



(19)
 Bundesrepublik Deutschland
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 06 076 B4** 2005.02.17

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **103 06 076.6**
 (22) Anmeldetag: **08.02.2003**
 (43) Offenlegungstag: **26.08.2004**
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **17.02.2005**

(51) Int Cl.7: **H01L 29/775**
H01L 21/335, B82B 3/00

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

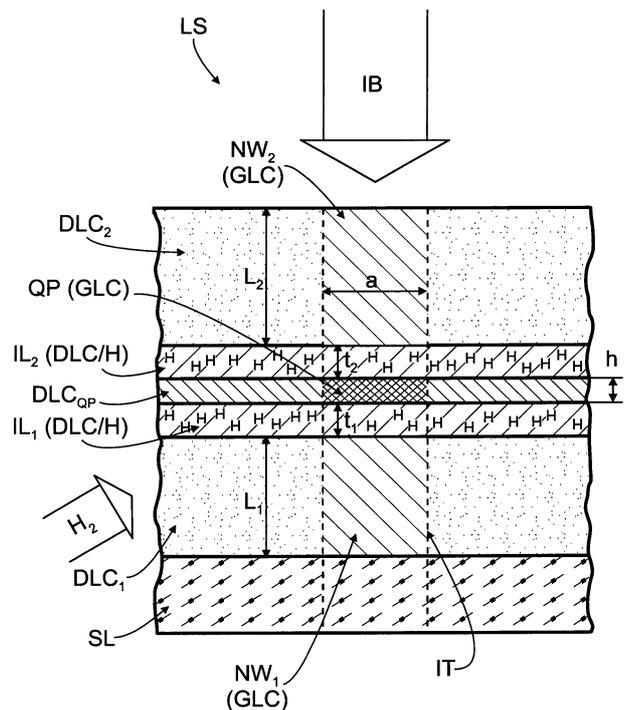
(71) Patentinhaber:
Hahn-Meitner-Institut Berlin GmbH, 14109 Berlin, DE

(72) Erfinder:
Weidinger, Alois, Prof. Dr. Dipl.-Phys., 14129 Berlin, DE; Hofsäss, Hans Prof. Dr., 37073 Göttingen, DE; Krauser, Johann, Prof. Dr., 12161 Berlin, DE; Mertesacker, Bernd, 13503 Berlin, DE; Zollondz, Jens-Hendrik, Dr. Dipl.-Phys., 12169 Berlin, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht gezogene Druckschriften:
DE 199 10 156 C2
DE 100 32 370 C1
DE 198 57 060 A1
US2002/00 31 649 A1
US2002/00 24 099 A1
JP 2002-2 17 400 A
SUZUKI, M., et al.: Quantum Dot Formation in Single-Wall Carbon Nanotubes, in: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, 2001, S. 2001, S. 1915-1917;
J.-Y. Park et al.: "Electrical cutting and nicking of carbon nanotubes using an atomic force microscope" (Applied Physics Letters, Volume 80, Number 23 (10.06.2003), pp. 4446-4448);
K.Hofmann und B.Spangenberg "Der "ultimative" Transistor-Traum oder Wirklichkeit?" (Physikalische Blätter 56 (2000) Nr.9, pp.45-49);

(54) Bezeichnung: **Quantenpunkt aus elektrisch leitendem Kohlenstoff, Verfahren zur Herstellung und Anwendung**

(57) Hauptanspruch: Quantenpunkt aus elektrisch leitendem Kohlenstoff, aufweisend 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 (IL₁, IL₂) mit für Elektronen durchtunnelbaren Schichtdicken t_1 , t_2 angeordnet ist.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf einen Quantenpunkt aus elektrisch leitendem Kohlenstoff, auf ein Verfahren zu seiner Herstellung und auf eine Anwendung.

Stand der Technik

[0002] 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 Nanooptik und der Nanoelektronik finden, weisen ein diskretes Energiespektrum auf 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 vorhandenen 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 Herstellungsverfahren und den verwendeten Materialien ab.

