

46 Quantenpunkte

In winzigen Stückchen aus Silizium oder anderen Halbleitern, die nur einige Dutzend Atome breit sind, verhalten sich manche Elektronen, als seien sie an das „punktförmige“ Potenzial eines exotischen Atoms gebunden. Deshalb bezeichnet man diese Stückchen als Quantenpunkte. Genau wie ein Wasserstoffatom strahlt, wenn seine Elektronen auf ein tieferes Energieniveau springen, können Quantenpunkte leuchten. Sie lassen sich aber mit beliebiger Farbe herstellen, weshalb sie als Lichtquellen und Biosensoren interessant sind.

Der größte Teil unserer modernen Elektronik, vom Siliziumchips bis zur Germaniumdioden, besteht aus Halbleitern. Diese leiten normalerweise keinen Strom – ihre Elektronen sind innerhalb des Kristallverbunds eingesperrt. Aber mit ein wenig zusätzlicher Energie können Elektronen freigesetzt werden, sodass sie sich innerhalb des Kristalls bewegen und als elektrischer Strom fließen können.

Die Energie, die man den Elektronen zuführen muss, damit sie die Schwelle zur Beweglichkeit überschreiten, nennt man Bandlücke. Wenn Elektronen über diese Bandlücke springen können, werden sie frei beweglich und der Widerstand des Materials nimmt stark ab. Diese Flexibilität – also ihre Stellung zwischen Leiter und Isolator – macht Halbleiter so wertvoll für steuerbare elektronische Bauteile.

Die meisten konventionellen elektronischen Komponenten verwenden relativ große Stück aus Halbleitermaterial. Man kann einen Siliziumchip in die Hand nehmen oder einen Widerstand in ein Radio löten. Aber 1980 fanden Physiker heraus, dass winzige Stücke dieser Elemente sich sehr ungewöhnlich verhalten, denn dann beginnen Quanteneffekte eine Rolle zu spielen.

Winzige Bruchstücke aus Halbleiterelementen wie Silizium, die nur aus einigen Tausend Atomen bestehen, nennt man Quantenpunkte. Sie haben einen

Zeitleiste

1925

Pauli formuliert sein
Ausschlussprinzip

1981

Alexei Jekimow veröffentlicht
über quantenmechanische
Größeneffekte

1983

Louis Brus veröffentlicht über
quantenmechanische Größen-
effekte bei Halbleitern

Durchmesser von Nanometern (Milliardstel Meter), sind also so groß wie sehr große Molekül.

Weil sie so klein sind, werden die Elektronen in einem Quantenpunkt aufgrund von Quantenverbindungen korreliert. Im Wesentlichen beginnt sich die gesamte Anordnung wie ein einziges Objekt zu verhalten, daher nennt man sie manchmal „künstliche Atome“.

Weil sie Fermionen sind und dem Pauli-Prinzip gehorchen, muss sich jedes Elektron in einem anderen Quantenzustand befinden. Daraus ergibt sich eine Hierarchie der Elektronen, sodass sich im Quantenpunkt eine Reihe von neuen Energieniveaus ausbilden, etwa so wie bei den vielen Orbitalen in einem einzelnen Atom.

Wenn ein Elektron auf ein höheres Energieniveau springt, lässt es ein „Loch“ im Kristall zurück, das relativ gesehen positiv geladen ist. Das Elektronen-Loch-Paar verhält sich ähnlich wie ein Wasserstoffatom (ein Proton und ein Elektron). Und wie ein Wasserstoffatom kann der Quantenpunkt auch Photonen emittieren und absorbieren, wenn Elektronen Energiesprünge machen. So beginnt der Quantenpunkt zu leuchten.

Der durchschnittliche „Sprossen“-Abstand in der Leiter der Quanten-Energiezustände hängt von der Größe des Punktes ab und entsprechend auch die

„Die gesamte sichtbare Welt ist nur ein kleiner Ausschnitt im großen Busen der Natur.“

Blaise Pascal, 1670

Biosensoren

Viele Biologen verwenden chemische Farbstoffe, von denen manche fluoreszieren, um bei Experimenten im Labor oder der Natur Veränderungen in Organismen zu verfolgen. Manche davon haben Nachteile, zum Beispiel verfallen oder verblassen einige davon ziemlich schnell. Hier bieten Quantenpunkte einige Vorteile. Weil sie chemisch stabil sind,

halten sie länger. Und weil das Licht, das sie aussenden, in einem engen Spektralbereich liegt, kann es mithilfe von Filtern einfacher gegen einen Hintergrund aufgezeichnet werden. Quantenpunkte können zehnmal so hell und hundertmal so stabil sein, wie übliche Farbstoffe.

