

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

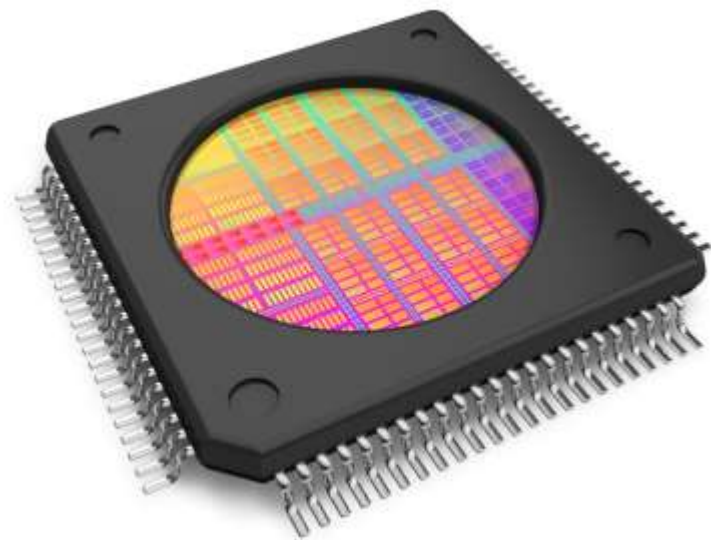
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

***Polovodičové materiály
a technologie
KET/PMAT***



***Speciální polovodičové
součástky***

Přednáška 10



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



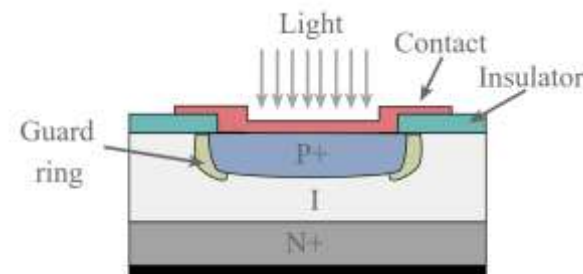
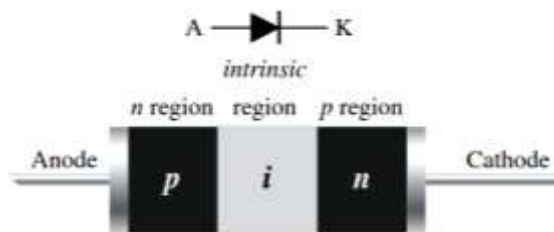
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, CO JE TO PIN DIODA A K ČEMU SE VYUŽÍVÁ.
- DOZVÍTE SE, JAKÁ JE STRUKTURA IGBT TRANZISTORU.
- ZJISTÍTE, CO JE TO FIN A HEMT TRANZISTOR.
- DOZVÍTE SE, CO JSOU SPINTRONICKÉ SOUČÁSTKY.
- ZJISTÍTE, JAKÉ JAK FUNGUJE MRAM.
- DOZVÍTE SE, CO JSOU TO UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE.
- DOZVÍTE SE, CO JSOU OFET A OECT TRANZISTORY.

PIN dioda

Diody PIN byly původně vyvinuty jako usměrňovací diody pro **zvýšení účinnosti usměrnění při vysokých závěrných napětích**. Vložení **intrinzické (ve skutečnosti pouze ochuzené v, π) vrstvy** mezi **silně dotované polovodiče P a N** bylo zajištěno zvýšení průrazného napětí v závěrném směru. Se snižujícím se počtem volných nosičů vzrůstá při konstantní šířce l vrstvy průrazné napětí. Zároveň se však **prodlužuje doba nutná k odsátí volných nosičů z vrstvy l** . Pro technické kmitočty je tato struktura vhodná, avšak **se zvyšující se frekvencí účinnost usměrňování klesá**. Od kmitočtu v řádu stovek megahertzů již může doba nutná k odsátí nainjekovaných nosičů z l vrstvy přesáhnout celou půlperiodu usměrňovaného proudu a dioda přestává usměrňovat zcela. Široká vnitřní oblast dělá z PIN diody **špatný usměrňovač**, ale díky ní je **vhodná pro např. attenuátory, rychlé spínače, fotodetektory a aplikace vysokonapěťové výkonové elektroniky**.



Vysokonapěťový usměrňovač

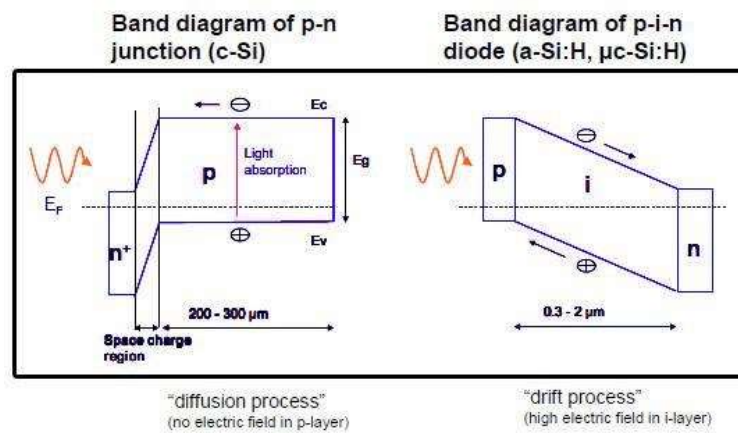
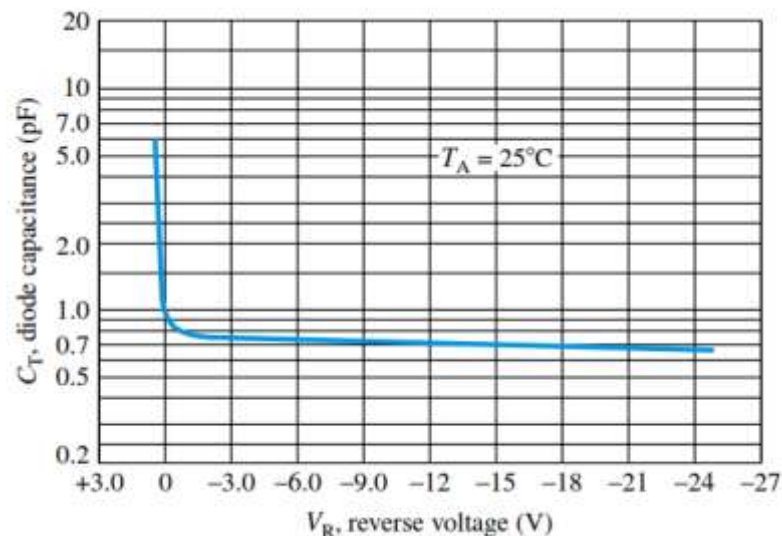
PIN diodu lze použít jako vysokonapěťový usměrňovač. Vnitřní uspořádání poskytuje větší oddělení mezi oblastmi P a N, což umožňuje vyšší reverzní napětí.

