

Coulomb Blockade und Single Electron Transistor (SET)

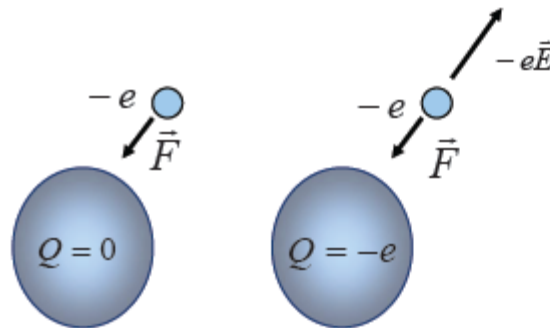
- Miniaturisierung von elektrischen und optoelektronischen Bauelementen
 - Verbesserung der Leistung von ULSIs (ultra large scale integration)
 - 1.000.000 Bauelemente pro Chip
- Bisher CMOSFETs (complementary MOSFETs) für ULSIs, aber diesen sind ab 50nm Grenzen gesetzt: Quantenmechanische Effekte
- Suche nach neuen effektiven Bauteilen mit kleineren Dimensionen

➔ SETs

(1987 von T.A. Fulton und G.J. Dolan realisiert)

Grundlagen

Konzept, um einzelne Elektronen zu kontrollieren



Kugelkondensator:

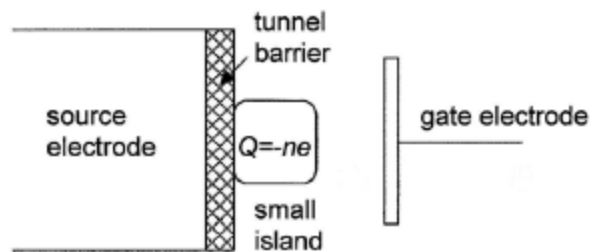
$$E = \frac{Q^2}{2C} \propto \frac{1}{R}$$

C...Kapazität

- ⇒ Abstoßendes Feld E , das verhindert, dass weitere Elektronen auf die Insel gelangen können → abstoßende Coulombbarriere
- ⇒ Energie $\Delta E = \frac{e^2}{2C}$ muss aufgewendet werden, um ein Elektron auf die Insel zu bringen oder zu entfernen

Grundlagen

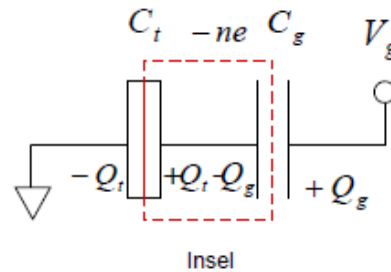
Einzel-Elektronen-Box



- kleinste funktionierende Einzel-Elektronen Anordnung: kleine Insel verbunden mit zwei Elektroden
- Eine Elektrode ist durch einen Tunnelübergang mit der Insel verbunden
- Die Gate-Elektrode ist über einen Isolator, durch den die Elektronen **nicht** tunneln können, mit der Insel kontaktiert

➡ Aufnahme und Abgabe der Elektronen über Tunnelbarriere

Grundlagen



- Minimale Energie, um die Insel aufzuladen oder zu entladen

$$E = \frac{Q^2}{2C} \gg k_B T$$

C ... Gesamtkapazität

Beispiel:

Radius der Insel sei $R < 1 \mu\text{m}$

dann folgt für die Kapazität $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r R \approx 10^{-15} \text{ F}$ mit $\epsilon_r = 10$

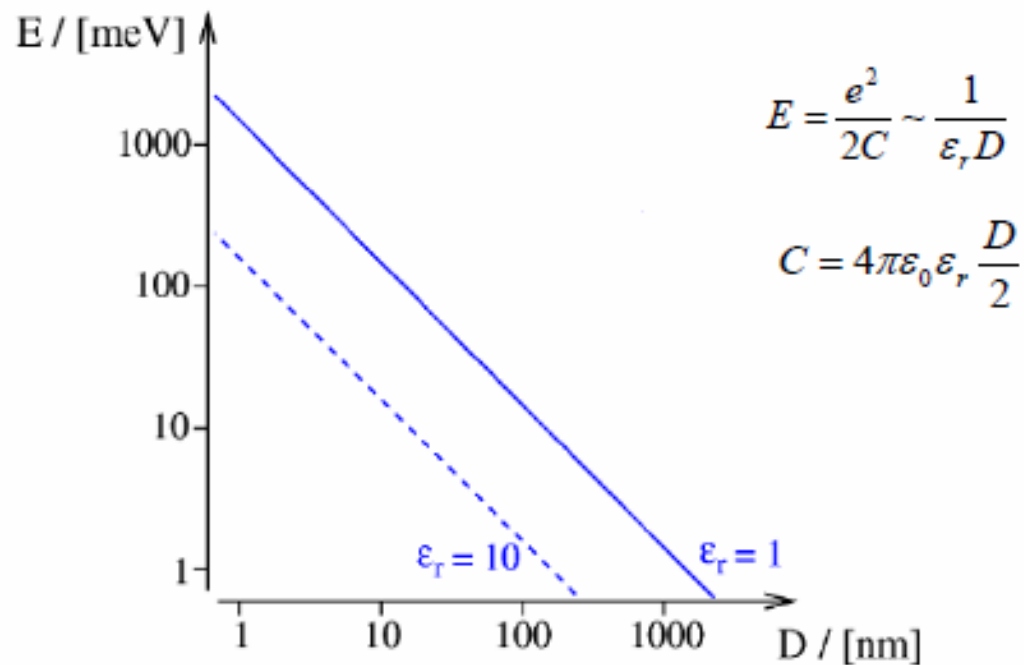
⇒ Die thermische Energie wird bei 4K unterschritten

