brechungsindexkontrast und Kurve 255 für
einen kleinen Brechungsindexkontrast), desto breiter ist das
Stoppband $\Delta\lambda$, desto kleiner ist die Eindringtiefe der Welle
in die Spiegel und desto weniger Spiegelpaare werden für eine
hohe Reflektivität benötigt.

20 Durch das untere Bragg-Spiegelpaket 110 und das obere Bragg-
Spiegelpaket 170 wird eine Mikrokavität 260 gebildet (vgl.
Fig. 4). Unter dem Begriff Mikrokavität sind Kavitäten mit
einer Größe im Mikrometerbereich zu verstehen. Die Figur 7
25 zeigt das Reflexionsspektrum der Kavität 260 im Detail. Je
höher die Güte der Kavität ist, desto kleiner ist die spekt-
rale Breite $\Delta\lambda_c$ sogenannter cavity-dips 265 der Kavität 260.
Als cavity dips werden die longitudinalen Moden der Kavität
bezeichnet. Über die spektrale Breite $\Delta\lambda_c$ der cavity dips 265
30 definiert sich die Güte der Kavität. Je höher die Güte desto
schmäler ist der cavity dip. Der freie Spektralbereich $\Delta\lambda_f$
zwischen den cavity dips ist von der Länge L der Kavität ab-
hängig. Umso größer diese ist, desto näher liegen die cavity
dips 265 zusammen. Die Moden der Kavität bilden eine stehende
35 räumliche Feldverteilung. Die Kavitätslänge L ist vorzugswei-
se so klein wie nur möglich, ideal wäre eine Länge $L = \lambda/2$,
wobei λ die Wellenlänge der emittierten Photonen bezeichnet.

Wie bereits eingangs erwähnt, verfügen Quantenpunkte über diskrete Energiezustände und damit über ein diskretes Lumineszenzspektrum. Die Zustände und damit die Lumineszenzeigenschaften eines Quantenpunktes hängen empfindlich von drei Parametern ab: Materialkomposition, Größe und Form der Quantenpunkte sowie der Temperatur. Da nach der Fertigstellung des Bauelementes die Temperatur der einzige noch variable Parameter ist, kommt ihm eine besondere Bedeutung zu. Daher soll an dieser Stelle noch näher auf ihn eingegangen werden. Wird die Temperatur erhöht, so kommt es zu einer Linienverbreiterung und Rotverschiebung der Lumineszenz. Dies zeigt die Figur 8.

Man erkennt in der Figur 8 die Lumineszenz zweier einzelner Quantenpunkte: Kurven 270 und 270' zeigen die Lumineszenz bei Raumtemperatur, Kurven 275 und 275' bei tiefen Temperaturen ($\sim 4\text{K}$). Bei einer Erhöhung der Temperatur kommt es zu einer Linienverbreiterung und einer Rotverschiebung; im Falle einer Reduktion der Temperatur kommt es zu einer Linienbreitenverkleinerung sowie zu einer Blauverschiebung der Lumineszenz. Der Abstand der Maxima bleibt dabei konstant.

Beim epitaktischen Wachstum von Quantenpunkten tritt eine Fluktuation bezüglich Größe und Komposition um einen Mittelwert auf. Diese wirkt sich unmittelbar auf die Lumineszenzeigenschaften aus. Es kommt zu einer Verteilung um eine mittlere Photonenenergie. Das bei tiefen Temperaturen diskrete Lumineszenzspektrum eines Ensembles von Quantenpunkten ähnlicher Größe und Materialkomposition verschmilzt bei Raumtemperatur zu einem breiten, rotverschobenen Emissionsspektrum. Dies zeigt die Figur 9 beispielhaft.

Man erkennt in der Figur 9 ein Lumineszenzspektrum eines Ensembles in Größe und Materialkomposition ähnlicher Quantenpunkte, einmal bei Raumtemperatur (Kurve 280) und bei tiefen Temperaturen (Kurve 285). Die Intensitätsverteilung des Emissionsspektrums spiegelt die Verteilungsfunktion der Quanten-

punkte wieder. Es ist leicht zu erkennen, dass die Anzahl der angeregten Quantenpunkte umso stärker abnimmt, je mehr sich Größe und Komposition der Quantenpunkte von deren Mittelwert entfernt. Eine resonante Anregung einzelner Quantenpunkte lässt sich also nur erreichen, wenn sich die Emissionspeaks der Quantenpunkte nicht überlappen. Dies lässt sich durch einen ausreichenden energetischen Abstand zwischen den Quantenpunkten erreichen, oder aber dadurch, dass die Betriebstemperatur abgesenkt wird, wodurch die Emissionslinien voneinander getrennt werden.

Die in der Figur 4 gezeigte Einzelphotonenquelle 100 kann gedanklich in zwei Grundelemente zerlegt werden: Das erste Grundelement wird durch die p-i-n-Diodenstruktur 130 gebildet, innerhalb derer sich die Monolage Quantenpunkte 160 befindet. Das zweite Grundelement wird durch einen einzelnen, mit der Mikrokavität 260 resonant gekoppelten Quantenpunkt gebildet. Um zu erreichen, dass von den angeregten Quantenpunkten 160' gemäß Figur nur ein einziger tatsächlich Photonen nach außen abgeben kann, wird die selektierende Wirkung des cavity-dip 265 genutzt. Die Einzelphotonenquelle 100 wird hierzu in einem Temperaturbereich betrieben, bei dem das Lumineszenzspektrum aus einzelnen, sich nicht überlappenden Emissionslinien besteht.

Durch die Strompfadbegrenzungseinrichtung ist die Zahl der angeregten Quantenpunkte 160' - bezogen auf die Gesamtzahl der Quantenpunkte 160 - bereits beträchtlich eingeschränkt worden. Die verbleibenden elektrisch angeregten Quantenpunkte 160' unterliegen - wie bereits oben angedeutet - einer gewissen Verteilung bezüglich ihrer energetischen Zustände. Über eine Änderung der Temperatur kann nun bei einer ausreichend kleinen cavity-dip-Breite $\Delta\lambda_c$ erreicht werden, dass nur ein einzelner Quantenpunkt resonant mit der Kavität 260 gekoppelt wird.

Die in Figur 10 a) dargestellte Situation entspricht vom Prinzip her den Verhältnissen in einer VCSEL-Struktur (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Der cavity-dip 265' liegt im Maximum der thermisch verbreiterten Lumineszenzverteilung 300 der Quantenpunkte. Dort überlappen sich die meisten Zustände der einzelnen Quantenpunkte, was zur Folge hat, dass viele Quantenpunkte gleichzeitig mit der Kavität resonant gekoppelt sind. Dies ist in einer Laserstruktur sehr willkommen, da somit die meisten Quantenpunkte zur induzierten Emission beitragen. Mit Absenken der Temperatur ändert sich die Situation grundlegend.

In der Figur 10 b) ist kein Quantenpunkt-Zustand in Resonanz mit der Mikrokavität. Der cavity dip 265' befindet sich am Rand der Lumineszenzverteilung des Quantenpunkt-Ensembles. Genauer gesagt - auf der langwelligeren Seite (d.h. in der Darstellung auf der niederfrequenten bzw. niederenergetischen Seite).

Der Ausschnittsvergrößerung in der Figur 10 c) lässt sich entnehmen, dass sich durch eine weitere Abkühlung eine der Lumineszenzlinien 305 in Resonanz mit der Kavität bringen lässt. Geschieht dies, so ist ausschließlich ein einziger Quantenpunkt in Resonanz mit der Kavität. Eine Reabsorption der Photonen dieses in Resonanz mit der Kavität befindlichen Quantenpunkts ist nicht möglich, da die Anregungsenergien für die anderen Quantenpunkte der umgebenden pin-Diodenstruktur 130 höher sind.

Die Struktur gemäß der Figur 4 ist somit in der Lage einen einzelnen, elektrisch angeregten Quantenpunkt 160' resonant mit der Mikrokavität 260 zu koppeln.

Um die Funktionsweise der Einzelphotonenquelle 100 zu verdeutlichen, sollen die Unterschiede zwischen vorbekannten VCSEL-Laserstrukturen und der in der Figur 4 gezeigten Einzelphotonenquelle 100 nochmals kurz zusammengefasst werden:

Trotz der großen Ähnlichkeiten zwischen einem VCSEL und der hier vorgeschlagenen Struktur bestehen eine Reihe von wesentlichen Unterschieden, die ihren Ursprung in der völlig entgegengesetzten Anwendung der beiden Bauelemente finden. Zum einen handelt es sich dabei um Designunterschiede, zum anderen werden die Eigenschaften der einzelnen Komponenten mit unterschiedlichem Ziel genutzt. Bei der Einzelphotonenquelle besteht die aktive Schicht nur aus einer Monolage mit Quantenpunkten. Ziel beim Wachstum dieser Monolage ist dabei, eine möglichst geringe Dichte und eine hohe Fluktuation bezüglich Größe und Materialkomposition der Quantenpunkte zu erreichen. Dies wird durch geeignete Führung des Kristallwachstums sichergestellt. Beides zielt darauf ab, den energetischen Abstand zwischen den einzelnen Lumineszenzlinien der Quantenpunkte zu maximieren, so dass eine Selektion einer einzelnen Linie und damit die resonante Kopplung eines einzelnen Quantenpunktes realisiert werden kann. Beim VCSEL-Laser hingegen soll genau das vermieden werden. Daher werden mehrere Quantenpunkt-Schichten mit maximaler Dichte in der Kavität platziert. Die Fluktuation der Quantenpunkte beim Wachstum soll dabei minimal sein, so dass durch die Verbreiterung der Lumineszenzlinien bei Raumtemperatur und der daraus folgenden Überlappung möglichst viele Quantenpunkte in Resonanz mit der Kavität gebracht werden können. Daher wird die VCSEL-Struktur auch so ausgelegt, dass sich der „cavity dip“ bei Betriebstemperatur im Maximum der Lumineszenzverteilung befindet.