RF spínač

PIN dioda je kvalitním RF spínačem. Vnitřní vrstva mezi oblastmi P a N zvětšuje vzdálenost mezi nimi. To také snižuje kapacitu mezi nimi, čímž se zvyšuje izolační vrstva (vyčerpaná oblast), když je dioda v závěrném směru.

Fotodetektor

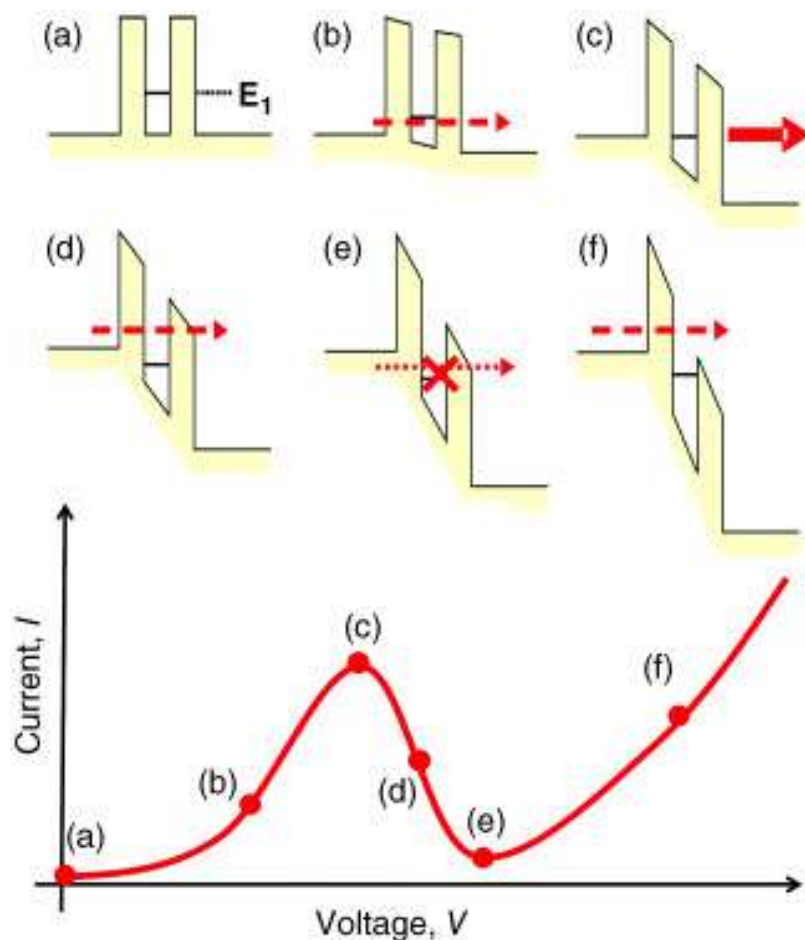
Vzhledem k tomu, že přeměna světla na proud probíhá ve vyčerpané oblasti, která je díky intrinzické vrstvě širší, dochází ke zlepšení výkonu přeměny světla.



Rezonanční tunelové diody

Rezonanční tunelová dioda (Resonant Tunneling Diode, RTD) je v podstatě **heterostruktura opatřená ohmickými kontakty, která vytváří dvojí bariéru s kvantovou jámou**. Tato bariéra, která se často označuje jako DBQW (Double Barrier Quantum Well), je nejčastěji tvořena **heteropřechodem AlGaAs/GaAs**. V polovodiivých vrstvách na bázi GaAs je pro zajištění elektronové vodivosti nejvíce užívaným dopantem křemík, přičemž ve zmíněných vrstvách zároveň působí jako donor

Rezonanční tunelové diody mají oproti jiným součástkám, které mají oblasti se záporným diferenciálním odporem, mnoho výhod, jako např. nízkou hodnotu kapacity.



IGBT tranzistor

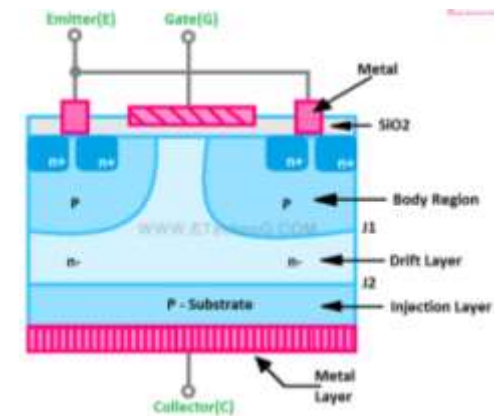
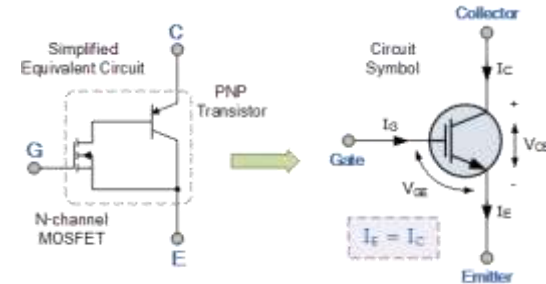
Nevýhody bipolárních a unipolárních tranzistorových spínačů odstraňuje IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Jedná se o bipolární tranzistor s izolovanou řídící elektrodou, čili kaskádní spojení bipolárního tranzistoru PNP, jehož proud báze je řízen sepnutím vstupního unipolárního tranzistoru.

Na straně vstupu má vlastnosti podobné tranzistoru FET – **nekonečný vstupní odpor**. Na výstupní straně má vlastnosti bipolárního tranzistoru – **je dostatečně proudově i napěťově zatížitelný**.

Na sepnutém IGBT je **úbytek napětí 1,5 až 4 V** dle typu a dle protékajícího proudu.

