

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

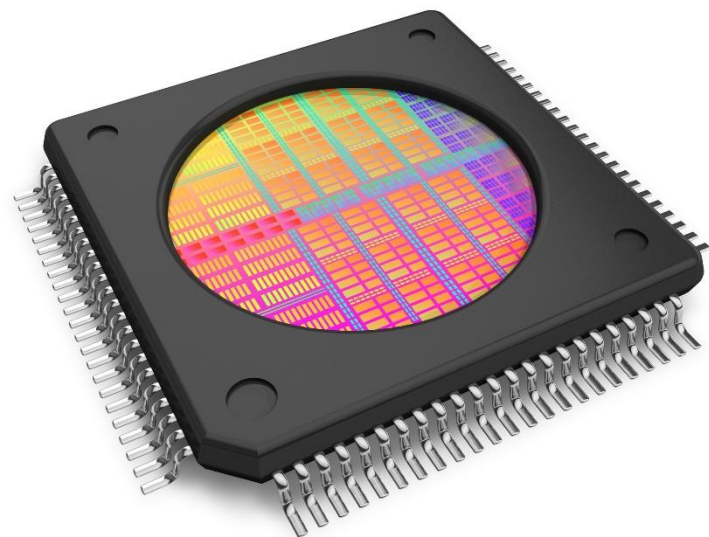
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



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

**MS
MT**
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

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



***Polovodičové materiály pro
výkonové a vysokofrekvenční
aplikace***

Přednáška 12



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

**MS
MT**
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, JAKÉ JSOU POŽADAVKY NA POLOVODIČOVÉ MATERIÁLY PRO VÝKONOVÉ APLIKACE.
- DOZVÍTE SE, JAKÉ JSOU POŽADAVKY NA POLOVODIČOVÉ MATERIÁLY PRO VYSOKOFREKVENČNÍ APLIKACE.
- ZJISTÍTE, JAKÝMI VLASTNOSTMI SE VYZNAČUJE GAN.
- DOZVÍTE SE, CO JSOU MONOKRYSTALY WURTZITOVÉHO TYPU.
- ZJISTÍTE, JAKÝMI VLASTNOSTMI SE VYZNAČUJE SiC.
- ZJISTÍTE, ZJISTÍTE, JAKÝMI VLASTNOSTMI SE VYZNAČUJE GAAs.
- ZJISTÍTE, JAKÝMI VLASTNOSTMI SE VYZNAČUJE INP.
- DOZVÍTE SE, PRO JAKÉ APLIKACE JSOU VHODNÉ GERMANIOVÉ SOUČÁSTKY.

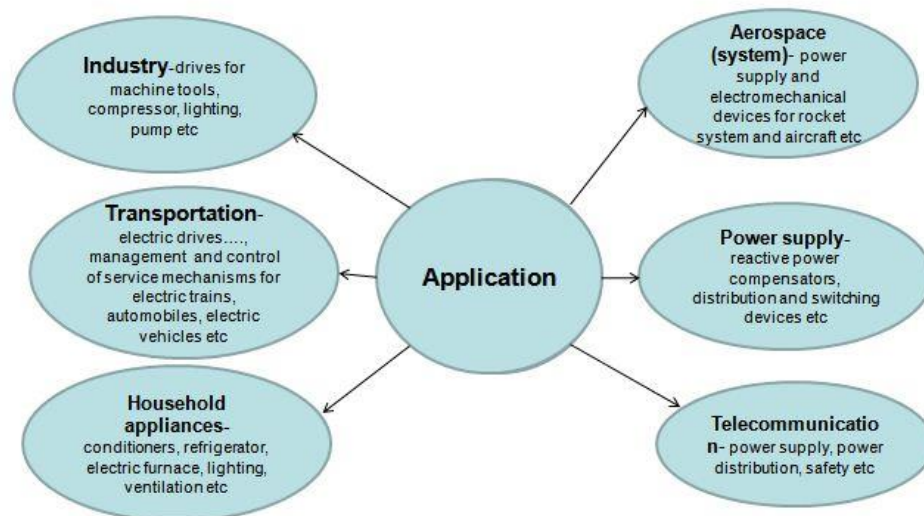
Výkonové elektronické součástky

Požadavky na výkonové elektronické součástky

Výkonová elektronika má v současné době **velké množství různých aplikací** v oblasti spotřební elektroniky, zařízení pro domácnost, napájecích zdrojů, řízení výkonu spotřebičů i v oblasti přenosu a distribuce elektrické energie.

Těžiště pokroku je v součástkové základně výkonové elektroniky, která se rozvíjí velmi rychlým tempem, zejména pak výkonové polovodičové součástky. Požadavky na výkonové polovodičové součástky:

- **Nízká cena**
- **Vysoká odolnost**
- **Vysoká spolehlivost**
- **Velké mezní proudy**
- **Velká mezní napětí**
- **Rychlé spínání** (krátké doby t_{on} a t_{off})
- **Nízké ztráty** (spínací i stejnosměrné)
- **Vysoké pracovní kmitočty** (rychlé nízkoztrátové přepínání)



