

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
19. August 2004 (19.08.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/070735 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: H01B 1/04,
H01L 29/12, 21/02

Jens-Hendrik [DE/DE]; Südenstrasse 56, 12169 Berlin (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2004/000231

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(22) Internationales Anmeldedatum:
5. Februar 2004 (05.02.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
103 06 076.6 8. Februar 2003 (08.02.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): HAHN-MEITNER-INSTITUT BERLIN GMBH [DE/DE]; Glienicke Strasse 100, 14109 Berlin (DE).

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): WEIDINGER, Alois [DE/DE]; Kirchweg 39, 14129 Berlin (DE). HOFSSÄSS, Hans [DE/DE]; Hanssenstrasse 24, 37073 Göttingen (DE). KRAUSER, Johann [DE/DE]; Hertelstrasse 3, 12161 Berlin (DE). MERTESACKER, Bernd [DE/DE]; Freester Weg 4G, 13503 Berlin (DE). ZOLLONDZ,

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: QUANTUM POINT MADE OF ELECTRICALLY CONDUCTING CARBON, PRODUCTION METHOD, AND APPLICATION

(54) Bezeichnung: QUANTENPUNKT AUS ELEKTRISCH LEITENDEM KOHLENSTOFF, VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG UND ANWENDUNG

(57) Abstract: The invention relates to quantum points showing quantization of the electrical properties thereof, which can be used in an advantageous manner especially in nanoelectronics. However, quantum points are very complicated to accurately design, produce, and incorporate, resulting in an insufficient success rate. The inventive quantum point (QP) is characterized by an embedded structure configured as a cylindrical area having a graphite-type structure (GLC) within an electrically insulating carbon layer (DLC_{QP}) which is provided with a diamond-type structure and is arranged between two electrically insulating layers (IL₁, IL₂) that maintain said property also following ion passage. Hence, a quantum point that is geometrically and positionally defined with precision is disclosed for the first time in DLC material which is very interesting for nanoelectronics. Said quantum point can have dimensions of less than 8 nm and is particularly suitable for producing a single-electron transistor (SET). Contacting can be done in a simple manner by means of integrated nanowires. The inventive quantum point is easy to produce by irradiating a stack of layers (LS) with an ion beam (IB). The quantum point (QP) and the nanowires (NW) are created in the ion track (IT) by converting the non-conductive carbon (DLC) having a diamond-type structure into conductive carbon (GLC) having a graphite-type structure.

(57) Zusammenfassung: Quantenpunkte zeigen eine besonders in der Nanoelektronik vorteilhaft nutzbare Quantisierung ihrer elektrischen Eigenschaften. Der präzise Aufbau, die Herstellung und der Einbau von Quantenpunkten sind jedoch sehr kompliziert und gelingen nur ungenügend. Der erfindungsgemässe Quantenpunkt (QP) ist gekennzeichnet durch einen eingebetteten Aufbau als zylindrischer Bereich mit graphitartiger Struktur (GLC) in einer elektrisch isolierenden Kohlenstoffschicht (DLCQP) mit diamantartiger Struktur, die zwischen zwei elektrisch isolierenden, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigenden Isolierschichten (IL₁, IL₂) angeordnet ist. Somit wird erstmals ein geometrisch und lokal genau definierter Quantenpunkt in dem für die Nanoelektronik sehr interessanten DLC-Material vorgestellt, der Abmasse von unter 8 nm aufweisen kann und besonders zur Realisierung eines Einzel-Elektron-Transistors (SET) geeignet ist. Durch integrierte Nanodrähte kann eine einfache Kontaktierung erfolgen. Die Herstellung erfolgt in einfacher Weise durch Bestrahlung eines Schichtenpakets (LS) mit einem Ionenstrahl (IB). Der Quantenpunkt (QP) und die Nanodrähte (NW) entstehen dabei in der Ionenspur (IT) durch Umwandlung des nicht-leitenden Kohlenstoffs (DLC) mit diamantartiger Struktur in leitenden Kohlenstoff (GLC) mit graphitartiger Struktur.

WO 2004/070735 A1



— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

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.

Quantenpunkt aus elektrisch leitendem Kohlenstoff, Verfahren zur Herstellung und Anwendung

5 Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf einen Quantenpunkt aus elektrisch leitendem Kohlenstoff, auf ein Verfahren zu seiner Herstellung und auf eine Anwendung.

- 10 Bei Objekten mit Abmessungen von nur einigen Nanometern, sogenannte Quanten- oder Nanopunkte oder -inseln, ist die Bewegungsfreiheit der Elektronen in allen drei Raumrichtungen eingeschränkt („nulldimensionales System“). Quantenpunkte, die in der Hauptsache Anwendung in der Nano-
optik und der Nanoelektronik finden, weisen ein diskretes Energiespektrum auf
15 und zeigen in mancher Hinsicht ein den Atomen ähnliches Verhalten. Im Gegensatz zu den Atomen kann jedoch auf die Größe und die elektronische Struktur Einfluss genommen werden. Wegen der geringen elektrischen Kapazität der Quantenpunkte erfordert das Hinzufügen eines weiteren Elektrons („Einzel-Elektron-Tunneln“) zu den bereits im Quantenpunkt vorhan-
20 denen einen bestimmten Energieaufwand im Bereich von einigen 10 meV bis einigen 100 meV („Coulomb-Blockade“). Dieser Effekt führt zu einer Quantisierung des Stromflusses über den Quantenpunkt. Der Strom als Funktion der angelegten Spannung steigt in Stufen an respektive kann über diese gesteuert werden. Größe und Form der Quantenpunkte hängen vom
25 Herstellungsverfahren und den verwendeten Materialien ab.

- Allgemein bekannt sind Quantenpunkte aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien und aus Kohlenstoff. Aus der **Veröffentlichung I** von J.-Y. Park et al. „Electrical cutting and nicking of carbon nanotubes using an atomic force
30 microscope“ (Applied Physics Letters, Volume 80, Number 23 (10.06.2003), pp. 4446-4448) ist die relativ aufwändige Herstellung von einzelnen Quantenpunkten aus vorgeformten Nanoröhren aus halbleitendem oder metallischem

Kohlenstoff durch deren Abschneiden oder Abknicken bekannt. Aus der japanischen Patentzusammenfassung der **JP 2002217400 A** sind halbrunde Quantenpunkte mit fullerenartiger Struktur bekannt, die in eng benachbarter Vielzahl auf einem Siliziumsubstrat mit einer Kohlenstoffoberfläche im Vakuum unter Wärmezufuhr durch Agglomeration hergestellt werden. Eine gezielte Herstellung einzelner Quantenpunkte durch das selbstorganisierte Aufwachsen ist sehr schwierig.

Quantenpunkte können in vielfältiger Weise realisiert werden. Zu den bekanntesten Herstellungsverfahren von Quantenpunkten aus Halbleitermaterialien zählen das Ionenstrahlputtern, die mechanisch strukturierende oder lokal oxidierende Nanolithographie mit dem Rasterkraftmikroskop und die Herstellung durch selbstorganisiertes Inselwachstum nach Stranski-Krastanov. Insbesondere ist jedoch die derzeit vorwiegend verwendete Nanolithographie aufgrund der einzuhaltenden äußerst kleinen Dimensionen bis unter 10 nm sehr aufwändig und störanfällig. Desweiteren ist es aus der **DE 198 57 060 A1** bekannt, Quantenpunkte für ein Halbleiterbauteil durch Agglomeration zu erzeugen, indem eine zwischen zwei halbleitenden Isolierschichten angeordnete leitende Halbleiterschicht getempert wird. Dabei kann jedoch wiederum auf die Verteilung der agglomerierten Quantenpunkte kein direkter Einfluss genommen werden.