Se zvyšující se teplotou tento úbytek vzrůstá. Proto je lze řadit paralelně za účelem zvýšení maximálního pracovního proudu, podobně jako tranzistory FET.

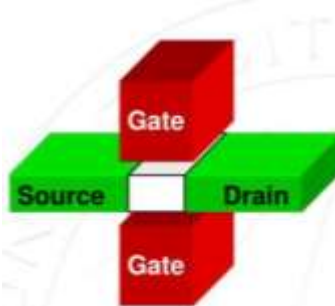
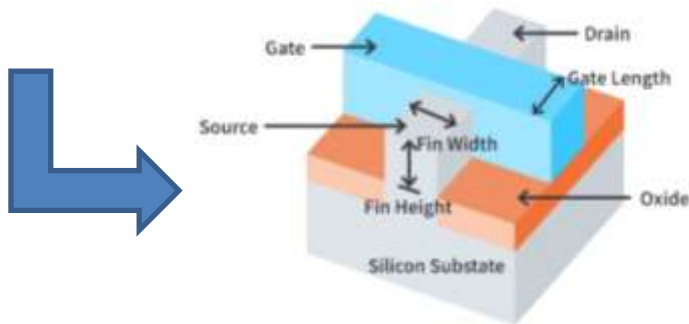
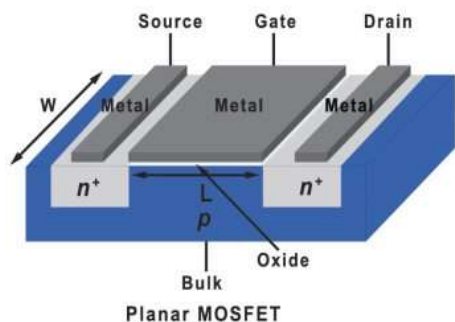
Pro řízení IGBT se vyrábějí **speciální budiče**, které zajišťují dosažení maximální rychlosti sepnutí (desetiny mikrosekund) - **tvarování průběhu napětí řídící elektrody**.



Fin FET

Tranzistor **FinFET (Fin-shaped Field Effect Transistor)** (žebrový tranzistor) je polovodičová součástka s délkou brány (gate) menší než **18 nm** a s **tloušťkou** oxidované vrstvy brány tenčí než **2,5 nm**. Tento tranzistor byl vytvořen na tenké křemíkové struktuře umístěné na **vrstvě izolantu, tzv. finu**.

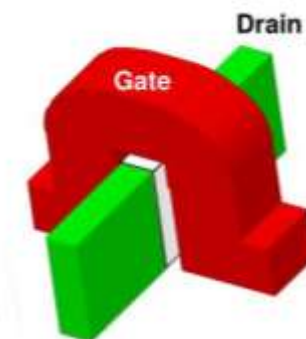
Rozhodující geometrické rozměry tohoto tranzistoru spočívají v délce tištěné brány, efektivní délce brány, která se určuje podle vzdálenosti při přechodu, výšce žebra a šířce žebra, což je vzdálenost mezi oxidovanou branou a dvěma branami.



Planar DG-FET



Source **90°**
Rotation

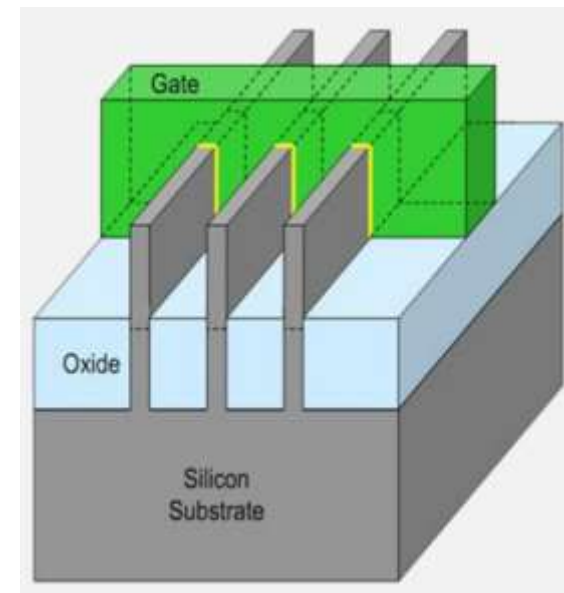
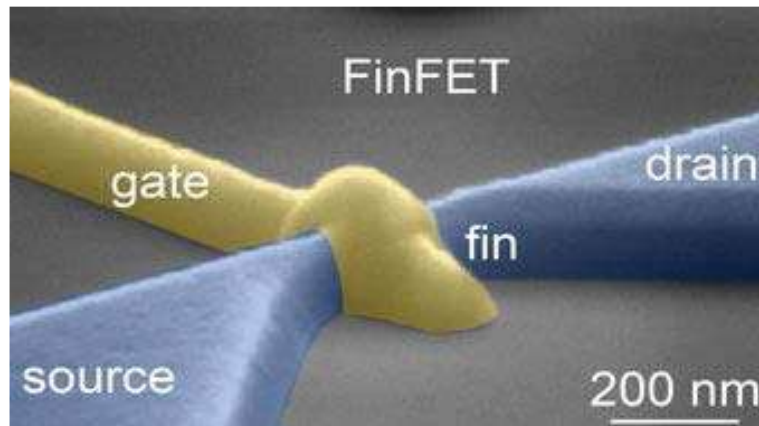


Source
FinFET

FinFET je druh **neplanárního tranzistoru**, neboli „**3D**“ tranzistoru. Je základem pro výrobu moderních nanoelektronických polovodičových součástek.

Co se týče praktického využití tranzistorů FinFET, společnosti AMD, IBM a Toshiba vyvinuly nejmenší funkční paměťovou buňku SRAM, která byla vyrobena pomocí 22 nm technologie, zabírá prostor o velikosti pouze $0,128 \mu\text{m}^2$, zatímco 32 nm SRAM buňky společnosti zabírají prostor $0,171 \mu\text{m}^2$. Tato úspora prostoru je umožněna právě využitím vertikálních tranzistorů FinFET namísto konvenčních tranzistorů s rovinným hradlem.

Zařízení FinFET mají výrazně **rychlejší spínací časy** a **vyšší proudovou hustotu** než planární technologie CMOS.

