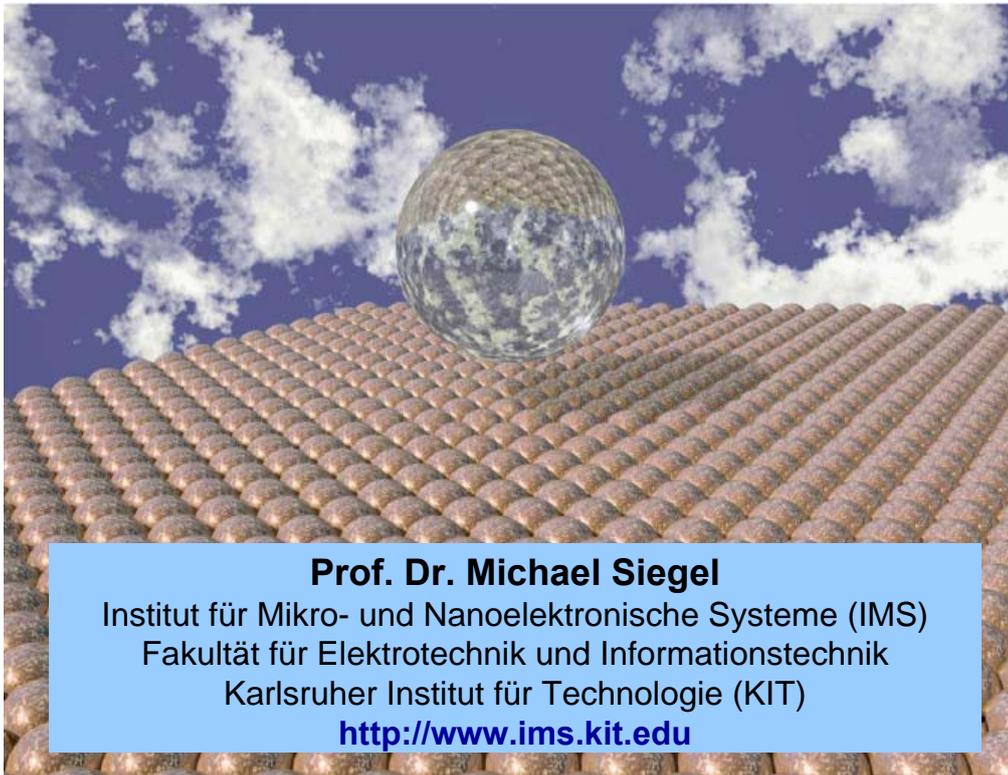


Nanoelektronik



Prof. Dr. Michael Siegel
Institut für Mikro- und Nanoelektronische Systeme (IMS)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
<http://www.ims.kit.edu>



Institut für Mikro- und Nanoelektronische Systeme 

Organisatorisches

Prof. Dr. Michael Siegel
e-Mail: michael.siegel@kit.edu
Tel.: 0721-608 44961

Termine:

Vorlesung: Mittwoch 11.30 – 13.00 Uhr (kleiner HS ETI)

Dateien zur Vorlesung: <http://www.ims.kit.edu>

Lehrveranstaltungen

Vorlesung⇒ Folien-Kopien

Alle Dateien sind nur mit Passwort zu entzippen:

nano_____



Institut für Mikro- und Nanoelektronische Systeme 

Inhaltsverzeichnis (I)

1. Einleitung

- 1.1. Das Moore'sche Gesetz
- 1.2. ITRS - Roadmap
- 1.3. Grenzen der Roadmap
- 1.4. Roadmap und Nanoelektronik
- 1.5. Nano – Visionen
- 1.6. Perspektive der nanoelektronischen Bauelemente

2. Potenzial der Silizium-Technologie

- 2.1. Grenzen der klassischen Technologie
- 2.2. Skalierung von MOSFETs
- 2.3. Grenzen: Elektrostatik, Tunneleffekt, Leistungsumsatz
- 2.4. Neue ultimative MOSFETs

Inhaltsverzeichnis (II)

3. Welle – Teilchen – Dualismus der Elektronen

- 3.1. Elektronen als Wellen – Elektronen im Potentialtopf
- 3.2. Elektronenladung als Teilchen – Einzelelektronen – Effekte

4. Nanoelektronische Bauelemente

- 4.1. Einzelelektronentransistor
- 4.2. Resonante Tunneldioden
- 4.3. Supraleitende Nanostrukturen (Detektoren, Josephson-Kontakte)

5. Nanostrukturierung

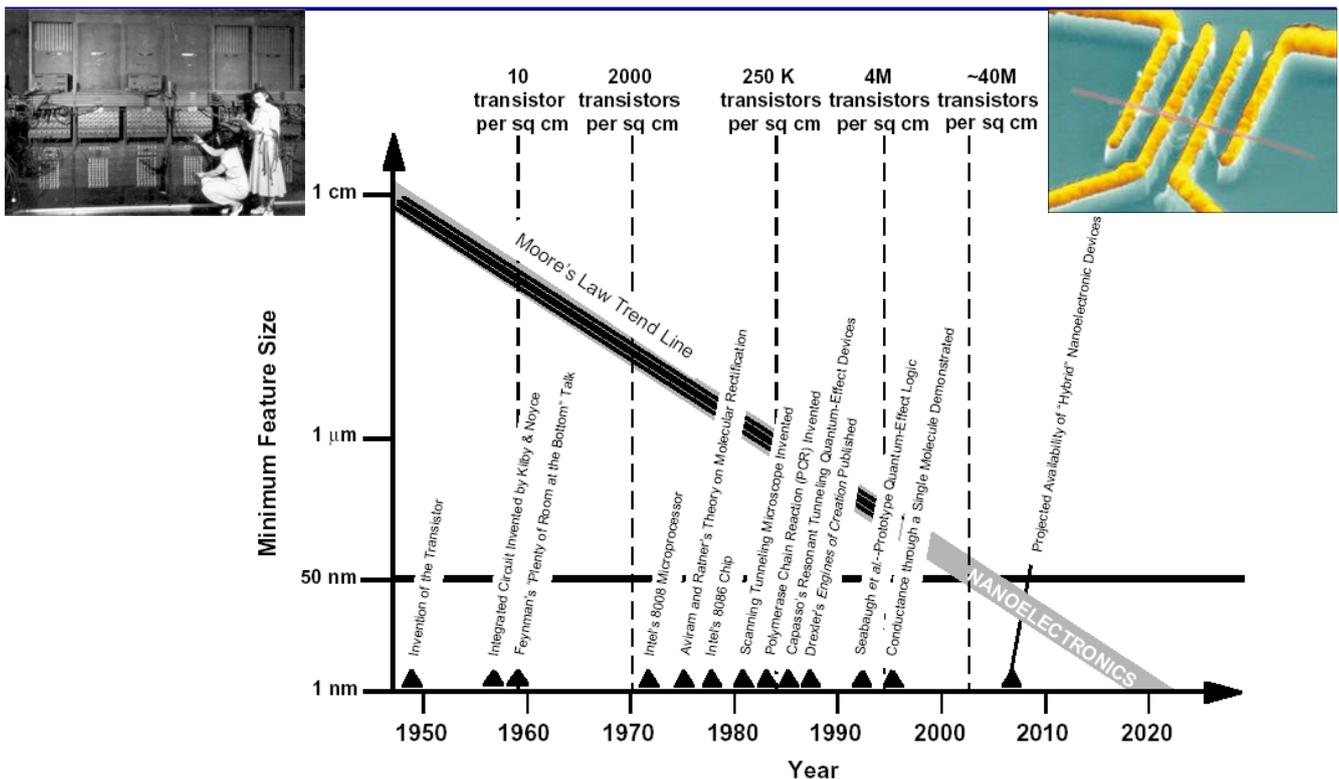
- 5.1. Lithografie für CMOS-Technologie (DUV, e-Lith)
- 5.2. Nanoimprint-Verfahren
- 5.3. Rasterverfahren (Top-down)
- 5.4. Self-Assembly (Bottom-up)

Inhaltsverzeichnis (III)

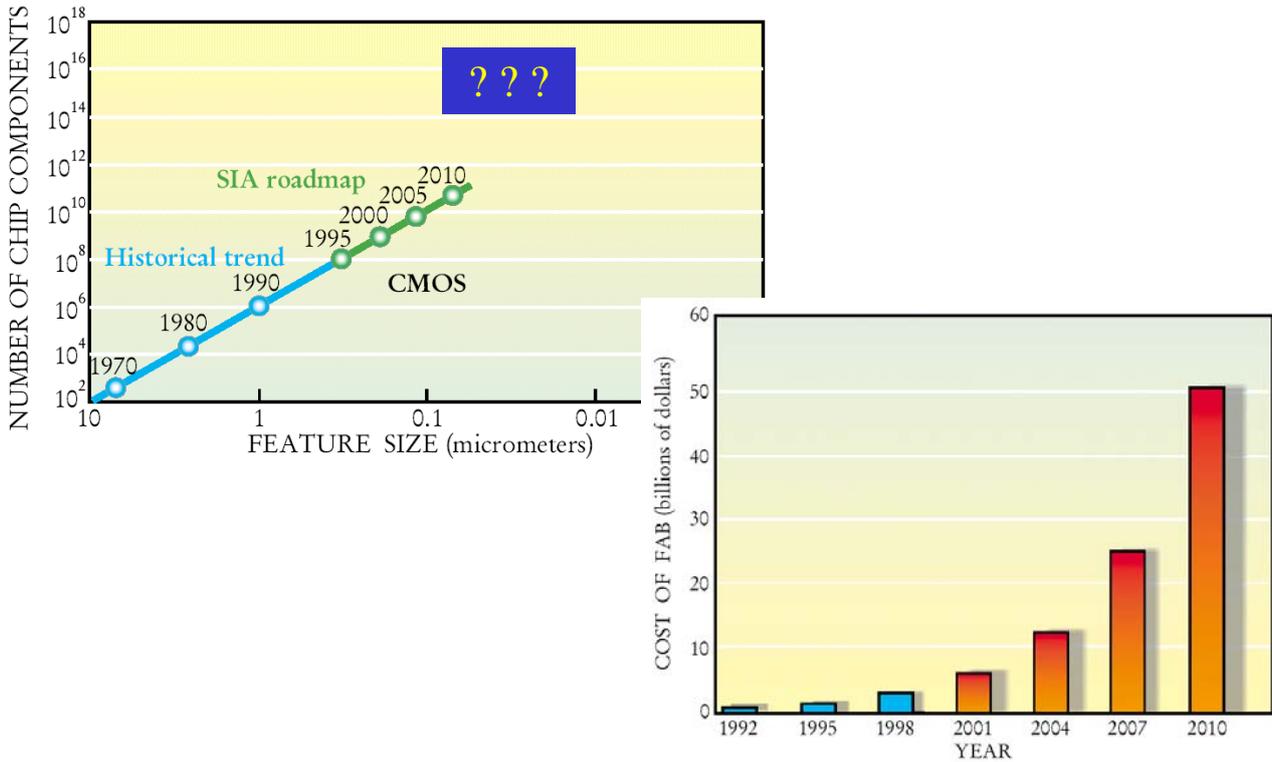
6. Qubits

- 6.1. Bit und Qubit
- 6.2. Kriterien für Qubits
- 6.3. Qubits mit Josephson-Kontakten

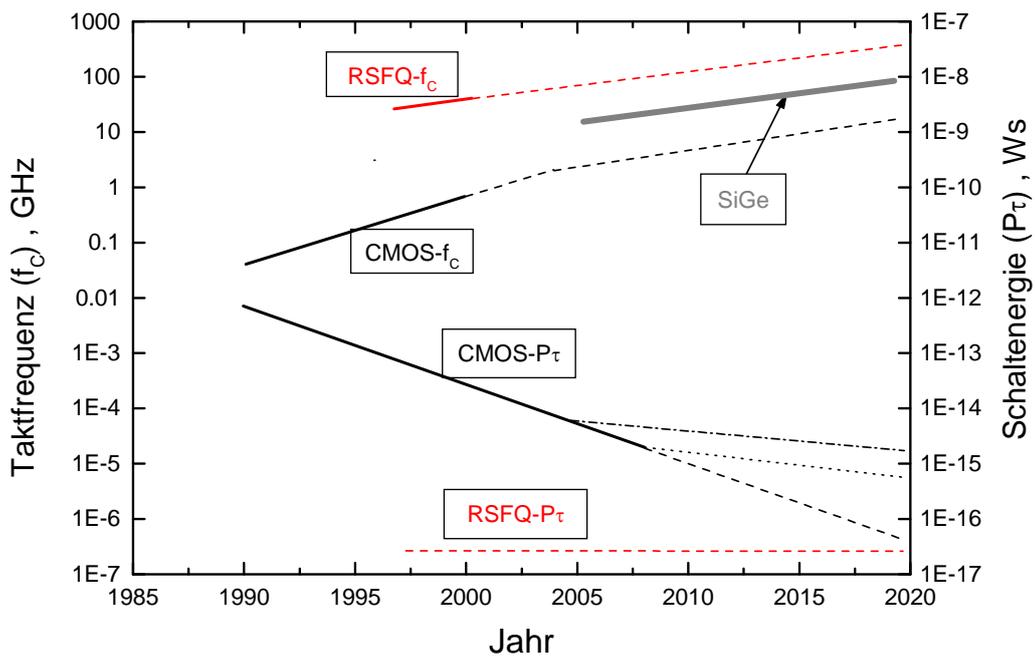
1.1. Das Moore'sche Gesetz



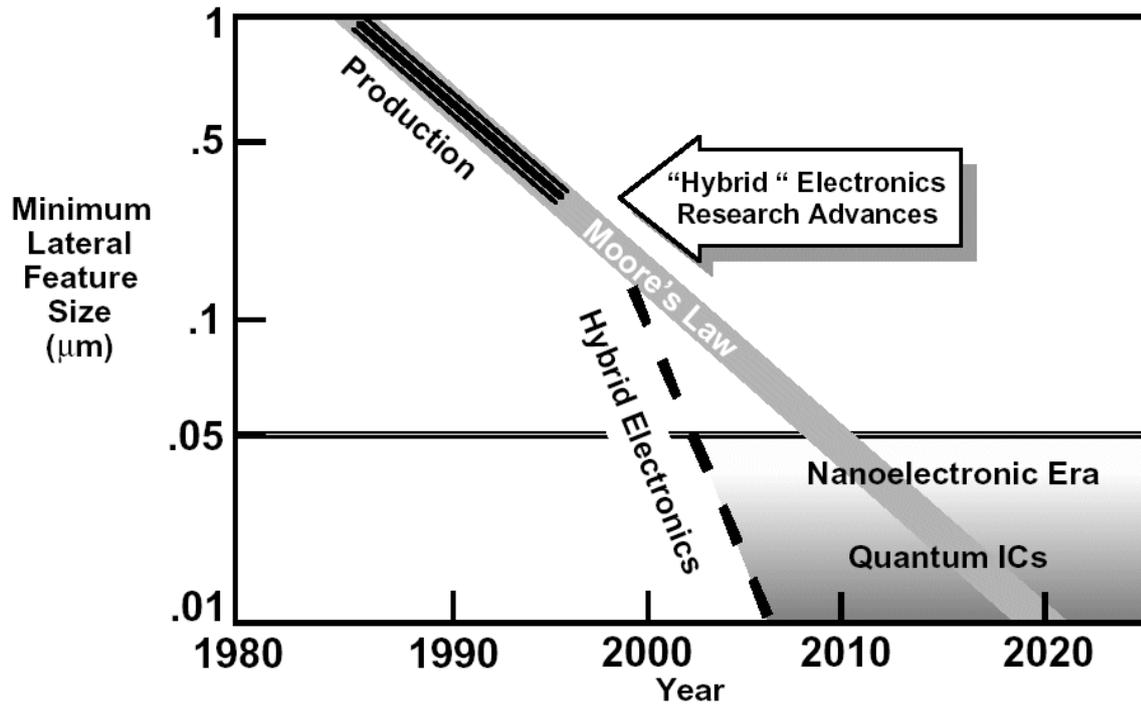
1.2. ITRS - Roadmap



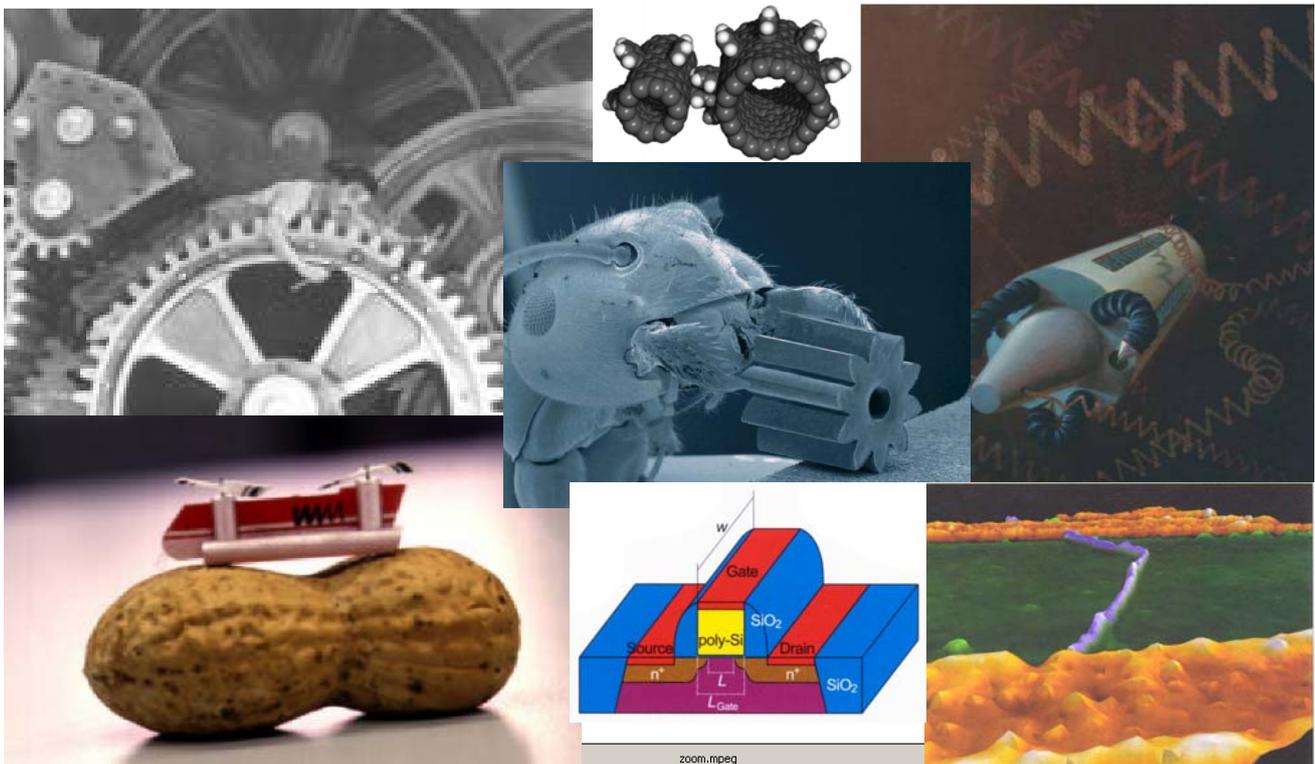
1.3. Grenzen der Roadmap



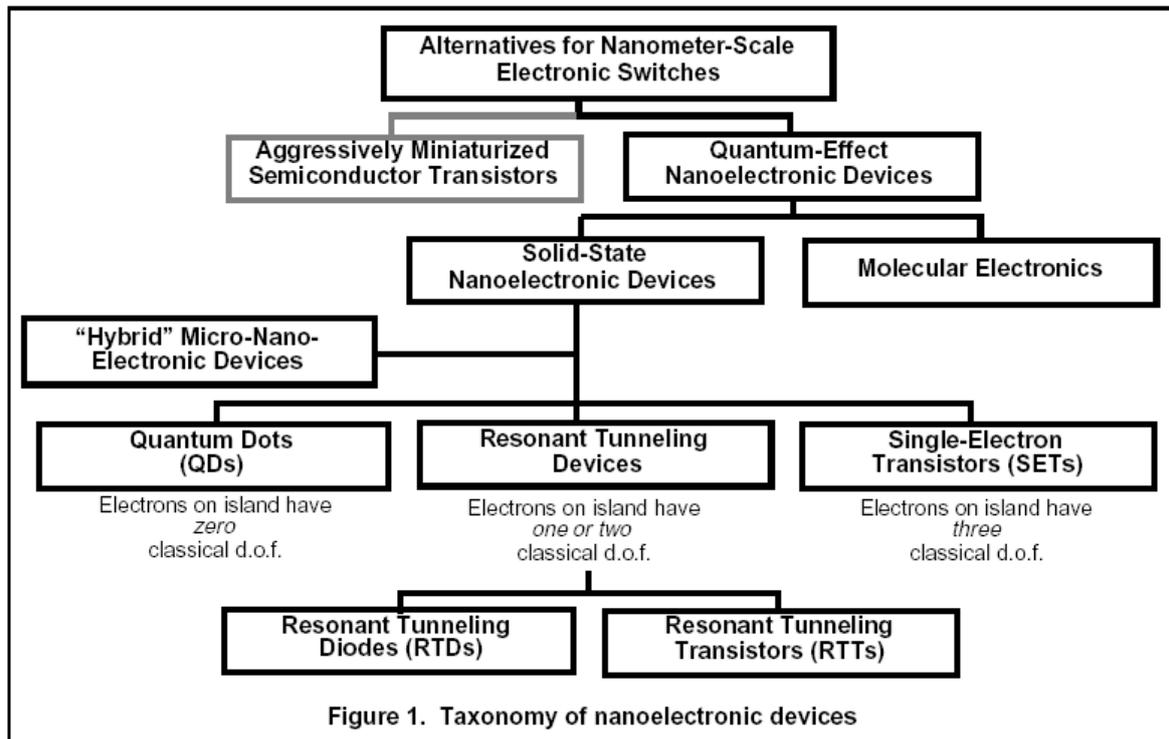
1.4. Roadmap und Nanoelektronik



1.4. „Nano – Visionen“



1.5. Perspektive der nanoelektronischen Bauelemente



2. Potenzial der Silizium-Technologie

2.1. Fundamentale Grenzen

Fundamentale physikalische Grenzen: (I) Thermodynamik
(II) Quantenmechanik
(III) Elektromagnetismus

(I) Thermodynamische Grenzen

Mittlere Schaltenergie für eine logische Operation: $W_d = P_d \cdot t_d$

Minimale Energie für binäre Operation:

$$W_{TD,\min} = k_B \cdot T \cdot \ln 2 \approx 3 \cdot 10^{-21} \text{Ws} / \text{bOp}$$

d.h. ein Bit verschwindet nicht – die adäquate Energie wurde in einen anderen Teil des „Raumes“ verschoben.

2.1. Fundamentale Grenzen (I)

(II) Quantenmechanische Grenzen

Heisenberg'sche Unschärferelation:

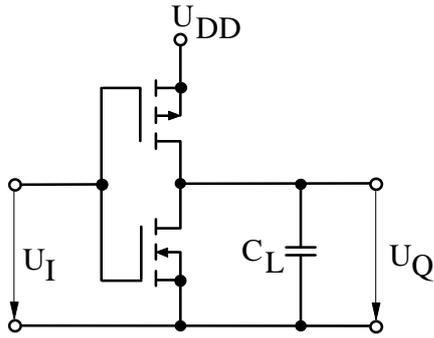
$$W_{QM,\min} \equiv \Delta W \geq \frac{h}{\Delta t}$$

d.h. ein Quantenzustand benötigt eine minimale Zeit um sich im Raum einzuschwingen:

$$\Delta t = \frac{h}{\Delta W}$$

2.1. Fundamentale Grenzen (II)

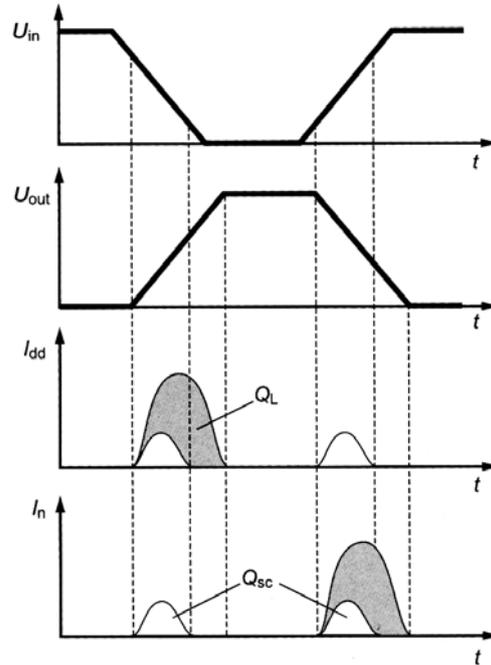
(II) Elektromagnetische Grenzen (Kapazitäten)



$$C_L = C_{out} + C_{con} + C_{in}$$

$$P_d = P_{dyn,CL} + P_{dyn,SC} + P_{stat}$$

$$P_{dyn,CL} = 0.5 \cdot f \cdot C_L \cdot U_{DD}^2$$

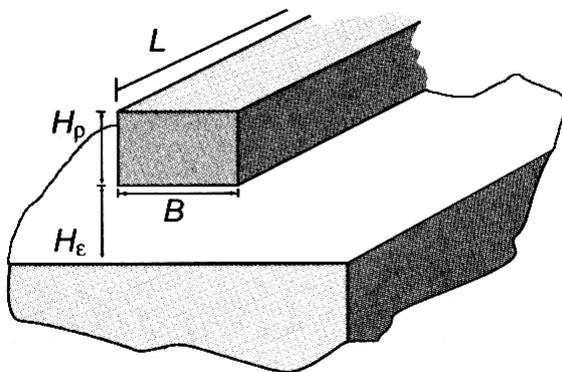


2.1. Fundamentale Grenzen (III)

(II) Elektromagnetische Grenzen (Verbindungsleitungen – Interconnects)

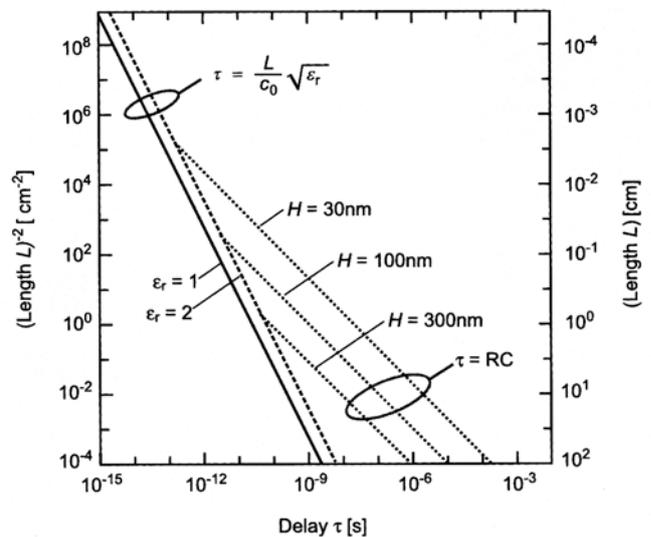
Lichtgeschwindigkeit

$$\tau = \frac{L}{c_0} \sqrt{\epsilon_r}$$

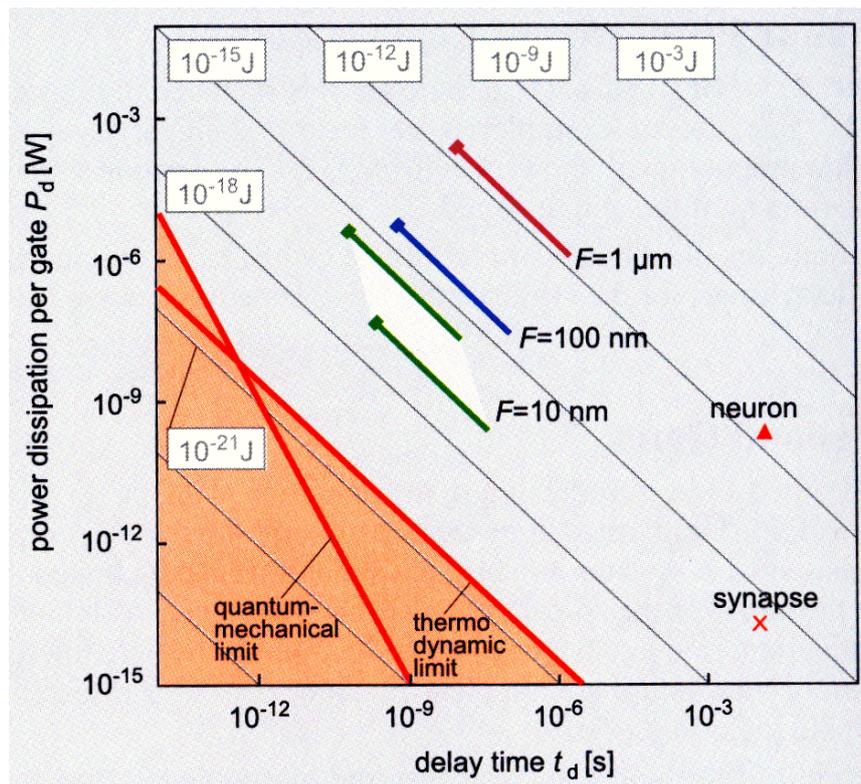


Laufzeit der Signale

$$\tau = \alpha \cdot R \cdot C = \alpha \cdot r \cdot c \cdot L^2$$

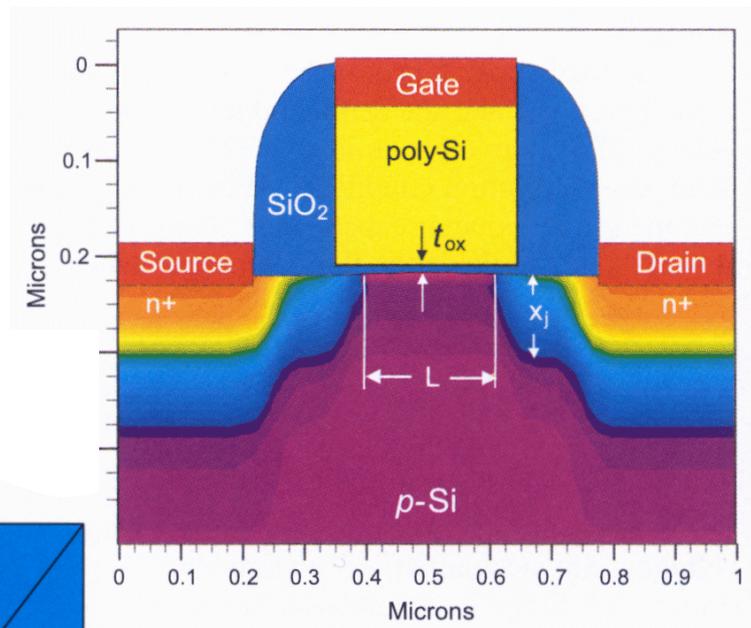
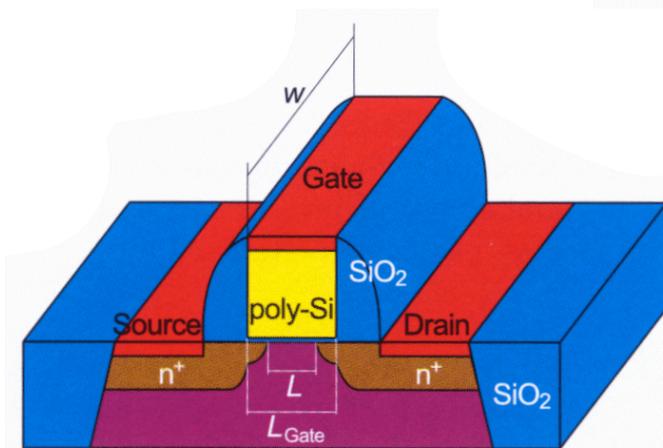


2.1. Fundamentale Grenzen (IV)



2.2. Skalierung von MOSFETs

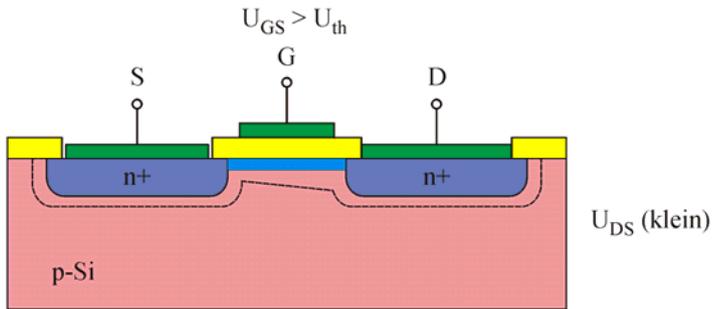
Querschnitt



Simulation

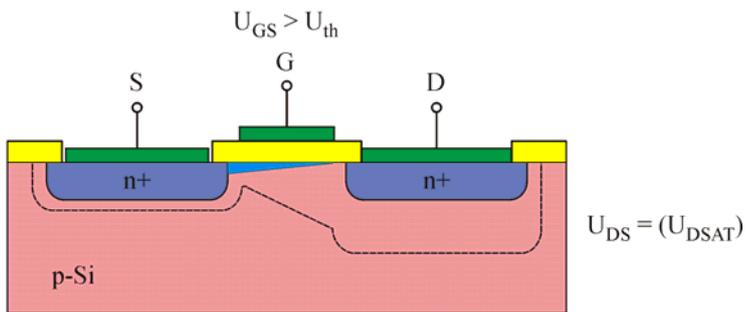
2.2.1. Skalierung: Klassische MOSFETs

Drainstrom in der Sättigung



$$I_D = \frac{1}{2} \mu_{eff} \cdot C_{ox} \cdot \frac{w}{L} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2$$