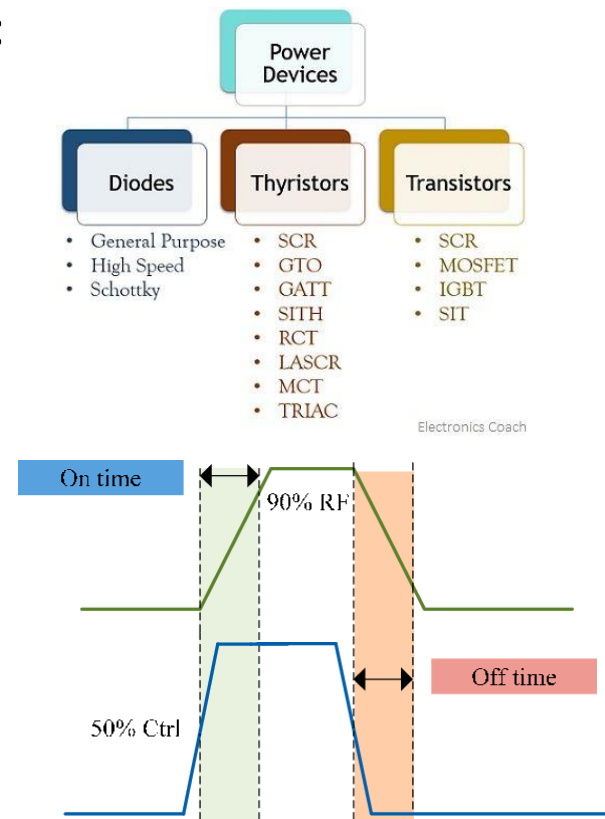
Pro výkonové součástky je typické, že se používají většinou **ve spínacím režimu**. Z obecného pohledu se výkonové polovodičové součástky dále dělí na dvě velké skupiny.

- První skupina je založena na **injekci minoritních nosičů do vysokoohmové oblasti součástky**. Hovoříme o tzv. modulaci vodivosti, která vede k malému odporu (úbytku napětí) v sepnutém stavu. Jde o diody s přechodem PN, bipolární tranzistory a tyristory. U těchto součástek je **nevýhoda**, že **před vypnutím musí být nejprve nadbytečné nosiče odstraněny, což prodlužuje vypínací časy (t_{off}) a zvyšuje výkonovou ztrátu**. U vysokovýkonových součástek s modulací vodivosti je limit 50 kHz, maximálně 200 kHz.
- Druhá skupinou jsou **unipolární součástky využívající k vedení proudu jen nosiče jednoho druhu**. Patří sem tranzistory FET a Schottkyho diody. Oproti součástkám s modulací vodivosti obvykle **dosahují menších proudových a napěťových parametrů, avšak vyššího pracovního kmitočtu**. Injekce nosičů a modulace vodivosti nenastává, takže není třeba odstraňovat velké náboje a **čas vypnutí je krátký**. Jejich výhoda se projeví při kmitočtech nad 10 kHz.

Výkonové obvody jsou významným **zdrojem elektromagnetického rušení** (vyzařování v oblasti vysokofrekvenční i v oblasti nízkofrekvenční). U spínacích součástek se výrobci snaží o relativně **pomalý pokles proudu (malá derivace)** při vypnutí, a to ze tří důvodů: z důvodu **omezení přepětí (při vypínání indukční zátěže)**, z **hlediska rušivého vyzařování (EMI)**, **zmenšuje se i ztrátový výkon**.

Požadavky na vlastnosti výkonových spínacích součástek jsou velmi vysoké a ve své podstatě jsou totožné s požadavky na tzv. ideální spínač:

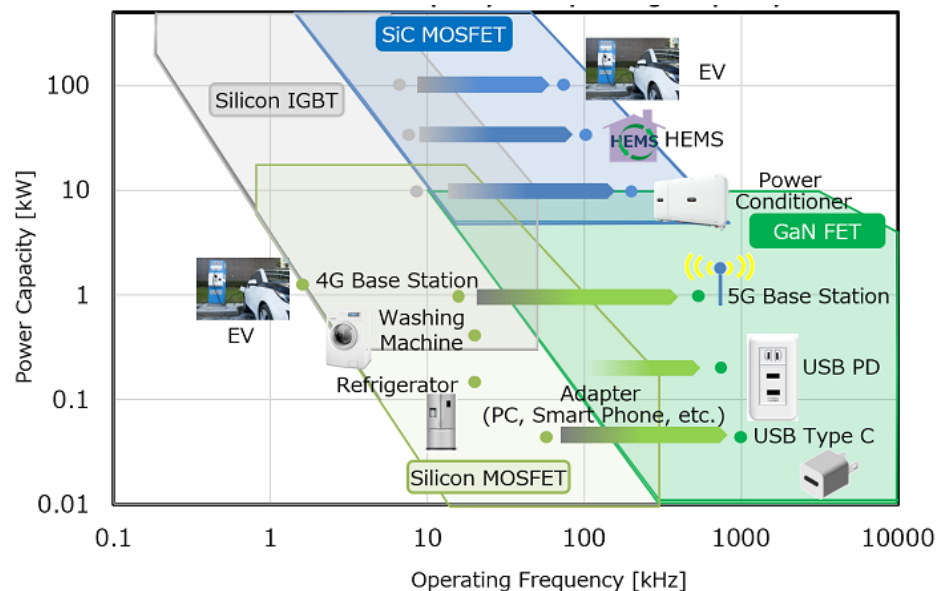
- **Nulový odpor v sepnutém stavu** (souvisí se ztrátami v sepnutém stavu).
- **Nekonečná proudová zatížitelnost v sepnutém stavu.**
- **Nekonečný odpor ve vypnutém stavu.**
- **Nekonečně velká napěťová odolnost** proti průrazu ve vypnutém stavu (tj. požadavek vysokých závěrných napětí).
- **Nulová délka doby zapnutí a vypnutí.** Tento požadavek souvisí s přepínacími ztrátami, rostoucími přímo úměrně s pracovním kmitočtem.
- **Nulový příkon řídicí elektrody.** Tento požadavek je docela dobře splněn u tranzistorů MOSFET a IGBT.