Quantenpunkte können aufgrund ihrer besonderen physikalischen Eigenheiten zur Herstellung beliebiger nanoelektrischer Strukturen verwendet werden. Als Grundbausteine sind hier der Stromschalter aufgrund der Coulomb-Blockade, durch die bei einer geringen Variation der angelegten Spannung der Strom stufenartig variiert, und der Einzel-Elektron-Transistor (Single-Electron-Transistor SET) aufgrund der Umschaltfähigkeit der Quantenpunkte zwischen Sperr- und Durchlasszustand über eine Steuerelektrode anzusehen. SET sind vielfältig zu verwenden, beispielsweise in Elektrometern, DC-Normalen, Thermometern sowie Logik- und Speicherelementen. Ein guter Überblick über die physikalischen Grundlagen, die Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten

sowie über die derzeit verwendeten Herstellungsmethoden von SET ist der **Veröffentlichung II** von K. Hofmann und B. Spangenberg „Der „ultimative“ Transistor – Traum oder Wirklichkeit ?“ (Physikalische Blätter 56 (2000) Nr. 9, pp 45-49) zu entnehmen. Neben metallischen SET, die durch Schrägschattenbedampfung und Elektronenstrahl-Lithographie hergestellt werden, sind in der
5 Hauptsache SET aus Halbleitern bekannt, die mittels Elektronenstrahl-Lithographie und reaktivem Ionenätzen hergestellt werden. Als alternative, technologisch jedoch noch nicht konkret erfasste Ansätze werden SET aus manipulierten Kohlenstoff-Nanoröhrchen oder metallisierten DNA-Strängen
10 genannt.

Vor dem Hintergrund des zuvor gewürdigten Standes der Technik und ausgehend von der zitierten japanischen Patentzusammenfassung der **JP 2002217400 A** als nächstliegendem Stand der Technik für den Quantenpunkt
15 ist es daher die **Aufgabe** der Erfindung, einen Quantenpunkt aus elektrisch leitendem Kohlenstoff mit definierten Dimensionen in einem Bereich von unter 12 nm mit optimalen nanoelektronischen Eigenschaften anzugeben. Desweiteren soll ein Herstellungsverfahren angegeben werden, mit dem in einfacher, genauer und reproduzierbarer Weise einzelne Quantenpunkte herstellbar sind.
20 Darüber hinaus soll der Quantenpunkt nach der Erfindung aufgrund seines Aufbaus und seines Herstellungsprozesses eine besondere Eignung in der Anwendung für einen SET aufzeigen. Die erfindungsgemäße **Lösung** ist für einen Quantenpunkt aus leitendem Kohlenstoff der eingangs genannten Art gekennzeichnet durch einen eingebetteten Aufbau als zylindrischer Bereich mit
25 graphitartiger Struktur in einer elektrisch isolierenden Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur, die zwischen zwei elektrisch isolierenden, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigenden Isolierschichten mit für Elektronen durchtunnelbaren Schichtdicken t_1 , t_2 angeordnet ist.

30 Der erfindungsgemäße Quantenpunkt hat eine zylindrische Form und ist damit in seiner Form genau definiert und isoliert. Er besteht aus elektrisch leitendem Kohlenstoff mit graphitartiger Struktur (Graphite Like Carbon GLC), das in

elektrisch isolierendem Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur (Diamond Like Carbon DLC) eingebettet ist. Damit ist erstmals eine Realisierung eines Quantenpunktes in DLC gegeben, bei dem es sich insbesondere für die nanoelektronischen Bauelemente um ein sehr interessantes Material handelt.

5 Die Höhe h des Quantenpunktes wird durch die Schichtdicke der Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur DLC bestimmt, die zwischen den zwei Isolierschichten angeordnet ist. Diese begrenzen somit den Quantenpunkt an seinen Stirnseiten und bilden die Tunnelbarrieren bzw. den Tunnelabstand für die Elektronen von und zum Quantenpunkt. Somit weisen sie solche Schicht-

10 dicken auf, dass sie die funktionswesentliche Durchtunnelung von Elektronen zulassen. Der Durchmesser d des Quantenpunkts wird durch die Art der Herstellung und dabei durch den Wirkdurchmesser des umwandelnden Ions bestimmt (s.u.). Bezüglich der Dimensionierung des Quantenpunktes nach der Erfindung ist es vorteilhaft, wenn er einen Durchmesser d von 8 nm und eine

15 Höhe h von 5 nm aufweist. Bevorzugt können auch die Isolierschichten gleiche Schichtdicken t_1 , t_2 von 5 nm aufweisen. Zur Funktionserfüllung der Tunnelbarrieren sollten die Schichtdicken t_1 und t_2 der Isolierschichten jedoch nicht wesentlich größer als 5 nm sein.

20 Die Isolierschichten, die beispielsweise aus Siliziumoxid SiO_x bestehen können, sind elektrisch isolierend und behalten diese Eigenschaft auch unter oder nach einem Durchgang von Ionen bei. Nach einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung kann diese Eigenschaft durch Isolierschichten mit einem eingelagerten Zusatzstoff, der deren elektrische Isolationseigenschaft

25 erhält, erreicht werden. Bei dem Zusatzstoff kann es sich bevorzugt um Wasserstoff, Fluor oder Chlor handeln. Es kann beispielsweise eine Wasserstoffdotierung mit einem Anteil von 30 Atomprozent vorgenommen werden. Bei einer Einlagerung eines Zusatzstoffes mit die Isolationseigenschaften der Isolierschichten erhaltenden Eigenschaften kann es sich dann vorteilhafter-

30 weise auch bei den Isolierschichten um Kohlenstoffschichten mit diamantartiger Struktur handeln. Diese werden durch die Dotierung mit dem Zusatzstoff dann beim Durchgang von Ionen strukturell nicht in leitende

Graphitbereiche umgewandelt. Weiterhin erhält der einzeln verfügbare Quantenpunkt nach der Erfindung eine stabile Basis und eine Kontaktierungsmöglichkeit durch einen Aufbau mit einem elektrisch leitenden Substrat. Dieses kann problemlos auch für den Aufbau anderer nanoelektronischer Komponenten verwendet werden. Eine monolithische Integration des Quantenpunktes nach der Erfindung mit anderen Bauelementen ist damit möglich.

Die mit Nanolithographie hergestellten, bekannten Quantenpunkte haben den Vorteil, dass direkt bei der Herstellung die wesentlichen Anschlusskontakte hergestellt werden können. Bei den bekannten Quantenpunkten aus Kohlenstoff werden zur Kontaktierung vorgefertigte Nanoröhrchen verwendet. Eine Kontaktierung der bekannten Quantenpunkte aus fullerenartigem Kohlenstoff ist nicht bekannt. Dagegen kann der Quantenpunkt nach der Erfindung vorteilhafterweise direkt eigene elektrische Anschlüsse aufweisen. Es ist dann nach einer weiteren Ausführungsform der Erfindung gekennzeichnet durch einen integrierten Aufbau mit zwei elektrisch leitenden Nanodrähten, die als zylindrische Bereiche mit graphitartiger Struktur und zum Quantenpunkt gleichen Durchmessern in jeweils eine weitere elektrisch isolierende Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur der Schichtdicken l_1 , l_2 ober- und unterhalb der beiden Isolierschichten eingebettet sind. Somit weist der Quantenpunkt nach der Erfindung integrierte und aufgrund des Herstellungsverfahrens (s.u.) korrekt zentrisch positionierte Anschlüsse mit gleichen elektrischen Eigenschaften und gleichem Durchmesser auf, die ihn für eine Verwendung in nanoelektronischen Bauteilen besonders geeignet machen. Bei einer gleichen Schichtdicke der beiden zusätzlichen, strukturell umwandelbaren Kohlenstoffschichten, in die die Nanodrähte eingebettet sind, ergibt sich somit ein direkt anschlussfähiger Quantenpunkt mit symmetrischem Aufbau. Die integrierten Nanodrähte können aber auch unterschiedliche Längen aufweisen und an den jeweiligen Anwendungsfall des Quantenpunkts in ihrer Länge optimal angepasst werden.

