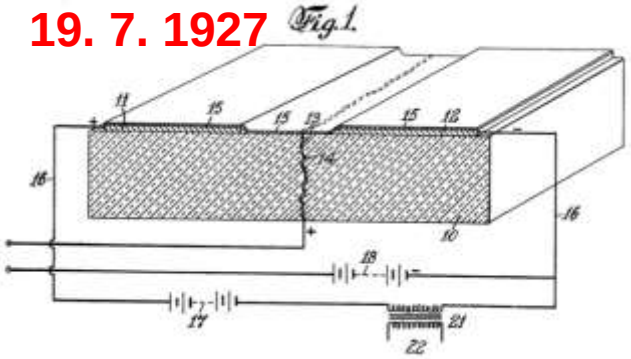
FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ČVUT V PRAZE

Mikro / nano - novinky a výhled

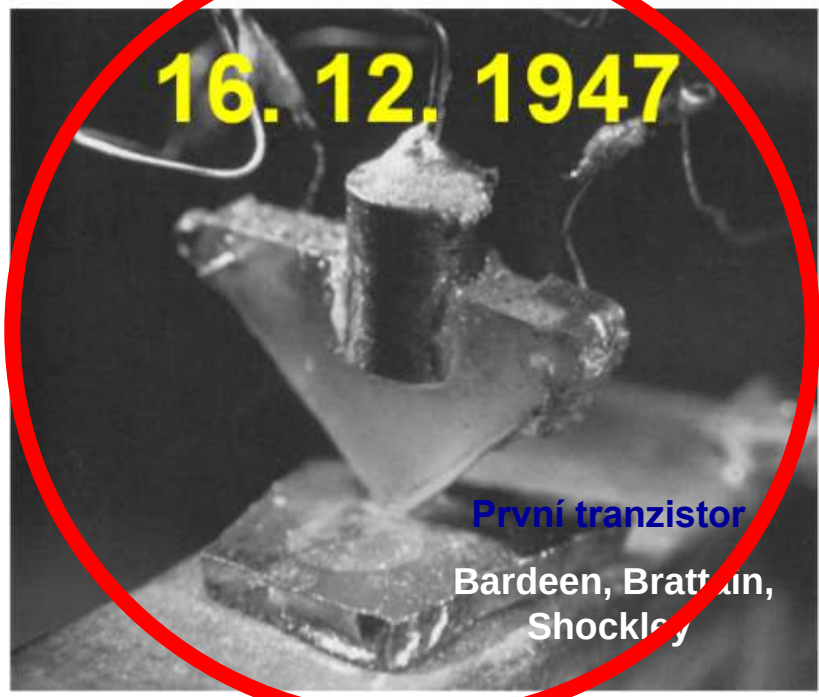
prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
husak@fel.cvut.cz
tel.: 2 2435 2267
http://micro.fel.cvut.cz

Od vakua k polovodičům a IO

19. 7. 1927



Patent č. 272437D - polem řízený tranzistor – J. E. Lilienfelda



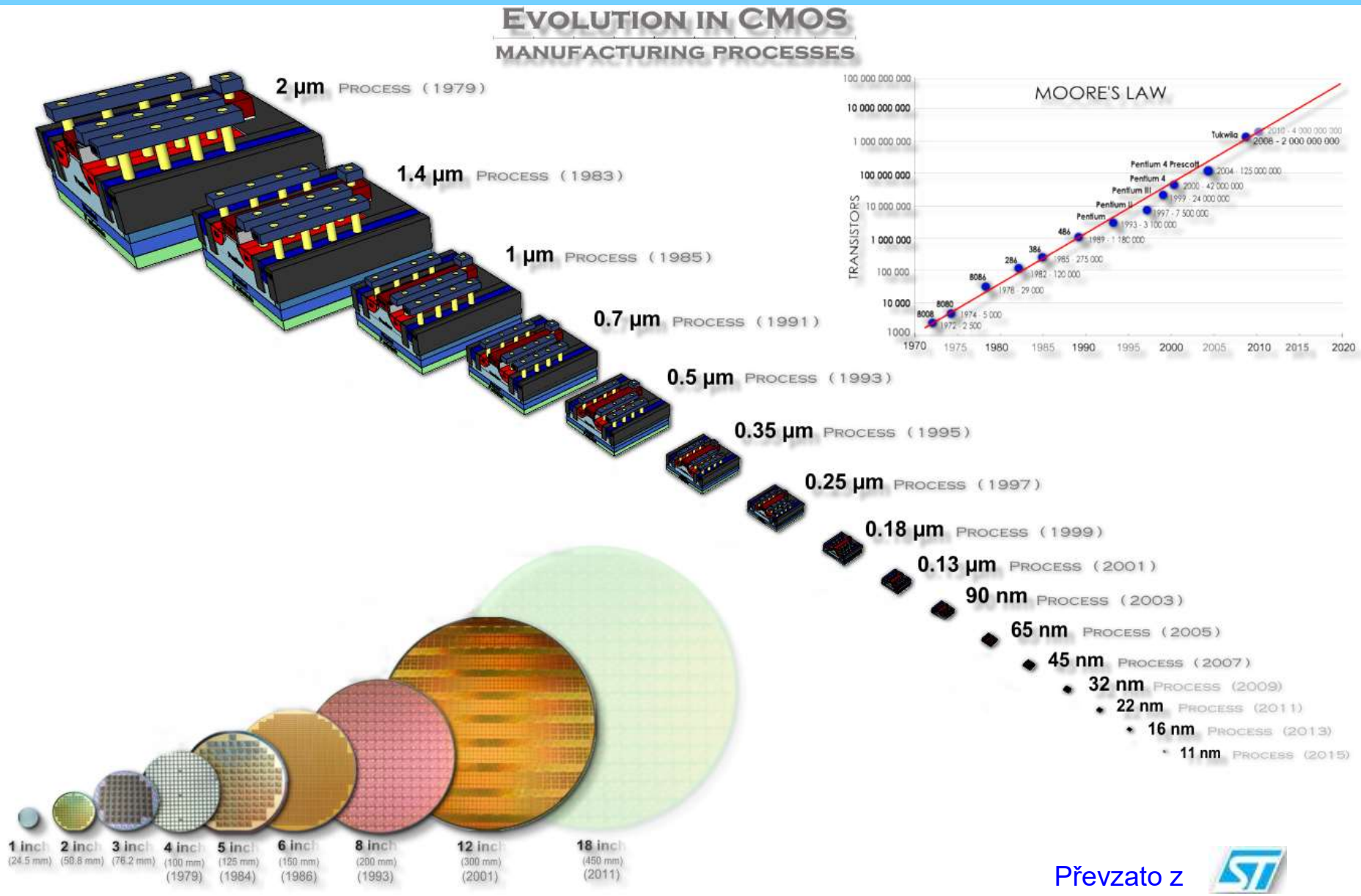
První použitelné tranzistory

Rozvoj polovodičové elektroniky

Cíle rozvoje

- Zmenšování rozměrů
- Zvyšování výkonu (pracovní teploty)
- Zvyšování mezních kmitočtů
- Zvyšování rychlosti
- Integrace velkých výkonů
- Nové polovodičové materiály

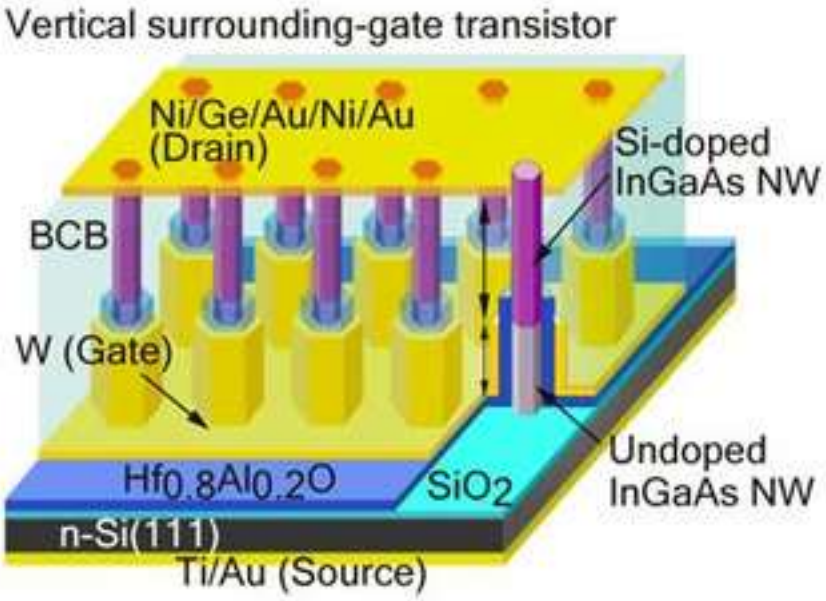
Zvyšování integrace = zmenšování rozměrů

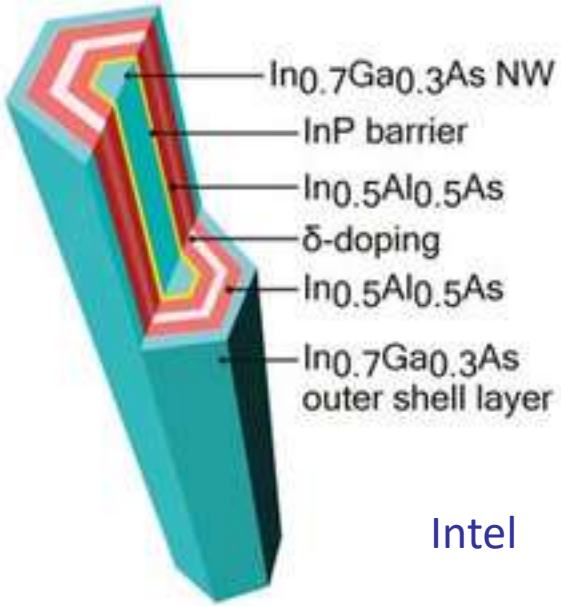


Převzato z

Nové 3D tranzistory

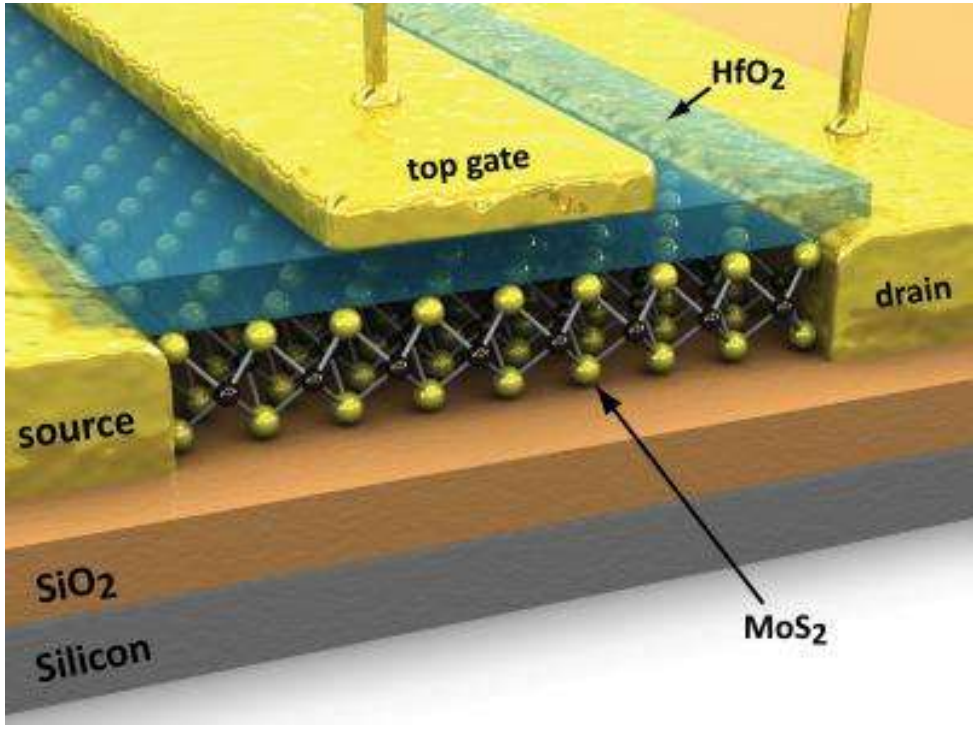
- Intel 22 nm procesory - „3D“ tranzistory (TriGate) pro Ivy Bridge, SpinFET
- **Vertikální tranzistory s nanodrátky.**
- Kanál ve formě sloupečku (nanodrátek jako úzká polovodičová tyčinka).
- Hradlo nebo více hradel - okolo sloupečku/nanodrátku tvoří „obal“.
- Emitor a kolektor tranzistoru jsou přímo nad sebou.
- Vertikální tranzistorové struktury mají šestiboký průřez, z několika materiálů (In, Ga, P, Al).





Molybdenové tranzistory MoS_2

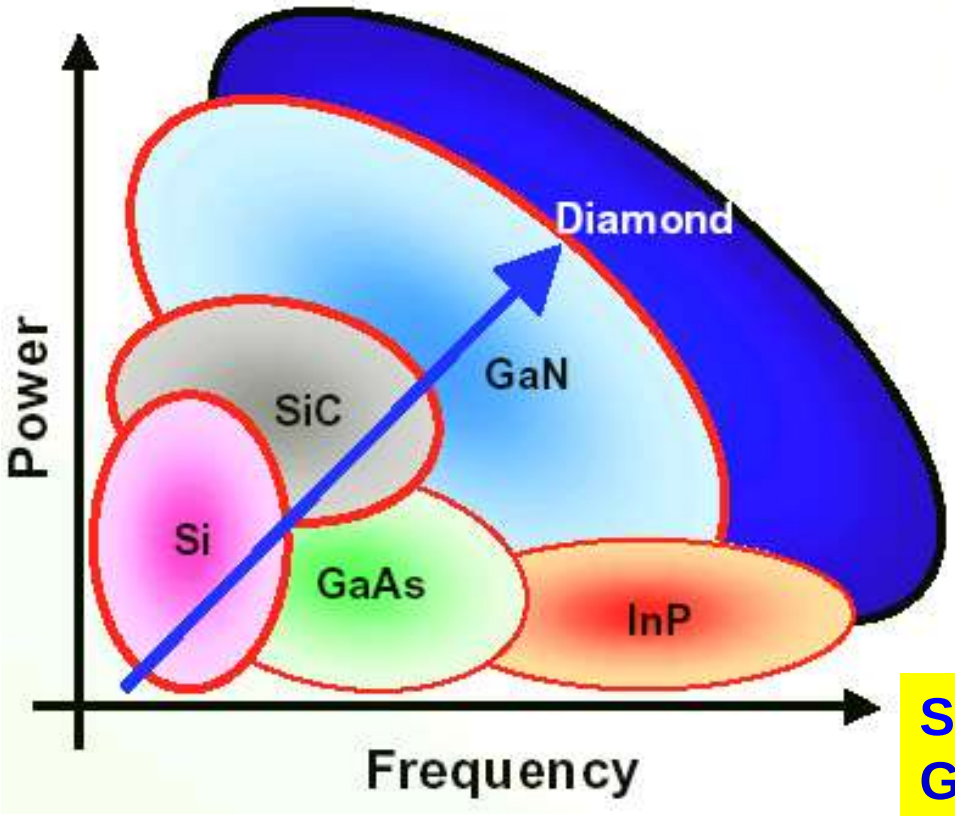
- Mechanické vlastnosti - ohebný, ale není na rozdíl od křemíku elastický, je dobrý vodič elektřiny, je nemagnetický
- Menší tepl. ztráty - vrstva molybdenitu 0,65 nm, srovnatel. s Si 2 nm,
- Menší spotřeba energie **10^5x** ve stand-by režimu než u Si tranzistorů
- **Předpoklad** - molybdenit umožní realizaci tranzistorů v **3 až 4nm** technologiích.
-



