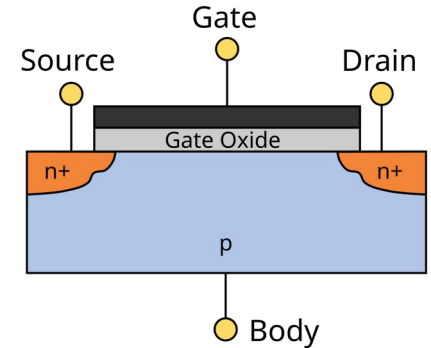
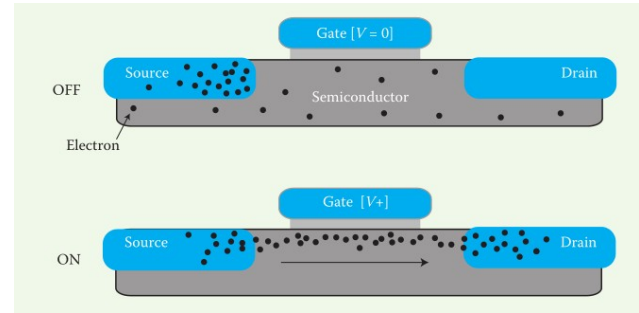


Jednoelektronový tranzistor

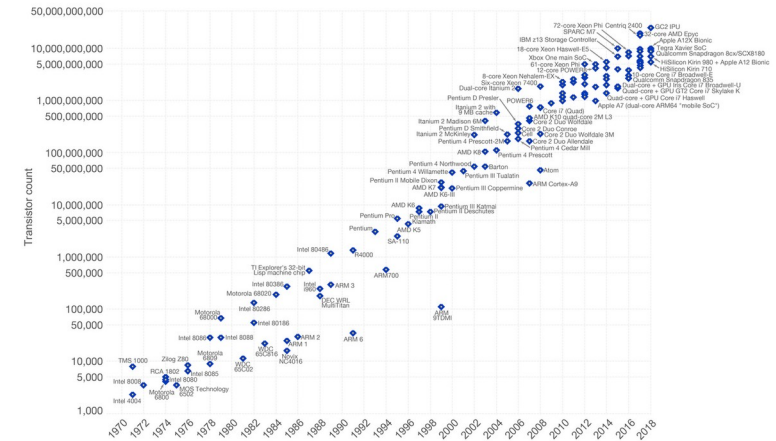
Tranzistor řízený elektrickým polem

- Field Effect Transistor (FET)
- Elektrické pole ovládá průchod proudu polovodičem
- JFET, MOSFET
- 3 elektrody: Gate, Source, Drain
- N a P typ (elektrony nebo díry)
- Moorův zákon → miniaturizace dosahuje fyzikálních limitů klasických FET
- Rozměry kde se projevují kvantové vlastnosti nemusí být nevýhodou



Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2018)

Moore's law describes the empiric regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are linked to Moore's law.



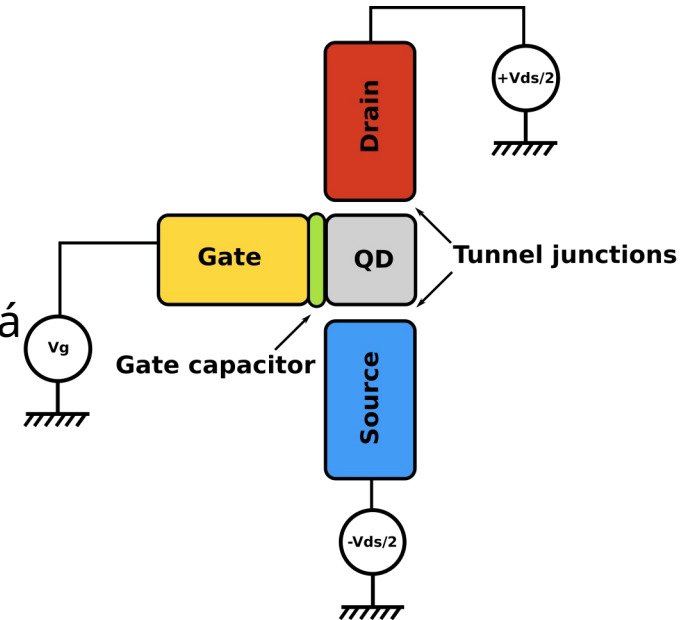
Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_circuit)