⇒ Sollen Messungen bei RT (300K) durchgeführt werden

$$C < 10^{-18} \text{ F} \rightarrow R < 2 \text{ nm}$$

Grundlagen

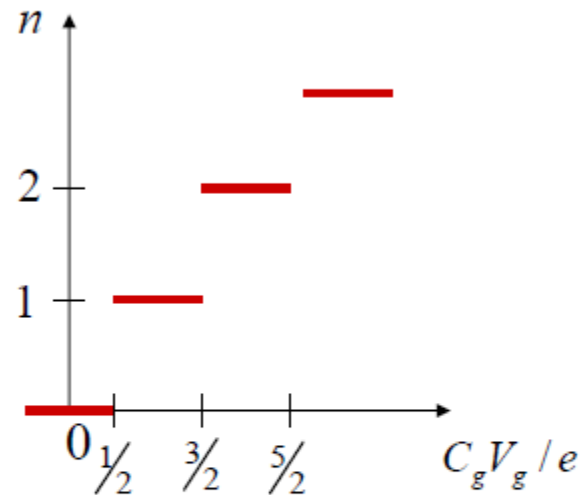
Coulomb Charging Energy vs. Island Diameter D



J. Weis, "Coulomb Blockade and Single-Electron Charging Effects, Electrical Transport through Quantum Dots (Part1: The Basics)", MPI Stuttgart

Grundlagen

Coulomb-Treppe



- Anzahl der Elektronen n auf der Insel nimmt mit steigender Gatespannung zu
- Anzahl der Elektronen kann kontrolliert werden
- Der Auflade-Effekt, der die Aufnahme oder Abgabe eines Elektrons verhindert, heißt **Coulomb-Blockade**

Grundlagen

Bedingungen für das Tunneln von einzelnen Elektronen

- Ladungsenergie muss viel größer als die thermische Energie sein
- Für Tunnelwiderstand R_t der Barriere gilt: $\Delta E \cdot \Delta t \sim \frac{e^2}{C} \cdot R_t C = e^2 R_t > h$

$$R_t \gg \frac{h}{e^2} = 25,8 \text{ k}\Omega$$

Bedingungen für den Coulomb-Blockade-Effekt

- Spannungsbereich, in welchem die Coulomb-Blockade wirkt und die Anzahl der Elektronen n auf der Insel konstant ist

$$\left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{e}{C_g} < V_g < \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{e}{C_g}$$

Herstellung

- SETs können aus Metall oder Halbleitern hergestellt werden
 - 2 Prozesse: **Lithographie** oder **Wachstum** über Abscheideprozesse
- ➔ Es ist möglich, Struktur und Position von den Inseln zu bestimmen

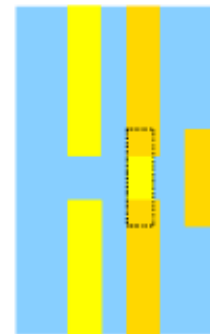
Metallischer SET

Material: Aluminium

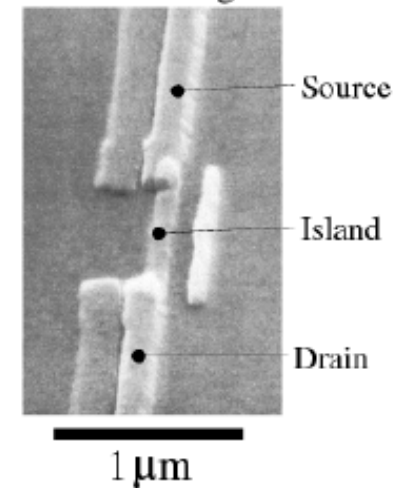
Prozessschritte:

Elektronenstrahlolithographie + Ätzprozesse + Schrägschattenbedampfung

Metal Structure



SEM Image



J. Weis, "Coulomb Blockade and Single-Electron Charging Effects, Electrical Transport through Quantum Dots (Part1: The Basics)", MPI Stuttgart