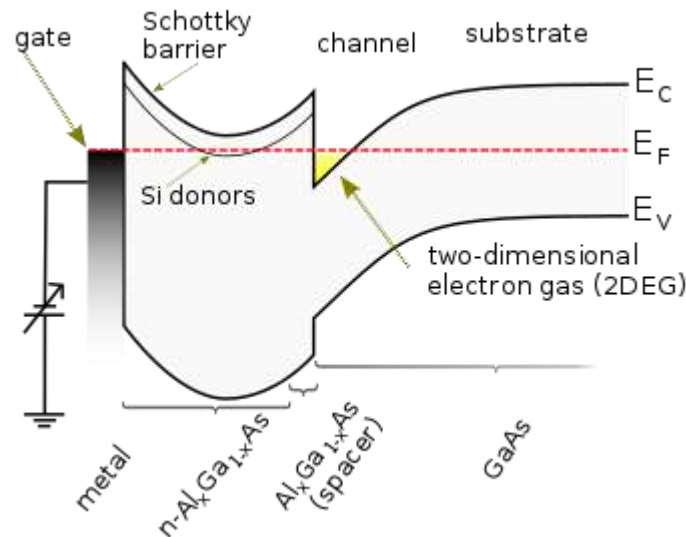


HEMT tranzistory

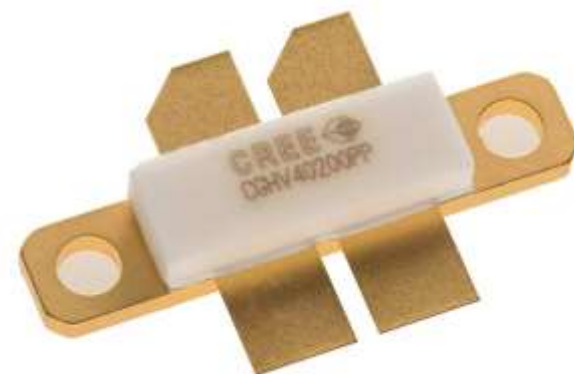
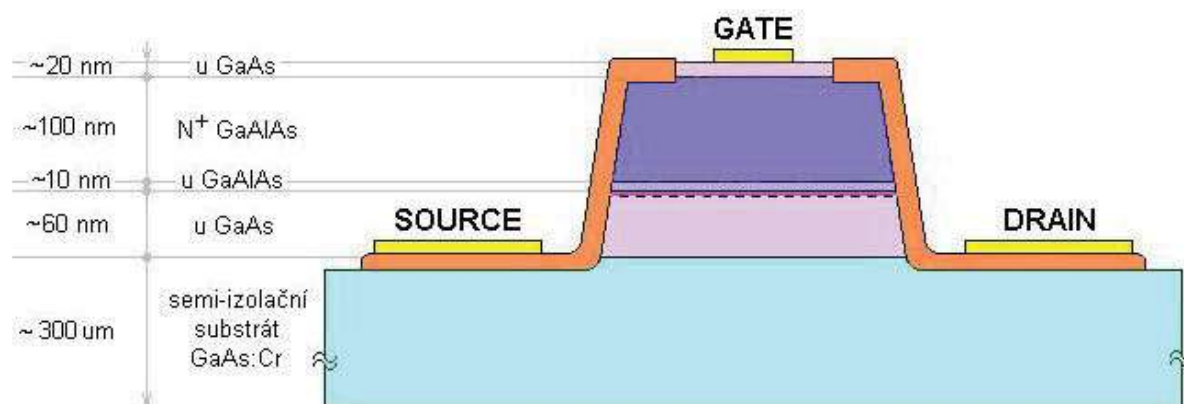
Tranzistor s vysokou hodnotou pohyblivosti elektronů (High Electron Mobility Transistor - HEMT), je unipolární struktura s řadou výhod.

Jedná se o **polem řízený tranzistor**, který **využívá heteropřechodu mezi dvěma různými polovodivými materiály** k uzavření elektronů do tzv. trojúhelníkové kvantové jámy, podél níž probíhá jejich transport ve formě dvourozměrného elektronového plynu. **Elektrony** omezené v heteropřechodu tohoto tranzistoru **vykazují vyšší pohyblivost**, než elektrony v tranzistoru MOSFET, z toho důvodu, že transport probíhá prakticky bez rozptylu.

Nejmodernější technologie umožňují vytvoření tranzistoru HEMT s délkou kanálu menší než $0,1\ \mu\text{m}$.



Označení tohoto typu tranzistoru zkratkou **HEMT** není jednoznačné, jelikož pro něj také existuje označení **MODFET** (Modulated-Doping Field Effect Transistor, resp. Modulation-Doped Field Effect Transistor) nebo **HFET** (Heterostructure Field Effect Transistor).



Spintronické součástky

Postupná miniaturizace součástek, jako např. procesorů pracujících na bázi **přenosu elektrických proudů** v polovodičích, přináší mnoho problémů, např. v podobně **zahřívání**. Řešení těchto problémů lze s největší pravděpodobností nalézt v novém technologickém oboru, kterému se říká **spintronika**. Spintronika, resp. **spinová elektronika**, neboli také **magnetoelektronika**, je moderní obor, jehož technologie **využívají kvantové vlastnosti elektronu**, konkrétně jeho **elektrický náboj a především orientaci spinu**, čímž se liší od klasické elektroniky, ve které se využívá pouze jeho elektrického náboje.

Cílem spintroniky je tedy konstrukce elektronických zařízení, které budou moci **kombinovat klasickou mikroelektroniku se spinově citlivými jevy**, které vznikají vzájemnou **interakcí mezi nosičem náboje a magnetickými vlastnostmi materiálu**. Zmíněné užití spinu je většinou založeno na jeho orientaci, která může být buď „nahoru“ nebo „dolů“, vzhledem nějaké referenci, jako např. vůči přiloženému magnetickému poli. Elektronické prvky poté pracují s jistou veličinou, např. s elektrickým proudem, která je tak ovlivněna orientací spinu.

K nejvýznamnějším součástkám, kterým se pak říká spintronické, patří **paměti typu MRAM a tranzistor typu SFET**.

