ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

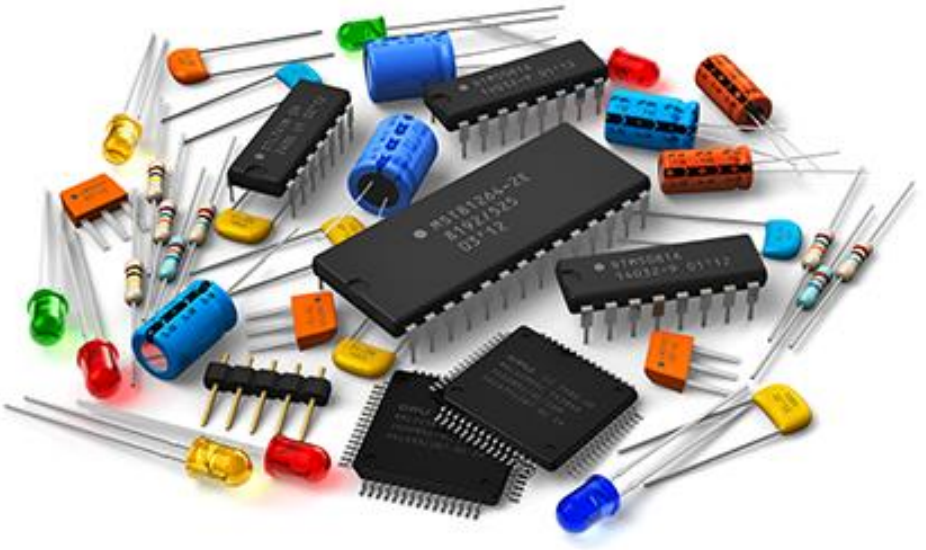
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

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

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Fyzikální elektronika

KET/FYE



Výkonové elektronické součástky 2

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, jaké jsou nejsilnější polovodičové součástky
- Zjistíte, jak vypadá vysoce výkonný vypínatelný tyristor
- Dozvíte se, jaké další polovodiče se používají
- Zjistíte jak se liší SiC MOSFET od křemíkových součástek
- Dozvíte se co je to 2D-gass
- Uvidíte jak vypadají výkonové součástky zevnitř

Výkonové tyristory

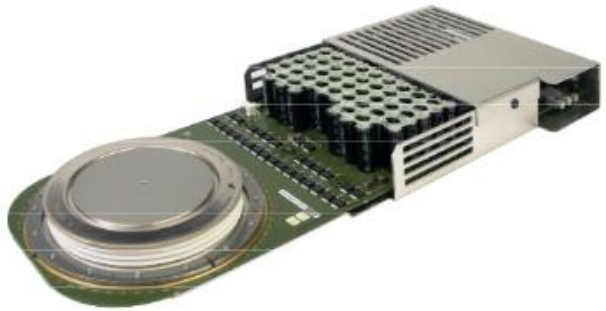
Základní vlastnosti

- Jednoduchá struktura bez jemných motivů – na trhu od 60. let
- Použití v aplikacích s nízkými spínacími frekvencemi
- "Nejsilnější" výkonnové součástky → konstrukce měničů až GW
- Verze zpětně blokující i bez schopnoti zpětně blokovat
- Nevypínatelné (SCR – silicone controlled rectifier)
- Vypínatelné – **GTO** (Gate Turn-off thyristor)
  – **IGCT** (Integrated Gate Commutated Thyristor)



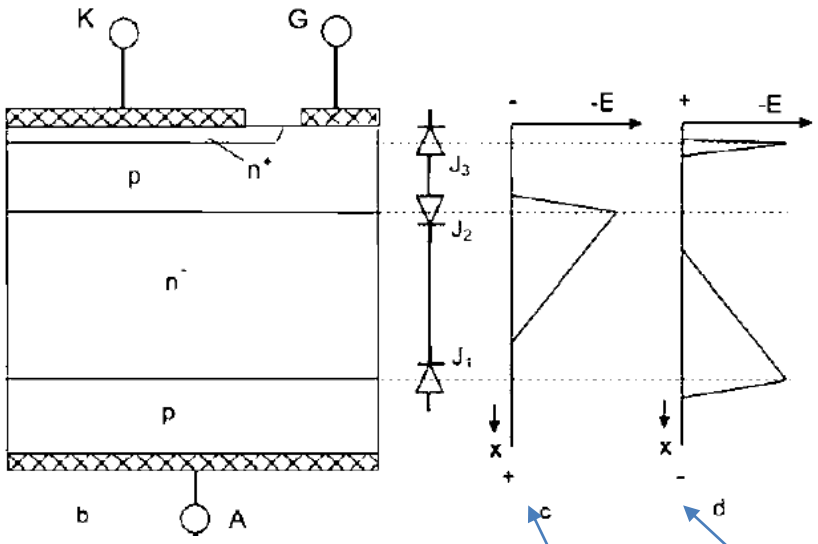
SCR *5STP 45Y8500*
8500V/4450A
Špičk. Proud 90kA
Dia. 192mm x 35mm

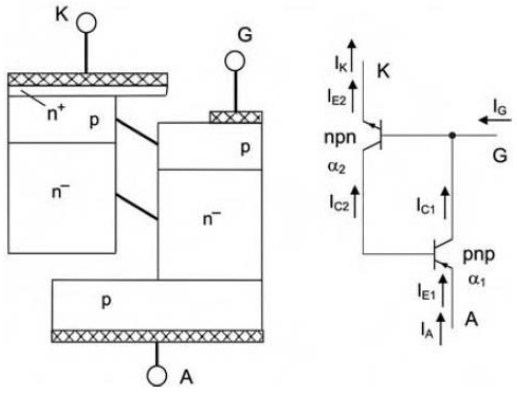
IGCT 5SHY 42L6500
6500V/3800A
Špičk. Proud 26kA
439x173x41mm

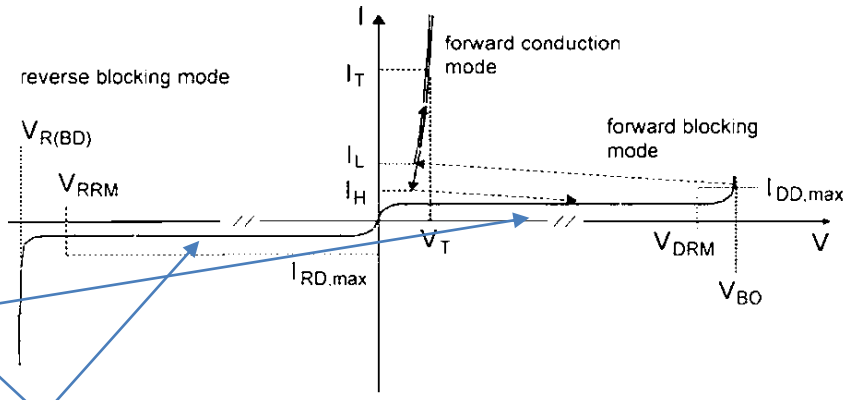


Nevypínatelný tyristor

struktura a rozložení E





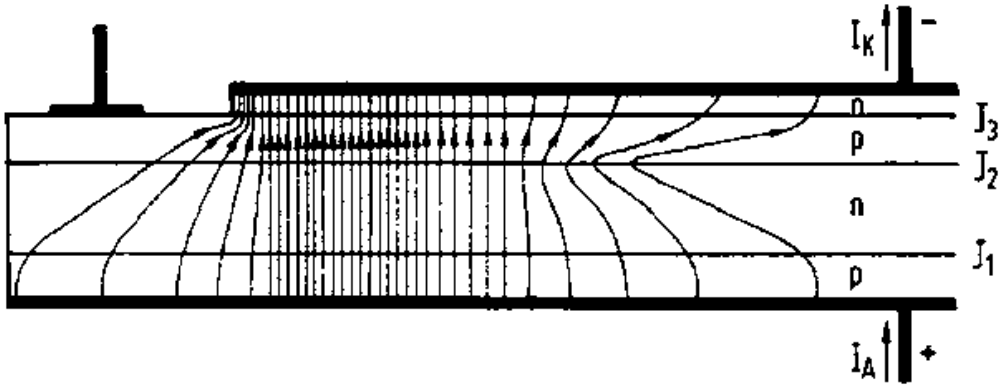


dopředně blokující

zpětně blokující

Sepnutí tyristoru

- V okamžiku po sepnutí pouze malá část tyristoru v okolí G vede
- „Sepnutá“ oblast se šíří od D rychlostí 50 µm-100 µm/µs → výrazné omezení spínatelného di/dt (vysoká lokální J)
- Rychlé tyristory (nižší tau), vysoké blokovací napětí (šířka w_b) dále snižují rychlost šíření k 10 µm/µs