Weiter oben wurden bereits bekannte Herstellungsverfahren für Quantenpunkte näher erläutert, die jedoch alle relativ aufwändig in ihrer Durchführung und dabei trotzdem unbefriedigend in der Erzielung der vorgegebenen Dimensionen und Reproduzierbarkeit der Quantenpunkte sind. Das gemäß der
5 **DE 198 57 060 A1** bekannte Verfahren bildet dabei den zum Herstellungsverfahren nach der Erfindung nächstliegenden Stand der Technik. Zur Erzeugung des Quantenpunktes aus elektrischen leitendem Kohlenstoff nach der Erfindung hingegen kann ein besonders einfaches und trotzdem hochgenaues Herstellungsverfahren mit den nachfolgenden Verfahrensschritten besonders
10 vorteilhaft verwendet werden:

- Aufbringen einer unteren elektrisch isolierenden, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigenden Isolierschicht mit einer für Elektronen durchtunnelbaren Schichtdicke t_1 auf ein elektrisch leitendes Substrat,
- 15 • Aufbringen einer elektrisch isolierenden Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur und sehr geringer, die Höhe des Quantenpunktes festlegenden Schichtdicke h ,
- Aufbringen einer oberen elektrisch isolierenden, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigenden Isolierschicht mit einer für
20 Elektronen durchtunnelbaren Schichtdicke t_2 ,
- Bestrahlung des Schichtenpakets mit einem senkrecht dazu ausgerichteten Ionenstrahl aus schweren Ionen mit einer vorgegebenen Fluenz, die einen ausreichenden Abstand zwischen den einzelnen Durchgangsspuren der Ionen gewährleistet, und mit einer vorgegebenen Energie, die eine für eine
25 in der Durchgangsspur jedes Ions erfolgende Umstrukturierung der elektrisch isolierenden Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur in elektrisch leitenden Kohlenstoff mit graphitartiger Struktur hinreichend hohe Energiedeposition gewährleistet, und
- Detektion der hergestellten Quantenpunkte aufgrund ihrer gegenüber der
30 Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur erhöhten elektrischen Leitfähigkeit.

Das prinzipielle Verfahren zur Umwandlung einer elektrisch isolierenden Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur (DLC) in eine elektrisch leitende Kohlenstoffschicht mit graphitartiger Struktur ist aus dem deutschen Patent **DE 199 10 156 C2** des gleichen Anmelders bekannt. Hierin werden ein Elektronenemitter in Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur und ein Verfahren zu dessen Herstellung beschrieben. Der besondere Vorteil des bekannten Verfahrens liegt in der vertikalen Ausrichtung der emittierenden Nanoröhren und in deren statistisch gleichmäßigen Verteilung in der Fläche in Abhängigkeit von der gewählten Fluenz (Anzahl der auftreffenden Ionen/cm²). Dazu wird zunächst auf einem Substrat eine isolierende Schicht mit einer Dicke zwischen 40 nm und 1000 nm aufgebracht, anschließend wird diese Schicht senkrecht zu ihrer Oberfläche mit energiereichen, schweren Ionen homogen bestrahlt, wobei die Ionen eine solche Energie aufweisen, die eine für eine Umstrukturierung der isolierenden Schicht hinreichend hohe Energiedeposition über die gesamte Dicke dieser Schicht gewährleistet, und die Ionen eine Dosis (Fluenz) aufweisen, bei der der mittlere Abstand der statistisch in die isolierende Schicht einschlagenden Ionen zwischen 20 nm und 1000 nm liegt. Dabei werden als energiereiche schwere Ionen Xe-Ionen mit einer Energie von 240 MeV und einer Dosis von 5×10^{10} Teilchen/cm² verwendet. Als Material für die isolierende Schicht kann diamantartiger Kohlenstoff verwendet werden, das mittels Ionendeposition auf einem dotierten Silizium-Substrat aufgebracht wird und eine Schichtdicke von 100 nm aufweisen kann.

Im Gegensatz dazu wird bei dem erfindungsgemäßen Verfahren nicht eine einzelne, dickere Kohlenstoffschicht, sondern eine alternierende Schichtenabfolge aus wandel- und nicht-wandelbaren elektrisch isolierenden Schichten aufgebracht und anschließend mit einem Ionenstrahl gemeinsam durchstrahlt. Dabei kann es sich um einen breiteren Ionenstrahl, in dem der mittlere Auftreffabstand zwischen den Ionen durch die gewählte Fluenz statistisch festgelegt ist, oder gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens um einen Mikro-Ionenstrahl handeln. Dieser bietet die

Möglichkeit, gezielt einzelne Ionenspuren in einem definierten Abstand, z.B. einige Nanometer, zu setzen. Die wandelbare, elektrisch isolierende Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur wird in der oder den Durchgangsspuren der Ionen in eine elektrisch leitende Graphitschicht umgewandelt. Die Isolierschichten behalten dabei ihre elektrische Isolationsfähigkeit. Der Durchmesser
5 des herzustellenden Quantenpunktes wird durch die Wahl des Ions, hierbei kann es sich beispielsweise um ein Gold- oder Uran-Ion handeln, festgelegt. Jeder Quantenpunkt wird somit von nur einem Ion erzeugt. Mit dieser einfachen, aber sehr genauen und zuverlässig reproduzierbaren Herstellungsmethode werden ein einzelner oder auch mehrere, ausreichend zueinander
10 beabstandete Quantenpunkte im Schichtenaufbau erzeugt. Das Auffinden des oder der erzeugten Quantenpunkte erfolgt durch Detektion der elektrischen Leitfähigkeit in der Oberfläche des Schichtenpakets. Hierzu kann beispielsweise als Detektor ein Messstromkreis zwischen dem leitenden Substrat des
15 Schichtenpakets (oder einer dort aufgebrachtten Flächenelektrode) und der Spitze eines Rasterkraftmikroskops (Atomic-Force-Microscope AFM) angelegt und die Oberfläche des Schichtenpakets mit der AFM-Spitze in hoher Ortsauflösung abgetastet werden. Ein Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit zeigt den oder die erzeugten Quantenpunkte an. Es können danach ein oder
20 mehrere bevorzugte Quantenpunkte ausgewählt und elektrisch kontaktiert werden.

Die Beständigkeit der elektrisch isolierenden Schichten beim Ionendurchgang ist wesentlich für die einfache Erzeugbarkeit des Quantenpunktes nach der
25 Erfindung. Nach einer Fortführung des Herstellungsverfahrens nach der Erfindung ist es dafür vorteilhaft, wenn während des Aufbringens der Isolierschichten eine Zufuhr eines gasförmigen Zusatzstoffes erfolgt, der die elektrische Isolationseigenschaft der Isolierschichten erhaltende Eigenschaften aufweist. Bei dem gasförmigen Zusatzstoff kann es sich bevorzugt um
30 Wasserstoff-, Chlor oder Fluorgas handeln, das beispielsweise in die Produktionskammer eingeleitet wird. Durch die Einlagerung des Zusatzstoffes wird die dauerhafte elektrische Isolationswirkung der Isolierschichten bewirkt,

sodass diese nun ebenfalls auch aus Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur bestehen können. Durch die gleiche Materialwahl für alle Schichten wird der Herstellungsprozess noch weiter vereinfacht. Das temporäre Einleiten des gasförmigen Zusatzstoffes während der Herstellung der Isolierschichten in die Produktionskammer stellt kein technologisches Problem dar und ist einfach und genau steuerbar. Somit kann letztendlich durch die Wahl des jeweiligen Anfangszeitpunkts und der Länge der Einleitung des gasförmigen Zusatzstoffes die Schichtenabfolge aus dauerhaft isolierenden Schichten und umwandelbaren Schichten zur Herstellung des Quantenpunkts und der kontaktierenden Nanodrähte und die jeweiligen Schichthöhen während des fortlaufenden Aufbringens von Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur festgelegt werden. Zum Aufbringen können verschiedene Verfahren, bevorzugt die Deposition von Kohlenstoff-Ionen in einem Energieintervall von 50 eV bis 200 eV bei Raumtemperatur verwendet werden. Das Aufbringen der Isolierschichten kann durch Aufdampfen aus der Gasphase erfolgen, insbesondere, wenn sie nicht aus Kohlenstoff bestehen. Andere Abscheidungsverfahren sind ebenfalls anwendbar.