Reabsorption durch nichtangeregte Quantenpunkte hingegen wirkt sich bei beiden Bauelementen negativ aus. Beim VCSEL besteht der Ansatz, diese zu vermeiden, darin, möglichst alle in der Kavität befindlichen Quantenpunkte elektrisch anzuregen. Dafür wird der Stromfluss durch die Apertur möglichst homogen gestaltet, so dass auch Quantenpunkte, die nicht in der Mitte der Apertur liegen, gepumpt werden. Wie bereits oben erwähnt ist letzteres bei der Einzelphotonenquelle gemäß der Figur 4 unerwünscht, da hier möglichst wenige, ide-

alerweise nur ein einziger Quantenpunkt, elektrisch angeregt werden sollen. Um nun Reabsorptionsverluste an nicht-angeregten Quantenpunkten zu verhindern, wird die Einzelphotonenquelle 100 vorzugsweise so konzipiert, dass sich der cavity dip 265 bei Betriebstemperatur auf der niederenergetischen Seite der Lumineszenzverteilung befindet. Ist die Kavität mit einem Quantenpunkt in Resonanz, dessen Rekombinationsenergie kleiner ist als die aller anderen Quantenpunkte, so können die von ihm emittierten Photonen nicht mehr innerhalb der Struktur reabsorbiert werden, weil deren Energie für eine Absorption durch die übrigen Quantenpunkte zu klein ist.

Auch in Bezug auf die Wahl der Kavitätslänge L bestehen Unterschiede zwischen einem VCSEL-Laser und der Einzelphotonenquelle 100 gemäß Figur 4. Beim VCSEL steht die optimale Platzierung möglichst vieler Schichten in den Maxima der räumlichen Feldverteilung innerhalb der Kavität im Vordergrund. In der Regel beträgt die VCSEL-Kavitätslänge das ein- bis fünf-fache der Emissionswellenlänge des Lasers. Eines der Primärziele beim Design der Einzelphotonenquelle 100 ist hingegen die optimale Ausnutzung des Purcelleffektes und der damit verbundenen Steigerung der spontanen Emissionsrate. Da das Modenvolumen hierbei eine wesentliche Rolle spielt, wird die Kavitätslänge so klein wie nur möglich gewählt, idealerweise beträgt die Kavitätslänge $\lambda/2$, was durch die Wahl eines kleinen mittleren Brechzahlindex (kleiner als die Brechzahl der angrenzenden oberen und unteren Spiegelschicht) möglich ist.

Die beschriebene Einzelphotonenquelle 100 erfüllt alle eingangs aufgeführten Forderungen an ein für die Quantenkryptographie nutzbares Bauelement. An erster Stelle sei dabei die Möglichkeit genannt, direkt elektrische Signale zu verarbeiten. Eine Systemintegration wird hierdurch wesentlich vereinfacht. Die resonante Kopplung der Quantenpunkt-Zustände mit den Moden einer Mikrokavität gewährleistet durch die Ausnutzung des Purcelleffektes eine ausreichende spontane Emissionsrate. Zusammen mit der ebenfalls durch die Kavität gegebene-

nen Emissionsvorzugsrichtung wird somit die Effizienz den Bedürfnissen eines realistischen Bauelementes angepasst. Auch die optischen Verluste, die bei der Einkopplung in Glasfasern auftreten, sind minimal. Die Ursache hierfür liegt in der zum VCSEL identischen Abstrahlcharakteristik, welche sich durch kleine Öffnungswinkel und runde Strahlprofile auszeichnet. Durch die Verwendung von Quantenpunkten ist das Bauelement prinzipiell in der Lage, die für die Telekommunikation interessanten Wellenlängen von 1,3 μm bzw. 1,55 μm zu verwenden. Durch die strukturelle Ähnlichkeit zum VCSEL bietet die vorgestellte Einzelphotonenquelle 100 darüber hinaus den Vorteil, dass sich deren Herstellung mit bereits etablierten Methoden und Verfahren realisieren lässt.

Wenn die Einzelphotonenquelle 100 gemäß der Figur 4 verschränkte Photonenpaare erzeugen soll, werden die Quantenpunkte 160 im Falle von In(Ga)As vorzugsweise mit 800 bis 5000 Atomen des Quantenpunktmaterials gebildet. Bei einer solchen Größe der Quantenpunkte ist die Feinstrukturaufspaltung in der Regel ausreichend klein, um verschränkte Photonenpaare erzeugen zu können; vorzugsweise liegt die Feinstrukturaufspaltung innerhalb eines Intervalls zwischen -100 μeV und +100 μeV , noch besser zwischen -50 μeV und +50 μeV . Die Grundzustandsenergie der Quantenpunkte liegt beispielsweise zwischen 1,27 eV und 1,33 eV.

Wenn die Einzelphotonenquelle 100 gemäß der Figur 4 hingegen einzelne Photonen mit definierter Polarisierung erzeugen soll, werden die Quantenpunkte 160 vorzugsweise mit 40000 bis 125000 Atomen des Quantenpunktmaterials gebildet. Bei einer solchen Größe der Quantenpunkte 160 wird die Feinstrukturaufspaltung in der Regel ausreichend groß, um die unerwünscht miterzeugten Photonen „wegfiltern“ zu können; bevorzugt wird eine Feinstrukturaufspaltung von mindestens +400 μeV , besonders bevorzugt von mindestens +500 μeV oder mehr, eingestellt. Die Grundzustandsenergie der Quantenpunkte ist beispielsweise kleiner als 1,1 eV.

In der Figur 11 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel für eine Einzelphotonenquelle 100 gezeigt. Man erkennt ein Substrat 500 mit einem unteren Bragg-Spiegelpaket bzw. DBR-Spiegelpaket (DBR: Distributed Bragg Reflector) 505, einer darüber befindlichen LED-Struktur 510 und einer über der LED-Struktur 510 befindlichen Mikrokavität 515. Im Unterschied zu der Einzelphotonenquelle 100 gemäß Figur 4 sind in der Kavität 515 gemäß Figur 11 nur sehr wenige Quantenpunkte enthalten. Nachfolgend wird beispielhaft davon ausgegangen, dass in der Kavität nur ein einziger Quantenpunkt 520 enthalten ist, der durch die elektrisch über Kontakte 525 und 530 ansteuerbare LED-Struktur 510 optisch angeregt wird. Durch das sich unterhalb der LED-Struktur 510 befindliche Bragg-Spiegelpaket 505 wird die Auskoppelleffizienz der als „Pump-LED“ arbeitenden LED-Struktur 510 erhöht.

Durch die Kavität 515 wird der Purcell-Effekt ausgenutzt, welcher den Einfluss der resonanten Kopplung der energetischen Zustände des Quantenpunkts 520 mit den Moden der Kavität 515 auf die spontane Emissionsrate beschreibt. Der Parameter, der diesen Effekt quantifiziert, ist der Purcellfaktor F_p . Dieser ist abhängig von der Güte und dem Modenvolumen der Kavität und beschreibt das Verhältnis der Lebensdauern eines quantenmechanischen Zustandes außer und innerhalb einer Kavität gemäß:

$$F_p = \tau_{\text{free}} / \tau_{\text{cav}}.$$

Der Zusammenhang zwischen Purcellfaktor und den Kavitätsparametern ist gegeben durch

$$F_p = 3Q(\lambda_c/n)^3 / 4\pi V$$

mit λ_c : Wellenlänge, n: Brechzahl, V: Modenvolumen.

Dabei sind die für das Design der Kavität 515 wichtigen Parameter das Modenvolumen V und der Gütefaktor Q der Kavität 515. Die Herausforderung bei der Gestaltung der Kavität 515 besteht vor allem in der Realisierung eines hinreichend kleinen Modenvolumens V . Um einen deutlichen Einfluss auf die spontane Emissionsrate durch den Purcell-Effekt zu erzielen, sind kleine Kavitätsdurchmesser d von $0,5\mu\text{m}$ bis max. $3\mu\text{m}$ erstrebenswert. Wie man sofort sieht, lässt sich der Purcellfaktor leicht durch eine Verringerung des Kavitätsdurchmessers erhöhen, da $F_p \sim 1/V$ gilt.

Der Gütefaktor Q ist abhängig von den inneren und äußeren optischen Verlusten der Kavität 515. Innere Verluste entstehen durch Lichtabsorption, äußere Verluste durch teilweise gewolltes Auskoppeln durch die Resonatorspiegel aufgrund deren endlicher Reflektivität sowie verschiedener Streumechanismen. Mit abnehmendem Säulendurchmesser d der Kavität 515 steigen die äußeren optischen Verluste der Kavität an. Ursache hierfür sind eine Abnahme der Spiegelreflektivitäten aufgrund zunehmend gekrümmter Wellenfronten, eine abnehmende horizontalen Wellenführung, und die zunehmende Lichtstreuung, verursacht durch Rauigkeiten am Säulenmantel 540 der Kavität. Da die Güte der Kavität direkt in den Purcellfaktor eingeht, ist leicht ersichtlich, dass eine Erhöhung des Purcellfaktors nur durch die Verringerung des Kavitätsdurchmessers d limitiert ist. Die Forderung nach kleinen Säulendurchmessern d zieht jedoch das Problem nach sich, dass die optischen Verluste mit abnehmendem Durchmesser stark zunehmen, so dass es zu einer dramatischen Verschlechterung des Gütefaktors Q der Kavität kommt.