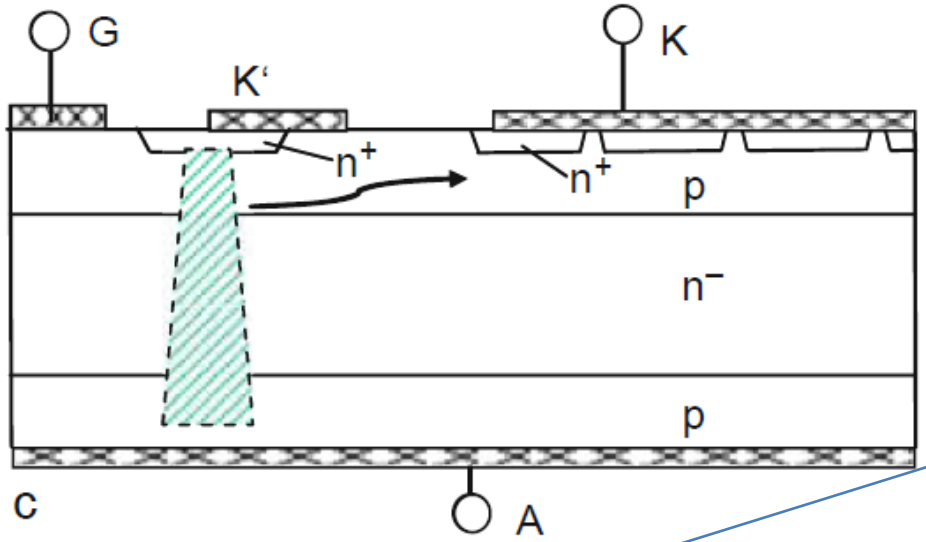


Rozložení proudu okamžitě po sepnutí tyristoru

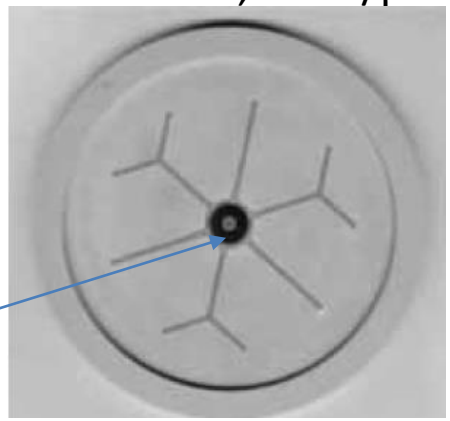
- Povolená strmost pomalých SCR (stř. síť 50/60 Hz) … 100-150 A/µs

Sepnutí tyristoru

- Vyšší di/dt → zvětšení oblasti hradla → i_G roste…
- **Zesilovací hradlo** (amplifying gate) – G spouští pomocný tyristor K', jeho celkový proud je hradlovým proudem hlavního tyristoru K – lze řetězit



8000V/3570A
dia. 119mm, 300A/µs

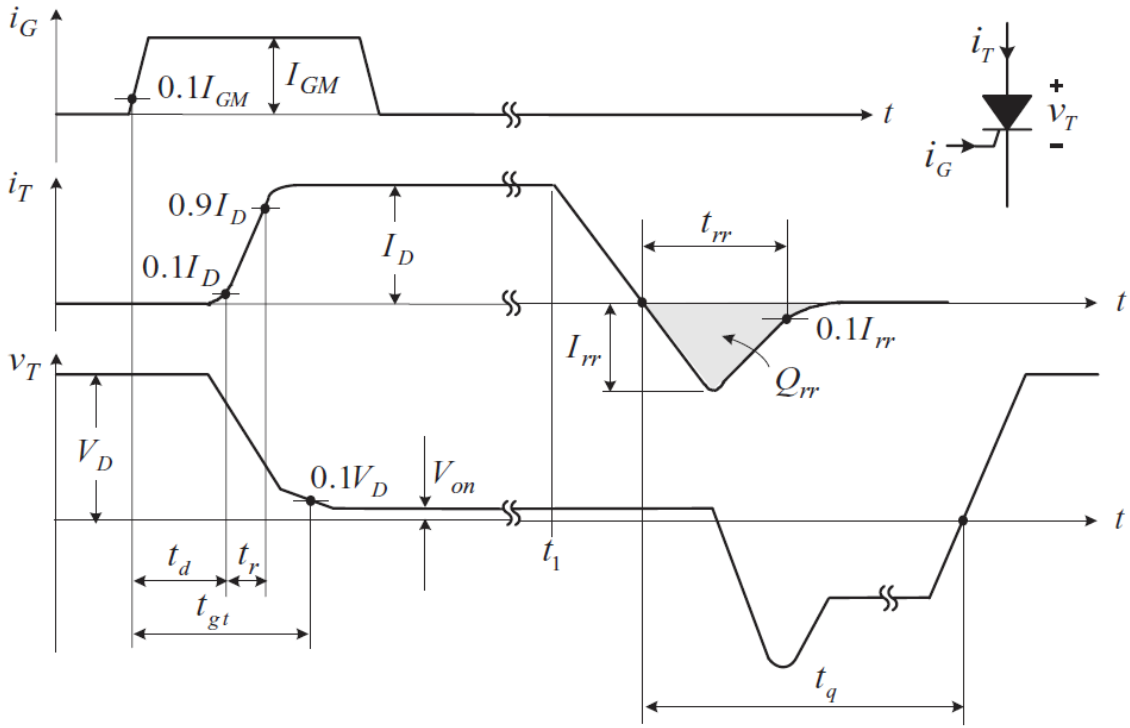


- Možnost spínání světlem

Vypnutí a zotavovací děj

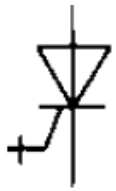
- Vypínání při průchodu proudu nulou
- Proces odstranění vloženého náboje Q_f ~ PIN dioda

- t_q - vypínací čas,
- Napětí V_D by nemělo být aplikováno v $t < t_q$
- dV_D/dt omezené



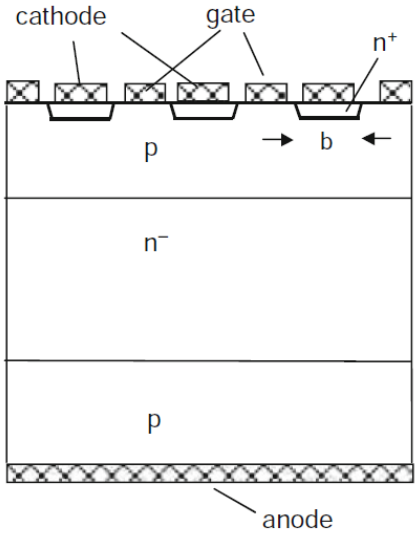
- T_q v řádu stovek µs-ms
  (FT1500AU-240 12kV/1.5kA… tq=1.2ms)