Struktura MoS_2 tranzistoru

New transistors: An alternative to silicon and better than graphene, 2011, http://esciencenews.com/articles/2011/01/30/new.transistors.an.alternative.silicon.and.better.graphene

Nové polovodičové materiály + diamant



Si - fyzikální a technologické parametry se blíží limitním hodnotám

Diamant - perspektivní materiál pro vysoce výkonové vf tranzistory

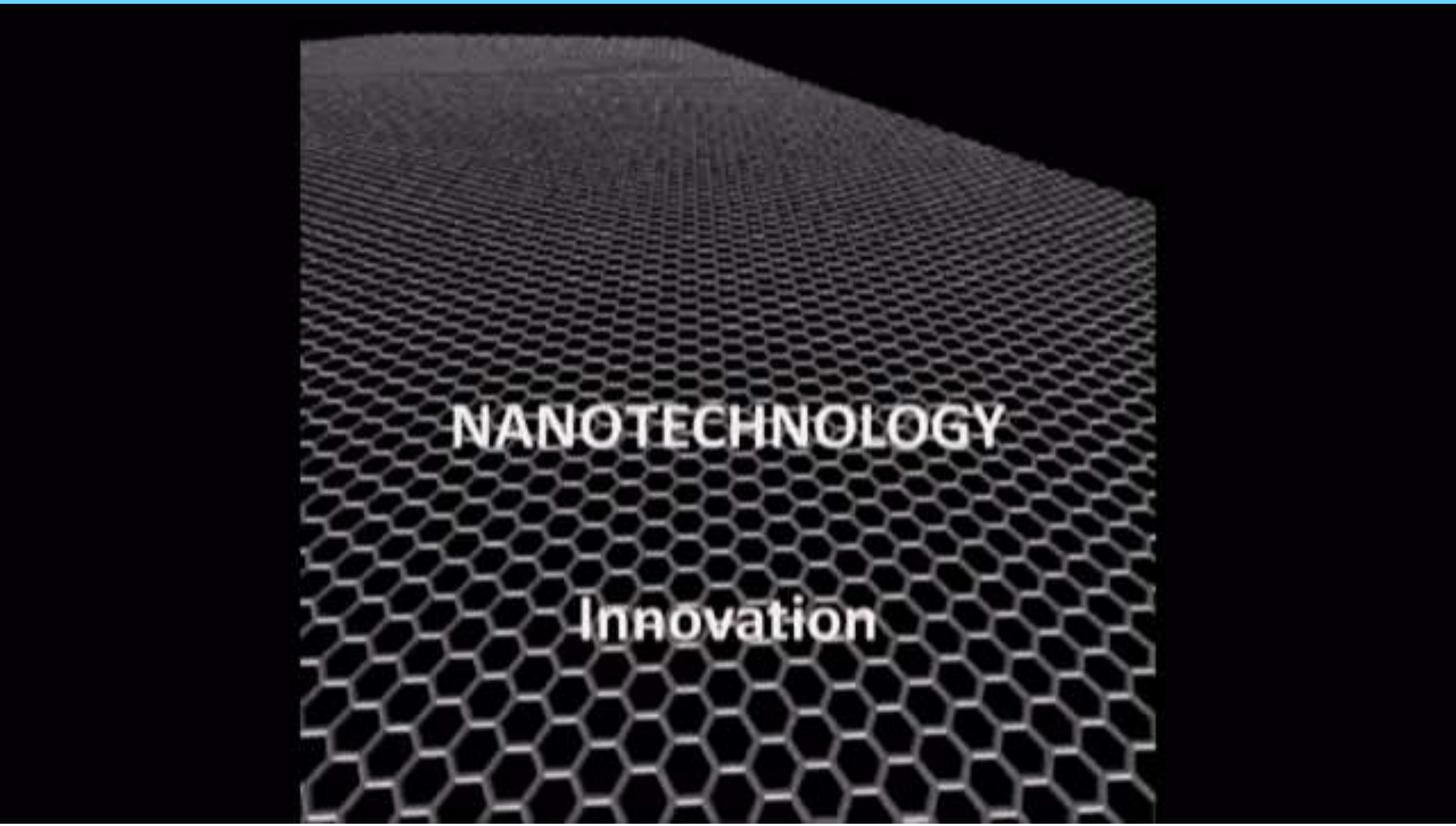
Uplatnění - bezdrátové komunikační systémy včetně mobilních sítí, komunikační satelity, RF a TV vysilače, chemicky agresivní prostředí atd.

SiC – ON Semi Rožnov. p. Radhoštěm
GaN – např. ST Agrate (It)

- Zvýšení mezních kmitočtů na desítky GHz při výkonu W
- Zvýšení pracovního napětí kV při zatížení několika desítek A cm^{-2},
- Cca 15 krát rychlejší chlazení čipů v porovnání s Si
- Diamantové zesilovače pro X pásmo s výkony > 10 W.

Nástup nanoelektroniky a hledání realizačních cest

Nanotechnologie



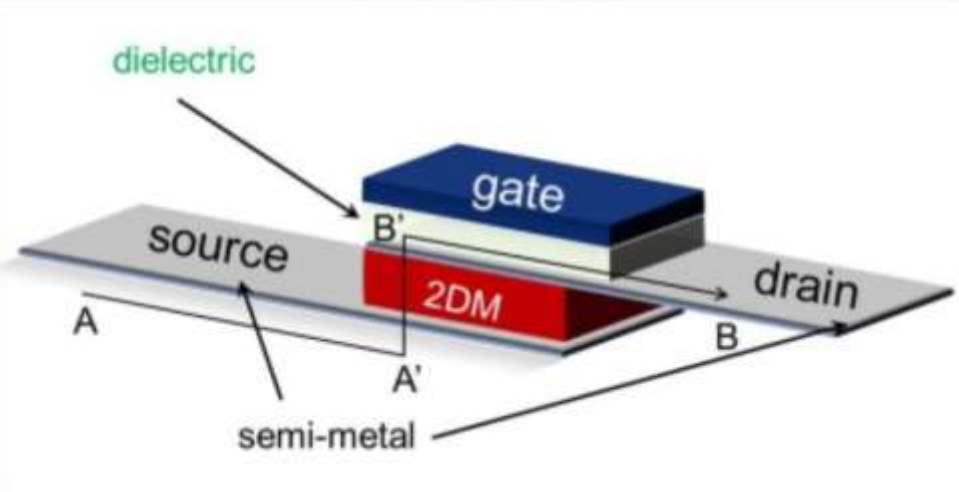
Kvantové inženýrství u tranzistorů na bázi heterostrukturních 2D materiálů

- Kvantové inženýrství - návrh struktur tranzistoru atom po atomu (sjednocení vědy o materiálech a inženýrství struktur)
- Vertikální a laterální heterostruktury 2D materiálů (rozměry řádově nm → hranice mezi materiály a strukturami se stává neostrá).
- Laterální 2D heterostruktury s materiály: grafen, hexagonální nitrid bóru (h-BN) nebo s materiály v různých fázích (kovovými a polovodivými) přechodných dichalkogenidů kovů (TMD).

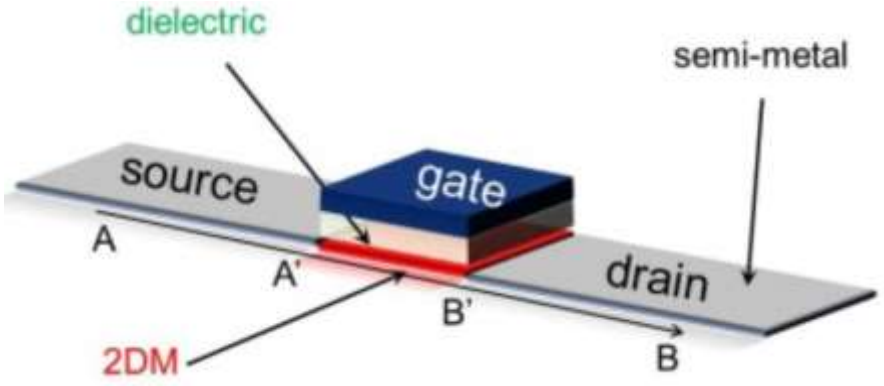
Lannaccone, G., Bonaccorso, F., Colombo, L., Fiori, G., Quantum engineering of transistors based on 2D materials heterostructures, NATURE NANOTECHNOLOGY, vol 13, March 2018, pp. 183–191.

Vertikální a laterální tranzistorové struktury

Vertikální a laterální heterostruktura FET (VH FET)



Vertikál



Laterál

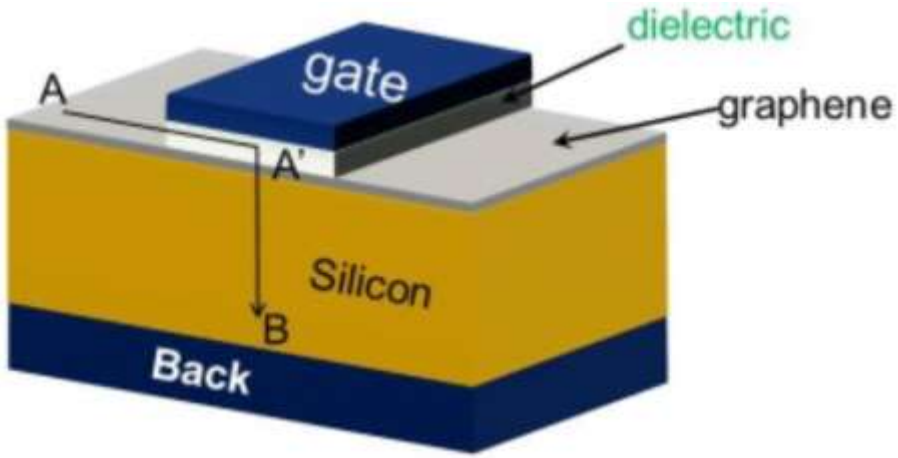
- Vertikální a laterální heterostruktura FET
- Napětí na hradle moduluje výšku energetické bariéry (a tedy i proud).
- Heterostruktury poskytují oblasti s vysokou pohyblivostí a nízkým kontaktním odporem

Novoselov, K. S. *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* **306,** 666–669 (2004).

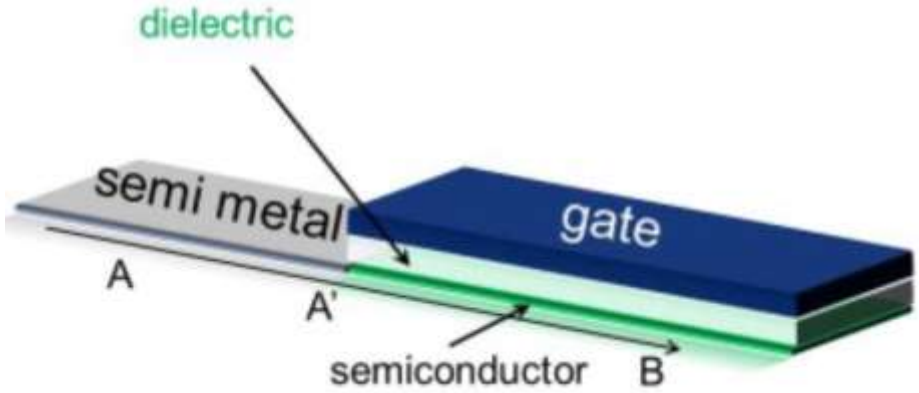
Lannaccone, G., Bonaccorso, F., Colombo, L., Fiori, G., Quantum engineering of transistors based on 2D materials heterostructures, NATURE NANOTECHNOLOGY, vol 13, March 2018, pp. 183–191.

Vertikální a laterální tranzistorové struktury

Vertikální a laterální heterostruktura s grafenem (Baristor)



Vertikál



Laterál

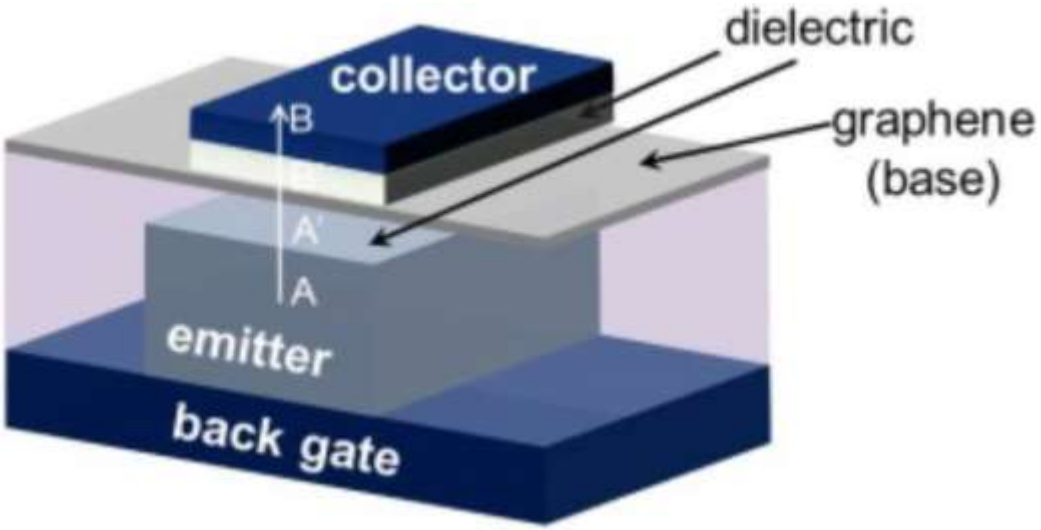
Ve vertikálních a laterálních baristorech je výška Schottkyho bariéry mezi Source s nízkou hustotou stavů (např. grafen) a polovodičovým Drain modulována napětím hradla

Marian, D., *et al*., Transistor Concepts Based on Lateral Heterostructures of Metallic and Semiconducting Phases of MoS2, *Phys. Rev. Appl.* **8,** 05404 (2017).

Lannaccone, G., Bonaccorso, F., Colombo, L., Fiori, G., Quantum engineering of transistors based on 2D materials heterostructures, NATURE NANOTECHNOLOGY, vol 13, March 2018, pp. 183–191.