1988

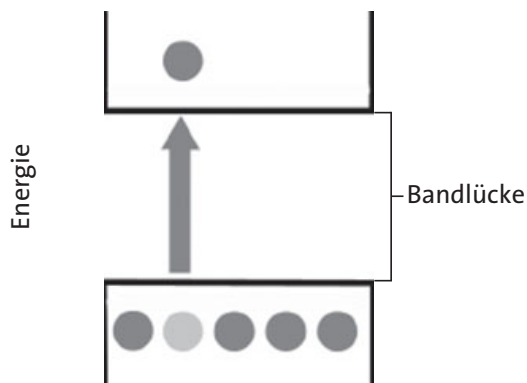
Mark Reed verwendet den Begriff „Quantenpunkt“

1990

Forscher bringen Silizium dazu, rot zu leuchten

Quantenmechanisches Confinement

Wenn die Ausmaße eines Halbleiterstücks in die Nähe der Größe der Wellenfunktion kommen, beginnen Quanteneffekte zu dominieren. Quantenpunkte verhalten sich dann wie ein einzelnes Atom, und ihre Energiebänder verschieben sich entsprechend. Dies ist unter dem Begriff quantenmechanisches Confinement bekannt.



Elektronen können auf höhere Energieniveaus springen und sich dann frei bewegen. Dadurch leuchten Quantenpunkte.

Frequenz des abgegebenen Lichts. Größere Quantenpunkte haben enger beieinanderliegende Energielücken und leuchten rot. Kleinere Punkte leuchten blau. Dies eröffnet eine Reihe von Anwendungen für Quantenpunkte als Lichtquellen, Marker und Sensoren.

Quantenpunkte bei der Arbeit Seit Langem versuchen Physiker Silizium dazu zu bringen, Licht zu emittieren. Silizium wird zum Beispiel in Solarzellen verwendet, weil Licht es leitfähig macht und einen Stromfluss anregt. Doch der umgekehrte Vorgang schien bis 1990 unmöglich. Erst dann gelang es europäischen Forschern, Silizium dazu zu bringen, aufgrund seines Quantenverhaltens rot zu leuchten.

Seitdem haben die Forscher Silizium auch dazu gebracht, grün und blau zu strahlen. Vor allem blaues Licht ist wertvoll, denn dies war lange Zeit nur im Labor unter genau definierten Bedingungen möglich. Quantenpunkte könnten

deshalb als Basis für eine neue Art blauer Laser dienen.

Quantenpunkte aus Silizium und Germanium überspannen heute das Spektrum vom infraroten bis zum ultravioletten Bereich. Ihre Farbe kann einfach über ihre Größe genau und leicht eingestellt werden. So kann die Quantenpunkt-Technologie für die Herstellung von LEDs (light-emitting Diodes) genutzt werden, die sowohl als energiesparende Lichtquelle, als auch für Computer- und Fernsehbildschirme verwendet werden. Vielleicht können Quantenpunkte eines Tages auch als Qubits für Quantencomputer und -kryptografie genutzt werden. Weil sie sich wie einzelne Atome verhalten, können ihre Zustände verschränkt werden.

Quantenpunkte können als Biosensoren verwendet werden, die schädliche Chemikalien oder Stoffe in der Umwelt aufspüren. Sie sind langlebiger als fluoreszierende chemische Farbstoffe und emittieren Licht mit genauer definierten

Die Geschichte der Halbleiterphysik handelt nicht von großen heroischen Theorien, sondern von akribischer kluger Arbeit.

Ernest Braun, 1992

Frequenzen, sodass dieses leichter zu messen ist. Auch für optische Technologien, wie sehr schnelle Schalter und logische Gatter für optische Computer und die Signalübertragung durch Glasfasern sind sie nützlich.

Herstellung von Quantenpunkten Die meisten Halbleiterbauteile werden hergestellt, indem man in recht dicke Schichten des Materials, zum Beispiel Silizium, Strukturenätzt. Quantenpunkte dagegen werden Atom für Atom aufgebaut. Weil sie derart von unten nach oben aufgebaut werden, kann ihre Struktur und Größe genau gesteuert werden. Man kann Quantenpunkte in Lösung als Kristalle wachsen lassen. Sie können in großer Menge hergestellt werden, sodass sich als Endprodukt ein Puder oder Teilchen in einer Flüssigkeit ergeben. Quantenpunkte können nicht nur aus Silizium oder Germanium hergestellt werden, sondern auch aus Legierungen von Cadmium und Indium.

Manche Forscher haben Quantenpunkte bereits verbunden und daraus mikroskopische Strukturen und Schaltkreise hergestellt. Die Netze werden durch winzige Quantendrähte verbunden. Doch es ist dabei sehr große Sorgfalt notwendig, damit die Quanteneigenschaften des Punktes erhalten bleiben. Sie können auch mit langen dünnen organischen Molekülen verknüpft werden, die chemisch mit der Oberfläche des Punktes verbunden werden. Auf diese Weise können Kristalle, Folien oder andere Anordnungen von Quantenpunkten konstruiert werden.

Worum es geht
Jetzt alle zusammen