The data visualization is available at [OurWorldinData.org](https://ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under [CC-BY-SA](#) by the author Max Roser.

Jednoelektronový tranzistor

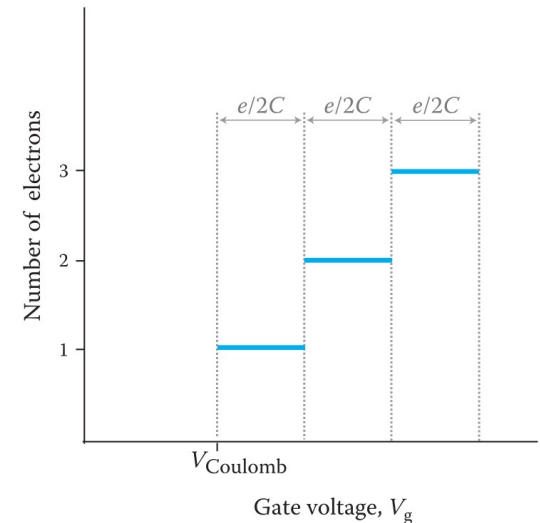
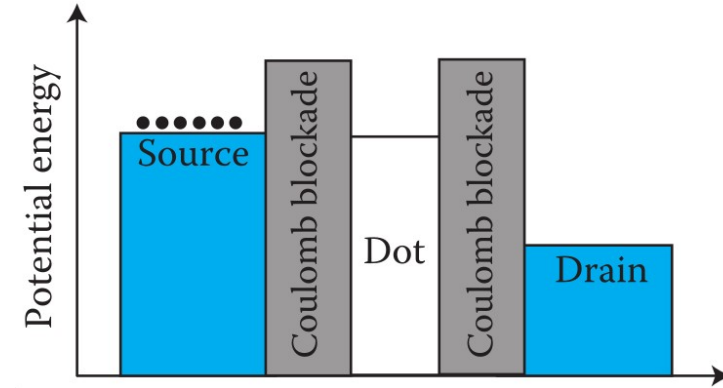
- Single Electron Transistor (SET)
- Nanosoučástka umožňující řízení toku jednotlivých elektronů
- Princip tunelování elektronů: $S \rightarrow QD \rightarrow D$
- 3 elektrody: Gate, Source, Drain + vodivý ostrůvek (kvantová tečka)
- Kvantová tečka (např. kovová částice na substrátu izolátoru) nahrazuje vodivý kanálek
- Tečka oddělena od Drain a Source tenkým izolátorem (<10 nm)
- Řízení Coulombovy blokády pomocí napětí na elektrodě Gate



Coulombova blokáda

- Potenciální bariéra
- Elektrostatické odpuzení mezi elektrony QD a příchozími elektrony
- Charging energy $E_c = \frac{e^2}{2C_{DOT}}$
- Kapacita sférické kvantové tečky o poloměru R : $C_{DOT} = 4\pi\epsilon R$
- Kapacita závisí pouze na geometrii a materiálu kvantové tečky
- Je třeba zamezit tunelování elektronů excitovaných vlivem teploty
- Obecně velikost Coulombovy blokády $E_c > 10 k_b T$
- Množství protunelovaných elektronů lze definovat pomocí napětí přiloženém na Gate:

$$U = \frac{E_c}{e} = \frac{(e^2/2C_{DOT})}{e} = \frac{e}{2C_{DOT}}$$



Princip SETu

a) Gate OFF $\rightarrow$ žádné tunelování

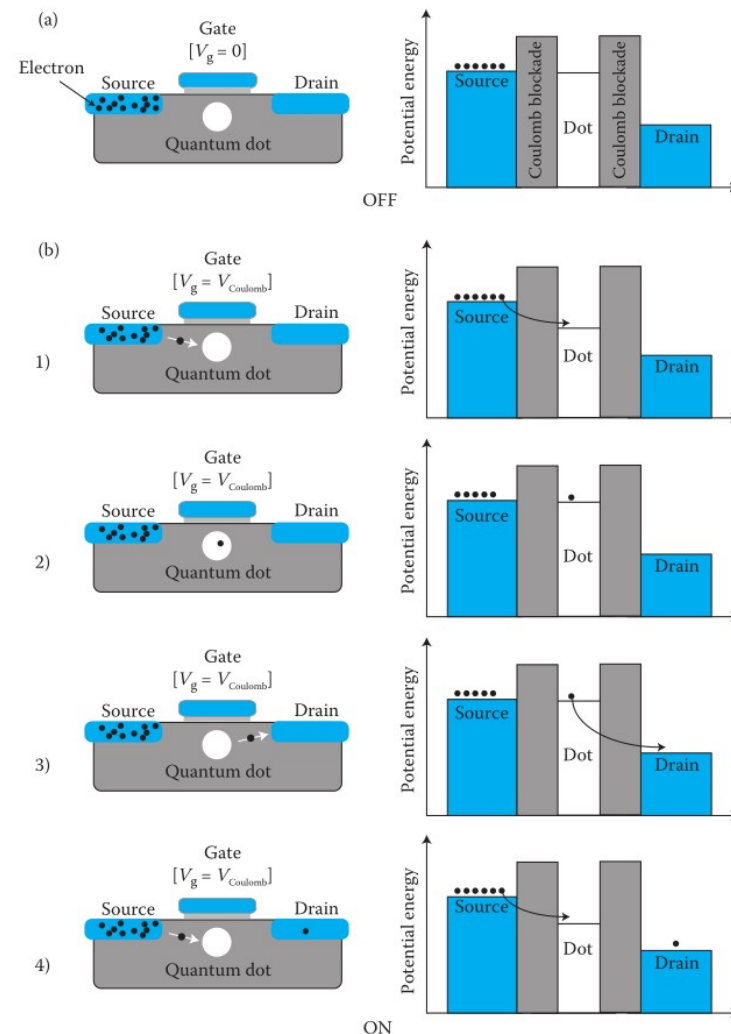
b) Gate ON $\rightarrow$ tunelování

1) $E_S > E_{\text{dot}}$, tunelování Source $\rightarrow$ Dot

2) $E_S = E_{\text{dot}}$

3) $E_{\text{dot}} > E_{\text{drain}}$, tunelování Dot $\rightarrow$ Drain

4) E_{dot} klesá, děj se opakuje



Výroba SETu

- Nejčastěji metodou Shadow Evaporation and Oxidation of Al – nejčastější, pro hromadnou výrobu

1) Expozice – Pomocí elektronové litografie (e-beam) se ozařuje rezistová vrstva nanesená na substrátu. Používá se dvouvrstvý rezist, což umožňuje vytvořit převis (overhang), nezbytný pro stínový efekt. Cílem je vytvořit most (resist bridge), který později stíní napařovaný kov.