Vysokofrekvenční elektronické součástky

Vysokofrekvenční vlastnosti polovodičových součástek jsou zejména **ovlivněny pohyblivostí nosičů náboje**. Polovodičové materiály s vyšší pohyblivostí nosičů jsou pro vysokofrekvenční aplikace vhodnější z důvodu **rychlejší reakce na změny signálu** (rychlá změna mezi propustným a závěrným směrem) – rychlé odsátí nosičů z vodivého kanálu.

Dále **materiály musí být vhodné pro výrobní technologie umožňující snížení parazitních kapacit** – přesné motivy polovodičových struktur.



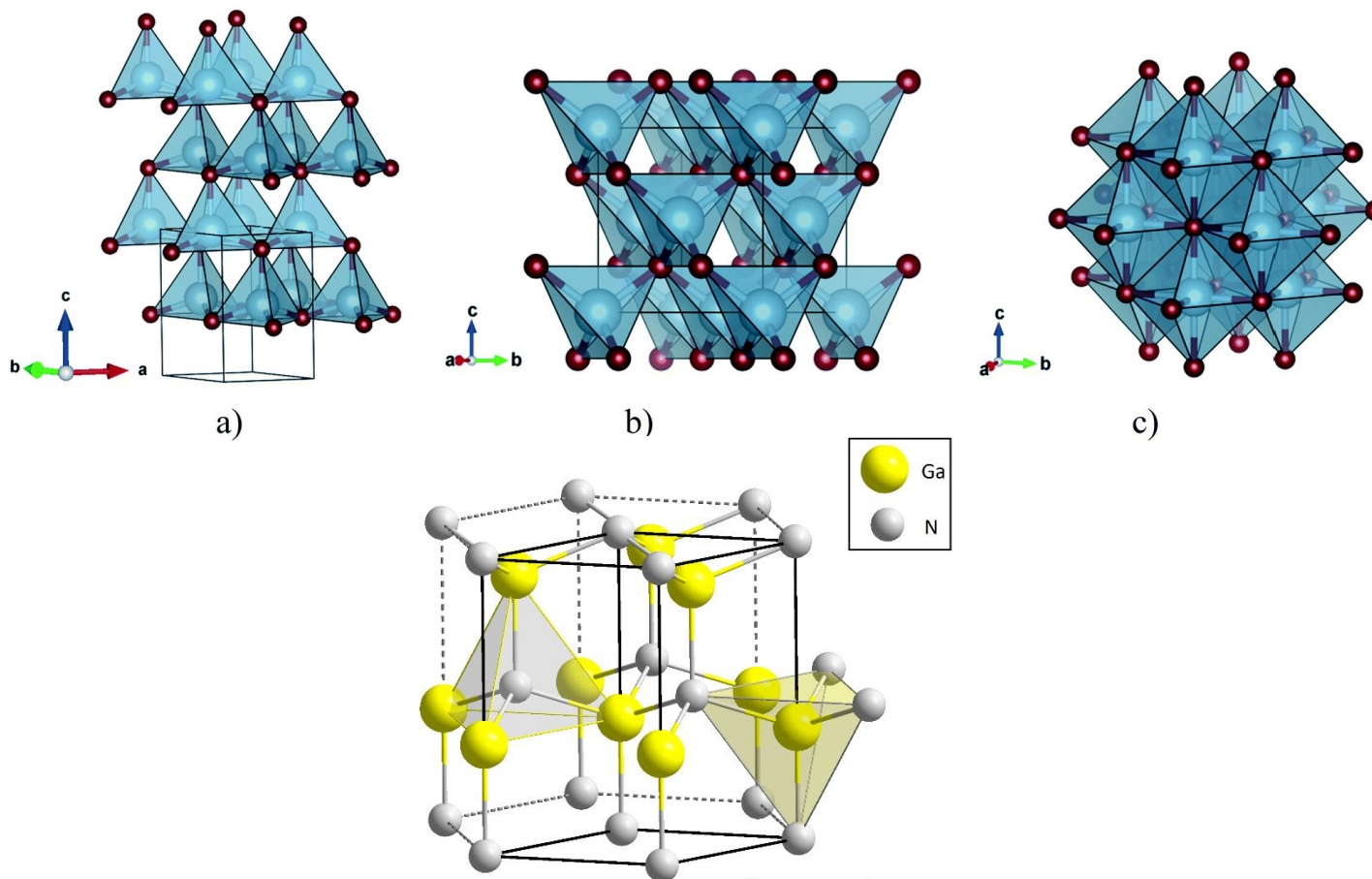
GaN

Nitridové polovodiče jsou dnes hned po křemíku **druhým nejrozšířenějším polovodičovým materiálem**. Nalezneme je např. v barevných displejích mobilních telefonů i notebooků, v diodovém osvětlení, ve velkoplošných obrazovkách a LED televizích, neobešel by se bez nich současný automobilový průmysl, využívány jsou v rozvodné soustavě, v jaderných elektrárnách nebo v kosmu, protože **jsou odolné proti kosmickému záření**. Nitridové součástky **spolehlivě pracují také za vysokých teplot**, odpadá tedy u mnoha aplikací nutnost náročného chlazení. Nitridové struktury jsou vhodné také **pro mikrovlnné aplikace, mobilní sítě a radary**.