Die elektrische Kontaktierung stellt eine grundsätzliche Schwierigkeit bei der Nutzung von Quantenpunkten aufgrund ihrer kleinen Abmessungen dar. Der Quantenpunkt nach der Erfindung kann deshalb vorteilhafterweise bereits integrierte Nanodrähte als Anschlussdrähte aufweisen. Zu deren Herstellung ist dafür gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung im erfindungsgemäßen Verfahren ein dem Aufbringen der Isolierschichten vor- und nachgelagertes Aufbringen jeweils einer dickeren Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur der Schichtdicken l_1 , l_2 vorgesehen. Bei der Bestrahlung mit dem Ionenstrahl werden die Durchgangsspuren dann in leitende Bereiche mit graphitartiger Struktur umgewandelt. Somit findet der gleiche Herstellungsprozess wie bei dem Quantenpunkt statt. Der Unterschied liegt in der Schichtdimensionierung. Durch die größeren Schichtdicken l_1 , l_2 der zusätzlich abgeschiedenen Kohlenstoffschichten entstehen keine weiteren Quantenpunkte mehr, sondern längliche Nanodrähte, deren gleiche oder

unterschiedliche Längen durch die Schichtdicken l_1 , l_2 der zusätzlichen Kohlenstoffschichten gegeben sind. Die Nanodrähte sind bei der Erfindung aber per Herstellungsprinzip direkt mit dem Quantenpunkt in einer vertikalen Linie versatzfrei ausgerichtet und kontaktiert. Die beiden Isolierschichten
5 weisen dafür solche Schichtdicken t_1 , t_2 auf, dass sie von Elektronen durchtunnelt werden können (beispielsweise 5 nm). Die Durchdringung des gesamten Schichtpaketes bis zu einigen Mikrometer Dicke mit dem hochenergetischen Ionenstrahl ist gewährleistet.

10 Durch die versatzfreie Verbindung zwischen dem Quantenpunkt und den Nanodrähten aufgrund der in-situ-Herstellung mit einem Ionenstrahl bietet der Quantenpunkt nach der Erfindung beste Voraussetzungen für eine äußere elektrische Kontaktierung gemäß einer weiteren Erfindungsfortführung und damit zu einer effizienten Anwendung in einem Nutzkreis. Bezüglich der
15 äußeren elektrischen Kontaktierung gibt es verschiedene Realisierungsmöglichkeiten. Es können beispielsweise mit dem Lithographieverfahren dünne, ein bis mehrere μm breite Leiterbahnen auf das Substrat aufgebracht werden. Anschließend wird das Schichtpaket abgeschieden. Auf die oberste Schicht werden dann senkrecht zu den unteren Leiterbahnen weitere dünne
20 Leiterbahnen aufgebracht. An den virtuellen Kreuzungspunkten wird anschließend durch gezielte Ionenbestrahlung jeweils ein Quantenpunkt gesetzt. Dies kann durch einen Mikro-Ionenstrahl (Weiterschaltung des Mikro-Ionenstrahls von Kreuzungspunkt zu Kreuzungspunkt) oder durch Ausnutzung der statistischen Verteilung der von einem Ionenstrahl induzierten Quanten-
25 punkte erfolgen. Bei einer statistischer Verteilung der Ionen über die Fläche erhält man bei geeigneter Wahl der Fluenz pro Kreuzungspunkt entweder keinen oder einen oder zwei usw. Quantenpunkte. Auf Grund des Widerstandes im Stromkreis kann entschieden werden, wie viele Quantenpunkte in einen Umfeldkreis vorhanden sind. Eine Beschränkung auf einen
30 Umfeldkreis mit nur einem Quantenpunkt kann dann erfolgen. Alternativ zu der Methode mit den virtuell gekreuzten Leiterbahnen kann auch eine AFM-Spitze den einen Kontakt und das leitende Substrat den anderen Kontakt bilden. Der

Messkreis zur Detektion des Quantenpunktes ist dann gleichzeitig der Kontaktierungskreis. Um die Kapazität des elektrischen Kreises gering zu halten, werden bevorzugt mikrostrukturierte Zuleitungen auf dem Substrat gewählt.

5

Von besonderem Vorteil ist es auch, wenn gemäß einer nächsten Erfindungsförderung im Herstellungsverfahren mit einer n-fachen Wiederholung des Schichtenaufbaus zur Erzeugung von n vertikal in einer Linie angeordneten Quantenpunkten erfolgt, wobei zwischen diesen zumindest eine
10 Isolationsschicht der Schichtdicke t_n aufgebracht wird. Dadurch entsteht eine Vielzahl von Quantenpunkten, die wie an einer Perlenkette aneinander gereiht sind. Zwischen den Quantenpunkten befindet sich immer eine Isolationsschicht der Schichtdicke t_n , die konstant oder auch veränderlich sein kann. Gegebenenfalls können auch Leiterstücke aus Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur
15 zwischen die einzelnen Quantenpunkt eingefügt werden. Dazu werden zusätzliche DLC-Schichten wie bei der Herstellung der Nanodrähte zur Kontaktierung eines einzelnen Quantenpunkts in das Schichtenpaket an die entsprechenden Stellen eingebracht. Je nach der Wiederholungsanzahl der einen Quantenpunkt definierenden Schichtfolge können somit eine
20 entsprechende Anzahl von vertikal versatzfrei in einer Linie liegenden Quantenpunkte mit einem einzelnen Ion erzeugt werden. Vorteil dieser vertikalen Anordnung mehrerer Quantenpunkte übereinander ist deren integrierte elektrische Verbindung, die beim Ionendurchgang automatisch in den zusätzlichen Kohlenstoffschichten aus DLC hervorgerufen wird. Eine
25 Kombination der vertikalen mit der horizontalen Ausbildung von Quantenpunkten führt schließlich zu einer räumlichen Anordnung der Quantenpunkte. Eine getrennte oder gemeinsame Nutzung der erzeugten Quantenpunkte in der Fläche unter entsprechender Kontaktierung ist hier möglich.

30 Durch die integrierte Kombination des Quantenpunkts mit zwei elektrischen Anschlüssen in Form von Nanodrähten ergibt sich eine neuartige Aufbau, der gemäß einer besonders bevorzugten Anwendung der Quantenpunkts nach der

Erfindung für eine Anwendung in einem Einzel-Elektron-Transistor mit einer elektrischen Kontaktierung der beiden Nanodrähte im Quellen-Senken-Stromkreis und mit einer ringförmigen Steuerelektrode, die konzentrisch zum Quantenpunkt auf der oberen Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur angeordnet ist, geeignet ist. Das Kontaktieren der beiden Nanodrähte kann beispielsweise über die bereits weiter oben erwähnte Möglichkeit mit einer AFM-Spitze und einer Kontaktierung des leitenden Substrats oder einer dort aufgebrachtten Flächenelektrode erfolgen. Das Aufbringen einer ringförmigen Steuerelektrode kann durch entsprechendes Wegätzen einer beispielsweise vor der Herstellung des Quantenpunkts auf dem Schichtenpaket zusätzlich aufgedampften Metallschicht erfolgen. Über die Orientierung zu den integrierten und in axialer Verlängerung zum Quantenpunkt liegenden Nanodrähten ist eine zentrische Anordnung der ringförmigen Steuerelektrode einfach zu erreichen. Somit steht durch die Verwendung des Quantenpunktes nach der Erfindung erstmals ein SET auf Basis von Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur zur Verfügung. Nähere Einzelheiten zu dem SET unter Verwendung des Quantenpunktes nach der Erfindung sind dem speziellen Beschreibungsteil zu entnehmen.