[0003] 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 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 Patentszusammenfassung 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. Weiterhin ist aus der für die vorliegende Erfindung relevanten US 2002/0031649 A1 (vergleiche insbesondere Fig. 3F mit der dazugehörigen Beschreibung) ein Quantenpunkt bekannt, der einen eingebetteten Aufbau als zylindrischer Bereich in einer elektrisch isolierenden Schicht aufweist, die zwischen zwei elektrisch isolierenden, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigenden Isolierschichten mit für Elektronen durchtunnelbaren

Schichtdicken angeordnet ist. Dabei handelt es sich jedoch um einen Quantenpunkt in Form einer punktförmigen Region aus Siliziumionen, die in einen Siliziumoxidfilm implantiert sind.

[0004] Quantenpunkte können in vielfältiger Weise realisiert werden. Zu den bekannten Herstellungsverfahren von Quantenpunkten aus Halbleitermaterialien zählen das Ionenstrahlspattern, 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. Aus der oben bereits genannten US 2002/0031649 A1 ist auch ein Verfahren zur Herstellung von Quantenpunkten bekannt, bei dem zunächst eine untere elektrisch isolierende, diese Eigenschaft auch nach einem Ionendurchgang zeigende Isolierschicht mit einer für Elektronen durchtunnelbaren Schichtdicke auf ein elektrisch leitendes Substrat aufgebracht wird. Anschließend wird das Schichtenpaket mit einem senkrecht dazu ausgerichteten Ionenstrahl aus Siliziumionen mit einer vorgegebenen Fluenz, die einen ausreichenden Abstand zwischen den einzelnen Durchgangsspuren der Ionen gewährleistet, und mit einer vorgegebenen Energie bestrahlt. Eine energieabhängige Strukturumwandlung findet dabei im Schichtenpaket aber nicht statt. Die hergestellten Quantenpunkte werden dann aufgrund ihrer gegenüber der isolierenden Schicht erhöhten elektrischen Leitfähigkeit detektiert.

[0005] Weitere Verfahren zur Herstellung von Quantenpunkten sind beispielsweise aus der Veröffentlichung von M. Suzuki „Quantum Dot Formation in Single-Wall Carbon Nanotubes“ (Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 40, 2001. pp 1915-1917, vergl. Fig. 1), aus der DE 100 32 370 C1 („Feldeffekttransistor“, vergl. Fig. 5) und aus der US 2002/0024099 A1 („Transistor“, vergl. Fig. 2, jeweils mit der zugehörigen Beschreibung) bekannt.

[0006] 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 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 genannt.

Aufgabenstellung

[0007] Vor dem Hintergrund des zuvor gewürdigten Standes der Technik 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. 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 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.

[0008] 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. Die Höhe h des Quantenpunktes wird durch die Schichtdicke der Kohlenstoff-

schicht 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 Schichtdicken auf, dass sie die funktionswesentliche Durchtunnelung von Elektronen zulassen. Der Durchmesser d des Quantenpunktes 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 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.

[0009] 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 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 vorteilhafterweise 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.

[0010] 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 weite-

ren 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 zuzätzlichen, 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.

[0011] 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 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 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,
- 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 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 in der Durchgangsspur jedes Ions erfolgende Umstrukturierung der elektrisch isolie-

renden Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur in elektrisch leitenden Kohlenstoff mit graphitartiger Struktur hinreichend hohe Energie-deposition gewährleistet, und

- Detektion der hergestellten Quantenpunkte aufgrund ihrer gegenüber der Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur erhöhten elektrischen Leitfähigkeit.

[0012] 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.

[0013] 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 Auftreff-Abstand 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 elek-

trisch leitende Graphitschicht umgewandelt. Die Isolierschichten behalten dabei ihre elektrische Isolationsfähigkeit. Der Durchmesser 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 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 Schichtenpakets (oder einer dort aufgebrachtenelektrode) 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 mehrere bevorzugte Quantenpunkte ausgewählt und elektrisch kontaktiert werden.