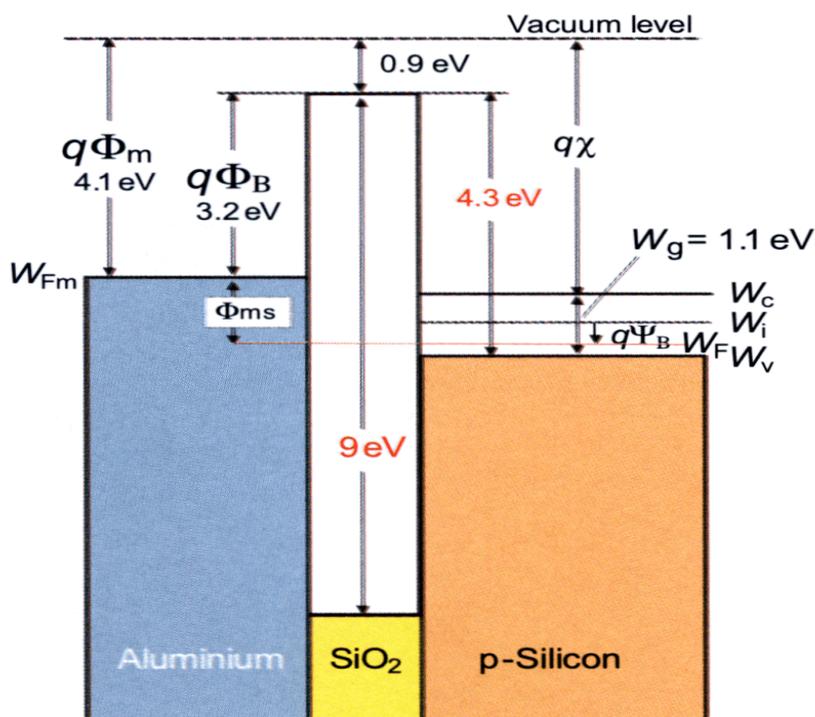
Steilheit



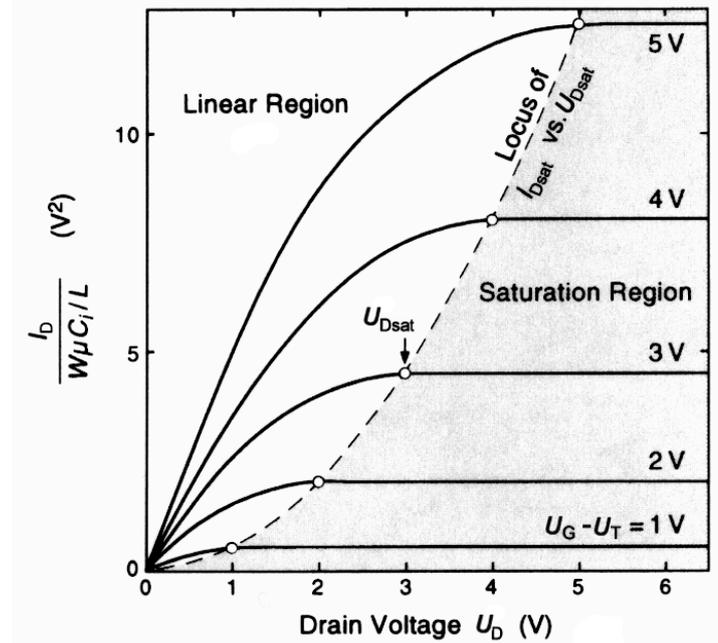
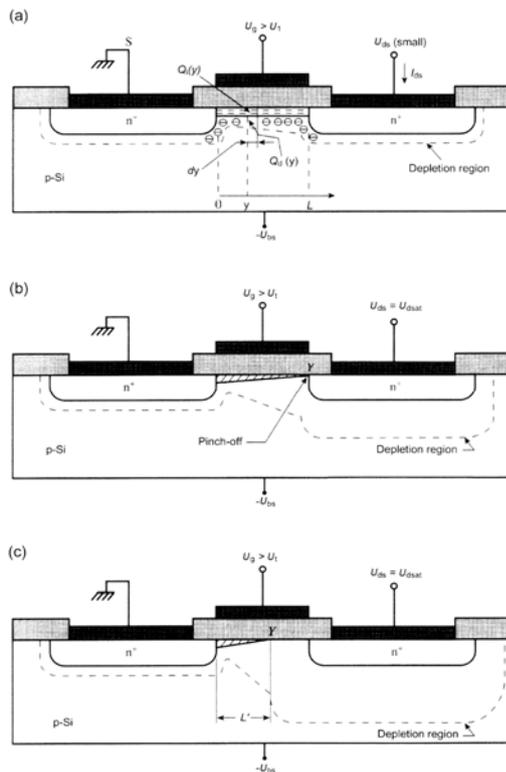
$$g = \frac{1}{w} \cdot \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{gs}} \right|_{U_D = const} =$$

$$= \mu_{eff} \frac{C_{ox}}{L} (U_{GS} - U_{th})$$

2.2.1. Bändermodell eines MOSFET (I)



2.2.1. Bändermodell eines MOSFET (II)



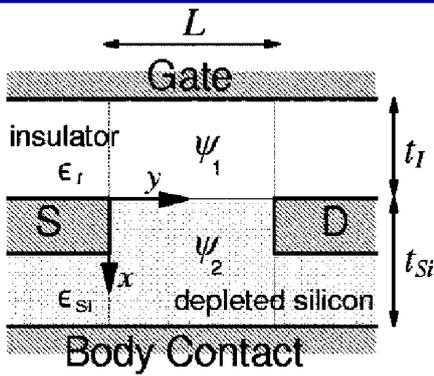
2.2.2. Skalierungsregeln

- Skalierung:**
- Langkanal-MOSFETs \Rightarrow 1-D Potential im Kanal
 - Kurzkanal-MOSFET \Rightarrow 2-D Potential im Kanal

E=const. Skalierung:

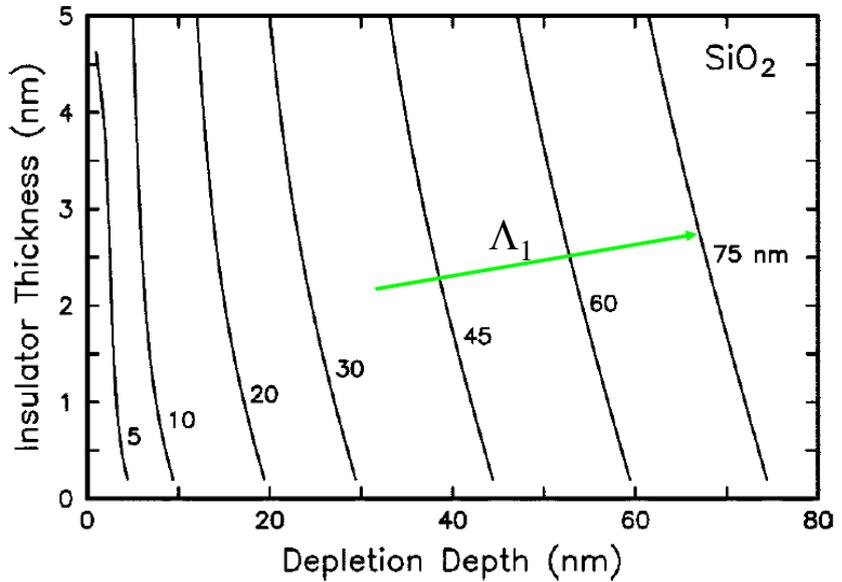
	Device und Schaltungsparameter	Faktor
Skalierung	Dimensionen (t_{ox} , L, w)	$1/\alpha$
	Dotierung	α
	Spannung (U_D)	$1/\alpha$
Verhalten der Bauelemente	Elektrisches Feld	1
	Breite der Verarmungsschicht	$1/\alpha$
	Kapazität	$1/\alpha$
	Beweglichkeit der Ladungsträger	1
	Strom	$1/\alpha$
Verhalten der Bauelemente	Verzögerungszeit	$1/\alpha$
	Leistungsumsatz	$1/\alpha^2$
	Schaltenergie	$1/\alpha^3$
	Packungsdichte	α^2
	Leistungsdichte	1

2.2.3. Kurzkanal-Effekte (I)



Dielektrische Feldverteilung

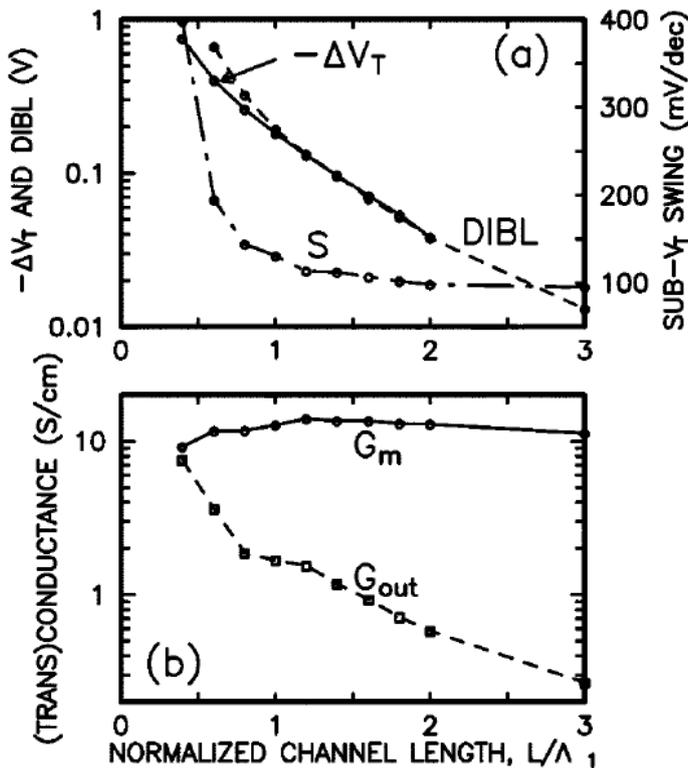
$$\epsilon_{Si} \cdot \tan(\pi \cdot t_I / \Lambda_1) = \epsilon_I \cdot \tan(\pi \cdot t_{Si} / \Lambda_1)$$



Lineare Näherung (klassisch)

$$\Lambda_1 \cong t_{Si} + \left(\frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_I} \right) \cdot t_I$$

2.2.3. Kurzkanal-Effekte (II)



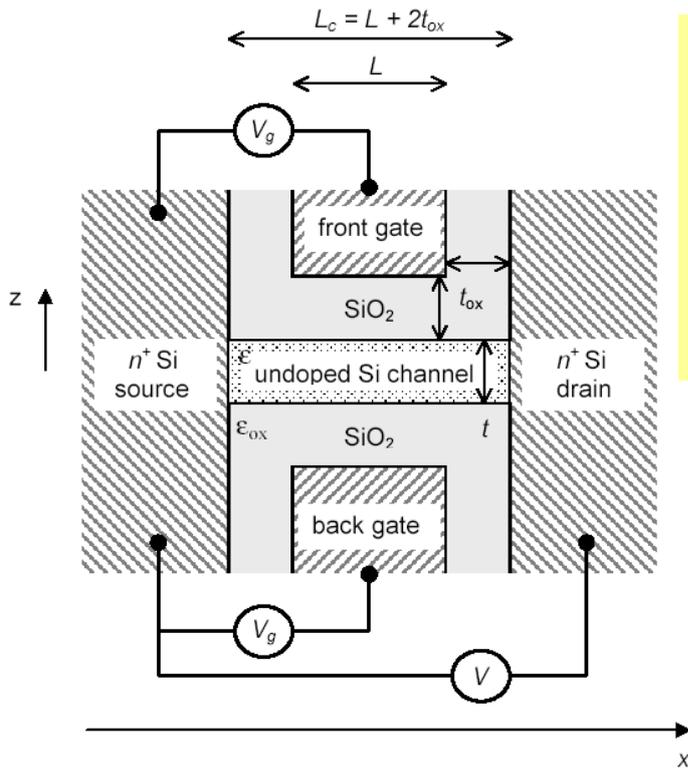
Grenzen

- $L/\Lambda_1 \gg 1 \Rightarrow$ 1-D-Verhalten
- $L/\Lambda_1 \leq 0.4 \Rightarrow$ 2D-Verhalten
- $L/\Lambda_1 \approx 1.5 \Rightarrow$ Design Punkt

Physikalische Effekte

- Tunneln durch Gateoxid
- Reduzierung der Feldeffektsteuerung durch das Gate
- Nichtskalierbarkeit von $E_{GSi} = 1.1 \text{ eV}$

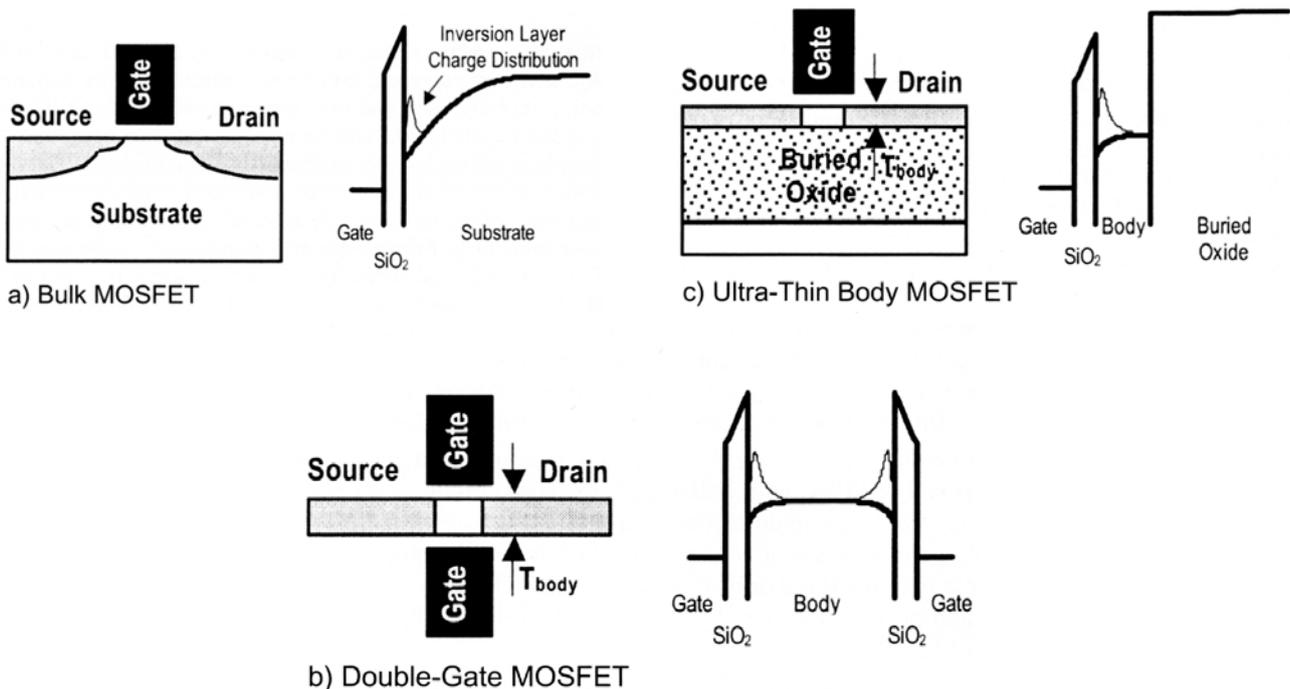
2.3. Nanoskalige MOSFET



Vorteile

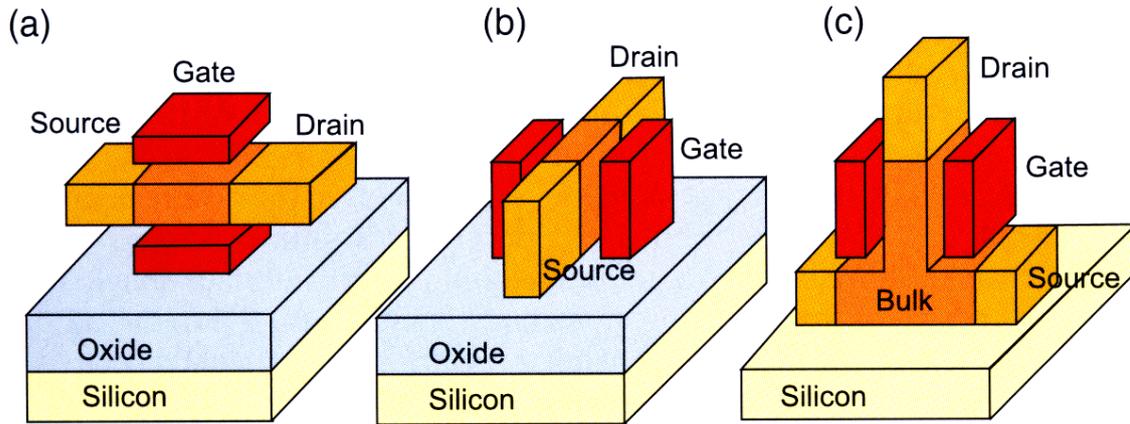
- Silicon-on-Isolator (SOI)
- sehr effektive Steuerung des Kanalpotentials
- Herstellung möglich

2.3.1. Aufbau von nanoskaligen MOSFET

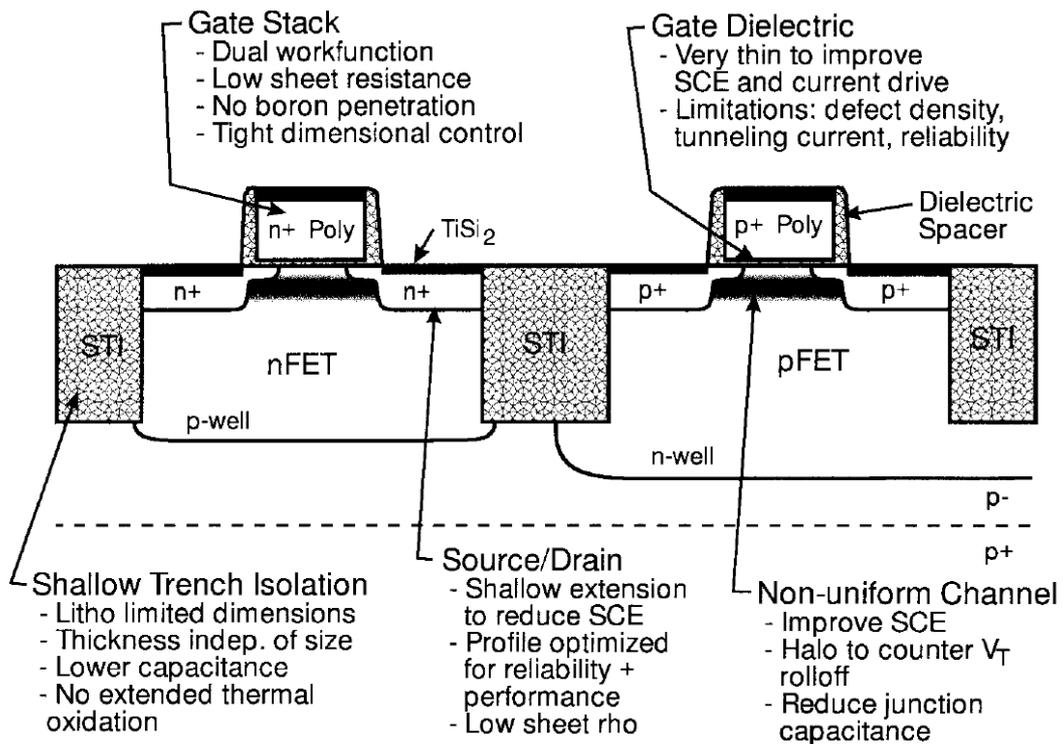


2.3.1. Aufbau von nanoskaligen MOSFET

Aufbau von Dual-Gate-MOSFET



2.4. Technologische Herausforderungen



2.4.1. Herausforderungen: Bauelemente

Gatelänge

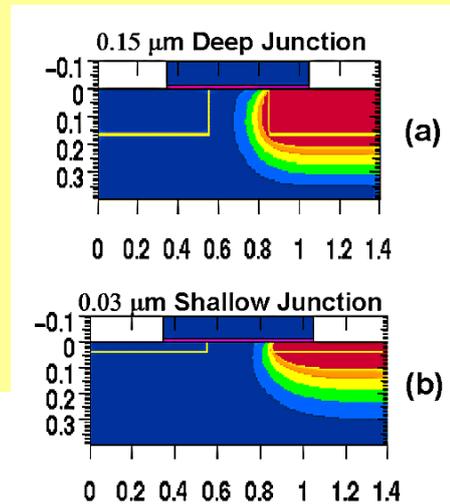
- sub 50 nm-Bereich mit E-Lithographie; XRL oder DUV
- Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit

Dicke des Gateoxids

- 2 nm oder höheres ϵ
- Zuverlässigkeit der Grenzflächen

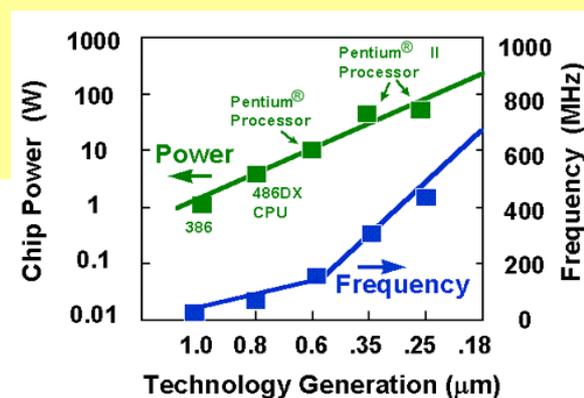
Tiefe der Verarmungszone

- Präzision der Ionenimplantation
- hohe Si-Dotierung
- Drain-Bulk-Tunneln



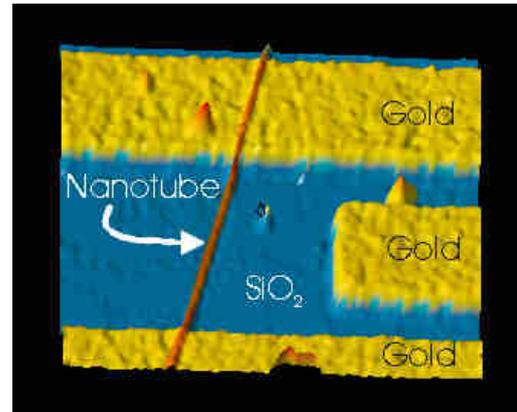
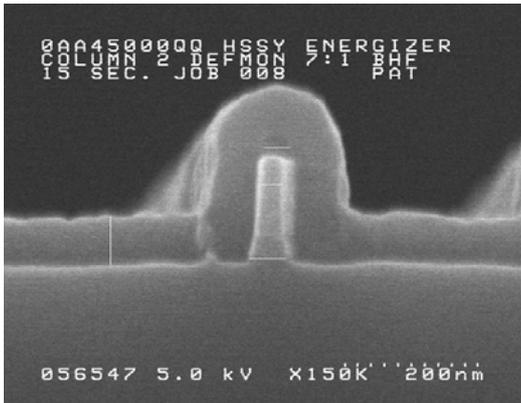
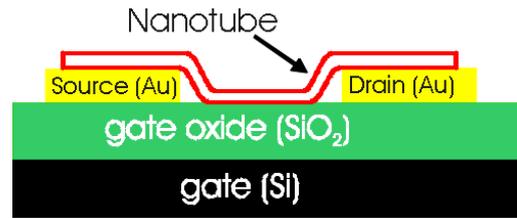
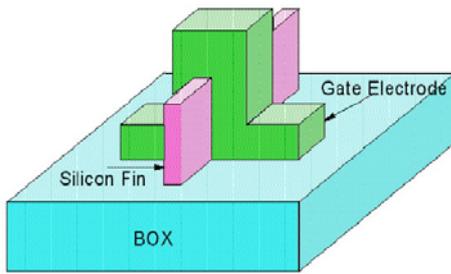
2.4.2. Herausforderungen: Toleranzen, Leistung

- Schwankungen der geometrische Abmessungen
- Schwankungen der Schichtdicken
- Fluktuationen der Dotierung
- Fluktuationen der Parameter
- Verlustleistung



2.4.3. Herausforderungen: Beispiele

FinFET Structure



3. Welle – Teilchen Dualismus der Elektronen

3.1. Elektronen als Welle

Einstein's Quantenhypothese: $W = \hbar \cdot \omega$

De Broglie-Wellenlänge: $\lambda = \frac{2\pi \cdot \hbar}{p}$ Impuls: $p = m \cdot v = \hbar \cdot k$

Ebene Elektronenwelle: $\psi(r, t) = c \cdot \exp\{i(k \cdot r - \omega \cdot t)\}$

Schrödinger-Gleichung: $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(r, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V(r) \right] \cdot \psi(r, t)$

Stationäre Lösung: $\psi(r, t) = f(t) \cdot \varphi(r)$ mit $f(t) = \exp\left(-i \frac{W}{\hbar} \cdot t\right)$
 und $\hat{H} \cdot \varphi(r) = W \cdot \varphi(r)$



3.1.1. Elektron im Potentialtopf

Energien der Elektronen im eindimensionalen Potentialtopf

$W = \frac{p^2}{2m}$ mit $p = \frac{2\pi \cdot \hbar}{\lambda}$

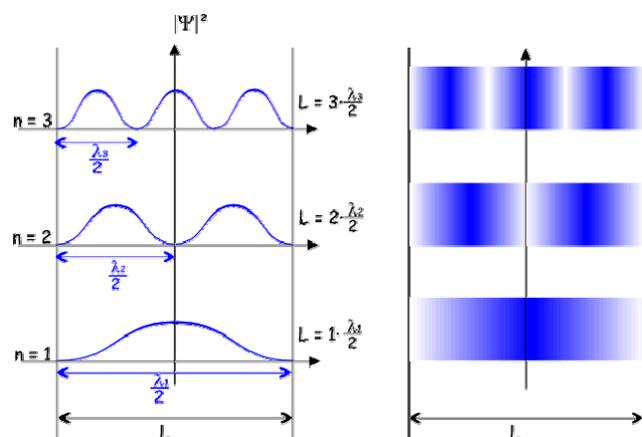
$W = \frac{4\pi^2 \hbar^2}{2m\lambda^2}$

mit Bedingung für stehende Welle

$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$

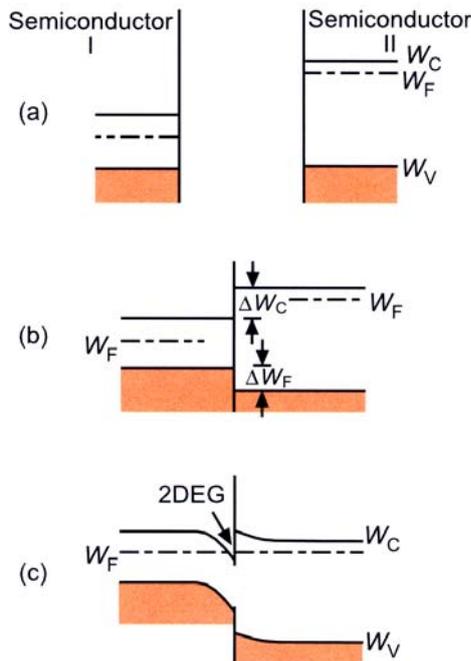
$W = \frac{\hbar^2 \cdot \pi^2 \cdot n^2}{2m_{\text{eff}} \cdot L^2}$ für $n = 1, 2, 3, \dots$

Potentialverlauf und stehende Welle

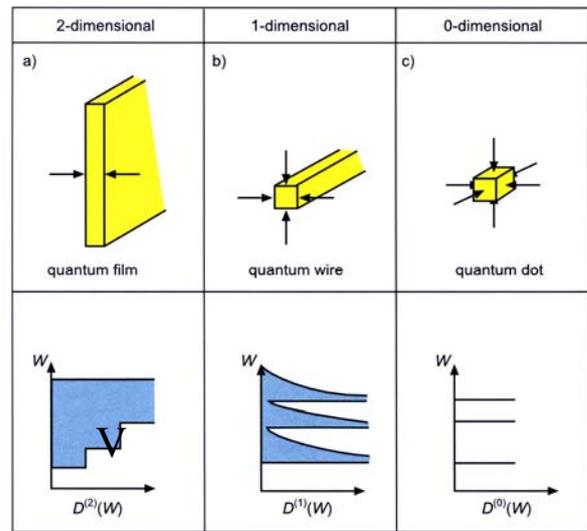


3.1.2. Niedrig-dimensionale Strukturen (I)

Band-Gap Engineering



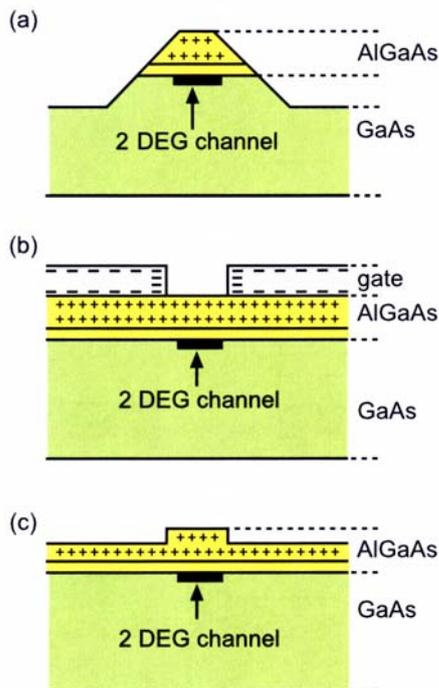
Zustandsdichte der Elektronen



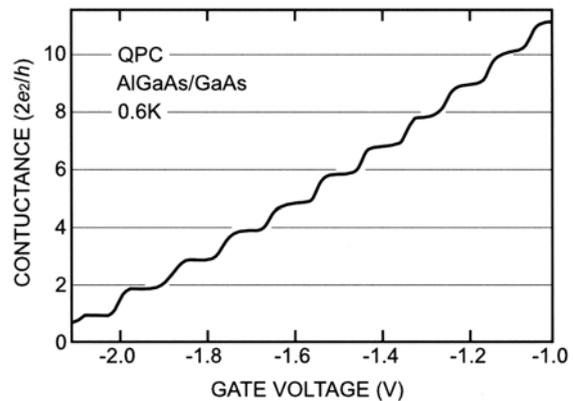
Quantisierte Energie:

$$W = \frac{\hbar^2 \cdot \pi^2}{2 \cdot m^*} \cdot \frac{n^2}{L^2}$$

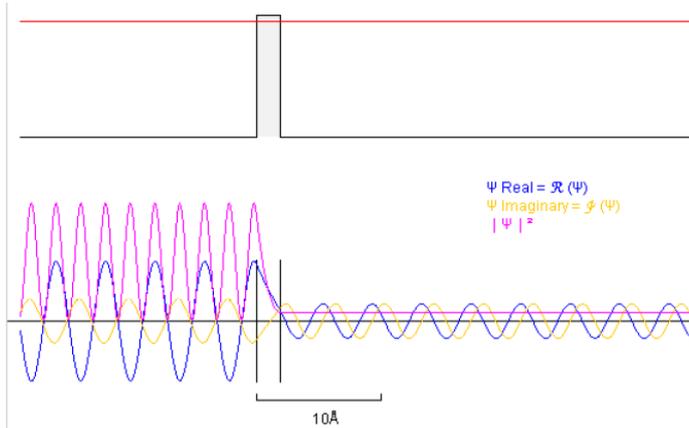
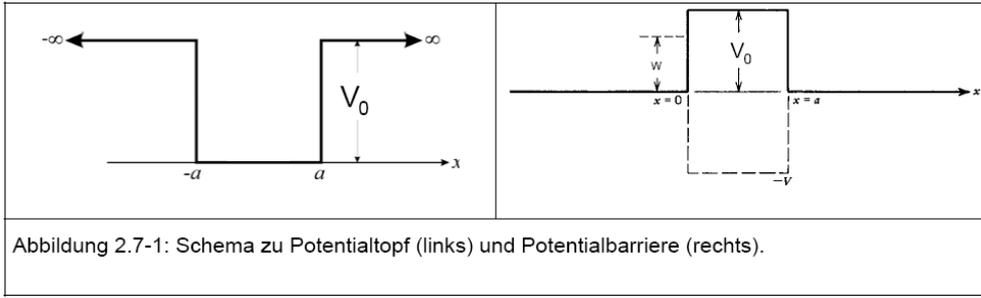
3.1.2. Niedrig-dimensionale Strukturen (II)



Quantisierte Leitfähigkeit eines Quanten-Punktkontaktes



3.2. Potentialbarrieren und Tunneleffekt



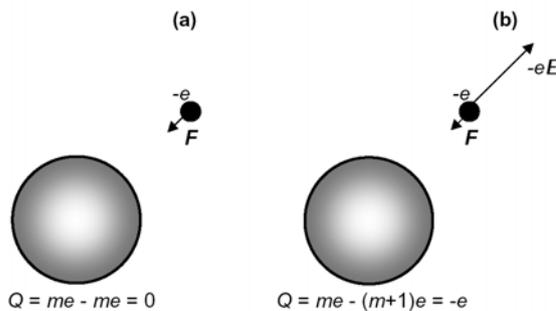
Tunnelstromdichte

$$j \propto \int_0^\infty d\bar{k} \cdot [f_i(W) - f_r(W + eU)] \cdot T(W)$$

Transmissionskoeffizient

$$T(W < V_0) = \left(1 + \frac{\sinh^2 \left(a \sqrt{2m(V_0 - W) / \hbar^2} \right)}{4(W/V_0)(1 - W/V_0)} \right)^{-1}$$

3.3. Elektronenladung als Teilchen – Einzelelektronen – Effekte (I)



$e \approx 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb
generates an electrical field
on a 10-nm sphere of
 ≈ 140 kV / cm

Frage: Gilt $Q=me$ oder ist Q kontinuierlich?