Vertikální a laterální tranzistorové struktury

Tranzistor s grafenovým hradlem (GBT)



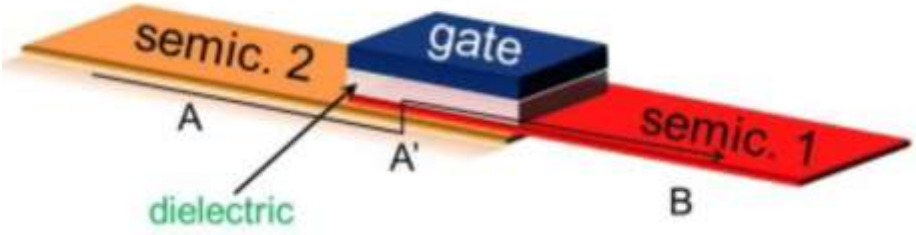
- Bariéra mezi source a drain reprezentována grafenovou vrstvou
- Napětí na grafenové vrstvě báze, moduluje tvar a výšku bariéry
- Struktura je vnitřně vertikální, má hradlo o síle 1 atomu (ultrarychlá činnost)

Mehr, W. *et al.* Vertical graphene base transistor. *IEEE Electron Device Lett.* **33,** 691–693 (2012)

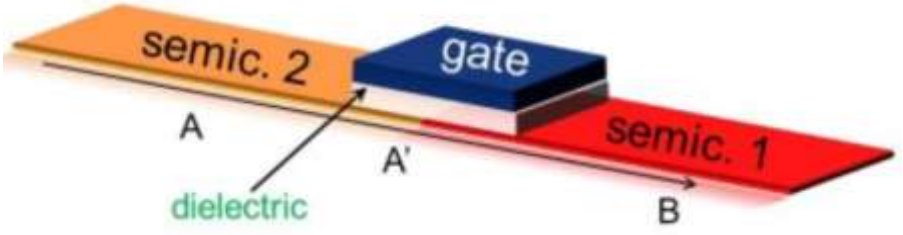
Lannaccone, G., Bonaccorso, F., Colombo, L., Fiori, G., Quantum engineering of transistors based on 2D materials heterostructures, NATURE NANOTECHNOLOGY, vol 13, March 2018, pp. 183–191.

Vertikální a laterální tranzistorové struktury

Vertikální a laterální tunelová heterostruktura (TFET)



Vertikál (VH TFET)



Laterál (LH TFET)

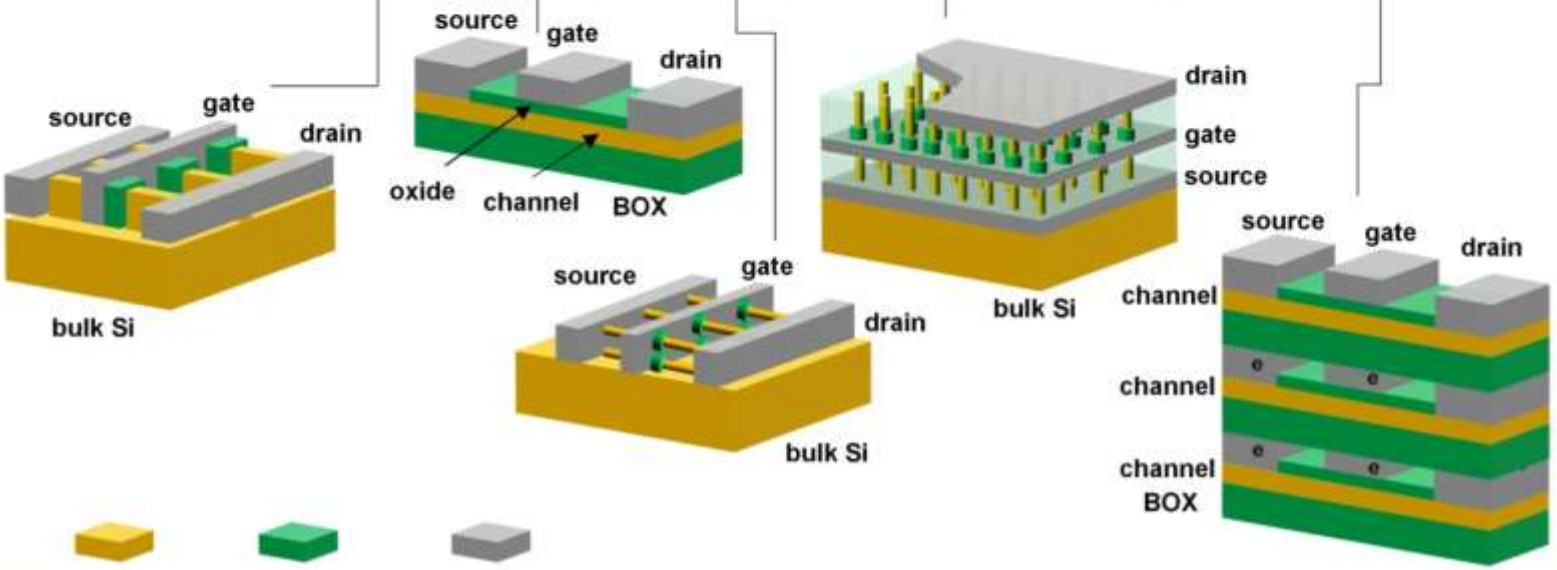
- Vertikální a laterální tunelové FET
- Drain proud protéká tunelováním skrz laterální nebo vertikální heterostruktury
- Změna napětí na hradle modifikuje profil tunelovací bariéry (proud)

Roy T. *et al.* Dual-Gated MoS2/WSe2 van der Waals Tunnel Diodes and Transistors. *ACS Nano* **9**, 2071-2079 (2015).

Lannaccone, G., Bonaccorso, F., Colombo, L., Fiori, G., Quantum engineering of transistors based on 2D materials heterostructures, NATURE NANOTECHNOLOGY, vol 13, March 2018, pp. 183–191.

Mezinárodní technologická mapa pro polovodiče (ITRS) 2.0, a nástupce Roadmap pro součástky a systémy (IRDS)

Year	2017	2019	2021	2024	2027	2030
Tech. Node (nm)	“16/14”	“11/10”	”8/7”	”6/5”	”3/2.5”	”2/1.5”
FinFET						
FDSOI						
Lateral GAA-FET						
Vertical GAA-FET						
Monolithic 3D						

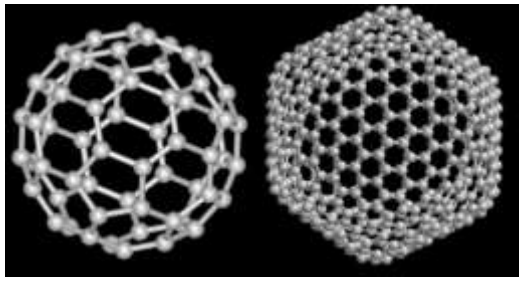


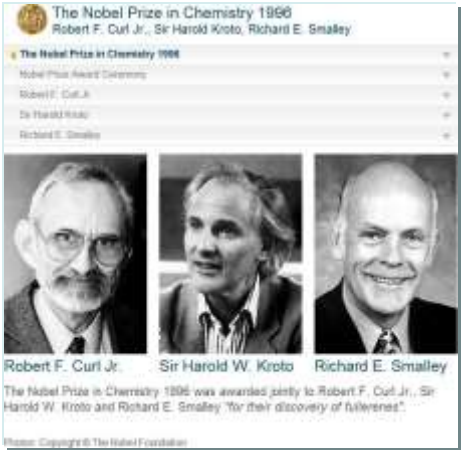
- International Technology Roadmap for Semiconductors 2.0, 2015 edition, available at http://www.itrs2.net (retrieved April 2, 2017).
- International Roadmap for Devices and Systems, 2016 Edition, More Moore White Paper (2017).
- Narasimha S. *et al.*, A 7nm CMOS Technology Platform for Mobile and High Performance Compute Applications”, *IEDM Tech. Digest* 689-692 (2017).

Uhlíkové nanostruktury součástky

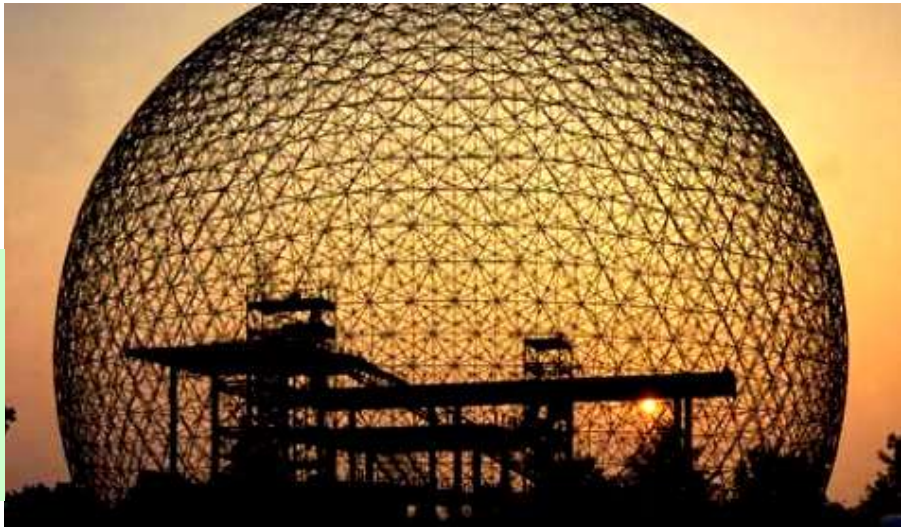
Fulleren (1996 Nobel. cena za chemii)

- Fulleren je alotropická forma uhlíku (synteticky vyrobená)
- Atomy uhlíku tvoří složité molekuly s pěti a šestiúhelníkovými strukturami, nejmenší počet atomů nejméně stabilního fullerenu je 20.
- Nejstabilnější je molekula C_{60} ve tvaru fotbalového míče.





- Supravodivost při teplotě ~18 až 30 K
- Přenos molekul léčiv do organizmu
- Ukládání radioaktivních atomů



Poznámka

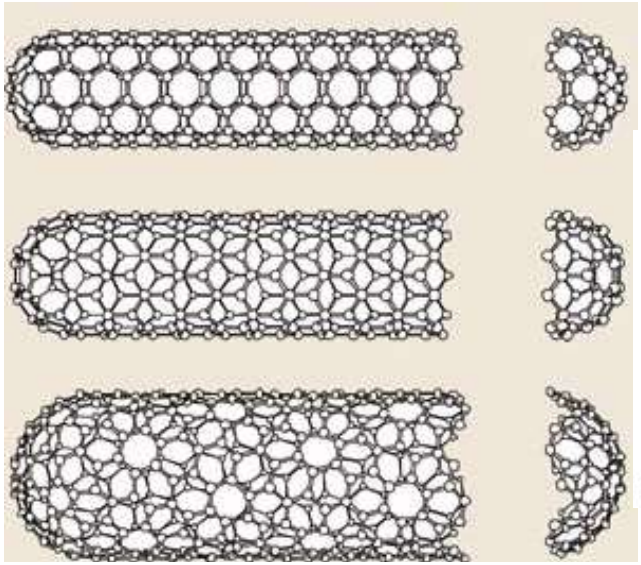
Název fulleren vznikl podle amerického architekta *R. Buckminstera Fullera (*podobné struktury při stavbě výstavních hal).

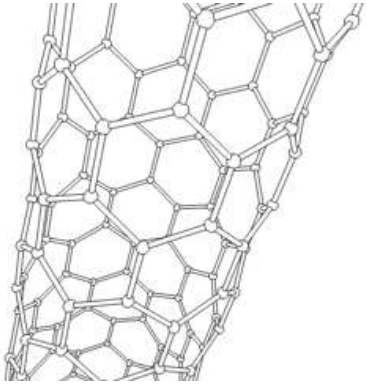
Uhlíkové nanotrubičky

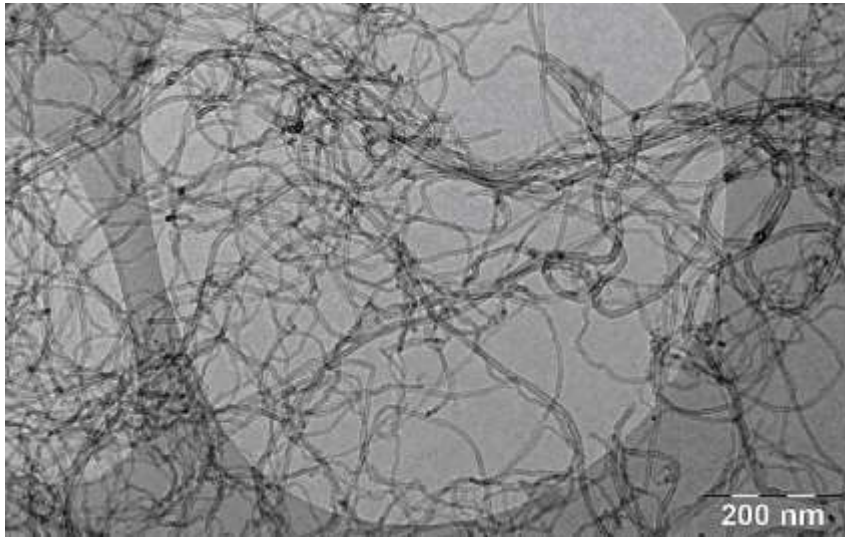
- Uhlíkové nanotrubičky (CNT) - na bázi fullerenů (kulový tvar fullerenu nahrazen valcovitým).
- Stěny válce - jedna vrstva atomů uhlíku (konce zavřené polokoulemi fullerenu)

Vlastnosti

- Velmi vysoká pevností (velký Youngův modul pružnosti ve směru osy, až 0,9 TPa)
- Průměr je 1 nm až 50 nm, délka řádově v mm (až 300 mm).