[0014] Die Beständigkeit der elektrisch isolierenden Schichten beim Ionendurchgang ist wesentlich für die einfache Erzeugbarkeit des Quantenpunktes nach der 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 Isolationsfähigkeit der Isolierschichten erhaltende Eigenschaften aufweist. Bei dem gasförmigen Zusatzstoff kann es sich bevorzugt um 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 Quantenpunktes 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 Raum-

temperatur verwendet werden. Das Aufbringen der Isolierschichten kann durch Aufdampfen aus der Gasphase erfolgen, insbesondere, wenn sie nicht aus Kohlenstoff bestehen. Andere Abscheideverfahren sind ebenfalls anwendbar.

[0015] 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 I_1 , I_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 I_1 , I_2 der zusätzlich abgeschiedenen Kohlenstoffschichten entstehen keine weiteren Quantenpunkte mehr, sondern längliche Nanodrähte, deren gleiche oder unterschiedliche Längen durch die Schichtdicken I_1 , I_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 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.

[0016] 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 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 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 Ver-

teilung der von einem Ionenstrahl induzierten Quantenpunkte 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 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.

[0017] 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 Isolations-schicht 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 Isolations-schicht der Schichtdicke t_n , die konstant oder auch veränderlich sein kann. Gegebenenfalls können auch Leiterstücke aus Kohlenstoff mit diamantartiger Struktur 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 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 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.

[0018] 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 Nano-

drähte 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 aufgebrauchten 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 ein 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.

Ausführungsbeispiel

[0019] Ausbildungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand der schematischen Figuren näher erläutert. Dabei zeigt

[0020] Fig. 1 einen Quantenpunkt nach der Erfindung im Querschnitt,

[0021] Fig. 2 ein dreifaches Schichtenpaket zur Herstellung von drei Quantenpunkten in vertikaler Linie im Querschnitt und

[0022] Fig. 3 eine Quantenpunkt nach der Erfindung in einer Anwendung als Einzel-Elektron-Transistor im Querschnitt.

[0023] Die Fig. 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 IL_1, IL_2 angeordnet, die ihre isolierende Eigenschaft auch nach dem Durchgang eines Ions beibehalten. Dies kann beispielsweise durch eine Dotierung mit Wasserstoff H in erreicht werden. In diesem Falle können die beiden Isolierschichten IL_1, IL_2 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 elek-

trisch 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.

[0024] Weiterhin sind in der **Fig. 1** zwei integrierte Nanodrähte NW_1, NW_2 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 DLC_1, DLC_2 mit diamantartiger Struktur ober- und unterhalb der beiden Isolierschichten IL_1, IL_2 eingebettet sind. Dabei weisen die beiden Isolierschichten IL_1, IL_2 eine für Elektronen durchtunnelbare Schichtdicke t auf, sodass der elektrische Anschluss der beiden Nanodrähte NW_1, NW_2 an den Quantenpunkt QP gewährleistet ist. Die zylindrischen Nanodrähte NW_1, NW_2 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 NW_1, NW_2 ist der Quantenpunkt QP optimal kontaktiert und kann problemlos in nanoelektronischen Bauelementen weiterverwendet werden.

[0025] Anhand des in **Fig. 1** dargestellten Schichtenpaket LS mit einem Quantenpunkt QP und integrierten Nanodrähten NW_1, NW_2 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 DLC_1 mit diamantartiger Struktur beispielsweise durch Ionendeposition abgeschieden. Nachdem diese Schicht eine vorgegebene Schichtdicke l_1 , im Beispiel 20 nm, erreicht hat, wird die untere Isolierschicht IL_1 , die auch nach dem Durchgang der Ionen isolierend bleibt, mit einer Schichtdicke t_1 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 H_2 zugeführt, aus dem sich Wasserstoff H in die untere Isolierschicht IL_1 homogen mit einem Molekülanteil von beispielsweise bis zu 30 Atomprozent einlagert. Bei dieser Ausführungsform kann auch die untere Isolierschicht IL_1 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 IL_1 die obere Isolierschicht IL_2 mit in einer Schichtdicke t_2 von im Beispiel ebenfalls 5 nm abgeschieden. Abschließend folgt eine obere dickere Kohlenstoff-