GaN jsou monokrystaly wurtzitového typu, v nichž se kombinují atomy dusíku s atomy III. skupiny, čímž můžeme vytvořit celou škálu nitridových polovodičů s různými vlastnostmi např. GaN, InN, AlGaN, InGaN atd. Vhodným **vrstvením** takových polovodičů **vzniká funkční heterostruktura s požadovanými vlastnostmi**. Dostatečně velké monokrystaly GaN nelze prozatím připravovat, nitridové heterostruktury se proto deponují na monokrystalických podložkách jiných materiálů (nejčastěji na safírových podložkách).

Monokrystaly wurtzitového typu

Krystalová struktura wurtzitového typu, pojmenovaná podle minerálu wurtzitu. Jedná se o krystalovou strukturu pro různé typy binárních sloučeniny. Je to příklad hexagonálního krystalového systému.



Vlastnosti GaN

Prvky GaN mají v porovnání s křemíkovými strukturami nejen mnohem **širší zakázaný pás** ($E_g = 3,4 \text{ eV}$), ale vykazují rovněž **vyšší průrazné napětí** (až 700 V), **menší rozměry**, které oproti křemíkovým MOSFET či IGBT. **Umožňují omezit přítomné parazitní kapacity**, tzn. **vyšší rychlosti spínání**.

Chemická skupina nitridů III. skupiny dodává několik důležitých **mechanických vlastností** jako například **tvrdost** či **odolnost vůči vysokým teplotám**. Nitridy mají většinou široký zakázaný pás, který je spojen s **malými dielektrickými konstantami** a **vysokou tepelnou vodivostí**. Navíc GaN je **odolný vůči chemickému leptání**, což tento typ polovodiče předurčuje pro tvorbu **elektronických součástí do chemicky agresivních prostředí**.

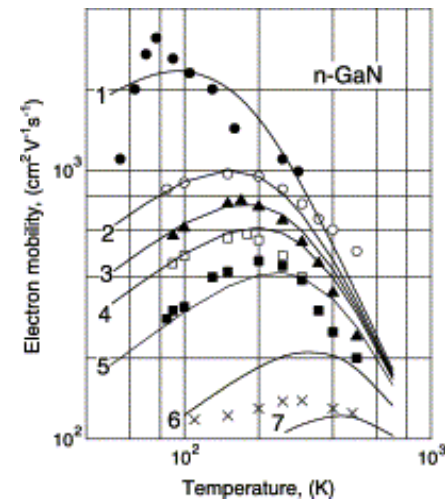
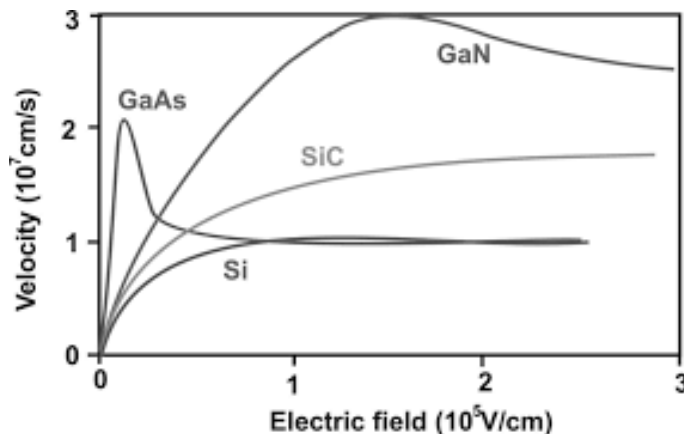
Z **optoelektronických vlastností** jsou důležité aplikace pro **LED diod (modrá, bílá, zelená)** díky širokému zakázanému pásu s možností jeho posunu legováním AlN nebo InN, či dopováním Mg nebo Si. Schopnost dopování umožňuje formaci epitaxního p-n přechodu, který vede k **vysoce efektivní zářivé rekombinaci elektronů a děr** a k vysoké účinnosti a stabilitě.

Aplikace GaN v elektronice a polovodičovém průmyslu je **podmíněna přípravou tenkých (10^{-2} - 10^0 μm) monokrystalických, vysoce čistých nebo záměrně dopovaných vrstev** vodivosti typu n a p. **Vrstvením** těchto jednotek vhodné tloušťky, typu vodivosti a šíře zakázaného pásu vznikají **struktury požadovaných elektrických a optických parametrů**. Obecný postup spočívá ve výběru vhodné, ve většině případů monokrystalické podložky, na které jsou různými technologickými postupy nanášeny tenké vrstvy GaN. Pro většinu III-V vrstev včetně GaN se v praxi zatím **využívá růstu na substrátech safíru a SiC**, které jsou však drahé. Existují i možnosti růstu polykrystalického GaN na levnějších a větších podložkách jako jsou křemík či sklo.