Um den bei einer Reduzierung des Säulendurchmessers d steigenden optischen Verlusten der Kavität entgegenzuwirken, ist der Säulenmantel 540 der in der Figur 11 gezeigten Einzelphotonenquelle 100 mit einer hochreflektierenden Beschichtung 550 versehen. Die hochreflektierende Beschichtung 550 kann beispielsweise durch eine Goldschicht gebildet sein. Mit die-

ser Konfiguration lassen sich Purcell-Faktoren erreichen, die deutlich höher sind als bei Einzelphotonenquellen 100 mit unbeschichteten bzw. anders beschichteten Kavitäten.

5 Über AlO_x -Aperturen, die in der Figur 11 mit den Bezugszeichen 560 gekennzeichnet sind, lässt sich darüber hinaus die Feldverteilung innerhalb der Kavität 515 noch weiter im Hinblick auf minimale Verluste und minimales Modenvolumen optimieren, indem die optische Feldverteilung möglichst weit vom
10 Säulenrand 540 der Kavität ferngehalten wird. Zusätzlich wird durch die AlO_x -Schichten der effektive Brechungsindex innerhalb der Kavität verringert und ist kleiner als der Brechungsindex der oben und unten angrenzenden Spiegelschichten, bestehend z.B. aus GaAs. Damit wird erst eine minimale Kavi-
15 tätslänge von $\lambda/2$ ermöglicht.

Das Emissionsspektrum der für die optische Anregung verwendeten LED 510 ist vorzugsweise so gewählt, dass die Anregung energetisch oberhalb der Zustände des Quantenpunktes 520
20 liegt; die Kavität 515 ist in diesem Wellenlängenbereich bevorzugt transparent.

Die Kurve 600 der Figur 12 zeigt das Lumineszenzspektrum des Quantenpunktes 520 bei tiefen Temperaturen; die Kurve 610
25 zeigt die Elektrolumineszenz der Anregungs-LED. Die Bezugszeichen 265, 265' und 265'' bezeichnen die longitudinalen Moden der Kavität 515.

Die in der Figur 11 gezeigte Einzelphotonenquelle 100 erfüllt
30 ebenfalls alle eingangs gestellten Forderungen an ein für die Quantenkryptographie nutzbares Bauelement. Zunächst einmal ist die Einzelphotonenquelle 100 in der Lage, elektrische Signale direkt zu verarbeiten. Durch die Ausnutzung des Purcell-Effektes ist die spontane Emissionsrate ausreichend hoch
35 und kann wegen der effektiven Unterdrückung optischer Verluste durch die Verspiegelung des Kavitätsmantels 540 weiter gesteigert werden. Die Kavität 515 wirkt sich auch positiv auf

die Abstrahlcharakteristik aus. So ergibt sich ein rundes Strahlprofil, so dass eventuelle optische Verluste bei der Einkoppelung in Fasern reduziert werden. Auch wenn sich in der Kavität 515 mehrere Quantenpunkte befinden werden, die optisch zur Emission von Photonen angeregt werden, wird durch die Filtercharakteristik der Kavität sicher gestellt, das nur Photonen innerhalb eines sehr schmalen Frequenzbandes, also Photonen eines einzelnen Quantenpunktes, aus der Kavität ausgekoppelt werden. Es sind hier Quantenpunkte mit Emissionswellenlängen von 1.3 μm bzw. 1.55 μm realisierbar. Damit können mit dieser Einzelphotonenquelle 100 bereits verlegte Glasfasernetzwerke genutzt werden. Die Herstellung der Einzelphotonenquellen 100 kann durch bereits etablierte Verfahren realisiert werden. Auch kann für die Systemintegration auf ausgereifte Technologien zurückgegriffen werden.

Wenn die Einzelphotonenquelle 100 gemäß der Figur 11 verschränkte Photonenpaare erzeugen soll, wird der Quantenpunkt 520 vorzugsweise mit 800 bis 5000 Atomen des Quantenpunktmaterials gebildet. Durch die Wahl der Größe des Quantenpunktes 520 wird bevorzugt eine Feinstrukturaufspaltung zwischen -100 μeV und +100 μeV oder besser zwischen nur -50 μeV und +50 μeV - ideal wäre exakt Null - eingestellt. Die Grundzustandsenergie des Quantenpunktes 520 liegt beispielsweise zwischen 1,27 eV und 1,33 eV. Die Höhe h des Quantenpunkts liegt in diesem Falle vorzugsweise zwischen 0,3 nm und 0,9 nm.

Wenn die Einzelphotonenquelle 100 gemäß der Figur 11 hingegen einzelne Photonen mit definierter Polarisierung erzeugen soll, wird der Quantenpunkt 520 vorzugsweise mit 40000 bis 125000 Atomen des Quantenpunktmaterials gebildet. Bei einer solchen Größe des Quantenpunkts 520 wird die Feinstrukturaufspaltung in der Regel ausreichend groß, um die unerwünscht miterzeugten Photonen „wegfiltern“ zu können; bevorzugt wird eine Feinstrukturaufspaltung von mindestens +400 μeV , besonders bevorzugt von mindestens +500 μeV oder mehr, eingestellt. Die Grundzustandsenergie des Quantenpunkts 520 ist beispielsweise

kleiner als 1,1 eV. Die Höhe h des Quantenpunkts ist in diesem Falle vorzugsweise größer als 2 nm.

Bezugszeichen

	10	kleiner Quantenpunkt
	15	großer Quantenpunkt
5	100	Einzelphotonenquelle
	105	Substrat
	110	unteres Bragg-Spiegelpaket
	115	Spiegelschichtpaaren
	120	untere elektrische Kontaktschicht
10	130	pin-Diodenstruktur
	140	obere elektrische Kontaktschicht
	150	aktive Schicht
	160	Quantenpunkte
	160'	angeregte Quantenpunkte
15	160''	nicht angeregte Quantenpunkte
	165	Zwischenschicht
	170	oberes Bragg-Spiegelpaket
	180	Photonen
	190,195	elektrische Anschlusskontakte
20	200	nichtleitende Schicht
	210	Öffnung
	220	Stromapertur
	250	Kurve für hohen Brechungsindexkontrast
	255	Kurve für kleinen Brechungsindexkontrast
25	260	Mikrokavität
	265,265',265''	cavity-dips
	270, 270'	Kurven
	280, 285	Kurven
	500	Substrat
30	505	unteres Bragg-Spiegelpaket
	510	LED-Struktur
	515	Mikrokavität
	520	einzigiger Quantenpunkt
	525, 530	Kontakte
35	540	Säulenrand
	550	hochreflektierende Beschichtung
	600, 610	Kurven

	x	Exziton
	XX	Biexziton
	FSS	Feinstrukturaufspaltung
5	π^+ , π^-	senkrecht aufeinander stehende Polarisationsrichtungen
	P1, P2	Dotierungsprofile
	$\Delta\lambda_c$	spektrale Breite eines cavity-dips
	$\Delta\lambda_f$	freier Spektralbereich zwischen cavity dips
10	L	Länge der Kavität

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen einer Einzelphotonenquelle (100) mit einem vorgegebenen Betriebsverhalten, wobei bei dem Verfahren

– das vorgegebene Betriebsverhalten der Einzelphotonenquelle (100) durch ein gezieltes Einstellen der Feinstrukturaufspaltung (FSS) des exzitonischen Energieniveaus mindestens eines Quantenpunkts (160', 520) festgelegt wird,

– indem der mindestens eine Quantenpunkt mit einer der einzustellenden Feinstrukturaufspaltung entsprechenden Quantenpunktgröße hergestellt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung einer verschränkte Photonenpaare erzeugenden Einzelphotonenquelle (100) der mindestens eine Quantenpunkt (160', 520) mit 800 bis 5000 Atomen des Quantenpunktmaterials gebildet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung einer verschränkte Photonenpaare erzeugenden Einzelphotonenquelle durch die Wahl der Quantenpunktgröße eine Feinstrukturaufspaltung (FSS) zwischen $-100 \mu\text{eV}$ und $+100 \mu\text{eV}$ eingestellt wird.

4. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung einer verschränkte Photonenpaare erzeugenden Einzelphotonenquelle (100) die Grundzustandsenergie des mindestens einen Quantenpunkts zwischen $1,27 \text{ eV}$ und $1,33 \text{ eV}$ eingestellt wird.

5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung einer einzelnen Photonen mit definierter Polarisierung erzeugenden Einzelphotonenquelle (100) der mindestens eine Quantenpunkt (160', 520) mit 40000 bis 125000 Atomen des Quantenpunktmaterials gebildet wird.

6. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung einer einzelnen Photonen mit definierter Polarisierung erzeugenden Einzelphotonenquelle (100) durch die Wahl der Quantenpunktgröße eine Feinstrukturaufspaltung (FSS) von mindestens +300 μeV eingestellt wird.

7. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung einer einzelnen Photonen mit definierter Polarisierung erzeugenden Einzelphotonenquelle (100) die Grundzustandsenergie des mindestens einen Quantenpunkts (160', 520) kleiner als 1,1 eV eingestellt wird.

8. Verfahren zur Herstellung einer Einzelphotonenquelle (100), insbesondere nach einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,

- dass eine Kavität (260) mit einer oder mehreren longitudinalen Resonanzfrequenzen (265, 265', 265'') hergestellt wird, wobei innerhalb der Kavität mehrere Quantenpunkte (160) angeordnet werden, die während des Betriebs der Einzelphotonenquelle Photonen (180) mit jeweils einer eigenen Emissionsfrequenz generieren,
- dass eine Ladungsträgerinjektionseinrichtung (130) derart hergestellt und angeordnet wird, dass diese während des Betriebs der Einzelphotonenquelle Ladungsträger in den Bereich der Kavität injiziert und die Quantenpunkte (160') zum Generieren der Photonen anregt, und
- dass die Flächendichte der Quantenpunkte (160') so gering und die Streuung bezüglich Größe und Materialzusammensetzung der Quantenpunkte (160') so groß gewählt wird, dass während des Betriebs der Einzelphotonenquelle ausschließlich die Emissionsfrequenz eines einzigen Quantenpunkts einer der longitudinalen Resonanzfrequenzen der Kavität entspricht und aus der Kavität ausgekoppelt werden kann.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Kavität (260) derart dimensioniert wird, dass die zur Auskopplung der Photonen (180) verwendete longitudinale Ei-

genfrequenz (265) der Kavität der Emissionsfrequenz desjenigen Quantenpunkts entspricht, der von allen angeregten Quantenpunkten die kleinste Emissionsfrequenz aufweist.