Klassisch gilt:

$$U = \frac{Q}{C}$$

$$W = \frac{Q^2}{2 \cdot C}$$

Für Nanostrukturen gilt:

Energiedifferenz durch ein Elektron

$$U_m = \frac{m \cdot e}{C}$$

$$W_m = \frac{m^2 \cdot e^2}{2 \cdot C}$$

$$\Delta W = \frac{e^2}{2 \cdot C} (2m + 1)$$

3.3. Einzelelektronen – Effekte (II)

Quantenwiderstand: $R_Q \equiv \frac{\hbar}{e^2}$

Für $R \ll R_Q$ kontinuierlicher Strom

Für $R \gg R_Q$ quantisierter Strom

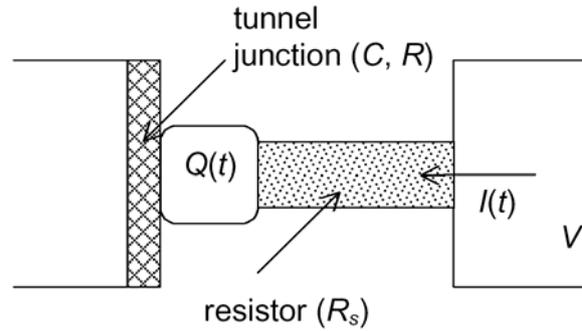
Beispiel SET-Plattenkondensator:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{A}{d}$$

$$\Delta W = \frac{e^2 \cdot d}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} (2m+1)$$

$$\text{aus } kT \ll \Delta W \Rightarrow A \ll \frac{e^2 \cdot d}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot k \cdot T}$$

Einzel-Elektronen-Tunneln



Beispiel: $T=300\text{K}$, $d=3\text{nm}$ (SiO_2)

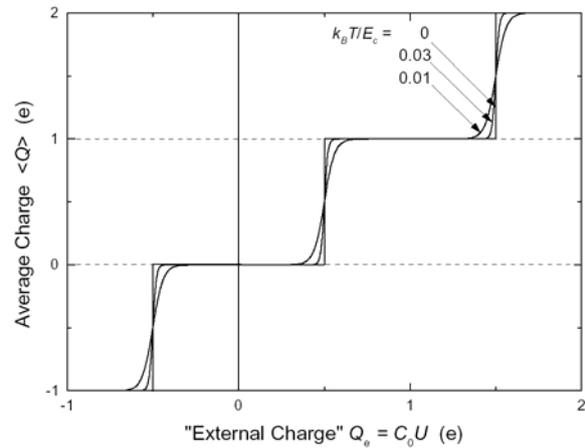
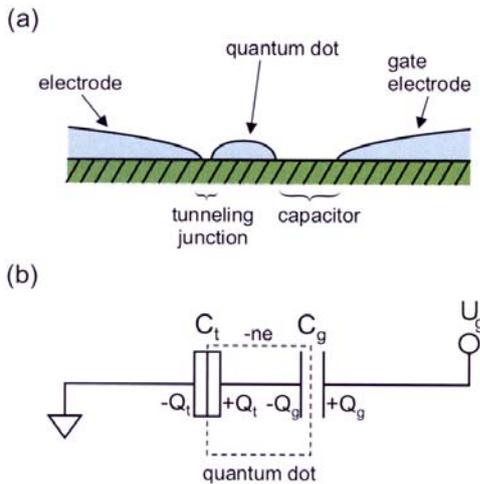
Fläche des Kondensators

$$A \ll 2.6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2 \text{ (16nm} \cdot \text{16nm)}$$

3.3. Einzelelektronen – Effekte (III)

Einzel-Elektronen-Box aus einem Quanten-Dot

Zahl der Elektronen auf einer Insel in Abhängigkeit von der Gatespannung



4. Nanoelektronische Bauelemente

Motivation

1. VLSI - Grenzen
 - Sub-10nm FET erfordert Genauigkeit der Abmessungen von ca. 0.3 nm
 - Grenzen der Lithografie (Technik und Kosten)
2. Suche nach neuen Prinzipien für Nanobauelemente

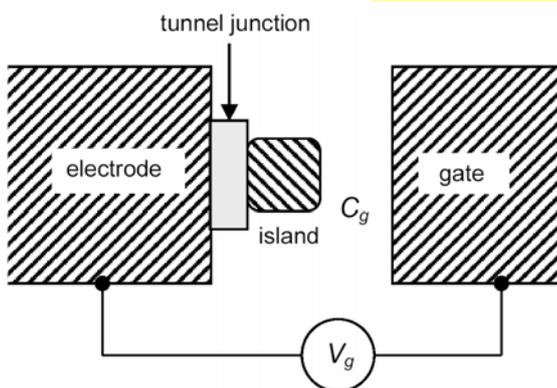
Quantenwiderstand:

$$R_Q \equiv \frac{\hbar}{e^2}$$

Für $R \ll R_Q$ kontinuierlicher Strom
 Für $R \gg R_Q$ quantisierter Strom

4.1. Einzelelektronen – Bauelemente

4.1.1. Einzelelektronen-Box (I)



Elektrostatistische Energie des Systems:

$$W = \frac{Q^2}{2 \cdot C_\Sigma} + \left(\frac{C_0}{C_\Sigma} \right) Q U_g \quad Q = -n e$$

$$W = \frac{(Q_0 - n e)^2}{2 \cdot C_\Sigma} + const. \quad Q_0 \equiv C_g \cdot U_g$$

$$R \gg R_Q \equiv \frac{\hbar}{e^2}$$

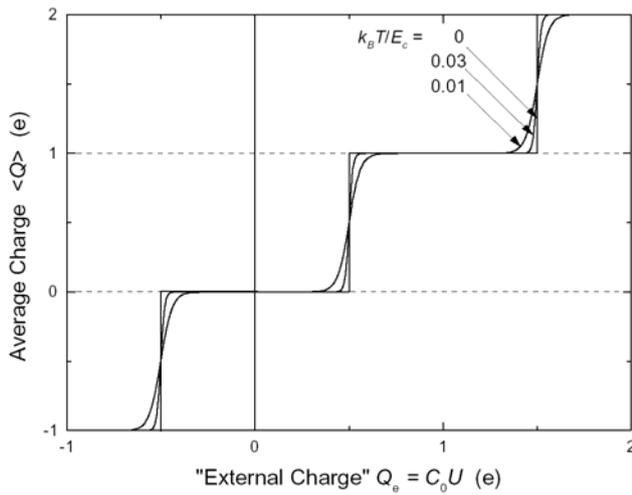
$$E_C \equiv \frac{e^2}{2C} \gg k_B T$$

Um ein Elektron in der Box zu halten, muß

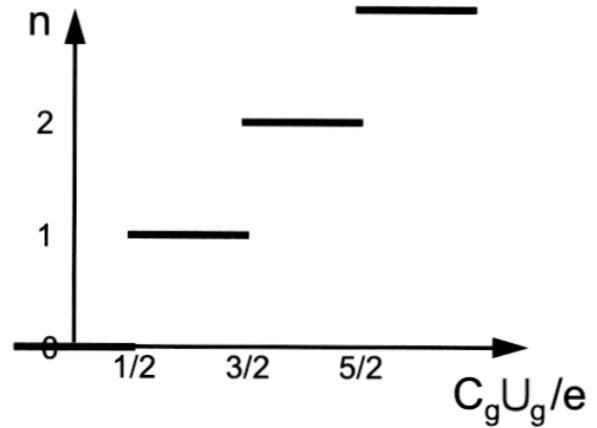
$$W(n) < W(n \pm 1)$$

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

4.1.1. Einzelelektronen-Box (II)



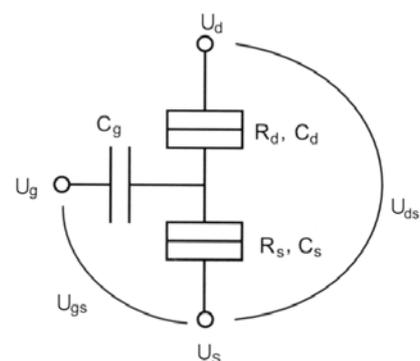
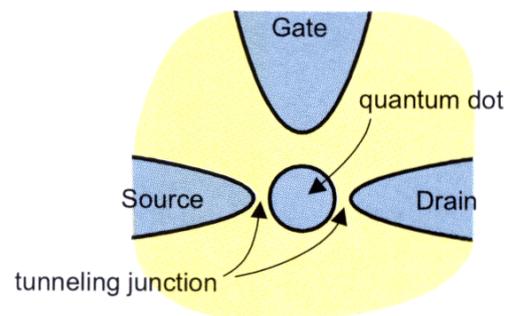
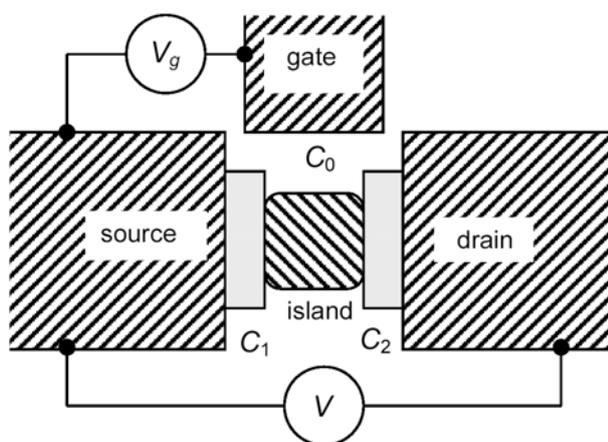
Coulomb Staircase



$$Q_0 = e \left(n \pm \frac{1}{2} \right)$$

4.1.2. Einzelelektronen – Transistor: Aufbau

Single-Electron Transistor (SET)

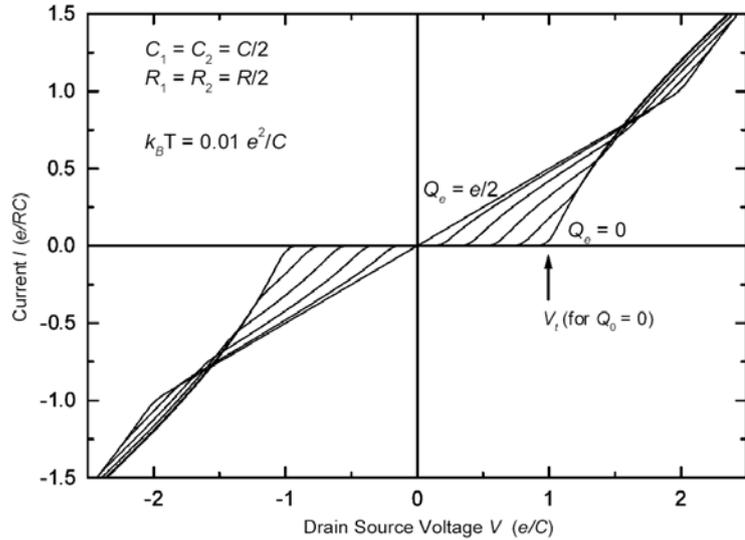
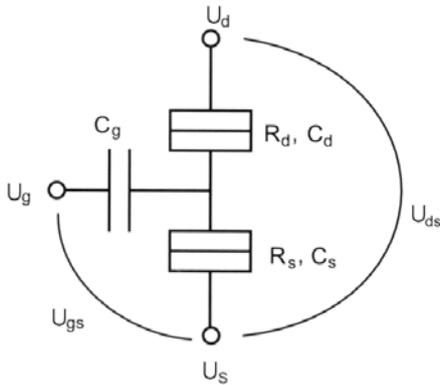


4.1.2. Einzelektronen – Transistor: Funktion

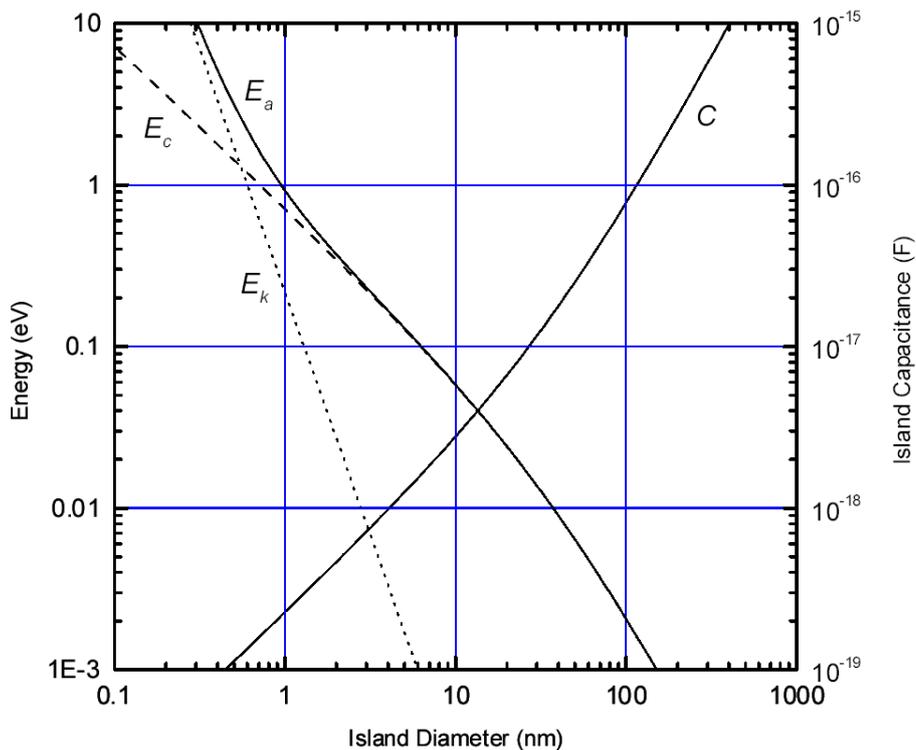
Erhöhung der Ladung auf der Insel: $\Delta Q \equiv -e$

Erhöhung der Energie auf der Insel: $W = \frac{(Q_0 - ne)^2}{2 \cdot C_\Sigma} - \frac{eU(n_s C_s + n_d C_d)}{C_\Sigma} + const.$

Dabei gilt: $n = n_1 - n_2$
 $C_\Sigma = C_g + C_d + C_s$

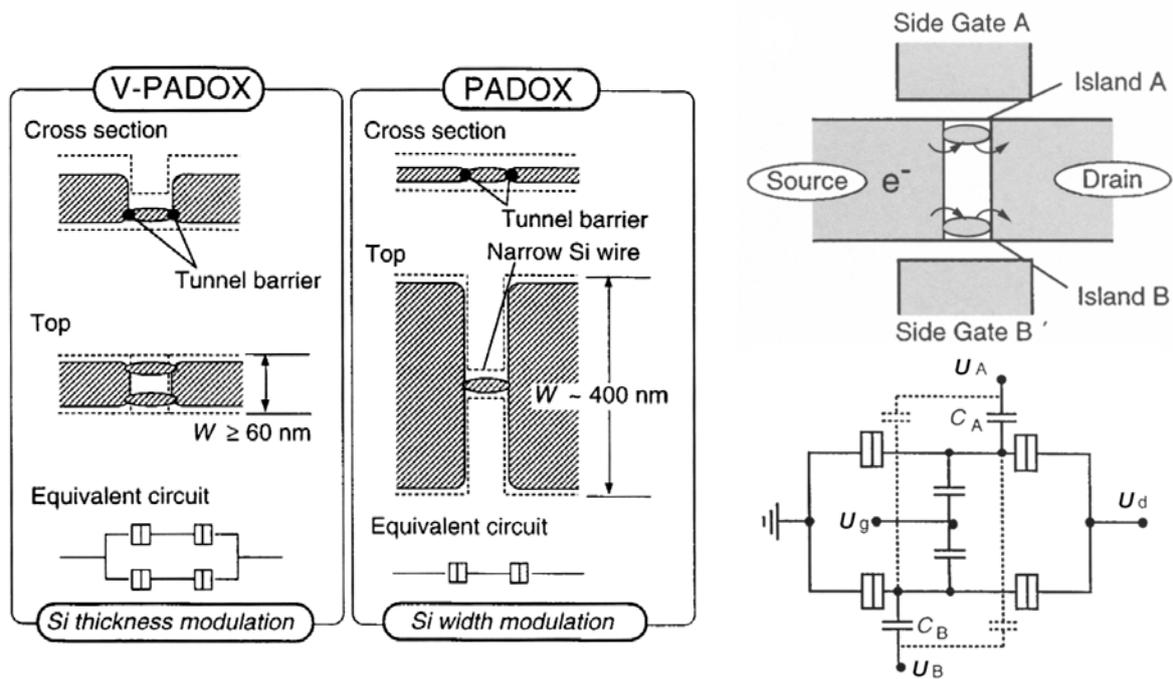


4.1.3. Einzelektronen – Transistor: Skalierung



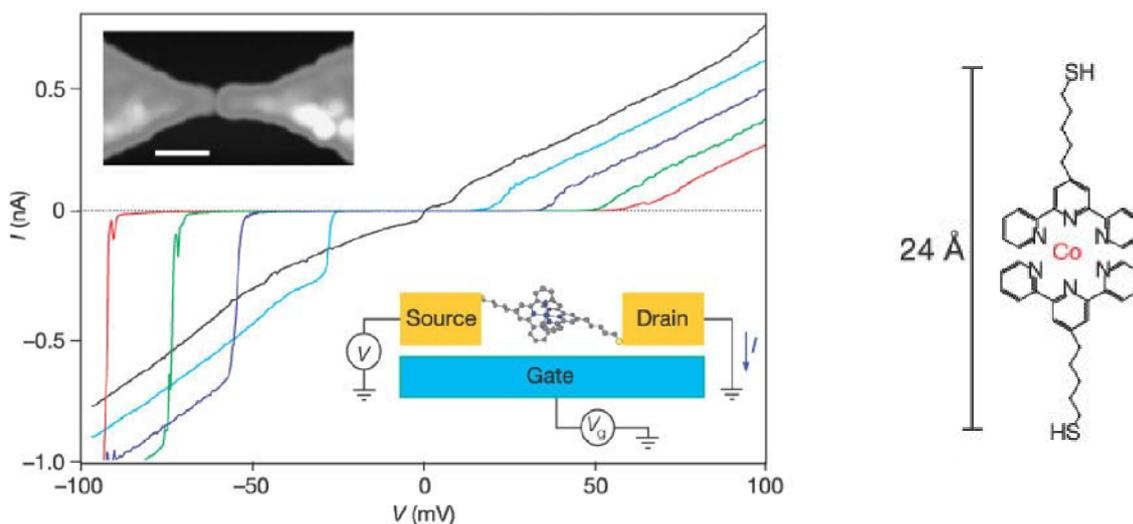
4.1.3. Einzelektronen – Transistor: Herstellung (I)

Halbleiter - Implementierung eines SET



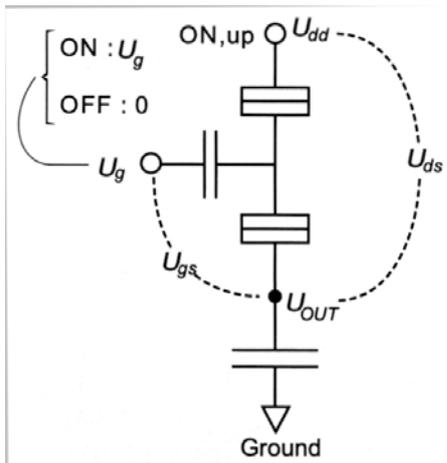
4.1.3. Einzelektronen – Transistor: Herstellung (II)

Molekular - elektronische Implementierung eines SET



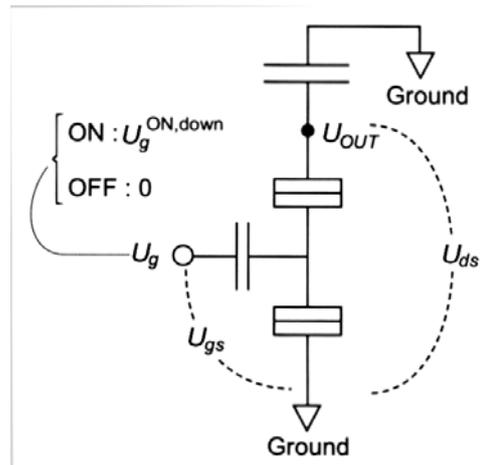
4.1.4. SET – Schaltungen (I)

Pull-up



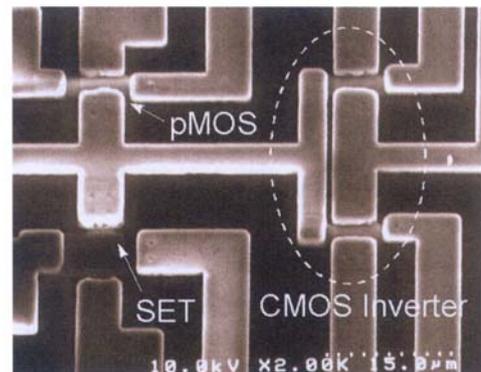
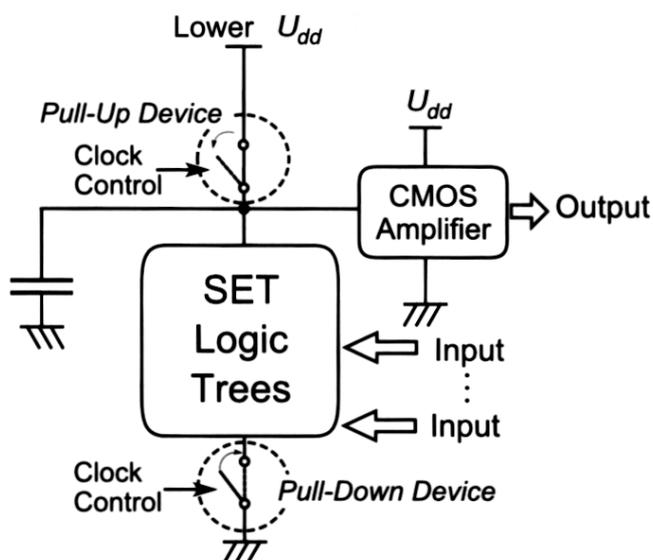
$$U_{gs}^{ON,up} = U_{dd} + \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{e}{C_g}$$

Pull-down



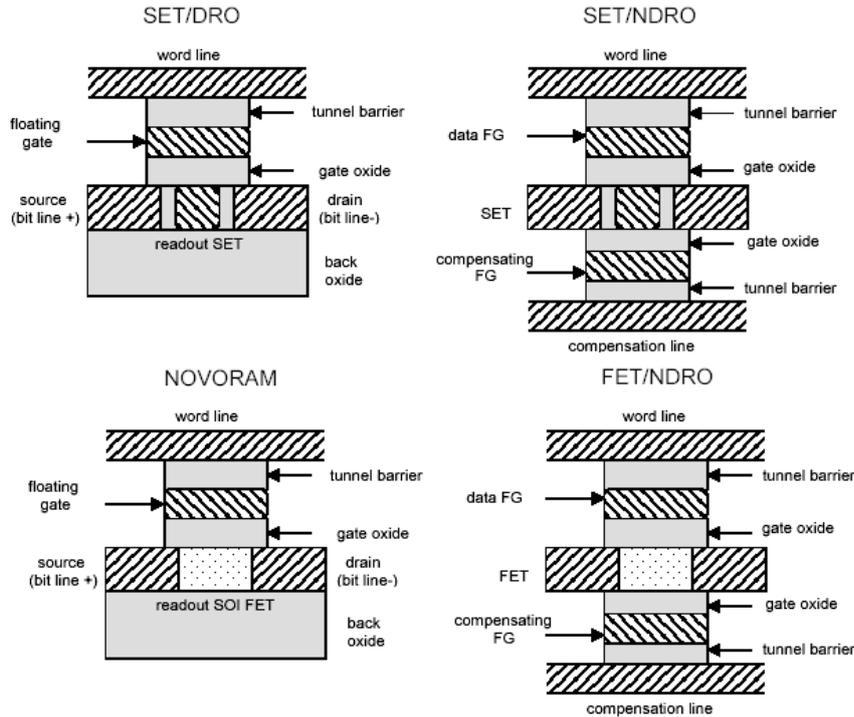
$$U_{gs}^{ON,down} = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{e}{C_g}$$

4.1.4. SET – Schaltungen (II)

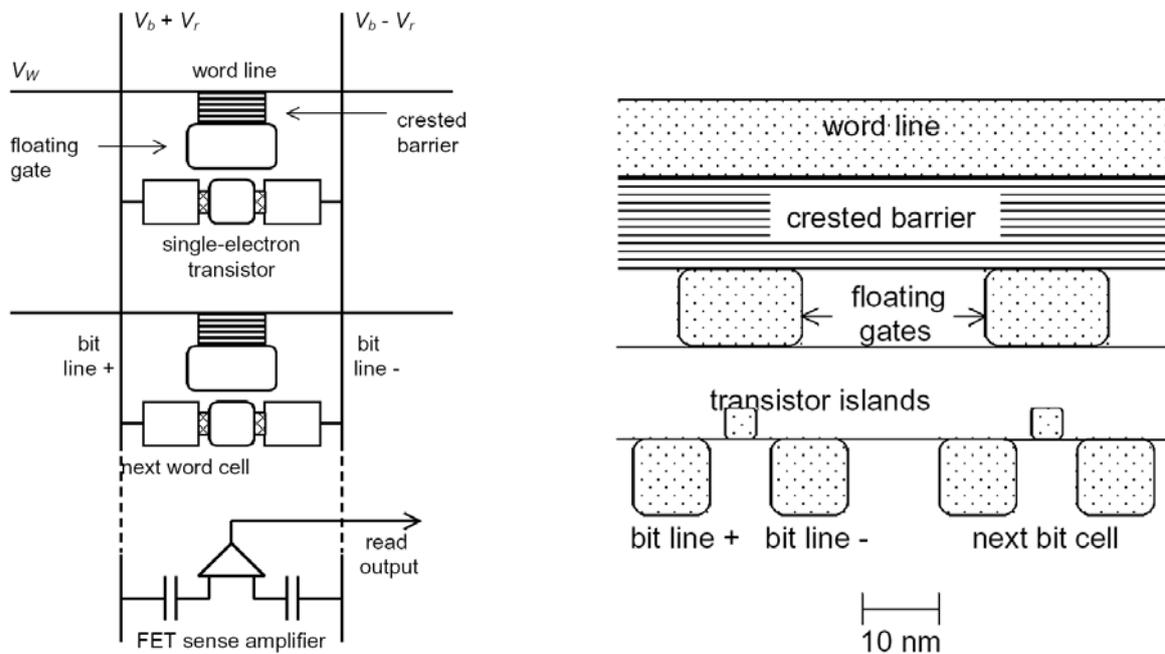


4.2. Einzelelektronen - Speicherschaltungen

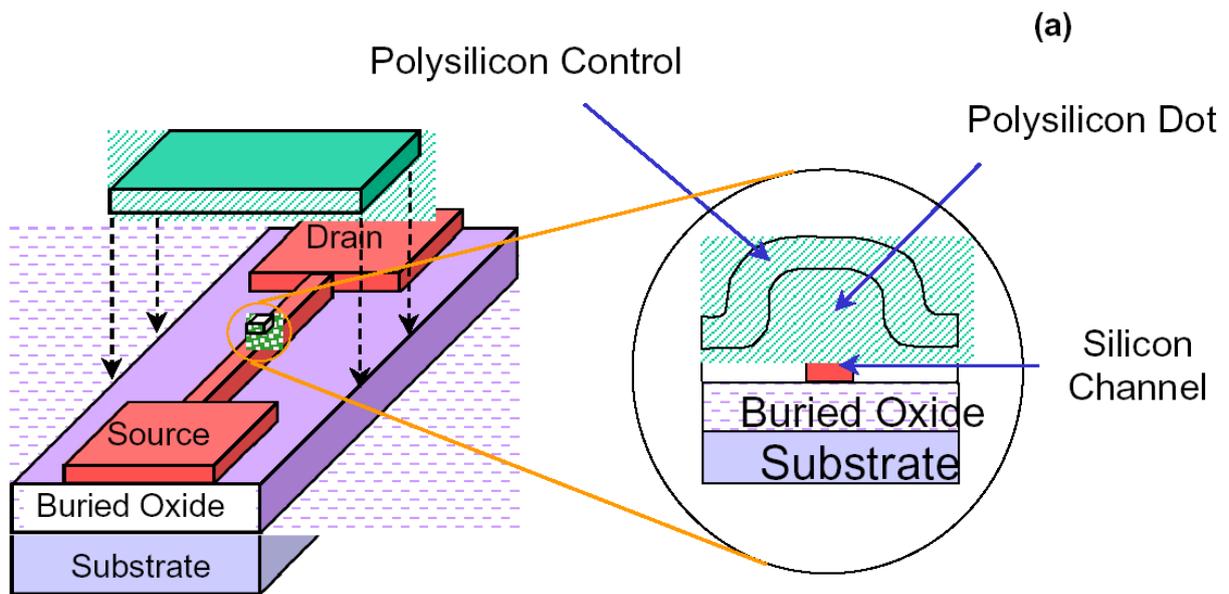
4.2.1. SET - Speicheraufbau



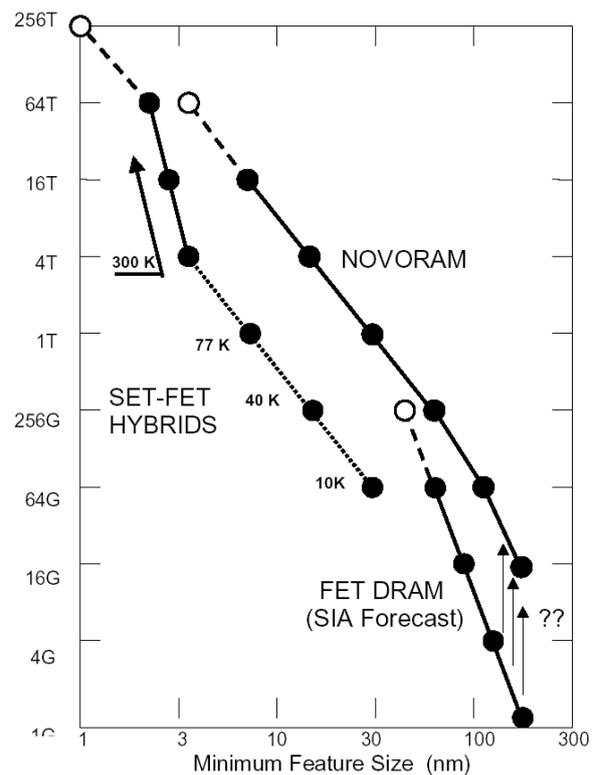
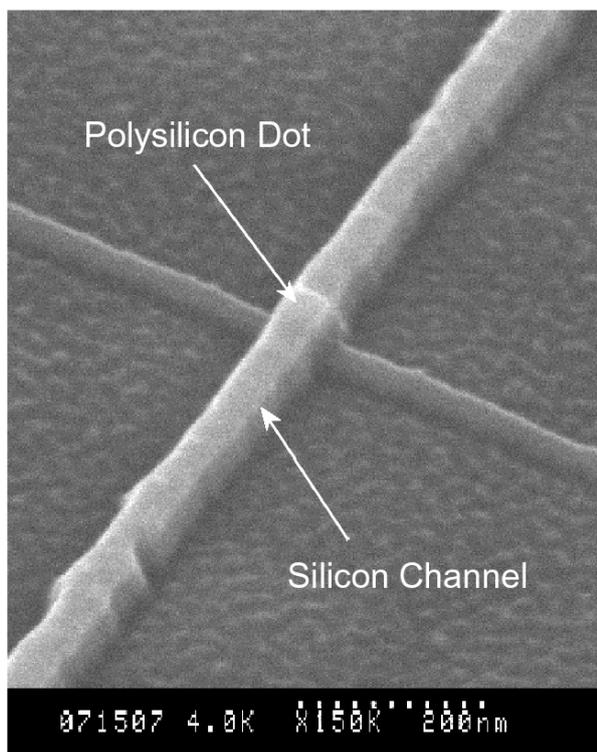
4.2.2. SET – Speicherarchitektur (I)



4.2.2. SET – Speicherarchitektur (II)



4.2.3. SET – Speicher: Aussichten



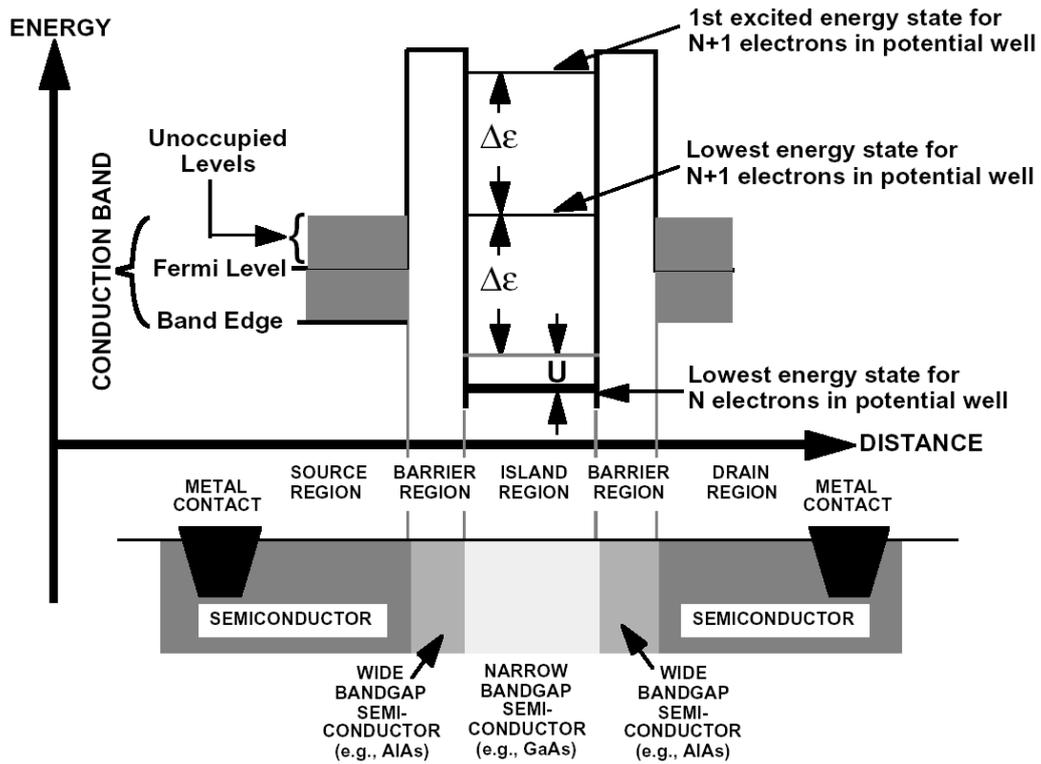
4.2.3. SET-Speicher: Vergleich

	Conventional Memory		Quantum Dot Memory			
	DRAM	Flash	SET	Nano-flash		Yano-type
				Multidot	Single dot	
device structure						
read time	~10 ns	~10 ns	1 ns	~10 ns	~10ns	~20 µs
write time	~10 ns	~1 ms	1 ns	~100 ns	<1 µs	~10 µs
erase time	< 1nm	~1ms	< 1nm	~1 ms	<1 ms	~10 µs
retention time	~1 s	~10 years	~ 1s	~1 week	~5 s	~1 day
endurance cycles	infinite	10 ⁶	infinite	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁷
operating voltage	3 V	15 V	1 V	5 V	10 V	15 V
voltage for state inversion	0.2 V	~5 V	< 0.1 V	0.65 V	0.1 V	0.5 V
electron number to write bit	10 ⁵	10 ³	1 (excluding no to change gate potential)	10 ³	1 (excluding no to change gate potential)	2 (excluding no to change gate potential)
cell size	~12 F ² /bit	~9F ² /bit	9-12 F ² /bit	9F ² /bit	9F ² /bit	2F ² /bit

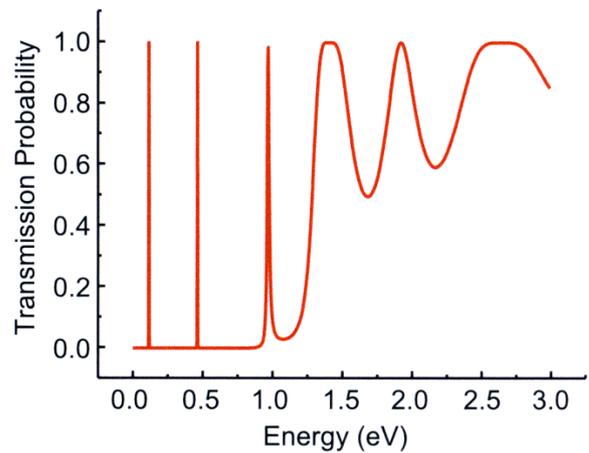
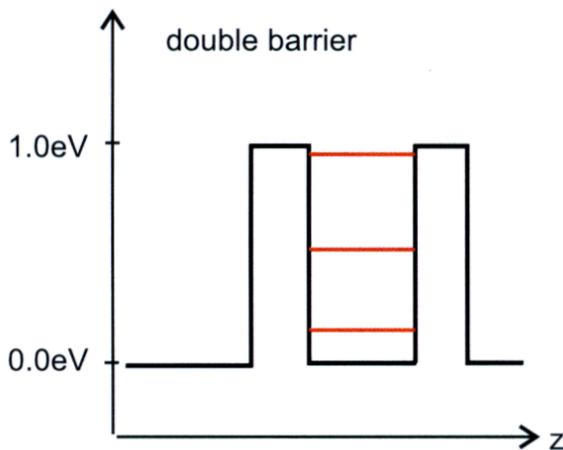
4.2.4. SET – Speicher: Zusammenfassung

1. Einzelelektronen – Bauelemente funktionieren
2. Anwendungen in Strom- und Widerstandstandards
3. Herausforderungen für Digitaltechnik:
 - Höchstintegrierte Speicher (SET/FET – Hybrid)
 - Hintergrund-Ladungen
 - extreme technologische Anforderungen
 - molekulare Nanostrukturen
 - Erhöhung der Arbeitstemperaturen