MRAM paměti

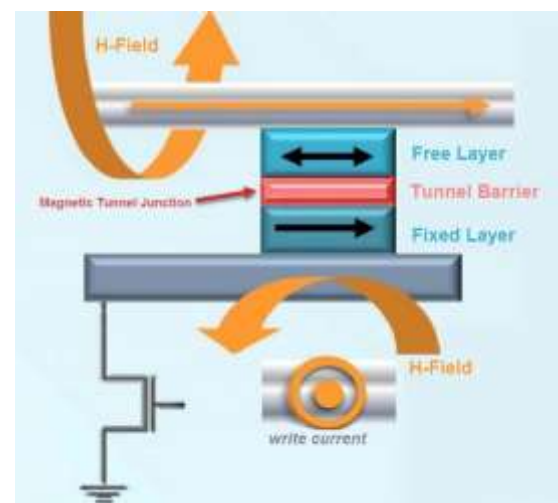
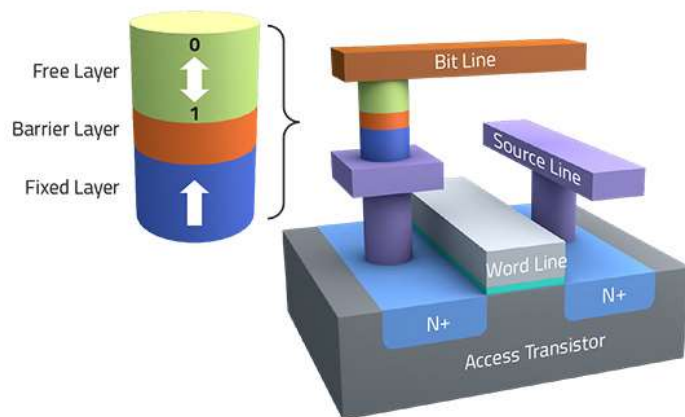
Magnetorezistenční paměti s libovolným přístupem, neboli paměti typu **MRAM (Magnetoresistance Random Access Memory)** jsou integrované paměťové čipy, které mají rozdílný postup čtení a zápisu logického stavu a uložení informace (stav bitu). **Vyžívají změny orientace magnetického pole speciální paralelní struktury feromagnetického a dielektrického materiálu**, kde se čtením provádí měření příčného elektrického odporu struktury. Zmíněný **odpor se mění díky jevu magnetorezistence** v závislosti na uložené orientaci magnetického pole při zápisu bitu. Jelikož je **magnetické pole nezávislé na elektrickém poli**, paměti typu MRAM proto udržují uloženou informaci i bez napájecího napětí a zároveň umožňují zápis a čtení stavu podobnou rychlostí, jako klasické paměti typu SRAM.

Základem každé paměťové MRAM buňky je **speciální vertikální struktura označovaná jako magnetický tunelový přechod**, která se skládá ze **dvou feromagnetických materiálů**, které jsou vzájemně **odděleny tenkou dielektrickou vrstvou z oxidu hliníku**. V této struktuře se užívá tunelové magnetorezistence, přičemž **v závislosti na vzájemné orientaci magnetického pole obou feromagnetických látek se natáčí spin procházejících elektronů elektrického proudu**, jež následně protunelují nebo neprotunelují dielektrikum. Tím se mění i příčný elektrický odpor celé této struktury.

MRAM paměti - zápis

Magnetické pole proměnné feromagnetické vrstvy je řízené **vybuzeným magnetickým polem při zápisu logického stavu bitu**. Je-li směr magnetického pole proměnné feromagnetické vrstvy **stejný s pevně daným směrem spodní vrstvy**, je **odpor kladený elektrickému proudu malý**. Ovšem, **je-li vzájemná orientace polí opačná, je vertikální elektrický odpor struktury velký**.

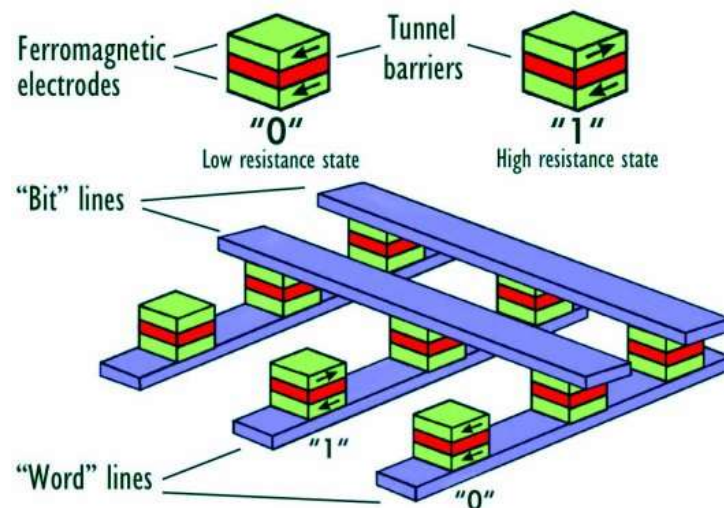
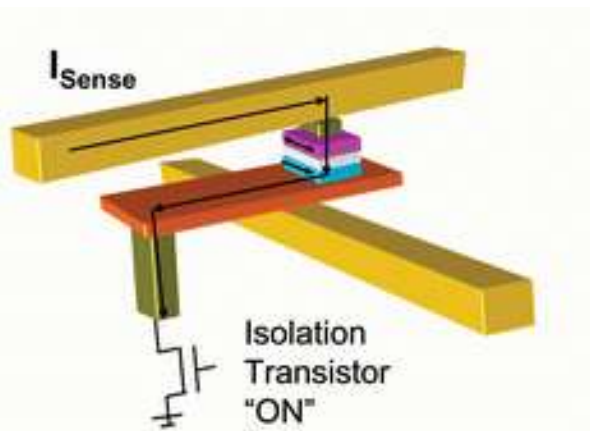
Co se týče zápisu, neboli změny logického stavu paměťové buňky z 0 na 1 nebo z 1 na 0, ten je prováděn **přivedením sekvenční dvou vzájemně posunutých proudových obdélníkových pulsů na dva zápisové vodiče** zmíněné paměťové buňky. Jedná se o tzv. přepínací zápisovou funkci, kdy přesun z 0 na 1, popř. opačně, se provádí pomocí úplně stejného zápisového signálu.



MRAM paměti - čtení

Čtení stavu bitu je prováděno **pomocí společné elektrody a menší speciální čtecí elektrody**, která je napojená na protější stranu vertikální struktury. Princip čtení spočívá v **sepnutí příslušného izolačního tranzistoru čtené buňky**, přičemž takto vzniklou trasou protéká **elektrický proud**, jehož hodnota se **porovnává s referenční hodnotou**. Má-li zapsaný stav hodnotu 1, pak zmíněná buňka má větší odpor a proud je tak menší než referenční hodnota.