Uhlíkové nanotrubice CNT zakončené polovinou fulerenu, CNT v elektron. mikroskopu

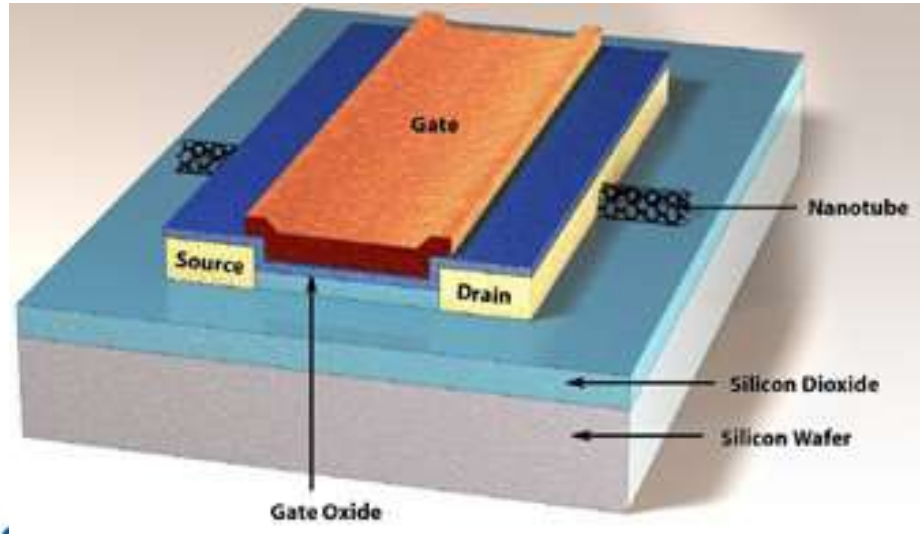
Uhlíkové nanotrubičky

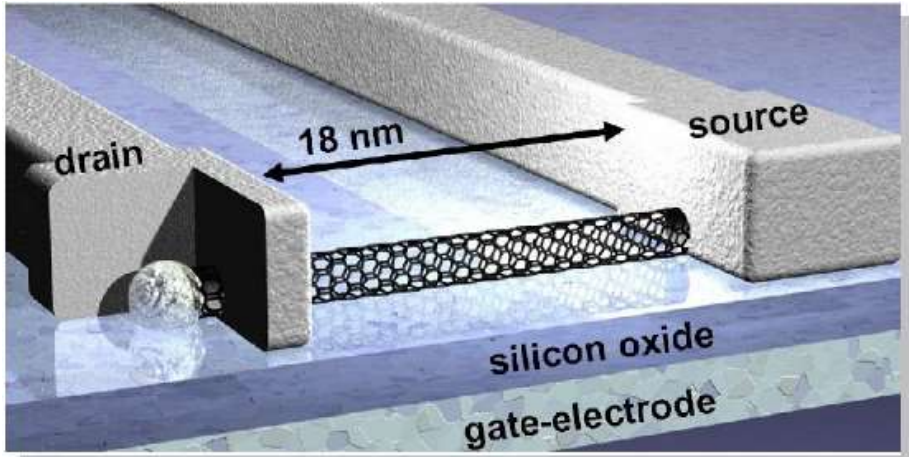
Elektrické vlastnosti

- Liší se podle uspořádání atomů uhlíku v CNT
- Realizaci vodičů, tranzistorů, paměťových prvků, přepínačů v optických počítačích, jako účinné tepelné vodiče ve výpočetní technice, jako superpevné fólie v ohebných displejích.

Tranzistor s CNT

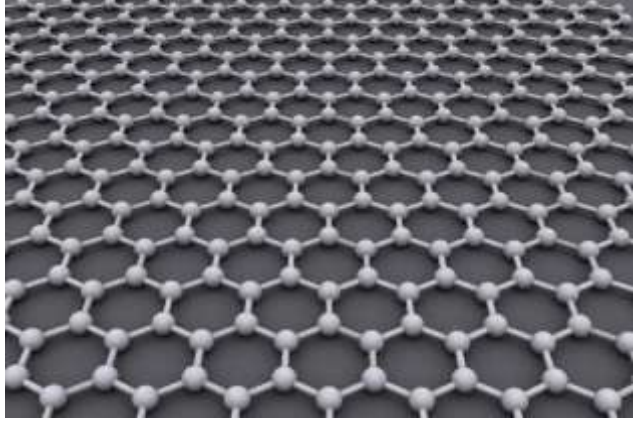
- Špatně reprodukovatelná technologie (obtížná manipulace s CNT)



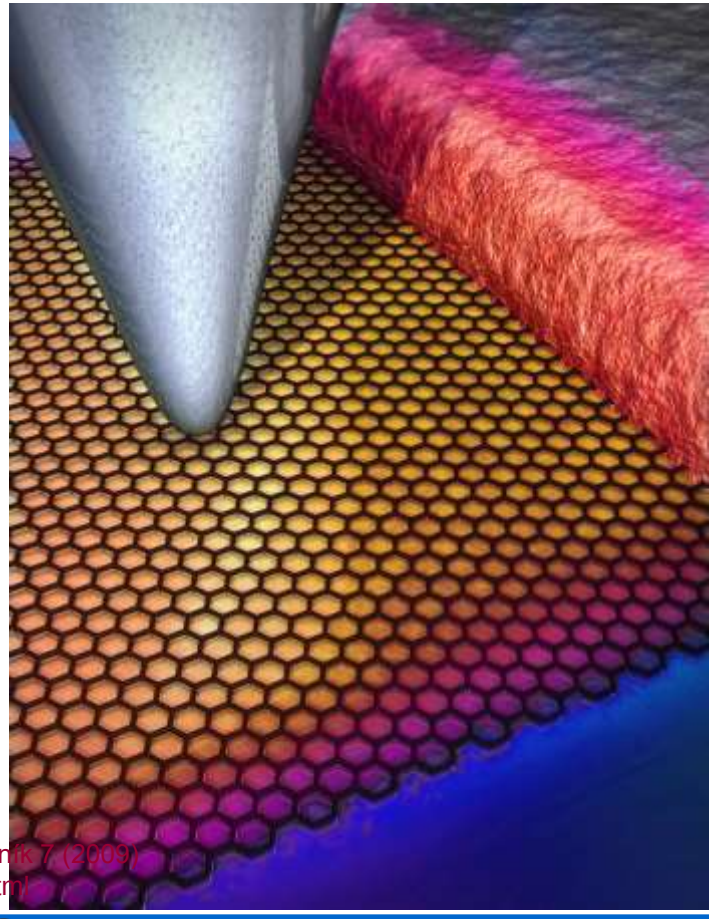


Tranzistor s CNT

Grafen



- Grafen - další struktura uhlíku, materiál je složený pouze z jedné nebo dvou vrstev atomů uspořádaných do pravidelné hexagonální struktury
- Jednoatomární vrstva grafenu bez příměsí vykazuje vysokou elektrickou vodivost a efektivní hmotnost elektronu klesá k nule
- Dvouatomární vrstva se chová podobně jako polovodič s malou šířkou zakázaného pásu (šířka je řízena externím elektrickým polem)
- Elektrony v grafenu dosahují nejvyšší pohyblivosti ze všech známých materiálů
- El. odpor je mnohem menší, než u běžných polovodičů nebo kovů (dokonce mluví o rychlosti, které se blíží rychlosti světla).



Havránek, M., Grafen – materiál, kde elektrony ztrácejí hmotnost. Aldebaran Bulletin, Číslo 26, ročník 7 (2009)
Grafen - materiál budoucnosti. 2009, http://fyzmatik.pise.cz/122032-grafen-material-budoucnosti.html

Vlastnosti grafenu - obecné

Mechanické vlastnosti

- Tuhost - 1 až 5 $N.m^{-1}$, Youngův modul pružnosti 500 GPa, 200x pevnější než ocel.
- Nejtenčí a současně nejpevnější materiál na světě (na prořízнutí 100 μm silné membrány bylo nutné použít sílu asi 20 kN.

Optické vlastnosti

- Výroba průhledných monitorů - vrstva grafenu o tloušťce 1 atomu absorbuje přibližně 2,3 % bílého světla
- V magnetickém a elektrickém poli se chová jako polarizátor světla.

Tepelná vodivost

- $(4,84 \pm 0,44).10^3$ až $(5,30 \pm 0,48).10^3$ $Wm^{-1}\,K^{-1}$ při 20 ^oC

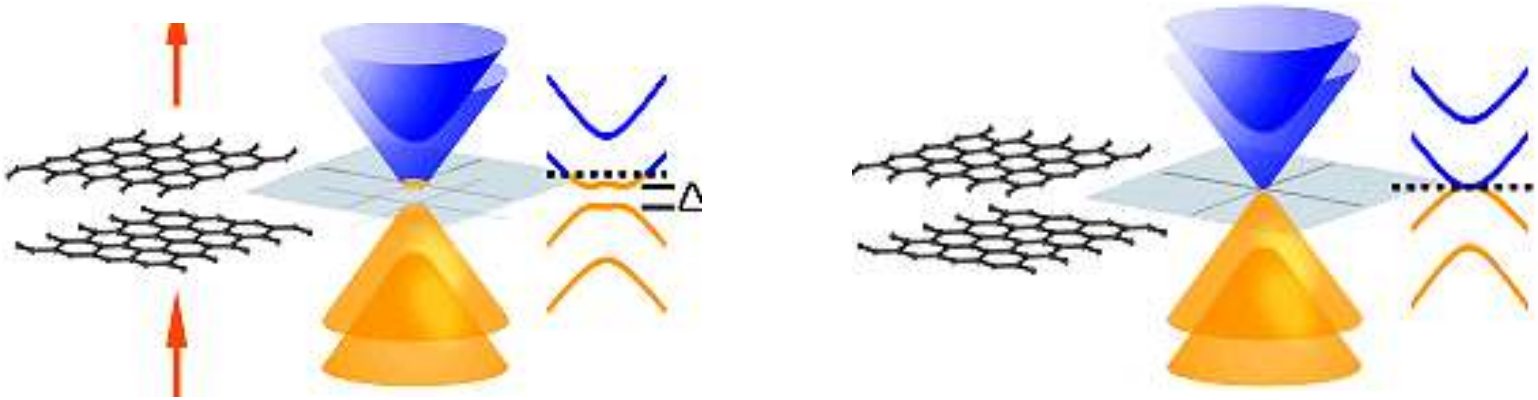
Vlastnosti grafenu – magnetické a elektrické

Magnetické efekty, spinový transport

- Anomální kvantový Hallův jev - ideální materiál pro spintroniku (malá spin-orbitální interakce a absence magnetického momentu jádra uhlíku).
- Elektrony v grafenu dosahují nejvyšší pohyblivosti ze všech známých materiálů při pokojové teplotě (asi 300 $km.s^{-1}$ mnohem vyšší, než ve standardních polovodičích (desítky až stovky $m.s^{-1}$), v kovech se elektrony pohybují rychlostí jen několik $mm.s^{-1}$).
- El. odpor je mnohem menší, než u běžných polovodičů nebo kovů (dokonce mluví o rychlosti, které se blíží rychlosti světla).
- Princip supravodivosti - materiál není supravodivý v celém objemu, projevuje se balistický transport elektronů, projevuje se jako kdyby se supravodivost uplatňovala jen na nepatrné vzdálenosti. Monovrstva grafitu vede proud paradoxně mnohem lépe, než souvislý krystal grafitu nebo dokonce ještě lépe, než nejlepší vodiče elektřiny.

Vlastnosti grafenu - elektrické

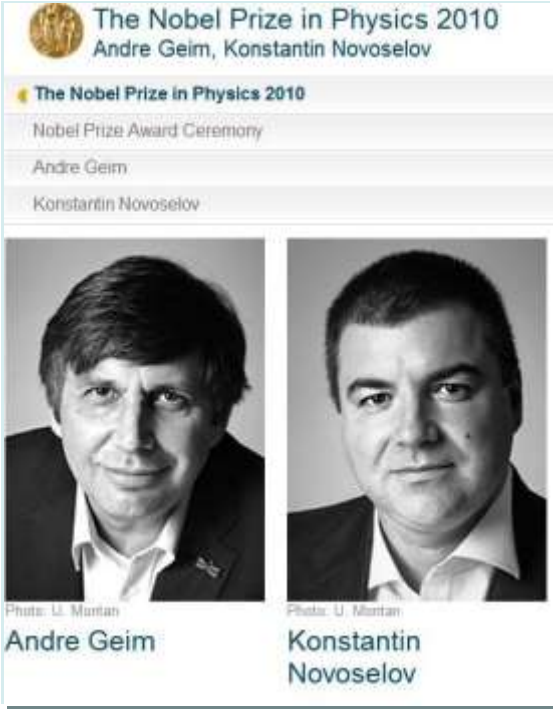
- Grafenové polovodičové součástky - jsou schopné pracovat extrémně vysokou rychlostí až do THz frekvencí.
- Integrace - díky nepatrné tloušťce grafenu lze skládat do kompaktních celků.
- První polem řízený tranzistor byl vyroben ze dvou monovrstev grafitu natočených vůči sobě tak, aby tvořily nevodivý polovodičový přechod. Přiložením napětí shora se vrstvy zmáčknou elektrostatickými silami, v grafitové dvojvrstvě se tím vytvoří vodivý kanál, dvojvrstva se stane vodivá a současně ztmavne.



Princip vytvoření vodivého kanálu u tranzistoru

Grafen – Nobelova cena

- Grafen byl objeven v roce 2004 (2010 Andre Geim a Konstantin Novoselov Nobelova cena).
- Ve 40. letech fyzik Linus Paulig - představa o nekonečné molekule z atomů uhlíku uspořádaných po šesti do kruhů vzájemně propojených do dvourozměrné struktury podobné včelímu plástu.
- 1947 Phlip R. Wallace - teoreticky předpověděl některé vlastnosti grafenů. Předpokládalo se, že v praxi by byly grafeny velmi nestabilní.
- Zájem začal až s objevem uhlíkových nanotrubic (Grafen není nic jiného než uhlíková nanotrubice rozříznutá na boku a rozvinutá do plochy).



Grafenové tranzistory (GrT)

- Tranzistory s mezními kmitočty až jednotky THz.
- Tranzistor je až 4x menší než nejmenší Si
- První GrT vyroben 2004, 2011 IBM tranzistor v 40 nm technologii („diamond-like carbon“), mezní kmitočet 155 GHz.
- GrT je vysoce teplotně stabilní a pracuje i při teplotě -268 ºC.

Aplikace:

- zpracování analogových signálů
- významné zvýšení výkonu v bezdrátových komunikacích, síťových komponentách nebo radarech.

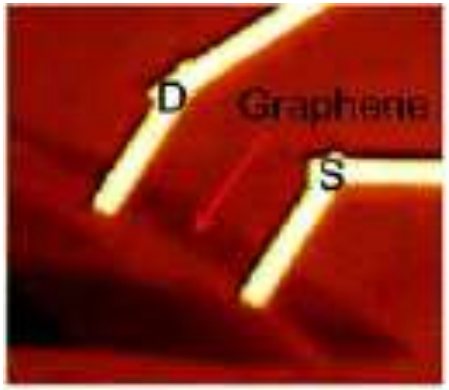
Jednotranzistorový grafenový zesilovač

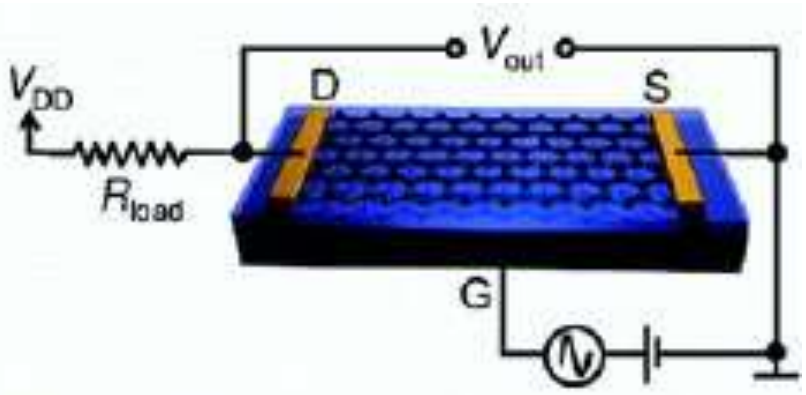
- Grafen je "ambipolární", to znamená, že proud v materiálu může být zajištěn jak elektrony, tak i dírami.
- Typ nosičů lze volit jednoduše změnou napětí na hradle.

Použití zesilovače

- Přepínání mezi třemi módy - lze využít pro klíčování fázovým nebo frekvenčním posunem (bezdrátové a audio aplikace, Bluetooth, RFID a ZigBee.
- Předpokládá se jeho využití v bezdrátových a audio aplikacích, využití pro návrh jednoduchých analog. obvodů pro komunikace.