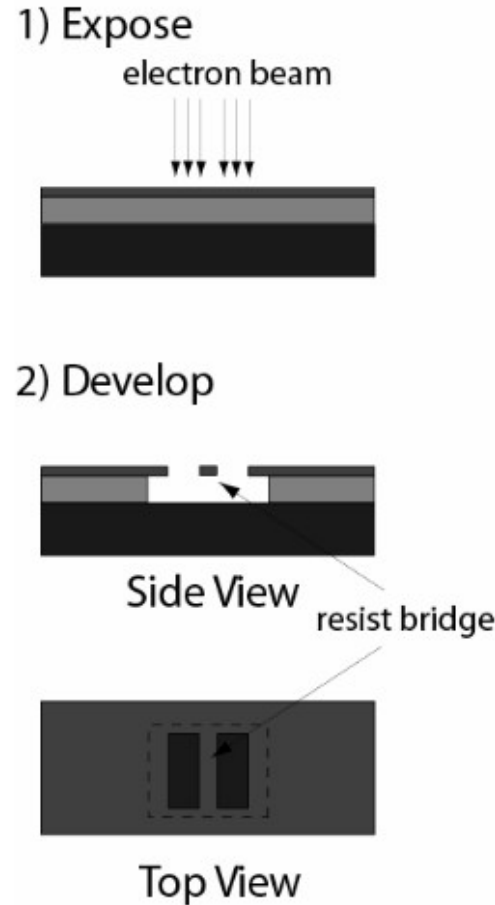
2) Vyvolání – Po ozáření se rezist vyvolá, tedy odstraní osvětlené části. Vznikne tak volný prostor pod mostem, který je klíčový pro dvojité napařování z různých úhlů.

3) První napařování – Hliník (Al) se napaří z určitého úhlu, takže se dostane jen na části substrátu, které nejsou stíněné mostem. Vzniká první kovová vrstva (budoucí ostrov SET).

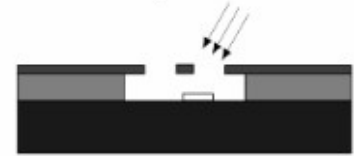
4) Oxidace – Do vakuové komory se vpustí kyslík, který oxiduje povrch hliníku → vzniká ultratenká vrstva Al_2O_3 . Tato oxidová vrstva tvoří tunelovou bariéru. Délku oxidace lze precizně kontrolovat, čímž se ovlivní vlastnosti bariéry.

5) Druhé napařování – Napařuje se z jiného úhlu, často zrcadlově vůči prvnímu. Hliník nyní dopadne i na dříve stíněná místa → překryje se přes první vrstvu, oddělen oxidovou bariérou. Vzniká tak kompletní MIM (metal-insulator-metal) tunelový přechod.

6) Odstranění masky – Celý vzorek se ponoří do rozpouštědla → rezist se rozpustí, zůstane jen požadovaná kovová struktura. Výsledkem je malý tunelový přechod s definovanými rozměry a izolační vrstvou Al_2O_3 .



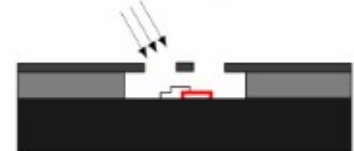
3) First Evaporation



4) Oxidization



5) Second Evaporation



6) Lift-off

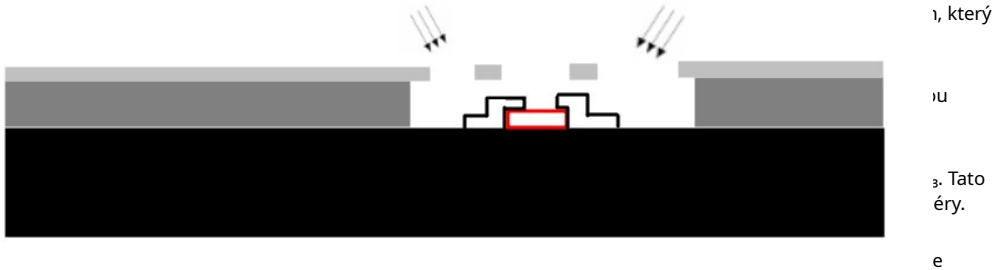
tunnel junction



Výroba SETu

- Nejčastěji metodou Shadow Evaporation and Oxidation of Al – nejčastější, pro hromadnou výrobu