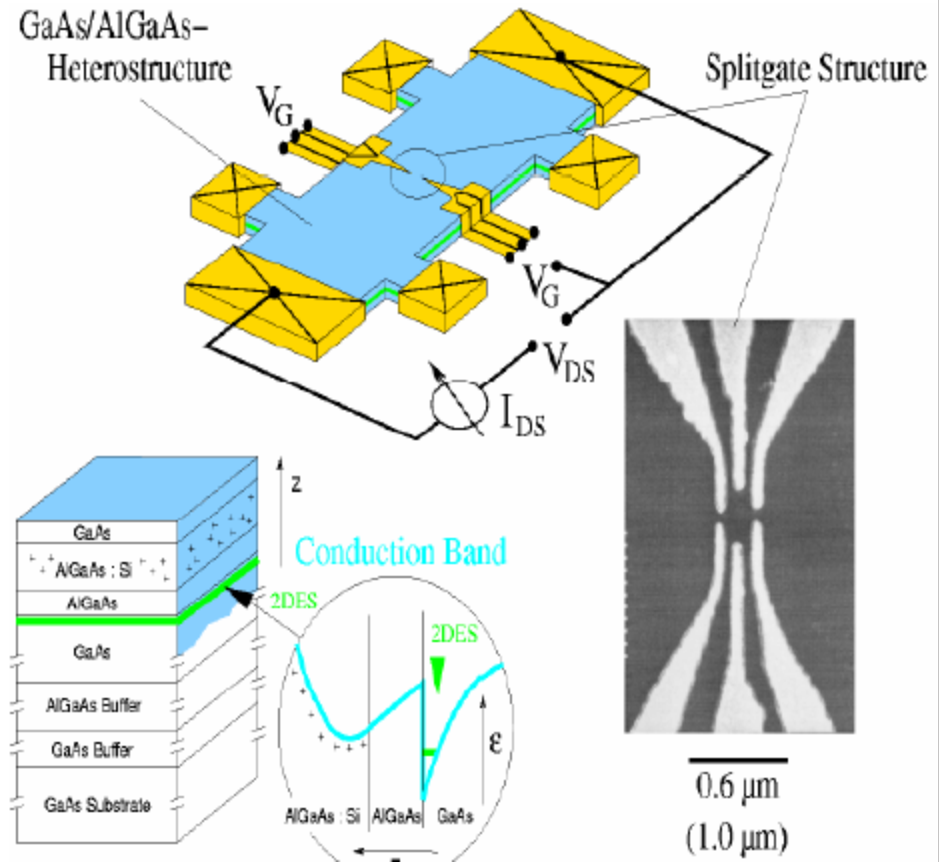
Herstellung

Halbleiter SET

Material: Heterostruktur GaAs/
 AlGaAs, 2DEG

Prozessschritte:

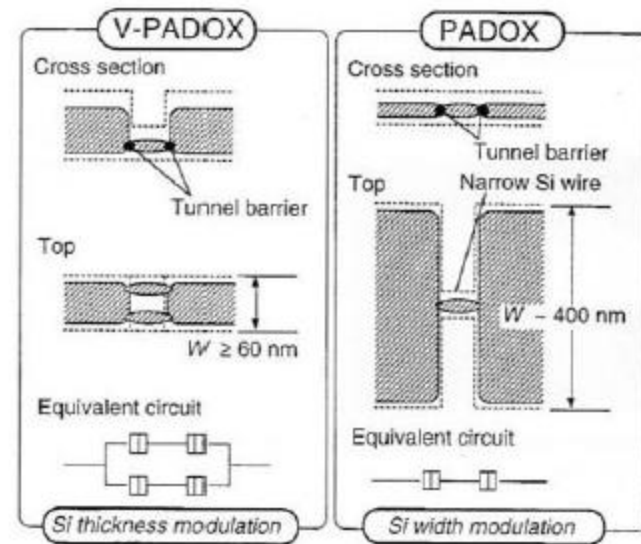
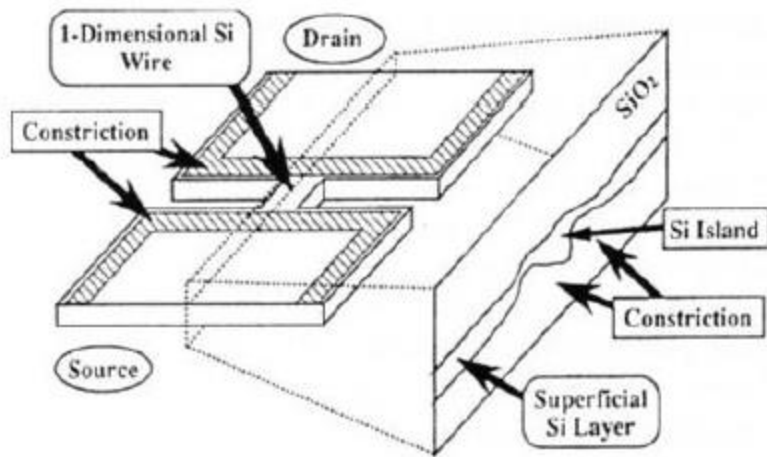
Wachsen einer Heterostruktur +
 Aufdampfen der metallischen
 Kontakte (Source, Drain,
 Splitgateelektroden)



J. Weis, "Coulomb Blockade and Single-Electron Charging Effects, Electrical Transport through Quantum Dots (Part1: The Basics)", MPI Stuttgart