4.3. Resonante Tunneldioden



4.3.1. Energieniveaus in RTD U (U)



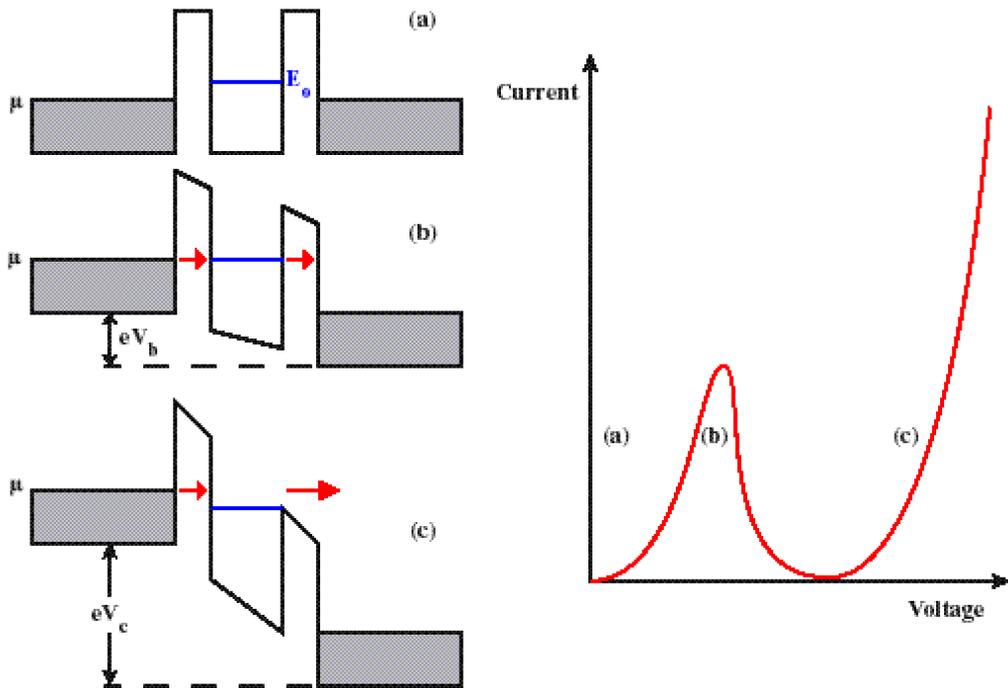
Tunnelstrom:

$$j \propto \int_0^{\infty} d\bar{k} \cdot [f_l(E) - f_r(E + eU)] \cdot T(E)$$

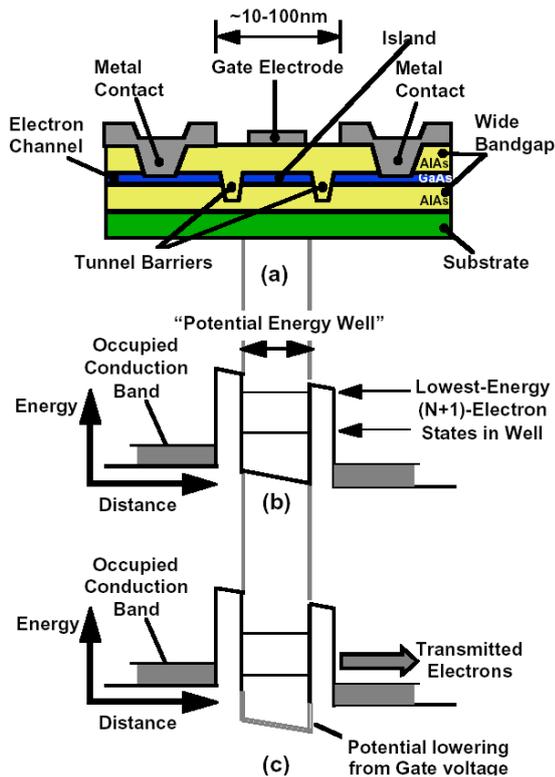
Transmissionkoeffizient:

$$T \propto \frac{E_F^2}{(E_F + eU)^2 - E_0^2}$$

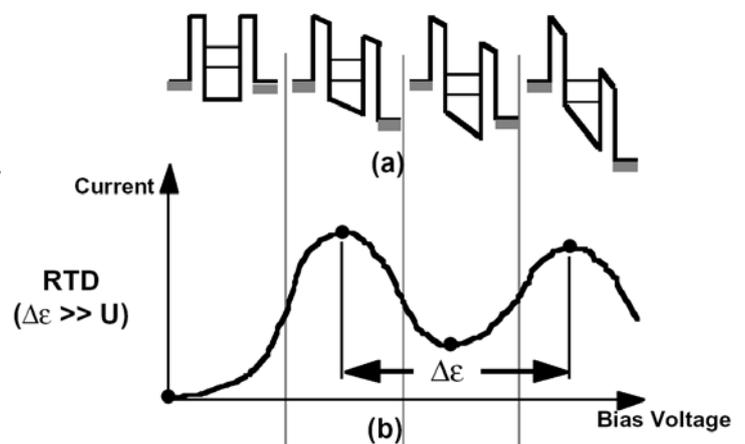
4.3.1. Strom-Spannungskennlinie



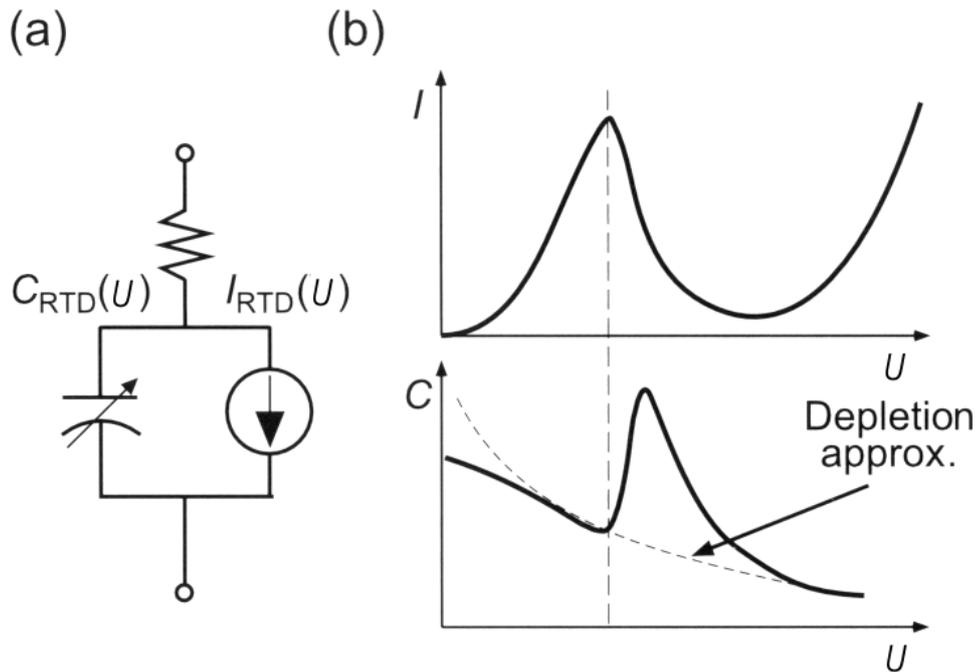
4.3.2. Aufbau und Betrieb einer RTD



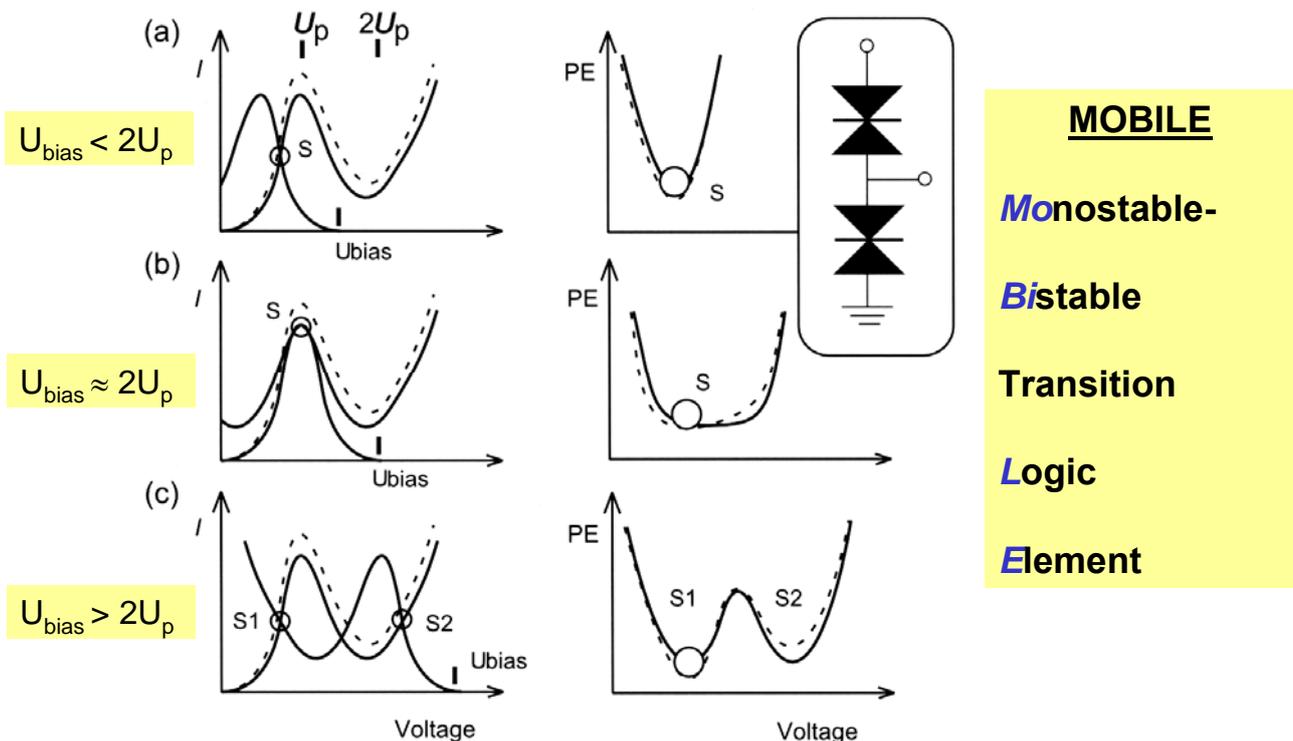
Strom-Spannungskennlinie



4.3.3. Ersatzschaltbild einer RTD

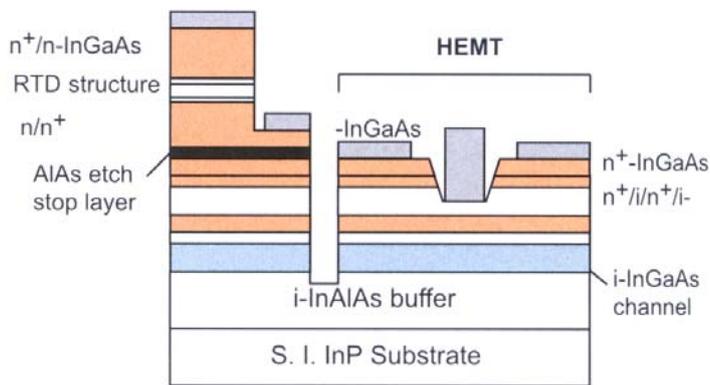


4.3.4. Resonante Tunneltransistoren (MOBILE)

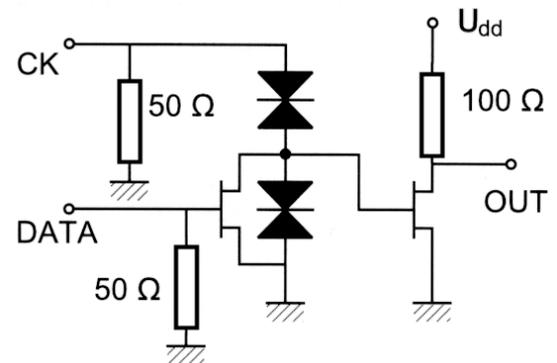


4.3.5. Schaltungstechnik mit RTT (I)

Integration von RTT und HEMT 4.3.5. Schaltungstechnik mit RTT (I)

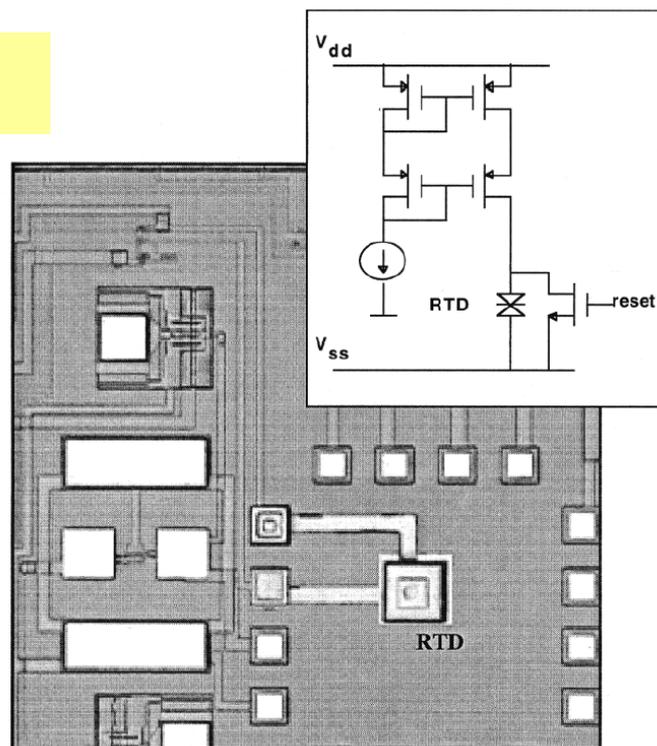


D-Flip Flop mit MOBILE



4.3.5. Schaltungstechnik mit RTT (I)

1-bit Komparator mit RTT und CMOS



4.4.1. Einleitung/Grundlagen

4.4.2. Josephson - Spannungsstandard

4.4.3. Supraleitende Quanteninterferometer: SQUID

4.4.4. Supraleitende Strahlungsdetektoren

4.4.5. Ultra-schnelle RSFQ - Elektronik

4.4.1. Grundlagen: Cooper - Paare

2 Sachverhalte:

- kein elektrischer Widerstand ($R = 0$)
- Magnetfeldverdrängung ($B_i = 0$)

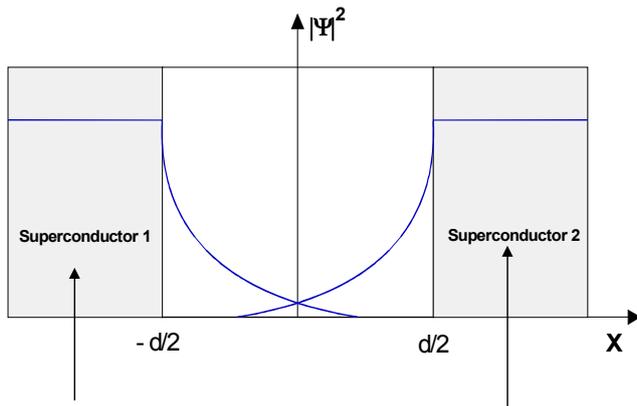
Grundzustand:

- 2 Elektronen bilden ein Paar ($p_{\uparrow}, p_{\downarrow}$)
- Gesamtspin = 0
- Bose - Teilchen
- $\Delta p \cdot \Delta x > h$

Wellenfunktion der Cooper-Paare:

$$\psi(\mathbf{r}, t) = |\psi| \exp\{i\varphi(\mathbf{r}, t)\}$$

mit $\varphi(\mathbf{r}, t) = \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega \cdot t$



$$\psi(\mathbf{r}, t) = |\psi| \exp\{i\varphi_1(\mathbf{r}, t)\}$$

$$\psi(\mathbf{r}, t) = |\psi| \exp\{i\varphi_2(\mathbf{r}, t)\}$$

- Betrachtungen**
1. wenn: $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, dann $I_S = 0$
 2. wenn: $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi$, dann $I_S = 0$
 3. wenn: $0 < (\varphi_1 - \varphi_2) < \pi$, dann $I_S \neq 0$
 4. es gilt $I(\varphi) = I(\varphi + 2\pi)$

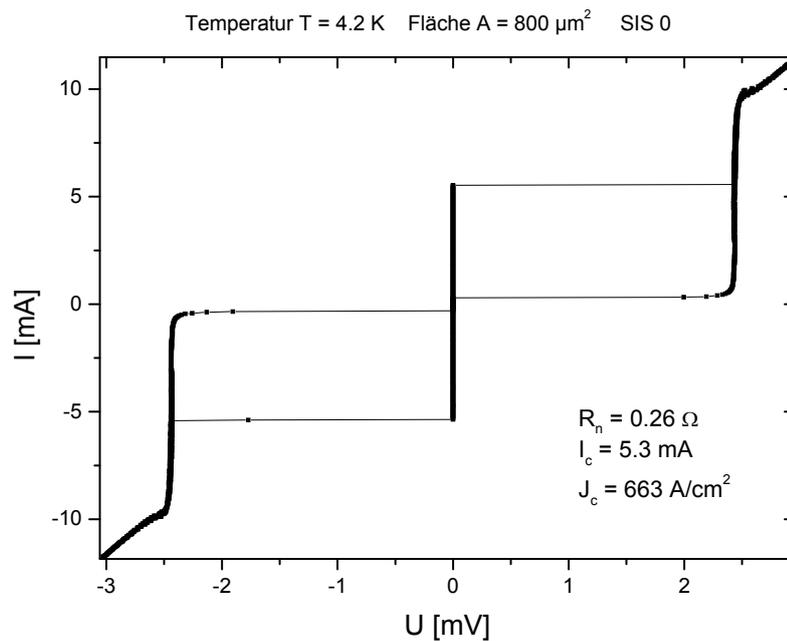
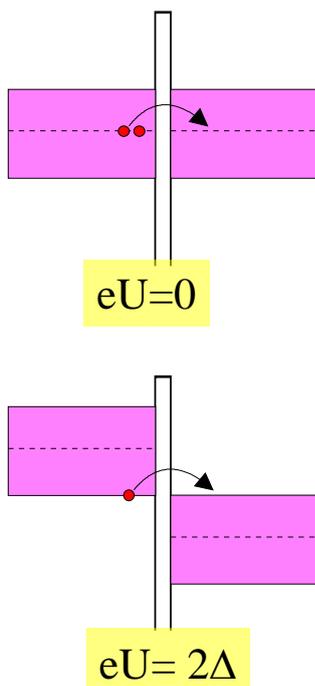
Phasendifferenz:

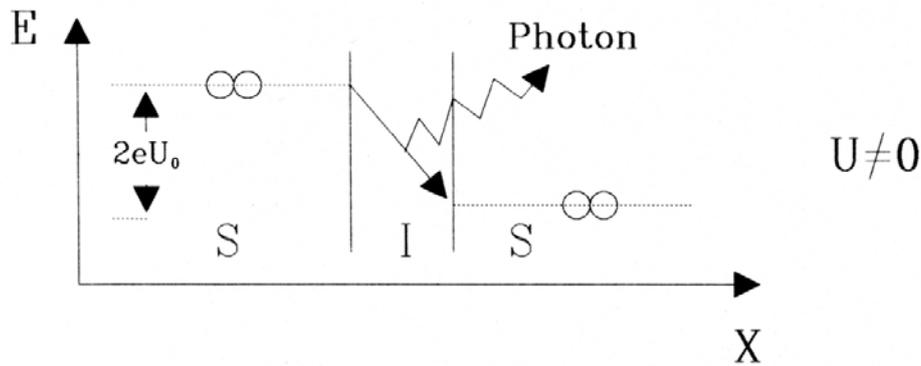
$$\phi = \varphi_2 - \varphi_1$$

Dc - Josephson - Effekt

$$I_S = I_C \sin \phi$$

4.4.1. Grundlagen: Tunnelkontakt





$$E = 2e\mu + \text{const.}$$

$$V = \mu_1 - \mu_2$$

Phasendifferenz: $\phi = \phi_2 - \phi_1$

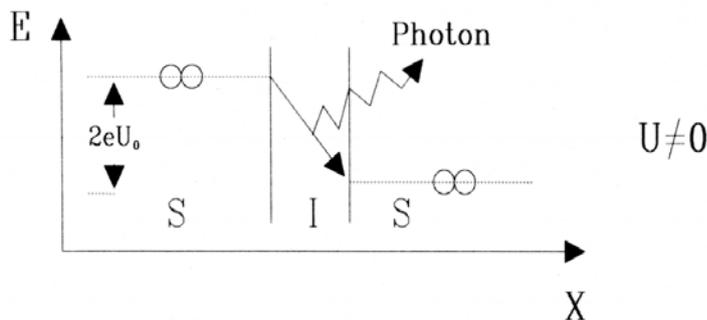
$$\Phi_0 = h/2e$$

$$\psi(\mathbf{r}, t) = |\psi| \exp\{i\phi_2(\mathbf{r}, t)\}$$

$$i\hbar\partial\psi/\partial t = H\psi$$

$$\partial\phi(\mathbf{r}, t)/\partial t = -(2e/\hbar)\mu(\mathbf{r}, t)$$

$$d\phi/dt = (2e/\hbar)U(t) = 2\pi U(t)/\Phi_0$$



$$d\phi/dt = (2e/\hbar)V(t)$$

Strom oszilliert:

$$I_S = I_C \sin(\omega_J t)$$

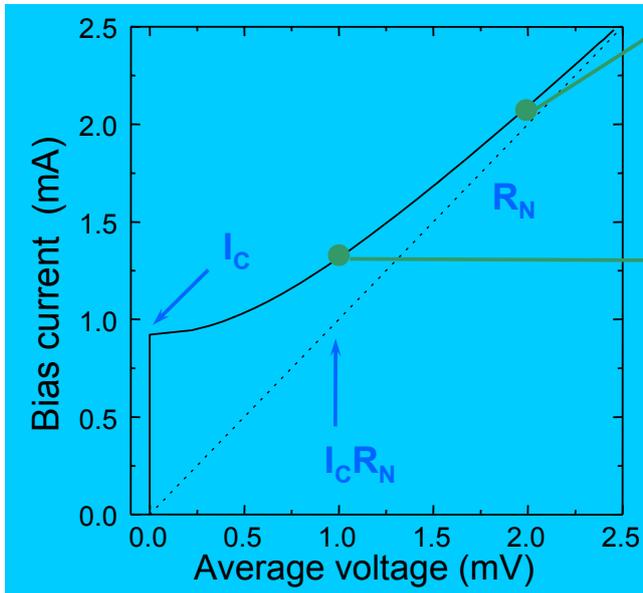
mit Frequenz:

$$f_J = \omega_J/2\pi = (2e/h)U = U/\Phi_0$$

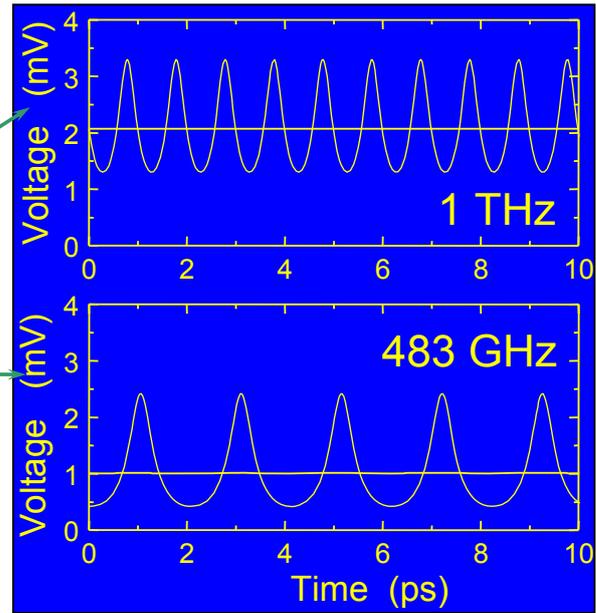
$$2e/h = \approx 483 \text{ GHz/mV}$$

$$v = \frac{\Phi_0}{2\pi} \langle U \rangle \approx 483 \frac{\text{GHz}}{\text{mV}} \langle U \rangle$$

Strom-Spannung-Kennlinie



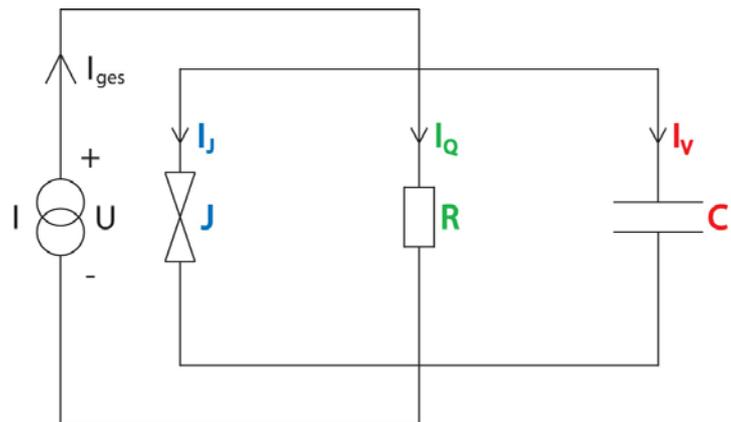
Zeitlicher Spannungsverlauf



Betriebsfrequenzen: 1 GHz - 5 THz

4.4.1. Grundlagen: RCSJ - Modell (I)

- RCSJ-Modell:
- *Cooper-Paar-Strom.*
→ Strom: I_J
- *Quasiteilchen-Strom.*
→ Strom: I_Q



- Geometrie ähnlich eines *Plattenkondensators.*
→ Verschiebungsstrom: I_V

- **RCSJ = Resistively and Capacitively Shunted Junction**

- Kirchhoff'sche Regeln:

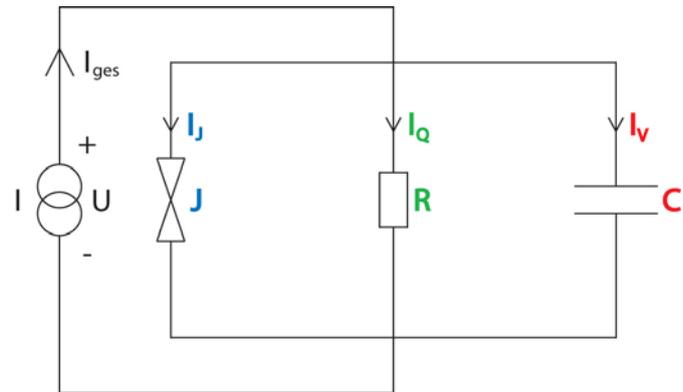
$$I_{ges} = I_J + I_Q + I_V$$

$$\downarrow (\varphi_2 - \varphi_1) = \varphi$$

$$I_{ges} = I_C \cdot \sin \varphi + \frac{U}{R} + C\dot{U}$$

$$\downarrow U = \dot{\varphi} \cdot \frac{\Phi_0}{2\pi}$$

$$I_{ges} = I_C \sin \varphi + \left(\frac{\Phi_0}{2\pi R} \right) \cdot \dot{\varphi} + \left(\frac{C\Phi_0}{2\pi} \right) \cdot \ddot{\varphi} \quad \text{DGL 2ter Ordnung}$$



4.4.2. Josephson-Spannungsstandard (I)

- Anforderung an einen Standard:
 - Hohe Genauigkeit.
 - Unabhängig von externen Parametern.

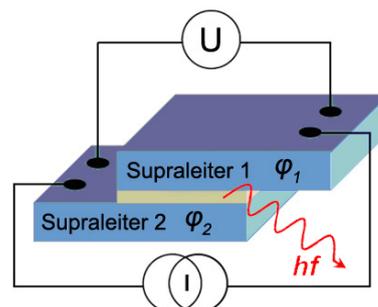
↓ AC-Effekt

$$I_s = I_C \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{\Phi_0} U \cdot t + \gamma_0 \right) \quad \text{Wechselstromfrequenz: } f = \frac{2e}{h} \cdot U$$

↓

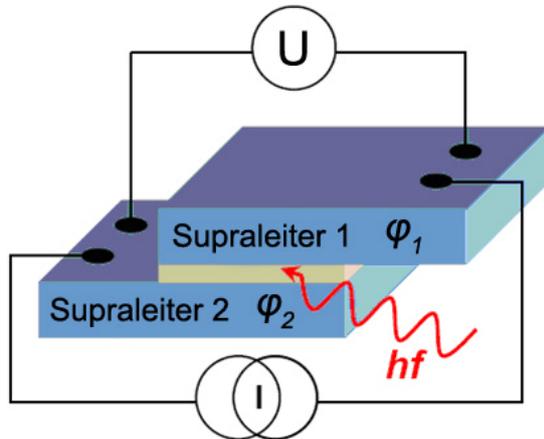
- Beschleunigte Ladungsträger
→ Emission von Photonen:

$$E = hf = 2e \cdot U$$



→ „Inverser Josephson-Effekt“:

- Einstrahlung von Mikrowellen: $E = hf = 2e \cdot U$

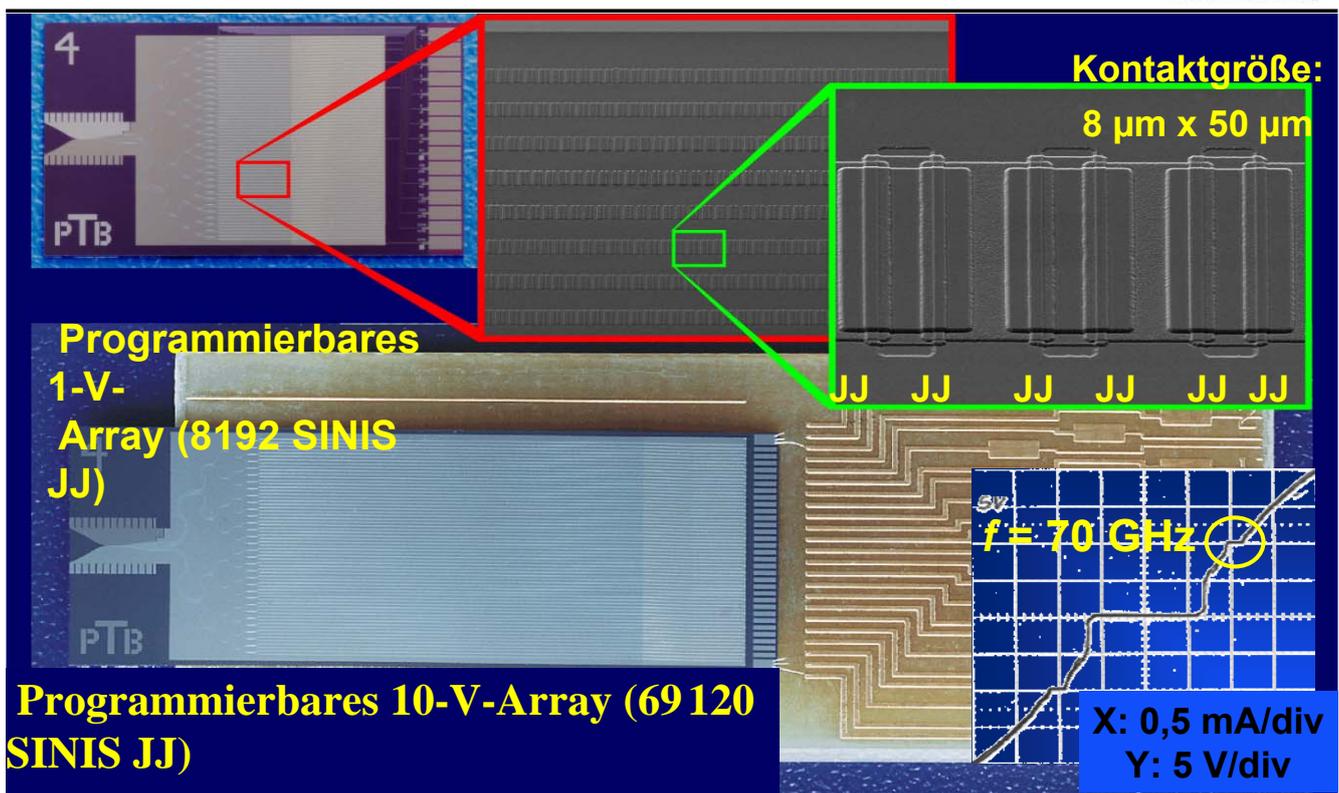


- 1990: K_{J-90} festgelegt:

$$K_{J-90} = \frac{2e}{h} = 483,5979 \frac{\text{GHz}}{\text{mV}}$$

- Nur von Naturkonstanten abhängig.
- Definiert heute Einheit „Volt“

4.4.2. Josephson-Spannungsstandard (III) - PTB



4.4.3. SQUID: Flussquantisierung

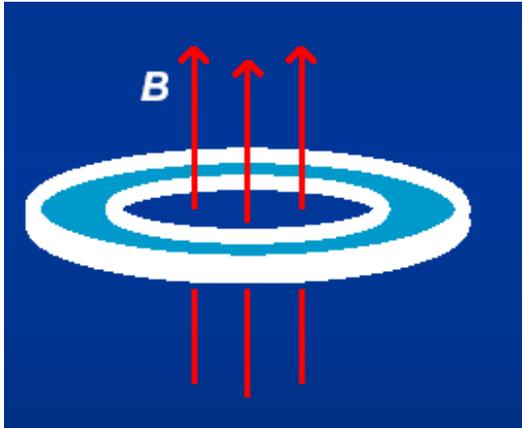
Faraday'sches Gesetz:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -U(t)$$

AC Josephson-Gleichung:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{2\pi}{\Phi_0} \cdot U$$

Quantisierung von magnetischem Fluß



Magnetischer Fluß im SI-Ring:

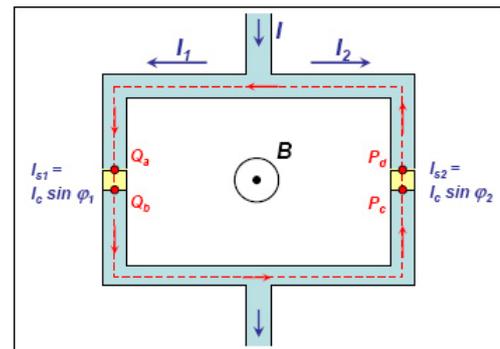
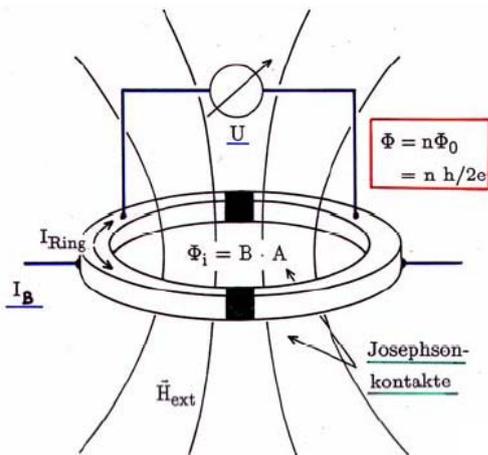
$$\Phi = n\Phi_0, n = 0, \pm 1, 2, \dots$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\Phi_0}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

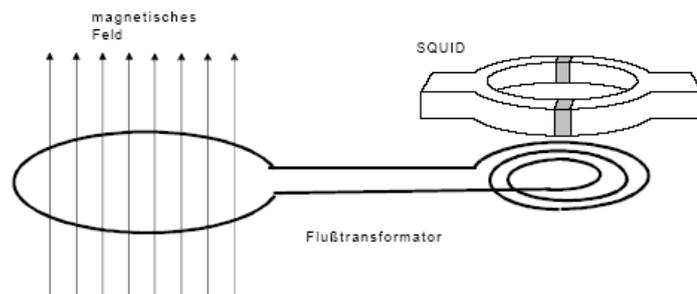
Integration:

$$\phi = 2\pi(\Phi / \Phi_0)$$

4.4.3. SQUID: DC - SQUID (I)



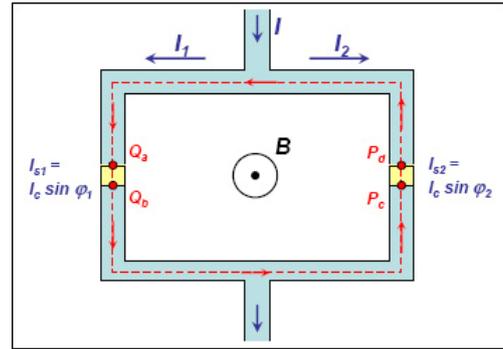
SQUID - Magnetometer



- Grundlegender Aufbau:

$$I_S = I_C \sin \varphi_1 + I_C \sin \varphi_2$$

$$I_S = 2I_C \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)$$

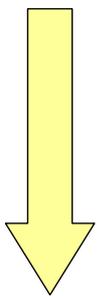


- Flussquantisierung
- Stetige Wellenfunktion
- Phasendifferenz im Ring = $2\pi \cdot n$

$$\Rightarrow \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi \cdot n + 2\pi \frac{\Phi_F}{\Phi_0}$$