Mezi jednu z mnoha výhod pamětí MRAM patří např. fakt, že čtení nemá vliv na kvalitu uložené informace. U klasických pamětí typu RAM dochází s časem a čtením k úbytku náboje, zatímco u MRAM není magnetická polarizace nijak čtením ani časem ovlivňována.



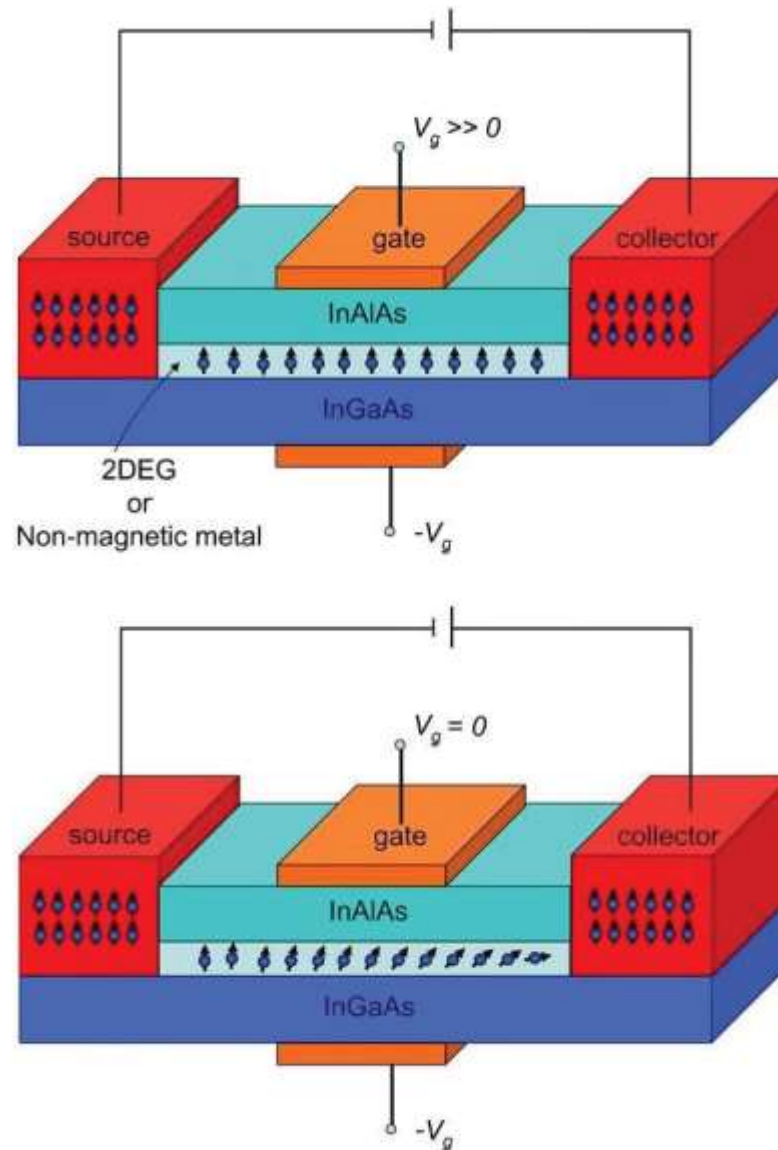
SPIN-FET tranzistor

Spinově polarizovaný polem řízený tranzistor (Spin Polarized Field Effect Transistor - SPINFET) byl navržený již v roce 1990, avšak do současnosti ještě nebyl prakticky realizován. Přesto je na něj nahlíženo jako na jednu z nejpokročilejších aplikací spintroniky budoucnosti.

V tranzistoru typu Spin-FET je nemagnetická vrstva, která je použita pro přenos a kontrolu spinově polarizovaných elektronů. Pro funkci tohoto zařízení musejí být spiny injektovány ze sourcu do této nemagnetické vrstvy a poté jsou přenášeny do drainu. Tyto nemagnetické vrstvy se také nazývají polokovy, protože mají velmi široké spinové difúzní délky.

Princip tranzistoru typu Spin-FET je ilustrován na následujícím obrázku, kde U_g je napětí na řídicí elektrodě. Je-li $U_g = 0$, injektované spiny, které jsou přenášeny skrz vrstvu dvoudimenzionálního elektronového plynu, se začnou přetáčet předtím, než dosáhnou drainu. Je-li $U_g \gg 0$, přetáčení elektronů je ovládáno elektrickým polem, takže příslušné spiny dosáhnou drainu se stejnou polarizací.