- 5 10. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Flächendichte der Quantenpunkte (160) kleiner als 5×10^9 pro Quadratzentimeter gewählt wird.
- 10 11. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche 8 - 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Streuung bezüglich Größe und Materialzusammensetzung der Quantenpunkte (160) so groß gewählt wird, dass die Emissionslinien der Quantenpunkte bei der Betriebstemperatur der Einzelphotonenquelle überlappungs-
- 15 frei sind.
12. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche 8 - 11, dadurch gekennzeichnet, dass eine Strompfadbegrenzungseinrichtung (220) hergestellt wird, die den Fluss der injizierten Ladungsträger im Bereich der Kavität (260) derart bündelt, dass nur eine Teilgruppe (160') der vorhandenen Quantenpunkte innerhalb der Kavität angeregt wird.
- 20 13. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche 8 - 12, dadurch gekennzeichnet, dass eine Temperatureinstelleinrichtung hergestellt wird, mit der sich die Temperatur der Einzelphotonenquelle für deren Betrieb auf einen Temperaturwert absenken lässt, bei dem alle Emissionsspektren (275, 275'), oder zumindest eines davon, der innerhalb der Kavität befind-
- 30 lichen Quantenpunkte überschneidungsfrei sind.
14. Verfahren zur Herstellung einer Einzelphotonenquelle (100), insbesondere nach einem der voranstehenden Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet,
- 35 - dass eine Kavität (515) mit einer oder mehreren longitudinalen Resonanzfrequenzen (265) hergestellt wird, wobei min-

destens eine Quantenpunktschicht innerhalb der Kavität angeordnet wird,

- dass eine Anrecheinrichtung (510) derart hergestellt und angeordnet wird, dass diese während des Betriebs der Einzelphotonenquelle zumindest einen Quantenpunkt (520) zum Generieren von Photonen (180) anregt, und
- dass an den längs zur Emissionsrichtung der Photonen verlaufenden Seitenwänden (540) der Kavität eine hochreflektierende Schicht (550) aufgebracht wird.

10

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass als hochreflektierende Schicht (550) eine Metallschicht, insbesondere eine Goldschicht, aufgebracht wird.

15 16. Einzelphotonenquelle (100) zum Emittieren einzelner linear polarisierter Photonen (180) oder verschränkter Photonenpaare (180), insbesondere zum Einsatz in der Quantenkryptografie, mit

- einem oder mehreren Quantenpunkten (160), die während des Betriebs der Einzelphotonenquelle Photonen mit jeweils einer Emissionsfrequenz generieren,
- einer Kavität (260), innerhalb derer die Quantenpunkte angeordnet sind, wobei die Kavität eine oder mehrere longitudinale Resonanzfrequenzen (265, 265', 265'') aufweist, und
- 25 - einer Ladungsträgerinjektionseinrichtung (130), die während des Betriebs der Einzelphotonenquelle in den Bereich der Kavität Ladungsträger injiziert und die Quantenpunkte zum Generieren der Photonen anregt,
- wobei während des Betriebs der Einzelphotonenquelle ausschließlich Photonen eines einzigen Quantenpunkts (160') ausgekoppelt werden, nämlich die Photonen desjenigen Quantenpunkts, dessen Emissionsfrequenz einer der longitudinalen Resonanzfrequenzen (265) der Kavität entspricht.

30

35 17. Einzelphotonenquelle nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Kavität (260) derart dimensioniert ist, dass die zur Auskopplung der Photonen (180) verwendete longi-

tudinale Eigenfrequenz (265) der Kavität der Emissionsfrequenz desjenigen Quantenpunkts entspricht, der von allen angeregten Quantenpunkten die kleinste Emissionsfrequenz aufweist.

5

18. Einzelphotonenquelle nach einem der voranstehenden Ansprüche 16 - 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Einzelphotonenquelle eine Strompfadbegrenzungseinrichtung (220) aufweist, die den Fluss der injizierten Ladungsträger im Bereich der Kavität bündelt.

10

19. Einzelphotonenquelle nach einem der voranstehenden Ansprüche 16 - 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Einzelphotonenquelle eine Mehrzahl an Quantenpunkten (160) aufweist, die in einer vorgegebenen Flächendichte angeordnet sind und eine vorgegebene Streuung ihrer Eigenschaften aufweisen, wobei durch die Strompfadbegrenzungseinrichtung (220) ausschließlich eine Teilgruppe der Quantenpunkte (160') angeregt wird.

20

20. Einzelphotonenquelle nach einem der voranstehenden Ansprüche 16 - 19, dadurch gekennzeichnet, dass die angeregte Teilgruppe (160') der Quantenpunkte so klein und die vorgegebene Streuung der Eigenschaften der Quantenpunkte so groß ist, dass bei der Betriebstemperatur der Einzelphotonenquelle zumindest ein Emissionsspektrum oder alle Emissionsspektren der Quantenpunkte der Teilgruppe überschneidungsfrei sind.

25

21. Einzelphotonenquelle nach einem der voranstehenden Ansprüche 16 - 20, dadurch gekennzeichnet, dass die Flächendichte der Quantenpunkte (160) kleiner 5×10^9 pro Quadratzen-
timeter ist.

30

22. Einzelphotonenquelle nach einem der voranstehenden Ansprüche 16 - 21, dadurch gekennzeichnet, dass die Einzelphotonenquelle eine Temperatureinstelleinrichtung aufweist, die die Temperatur der Einzelphotonenquelle für den Betrieb der

35

Einzelphotonenquelle auf einen vorgegebenen Betriebstemperaturwert absenkt, bei dem zumindest ein Emissionsspektrum, vorzugsweise alle Emissionsspektren, der innerhalb der Kavität befindlichen Quantenpunkte überschneidungsfrei sind.

5

23. Einzelphotonenquelle zum Emittieren einzelner linear polarisierter Photonen oder verschränkter Photonenpaare, insbesondere zum Einsatz in der Quantenkryptografie, mit

- 10 - mindestens einem Quantenpunkt (520), der während des Betriebs der Einzelphotonenquelle Photonen (180) mit einer Emissionsfrequenz generiert,
- einer Kavität (260), innerhalb derer der mindestens eine Quantenpunkt angeordnet ist, mit einer Filtercharakteristik derart, dass nur eine resonante Koppelung zwischen einem
- 15 einzigen der Quantenpunkte und der Kavität erfolgt,
- einer Anrecheinrichtung (510), die während des Betriebs der Einzelphotonenquelle den mindestens einen Quantenpunkt (520) zum Generieren der Photonen anregt,
- wobei an den längs zur Emissionsrichtung der Photonen ver-
- 20 laufenden Seitenwänden (540) der Kavität eine hochreflektierende Schicht (550) aufgebracht ist.

24. Einzelphotonenquelle nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die hochreflektierende Schicht (550) eine Metallschicht, insbesondere eine Goldschicht, ist.

25

25. Verfahren zum Ansteuern einer Einzelphotonenquelle (100), insbesondere einer Einzelphotonenquelle gemäß einem der voranstehenden Ansprüche 16 - 22, dadurch gekennzeichnet, dass

30 die Temperatur der Einzelphotonenquelle (100) derart eingestellt wird, dass die Emissionsfrequenz desjenigen Quantenpunkts, der von allen angeregten Quantenpunkten (160') die kleinste Emissionsfrequenz aufweist, mit einer longitudinalen Eigenfrequenz (265) der Kavität der Einzelphotonenquelle

35 (100) übereinstimmt.

26. Verfahren zum Ansteuern der Einzelphotonenquelle (100), insbesondere einer Einzelphotonenquelle gemäß einem der voranstehenden Ansprüche 23 - 24, dadurch gekennzeichnet, dass das Emissionsspektrum der für die optische Anregung verwendeten Anrecheinrichtung (510) so eingestellt wird, dass das Emissionsspektrum energetisch oberhalb der Zustände des Quantenpunktes (520) liegt und außerdem in einem Bereich liegt, in dem die Kavität (515) transparent ist.

27. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung einer verschränkte Photonenpaare erzeugenden Einzelphotonenquelle (100) die Höhe (h) des mindestens einen Quantenpunkts auf einen Wert zwischen 0,3 nm und 0,9 nm eingestellt wird.

28. Verfahren nach einem der vorgehenden Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung einer einzelnen Photonen mit definierter Polarisierung erzeugenden Einzelphotonenquelle (100) die Höhe (h) des mindestens einen Quantenpunkts auf einen Wert größer als 2 nm eingestellt wird.

29. Verfahren zum Herstellen einer Einzelphotonenquelle (100) mit einem vorgegebenen Betriebsverhalten, wobei bei dem Verfahren das vorgegebene Betriebsverhalten der Einzelphotonenquelle (100) durch gezieltes Einstellen der Verspannung mindestens eines Quantenpunktes (160', 520) festgelegt wird, indem der mindestens eine Quantenpunkt mit einer der einzustellenden Verspannung entsprechenden Quantenpunktgröße hergestellt wird.