schicht DLC_2 der Schichtdicke l_2 , im Ausführungsbeispiel ebenfalls 20nm, analog zu der unteren, dickeren Kohlenstoffschicht DLC_1 . Damit ist das Schichtenpaket LS zur Herstellung eines oder mehrerer in der mittleren Kohlenstoffschicht DLC_{QP} angeordneten Quantenpunkten QP mit Nanodrähten NW_1, NW_2 fertiggestellt.

[0026] Als nächster Verfahrensschritt wird das Schichtenpaket LS senkrecht zu seiner Oberfläche mit einem Ionenstrahl IB bestrahlt. Gezeigt ist eine Ionenstrahlspur 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.

[0027] 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 Vereinzelung der Quantenpunkte QP entspricht. Die Durchtrittspur 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 Quantenpunktes 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.

[0028] Die **Fig. 2** zeigt im Querschnitt einen dreifachen Schichtenaufbau ($n = 3$) des Schichtenpakets LS gemäß **Fig. 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 Durchtrittspur IT des durchgetretenen Ions übereinander wie Perlen an einer Kette angeordnet sind und durch durchtunnelbare Isolationschichten 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 **Fig. 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.

[0029] In der **Fig. 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 NW_1 (Senke Drain) und eine flächige Elektrode PE im Bereich des unteren Nanodrahtes NW_2 des Quantenpunktes QP (Quelle Source). Im Senkenbereich ist auf der oberen Kohlenstoffschicht DLC_2 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 Sperren und Durchlassen und im Durchlassbereich sogar noch ein abgestufter Stromfluss mit Hilfe eines Quantenpunktes QP und dessen elektronenweiser Be- und Entladung erreicht werden.

Bezugszeichenliste

AFM	Rasterkraftmikroskop
DLC	Kohlenstoffschicht mit diamantartiger Struktur
d	Durchmesser QP
D	Innendurchmesser Gate
Drain	Senke
Gate	Steuerelektrode
GLC	Kohlenstoff mit graphitartiger Struktur
h	Höhe QP, Schichtdicke DLC_{QP}
IB	Ionenstrahl
IT	Durchtrittsspur
IL	Isolierschicht
I_1, I_2	Schichtdicke von DLC_1, DLC_2
LS	Schichtenpaket
NW	Nanodraht
PE	flächige Elektrode
QP	Quantenpunkt
SDC	Quellen-Senken-Stromkreis
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, aufweisend 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

ren Schichtdicken t_1, t_2 angeordnet ist.

2. Quantenpunkt nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch Isolierschichten (IL_1, IL_2) mit einem eingelagerten Zusatzstoff, der deren elektrische Isolationsfähigkeit erhält.

3. Quantenpunkt nach Anspruch 2, gekennzeichnet durch Wasserstoff (H), Fluor (F) oder Chlor (Cl) als eingelagerten Zusatzstoff in den Isolierschichten (IL_1, IL_2).

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, 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.

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 Durchmessern d in jeweils eine weitere elektrisch isolierende Kohlenstoffschicht (DLC_1, DLC_2) mit diamantartiger Struktur der Schichtdicken I_1, I_2 ober- und unterhalb der beiden Isolierschichten (IL_1, IL_2) eingebettet sind.

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

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

- 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) 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 Isolierschichten (IL_1 , IL_2).