SPIN-FET tranzistor



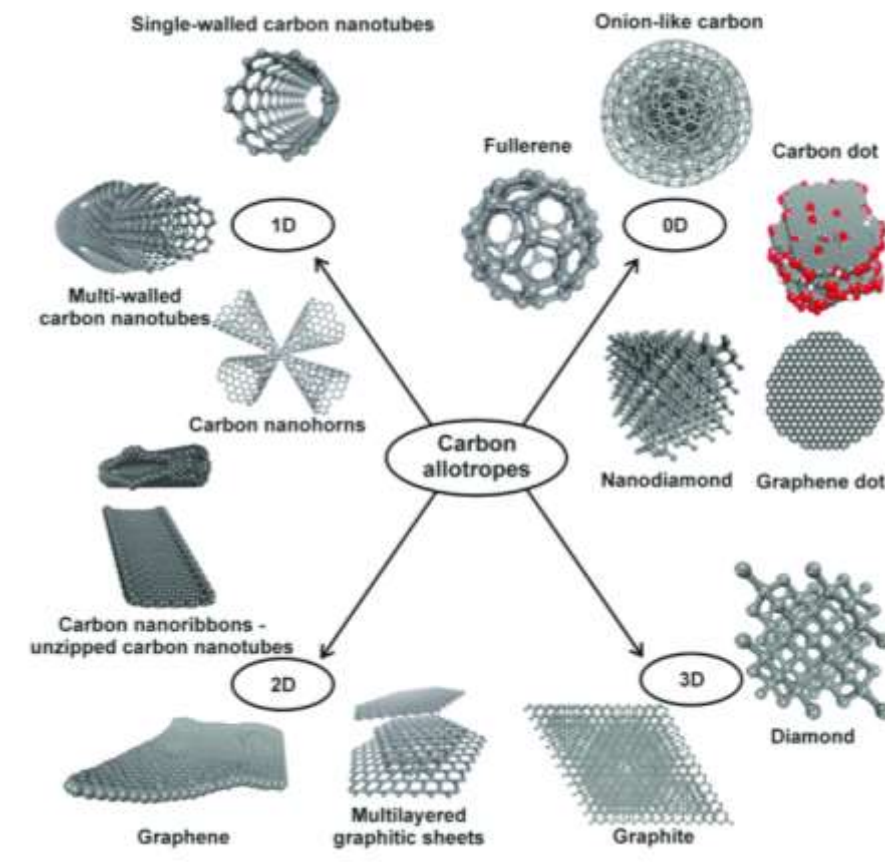
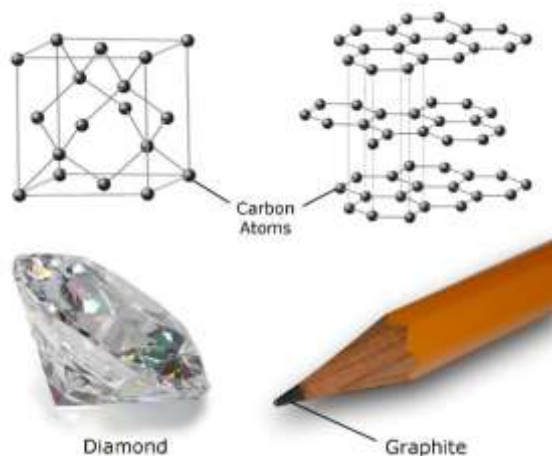
Uhlíkové nanotrubky

Uhlíkové alotropy

Uhlík je jeden ze základních materiálů používaných v elektrotechnice.

Existují různé formy uhlíků (alotropů):

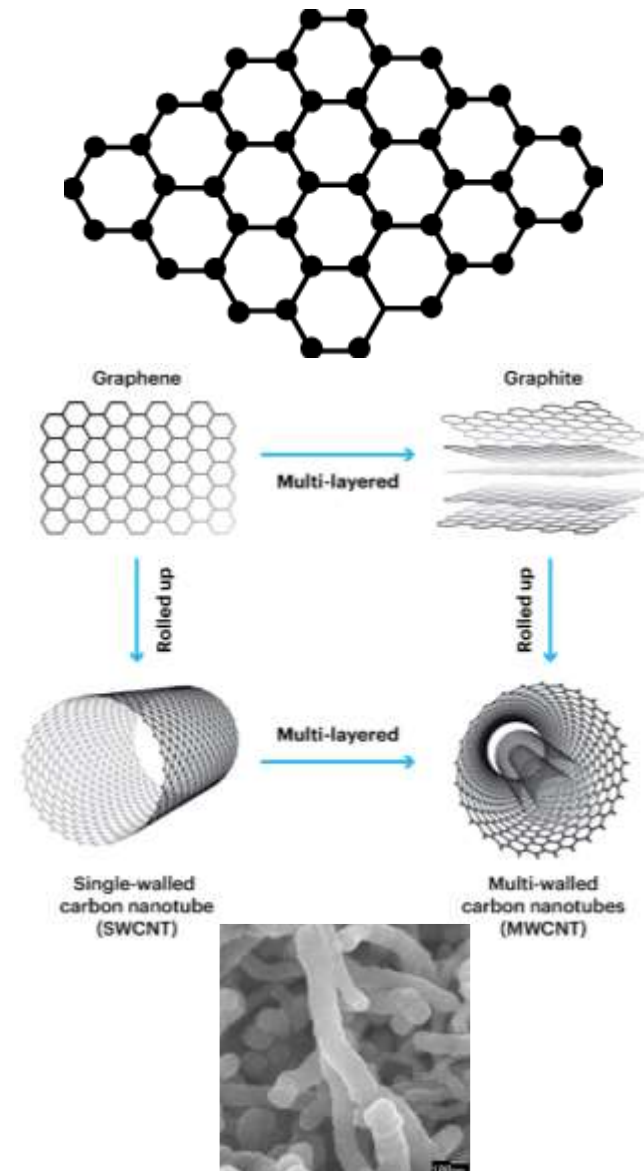
- Grafit
- Diamand
- Uhlíkové nanotrubky
- Grafen
- Fuleren



Uhlíkové nanotrubky (Carbon Nanotubes, CNT) jsou makromolekulami uhlíku a objevil je v roce 1991 Sumio Iijima a nezávisle na něm také Ústav chemické fyziky v Moskvě. Iijima při svém experimentu zkoumal „saze“ vznikající při obloukovém výboji mezi uhlíkovými elektrodami. Pod elektronovým mikroskopem ovšem pozoroval podivné útvary, které později nazval nanotrubkami.

Existují **dva typy uhlíkových nanotrubek**, přičemž prvním typem jsou tzv. **jednostěnné nanotrubky** (Single Walled CNT). Druhým typem jsou tzv. **vícetěnné nanotrubky** (Multi Walled CNT).

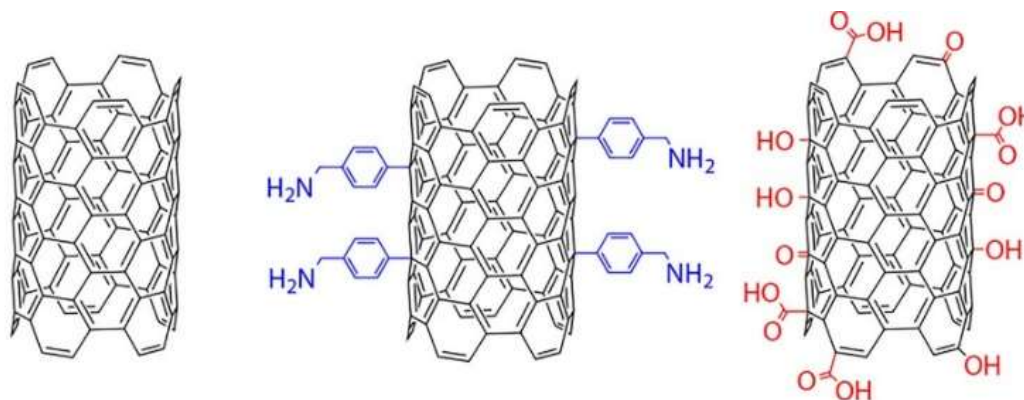
Uhlíkové nanotrubky, které mají typicky **průměr 1 až 50 nm a délku okolo 300 μm** , jsou výjimečné především díky svým **unikátním mechanickým, elektrickým a tepelným vlastnostem**, což souvisí s velkou silou vazeb v atomové rovině, z níž je nanotrubka stočena. Zajímavé je rovněž to, že některé jednostěnné nanotrubky mohou být buďto **vodiče nebo polovodiče**.