Parametr	Si	GaN	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC	GaAs	InP	Ge
Šířka zakázaného pásu (eV)	1,11	3,4	2,2	3,26	3,06	1,45	1,34	0,67
Průrazové pole (MV/cm)	0,2	3,5	1,2	3	2,4	0,4	0,5	0,5
Pohyblivost elektronů ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	1400	2000	900	1000	600	8500	54 000	3900
Pohyblivost děr ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	450	150	40	115	50	400	150	1900
Relativní permitivita (-)	12	8,9	9,7	10	9,6	12,9	12,4	16
Index lomu (-)	3,44	2,4	2,55	2,6	2,58	3,9	3,6	4
Teplota tavení ($^{\circ}\text{C}$)	1415	800	2700	2700	2700	1238	1060	938
Tepelná vodivost ($\text{Wcm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	1,5	1,3	350	350	350	55	68	60

V polovodičovém průmyslu je populární díky **vysoké elektronové mobilitě** porovnatelné se křemíkem, **tříkrát větším zakázaným pásem** oproti křemíku a taky **vyšší provozní teplotou** a **vyšší odolností vůči defektům**. Je to **mechanicky stabilní materiál** s **velkou tepelnou kapacitou** a **tepelnou vodivostí**. GaN je využíván v **optoelektronice**, **senzorech**, **tranzistorech** s **velkou elektronovou mobilitou** a **mikromechanických zařízeních** založených na GaN.

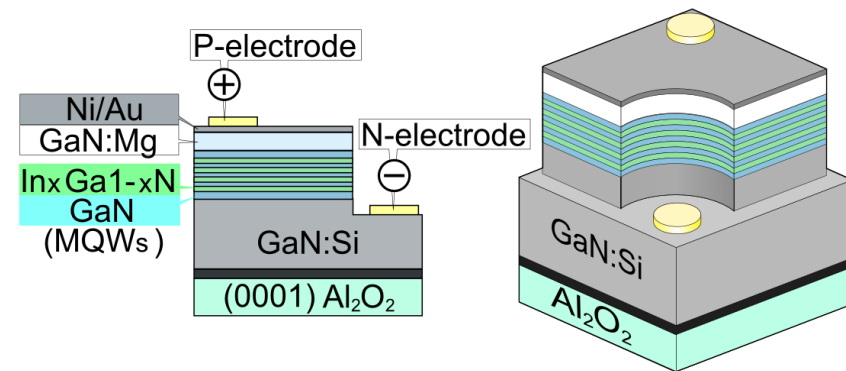
Na první pohled se GaN jeví jako naprosto **ideální materiál** pro polovodičový průmysl. Nicméně jeho **nevýhodou** může být **nedostatek substrátů vhodných pro jeho růst**. Růst realizovaný na **levných křemíkových površích** vykazuje **horší kvalitu GaN vrstev**. V tomto ohledu se zdá být **grafen** jako dobrý **potenciální substrát pro růst GaN**. Grafen je **opticky transparentní**, proto může být ve spojení s GaN **slibným materiálem pro výrobu LED**.



Aplikace GaN

Používá se pro **výrobu výkonových a vysokofrekvenčních součástek**, např. pro vysoce svítivé modré a fialové LED diody a laserové diody. Pro jeho **radiační odolnost** se také využívá pro výrobu **solárních článků pro satelity**. Z důvodu velké šířky zakázaného pásu mohou GaN transistory **pracovat při vyšších teplotách a vyšších napětích** než např. GaAs. Proto jsou **ideální pro výkonové zesilovače v mikrovlnné oblasti**.

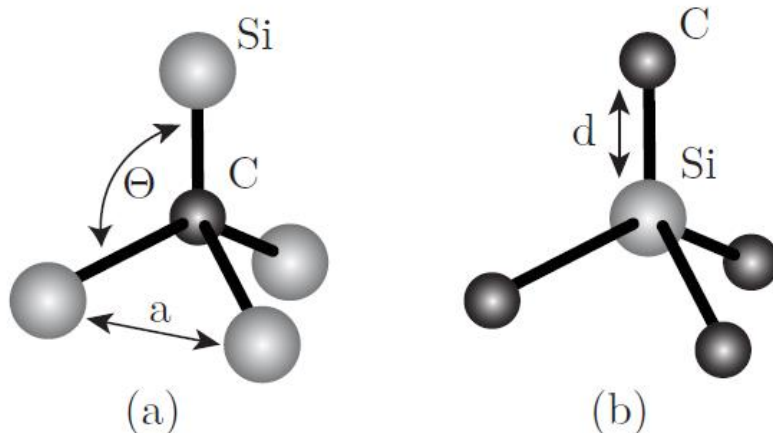
- **GaN laserové diody** – čtení Blu-ray disků.
- **Ternární sloučeniny** InGaN nebo AlGaIn, které mohou ladit svoji šířku zakázaného pásu změnou obsahu In nebo Al v GaN umožňují výrobu **LED diod od červené po modrou**.
- **Bílé LED diody**.
- **GaN HEMT** – využití v bezdrátových výkonových aplikacích.
- **GaN dopovaný Mn** je slibný magnetický polovodič vhodný pro spintroniku.
- GaN se dá připravit **ve formě nanotrubiček s využitím v nanoelektronice, optoelektronice a biochemických senzorech**.