GTO tyristor (Gate Turn-off tyristor)



- 80. léta, později z velké části nahrazeno IGBT
- Vypnutí proudovým pulzem $-i_G$
- Vypínací proudový zisk β_{off} (typ. 3-5)
- Vyšší propustné napětí než SCR
- Vysoké vypínací proudy → velká plocha hradlové elektrody
- Katoda – úzké segmenty (100µm-300µm) v koncentrických kruzích

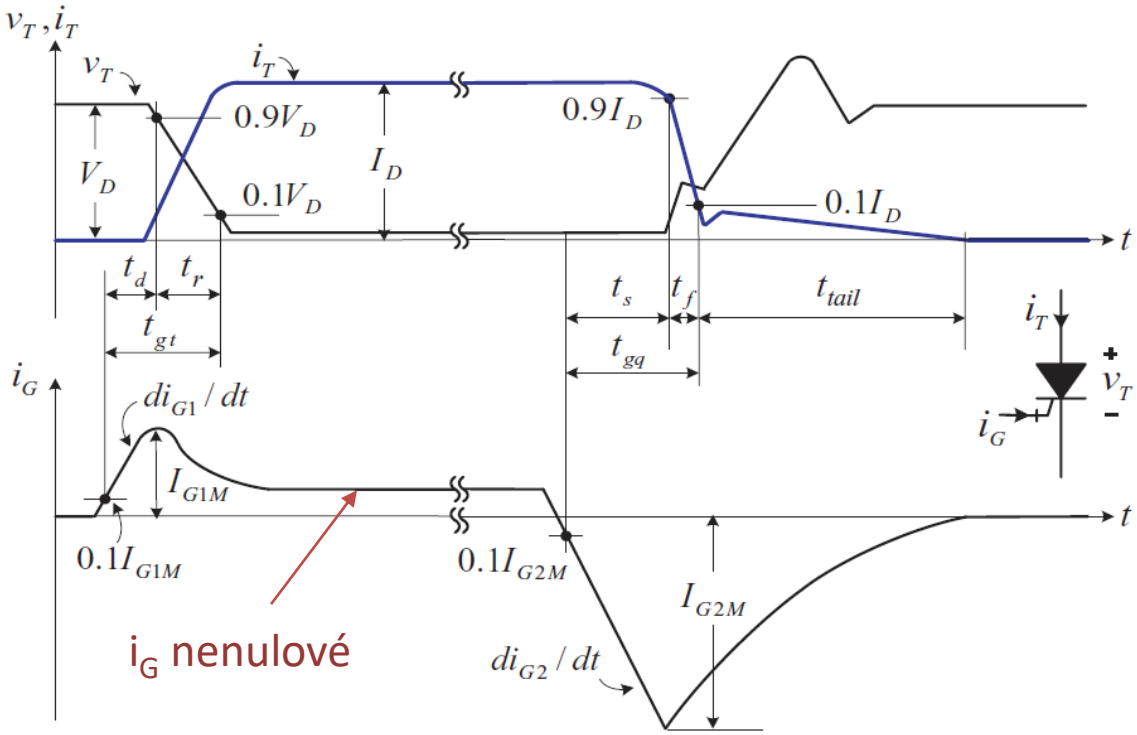
$$\beta_{\text{off}} = \frac{\alpha_2}{(\alpha_1 + \alpha_2) - 1}$$





Vypnutí GTO

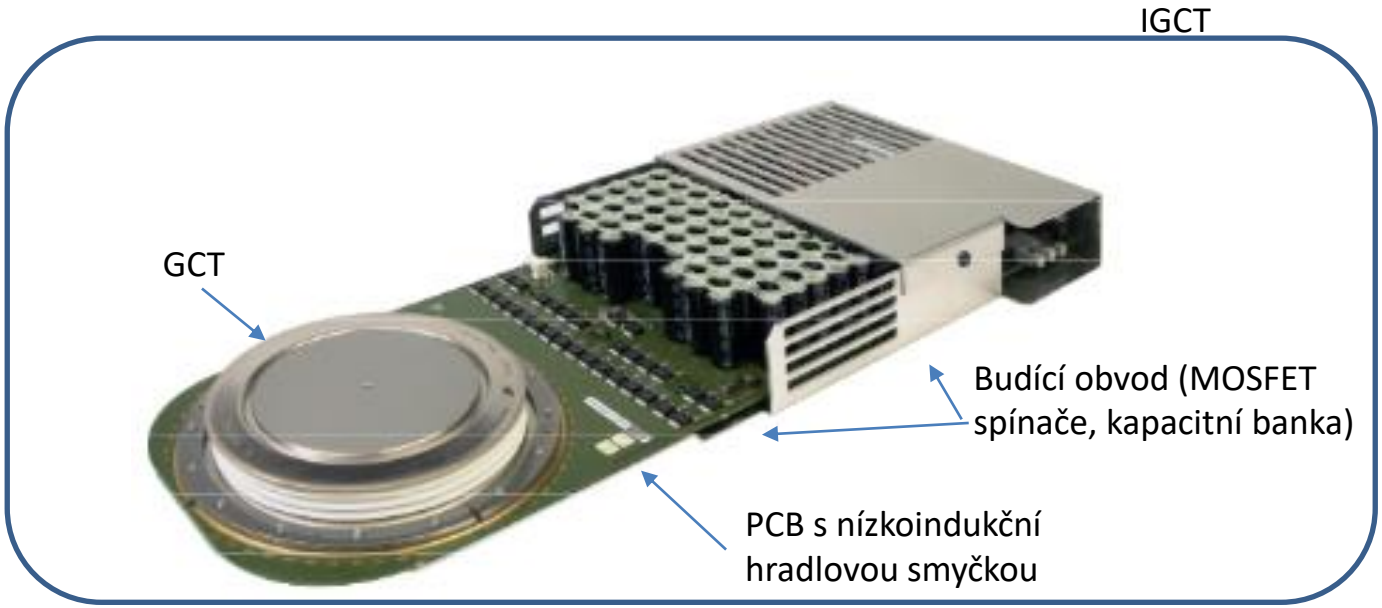
- Nízká dovolená strmost napětí → limitace vnějším odlehčovacím obvodem (snubberem)
- Odstranění náboje z oblasti pod katodovými segmenty musí být současné a rovnoměrné, jinak nejpomalelší segmenty přebírají I_A → destrukce segmentu
- Proudový ocas – extrakce vloženého náboje z báze u anodového přechodu



(5SGA 40L4501 4500V/4kA … t_s = 25µs, t_f = 3µs, dU_T/dt = 1000V/µs)