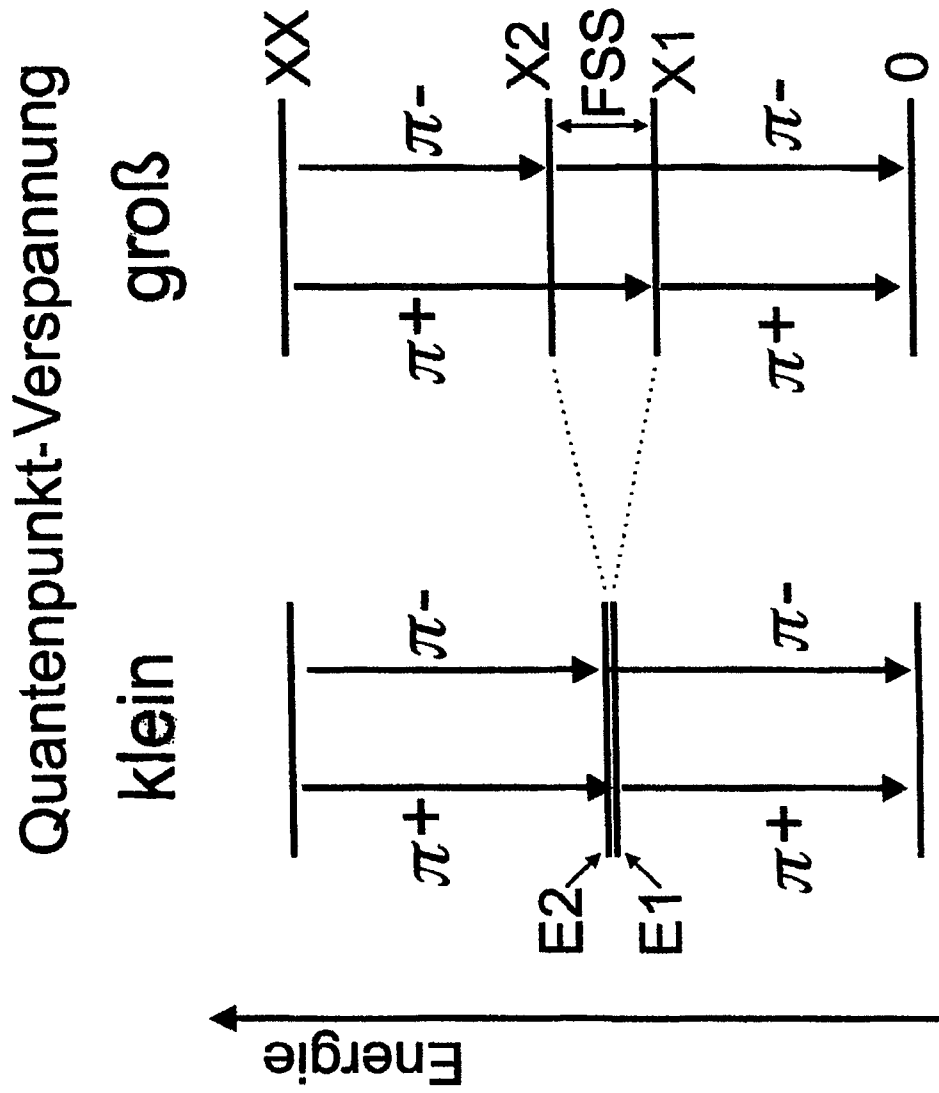


Fig. 1

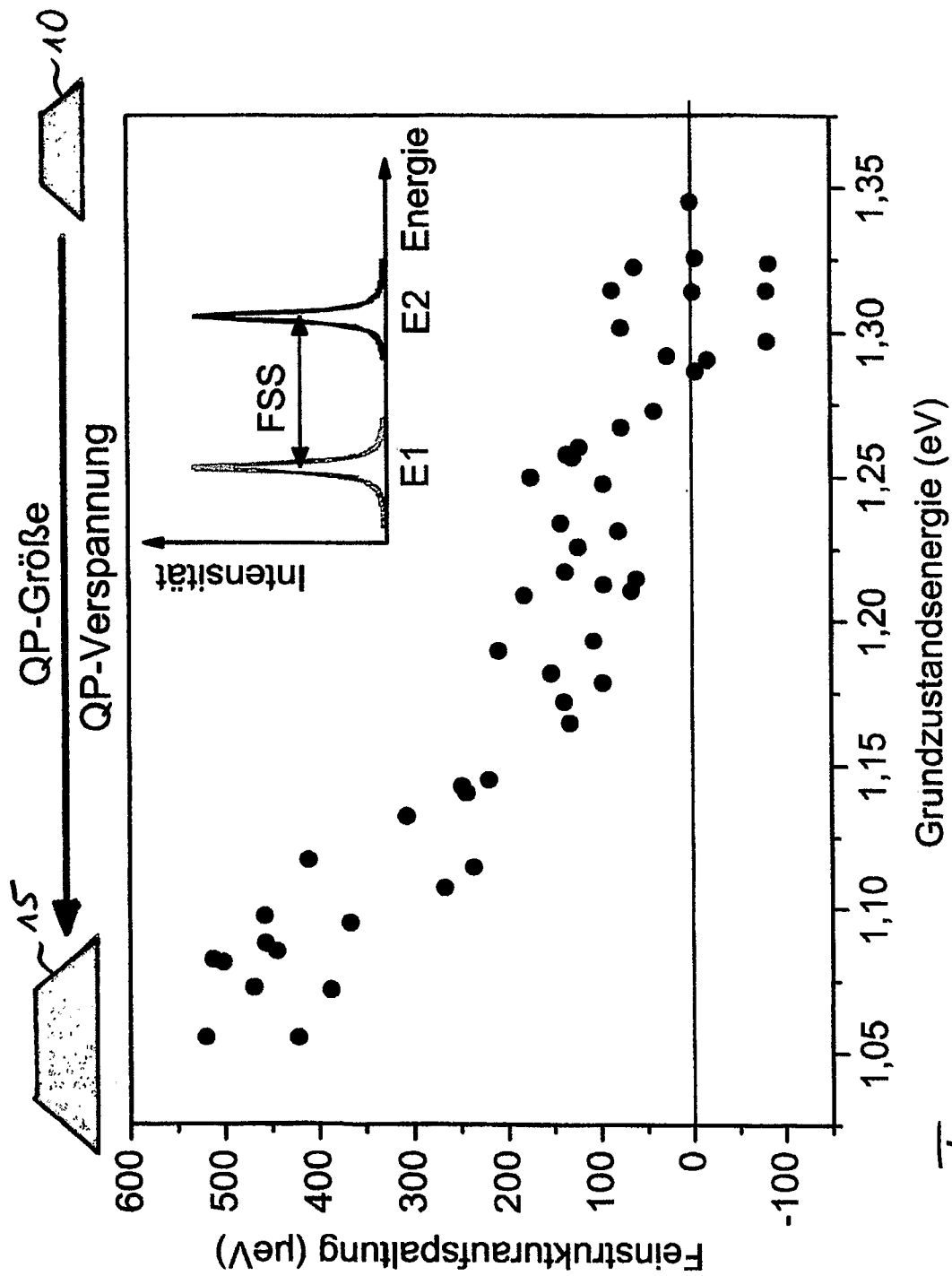


Fig. 2

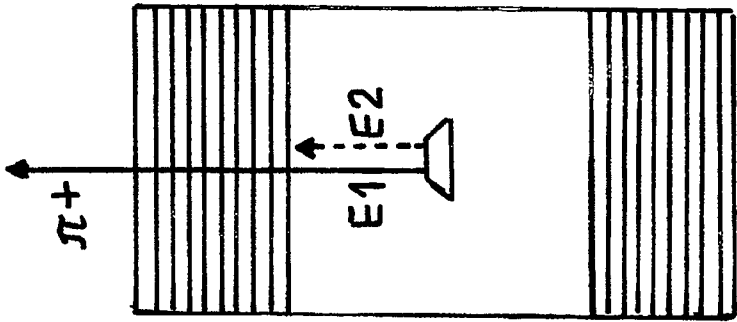


Fig. 3A