Herstellung

PADOX (pattern-dependent oxidation), Methode zur Si-Quantenpunkt Herstellung

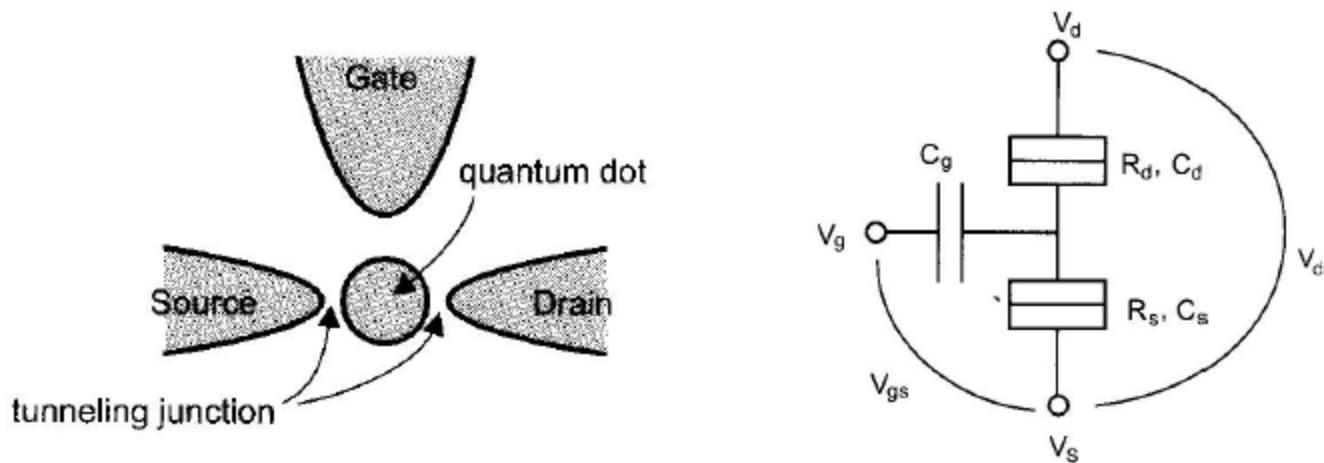


R. Waser, „Nanoelectronics and Information Technology“, 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.

Aufbau

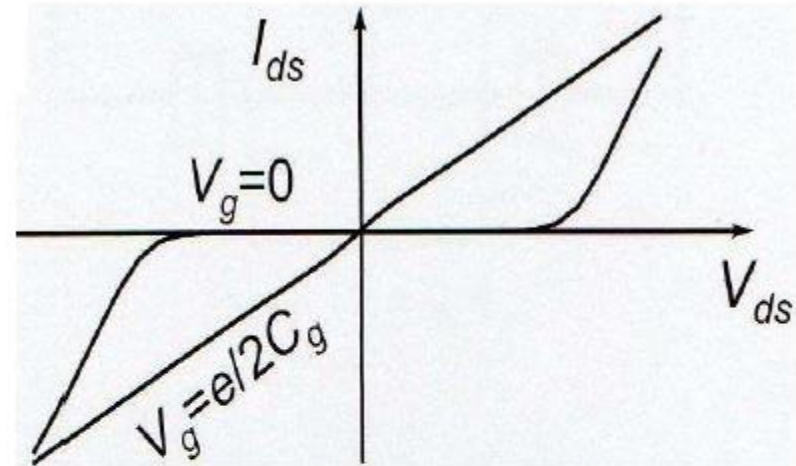
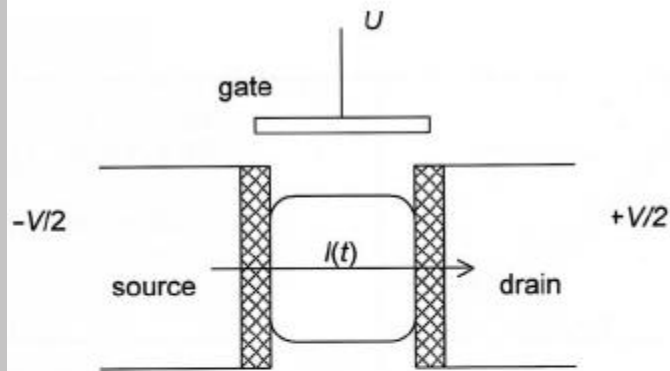
Einzelelektronen-Transistor (SET)

SETs sind schaltbare Bauelemente mit 3 Kontakten, die einzelne Elektronen von Source zu Drain transportieren können



R. Waser, „Nanoelectronics and Information Technology“, 2005vWILEY-VCH Verlag GmbH & Co.

I-V Charakteristik



- Strom I_{ds} kann über die Gatespannung V_{gs} und Source-Drain-Spannung V_{ds} gesteuert werden

I-V Charakteristik

Source-Drain-Strom kann über die Tunnelrate eines Elektrons durch die Tunnelbarriere beschrieben werden

$$\Gamma(n, n+1) = \frac{1}{e^2 R_t} \cdot \frac{\Delta F(n, n+1)}{1 - \exp[-\Delta F(n, n+1)/k_B T]}$$

- Mit der Energieänderung des Systems $\Delta F(n, n+1)$, die das Tunneln begleitet, und dem Tunnelwiderstand R_t
- Mit der Wahrscheinlichkeit p_n n Elektronen auf der Insel zu finden, ergibt sich für den Strom I eines SET:

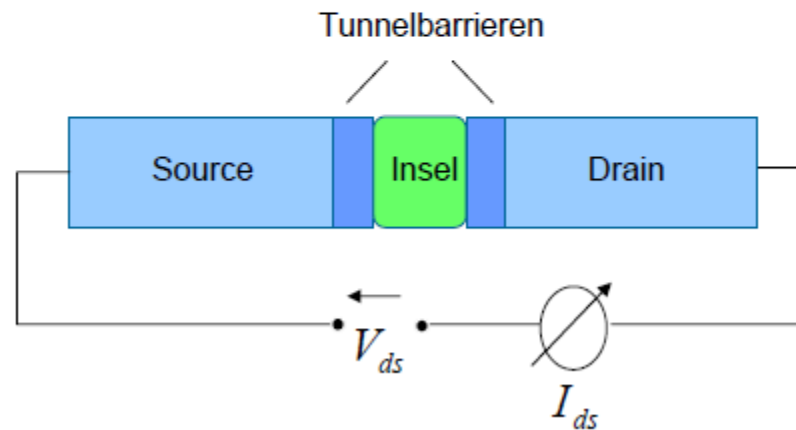
$$I = e \sum p_n [\Gamma_s(n, n+1) - \Gamma_d(n, n+1)]$$

Tunnelrate der Barriere von Source $\Gamma_s(n, n+1)$ und Drain $\Gamma_d(n, n+1)$