20

Ausbildungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand der schematischen Figuren näher erläutert. Dabei zeigt :

- Figur 1** einen Quantenpunkt nach der Erfindung im Querschnitt,
25 **Figur 2** ein dreifaches Schichtenpaket zur Herstellung von drei Quantenpunkten in vertikaler Linie im Querschnitt und
Figur 3 einen Quantenpunkt nach der Erfindung in einer Anwendung als Einzel-Elektron-Transistor im Querschnitt.

30

Die **Figur 1** zeigt im Querschnitt ein Schichtenpaket **LS** mit einem Quantenpunkt **QP** aus elektrisch leitendem Kohlenstoff **GLC** mit graphitartiger

Struktur. Der Quantenpunkt **QP** ist zylindrisch ausgebildet und in eine elektrisch isolierende Kohlenstoffschicht **DLC_{QP}** mit diamantartiger Struktur eingebettet, deren Schichtdicke die Höhe **h** des Quantenpunkts **QP** festlegt. Die Kohlenstoffschicht **DLC_{QP}** wiederum ist zwischen zwei elektrisch isolierenden Isolierschichten **IL₁**, **IL₂** angeordnet, die ihre isolierende Eigenschaft auch nach dem Durchgang eines Ions beibehalten. Dies kann beispielsweise durch eine Dotierung mit Wasserstoff **H** erreicht werden. In diesem Falle können die beiden Isolierschichten **IL₁**, **IL₂** verfahrensvereinfachend dann auch aus Kohlenstoff **DLC** mit diamantartiger Struktur bestehen. Im Beispiel weisen sie eine Schichtdicke **t** von 5 nm auf. Aufgebaut ist der Quantenpunkt **QP** auf einem elektrisch leitenden Substrat **SL**. Im gezeigten Ausführungsbeispiel weist der Quantenpunkt **QP** eine Höhe von 5 nm auf, die der Höhe der Kohlenstoffschicht **DLC_{QP}** mit diamantartigem Struktur entspricht. Der Durchmesser **d** des Quantenpunktes **QP** wird von dem durchdringenden Ion bestimmt und beträgt im Beispiel 8 nm.

Weiterhin sind in der **Figur 1** zwei integrierte Nanodrähte **NW₁**, **NW₂** zu erkennen, die als zylindrische Bereiche aus Kohlenstoff mit graphitartiger Struktur **GLC** und zum Quantenpunkt **QP** gleichen Durchmessern in zwei weitere, dickere elektrisch isolierende Kohlenstoffschichten **DLC₁**, **DLC₂** mit diamantartiger Struktur ober- und unterhalb der beiden Isolierschichten **IL₁**, **IL₂** eingebettet sind. Dabei weisen die beiden Isolierschichten **IL₁**, **IL₂** eine für Elektronen durchtunnelbare Schichtdicke **t** auf, sodass der elektrische Anschluss der beiden Nanodrähte **NW₁**, **NW₂** an den Quantenpunkt **QP** gewährleistet ist. Die zylindrischen Nanodrähte **NW₁**, **NW₂** weisen gegenüber dem Quantenpunkt **QP** eine erheblich größere Länge **l** auf und liegen mit diesem genau in einer vertikalen Linie, was sich aus dem unten näher erläuterten Herstellungsverfahren ergibt. Durch die beiden Nanodrähte **NW₁**, **NW₂** ist der Quantenpunkt **QP** optimal kontaktiert und kann problemlos in nanoelektronischen Bauelementen weiterverwendet werden.

Anhand des in **Figur 1** dargestellten Schichtenpaket **LS** mit einem Quantenpunkt **QP** und integrierten Nanodrähten **NW₁**, **NW₂** nach der Erfindung wird im Folgenden das Herstellungsverfahren nach der Erfindung näher erläutert. Zunächst wird auf das elektrisch leitende Substrat **SL**, das beispielsweise aus dotiertem Silizium besteht, die untere dickere Kohlenstoffschicht **DCL₁** mit diamantartiger Struktur beispielsweise durch Ionendeposition abgeschieden. Nachdem diese Schicht eine vorgegebene Schichtdicke **I₁**, im Beispiel 20 nm, erreicht hat, wird die untere Isolierschicht **IL₁**, die auch nach dem Durchgang der Ionen isolierend bleibt, mit einer Schichtdicke **t₁** von 5 nm aufgedampft, sodass sie von Elektronen durchtunnelt werden kann. Zur Aufrechterhaltung der Isolationswirkung unter Ionenbeschuss wird im gezeigten Ausführungsbeispiel während des Aufbringens Wasserstoffgas **H₂** zugeführt, aus dem sich Wasserstoff **H** in die untere Isolierschicht **IL₁** homogen mit einem Molekülanteil von beispielsweise bis zu 30 Atomprozent einlagert. Bei dieser Ausführungsform kann auch die untere Isolierschicht **IL₁** aus Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur bestehen. Als nächster Schicht wird eine dünne Kohlenstoffschicht **DLC_{QP}** mit diamantartiger Struktur in der gewünschten Höhe **h** des Quantenpunktes **QP**, hier 5 nm, abgeschieden. Darauf wird analog zur unteren Isolierschicht **IL₁** die obere Isolierschicht **IL₂** mit in einer Schichtdicke **t₂** von im Beispiel ebenfalls 5 nm abgeschieden. Abschließend folgt eine obere dickere Kohlenstoffschicht **DLC₂** der Schichtdicke **I₂**, im Ausführungsbeispiel ebenfalls 20nm, analog zu der unteren, dickeren Kohlenstoffschicht **DLC₁**. Damit ist das Schichtenpaket **LS** zur Herstellung eines oder mehrerer in der mittleren Kohlenstoffschicht **DLC_{QP}** angeordneten Quantenpunkten **QP** mit Nanodrähten **NW₁**, **NW₂** fertiggestellt.

Als nächster Verfahrensschritt wird das Schichtenpaket **LS** senkrecht zu seiner Oberfläche mit einem Ionenstrahl **IB** bestrahlt. Gezeigt ist eine Ionenspur **IT**. Dabei sind auch Abweichungen des Auftreffwinkels der Ionen tolerierbar. Diese führen zu einer Verzerrung der zylindrischen Form der Quantenpunkte **QP**, die jedoch akzeptabel ist, solange sie deren Funktion nicht beeinträchtigt.

Bei den Ionen kann es sich um Xe-, Au- oder auch U -Ionen handeln, letztere können eine Energie von 1 GeV aufweisen. Bei einem Ionenstrahl mit einer gewählten Fluenz von 1×10^8 Ionen/cm² weisen die einzelnen Auftrefforte der Ionen einen mittleren Abstand von 1000 nm auf, was einer guten Vereinzelnung der Quantenpunkte **QP** entspricht. Die Durchtrittsspur **IT** des Ionenstrahls **IB** durch das Schichtenpaket **LS** ist gestrichelt eingezeichnet. Im gezeigten Ausführungsbeispiel ist ein Quantenpunkt **QP** in der Kohlenstoffschicht **DLC_{QP}** durch Umwandlung der nichtleitenden diamantartigen Struktur in eine leitende graphitartige Struktur **GLC** durch Ionendurchtritt entstanden. Das Auffinden des Quantenpunkts **QP** erfolgt dann im letzten Verfahrensschritt, beispielsweise mittels Detektion der elektrischen Leitfähigkeit mit einer **AFM**-Spitze gegenüber einer flächigen Rückelektrode. Der detektierte Quantenpunkt **QP** kann dann an der Oberfläche des Schichtenpakets **LS** kontaktiert werden.