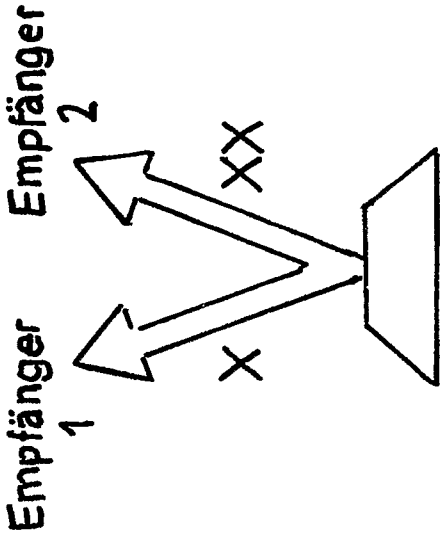


Fig. 3B

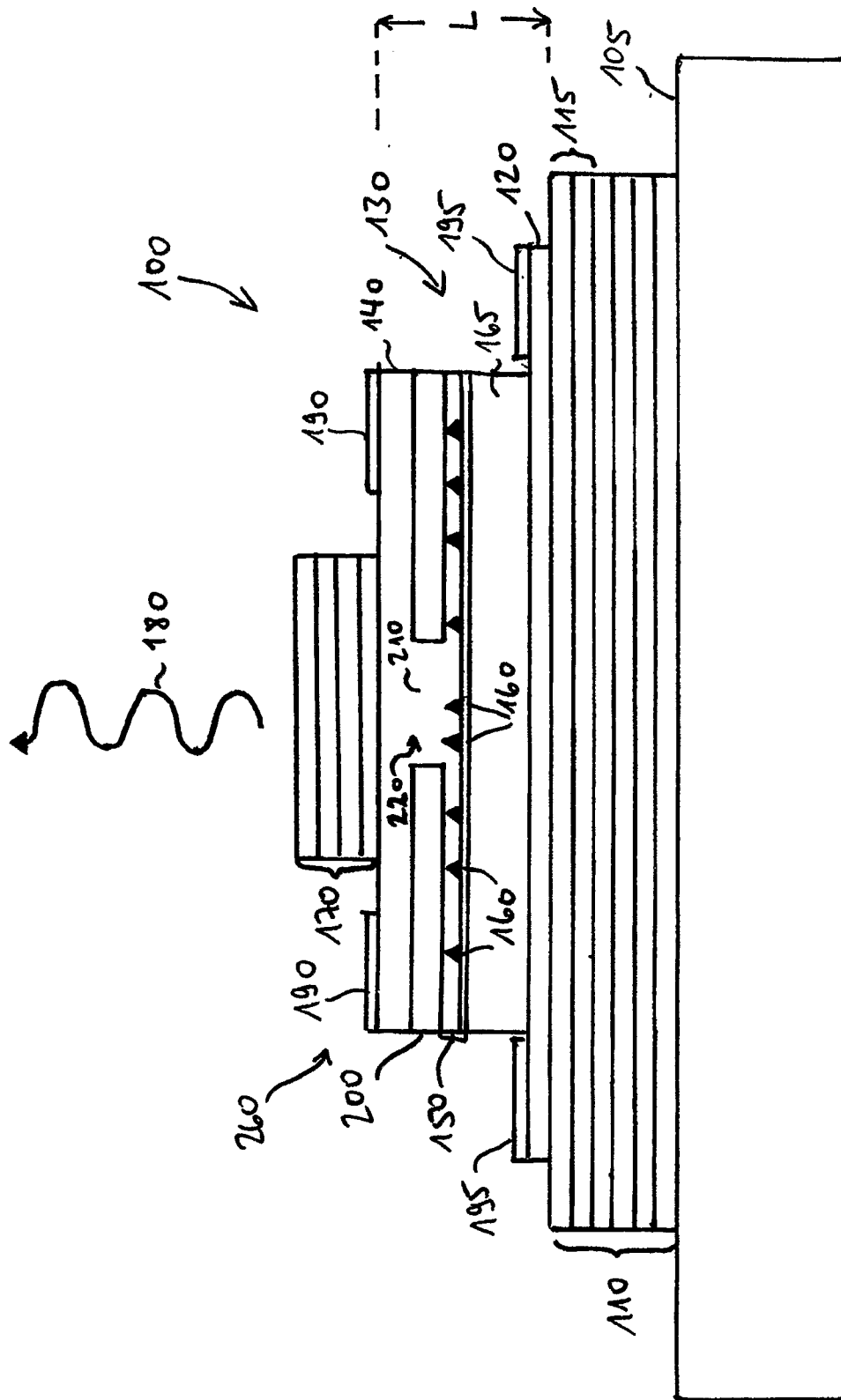


Fig. 4

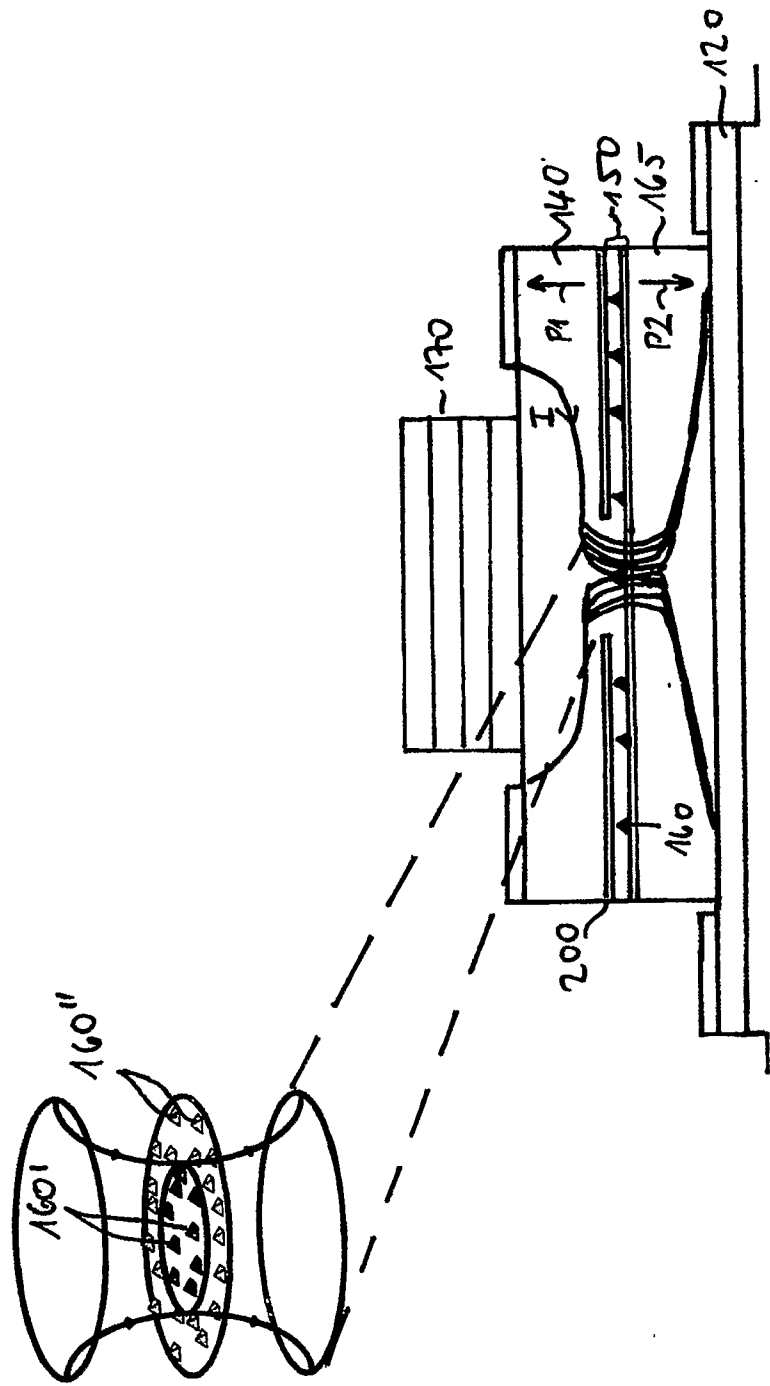


Fig. 5

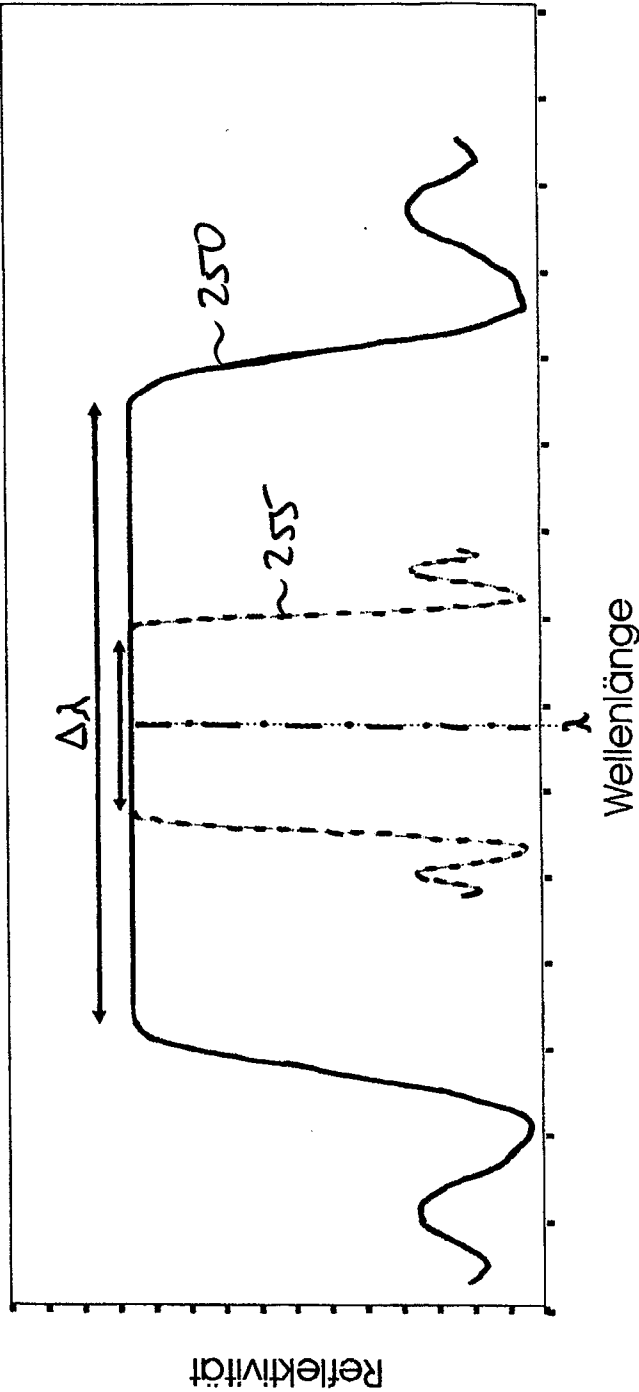