I-V Charakteristik

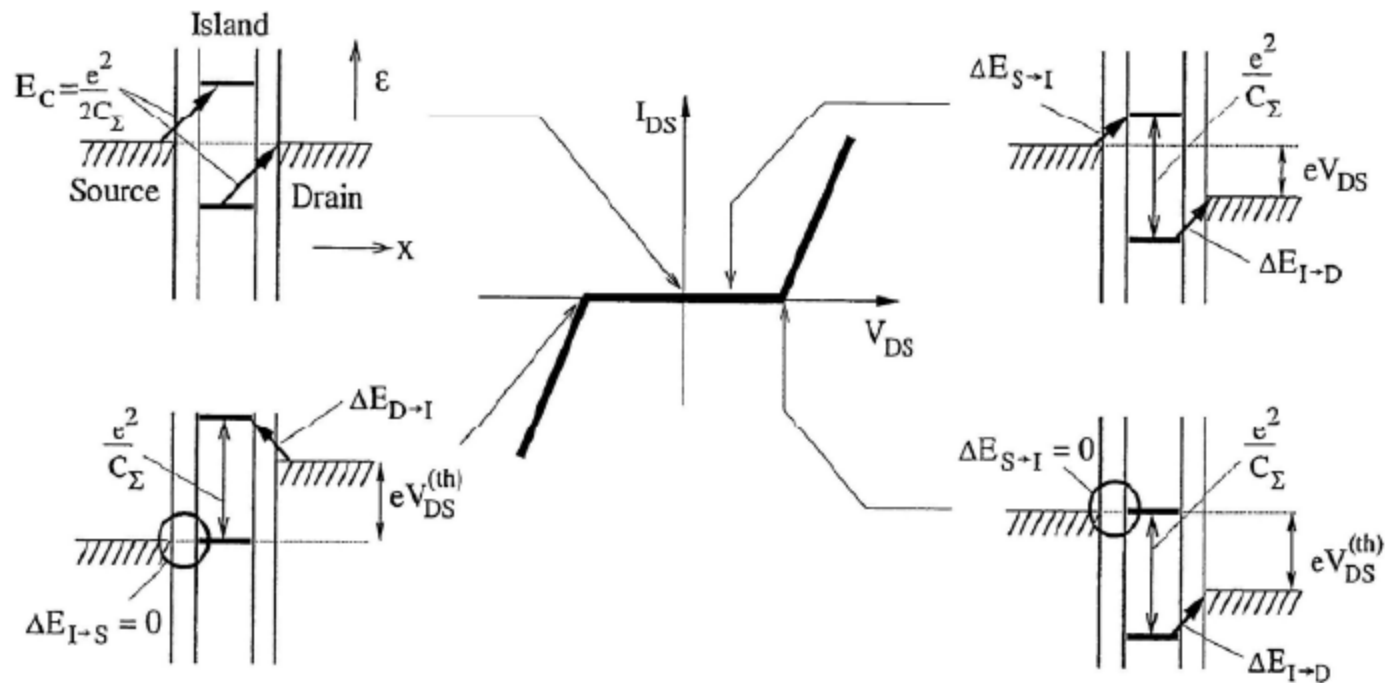
2-Kontakt Anordnung:

- Insel ist über 2 Tunnelbarrieren mit Elektroden verbunden
- Steuerung des Stroms über Source-Drain-Spannung V_{ds}