4.4.3. DC - SQUID (III)

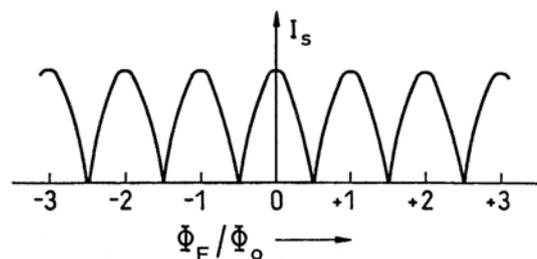
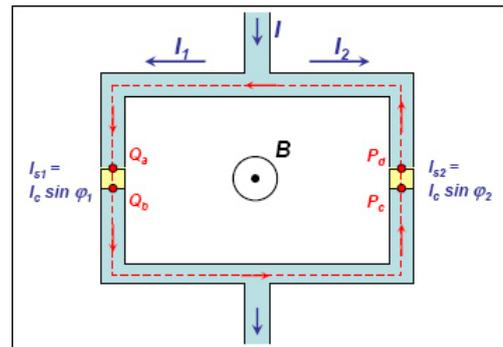
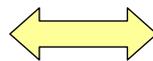
$$I_S = 2I_C \cos\left(\pi \frac{\Phi_F}{\Phi_0}\right) \cdot \sin\left(\varphi_1 + \pi \frac{\Phi_F}{\Phi_0}\right)$$

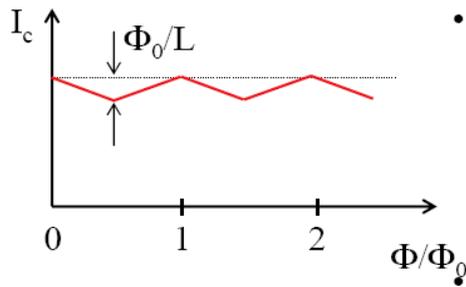
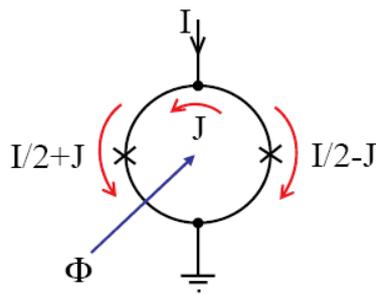


$$\tilde{I}_C = 2I_C \cos\left(\pi \frac{\Phi_F}{\Phi_0}\right)$$

$$\tilde{\varphi} = \varphi_1 + \pi \frac{\Phi_F}{\Phi_0}$$

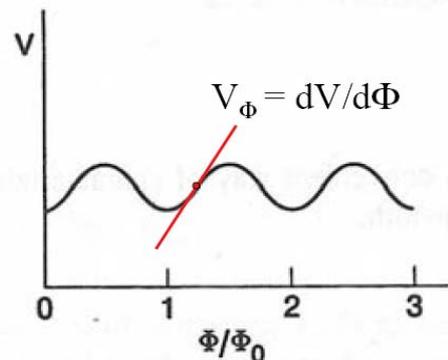
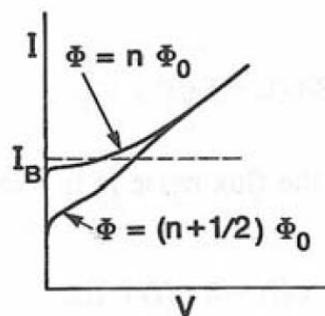
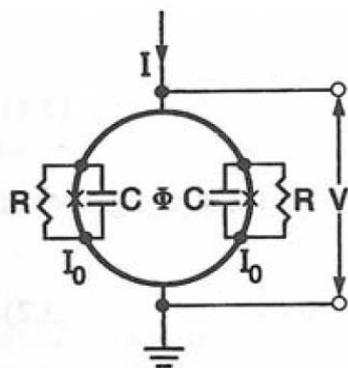
$$I_S = \tilde{I}_C \cdot \sin \tilde{\varphi}$$





- Annahme: identische Josephson-Kontakte $R_1 = R_2 = R_n$ und $I_{c1} = I_{c2} = I_0$
- ohne externen Fluss $\Phi = 0 \Rightarrow$ Abschirmstrom $J = 0 \Rightarrow$ Strom I teilt sich gleichmäßig auf beide Arme des SQUIDs auf \Rightarrow der gemessene kritische Strom ist gerade $2 \cdot I_0$
- externer Fluss $\Phi \Rightarrow$ Fluss in SQUID-Schleife ist quantisiert und Abschirmstrom J fließt um Schleife
- zirkulierender Strom J überlagert sich den Strömen in linkem und rechtem Arm \Rightarrow kritischer Strom von Kontakt 1 ist erreicht wenn $I/2+J = I_0$, an diesem Punkt fließt Strom $I_0-2 \cdot J$ durch Kontakt 2 \Rightarrow SQUID geht in resistiven Zustand über, wenn $I = 2 \cdot I_0 - 2 \cdot J$
- wenn $\Phi = \Phi_0/2$, dann geht SQUID bei $I = 2 \cdot I_0 - \Phi_0/L$ in resistiven Zustand über

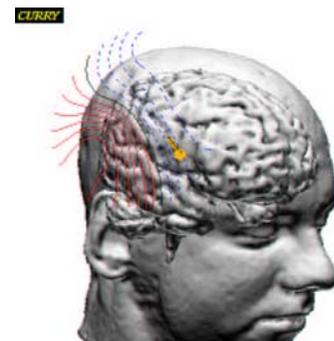
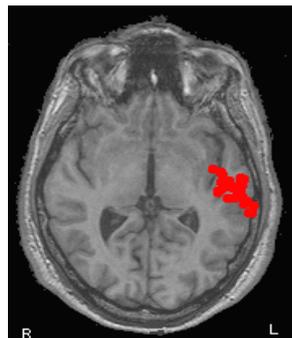
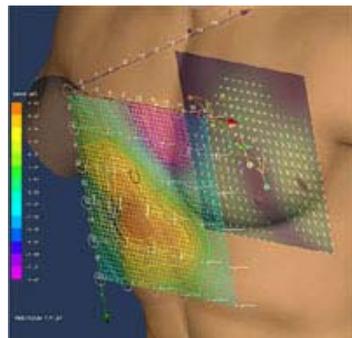
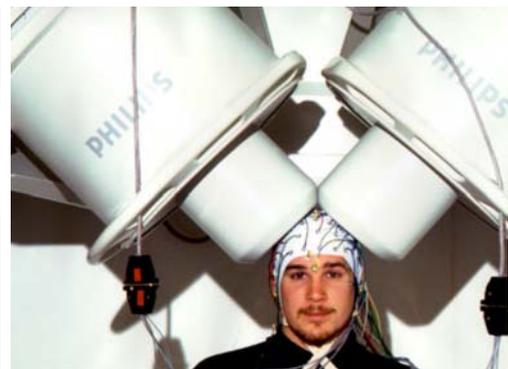
4.4.3. SQUID: Messung (II)



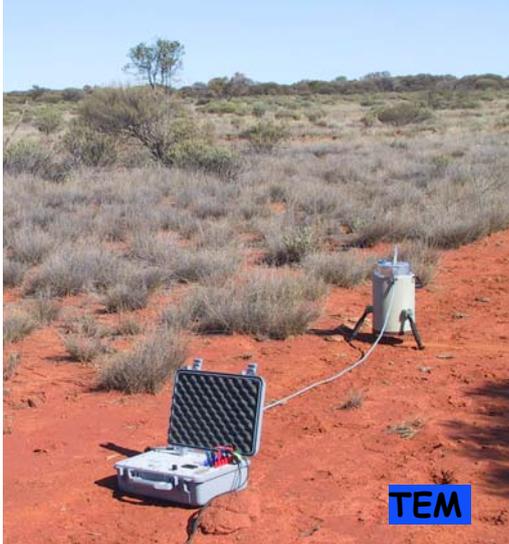
- Fortführung des vereinfachten Modells: Erhöhung des Flusses Φ von 0 auf $\Phi_0/2 \Rightarrow$ Spannungsänderung $\Delta V = \Delta I \cdot R_n/2 = (\Phi_0/L) \cdot R_n/2$
 \Rightarrow Empfindlichkeit: $V_\Phi = \Delta V/\Delta\Phi = \Delta V/(\Phi_0/2) = R_n/L$
- Numerische Simulationen: Empfindlichkeit (Transferfunktion) V_Φ ist maximal für $\beta_L = 2 \cdot L \cdot I_0/\Phi_0$

Anwendungsbereich	Beispiel
Medizintechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Magneto-Kardiographie • Magneto-Enzephalographie • Niedrigfeld-NMR
Fernerkundung	<ul style="list-style-type: none"> • Archäologie • Bodenschätze
Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	<ul style="list-style-type: none"> • Flugzeugteile • Metallurgie (Drähte, Bleche) • Verpackungen

4.4.3. SQUID: Medizintechnik

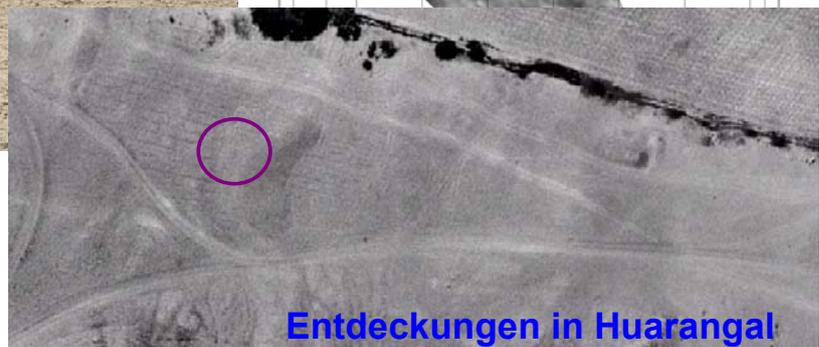
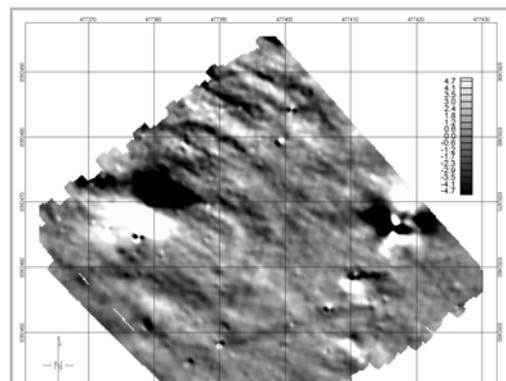


4.4.3. SQUID: Geophysikalische Erkundung

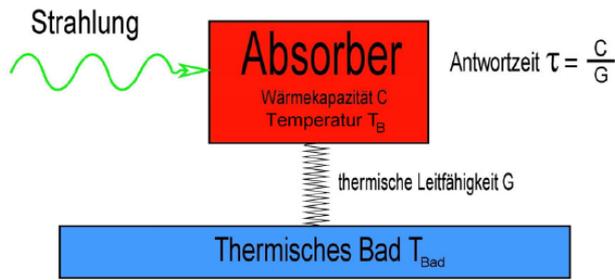


Ref.: IPHT Jena

4.4.3. SQUID: Archäologie



Ref.: IPHT Jena



Schematischer Aufbau eines Bolometers

$$C \frac{dT_B}{dt} + G(T_B - T_{Bad}) = P(t)$$

Linearisierte Leistungsbilanz des Systems

$$T_B(j\omega) = \left(\frac{P(j\omega)}{G} + T_{Bad} \right) (1 + j\omega\tau)^{-1}$$

Einfallende Strahlung bewirkt Temperaturänderung

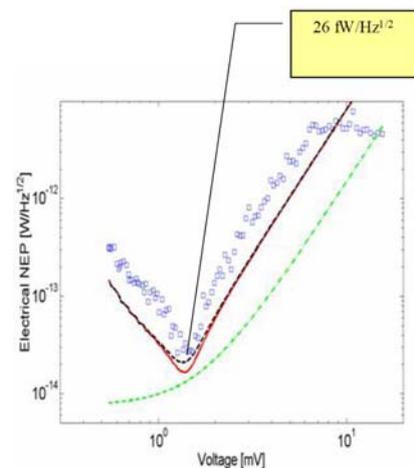
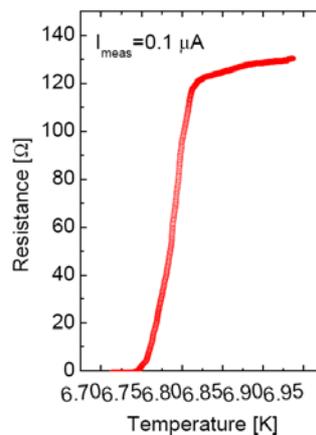
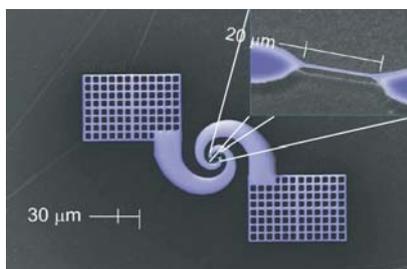
$$\tau = C/G$$

Heute 1-2 μ s möglich durch Verkleinerung des Absorbers (C)

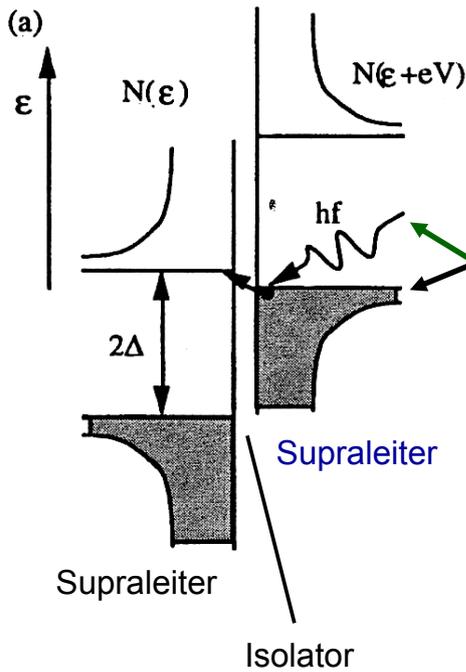
4.4.4. Strahlungsdetektoren: SL – Bolometer (II)

Länge der Brücke 20 μ m

Material Niob (Nb), NEP < 10⁻¹⁶ W / sqrt(Hz)
Sprungtemperatur 9,25K

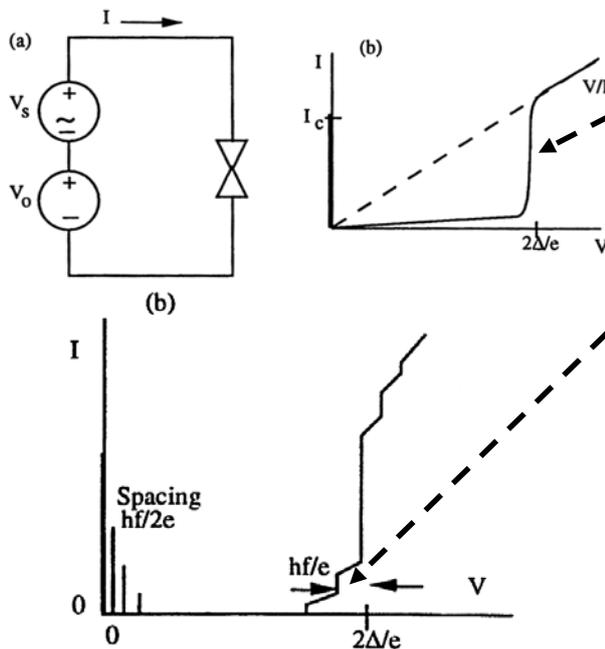


Aktuelle Mikrobolometer können im Zusammenspiel mit einer aktiven THz-Quelle auch bei Zimmertemperatur eingesetzt werden



Es gibt keine erlaubten Zustände mit dieser Energie auf der anderen Seite

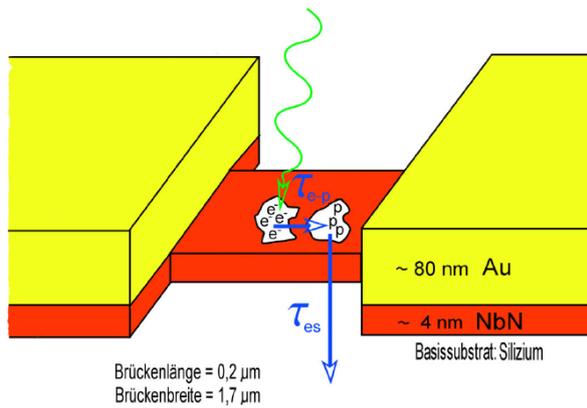
Aber mit Hilfe der Energie eines einstrahlenden Photons gelingt der Sprung
-> „photon-assisted tunneling“



Die U-I-Kennlinie des SIS-Kontakts weist eine sehr starke Nicht-Linearität auf

Hier können sogar einzelne Photonen nachgewiesen werden. Die Höhe der Stufen variiert je nach Frequenz der eingestrahnten Photonen.

Leider verhält sich z.B. Niob oberhalb der Lückenfrequenz ($2 \cdot \Delta / h$ ca. 700 GHz) metallartig -> die Nichtlinearität verschwindet



Die Elektron-Elektron-Wechselwirkung läuft deutlich schneller ab, als die Elektron-Phonon-Wechselwirkung.

Nur das Elektronengas wird erhitzt („Heisse Elektronen“).

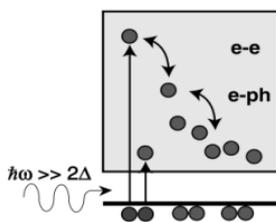
Dadurch deutlich kürzere Antwortzeiten.

Geeignet für sehr hohe Frequenzen.

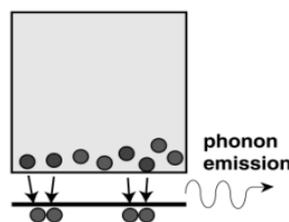
4.4.4. Strahlungsdetektoren: Supraleitender Einzel-Photonen-Detektor (SSPD)

Supraleitender Einzel-Photonen Detektor

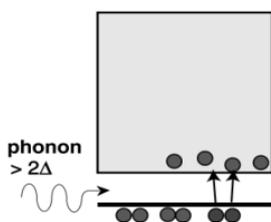
(a) Thermalization process



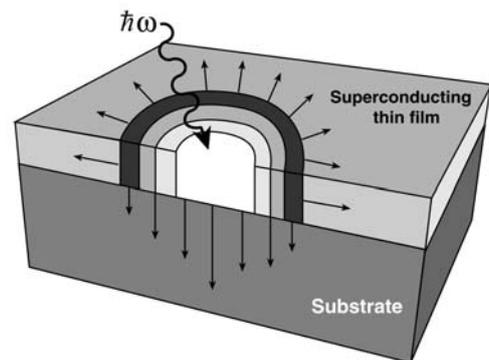
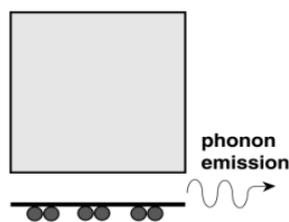
(b) Quasiparticle recombination



(c) Breaking of pairs by phonons

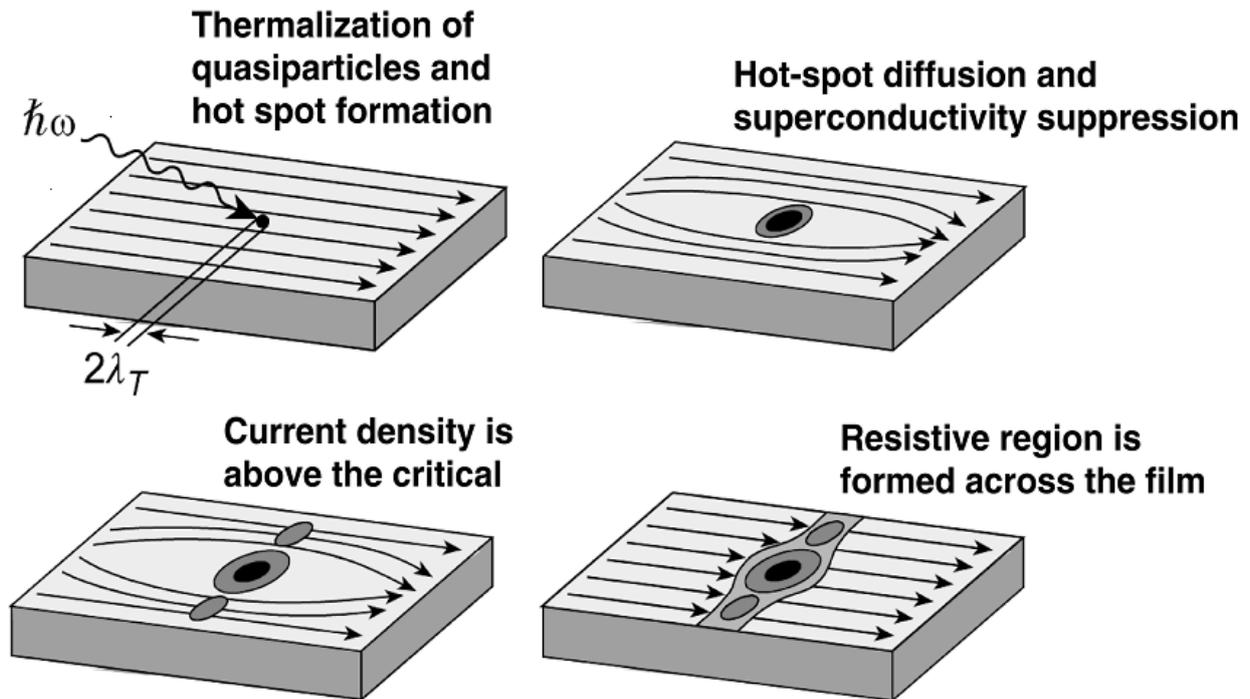


(d) Phonon escape to substrate



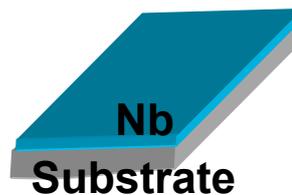
- Elektronenanregung durch Thermalisierung
- Wachstum des Hotspot durch Quasiteilchen-Anregung durch e-ph relaxation.
- Zusammenbruch des Hotspot.

4.4.4. Strahlungsdetektoren: Supraleitender Einzel-Photonen-Detektor (SSPD)

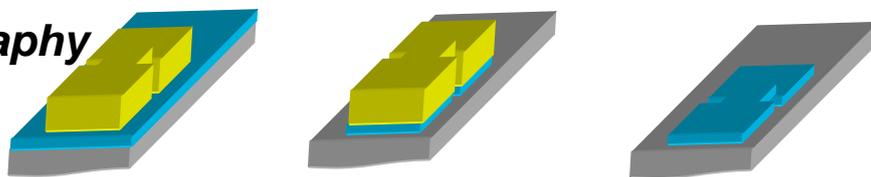


4.4.4. Strahlungsdetektoren: Supraleitender Einzel-Photonen-Detektor (SSPD)

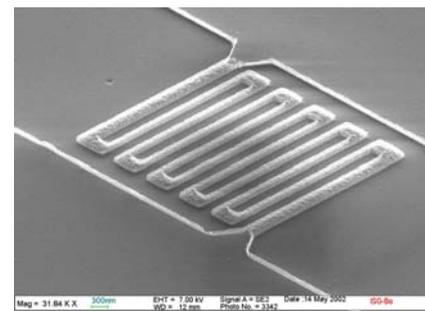
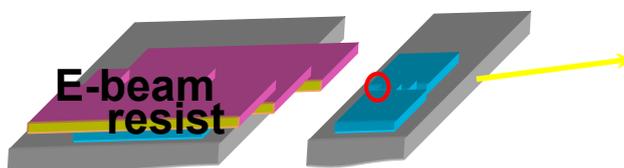
dc Nb magnetron sputtering



Photolithography and IBE



E-beam lithography and IBE



4.4.4. Strahlungsdetektoren: Supraleitender Einzel-Photonen-Detektor (SSPD)

Detector Model	Counting rate (s ⁻¹)	DE (%)	Jitter (ps)	Dark cnts (s ⁻¹)
FPD5W1KS InGaAs APD (Fujitsu)	5.0 · 10 ⁶ *	16	200	500**
R5509-42 STOP PMT (Hamamatsu)	9.0 · 10 ⁶	0.1	150	2.0 · 10 ⁴
Si APD SPCM -AQR-16 (EG&G)	5.0 · 10 ⁶	0.01	350	25
Mepsicron II PMT (Quantar Tech.)	1.0 · 10 ⁶ ***	0.001	100	0.1
Supercond. Tunnel Junction	5.0 · 10 ³	60	N/A	N/A
SSPD (measured)	10 · 10 ⁹	5	<35	<0.01
SSPD (work in progress)	30 · 10 ⁹	>10	18	<0.0001

* Gated regime with 0.1% per gate after-count probability.

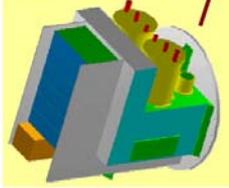
** Calculated with 10⁻⁴ per gate probability.

*** Data for a high-speed version; standard devices exhibit 1 · 10⁵ s⁻¹.

4.4.4. THZ - Empfänger

Diagram	Technologie	Empfindlichkeit	Kosten
	Heterodyn-empfang	Seht gut	Extrem hoch
	Kohärenter Direkttempfang (maximal 250 GHz)	Gut	Hoch
	Gekühlte Mikro-bolometer	Gut bis Sehr gut	Moderat
	Inkohärenter Direkttempfang	Moderat	Niedrig

4.4.4. Radioastronomie



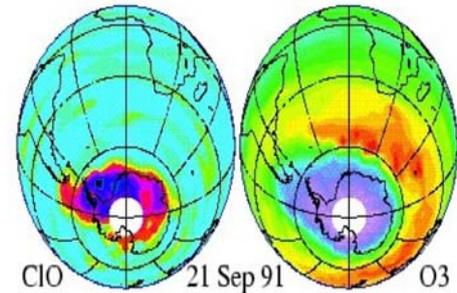
GREAT:
German Receiver
for Astronomy at
Terahertz
Frequencies



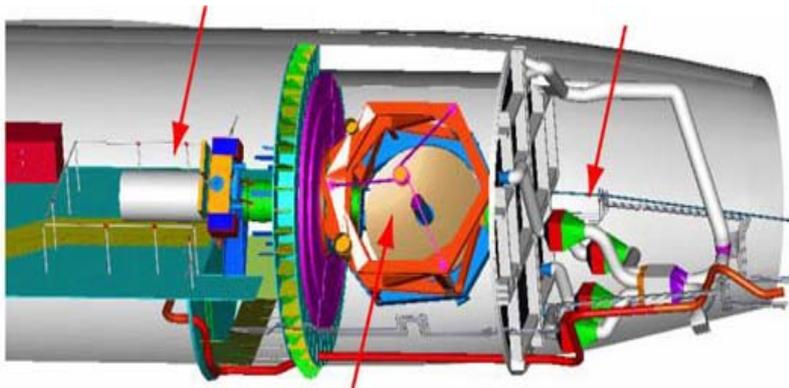
TELIS:
Terahertz Limb Sounder



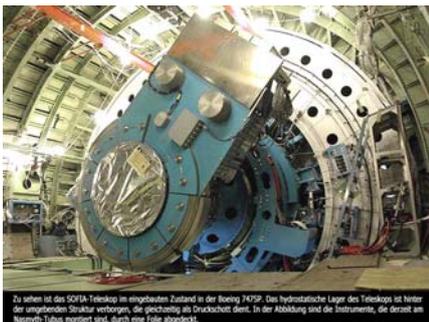
Earth Orbiter/Sounder



4.4.4. Radioastronomie - Instrumente

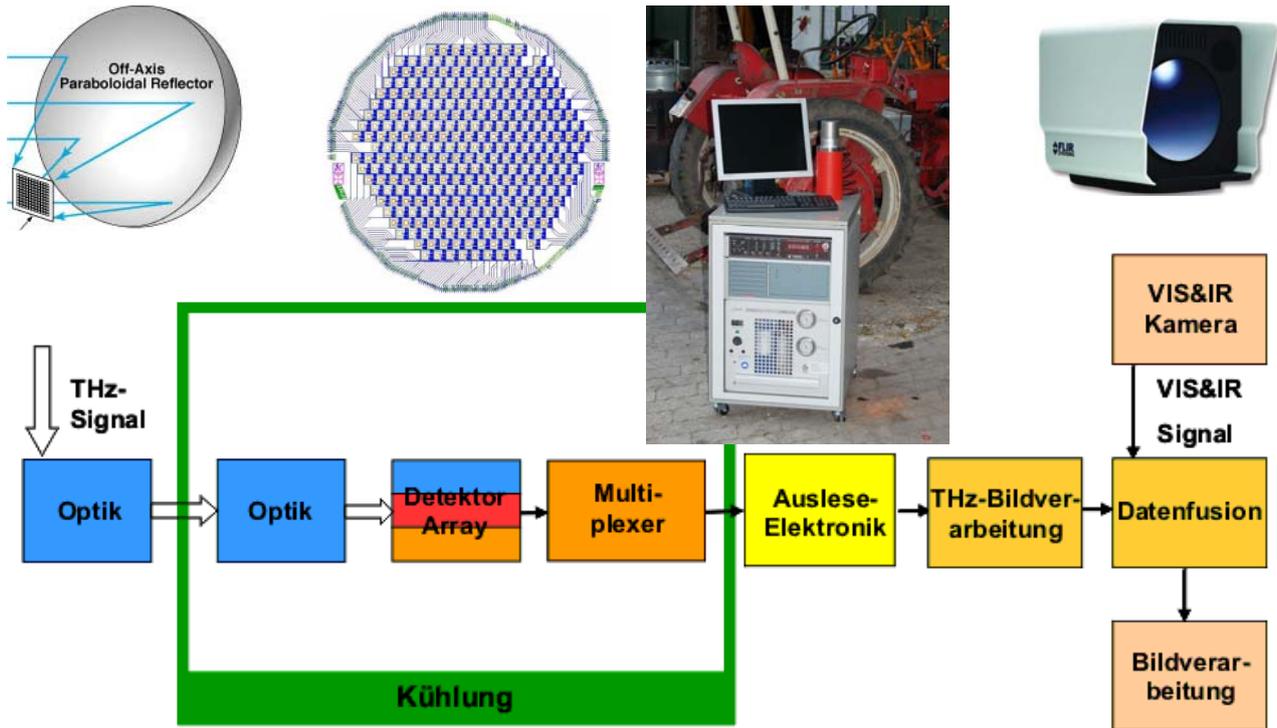


Artist's Impression of ALMA
(Atacama Large Millimetre Array)
© European Southern Observatory

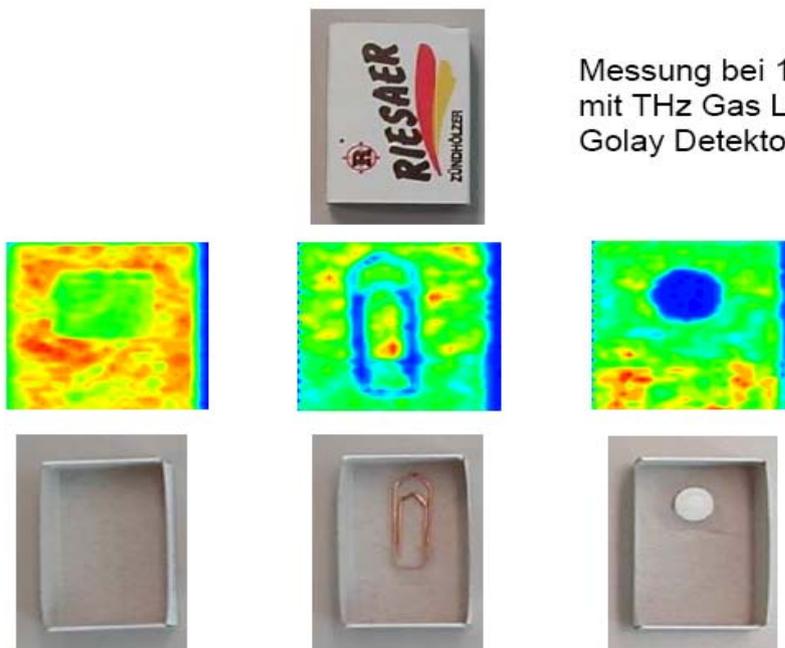


Zu sehen ist das SOFIA-Teleskop im eingebauten Zustand in der Boeing 747SP. Das hydrostatische Lager des Teleskops ist hinter der umgebenden Struktur verborgen, die gleichzeitig als Druckkottel dient. In der Abbildung sind die Instrumente, die derzeit am Near-Infrared-Submillimeter-Array, durch eine Folie abgedeckt.

4.4.4. Sicherheitstechnik (I)



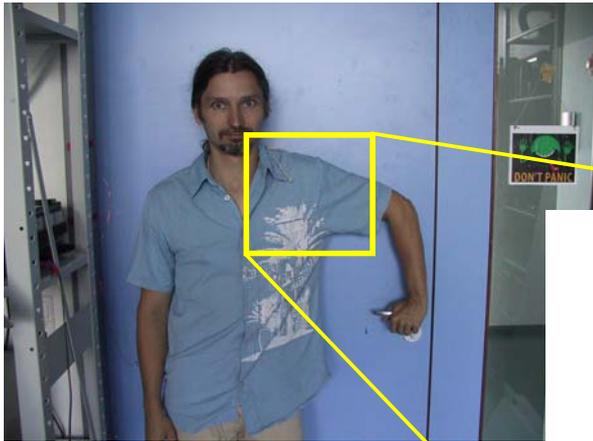
4.4.4. Sicherheitstechnik (II)



Messung bei 1.6 THz mit THz Gas Laser und Golay Detektor

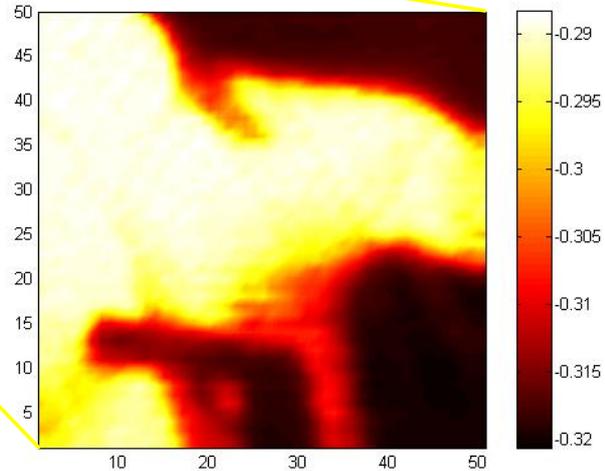
Kooperation: IPHT, DLR, IMS

4.4.4. Sicherheitstechnik (III)



Kooperation: IPHT, DLR, IMS

THz - Bild

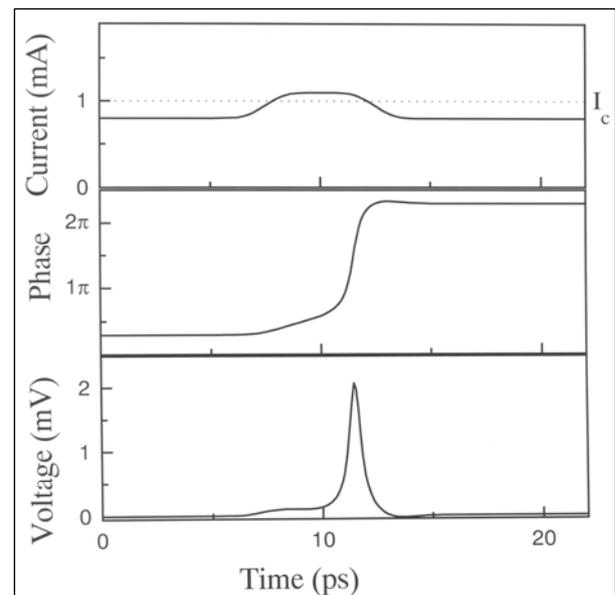
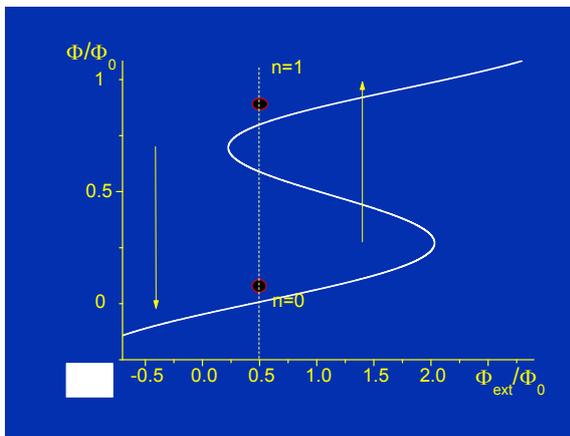
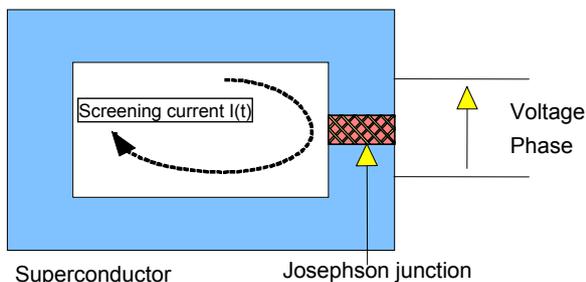


Vorteile der neuen Technologie:

- Indoor (Aufnahme in Gebäuden)
- Stand-off (5-20m Entfernung)
- Passiv (keine extra THz-Bestrahlung!)