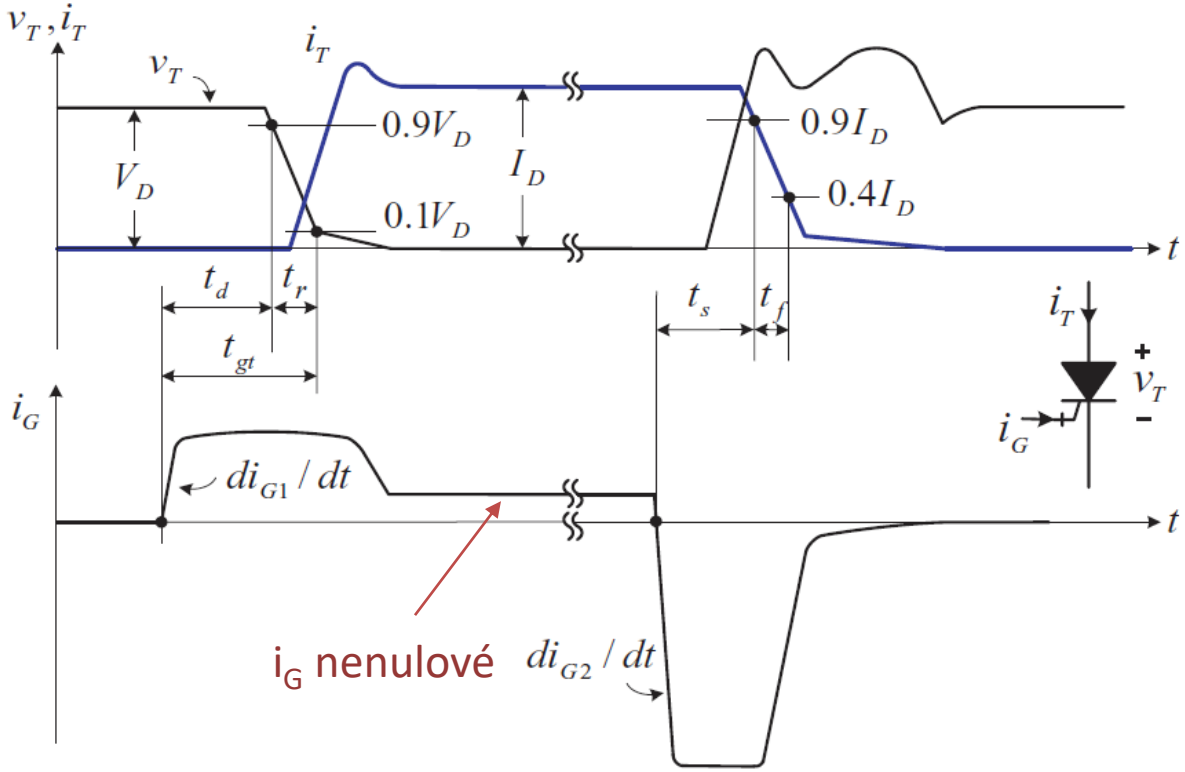
IGCT tyristor (Integrated Gate Commutated Thyristor)

- Nízká dovolená strmost napětí → limitace vnějším odlehčovacím obvodem (snubberem)
- proudový zisk $\beta_{off} = 1$ → vysoké iG → nízká L budího obvodu, aby byl nutný proud dosažen v krátkém čase (~1µs, di_G/dt až 10kA/µs oproti 40A/µs u GTO)



IGCT tyristoru

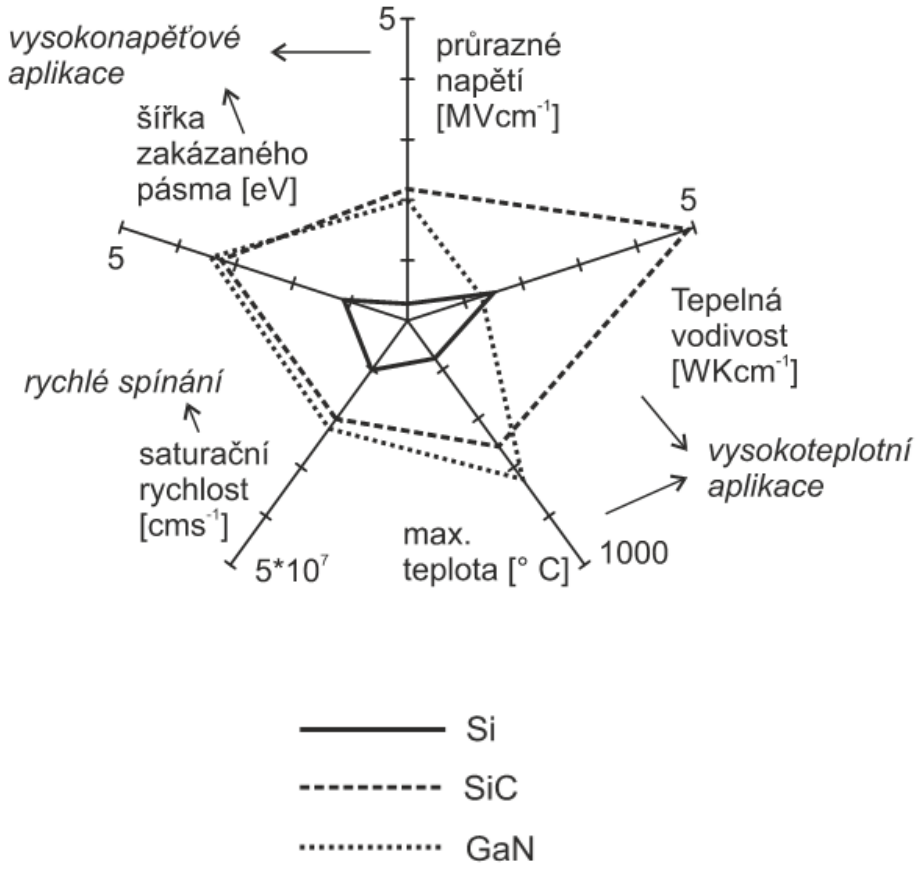
- Nepotřebuje vypínací snubber
- N+ oblast u anodového PN přechodu (mírný PT) → tenčí w_B → menší U_f



- (FGC6000AX120DS 4500V/4kA … t_s = 3µs, dU_T/dt = 3000V/µs)

Polovodiče se širokou ŠZP

Polovodiče se širokou šířkou zakázaného pásma (ŠZP)

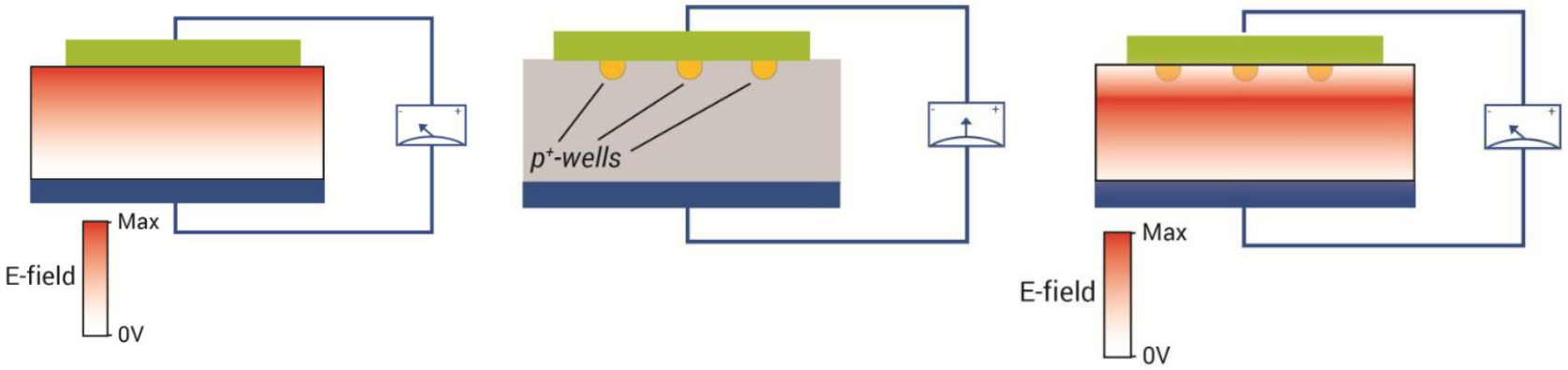


Property	Unit	Si	4H-SiC	6H-SiC	GaN	Diamond
Band gap	eV	1.12	3.26	3.02	3.39	5.47
Electron mobility μ_e	cm^2/Vs	1400	1000/ 1200	450/100	900	2200
Hole mobility μ_h		600	120	100	150	1600
Electric breakdown field E_c	V/cm	3.0×10^5	2.8×10^6	3.0×10^6	3.3×10^6	1.0×10^7
Thermal conductivity λ	W/cm K	1.5	4.9	4.9	2.0	20
Saturated electron drift velocity V_{sat}	cm/s	1.0×10^7	2.2×10^7	1.9×10^7	2.7×10^7	2.7×10^7
Relative dielectric constant ε		11.8	9.7/10.2	9.7/10.2	9.0	5.5