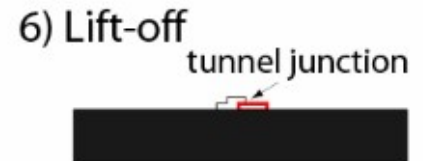
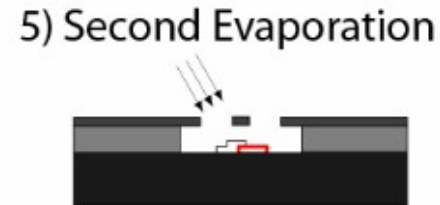
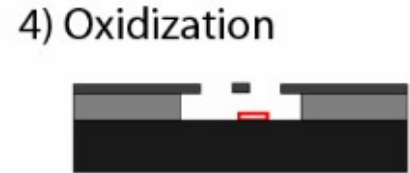
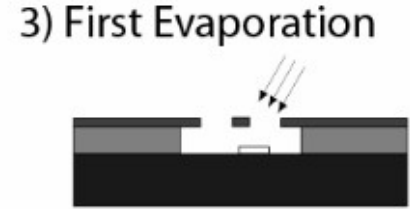
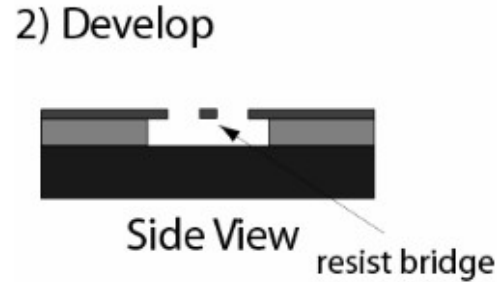
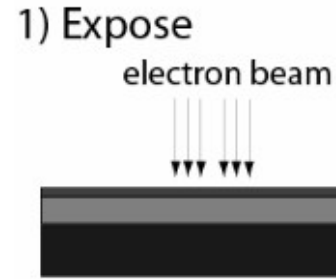
1) Expozice – Pomocí elektronové litografie (e-beam) se ozařuje rezistová vrstva nanesená na substrátu. Používá se dvouvrstvý rezist, což umožňuje vytvořit převis (overhang), nezbytný pro stínový efekt. Cílem je vytvořit most (resist bridge), který později stíní napařovaný kov.



3. Tato
ěry.
e

stíněná místa → překryje se přes první vrstvu, oddělen oxidovou bariérou. Vznika tak kompletní MIM (metal-insulator-metal) tunelový přechod.

6) Odstranění masky - Celý vzorek se ponoří do rozpouštědla → rezist se rozpustí, zůstane jen požadovaná kovová struktura. Výsledkem je malý tunelový přechod s definovanými rozměry a izolační vrstvou Al_2O_3 .



Výhody a nevýhody

- Výhody:
 - Nízká spotřeba energie
 - Vysoká citlivost na náboj
 - Malá velikost
 - Veliká rychlost
- Nevýhody:
 - Obtížná výroba
 - Malé proudy
 - Potřeba nízkých teplot (rozměr QD pro pokojovou teplotu je 10 nm)

Využití

- 1000 citlivější detektory náboje než FET
- Kvantové počítače (čtení spinových/nábojových qubitů)
- Metrologie (standard proudu)
- Detekce infračerveného záření
- Ultracitlivé mikrovlnné detektory

Děkuji za pozornost

Zdroje

- https://www.rug.nl/research/zernike/education/topmasternano/science/francesco.pdf?utm_source=chatgpt.com
- https://www.ripublication.com/aeee/07_pp%2057-62.pdf
- Adams, J., Pennathur, S., & Rogers, B. (2015). Nanotechnology: Understanding small systems (3rd ed.). CRC Press.
- https://eecs.umich.edu/courses/eecs598/handouts/101305_SET.pdf