SiC

Účinnost elektronických zařízení, zejména těch, které pracují v **extrémních podmínkách** (vysoké teploty, agresivní prostředí, ionizující záření), významně **závisí na spolehlivosti součástek** a dlouhodobé činnosti v těchto drsných prostředích. **Karbid křemíku (SiC)** je jedním z materiálů, na jehož základě lze vyrábět elektronická zařízení splňující tyto požadavky. Tyto vynikající vlastnosti materiálu existují díky **vysoké pevnosti vazby Si–C**.

SiC je jedinou sloučeninou tvořenou prvky IV skupiny křemíkem a uhlíkem, s přesnou stechiometrií $\text{Si}_{50}\text{C}_{50}$. Chemické vazby jsou většinou **kovalentní (88%) s obsahem iontové vazby 12 %**, kde Si je kladně a C - záporně nabitý iont.



Základní stavební blok krystalu SiC:
Čtyřstěny obsahující (a) jeden C atom a čtyři Si atomy a (b) jeden Si atom a čtyři C atomy.
 $a = 0,308 \text{ nm}$, $d = 0,189 \text{ nm}$ a $\Theta = 109^\circ$

SiC se vyskytuje v jednorozměrném polymorfizmu nazývaném polytypismus. Polytypy SiC mají totožné rovinné uspořádání atomu Si a C. Rozdíl mezi polytypy se projevuje v narušení pravidelného kladení podobných rovin, výsledkem toho je materiál, který má různou krystalickou strukturu (polytyp) a je složený ze stejných atomových uspořádání. V dnešní době je objeveno více než 200 polytypů SiC. Z tohoto velkého počtu polytypů existují jenom tři krystalické struktury zajímavé z technologického hlediska pro polovodičové součástky: kubická 3C, hexagonální 4H a 6H a rhombohedrální 15R.

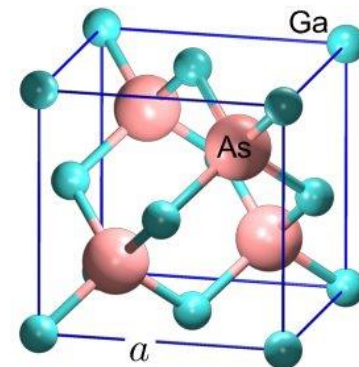
Karbid křemíku se tradičně **používá jako brusný materiál** díky svým **výborným mechanickým vlastnostem: vysoká tvrdost** ($2,8 \cdot 10^3 \text{ kg/mm}^2$), **vysoká oxidace a odolnost proti opotřebení**. SiC je také velmi dobře známý pro svou **chemickou odolnost vůči kyselinám a zásadám** při pokojové teplotě. Tato chemická inertnost může být vysvětlená velmi silnou vazbou Si – C. Další důležitou fyzikální vlastností SiC je jeho **vysoká tepelná vodivost** ($3,5 - 5 \text{ W/cmK}$), která je téměř nezávislá na polytypu, ale je více závislá na obsahu různých mikrodefektů nebo nečistot.

Je známo, že **každý polytyp SiC** vykazuje **odlišné elektrické a optické vlastnosti**. Jejich **šířka zakázaného pásu** se pohybuje **od 2,3 eV pro 3C do 3,2 eV pro 4H**. Vzhledem k takovému zakázanému pásu, SiC **nevykazuje výraznou změnu koncentrace intrinzických nosičů náboje v širokém rozsahu teplot** a dělá SiC součástky **relativně necitlivými k proudově–napěťovým fluktuacím**.

Parametr	Si	GaN	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC	GaAs	InP	Ge
Šířka zakázaného pásu (eV)	1,11	3,4	2,2	3,26	3,06	1,45	1,34	0,67
Průrazové pole (MV/cm)	0,2	3,5	1,2	3	2,4	0,4	0,5	0,5
Pohyblivost elektronů ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	1400	2000	900	1000	600	8500	54 000	3900
Pohyblivost děr ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	450	150	40	115	50	400	150	1900
Relativní permitivita (-)	12	8,9	9,7	10	9,6	12,9	12,4	16
Index lomu (-)	3,44	2,4	2,55	2,6	2,58	3,9	3,6	4
Teplota tavení ($^{\circ}\text{C}$)	1415	800	2700	2700	2700	1238	1060	938
Tepelná vodivost ($\text{Wcm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	1,5	1,3	350	350	350	55	68	60

GaAs

GaAs má v porovnání s Si řadu unikátní vlastností - **vyšší saturační elektronovou rychlost a vyšší elektronovou pohyblivost**, což tento materiál předurčuje k výrobě **vysokofrekvenčních transistorů (až do 250 GHz)**. V důsledku **větší šířky zakázaného pásu** je **méně citlivý na okolní teplotu**. Dále mají součástky **nižší šum** zvláště **při vyšších frekvencích** díky vyšší elektronové pohyblivosti. Proto se tyto součástky uplatňují hlavně při výrobě mobilních telefonů, v satelitní komunikaci, mikrovlnné dálkové komunikaci a vysokofrekvenčních radarových systémech. Na bázi GaAs jsou vyráběny **Gunnovy diody** jako mikrovlnné generátory. Díky větší šířce zakázaného pásu má GaAs **větší odolnost proti radiačnímu poškození**, proto se hojně využívá v **satelitní a raketové elektronice a pro výkonové aplikace**. V optoelektronických aplikacích je výhodou přímý zakázaný pás, kdy se ze směsného materiálu $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ vyrábějí LED a lasery pro viditelnou oblast, superrychlé transistory HEMT (High electron mobility transistor) a další kvantové struktury.