- vyšší blokovací napětí
- vyšší tepelná vodivost
- vyšší provozní teplota čipu
- vyšší spínací frekvence
- vyšší účinnost (výrazně nižší spínací ztráty)

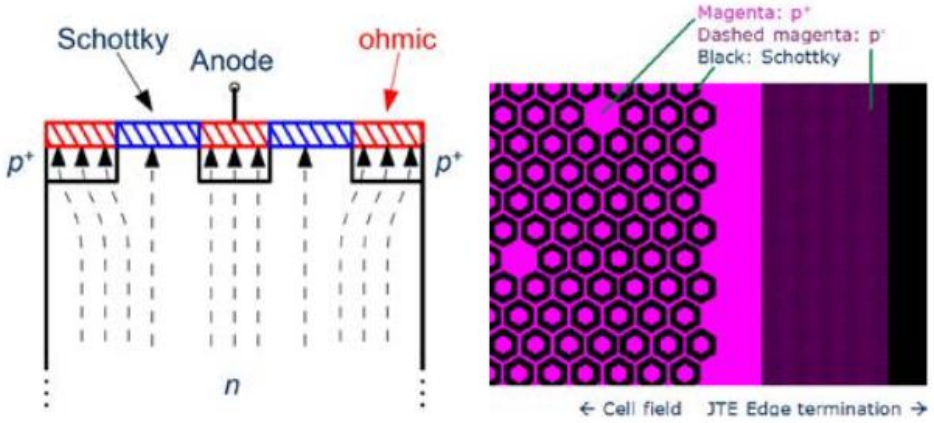
SiC JBS dioda (junction barrier diode)

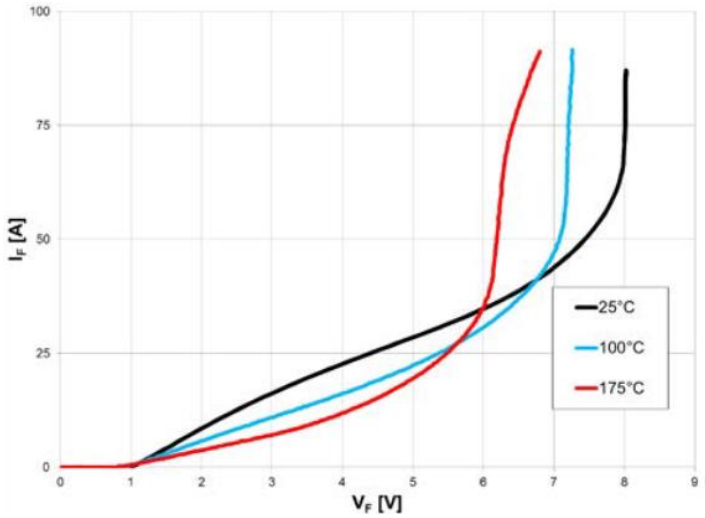
- SiC Shottky diody – deformace v SiC a rovinnosti Shottkyho kontaktu → problémy s i_r → lokální ohřev → spolehlivost klesá
- JBS (junction barrier diode)
  - Přidání P+ oblastí pod Shottkyho bariéru
  - V blokovacím stavu – elektrické pole P+N- přechodu působí proti E → špičková hodnota E se posune pod P+, dále od Shottkyho bariéry → nižší i_r, vyšší blokovací napětí

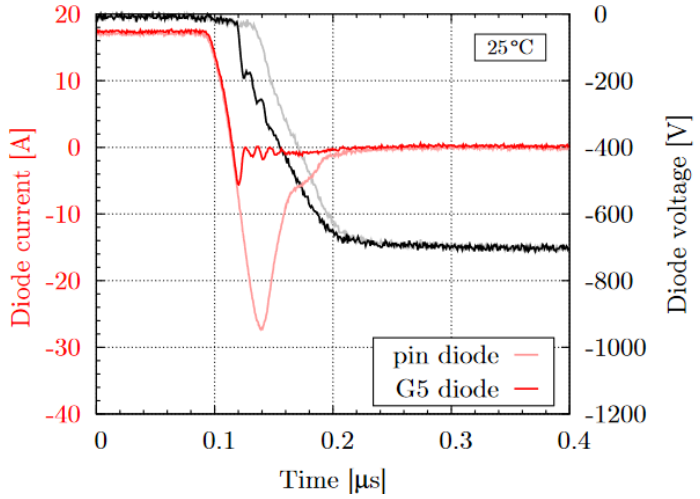


SiC MPS dioda (Merged PIN Schottky)

- V anodové části se střídají Shottkyho a pn oblasti
- Nízké (nulové) zotavení
- Masivní proudová přetížitelnost oproti SBD
- Vyšší U_f oproti Si PIN