Díky svým vlastnostem jsou uhlíkové nanotrubky **ideálním konstrukčním materiálem** pro spoustu technologických aplikací, např. pro **výrobu elektronických obvodů s vysokou hustotou integrace**, jako třeba pamětí nebo procesorů. Velký Youngův modul a pevnost je rovněž předurčuje k použití v nových uhlíkových kompozitech.

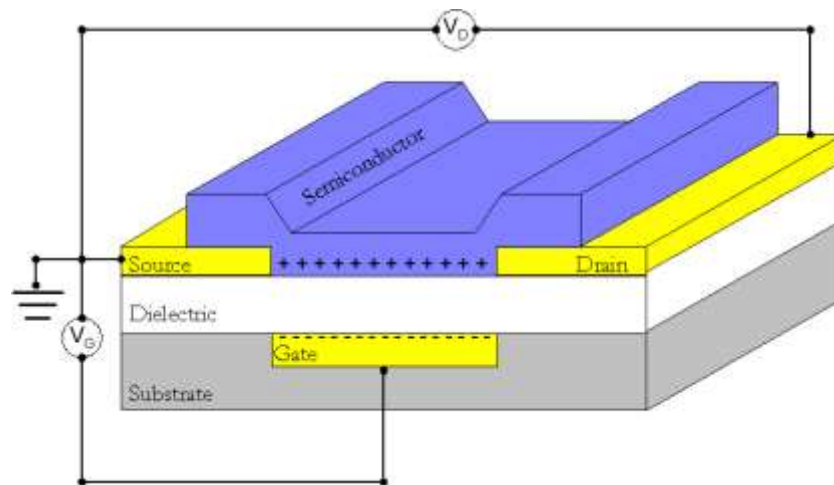
Modifikace uhlíkových nanotubic

Jedná se o chemické navázání dalších organických a anorganických prvků a sloučenin. Modifikace uhlíkových nanotubic způsobí změnu fyzikálních, chemických a elektrických vlastností. Využití lze nalézt pro konstrukci pasivních elektronických prvků, senzorů, ale také pro konstrukci tranzistorů (OFET, OECT).



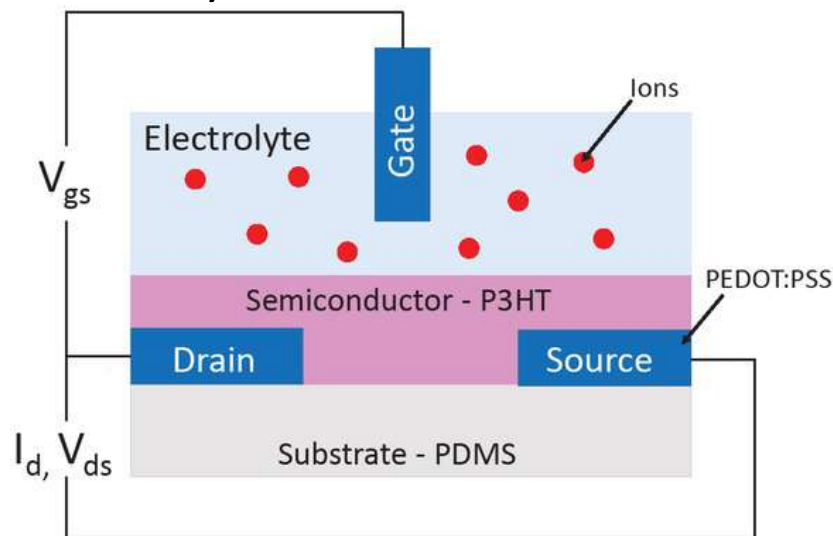
OFET

OFET (Organic field-effect transistor) tranzistor je založený na **elektrostatickém ovlivňování vodivosti prostřednictvím kapacitní vazby mezi řídicí elektrodou a polovodičovým kanálem**. OFET tranzistor obecně **využívá organického polovodiče v jeho kanálu**. Takovéto tranzistory se mohou připravovat buď vakuovým napařováním nízkomolekulárních látek, odlitím polymerů nebo mechanickým přemísťováním jedno-krystalické organické vrstvy na substrát. Jak bylo již zmíněno, tato technologie pro tranzistory se začala používat z důvodu **snížení nákladů na výrobu, realizaci velkých elektronických produktů a biologicky odbouratelných elektronických zařízení**.



OECT

OECT (Organic electrochemical transistor) je organický tranzistor založený na elektrochemickém principu, kde je řízeno dopování/dedopování polovodičového kanálu v přímém kontaktu s elektrolytem. Tranzistor má dvě elektrody source a drain, kde výplň mezi těmito elektrodami tvoří objemová vrstva elektrochemického aktivního materiálu. Tento kanál je v tzv. iontovém (přímém) kontaktu s vrstvou elektrolytu tranzistoru, která ho odděluje od řídicí elektrody gate. U OFET tranzistorů tvoří aktivní část kanálu pouze jeho povrch, kdežto u těchto elektrochemických tranzistorů je tomu naopak a tvoří ji celý objem vrstvy polovodiče v kontaktu s elektrolytem.



Kontrolní otázky

- Jaký je rozdíl mezi standardní usměrňovací diodou a PIN diodou?
- Popište strukturu a výhody IGBT tranzistoru.
- Jaký je rozdíl mezi FIN FET a MOSFET?
- Co je to FIN?
- Co využívají ke své činnosti HEMT tranzistory?
- Co jsou spintronicke součástky?
- Na jakém principu fungují MRAM?
- Vyjmenujte uhlíkové alotropy.
- Co jsou uhlíkové nanotrubic?
- Co znamená modifikace uhlíkových nanotrubic?
- Co znamená OFET?
- Co je podstatou a jaká je struktura OECT tranzistoru?