Nevýhody GaAs oproti Si

Křemík je jeden z nejrozšířenějších prvků na světě a jeho výroba je velmi dobře zvládnuta a můžeme ho vypěstovat ve velkých plochách a objemech. Křemík je teplotně i mechanicky extrémně stabilní. **Si je základní, jednoduchý prvek**, kdežto **GaAs je směsná sloučenina**. Si je možné vypěstovat skoro bez defektů s nízkou koncentrací cizích příměsí a dovoluje extrémní integraci oproti GaAs. Extrémní výhodou je existence excelentního izolantu SiO_2 . **GaAs nemá stabilní oxid** a ani jinou vlastní sloučeninu. Výhodou GaAs je mnohem vyšší děrová pohyblivost, která umožňuje výrobu rychlých FET transistorů, které jsou požadovány v CMOS logických strukturách. **CMOS struktury na bázi GaAs mají ale daleko vyšší spotřebu.**

Parametr	Si	GaN	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC	GaAs	InP	Ge
Šířka zakázaného pásu (eV)	1,11	3,4	2,2	3,26	3,06	1,45	1,34	0,67
Průrazové pole (MV/cm)	0,2	3,5	1,2	3	2,4	0,4	0,5	0,5
Pohyblivost elektronů ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	1400	2000	900	1000	600	8500	54 000	3900
Pohyblivost děr ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	450	150	40	115	50	400	150	1900
Relativní permitivita (-)	12	8,9	9,7	10	9,6	12,9	12,4	16
Index lomu (-)	3,44	2,4	2,55	2,6	2,58	3,9	3,6	4
Teplota tavení ($^{\circ}\text{C}$)	1415	800	2700	2700	2700	1238	1060	938
Tepelná vodivost ($\text{Wcm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	1,5	1,3	350	350	350	55	68	60

Aplikace GaAs

Solární články

První solární články na bázi heterostruktur GaAs byly vyrobeny Alferovem v roce 1970 v Sovětském svazu. Již v roce 1980 jejich účinnost překročila účinnosti Si solárních článků a dnes jsou tyto články nejúčinnější na světě. Heterostrukтуры na bázi GaAs, Ge a InGaP dnes dosahují účinnosti vyšší než 35 %. Používají se hlavně satelitních aplikacích.



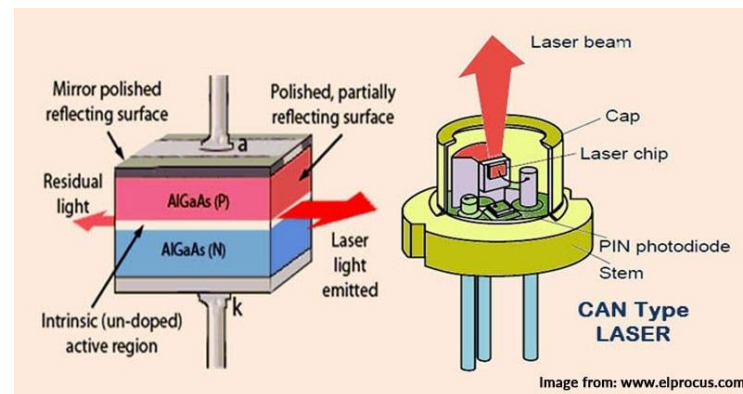
Detektory

Na bázi heterostruktur $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ jsou vyráběny vysoce citlivé detektory pro střední oblast infračerveného záření (QWIP - quantum well infrared photodetector). GaAs diody se využívají k detekci rtg záření.