Principiální obrázek jednotranzistorového grafenového zesilovače





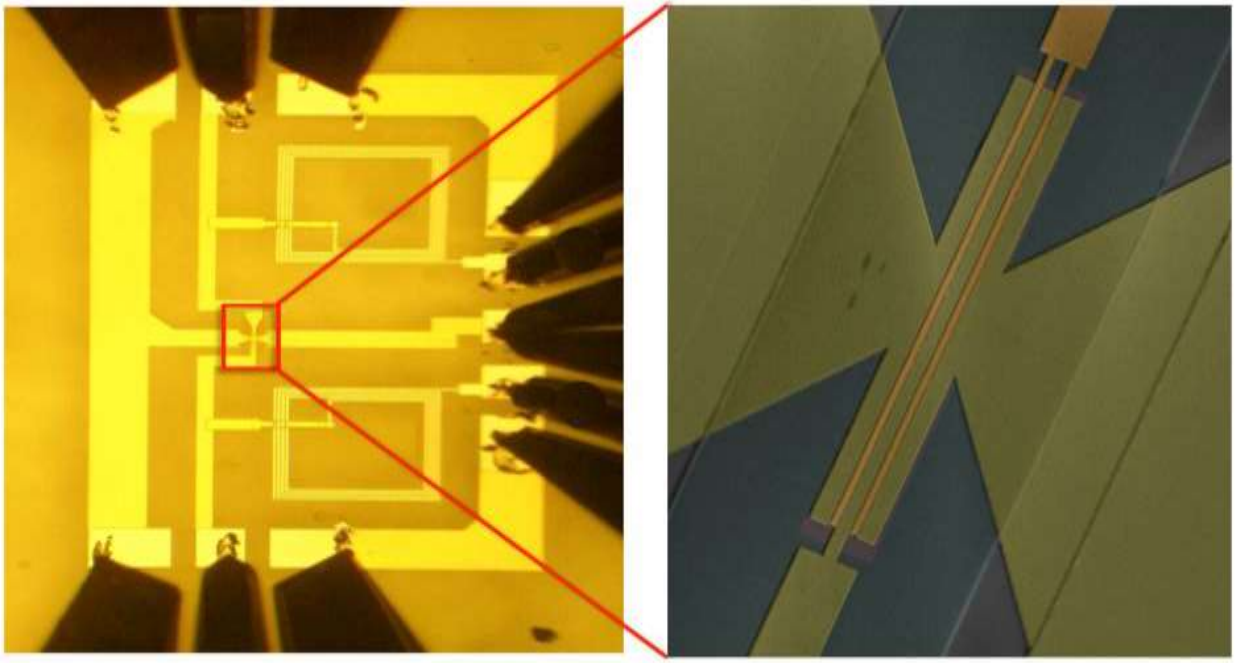
Dumé,B., Graphene single-transistor amplifier is a first, 2010, http://physicsworld.com/cws/article/news/44089

Integrované obvody

Integrovaný směšovač do 10 GHz

- širokopásmový směšovač pracující na frekvenci až 10 GHz.
- GrIO - grafenový tranzistor a pár cívek kompaktně integrovaných na karbidu křemíku (SiC).
- GrIO navržen pro bezdrátové komunikace.

Fotografie z optického mikroskopu kompletního grafenového integrovaného obvodu zahrnující kontaktní vývody



Floriano Traversi: *Integrated complementary g*

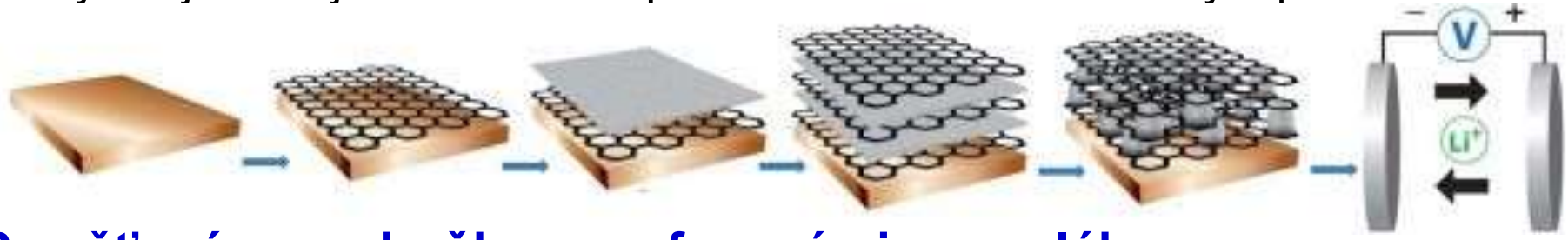
Další aplikace

Ultrakapacitní grafenové kondenzátory

- Kondenzátory - rozměrově menší, činnost i při velmi nízkých frekvencích cca 0,05 Hz
- Kondenzátor s frekvencí nad 5 kHz - 6x menší geometrický rozměr v porovnání s elektrolytickým kondenzátorem
- Grafenový kondenzátor 50 až 70 $\mu F.cm^{-2}$ je geometricky porovnatelný se standardním kondenzátorem o hodnotě 3 $\mu F.cm^{-2}$

Baterie s grafenovými elektrodami

- Rychlejší nabíjení a snížení opotřebení elektrod chemickým procesem



Paměťové superbuňky s grafenovými nanovlákny

- Náhrada superrychlých paměťových čipů na DIMM modulech (*Dual Inline Memory Module)* nebo grafických kartách, flash pamětích apod. s výrazně vyšší kapacitou.

Displeje z grafenu - průhledné vodivé elektrody

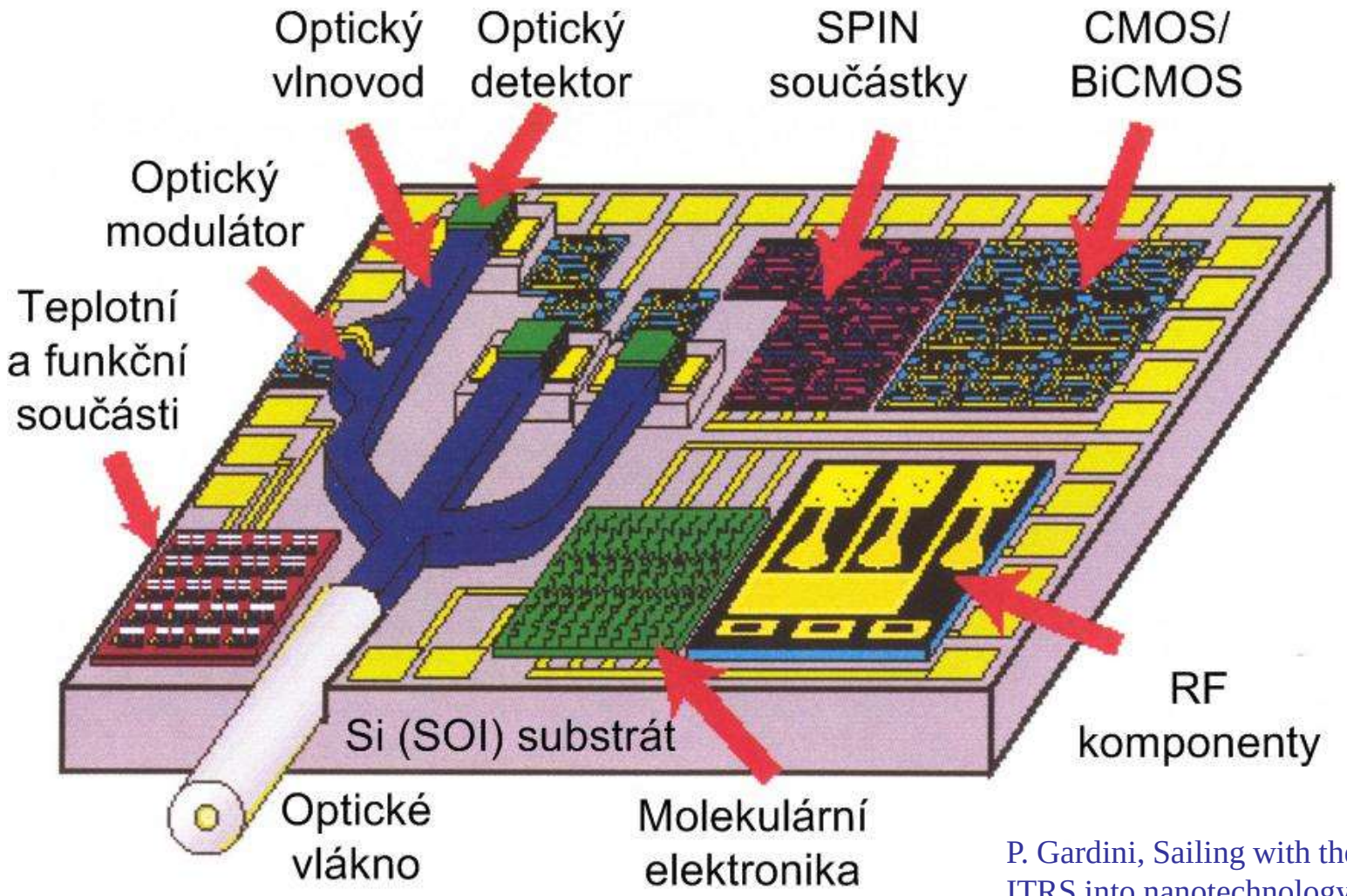
Grafenové procesory

Aplikace grafenu

Optické systémy
(přenos dat a energie)

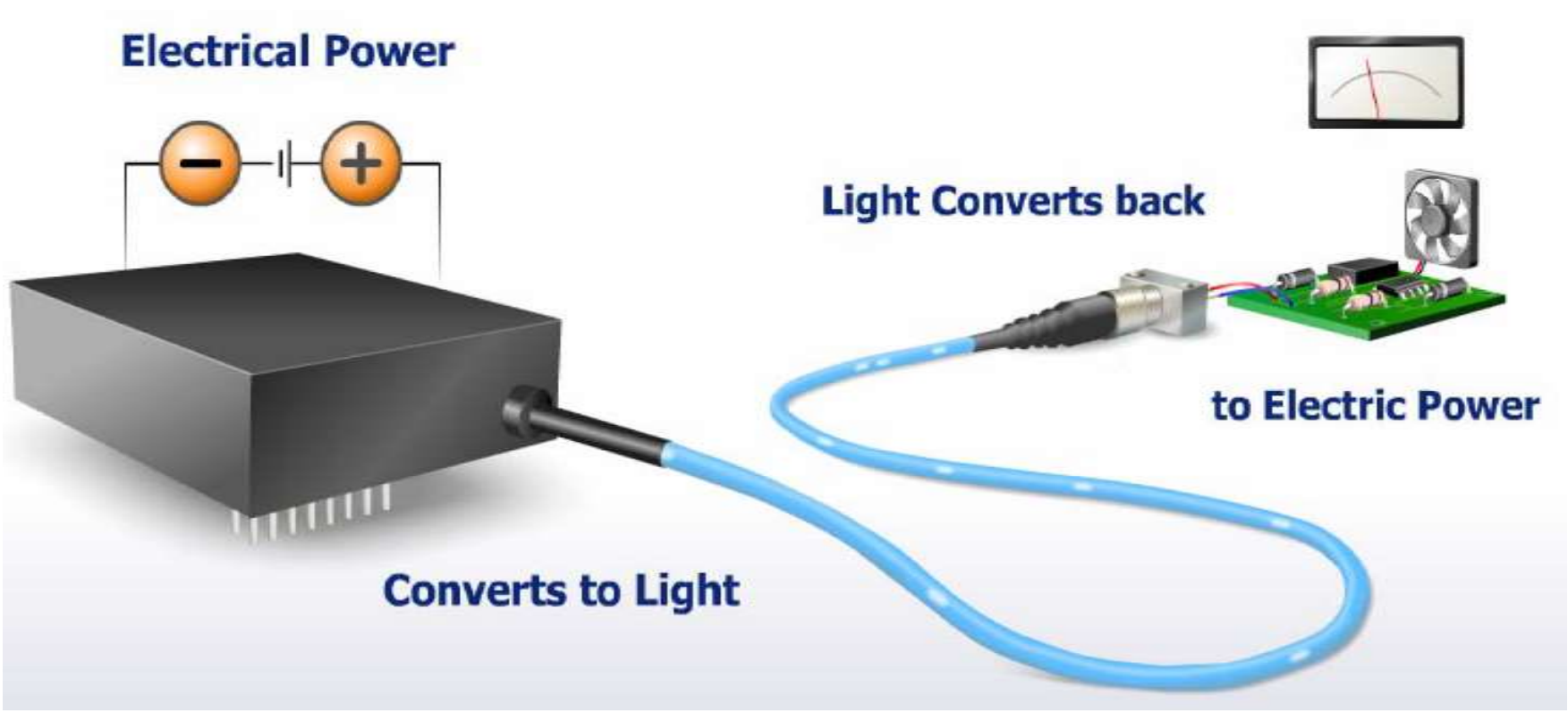
Optické systémy

Integrace různých technologií



P. Gardini, Sailing with the ITRS into nanotechnology

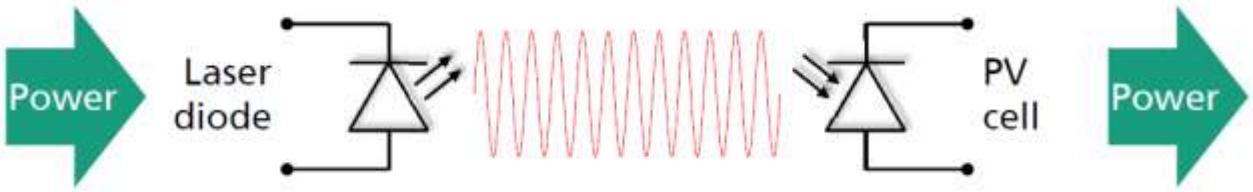
Koncept přenosu energie optickými vlákny



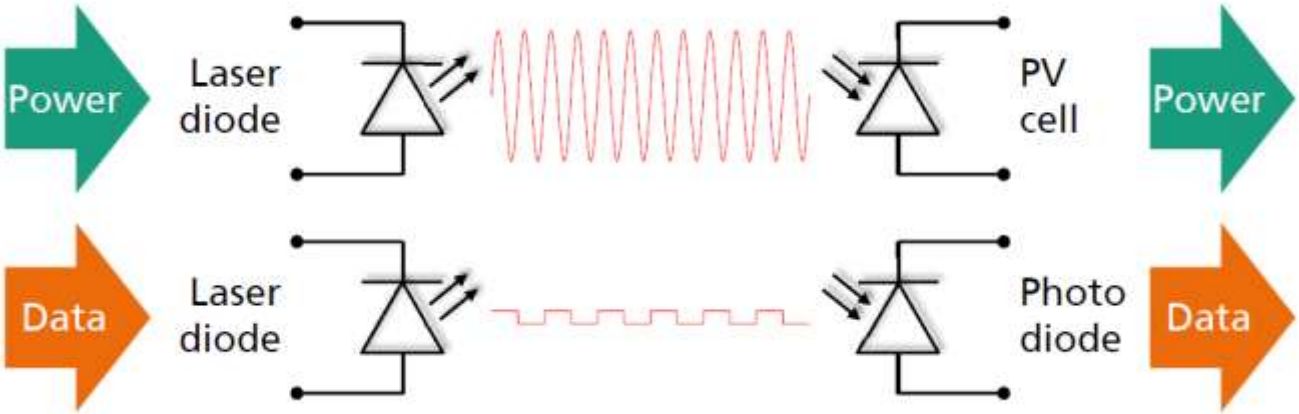
- Převod laserového záření na elektrickou energii s účinností až 50 %.
- Výstupní stejnosměrné napětí od 2 - 12 V
- Laserové diody 790 až 980 nm, 1300-1550 nm
- Přenos elektrické energie o výkonu řádově W
- Vzdálenost 1 km (multimode vlákno) až > 10 km (jednovidové vlákno)