I-V Charakteristik

2-Kontakt Anordnung

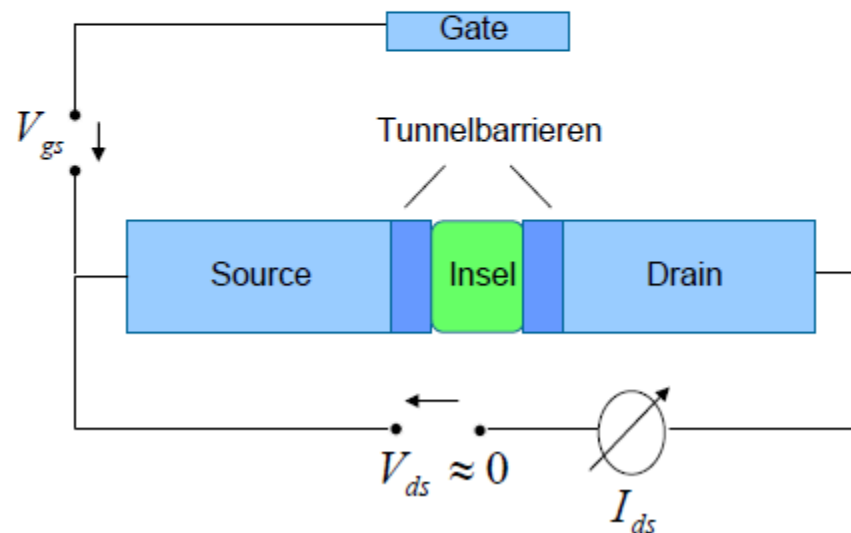


→ Wenn Energiedifferenz zw. Source und Drain = 0 ist, fließt ein Strom

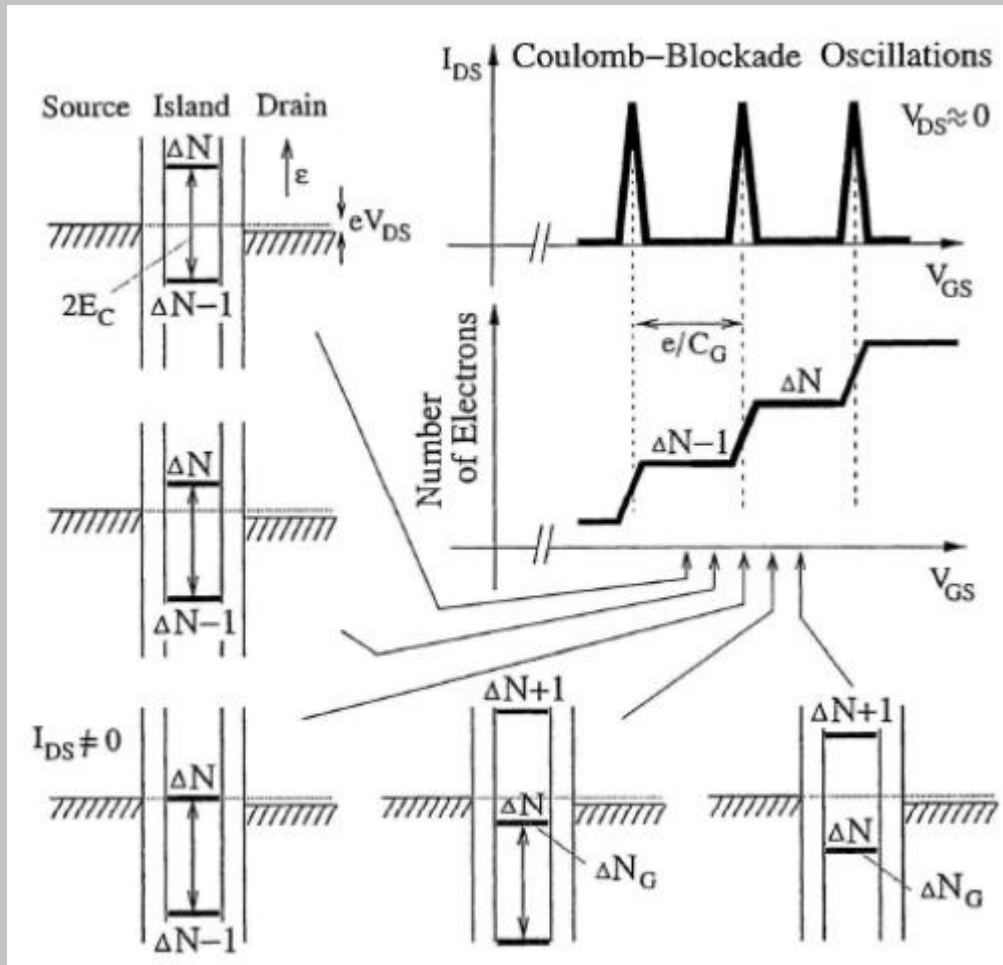
I-V Charakteristik

3-Kontakt Anordnung:

- Gate-Kontakt wird hinzugeführt
- Steuerung des Stroms über Source-Drain-Spannung V_{ds} und Gatespannung V_{gs}



I-V Charakteristik



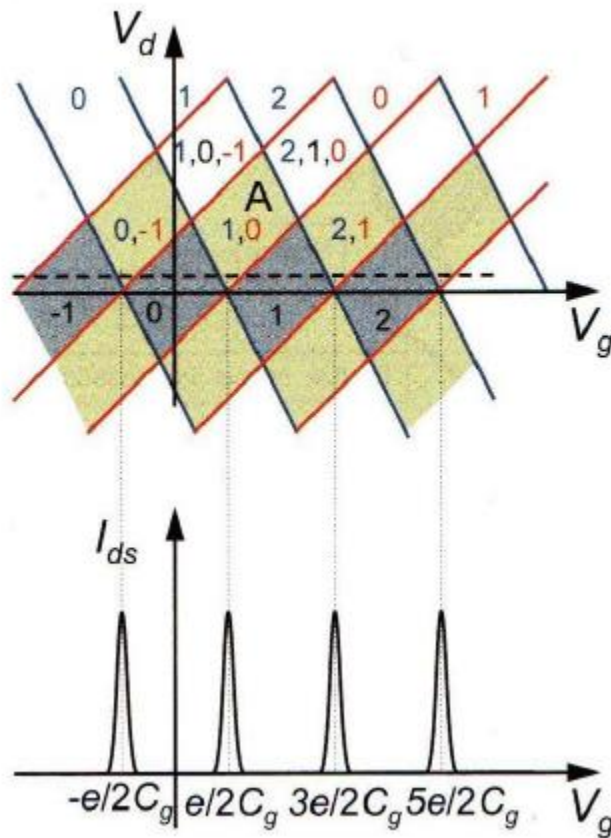
3-Kontakt Anordnung:

Steuerung des Stroms
über die Gatespannung

→ Strom oszilliert periodisch
mit der Gatespannung

I-V Charakteristik

Diamant-Diagramm:



Annahme:

Anfangszahl der Elektronen auf der Insel ist 0

- Graue Regionen:

Coulomb Blockade aktiv, Elektronenanzahl auf der Insel konstant

- Andere Regionen, z.B. gelbe Region (A):

Elektronenanzahl auf der Insel ist 1 oder 0

(vorzugsweise 1 für die Tunnelbarriere von Source, 0 für den Tunnelübergang zum Drain)