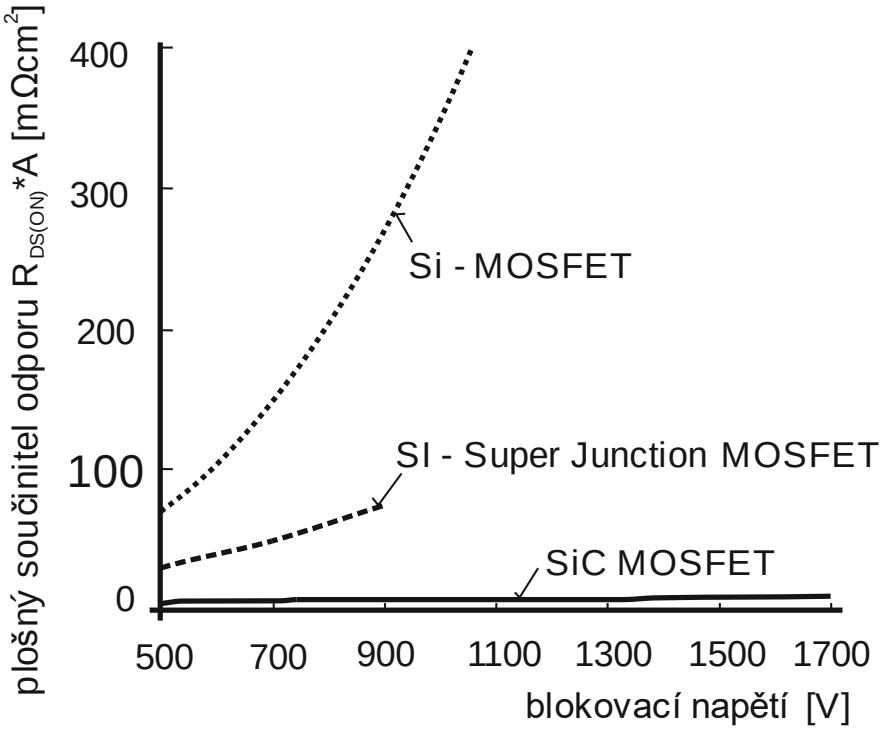


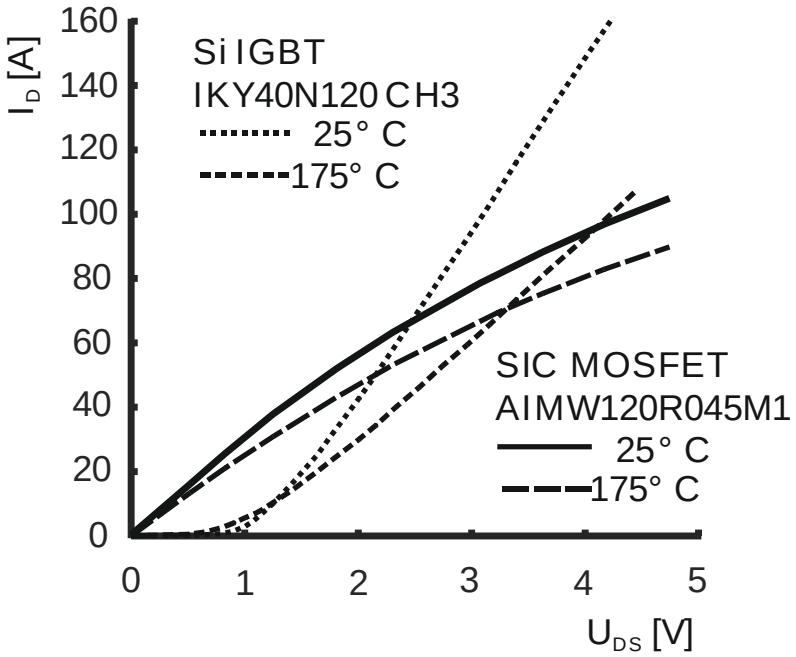
SiC MOSFET tranzistory - vlastnosti

- kombinují nízké vodivostní ztráty a schopnost rychlého spínání v napěťových třídách 600V – 3.3kV proudy 450A (modul)
- Až 10x vyšším průrazné napětí SiC → snížení tloušťka čipu
- Menší geometrické rozměry → menší kapacity → rychlé spínání → nízké spínací ztráty až o 85%
- Při větších proudech horší vodivostní ztráty než IGBT
- Zkratová odolnost SiC MOSFET tranzistorů – vypnutí do 2-3µs
- vyšší maximální provozní teploty – omezení pouzdrem 175-200 °C
- Vyšší odolnost vůči kosmickému záření
- 3-4x vyšší cena než IGBT
- Genrování vysokých strmostí dU_{DS}/dt (>50kV/µs)

SiC MOSFET tranzistory - vlastnosti

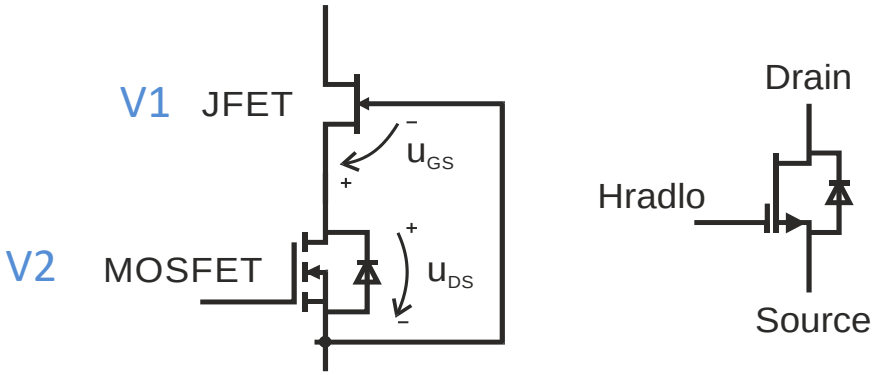
- Srovnání s Si MOSFET a Si IGBT





SiC JFET tranzistory

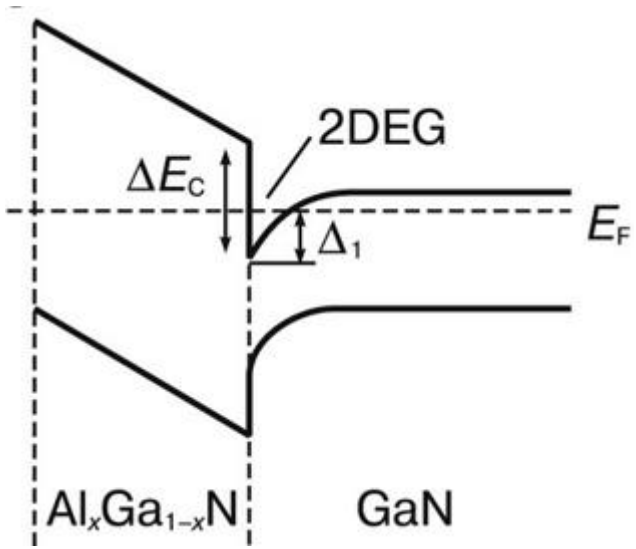
- SiC součástky s nejnižším $R_{DS(ON)}$
- Aby součástka blokovala i bez napájení G → cascode zapojení (použití nízkonapěťového Si-MOSFET tranzistorem)



- platí $u_{DS}(V2) = -u_{GS}(V1)$
- Je-li $u_{GS}(V2)=0$, napětí $u_{DS}(V2)$ roste, a současně $u_{GS}(V1)$ klesá. V okamžiku kdy $u_{GS}(V1)$ dosáhne $u_{GS(th)}(V1)$, tranzistor V1 se vypne.
- Je-li *V2* sepnut $u_{GS}(V1)$ je nulové a *V1* je rovněž plně sepnut. Při vedení proudu diodou *V2* je její úbytek zrcadlen na hradle V1, který je tak opět sepnut

GaN tranzistory - vlastnosti

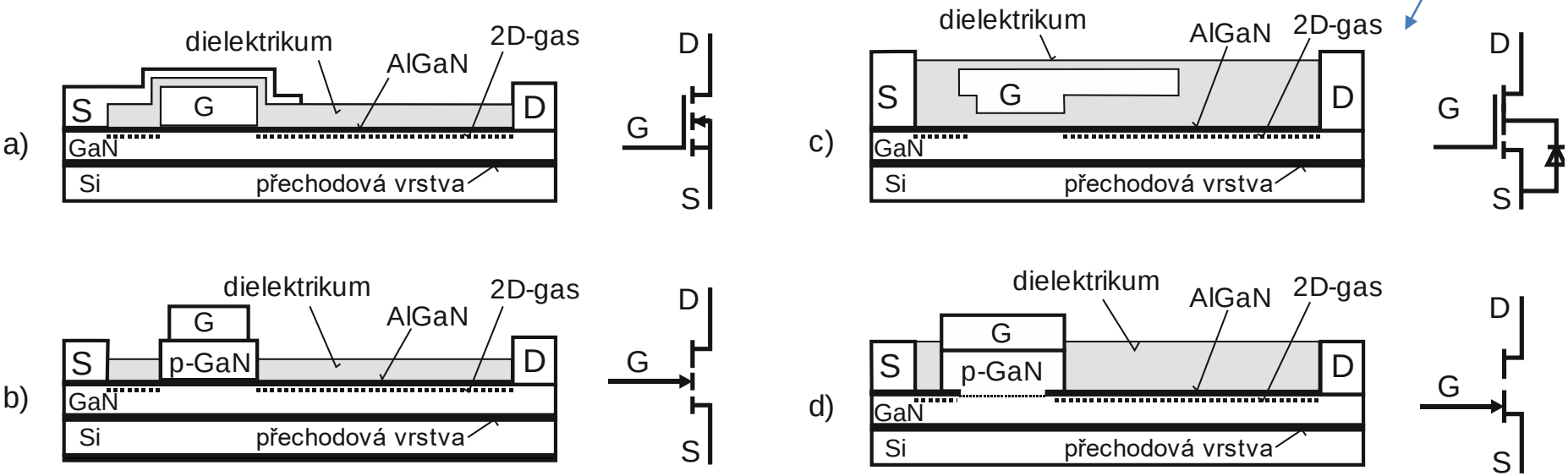
- Rozhraní materiálů AlGaN a GaN →
  tenká planární oblast s vysokou koncentrací e – **2D-gass**
  (valenční hladina pod Fermiho hladinou)
- Zvýšená mobilita elektronů → HEMT (high electron mobility transistor)
- Pouze laterální struktury
- Různé hradlové struktury
- Minimální Q_{rr}
- Napěťové třídy 600V – 900V
- Generování vysokých strmostí
  dU_{DS}/dt (>150kV/µs)
- Spínací doby v jednotkách ns