Koncept přenosu energie optickými vlákny

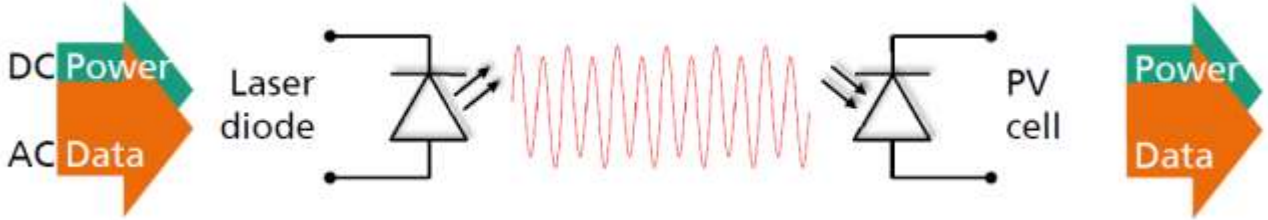
Přenos optického výkonu



Přenos dat a optického výkonu

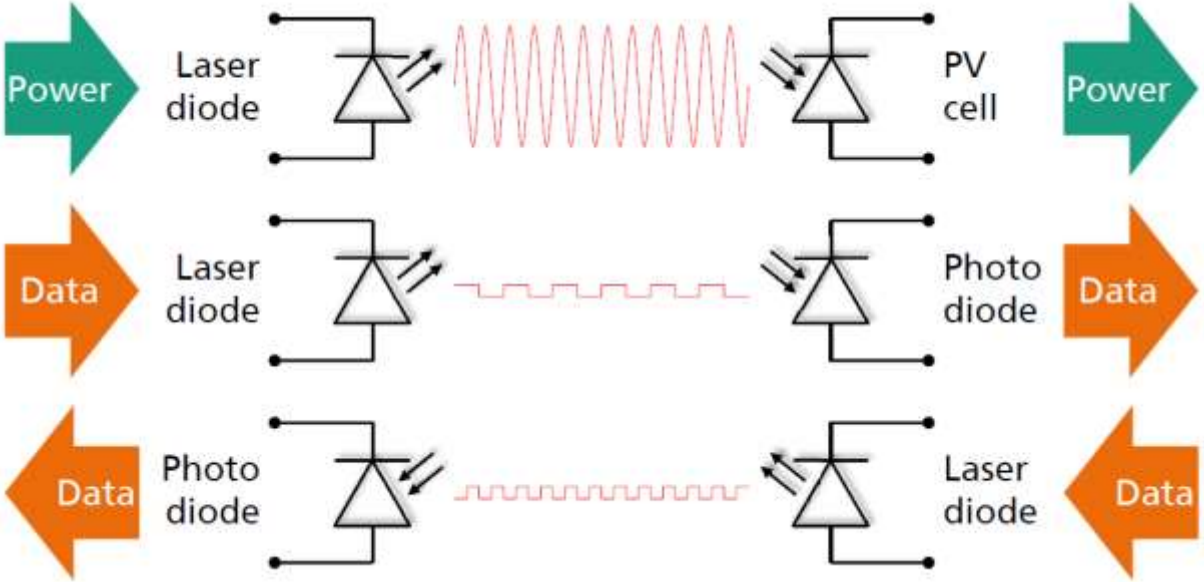


Přenos dat a optického výkonu (DC výkon + AC datový signál)

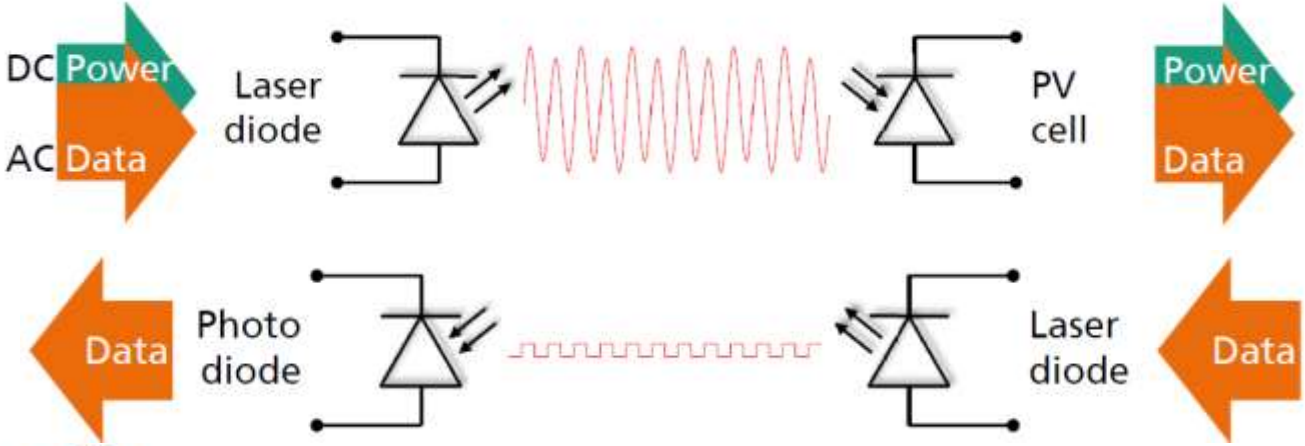


Koncept přenosu energie optickými vlákny

Přenos optického výkonu a dat (výkon a obousměrně data pomocí světla)



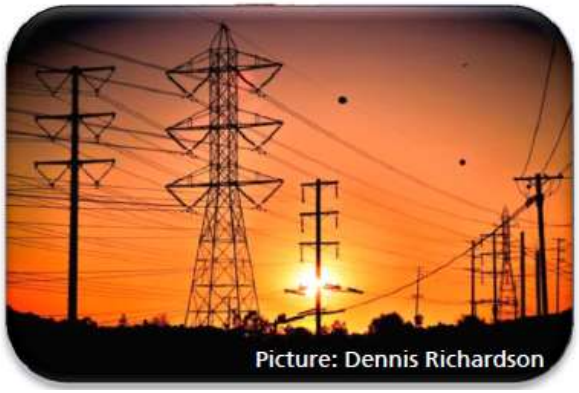
Přenos optického výkonu a dat (výkon a obousměrně data pomocí světla)



Fraunhofer

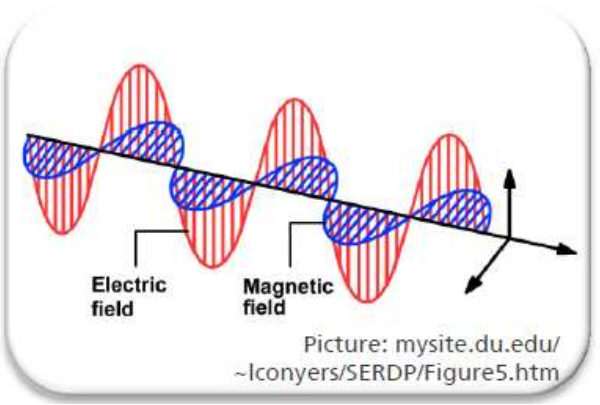
Koncept přenosu energie optickými vlákny

Příklady použití - Kabel z optických vláken nahrazuje metalické vedení

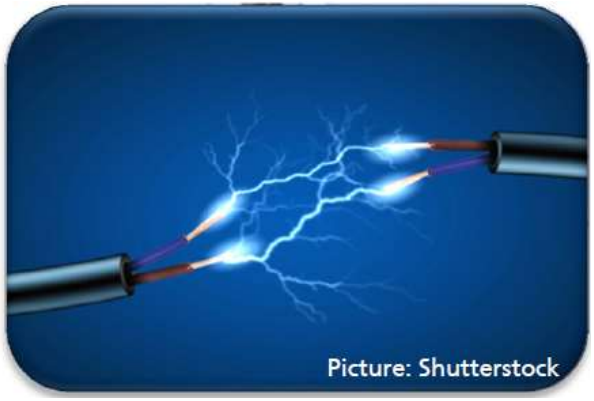


Galvanické oddělení

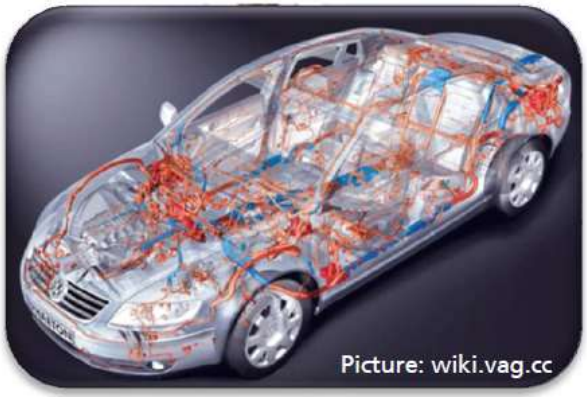
Ochrana před bleskem



Elektromagnetické rušení



Zamezení vzniku jisker a zkratů



Redukce hmotnosti

Vysoká magnetická pole

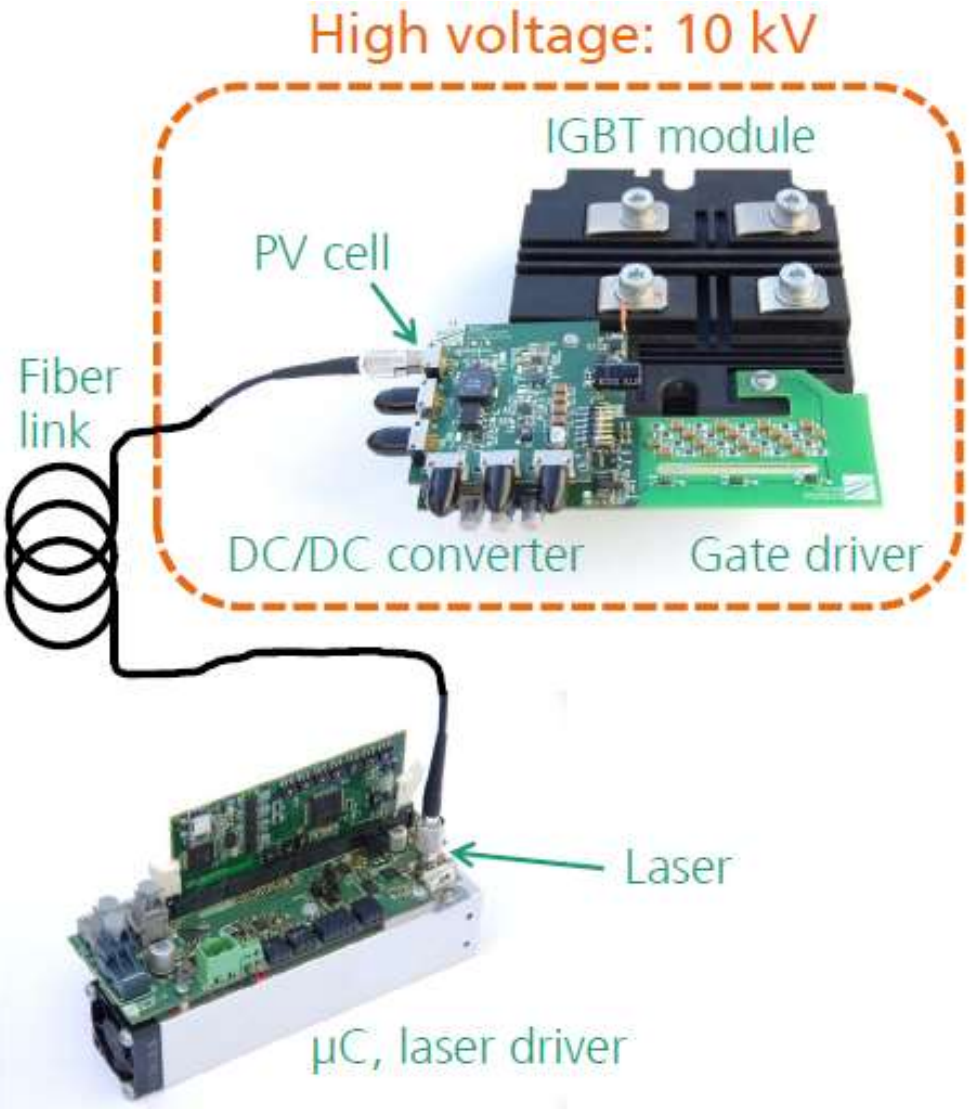
Koncept přenosu energie optickými vlákny

Laserový konvertor energie

- Úprava pro vlnovou délku laseru
- Vysoká účinnost
- Vysoká hustota výkonu
- Vysokonapěťový výstup
- Kombinace s přenosem dat