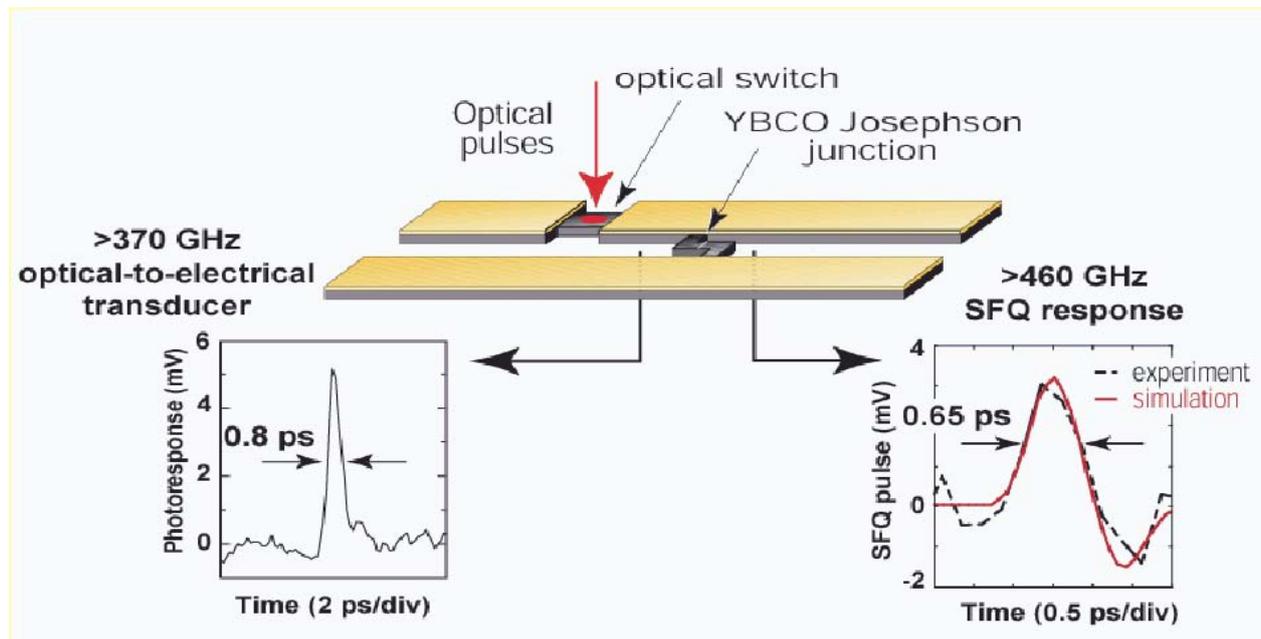
4.4.5. Ultra-schnelle Elektronik: RSFQ - Idee

Loop inductance

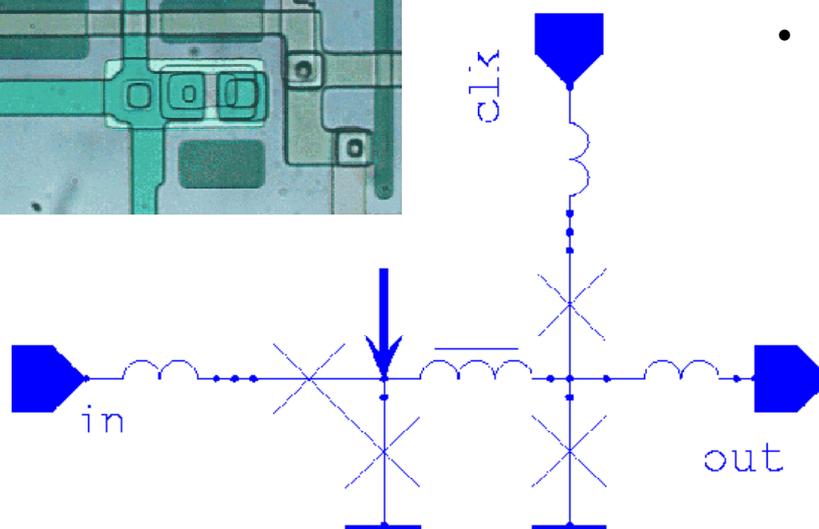
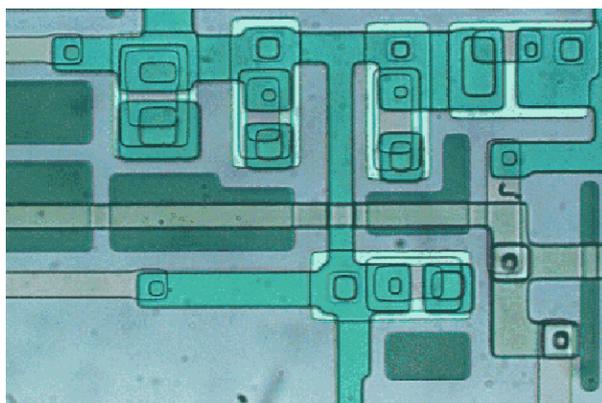


$$\int U(t) dt \approx \Phi_0 \approx 2 \text{ mV} \cdot \text{ps}$$

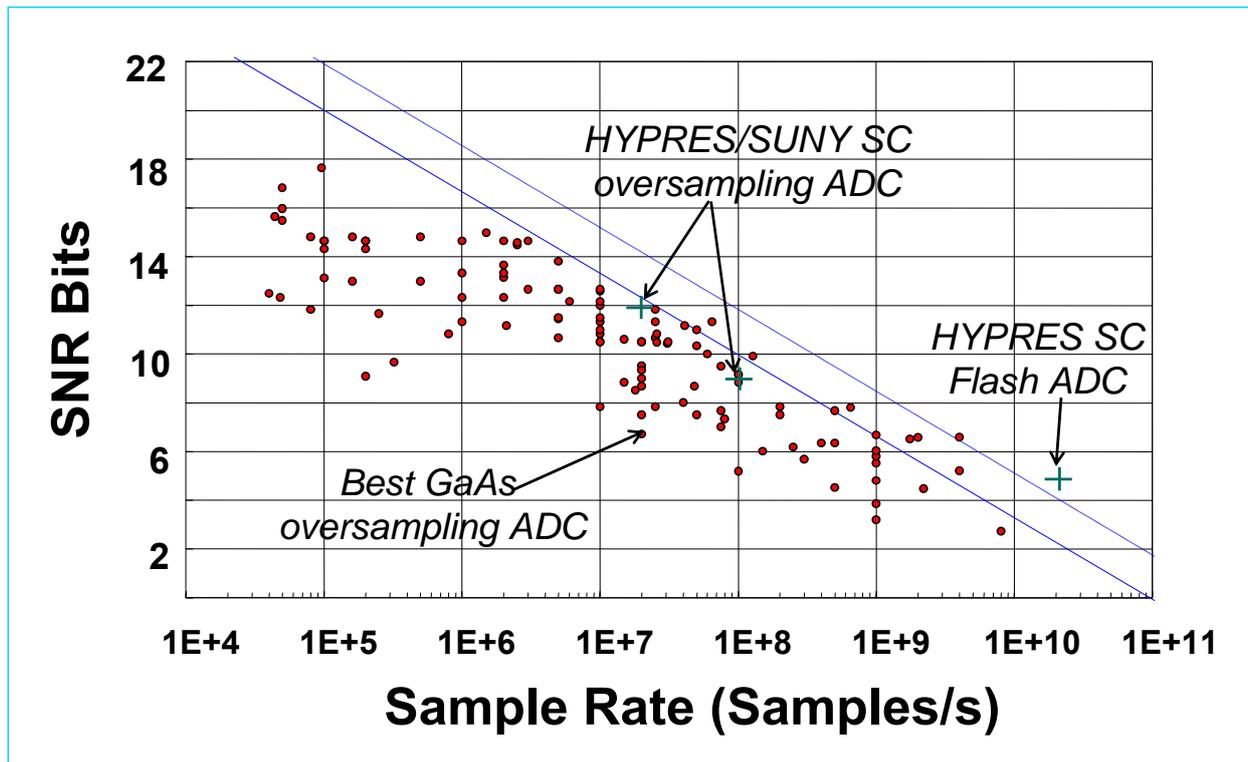
$$\int V(t)dt \approx \Phi_0 \approx 2 \text{ mV} \cdot \text{ps}$$



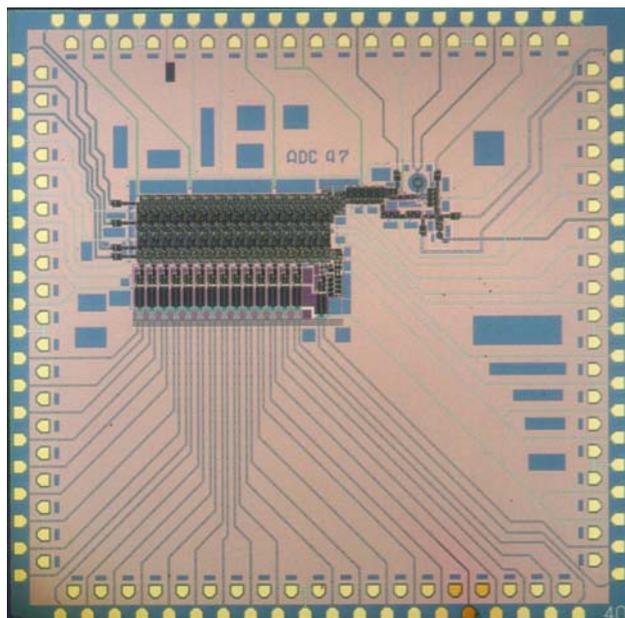
4.4.5. Ultra-schnelle Elektronik: SFQ D-Flip Flop



- Standard:
40 GHz
- Advanced:
750 GHz



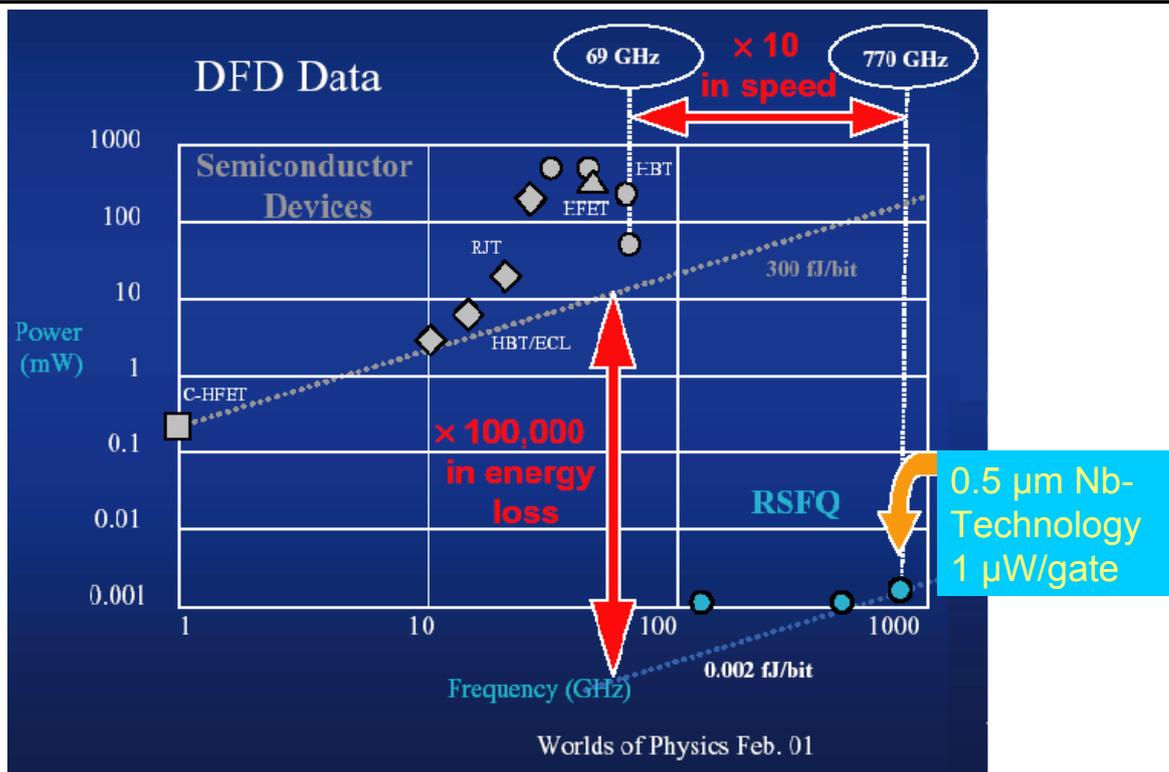
4.4.5. Ultra-schnelle Elektronik: State-of-the-Art ADC



- 15 bit resolution
- 20 GHz clock
- 200 MS/s output
- 6.000 junctions
- 1 mW
- HYPRESS, USA

Immediate Opportunities (next few years, 3.5 μm Technology with less 10 K JJs/ die)		Large Scale Applications (next 5 - 10 years, 0.3 μm Technology with less 10 M JJs/ die)	
Circuits	Parameter Examples	Systems	Parameter Scales
ADCs, Digital SQUIDs	14 bits @ 60 MHz, noise 100 K	Digital Switching	100 Gbps @128 x 128 channels
DACs, Digital Synthesizers	10 bit @ 18 GHz, 100 mV	Digital Signal Processors	100 GigaOps 1 chip, 0,1 W @ 4 K
Digital Signal Correlators	1 bit @ 1024 channels, 16 GHz 8 bit @ 8 channels, 128 Gbps	TeraFlop Scale Servers	1 Teraflop peak 1 MCM, 0,5 W @ 4 K

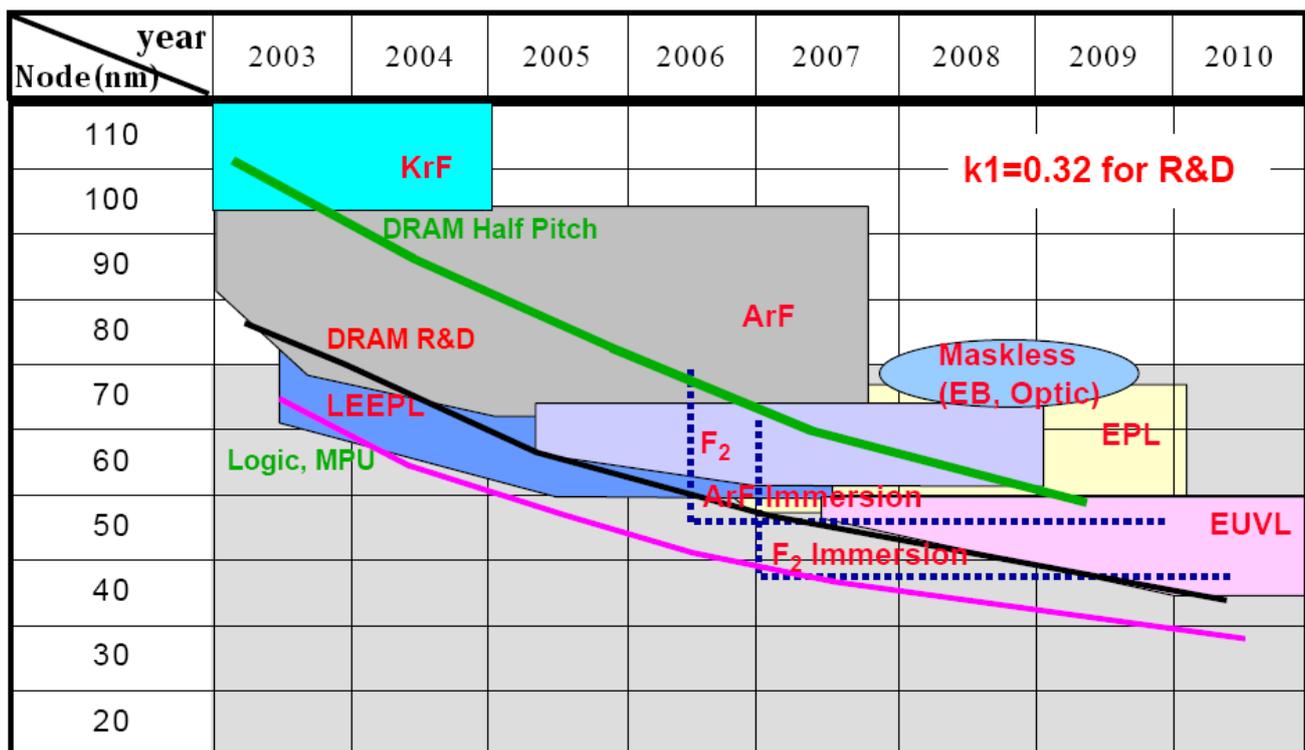
4.4.5. Ultra-schnelle Elektronik: Vergleich



5. Nanostrukturierung

1. Introduction
 - Concepts
 - Trends
2. Photolithography
3. Electron-Beam Lithography
4. Pattern Transfer
 - Subtractive Transfer
 - Additive Transfer

Technology Roadmap (DRAM, Logic)



Large Diameter Wafer Handling



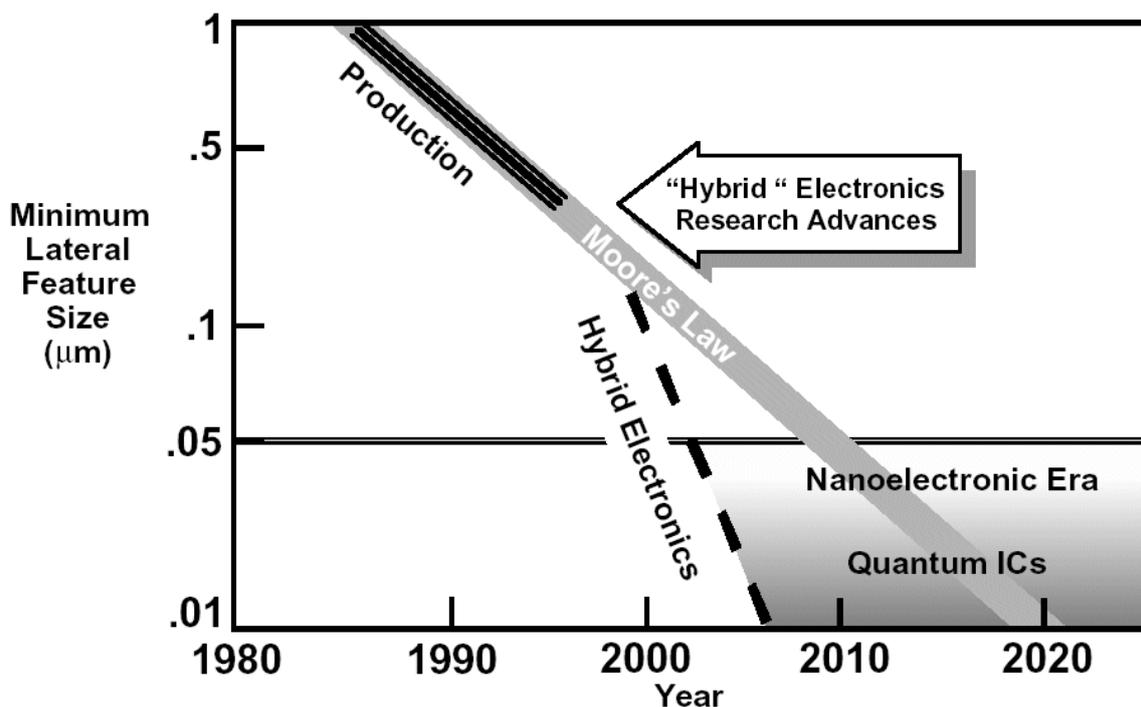
300mm wafer vs. pizza



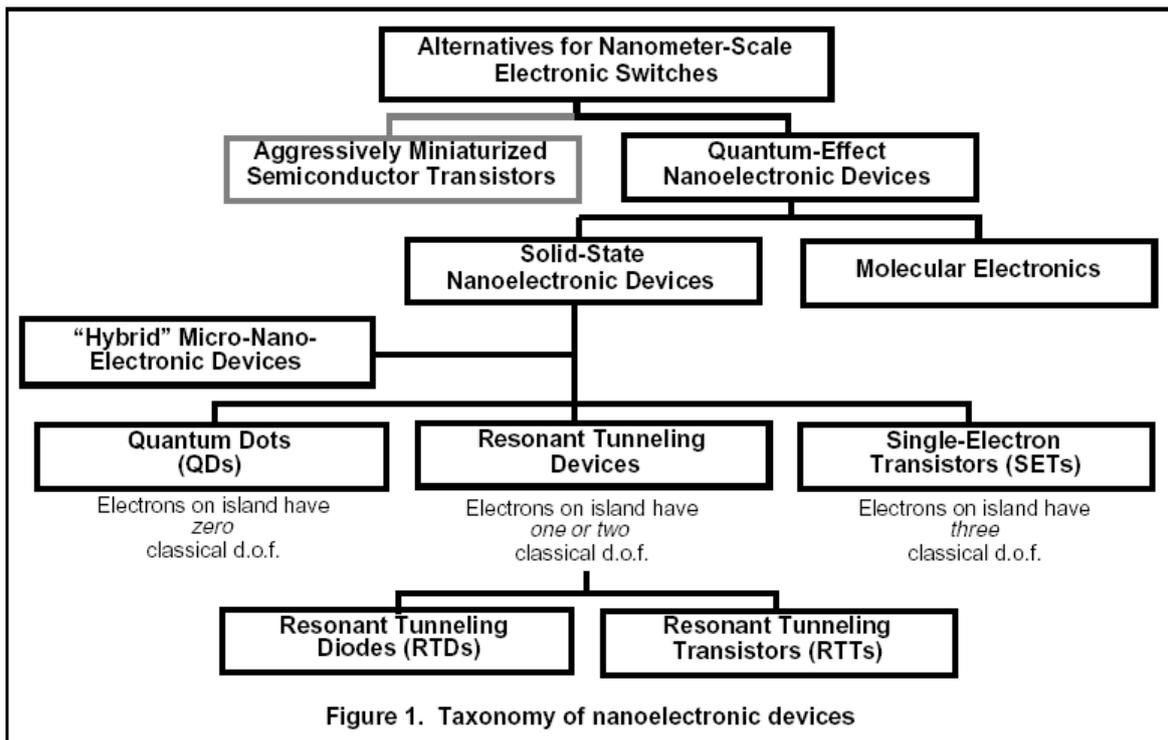
Overhead rail transport of wafer cassette

Lateral uniformity of processing effects across the WHOLE wafer is key consideration for microfabrication design

Roadmap and Nanoelectronics

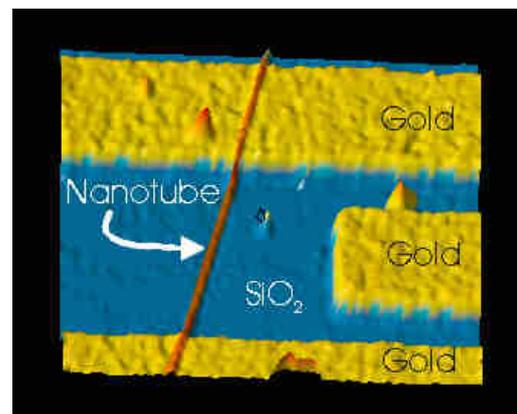
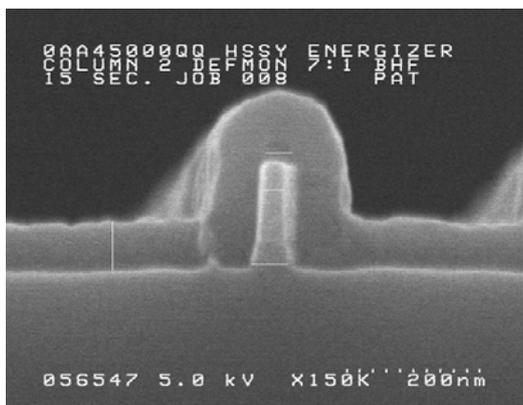
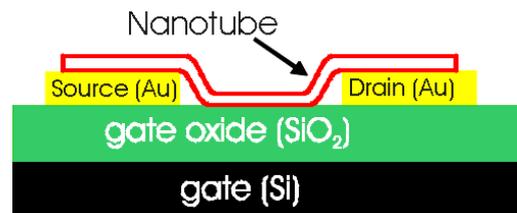
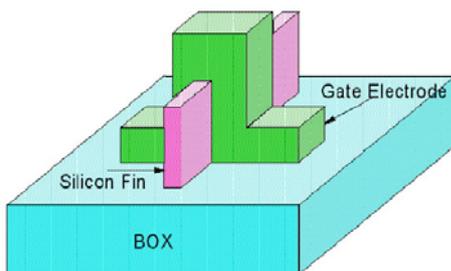


Taxonomy of Nanoelectronic Devices

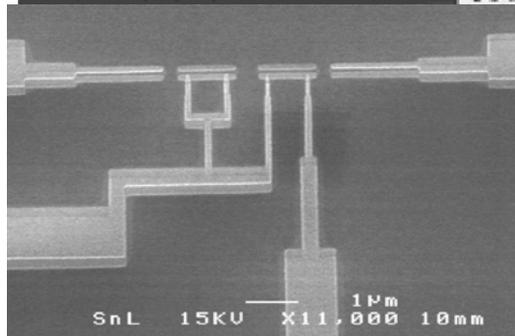
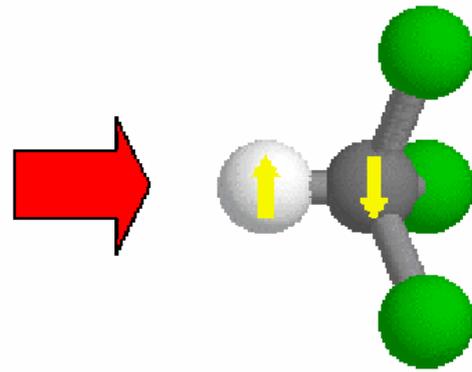
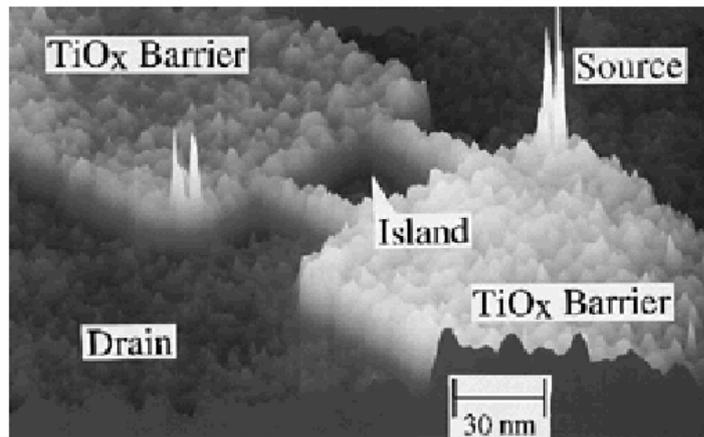


Challenges

FinFET Structure



Devices for Quantum Computing



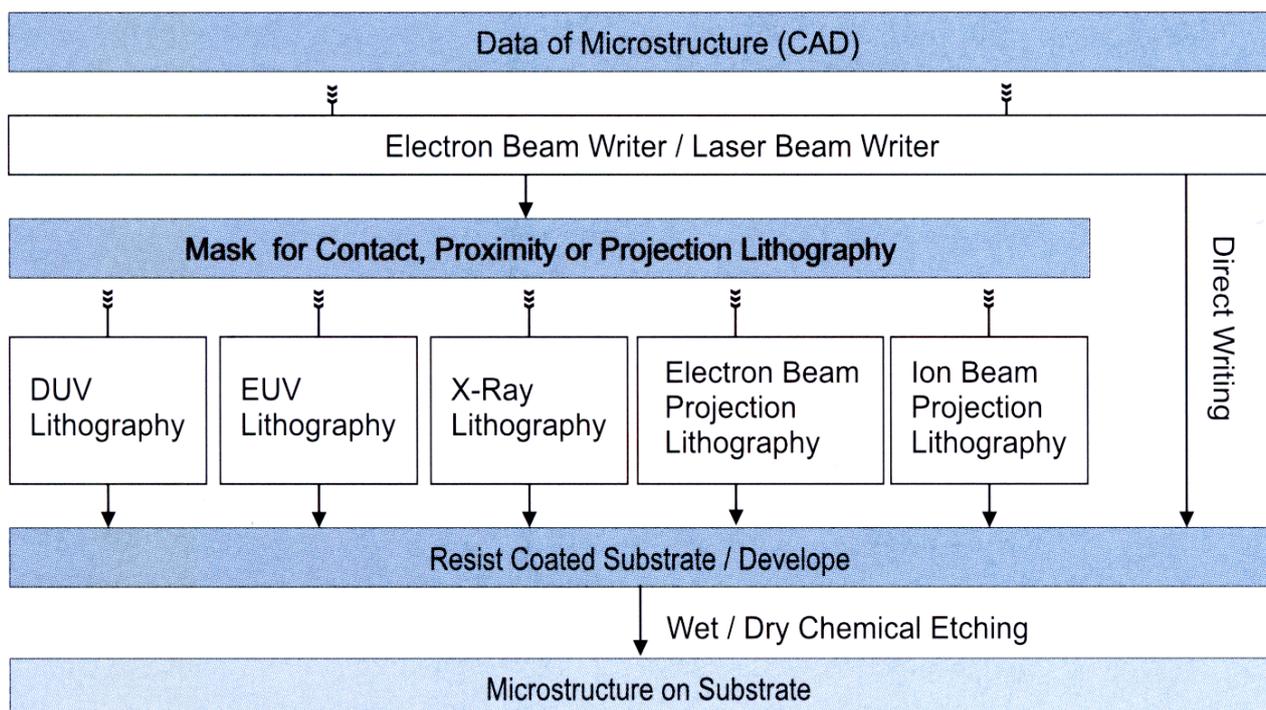
Concept of Thin Film Lithography

- Controlled realisation of a 3-dimensional structure
- Dimensions, accuracies and tolerances are in the nanometer range
- Step-by-Step process, Layer-by-layer
- Integration to a complete process
- Feedback loop between process and performance

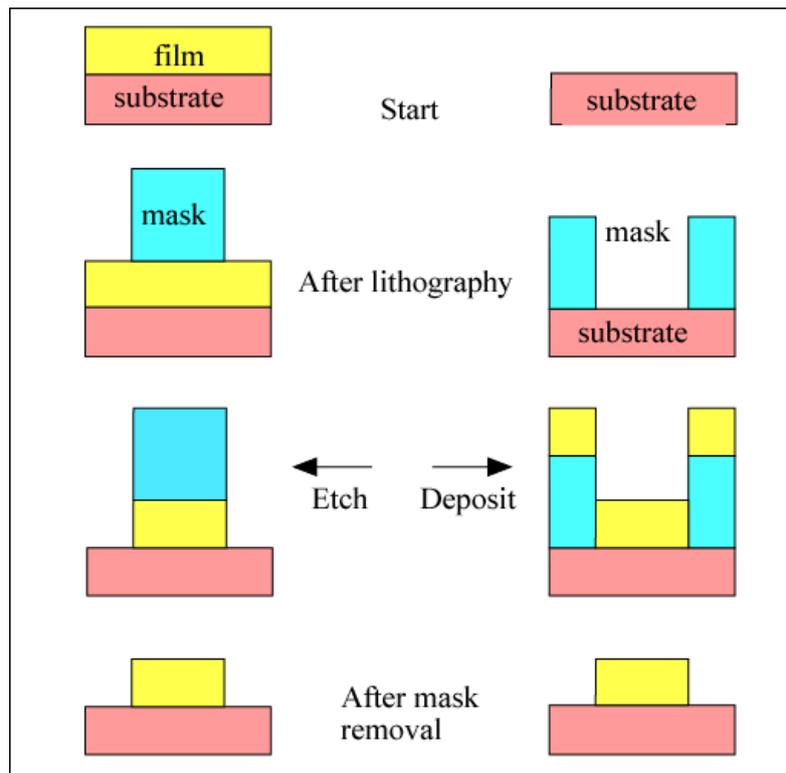
Layer-by-layer Technology

- Pattern Definition
 - Resist layer technology
 - Exposure
 - Pattern development
- Pattern transfer
 - Additive
 - Subtractive
- Mask removal
- Inspection