Fig. 6

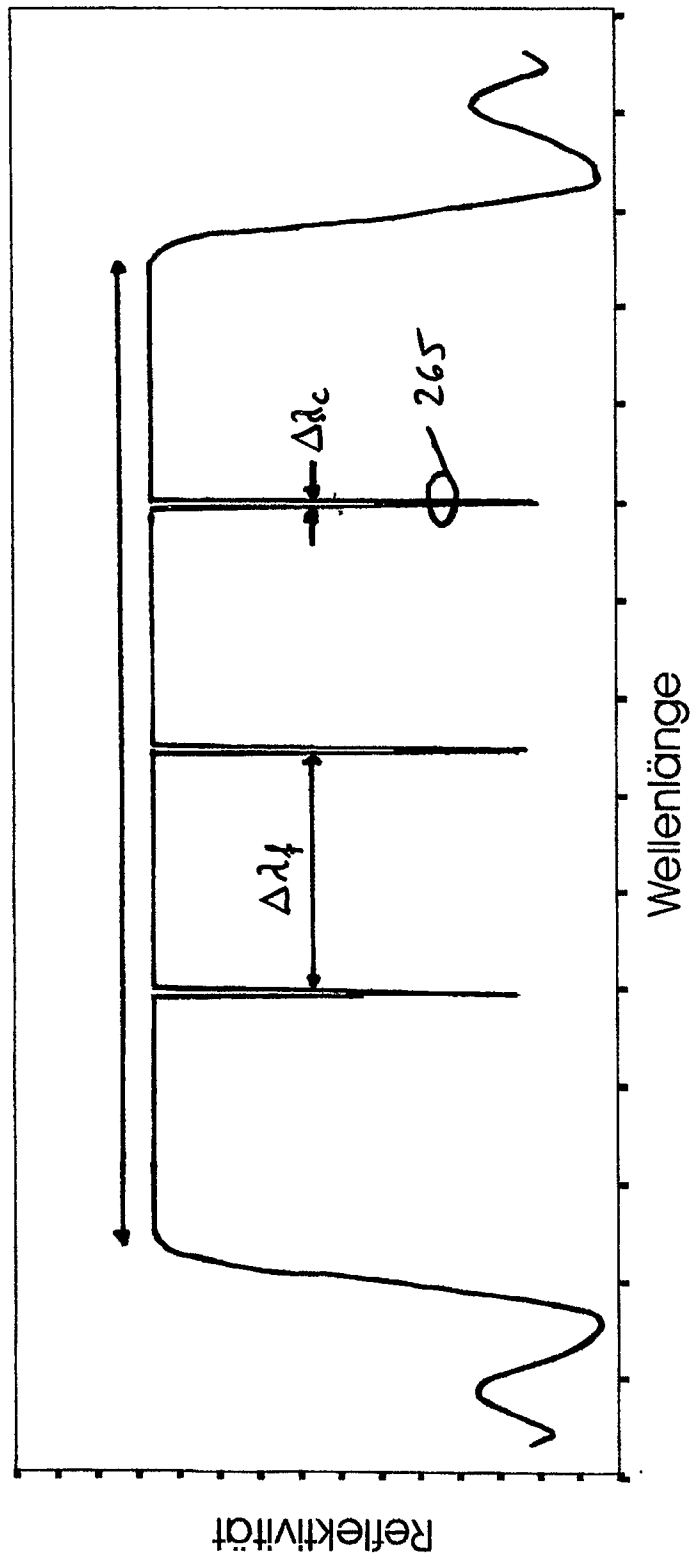


Fig. 7

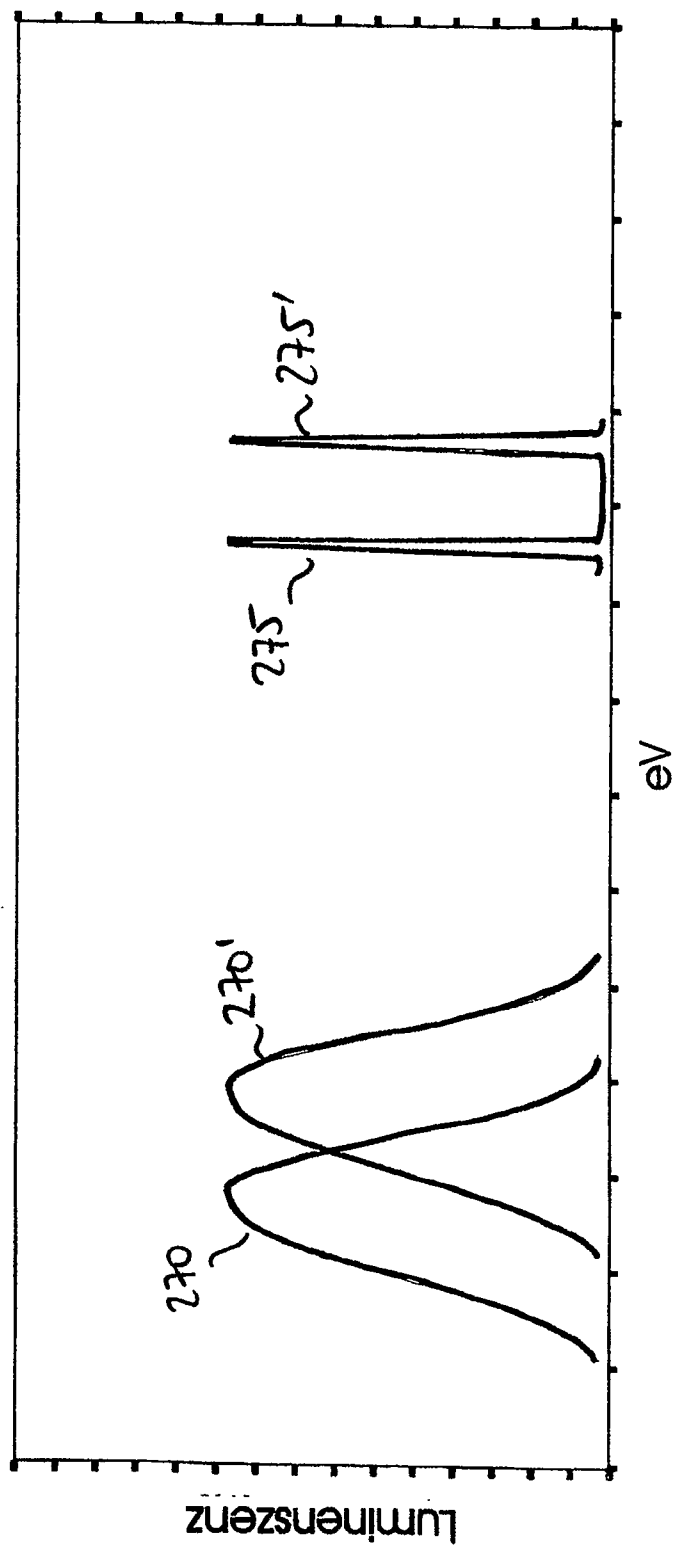


Fig. 8

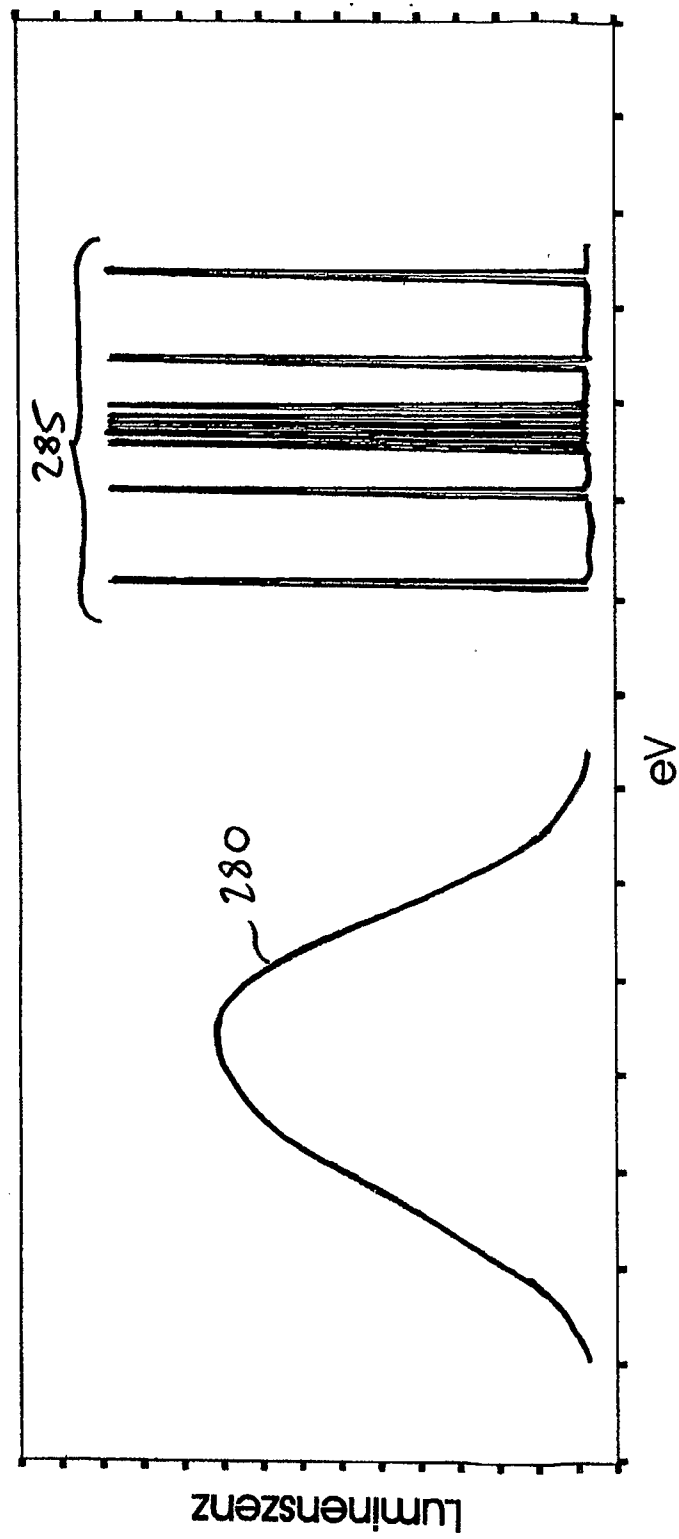