Koncept přenosu energie optickými vlákny

Napájení v prostředí vysokého napětí

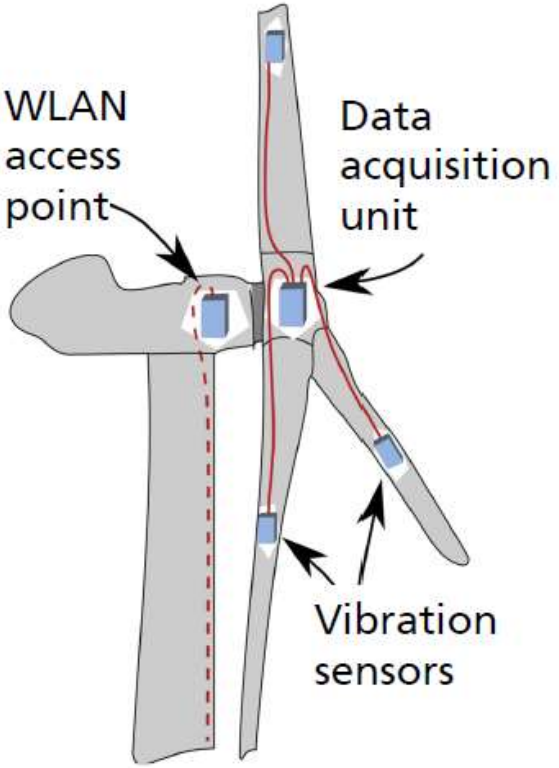


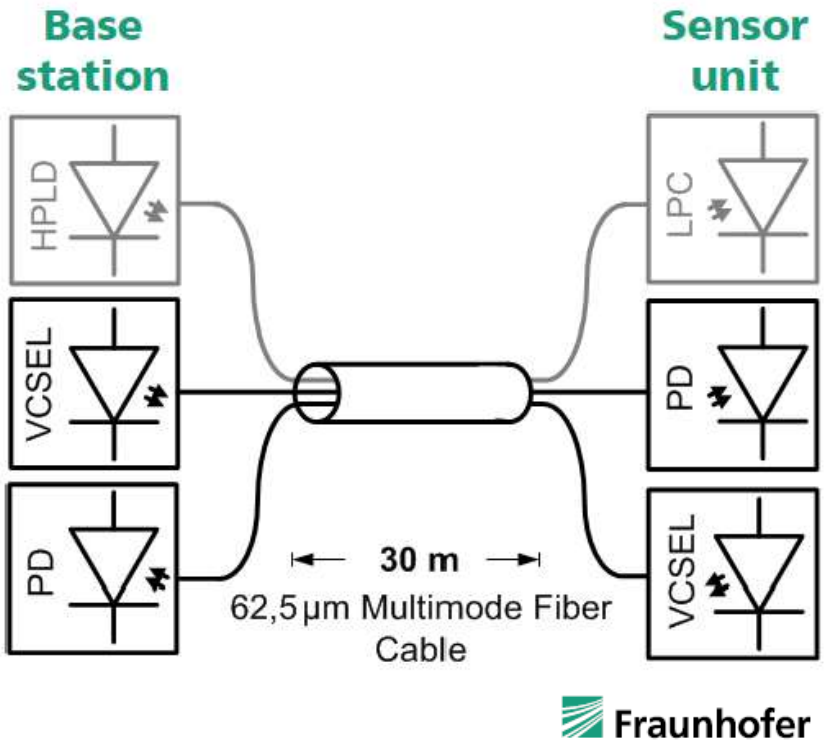
Fraunhofer

Koncept přenosu energie optickými vlákny

Monitorování stavu konstrukce s ochranou před bleskem

- Napájecí zdroj pro invertor větrné elektrárny
- Vysokého napětí: galvanické oddělení od země
- Integrovaný DC/DC převodník:
- Výstupní napětí +18 V, -10 V, +3,3 V
- 6 PV cells
- Pel=3 W





Fraunhofer

Kvantové technologie (kvantové počítače)

Cíl vývoje: Zrychlení a zpřesnění výpočtů

Kvantové technologie

- Kvantové technologie je nově vznikající obor fyziky a inženýrství, který se opírá o principy kvantové fyziky.
- Příklady kvantových technologií:
  - Kvantové výpočty,
  - kvantové senzory,
  - kvantová kryptografie,
  - kvantová simulace,
  - kvantová metrologie
  - kvantové zobrazování.
- Jsou založeny na:
  - kvantovém provázání
  - kvantové superpozici
  - kvantovém tunelování

Hlavní výhody: výpočetní výkon (rychlost), rozsah a přesnost

Kvantové technologie

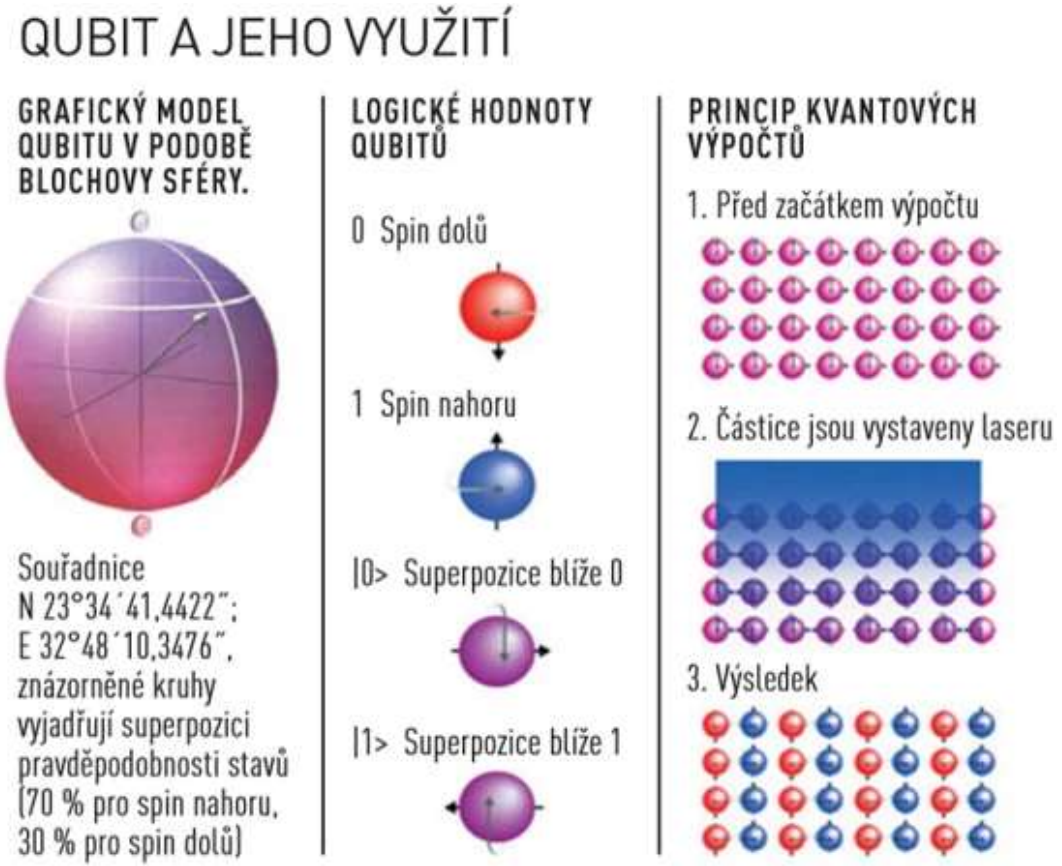
Kvantové počítače nevyužívají jenom (1,0), ale tzv. kvantové bity (qubity).

Qubity taktéž využívají 1 a 0, avšak mohou využívat obou těchto stavů zároveň, tzn. mohou být zároveň jednička a zároveň také nula.

Kvantové provázání: jeden elektron se může i na velkou vzdálenost spojit s jinou částicí (elektron může být na vícero místech zároveň) - jev se nazývá superpozice.

Superpozice elektronu se exponenciálně násobí, pokud se qubity navzájem propojí.

Čím více qubitů se dokáže v rámci počítače propojit, tím výkonnější počítač vzniká.



https://www.letemsvetemapplem.eu/2019/10/28/vse-co-jste-chteli-vedet-o-kvantovem-pocitaci-googlu/#gal1,1

Kvantové technologie

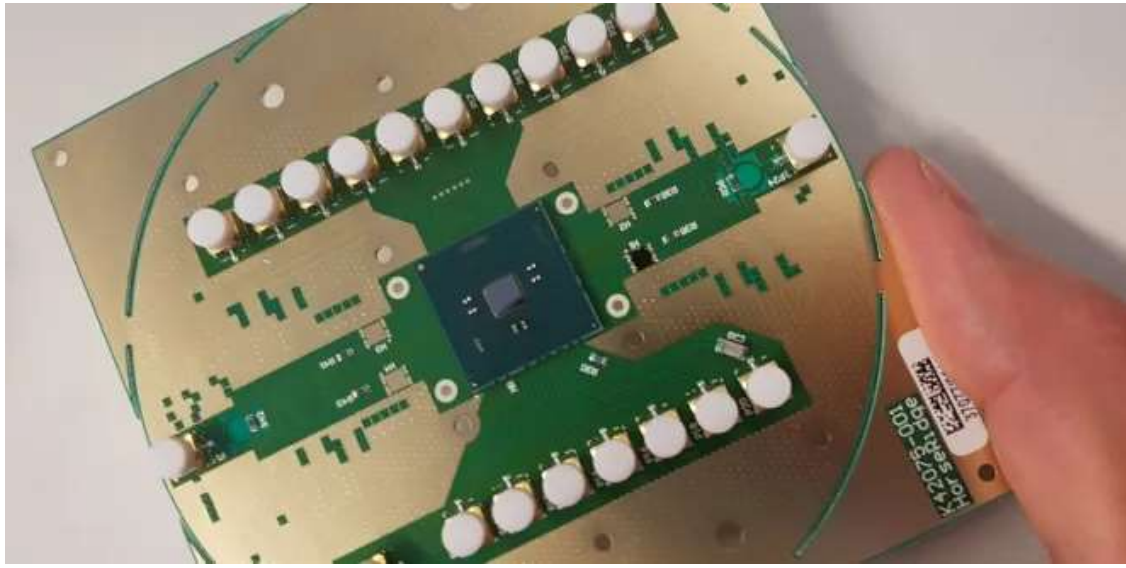
Náročnost chlazení

- Nutné hluboké chlazení s teplotou blízko 0 K (-273,15 °C).
- Při vyšší teplotě dochází k vibracím qubitů způsobujícím nepřesnost prováděných výpočtů.

https://www.letemsvetemapplem.eu/2019/10/28/vse-co-jste-chteli-vedet-o-kvantovem-pocitaci-googlu/#gal2,1

Kvantové technologie

- **Integrované kvantové počítače pracující blízko absolutní nuly**
  Řídicí čip pro qubity, který funguje blízko 0 K.
- Pomocná elektronika a samotné počítání je integrováno do jediného zařízení.
- Kryogenní řídicí čip zvládne teplotu 3 K, samotné qubity 20 mK.
- Čip HorseRidge využívá 22 nm technologii Intelu FinFET.
- Intel a QuTech (Nl, spolupráce Delft University of Technology a TNO, Nl organizace pro aplikovaný vědecký výzkum).



Horse Ridge, ovládací čip pro kvantové počítače

https://sciencemag.cz/kvantove-pocitani-1-qubity-mohou-byt-i-na-bazi-der/

Kvantové technologie

Plně integrovaný kvantový procesor (QPU) funguje při teplotě 3,7 K

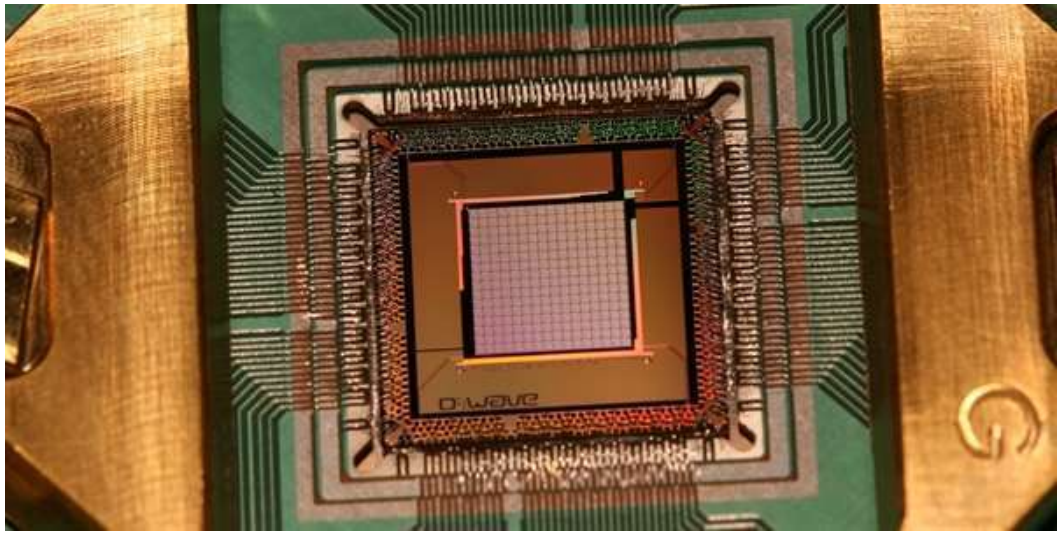
- Společnost Equal1 Laboratories prezentovala plně integrovaný kvantový procesor
- Technologie na bázi Si a funguje při teplotě 3,7 K (výrobce označuje „hot qubits“).
- Qubity mají podobu kvantových teček v nanometrovém měřítku.
- Kromě samotných qubitů jsou součástí integrovaného čipu také veškeré další komponenty potřebné k provozu procesoru, systémy pro čtení dat, řízení, napájení atd.
- Čip obsahuje přes 10^7 tranzistorů.

https://sciencemag.cz/kvantove-pocitani-1-qubity-mohou-byt-i-na-bazi-der/

Kvantové technologie

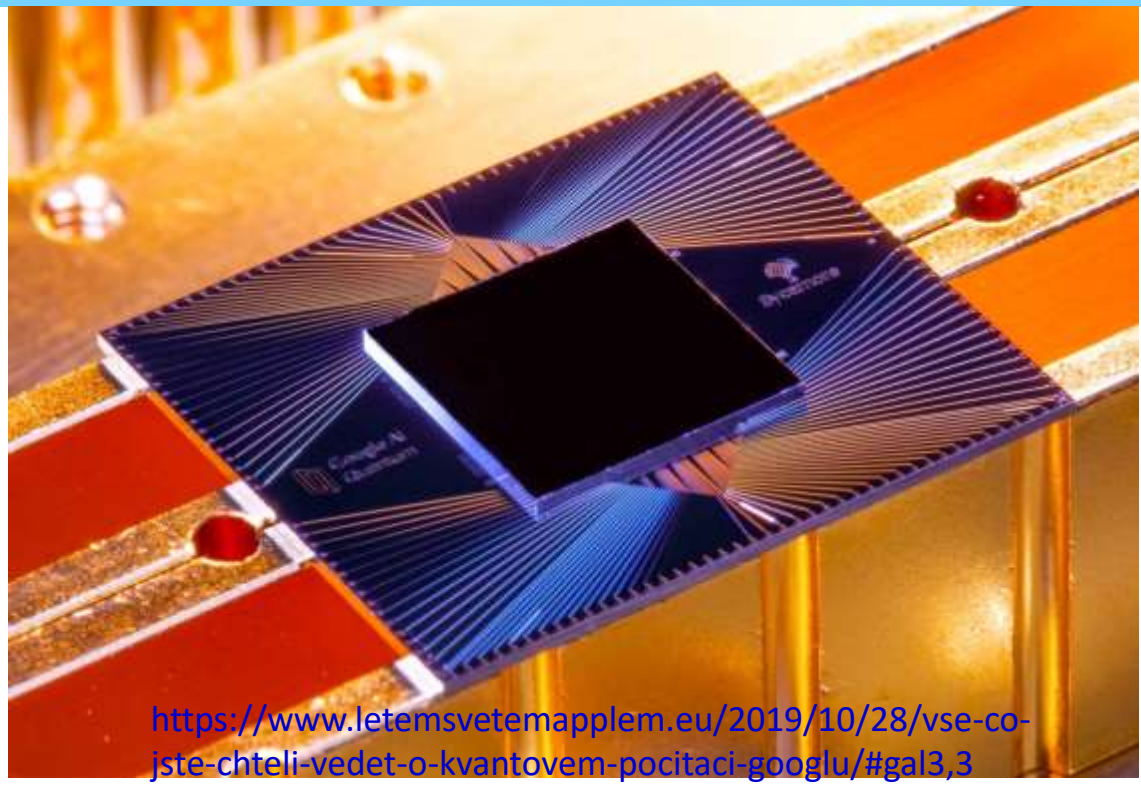
Google údajně postavil kvantový stroj, který je 10^9x rychlejší než nejrychlejší superpočítač světa