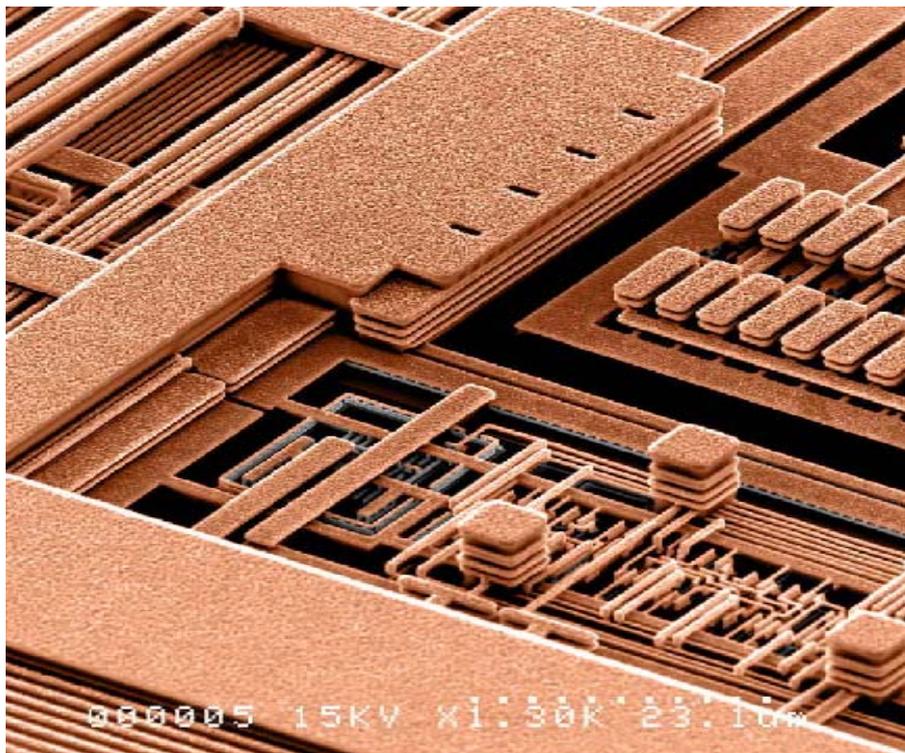
Standard Approach



Process Design – A Matter of Choice



Multi-level Micro- and Nano-Circuits

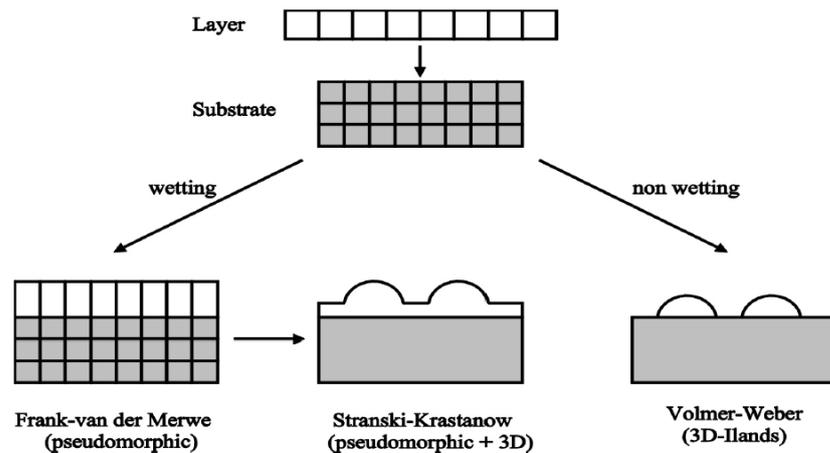


- **Applications**
 - Molecular Devices
 - Nanomechanical structures
 - Nanomagnetic structures
 - Nanofluidics
 - On-chip integration & “Lab-on-a-chip”
- **Technology**
 - Fabrication beyond limits
 - Atomic scale techniques

Trends: Basics

- **Bottom-up methods**
 - Epitaxy
 - Self organisation
 - Deposition of cluster matter
- **Top-down methods**
 - Lithography (opt., e-beam)
 - Nano print techniques
 - Nanostructures via scanning methods (STM, AFM, near field microscopy,)

Trends: Bottom-up



Trends: Top-down

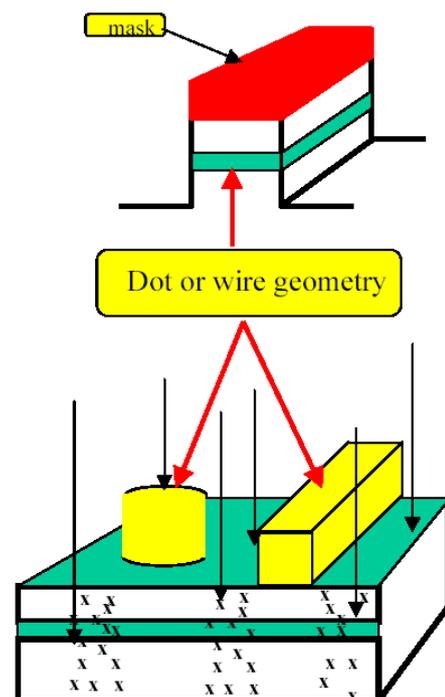
- Lithography based techniques

Lithography and etching

- optical lithography
- e-beam lithography
- wet chem. etch / dry etching

Lithography and implantation

- optical lithography
- e-beam lithography for impl. mask
- impl. of isoel. species

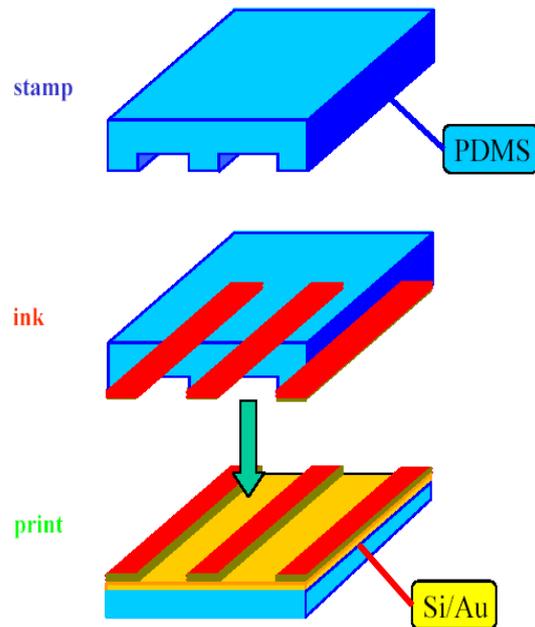


Trends: Nano-Imprint

- Nano print techniques

Silicon stamp by Lithography

- template by e-beam lithography
- Polydimethylsiloxan (PDMS) stamp mat.
- hardening of PDMS



Ink and print

- ink containing thiol molecules
- print on Si/Au
- structured SAM on Si/Au (5t0 nm)

Trends: Raster-Force-Methods

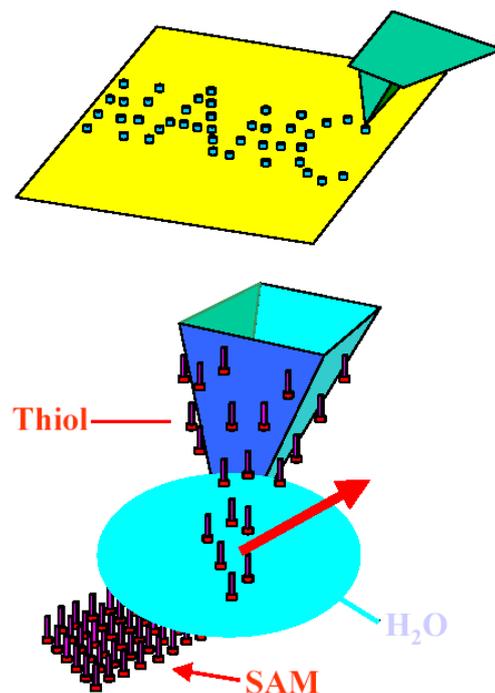
- Nano structures via scanning methods

Move atoms by AFM/STM

- placement of single atoms
-
-

Nano pen

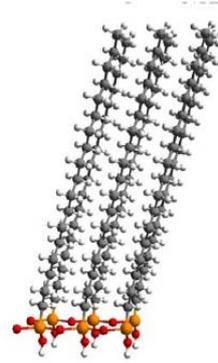
- Thiol molecules on STM tip
- environment of sat. H_2O
-



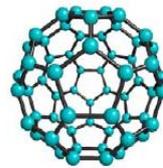
Trends: Molecules and Self-Assembly (I)

- Molecules

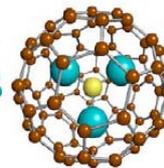
- Thiophenes, Thiols



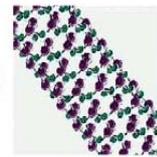
- Fullerenes, Carbon nanotubes



C₆₀
Fullerene



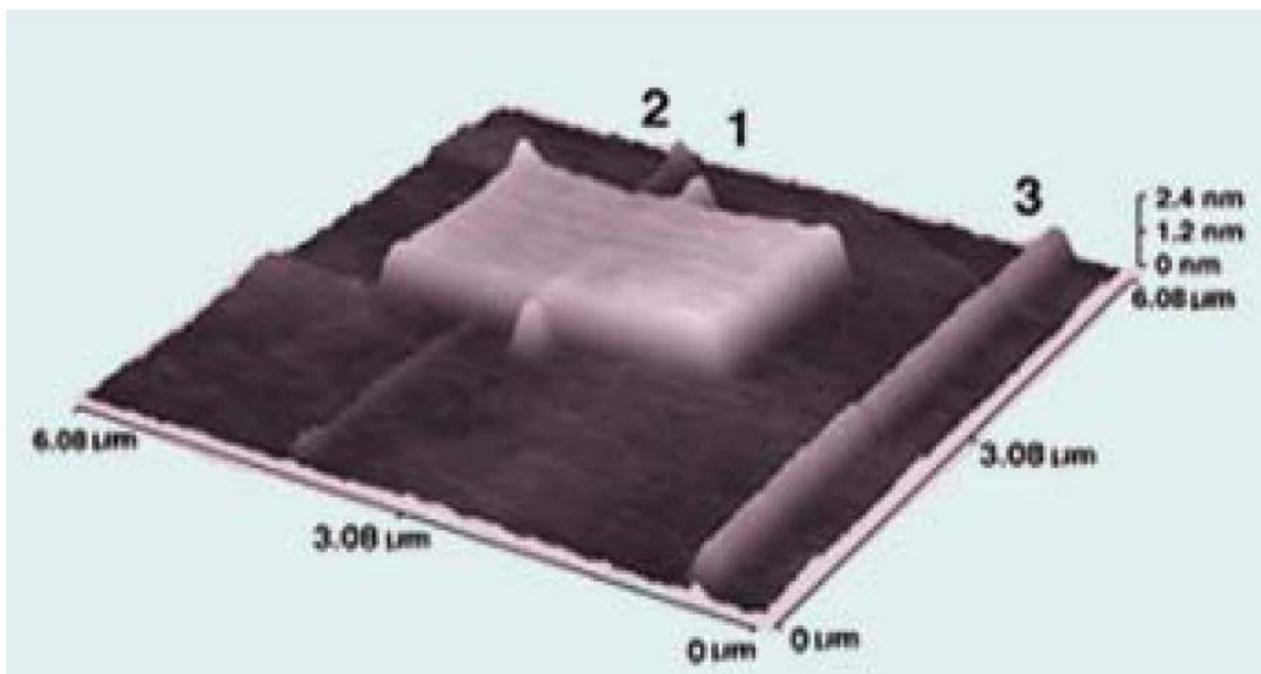
Sc₃N@C₈₀
Metallofullerene



Carbon
Nanotube

Virginia Tech (VT) CSAND

Trend: Self-Assembly (II)



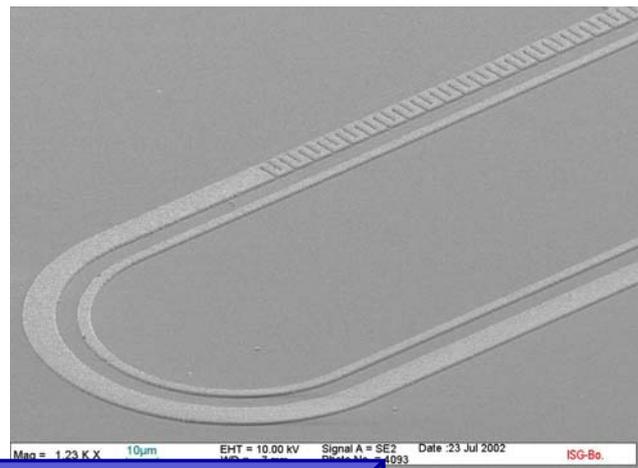
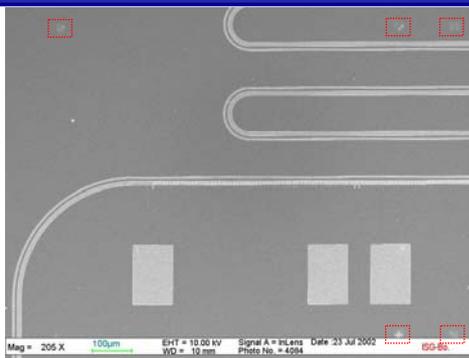
Nanostructure made of a single layer of oriented molecules, self-assembled on a nanoelectrochemically patterned monolayer surface on silicon

Pattern Definition

- **Radiation sources**
 - Photons
 - Electrons
 - X-ray
 - Ions
- **Approach**
 - Shadow mask
 - Imprint
 - Direct write

Different Exposition Fields

Writing field – **1000 μm**

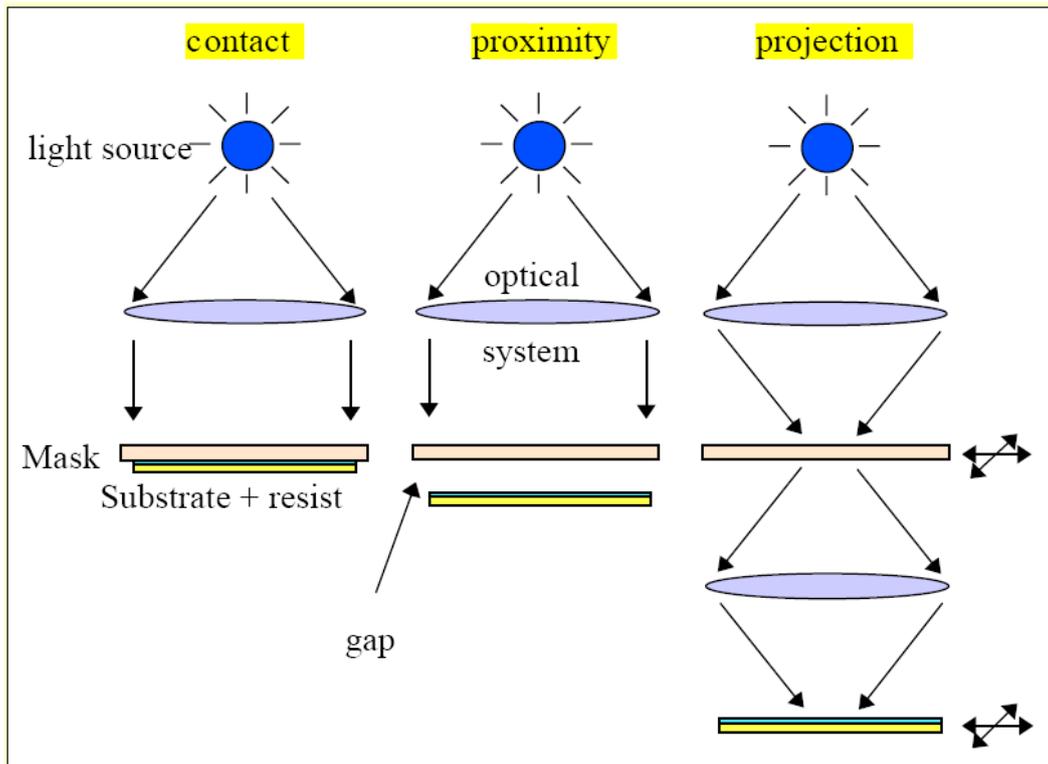


Width of meander line – **0.5 - 4 μm**

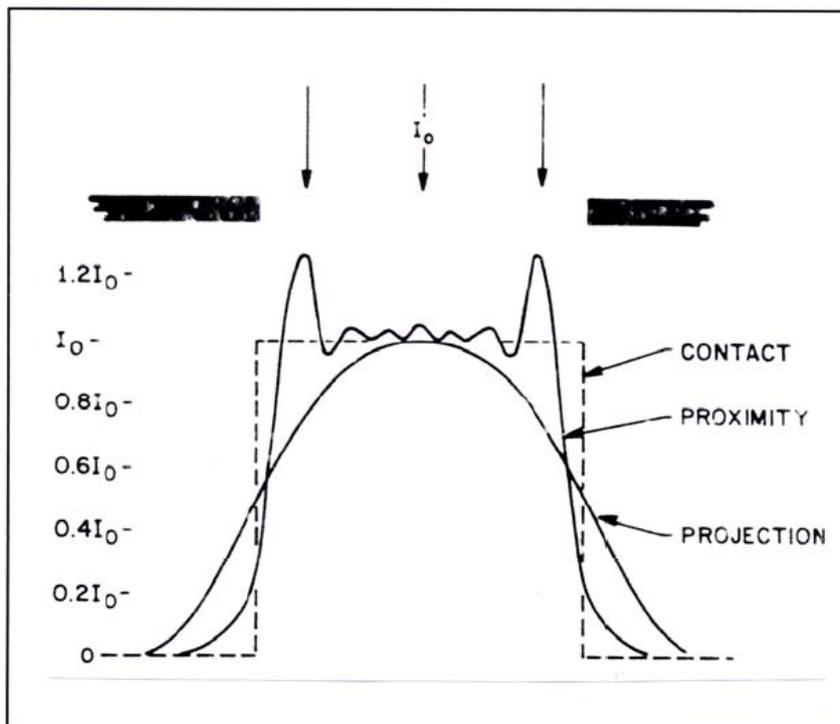
Distance – **0.3 - 1 μm**

Total length of structure – **8 mm**

Optical Lithography – Mask controlled



Optical Lithography – Diffraction Limit



Minimum Feature Size

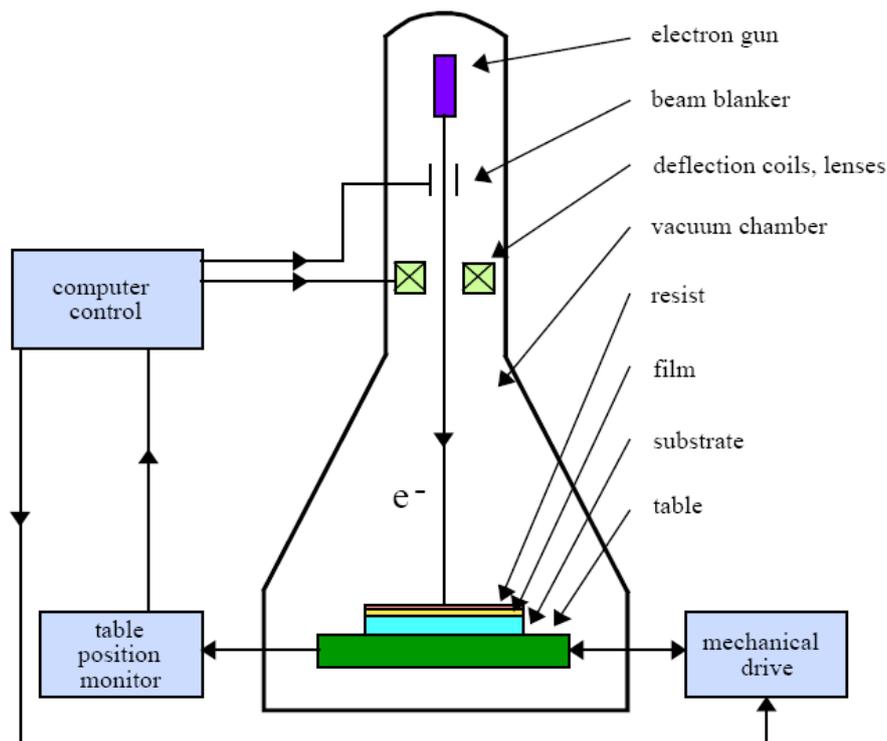
$$MFS = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

$$k_1 = 0.5 - 0.9$$

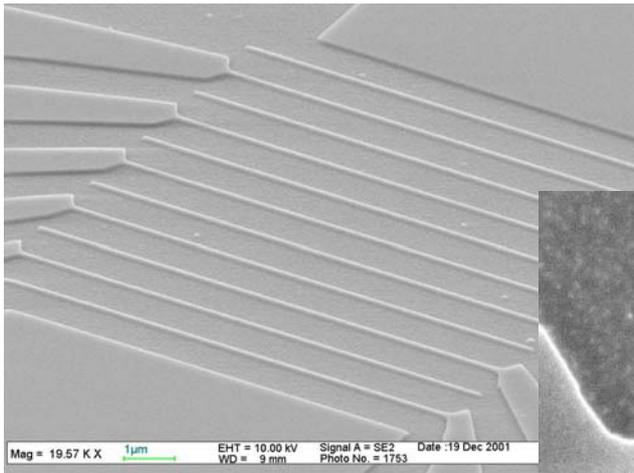
Light Sources

Wavelength [nm]	Source	Range
436	Hg arc lamp	G-line
405	Hg arc lamp	H-line
365	Hg arc lamp	I-line
248	Hg/Xe arc lamp; KrF excimer laser	Deep UV (DUV)
193	ArF excimer laser	DUV
157	F ₂ laser	Vacuum UV (VUV)
~10	Laser-produced plasma sources	Extreme UV (EUV)
~1	X-ray tube; synchrotron	X-ray

Electron-Beam Lithography (EBL)

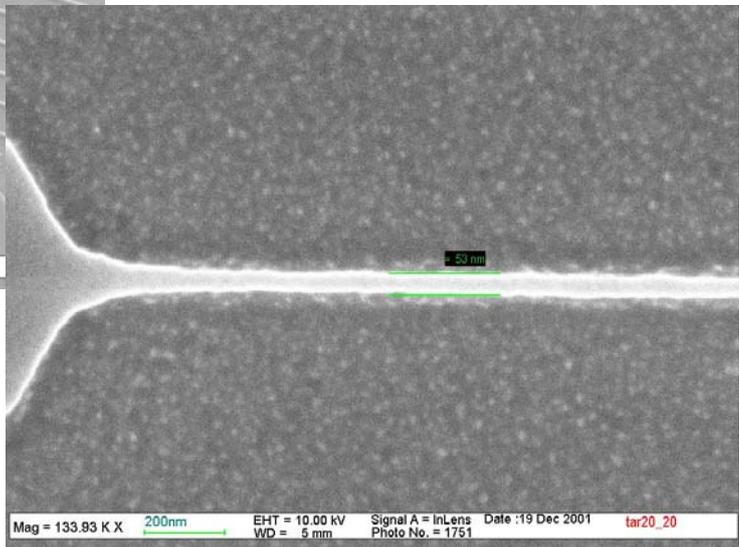


EBL for new devices

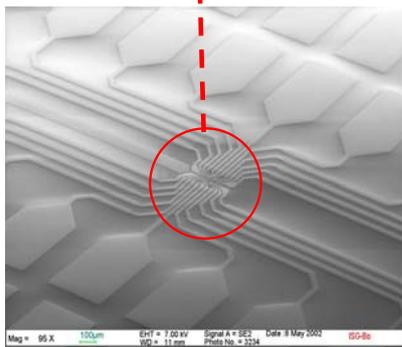
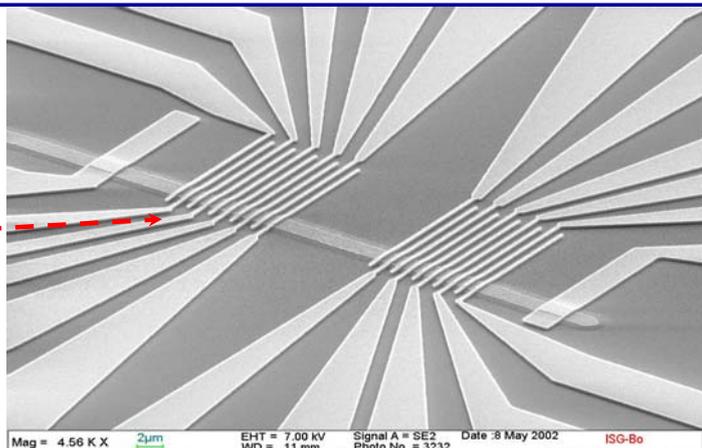
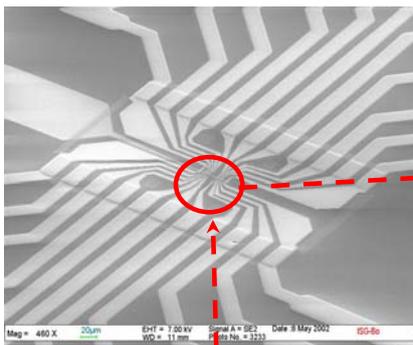


Characteristic size < 50nm

Writing field 100×100 μm



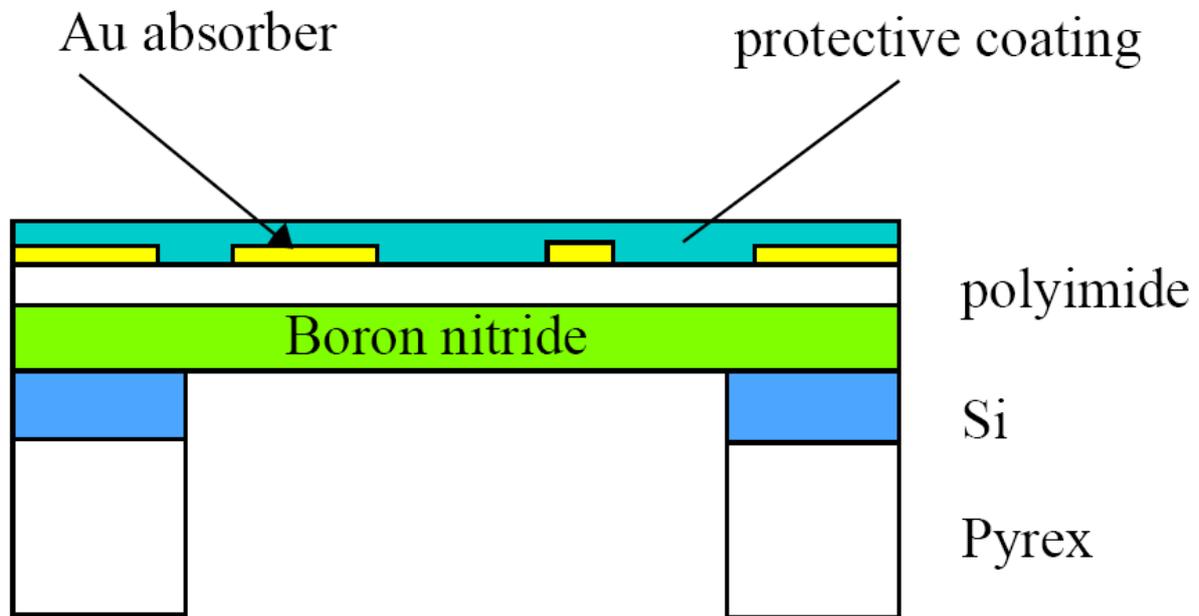
Josephson junction for quantum computing



Writing field – 400 μm
Width of strip – 250 nm
Distance – 1 μm

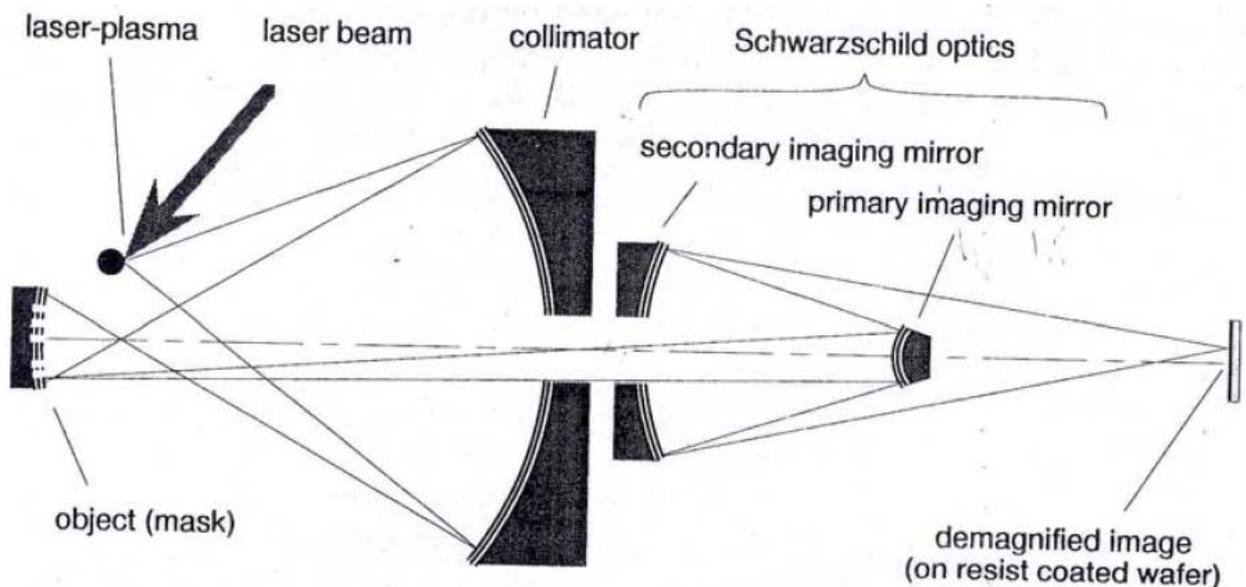
X-Ray Lithography (I)

Shadow mask concept – $\lambda=1$ nm

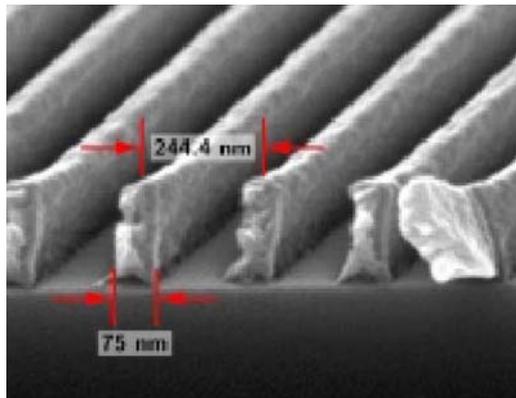
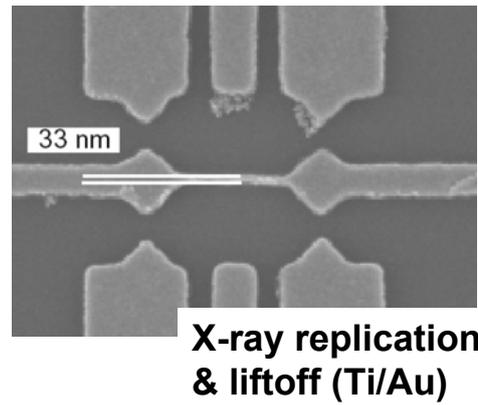
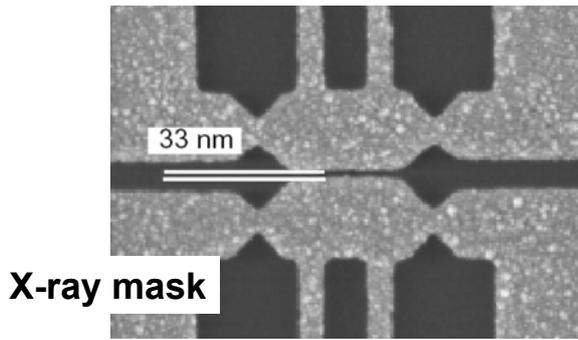


X-Ray Lithography (II)

Projection concept – $\lambda=13.7$ nm

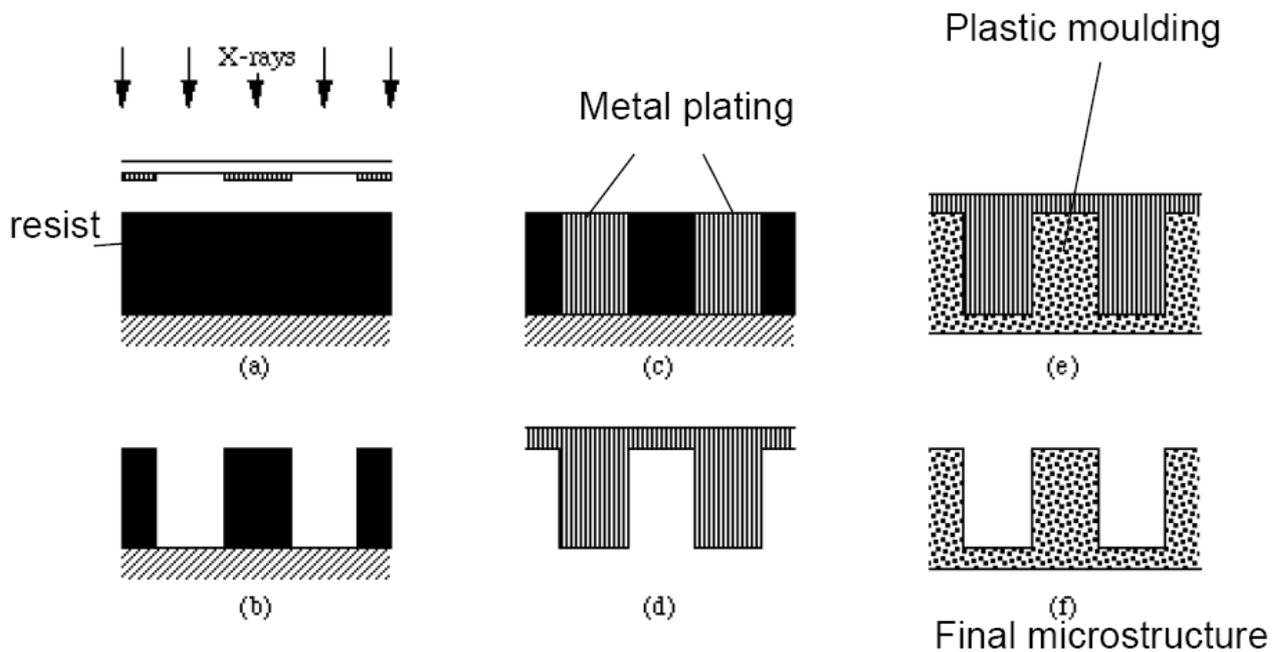


X-Ray Lithography (III)

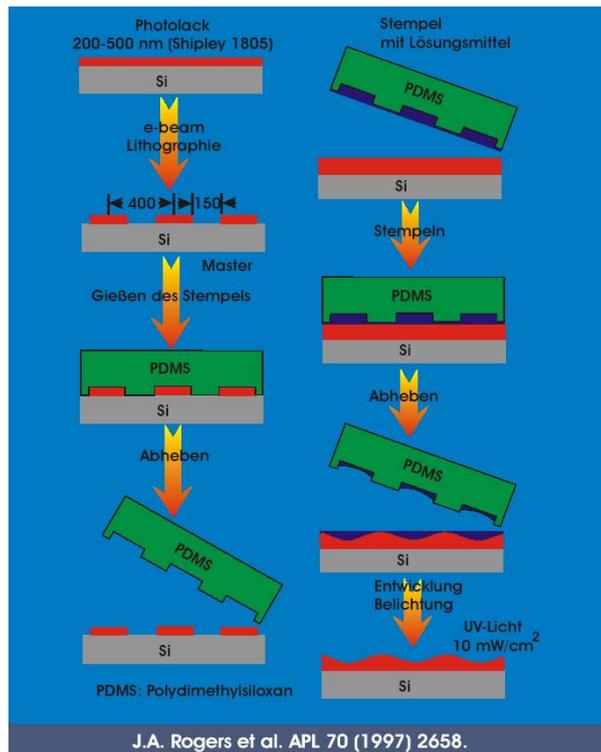


LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung)

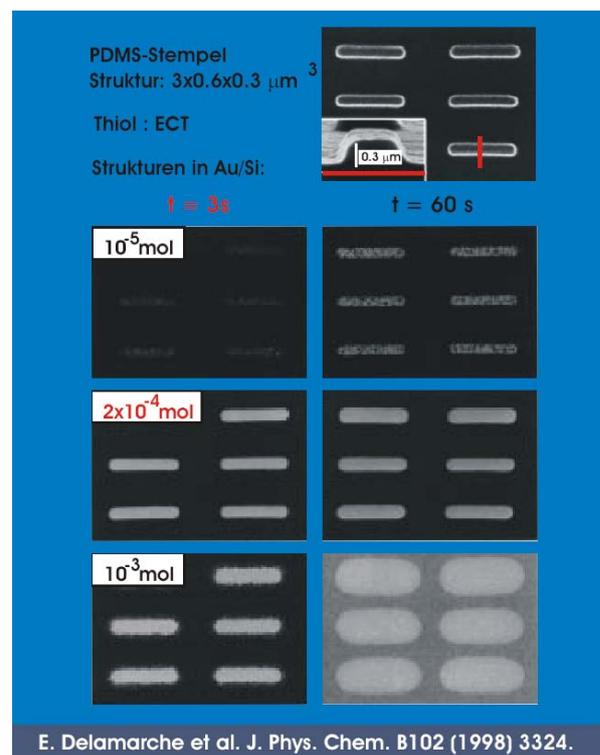
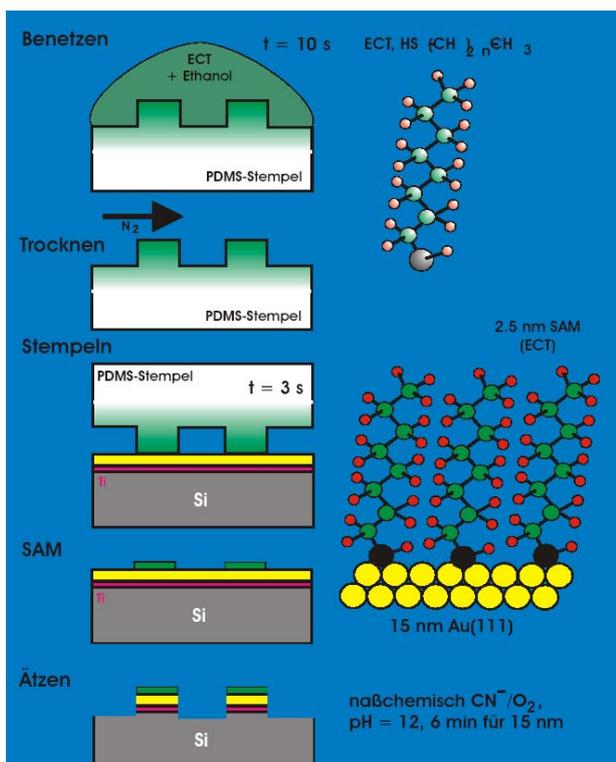
litho, electroplating, and molding processes to produce microstructures.