Zdroje záření

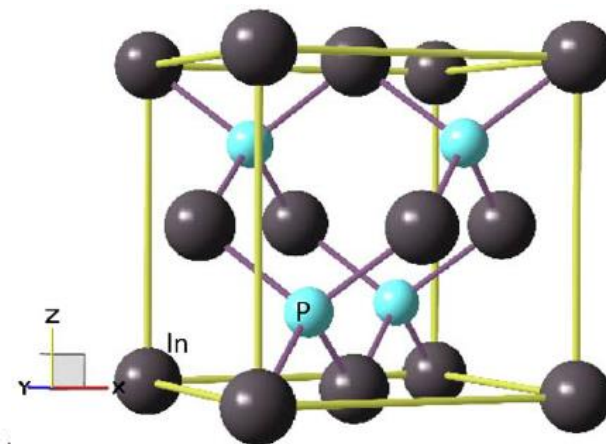
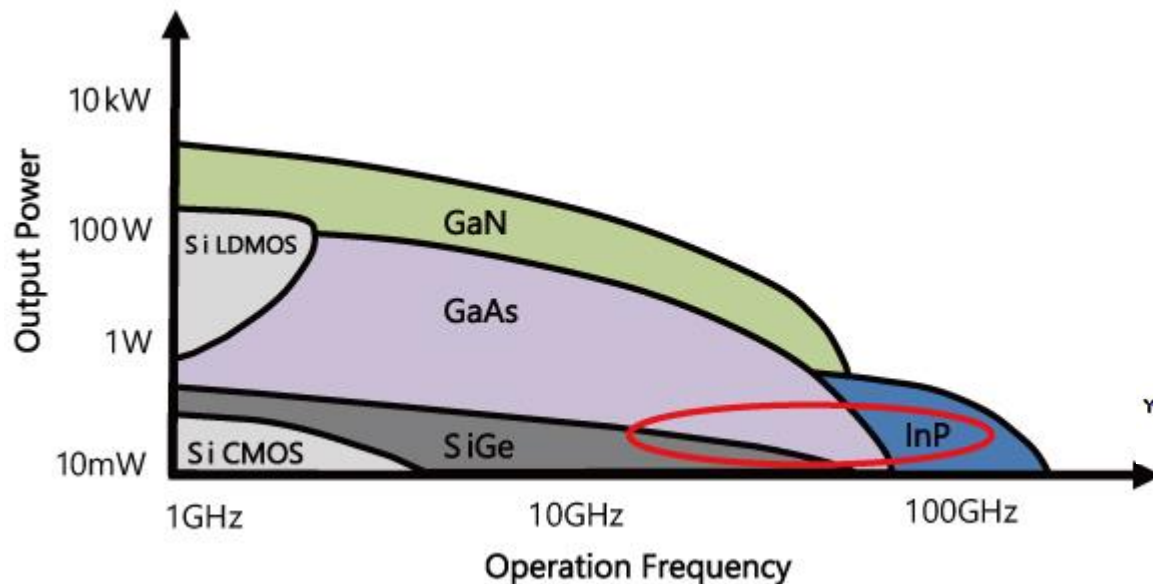
GaAs je používán pro výrobu laserových diod pro oblast blízkého infračerveného záření.

GaMnAs - spintronika



InP

InP je používán ve **vysokovýkonové a vysokofrekvenční elektronice**, pro jeho **vysokou pohyblivost elektronů** ve srovnání s Si a GaAs. Jedná se o přímý polovodič s **šířkou zakázaného pásu $E_g = 1,34$ eV** při 300K. Používá se k výrobě LED, laserových diod, **mikrovlnných transistorů a Gunnových diod** a jako substrát pro epitaxní růst InGaAs a GaInAsP. Tyto ternární a quaternární sloučeniny se používají k přípravě **zdrojů i detektorů infračerveného záření** ve vlnových délkách vhodných pro přenos optickými vlákny (1,3 μm a 1,55 μm). V těchto vlnových délkách mají vlákna nejmenší útlum a disperzi.



Ge

Anorganické germanium je nezbytný prvek podobně jako železo nebo vápník. Je **obsaženo v malém množství v mnoha rostlinách a v zemské kůře**. Germanium je **v zemské kůře značně vzácným prvkem**. V **horninách** se vyskytuje vždy pouze jako **příměs v rudách zinku a stříbra**, ale bývá obsaženo jako **stopová příměs v mnoha ložiscích uhlí**. V roce 1948 byl z germania vyroben první tranzistor a integrovaný obvod a později celé počítačové čipy.

Germanium je křehká, tmavě šedá látka krystalizující v kubické soustavě (podobně jako diamant). V **pevném skupenství** se germanium chová jako **polovodič**, a to jak v krystalické tak v amorfnní fázi. Naproti tomu **v kapalném skupenství** je germanium **kovem**.

Hlavními zdroji výroby germania jsou však **popílký vznikající při hutním zpracování zinečnatých rud při výrobě zinku a popely po spalování některých druhů uhlí**. Vyrobené kovové germanium obsahuje 5-10 % nečistot a je nevhodné pro účely polovodičové výroby a výroby germániových skel. Proto se dále čistí zonálním čištěním.



Aplikace Ge

Germanium bylo **nahrazeno křemíkem**, jež se **vyskytuje v přírodě v daleko větší míře**. Germanium je však i nadále používáno **pro speciální polovodičové diody**.

Germanium se používá v průmyslové výrobě polovodičů hlavně jako **germanid křemíku (SiGe)** pro **výrobu integrovaných obvodů s vysokou rychlostí přenosu signálu**, v obvodech reagující na elektromagnetické vlnění **v infračervené oblasti spektra** a **v radarové technice**.

Ultračisté germanium se využívá jako **detektor rtg a gama záření**.

Důležité uplatnění má germanium **při výrobě světlovodné optiky**, protože jeho přítomnost ve sklech a v materiálech optických vláken podstatným způsobem **zvyšuje index lomu materiálu**. Zároveň je Ge **průhledné pro infračervené záření**. V důsledku vysokého indexu lomu (4.0) musí však být všechna optika opatřena antireflexními vrstvami na bázi diamantu.

Slitiny germania mají zajímavé vlastnosti - **slitina se zlatem** (tzv. klenotnická pájka) se **při chladnutí roztahuje**, slitina s mědí a zlatem je vhodná v zubním lékařství.



Kontrolní otázky

- Definujte požadavky na polovodičové materiály určené pro výkonové aplikace.
- Definujte požadavky na polovodičové materiály určené pro vysokofrekvenční aplikace.
- Popište výhody, nevýhody a aplikace materiálu GaN.
- Popište výhody, nevýhody a aplikace materiálu SiC.
- Popište výhody, nevýhody a aplikace materiálu GaAs.
- Popište výhody, nevýhody a aplikace materiálu InP.
- Popište výhody, nevýhody a aplikace materiálu Ge.