Die **Figur 2** zeigt im Querschnitt einen dreifachen Schichtenaufbau ($n=3$) des Schichtenpakets **LS** gemäß **Figur 1**, der durch zyklisches Wiederholen des zuvor erläuterten Herstellungsverfahrens nach der Erfindung entsteht. Beim Ionendurchgang entstehen so drei Quantenpunkte **QP**, die versatzfrei vertikal in der Durchtrittsspur **IT** des durchgetretenen Ions übereinander wie Perlen an einer Kette angeordnet sind und durch durchtunnelbare Isolationsschichten **IL** getrennt sind. Je nach Anforderung durch das zu realisierende Bauelement können so viele Quantenpunkte **QP** durch Wiederholung des Schichtenaufbaus vertikal übereinander hergestellt werden. Über Nanodrähte **NW** kann die Reihe aus Quantenpunkten **QP** kontaktiert werden. Zwischen einzelnen Quantenpunkten **QP** können auch kurze Leiterstücke integriert sein (in der **Figur 2** nicht weiter dargestellt). Die maximale Ionenenergie stellt die Grenze für die maximale Anzahl der übereinander liegenden Quantenpunkte **QP** bzw. für die maximale Dicke des Schichtenpakets **LS** dar.

In der **Figur 3** ist im Querschnitt die Verwendung eines Quantenpunktes **QP** nach der Erfindung als Einzel-Elektron-Transistor **SET** dargestellt. Dazu ist der

Quantenpunkt **QP** im Quellen-Senken-Stromkreis **SDC** des Einzel-Elektron-Transistor **SET** kontaktiert. Die Kontaktierung erfolgt im gewählten Beispiel über eine **AFM**-Spitze am oberen Nanodraht **NW₁** (Senke **Drain**) und eine flächige Elektrode **PE** im Bereich des unteren Nanodrahtes **NW₂** des Quantenpunktes **QP** (Quelle **Source**). Im Senkenbereich ist auf der oberen Kohlenstoffschicht **DLC₂** mit diamantartiger Struktur eine metallische, ringförmige Steuerelektrode (**Gate**) konzentrisch zum Quantenpunkt **QP** angeordnet. Der Innendurchmesser **D** der Steuerelektrode (**Gate**) beträgt im gewählten Ausführungsbeispiel 100 nm. Durch Veränderung der Steuerungspannung an der Steuerelektrode (**Gate**) wird der Stromfluss im Quellen-Senken-Stromkreis **SDC** verändert (**U_{SD}**). So können die transistortypischen Stellungen zwischen Sperrern und Durchlassen und im Durchlassbereich sogar noch ein abgestufter Stromfluss mit Hilfe eines Quantenpunktes **QP** und dessen elektronenweiser Be- und Entladung erreicht werden.

15

Bezugszeichenliste

	AFM	Rasterkraftmikroskop
20	DLC	Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur
	d	Durchmesser QP
	D	Innendurchmesser Gate
	Drain	Senke
	Gate	Steuerelektrode
25	GLC	Kohlenstoff mit graphitartiger Struktur
	h	Höhe QP, Schichtdicke DLC_{QP}
	IB	Ionenstrahl
	IT	Durchtrittsspur
	IL	Isolierschicht
30	l₁, l₂	Schichtdicke von DLC_1 , DLC_2
	LS	Schichtenpaket

	NW	Nanodraht
	PE	flächige Elektrode
	QP	Quantenpunkt
	SDC	Quellen-Senken-Stromkreis
5	SET	Einzel-Elektron-Transistor
	SL	leitendes Substrat
	Source	Quelle
	t_1, t_2	Schichtdicke von IL_1, IL_2
	U_{SD}	Spannung im SDC

Patentansprüche

1. Quantenpunkt aus elektrisch leitendem Kohlenstoff,
5 **gekennzeichnet durch** einen eingebetteten Aufbau als zylindrischer Bereich mit graphitartiger Struktur (GLC) in einer elektrisch isolierenden Kohlenstoffschicht (DLC_{QP}) mit diamantartiger Struktur, die zwischen zwei elektrisch isolierenden, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigenden Isolierschichten (IL_1 , IL_2) mit für Elektronen durchtunnelbaren Schichtdicken t_1 ,
10 t_2 angeordnet ist.
2. Quantenpunkt nach Anspruch 1,
gekennzeichnet durch Isolierschichten (IL_1 , IL_2) mit einem eingelagerten Zusatzstoff, der deren elektrische Isolationseigenschaft erhält.
15
3. Quantenpunkt nach Anspruch 2,
gekennzeichnet durch Wasserstoff (H), Fluor (F) oder Chlor (CL) als eingelagerten Zusatzstoff in den Isolierschichten (IL_1 , IL_2).
- 20 4. Quantenpunkt nach Anspruch 2 oder 3,
gekennzeichnet durch Isolierschichten (IL_1 , IL_2) aus Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur (DLC).
5. Quantenpunkt nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
25 **gekennzeichnet durch**
einen Aufbau mit einem elektrisch leitenden Substrat (SL).

6. Quantenpunkt nach einem der Ansprüche 1 bis 5,
gekennzeichnet durch einen Durchmesser d von 8 nm und eine Höhe h von 5 nm und durch gleiche Schichtdicken t_1 , t_2 der Isolierschichten (IL_1 , IL_2) von ebenfalls 5 nm.

5

7. Quantenpunkt nach Anspruch 6,
gekennzeichnet durch einen integrierten Aufbau mit zwei elektrisch leitenden Nanodrähten (NW_1 , NW_2), die als zylindrische Bereiche in Kohlenstoff mit graphitartiger Struktur (GLC) und zum Quantenpunkt (QP) gleichen Durchmesser d in jeweils eine weitere elektrisch isolierende Kohlenstoffschicht (DLC_1 , DLC_2) mit diamantartiger Struktur der Schichtdicken l_1 , l_2 ober- und unterhalb der beiden Isolierschichten (IL_1 , IL_2) eingebettet sind.

10

8. Verfahren zur Herstellung von Quantenpunkten (QP) aus elektrischen leitendem Kohlenstoff, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 7, mit den Verfahrensschritten :

15

- Aufbringen einer unteren elektrisch isolierenden, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigenden Isolierschicht (IL_1) mit einer für Elektronen durchtunnelbaren Schichtdicke t_1 auf ein elektrisch leitendes Substrat (SL),
- Aufbringen einer elektrisch isolierenden Kohlenstoffschicht (DLC_{QP}) mit diamantartiger Struktur und sehr geringer, die Höhe des Quantenpunktes (QP) festlegenden Schichtdicke h ,
- Aufbringen einer oberen elektrisch isolierenden, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigenden Isolierschicht (IL_2) mit einer für Elektronen durchtunnelbaren Schichtdicke t_2 ,
- Bestrahlung des Schichtenpakets (LS) mit einem senkrecht dazu ausgerichteten Ionenstrahl (IB) aus schweren Ionen mit einer vorgegebenen Fluenz, die einen ausreichenden Abstand zwischen den einzelnen Durchgangsspuren (IT) der Ionen gewährleistet, und mit einer vorgegebenen Energie, die eine für eine in der Durchgangsspur (IT) jedes Ions erfolgende

20

25

30

Umstrukturierung der elektrisch isolierenden Kohlenstoffschicht (DLC) mit diamantartiger Struktur in elektrisch leitenden Kohlenstoff (GLC) mit graphitartiger Struktur hinreichend hohe Energiedeposition gewährleistet, und

- 5 • Detektion der hergestellten Quantenpunkte aufgrund ihrer gegenüber der Kohlenstoffschicht (DLC) mit diamantartiger Struktur erhöhten elektrischen Leitfähigkeit.

9. Verfahren nach Anspruch 8 mit einer Bestrahlung des Schichtenpakets (LS)
10 mit einem genau positionierbaren Mikro-Ionenstrahl (IB).

10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9 mit einer Zufuhr eines gasförmigen Zusatzstoffes, der die elektrische Isolationseigenschaft der Isolierschichten (IL_1 , IL_2) erhaltende Eigenschaften aufweist, während des Aufbringens der
15 Isolierschichten(IL_1 , IL_2).