Imprint - Technology (I)



Imprint - Technology (II)



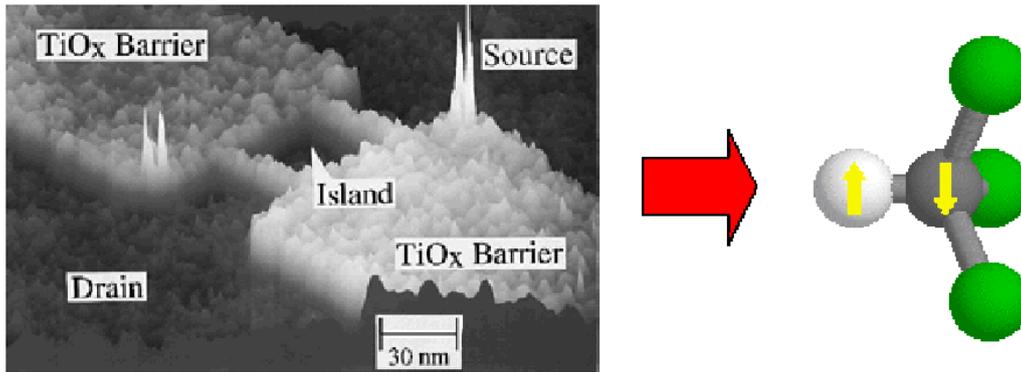
Imprint - Technology (III)

Definition des Layouts:	Photolithographie Photomaske (strukturierter Cr-Film auf einer Quarzplatte)	“soft lithography” Kunststoffstempel (PDMS-Block mit strukturierter Oberfläche)
Materialien die direkt strukturiert werden können:	Photolack (Polymere mit photosensitiven Zusätzen)	Photolack
Auflösung:	UV, 250 nm EUV, 10 nm	30 nm
Vorteile:	kostengünstig, bequem, verfügbar, komplexe (dreidimensionale) Strukturierung, kein Beugungslimit, gute Kontrolle über Oberflächenchemie, anwendbar auf viele Materialien, große Flächen	
Nachteile:	Deformation von Stempel oder Druckmasse, Kompatibilität mit industriellen Fertigungstechniken? höhere Defektkonzentrationen.	

6. Quantencomputer

Quantencomputer:

quantenmechanische Effekte ermöglichen neue Konzepte



Beispiel:

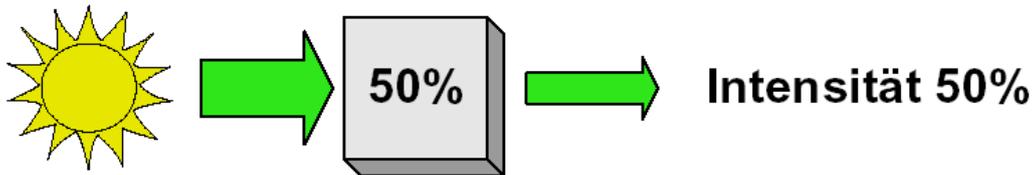
Kernspins im Chloroformmolekül dienen als Element eines NMR-Quantencomputers (1H bzw. 13C)

6.1. Einleitung

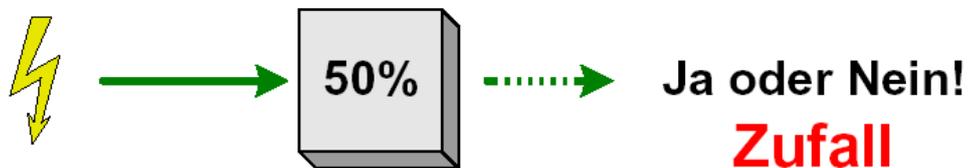
- Photonen
 - Energie
 - Polarisation
- Elektronen
 - Ladung
 - Energieniveau (in der Atomhülle)
- Spins von Teilchen
- Quanten-Hall-Effekt
- Radioaktiver Zerfall
-

6.1. Einleitung

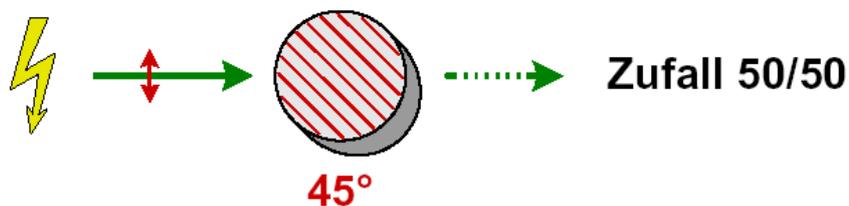
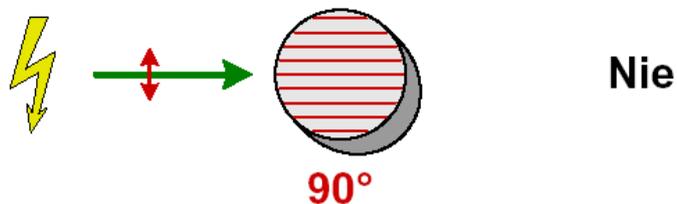
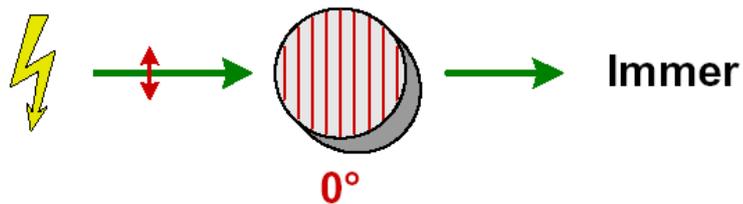
Viele Photonen:



Ein Photon:



6.1. Einleitung



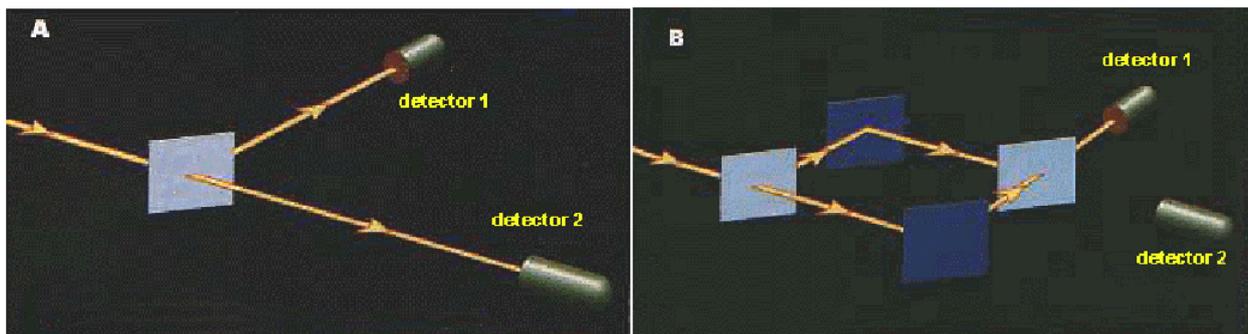
6.1. Einleitung

Eigenschaften von Quanten

- Unteilbar
- Diskrete Zustände
- Stochastisch
- Mikroskopisch
- *Intuitiv schwer erfassbar*

6.1 Einleitung: Prinzipien

Licht auf halbdurchlässigen Spiegel



Ein Photon wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit reflektiert und transmittiert

Das Photon erreicht immer Detektor 1 (Einteilchen-Interferenz)

Quantenmechanik !

6.2. Bit vs. Qubit

Klassische Welt:

Quantenmechanik:

Information:

Daten (Bits 0 und 1)

Daten (Bits 0 und 1)

physikal. Umsetzung:

Spannungen (+/- 5 mV)

Diskrete Quantenzustände



QUBIT:

1 ————— $|1\rangle$ $E = +\varepsilon$



0 ————— $|0\rangle$ $E = -\varepsilon$

Neu: $\Psi = a|0\rangle + b|1\rangle$

6.2. Bit vs. Qubit

Klassische Welt:

Quantenmechanik:

Informationsbehandlung:

Algorithmus > Programm > Durchführung

$\rho(t=0) \longrightarrow \rho(t=t_0)$
Kontrollierte Zeitentwicklung

$\Psi(t=0) \longrightarrow \Psi(t=t_0)$
Unitäre Zeitentwicklung

Zeitentwicklung durch
Entwicklungsoperator
beschrieben
(Hamiltonoperator)

Programm: benutze den
richtigen Hamiltonoperator

6.2. Qubit: Quantengatter

Klassische Gatter:

physikalische Gebilde auf einem Silikonwafer

Daten (elektronische Impulse) laufen durch die Gatter

Quantengatter:

Daten werden in einem Register festgehalten

Gatter werden zum Register gebracht, wenn benötigt (z.B. elektromagnetische Strahlungspulse um Spins zu verändern)

6.2. Qubit: Quantencomputer (I)

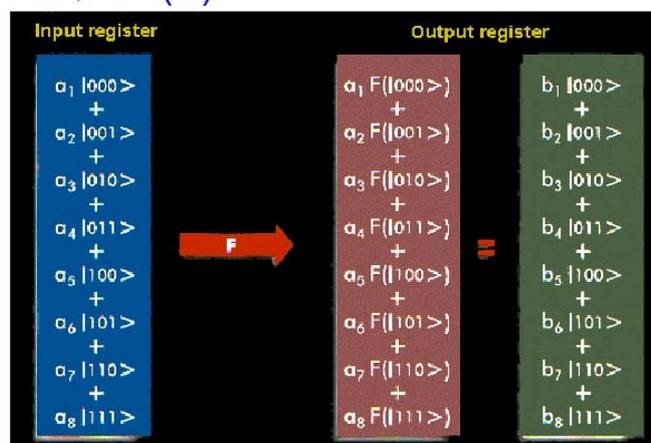
1) Präpariere Input und Output Register:

Zustandsvektoren, die L Bits darstellen $\Psi_{in}; \Psi_{out}$

2) Berechnung: $\Psi_{in}; \Psi_{out} \xrightarrow{U} \tilde{\Psi}_{in}; \tilde{\Psi}_{out}$

U: unitäre Transformation, $\dim(U) \sim 2^L$

Das Ergebnis ist eine Superposition aller möglichen Ergebnisse (gewichtet mit ihrer jeweiligen Wahrscheinlichkeit)



6.3. Quantenalgorithmen (I)

Shor (AT&T, 1994): Zerlegung ganzer Zahlen in ihre Faktoren

Basis für RSA (Rivest, Shamir, Adelman 1978) Verschlüsselung (RSA123): schnelle Generierung (Multiplikation), sehr aufwendige Entschlüsselung

klassischer Algorithmus (Euklid) $t \propto e^{L^{1/3}}$; $L = \log_{10} N$

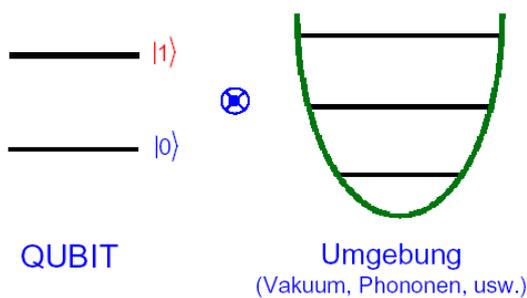
Anzahl der Stellen	Zeit
129	8 Monate
250	800,000 Jahre
1000	10^{25} Jahre

Quantenalgorithmus $t \propto L^3$

für eine 1000-stellige Zahl nur noch einige Millionen Schritte nötig

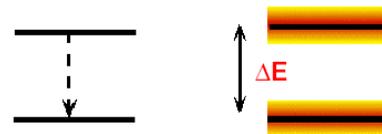
6.3. Algorithmen: Fehlerkorrektur

Wechselwirkung mit der Umwelt: Verschränkung mit dieser!



Beispiel: Atome

spontane Emission Stöße



Dissipation:

Qubit-Zustand
wechselt
(Besetzung)

Dekohärenz:

Qubit-Phase
fluktuiert

$$\Psi \rightarrow \rho$$

$$\rho_{tot}(0) = \rho_q(0) \otimes \rho_e(0)$$

$$\rho_{tot}(t) \neq \rho_q(t) \otimes \rho_e(t)$$

Kohärenzen sind empfindlicher als Besetzungen

Dekohärenz ist exponentielle Funktion der Systemgröße! ????

6.5. Realisierung von Quantencomputern (I)

Kriterien für einen Quantencomputer (DiVincenzo 1997):

Definiertes und ausbaufähiges Qubit-Array (stabiler Speicher)

Initialisierbar (0 - Zustand)

Lange Dekohärenzzeit (mehr als 10000 Operationszeit)

Universeller Satz von Gatteroperationen

Einzelquantenmessungen

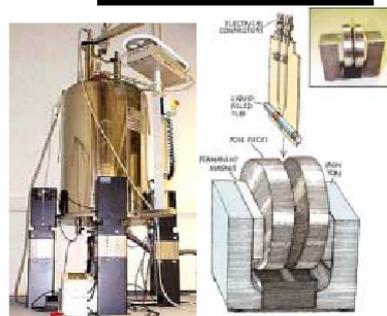
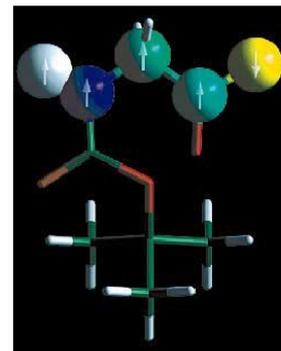
6.5. Realisierung: NMR

NMR (IBM, MIT, Gershenfeld, Chuang, seit 1997):

5 Qubits realisiert durch Kernspins bei Molekülen (z.B. Chloroform, Trichlorethylen)

Vorteil: sehr gute Kohärenz (Spin-Spin Relaxationszeit sehr viel länger als Gatterzeiten, die durch verschiedene Einstrahlen von RF-Feldern realisiert werden)

Problem: Limit der Anzahl der Qubits auf 20 bis 50 beschränkt (WW mit Umgebung)



6.5. Realisierung: Ionenfallen

Ionen-Fallen (Cirac, Zoller, seit 1994;
Monroe 1995; Schwarzschild 1996):

2 Qubits realisiert

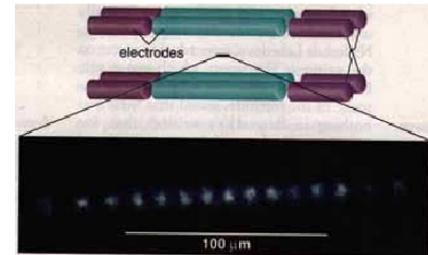
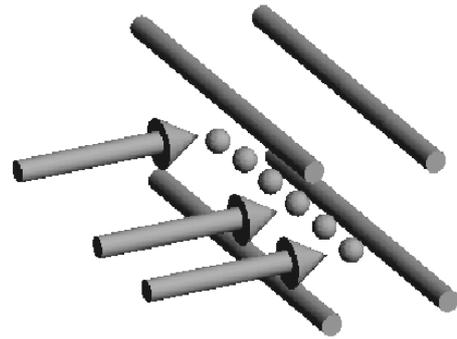
Daten: Energiezustände der Atome bzw.
Schwingungsmoden zwischen den
Atomen

Jedes Atom hat eigenen Laser

Ionen gekoppelt durch elektrostatische
Abstossung

Steuerung durch die verschiedenen Laser

Problem: Qubit von Atom auf Photon?



6.5. Realisierung: Photonen

Photonen (Gisin, seit 1997, SWISSCOM): 1 Qubit realisiert

Daten: Polarisation der Photonen

Übertragung über 23 km
Fiberoptik unter dem
Genfer See demonstriert

Problem: wie skalierbar?

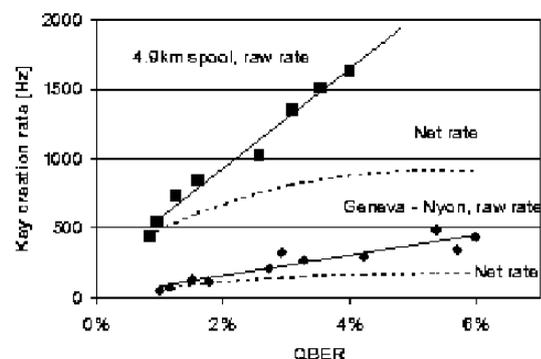


Figure 2: Raw and net key creation rate versus the QBER for transmission along a 4.9 km spool and 23 km installed cable.

6.5. Realisierung: Polymere

Heteropolymere (Teich, Obermayer, Mahler 1988; Lloyd 1993):
1 Qubit realisiert

Daten: Atome im Polymer (durch Laserpumpen in angeregte Zustände)

Steuerung: Laserpulse verschiedener Frequenzen

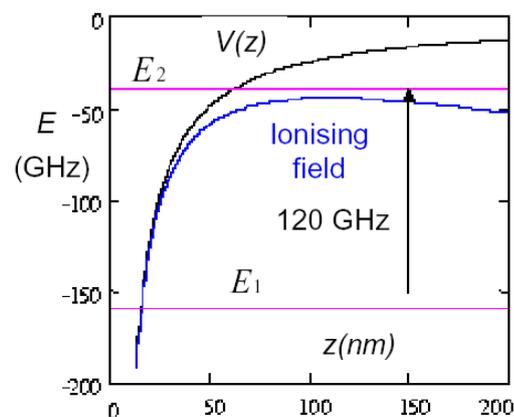
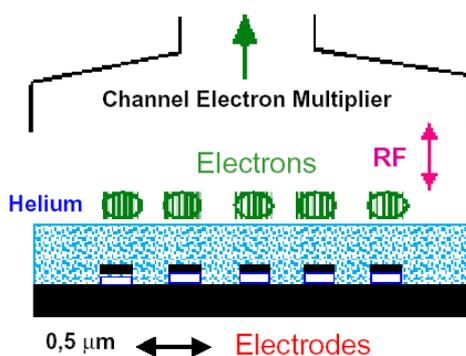
Auslesen: Resonanzfluoreszenz

Problem: Aufwand

6.5. Realisierung: 2D Elektronen auf He

Elektronen auf flüssigem Helium (Platzmann, Dykman 1999, Bell):

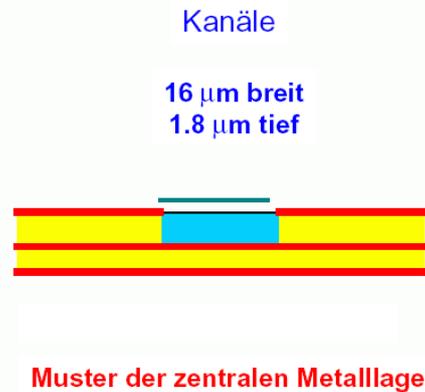
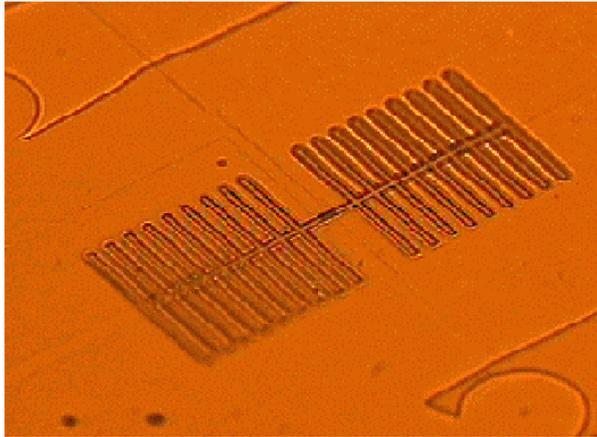
Elektronen gefangen in 1D Rydberg Niveaus (Bildladung)



6.5. Realisierung: 2D Elektronen auf He

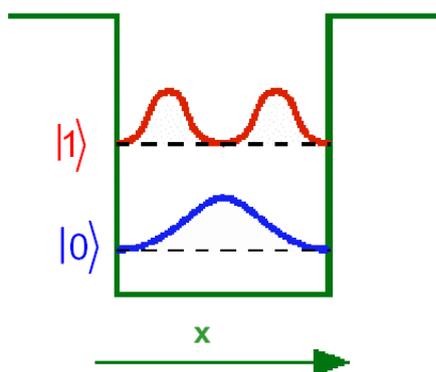
Elektronen auf flüssigem Helium:

Helium in Kanälen (Oberflächenspannung) produziert durch Elektronenstrahlolithographie oder Ionstrahlbohren (Genauigkeit bis 0.1 Mikrometer)



6.5. Realisierung: Quantenpunkte

Quantenpunkte (Barenco et al 1995; Loss, diVincenzo 1997)

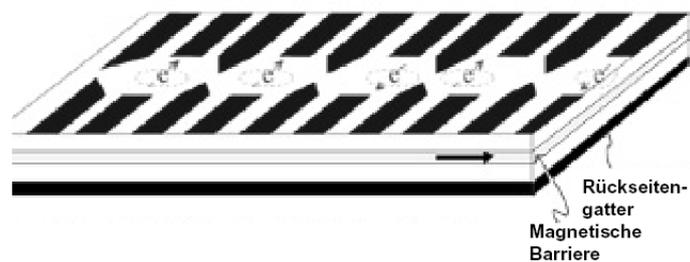


Dipol-Dipol WW ermöglicht Gatter

Problem: Dekohärenz

Quantenpunkt-Array:

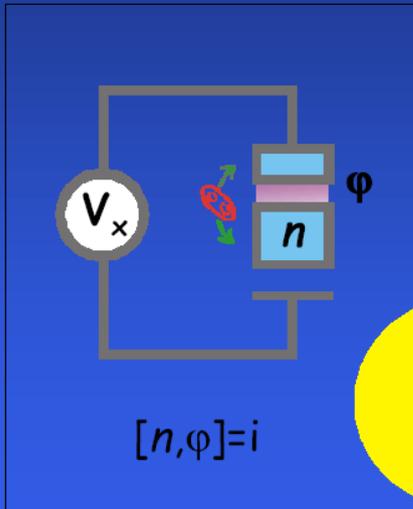
Loss & DiVincenzo, Phys. Rev. A 57, 120(1998).



- Quantenpunkte definiert durch seitliche Gatter (1 Elektron pro Punkt)
- Spin des Elektrons ist Qubit
- Gatteroperationen: Punkt-Kontakt-Gatterspannung kontrolliert Kopplung der Punkte
- Auslesen durch schaltbare magnetische Barriere

6.5. Realisierung: Josephson-Effekt

- A small Josephson Junction and a capacitance in series.
- Cooper pairs can tunnel inside/outside the box.
- Quantum numbers: Cooper pairs n , phase difference φ .

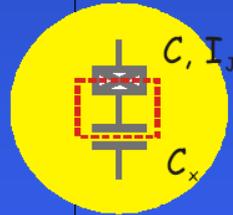


$$H = 4E_C (n - n_x)^2 - E_J \cos(\varphi)$$

$$E_C = e^2 / (2C)$$

$$E_J = I_J h / (4\pi e)$$

$$n_x = C_x V_x / (2e)$$

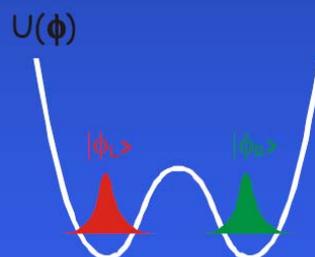
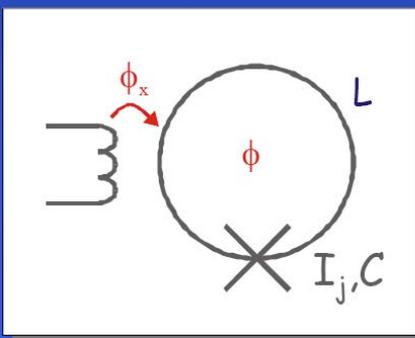


Usually $E_C \gg E_J$

rf-SQUID QUBIT

- Superconducting loop with a Josephson junction.
- Flux states $|\phi_L\rangle$ and $|\phi_R\rangle$ used as qubit states.
- Manipulation: flux pulses, RF pulses.
- Readout: magnetometer or flux discriminator.

$$H = -4E_C d^2/d\varphi^2 - E_L [(\varphi - \varphi_x)^2/2 - \beta \cos(\varphi)]$$



$$E_C = e^2 / 2C$$

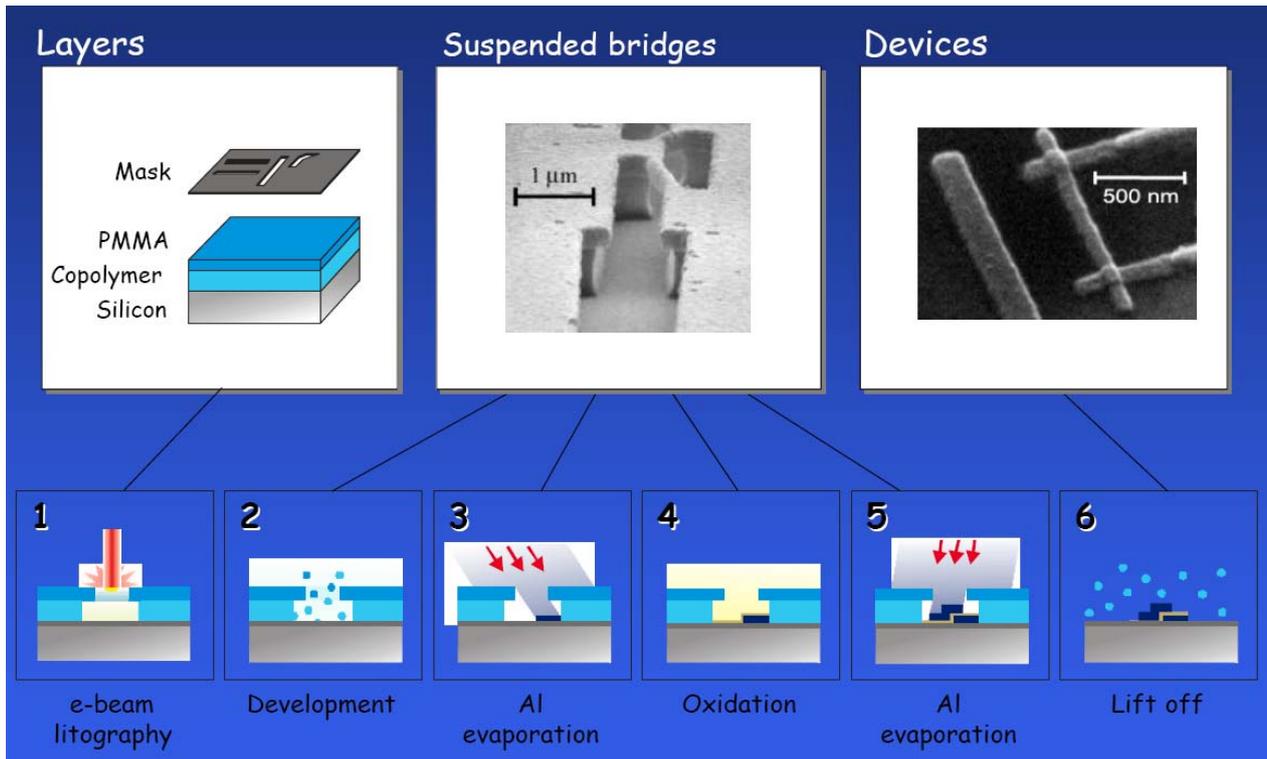
$$E_L = h^2 / (4\pi e)^2 / L$$

$$\beta = 4e\pi I_J L / h$$

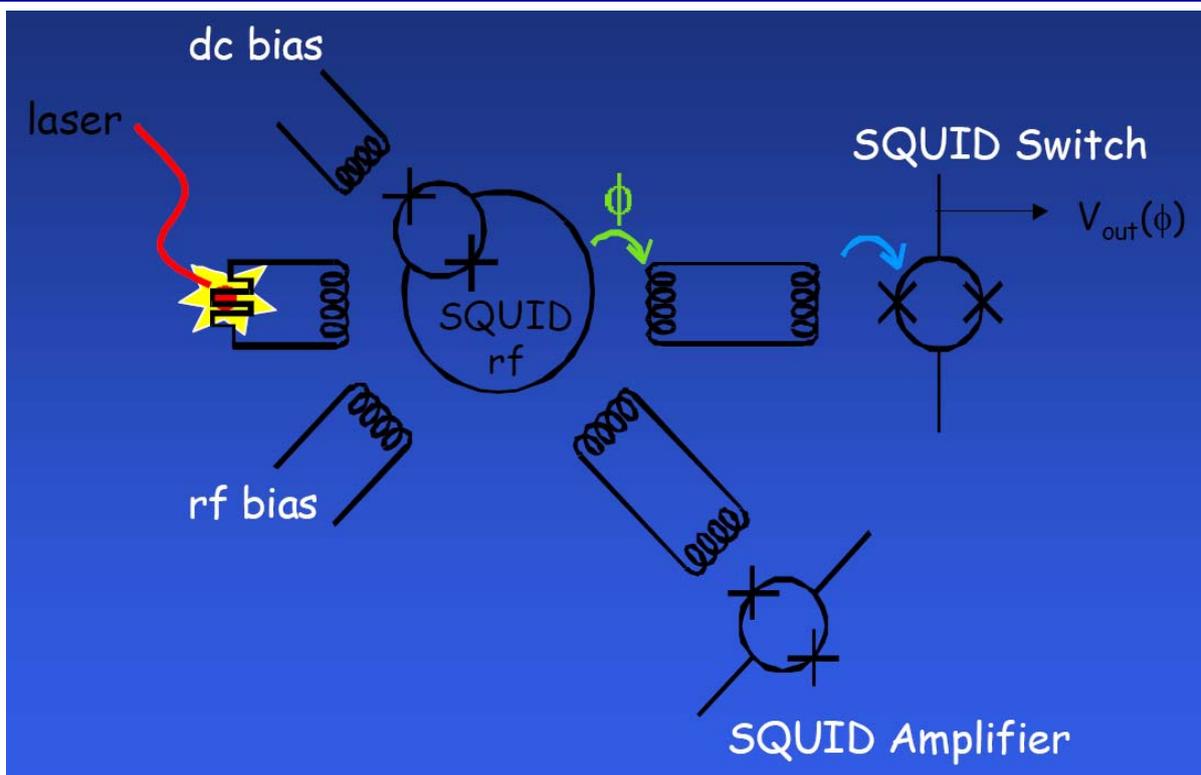
$$\varphi = 4\pi e \phi / h$$

Usually $E_J \gg E_C$

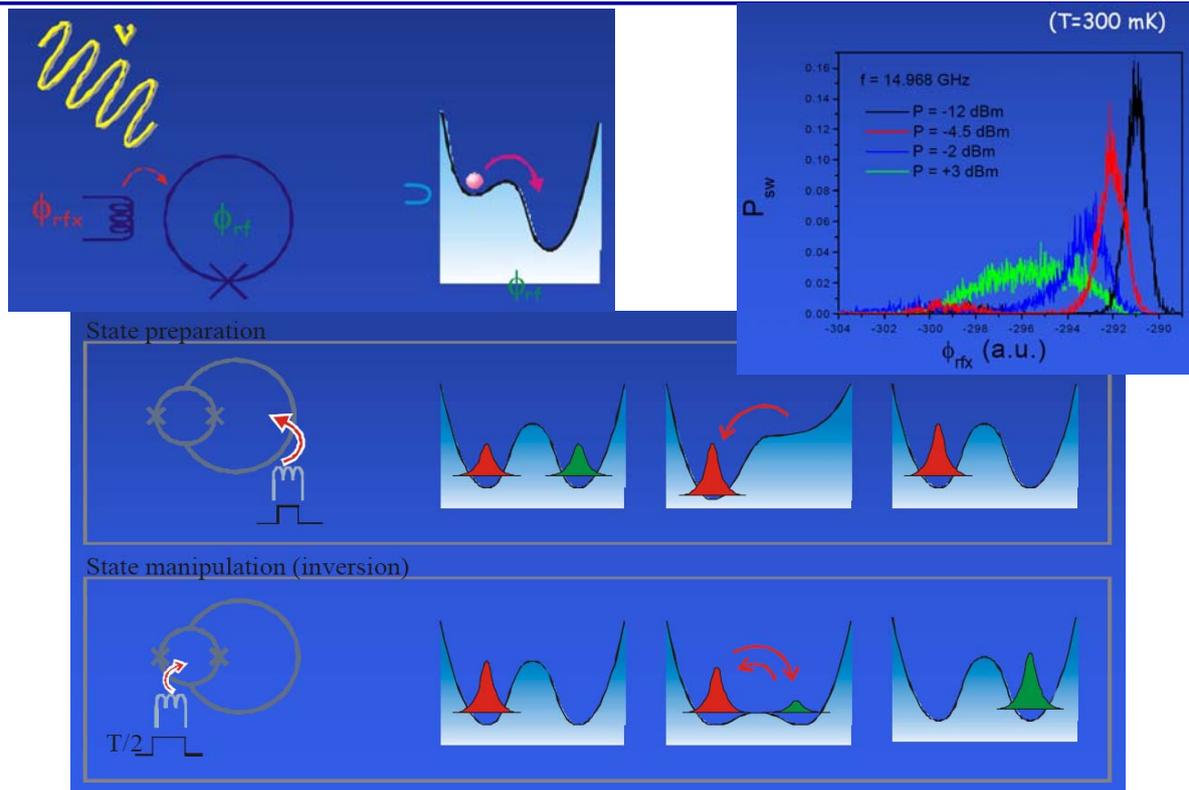
Schattenmasken-Bedampfung



Schaltung mit SQUID-QUBIT



Manipulation der QUBIT-Zustände



6.6. Zusammenfassung

Computerelemente werden kleiner und kleiner: quantenmechanische Effekte werden wichtig

QM Effekte können neue Algorithmen und Möglichkeiten schaffen: Verschränkung, Shor (Entschlüsselung), Teleportation, Kryptographie, ...

Quantencomputer sind physikalisch faszinierend

Realisierung von Quantencomputern ist noch sehr unsicher (Verschränkung mit Umwelt, Dekohärenz, ...)

ABER: vor 60 Jahren waren auch unsere jetzigen Computer undenkbar!!