← **Coulomb-Oszillationen**

Literatur

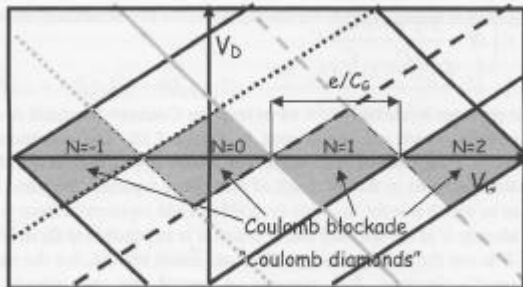


Figure 7.10. The SET Coulomb blockade areas in the (V_D, V_G) plane

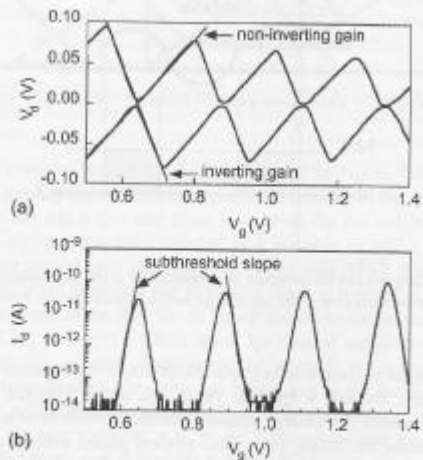
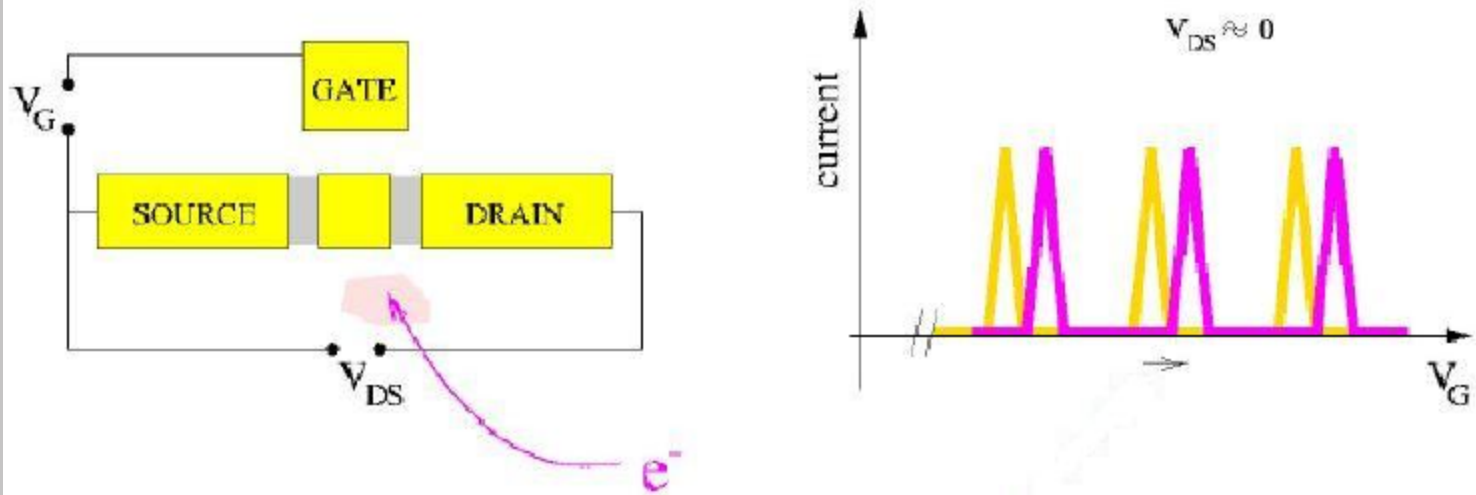


Figure 7.12. Electrical characteristics of a silicon SET operated at $T=27K$. In (a) the Coulomb diamonds are obtained by measuring the output drain voltage for a fixed current threshold of ± 10 pA. In (b) the periodic current oscillations are measured for $V_D=10$ mV. Reproduced with permission from [TAK 02], copyright (2002) by IOP Publishing Ltd

Anwendung

Anwendungen: Elektrometer, Spannungssignal-Verstärker, elektrostatischer Sensor, Stromgleichrichter, unvergänglicher Datenspeicher

SET als Elektrometer:



→ Wird ein Elektron in die Nähe der Insel gebracht, bewirkt dieses eine Verschiebung in der Stromcharakteristik des SETs

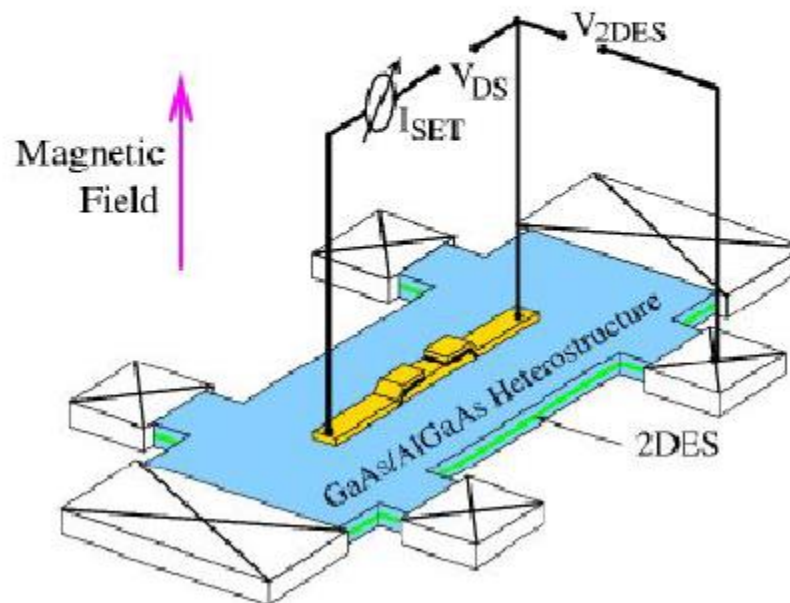
→ *Sensitivität:* $8 \cdot 10^{-5} \frac{e}{Hz}$