11. Verfahren nach Anspruch 10 mit einer Zufuhr von Wasserstoffgas (H_2), Chlor- oder Fluorgas als gasförmigem Zusatzstoff.

20 12. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11 mit einem dem Aufbringen der Isolierschichten (IL_1 , IL_2) vor- und nachgelagerten Aufbringen jeweils einer dickeren Kohlenstoffschicht (DLC_1 , DLC_2) mit diamantartiger Struktur der Schichtdicken l_1 , l_2

25 13. Verfahren nach Anspruch 12 mit einer äußeren elektrischen Kontaktierung des Quantenpunkts (QP).

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13 mit einer n-fachen Wiederholung des Schichtenaufbaus (LS) zur Erzeugung von n vertikal in einer
30 Linie angeordneten Quantenpunkten (QP_n), wobei zwischen diesen zumindest eine Isolationsschicht IL_n der Schichtdicke t_n aufgebracht wird.

15. Anwendung eines Quantenpunkts (QP) aus elektrisch leitendem Kohlenstoff (GLC), insbesondere nach Anspruch 7, in einem Einzel-Elektron-Transistor (SET) mit einer elektrischen Kontaktierung der beiden Nanodrähte (NW₁, NW₂) im Quellen-Senken-Stromkreis (SDC) und mit einer ringförmigen Steuerelektrode (Gate), die konzentrisch zum Quantenpunkt (QP) auf der oberen Kohlenstoffschicht (DLC₂) mit diamantartiger Struktur angeordnet ist.