Fig. 9

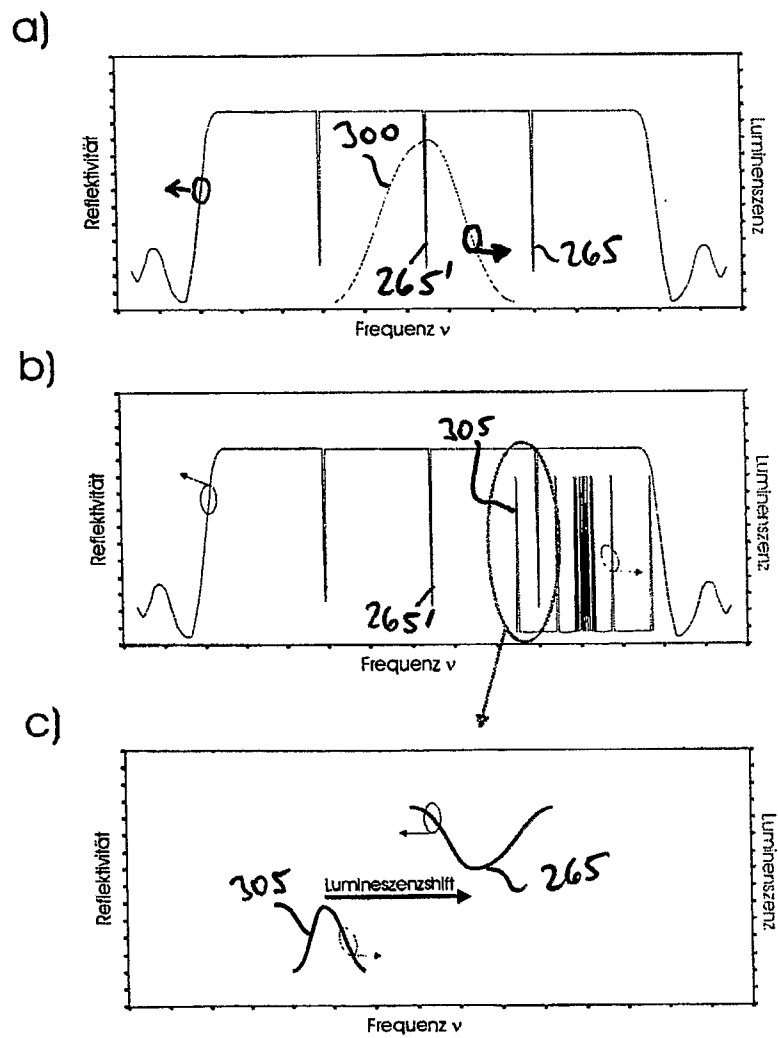


Fig. 10

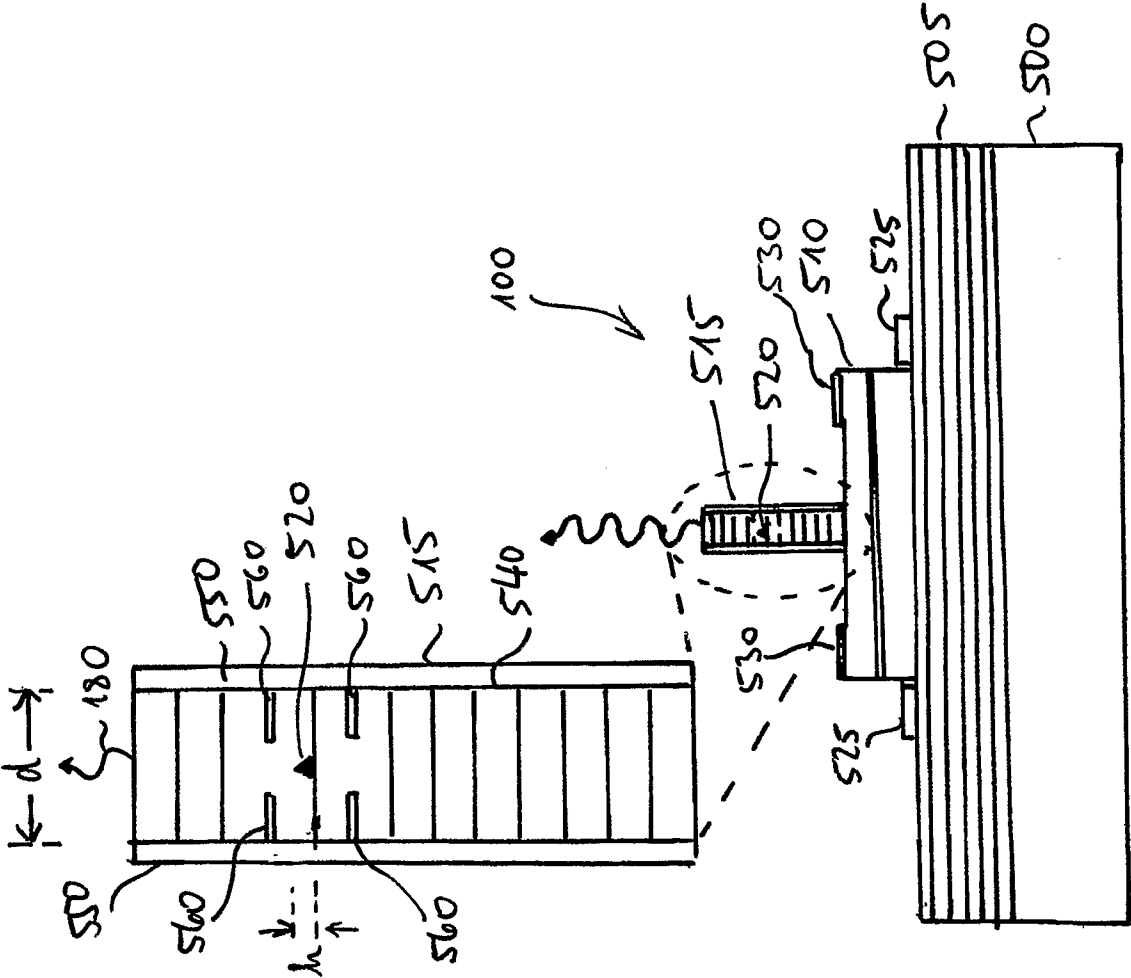


Fig. 11

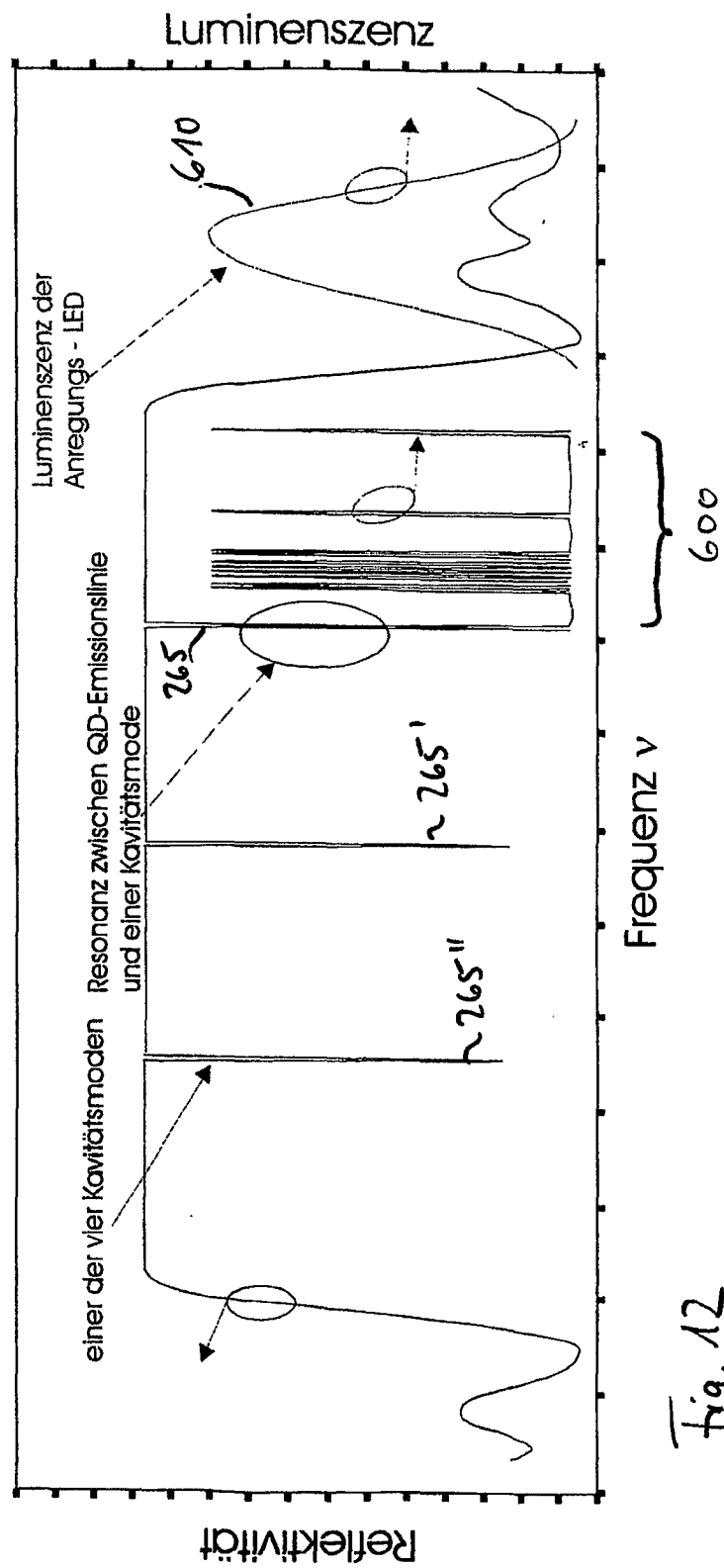


Fig. 12