J. Weis, "Coulomb Blockade and Single-Electron Charging Effects, Electrical Transport through Quantum Dots (Part1: The Basics)", MPI Stuttgart

Anwendung

SET als Elektrometer

SETs können als präzise Elektrometer eingesetzt werden, mit denen Ladungs -und Potentialänderungen festgestellt werden können, z.B. Nachweis der lokalen Leitfähigkeit im 2DEG



SET-Elektrometer auf eine Heterostruktur aufgebracht

J. Weis, "Coulomb Blockade and Single-Electron Charging Effects, Electrical Transport through Quantum Dots (Part1: The Basics)", MPI Stuttgart

Vor- und Nachteile

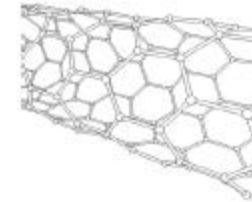
- Vorteile:**
- Niedriger Leitungsverlust und gute Skalierung
→ Zukunft für LSI-Elemente
 - Einzelne Elektronen können kontrolliert werden
 - Komplementäre Logik kann auf nur einer Anordnung eingesetzt werden

- Nachteile:**
- Sehr empfindlich gegenüber externen Ladungen, die die Insel umgeben und schlecht kontrollierbar sind
 - Operationen von SET-Schaltkreisen sind auf niedrige Temperaturen begrenzt
 - Um SET bei RT betreiben zu können, müssen Inseln kleiner als 10nm sein → schwierige Herstellung

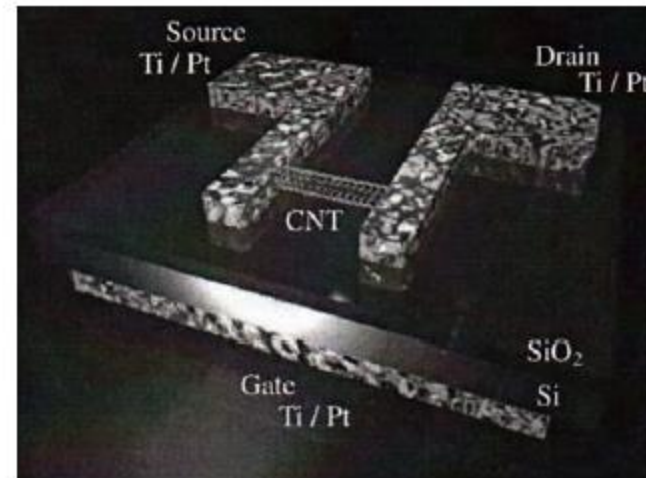
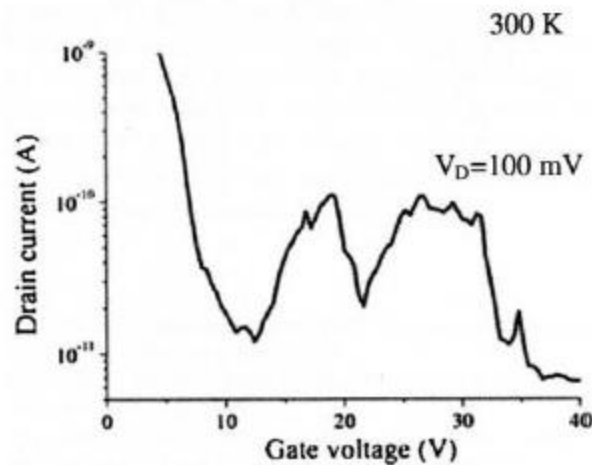
Künftige Anwendungen

Welche Strukturen können noch Strom leiten?

→ Fullerene



⇒ Room-Temperature Carbon Nanotube Single-Electron Transistor (CNT-SET)



M. Maeda, S. Iwasaki, T. Kamimura, K. Murata, K. Matsumoto, J. Appl. Phys. **47**, No. 7, (2008)

Zusammenfassung

- ⇒ Transport durch einen QD wird durch die Coulomb-Blockade und das Einzelelektron-Tunneln dominiert
- ⇒ SET steuert die Bewegung einzelner Elektronen
- ⇒ Sehr kleine Größe und sehr geringe Leistungsverluste
- ⇒ SETs können in Logikschaltungen eingesetzt werden
- ⇒ Herstellung und Anwendung bei RT relativ kompliziert

Literatur

- R. Waser, „Nanoelectronics and Information Technology“, 2005vWILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- S.M. Sze, „Physics o semiconductor devices“, John Wiley & Sons, New York, 2007
- K.K. Likharev, Proc. IEEE **87**,pp.606-632, (1999)
- J. Weis,“Coulomb Blockade and Single-Electron Charging Effects, Elektrical Transport through Quantum Dots (Part1: The Basics)“, MPI Stuttgart
- R. Kelsall, I. Hamley, M. Geoghegan, „Nanoscale Science and technology“, John Wiley & Sons, New Yörk, 2005
- J. Huels, J.Weis, J. Smet, K. v. Klitzing, Phys. Rev. B **69**, 085319 (2004)
- Y.Y. Wie, J. Weis, K. v. Klitzing, K. Eberl, Phys. Rev. Lett. **81**, 8 (1998)
- H.T. Chou, D. Goldhaber-Gordon, S. Schmult, M.J. Manfra, A.M. Sergent, R.J. Molnar, Appl. Phys. Lett. **89**, 033104 (2006)
- Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, J.S. Tsai, Appl. Phs. Lett. **76**, 16 (2000)
- M. Maeda, S. Iwasaki, T. Kamimura, K. Murata, K. Matsumoto, J. Appl. Phys. **47**, No. 7, (2008)