- Google kvantový stroj spočítal jistý problém v čase **3:20** min
- stejný výpočet současný nejvýkonnější superpočítačový cluster planety – americký Summit (https://www.top500.org/system/179397/) se změřeným výkonem 148 PFLOPS – spočítal zhruba za **10 tis. let**.



https://www.zive.cz/clanky/google-udajne-postavil-kvantovy-stroj-ktery-je-miliardkrat-rychlejsi-nez-nejrychlejsi-superpocitac-sveta/sc-3-a-200349/default.aspx

Kvantové technologie



https://www.letemsvetemapplem.eu/2019/10/28/vse-co-jste-chteli-vedet-o-kvantovem-pocitaci-googlu/#gal3,3

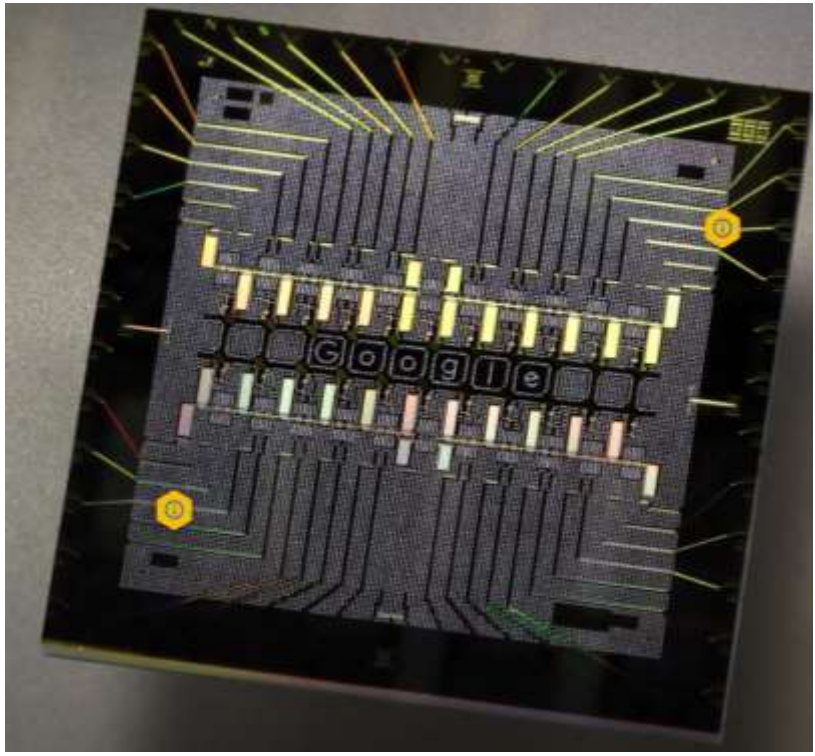
Sycamore (Od Google)

- Sycamore je název mikroprocesoru.
- Sycamore disponuje 54 qubity
- Měří napříč zhruba 10 mm.
- Jeho komponenty jsou konstruovány z Al a In, ty jsou uloženy mezi 2 silikonové desky.

Kvantové technologie

Google do roku 2029 postaví kvantový počítač. Bude řešit problémy, které jsou pro ty klasické příliš složité

- Kvantový čip je místo, kde směrujeme signály do / z qubitů.
- Tuto vrstvu udržujeme oddělenou od vrstvy qubitů, abychom minimalizovali interakci mezi signály a qubity.
- Povrch s vyleptanými vodiči pro odesílání a přijímání signálů do a z qubitů.
- Velikost 150 mm^2

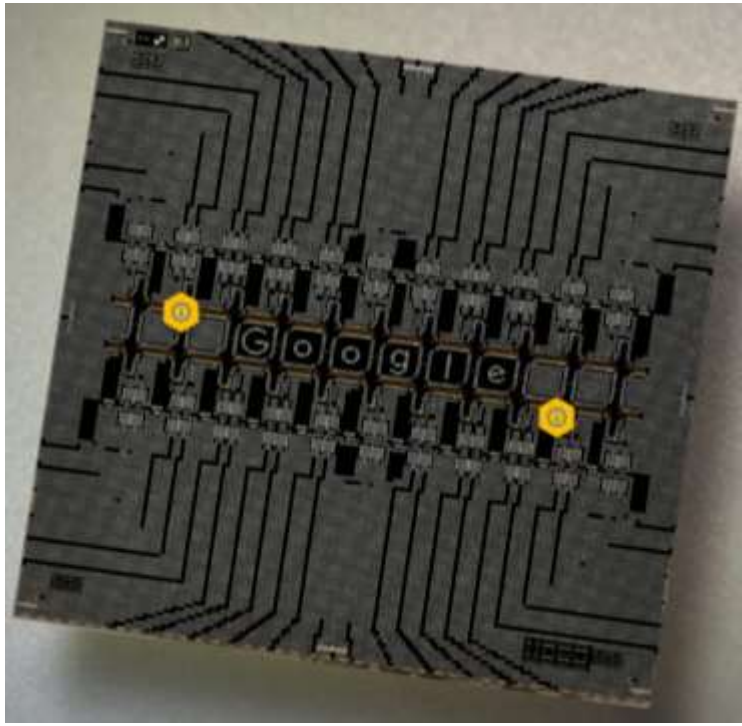


Kvantový čip: vodičové propojení

Quantové technologie

Google do roku 2029 postaví kvantový počítač. Bude řešit problémy, které jsou pro ty klasické příliš složité

- Kvantový čip je místo, kde spojujeme svět kvantové mechaniky s moderní výrobou.
- Vrstva qubitů obsahuje supravodivé kovy a magnetometry, které tvoří qubity.
- Velikost 150 mm^2

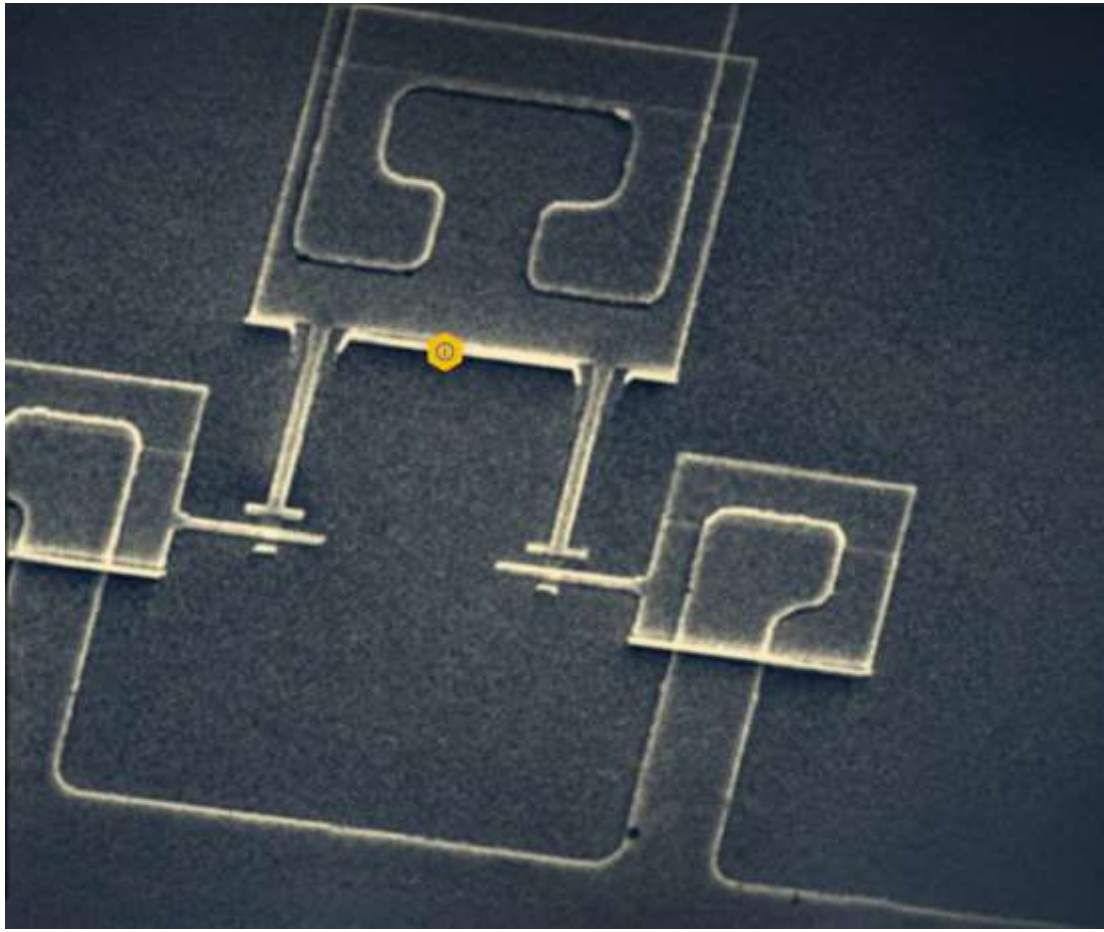


Kvantový čip: qubitová vrstva

Kvantové technologie

Google do roku 2029 postaví kvantový počítač. Bude řešit problémy, které jsou pro ty klasické příliš složité

- Qubit je velmi citlivý elektromagnetický detektor vyrobený z paralelního zapojení induktoru a kondenzátoru.
- Indukčnost je dána Josephsonovým přechodem, sendviče supravodivého kovu a izolátoru,
- Kapacita je dána dvěmi kovovými deskami ve tvaru písmene X.
- Velikost 10 μm^2

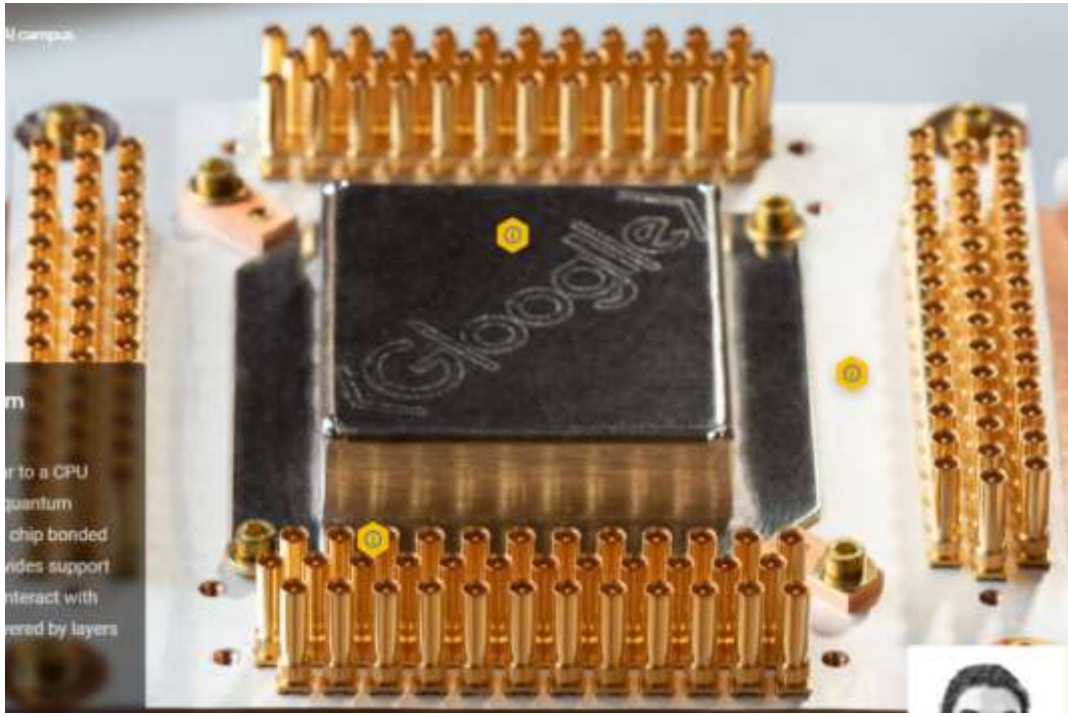


Qubit

Kvantové technologie

Google do roku 2029 postaví kvantový počítač. Bude řešit problémy, které jsou pro ty klasické příliš složité

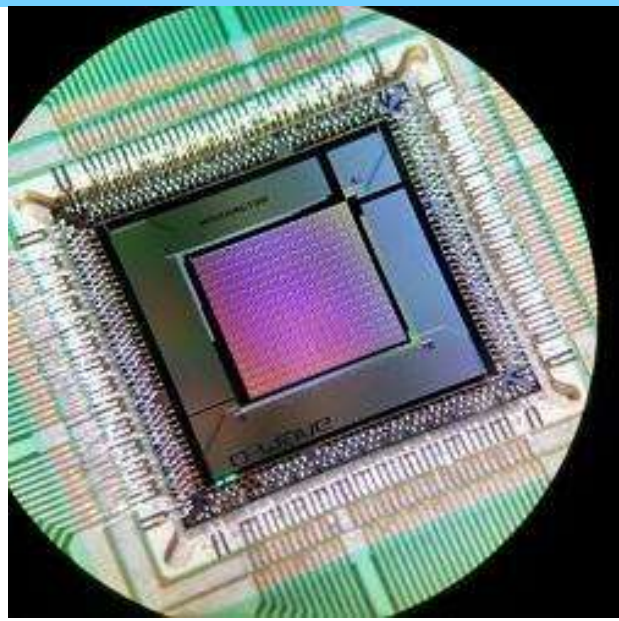
- Kvantový procesor je vysoce specializovaný čip spojený s deskou s elektrickými obvody.
- Deska poskytuje podporu spojení pro čip pro interakci s další elektronikou.
- Čip je pokryt vrstvami ochranného stínění.
- Velikost 60 cm^3



Zapouzdřený kvantový procesor

Kvantové technologie

- Vyžaduje stínění, které musí snížit magnetické pole Země 50 000 x.
- Vyžaduje vysoké vakuum s tlakem 10^{10} krát nižším, než atmosférický tlak.



Procesor D-Wave

- Kvantové počítače nabízejí proti těm normálním výpočetní výkon, který s počtem qubitů roste exponenciálně
- Skutečné zrychlení záleží na konkrétním algoritmu.

Kvantové technologie

Závěr: Urychlí jen některé úlohy

- Kvantové počítače, či superpočítače, nejsou univerzálně rychlé a výkonné.
- Kvantové počítače (alespoň prozatím) mají malé možnosti využití, např. u vzorců, anebo při prolamování kryptografických kódů.
- Všechny možné stavy těchto úloh dokáže kvantový počítač vyřešit ihned najednou, a proto jsou naprosto ideální.

Budoucnost

☹ Vzhledem k jednoduchému prolamování kryptografických kódů by nebyly peněžní transakce na internetu vůbec bezpečné.

☺ U datových center dojde integrací kvantových počítačů k rychlejšímu (bleskovému) prohledávání záznamů, a to především v netříděných databázích.

☺ Kvantové počítače zajistí posun v miniaturizaci integrovaných obvodů.

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc
husak@fel.cvut.cz
tel.: 2 2435 2267
http://micro.fel.cvut.cz