1/3

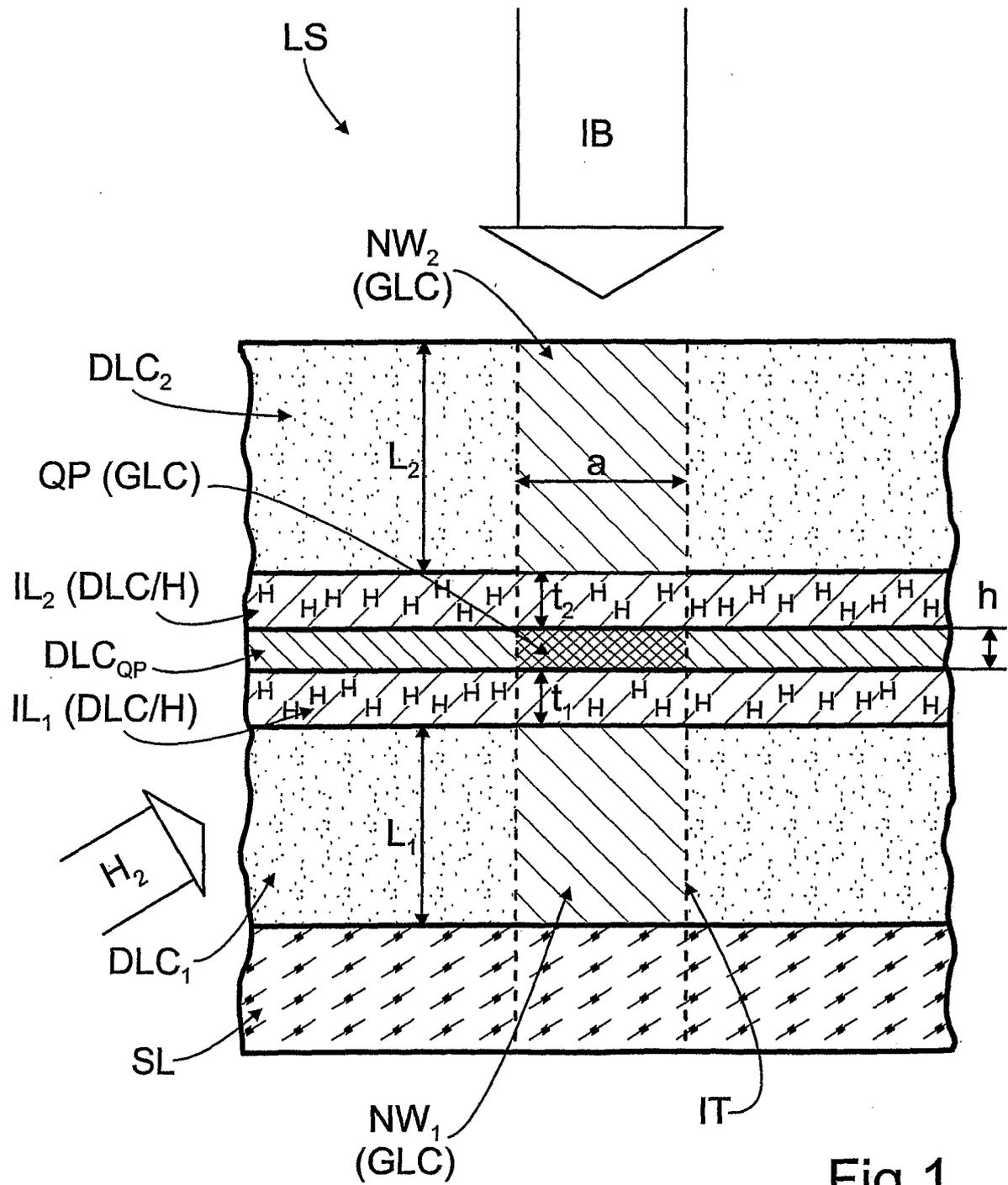


Fig.1

2/3

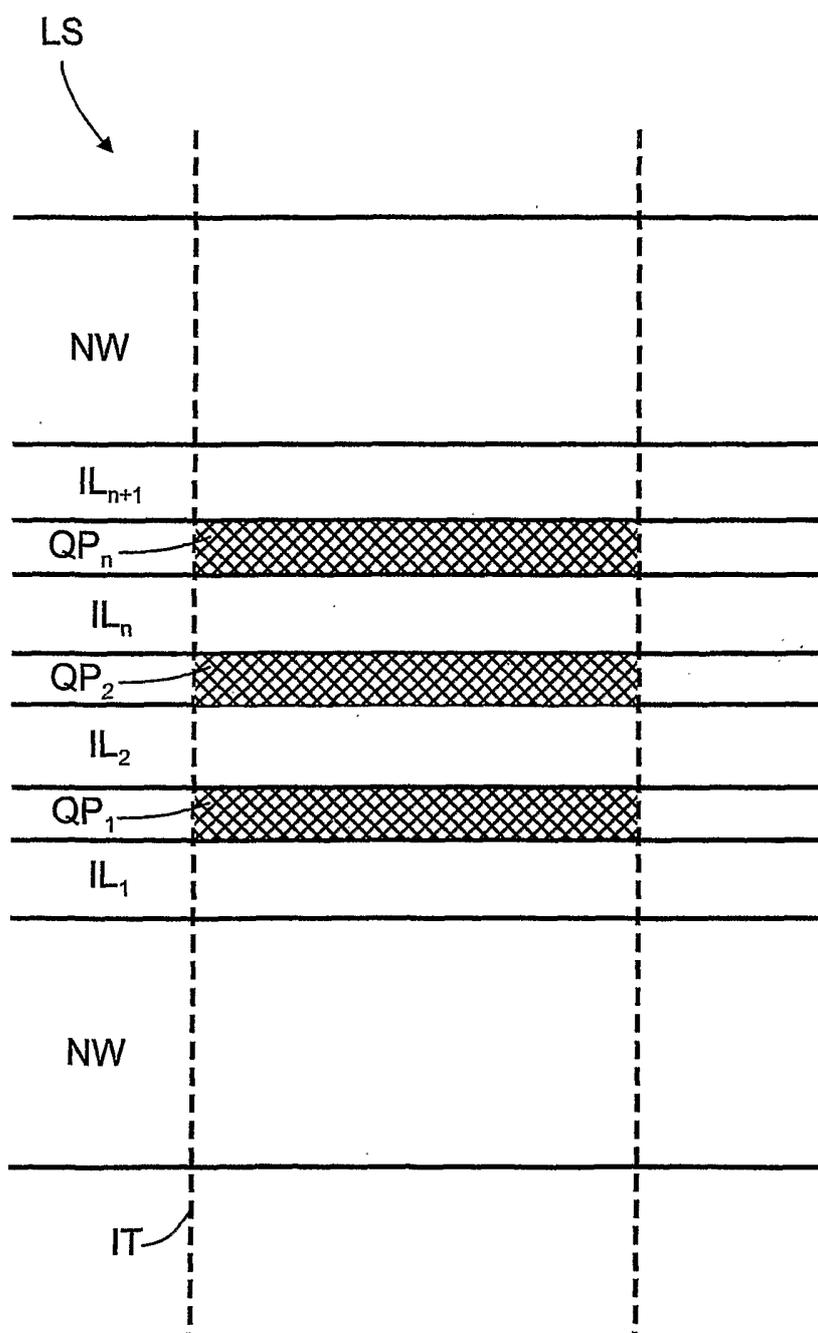


Fig.2

3/3

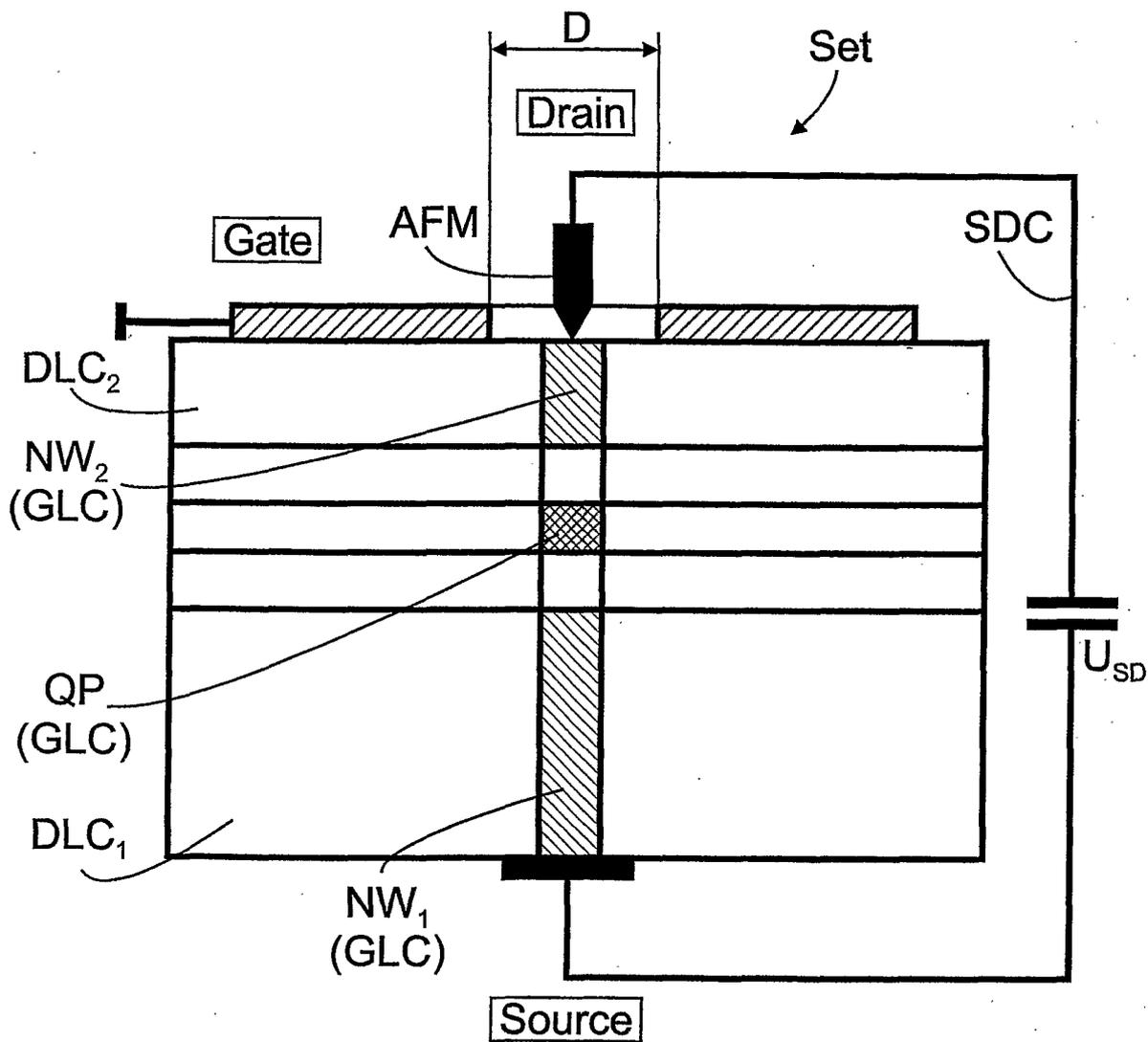


Fig.3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/DE2004/000231

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
 IPC 7 H01B1/04 H01L29/12 H01L21/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
 IPC 7 H01B H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)
 EPO-Internal, WPI Data, CHEM ABS Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 00/52725 A (HAHN MEITNER INST BERLIN GMBH ; MERTESACKER BERND (DE); WAIBLINGER MAR) 8 September 2000 (2000-09-08) cited in the application whole document	1-15
A	POSTMA H W: "CARBON NANOTUBE SINGLE-ELECTRON TRANSISTORS AT ROOM TEMPERATURE" SCIENCE, AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE,, US, vol. 293, 6 July 2001 (2001-07-06), pages 76-79, XP001060212 ISSN: 0036-8075 whole document	1-15

Further documents are listed in the continuation of box C. Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. "&" document member of the same patent family
---	---

Date of the actual completion of the international search 30 June 2004	Date of mailing of the international search report 14/07/2004
--	---

Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Marsitzky, D
--	---

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/DE2004/000231

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 37, 1 April 1998 (1998-04-01), pages 423-425, XP002286630 ROOM TEMPERATURE OPERATION OF AMORPHOUS CARBON-BASED SINGLE-ELECTRON TRANSISTORS FABRICATED BY BEAM-INDUCED DEPOSITION TECHNIQUES whole document</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No
PCT/DE2004/000231

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 0052725	A	08-09-2000	DE 19910156 A1	07-09-2000
			WO 0052725 A1	08-09-2000
			DE 50006333 D1	09-06-2004
			EP 1157402 A1	28-11-2001
			JP 2002538594 A	12-11-2002

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/DE2004/000231

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 H01B1/04 H01L29/12 H01L21/02

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 H01B H01L

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, CHEM ABS Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 00/52725 A (HAHN MEITNER INST BERLIN GMBH ; MERTESACKER BERND (DE); WAIBLINGER MAR) 8. September 2000 (2000-09-08) in der Anmeldung erwähnt whole document	1-15
A	POSTMA H W: "CARBON NANOTUBE SINGLE-ELECTRON TRANSISTORS AT ROOM TEMPERATURE" SCIENCE, AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE,, US, Bd. 293, 6. Juli 2001 (2001-07-06), Seiten 76-79, XP001060212 ISSN: 0036-8075 whole document	1-15

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

30. Juni 2004

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

14/07/2004

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Marsitzky, D

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/DE2004/000231

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie ⁶	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	<p>JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Bd. 37, 1. April 1998 (1998-04-01), Seiten 423-425, XP002286630 ROOM TEMPERATURE OPERATION OF AMORPHOUS CARBON-BASED SINGLE-ELECTRON TRANSISTORS FABRICATED BY BEAM-INDUCED DEPOSITION TECHNIQUES whole document</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/DE2004/000231

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 0052725 A	08-09-2000	DE 19910156 A1	07-09-2000
		WO 0052725 A1	08-09-2000
		DE 50006333 D1	09-06-2004
		EP 1157402 A1	28-11-2001
		JP 2002538594 A	12-11-2002