GaN tranzistory - vlastnosti

- Struktury různých výrobců a jejich schematické značky

Vede při $u_{GS} = 0$ → cascade zapojení

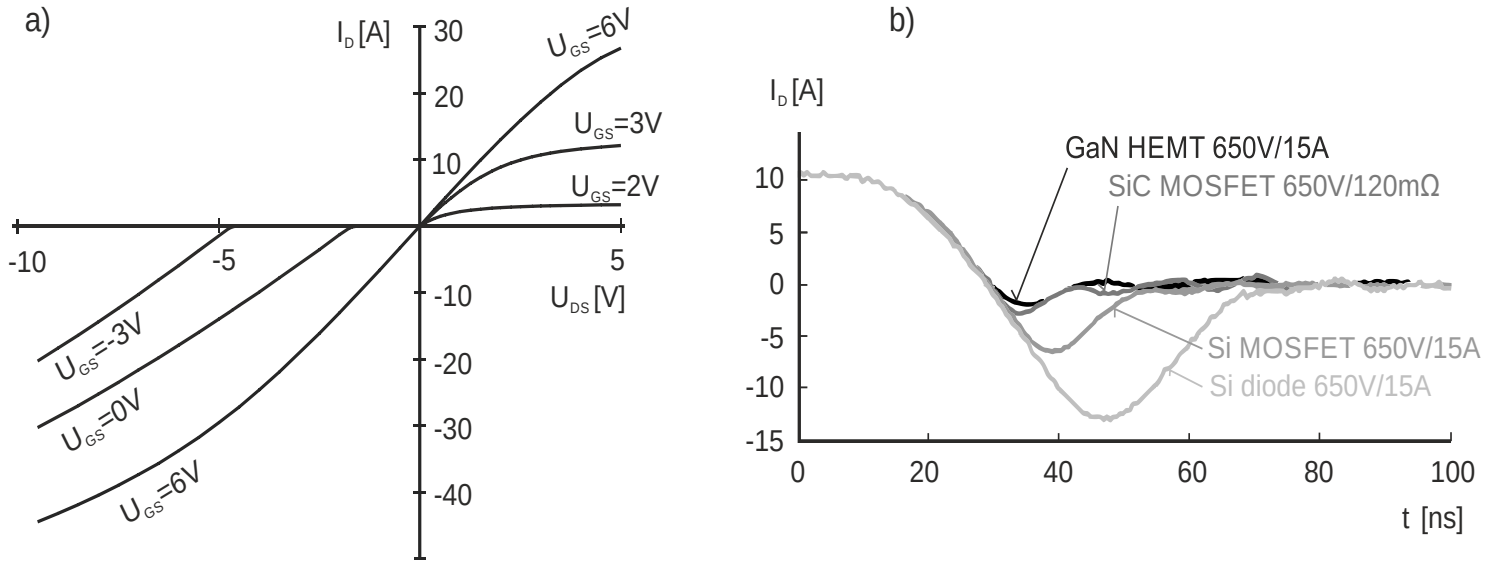


a) EPC, b) GaN Systems, c) Transphorm, d) Infineon, Panasonic

Pn přechod v hradle – trvalý $i_{G(ON)}$

GaN tranzistory - vlastnosti

- Výstupní charakteristika a zotavovací děj HEMT (GaN Systems)



- HEMT nemají vlastní antiparalelní diodu
- Vedou ve třetím kvadrantu – téměř symetrická I-V charakteristika při $u_{GS} > 0$

Pouzdření výkonových součástek

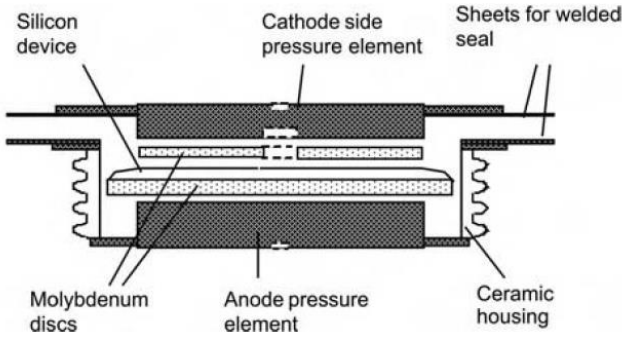
Požadavky na pouzdra

- Vysoká spolehlivost a životnost při proměnlivém zatížení (výkonové a teplotní cyklování apod.)
- Nízké parazitní elementy pouzdra (R, L, C)
- Elektrická izolace součástek ve výkonovém modulu
  - **Bezpotenciálový modul** – modul s izolací vůči externímu chladiči

Kapsule (přítlačná pouzdra)