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

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 I_1 , I_2

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 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) nach Anspruch 7 in einem Einzel-Elektron-Transistor (SET) mit einer elektrischen Kontaktierung der beiden Nanodrähte (NW_1 , NW_2) im Quellen-Senken-Stromkreis (SDC) und mit einer ringförmigen Steuerelektrode (Gate), die konzentrisch zum Quantenpunkt (QP) auf der oberen Kohlenstoffschicht (DLC_2) mit diamantartiger Struktur angeordnet ist.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

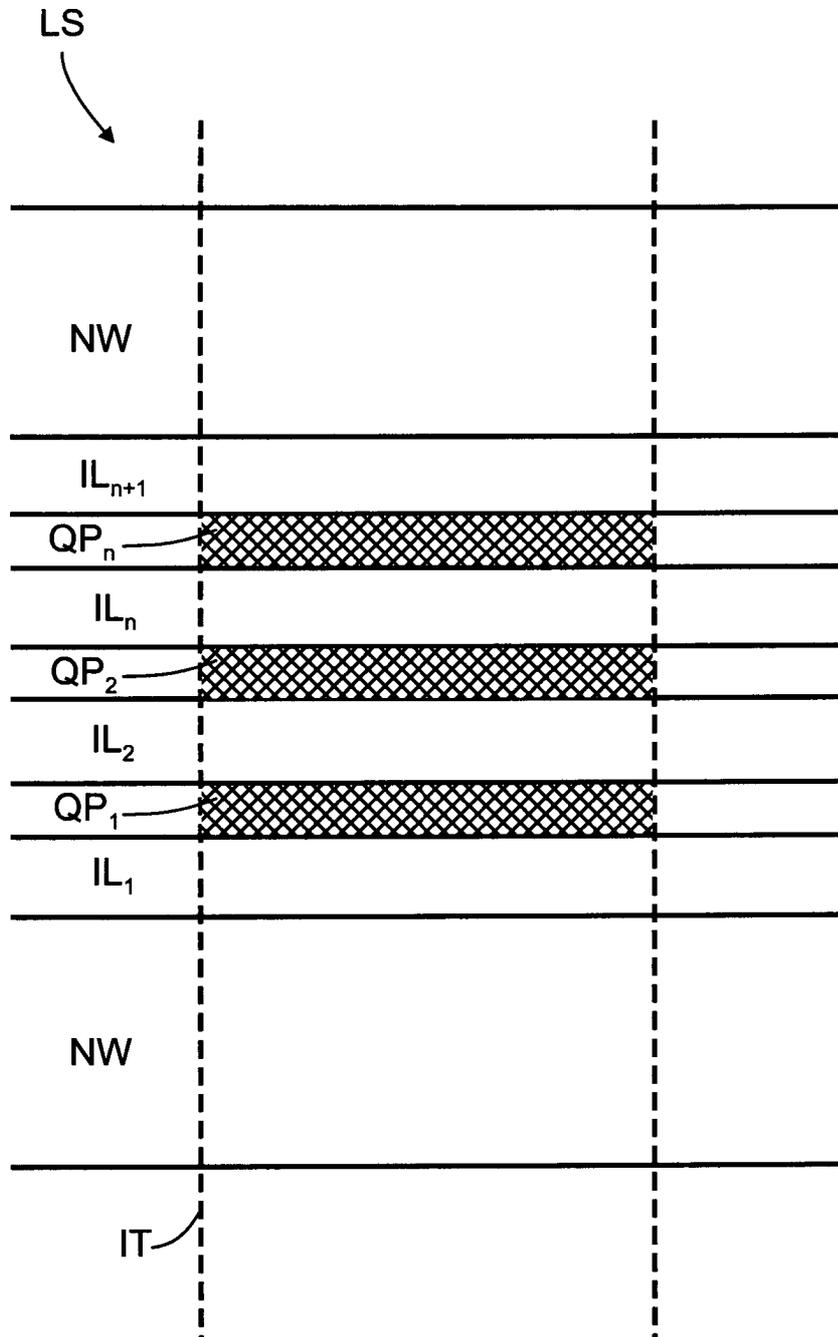


Fig.2

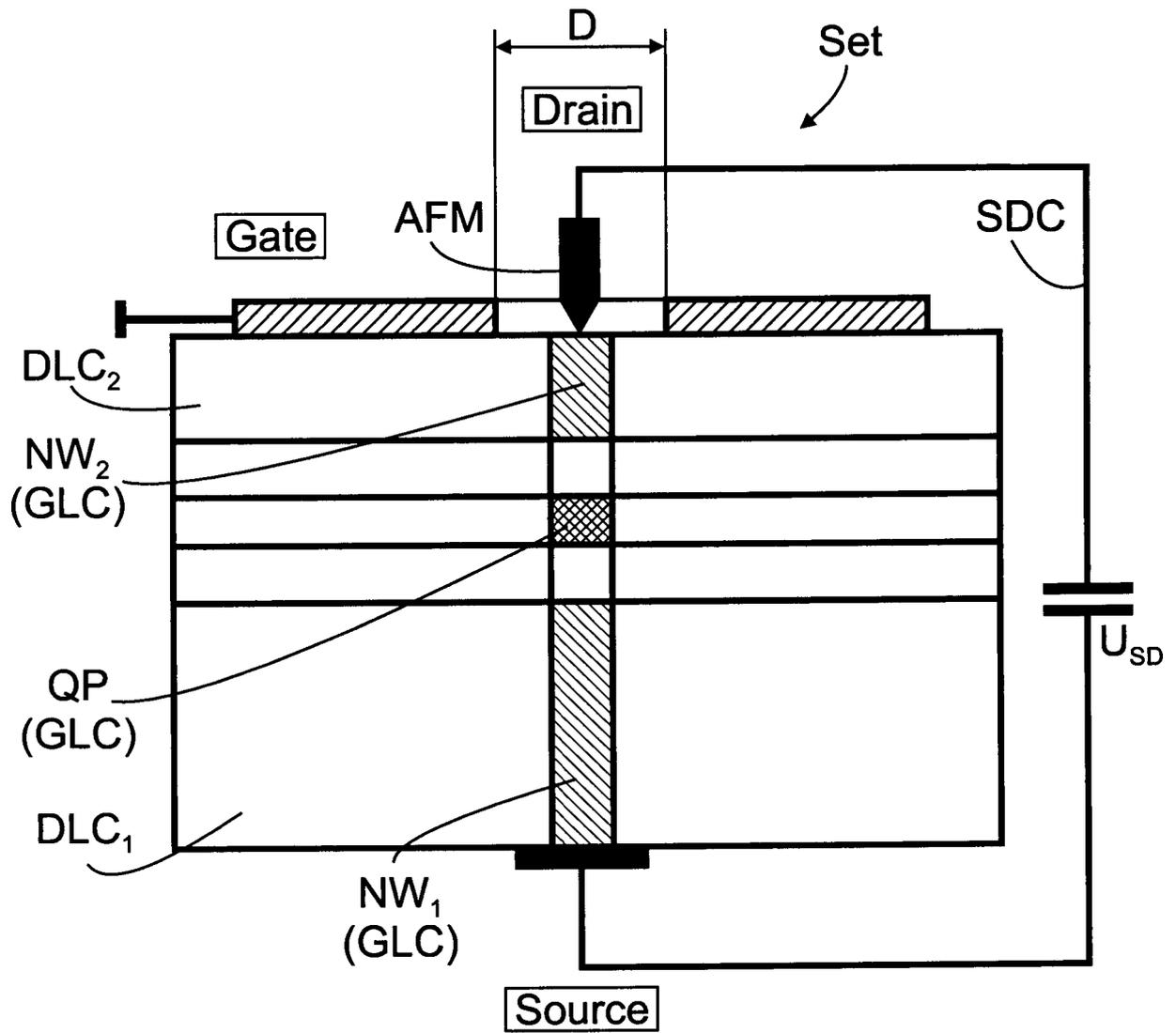


Fig.3