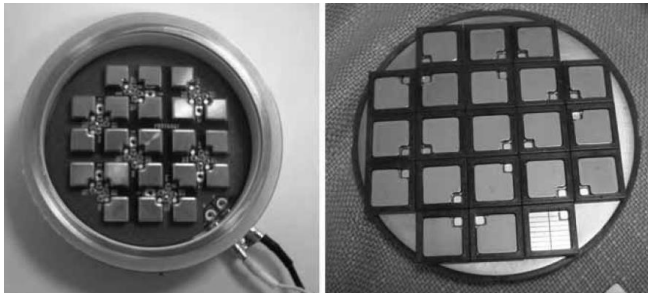
Diody, tyristory

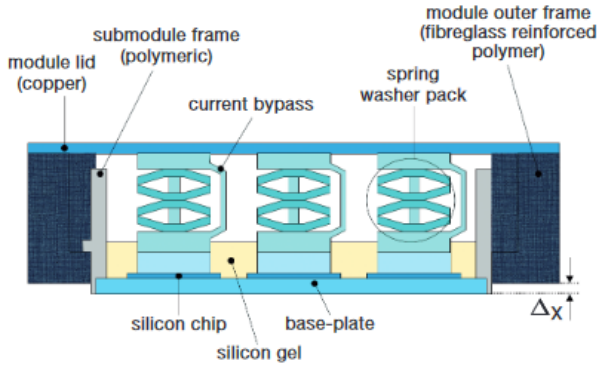






IGBT

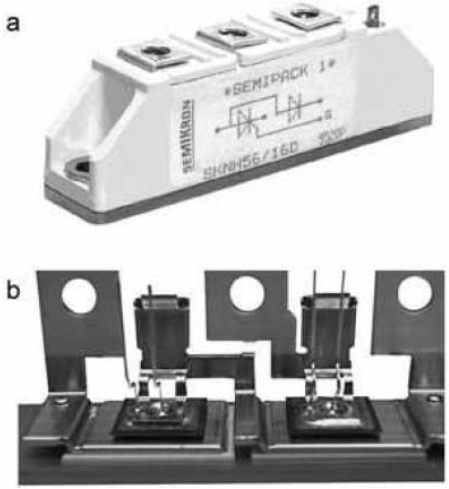


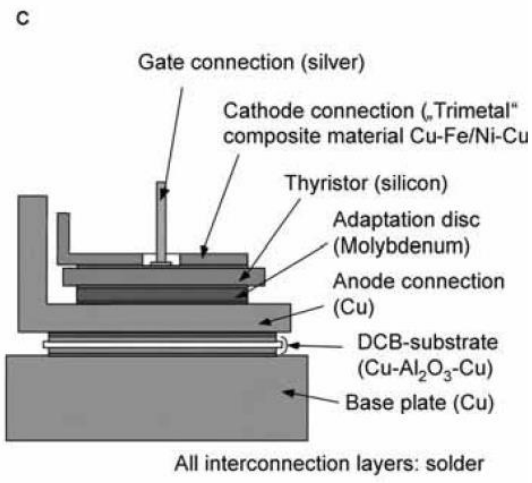


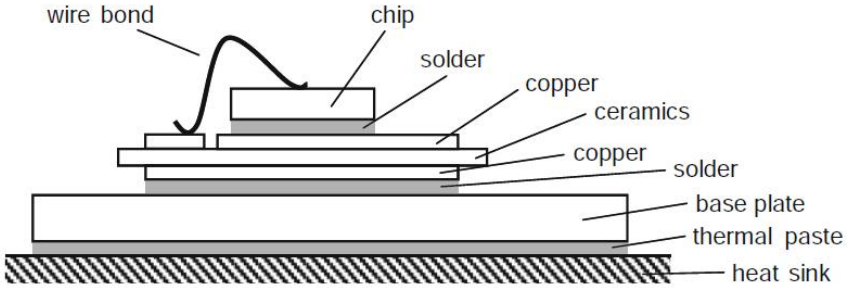
Individuální přítlak

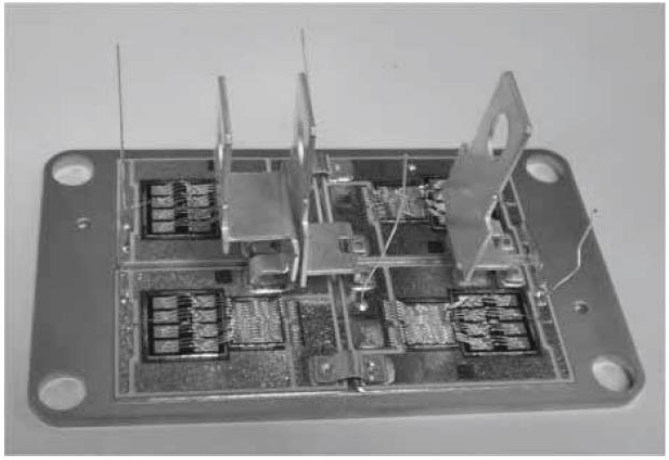
- Kontakt s čipem – molybden (tvrdost, součinitl tepelné roztažnosti)
- Elektrický a termální kontakt – při definovaném tlaku
- Hermeticky uzavřeno

“Klasické” výkonové moduly









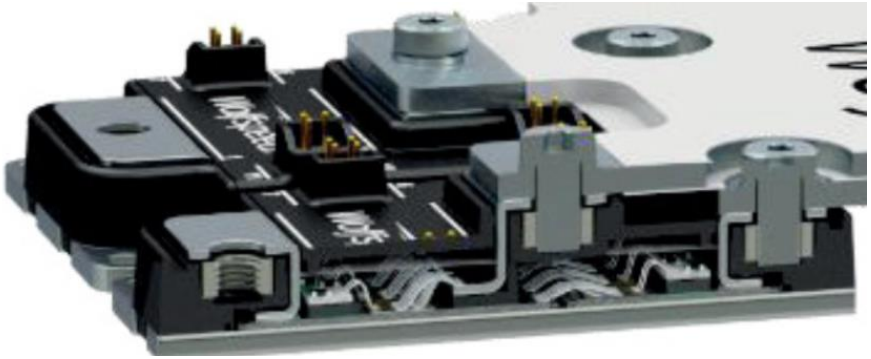
- Rozměrová kompatibilita až 50 let

- Propojení horní vrstvy čipu Al-bondy
- Dolní čip – pájení
- Izolace – dielektrický gel



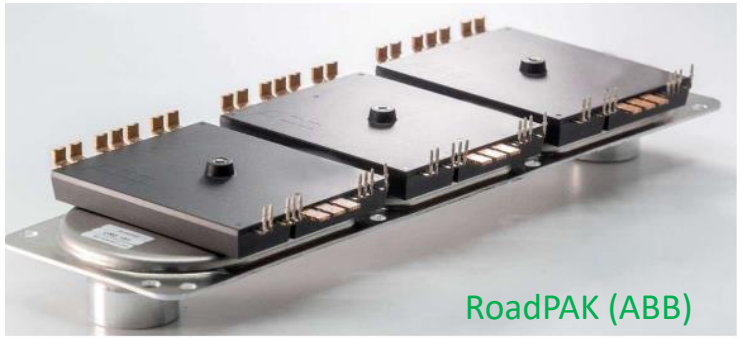
Příklady moderních výkonových pouzder

- Sintrování čipu
- Měděné bondy
- Zalití v plastu
- Přímé chlazení vodou
- Oboustranné chlazení
- Lisovací vývody
- Laserové svařování vývodů



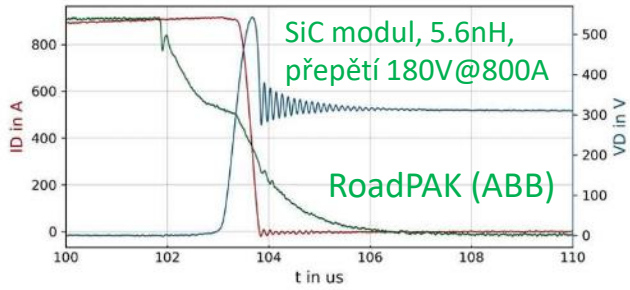
XM3 (CREE)

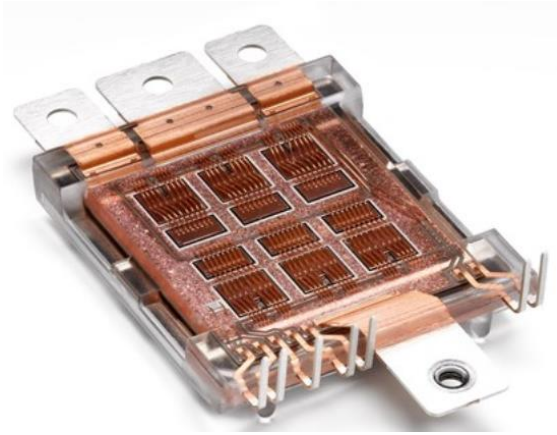




RoadPAK (ABB)







DCM1000 (Danfoss)

Kontrolní otázky

- Jaký je rozdíl mezi GTO a IGCT tyristorem?
- Co je to zesilovací hradlo tyristoru?
- Jaké jsou výhody SiC a GaN oproti Si polovodičům?
- Popište princip MPS diody.
- Co je to cascode zapojení?
- Co je to HEMT tranzistor?
- Jaká je výstupní charakteristika HEMT tranzistoru?
- Co je to parazitní indukčnost pouzdra a čím je významná?
- Co je to bezpotenciálový výkonový modul?



Použitá literatura

- Lutz, J., Schlangenotto, H., Scheuermann, U., De Doncker, R.: **Semiconductor Power Devices.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, 978-3-642-11124-2
- Sze, S.M.; Kwok, K.Ng.: **Physics of semiconductor devices.**Wiley-Interscience, 2007, ISBN 978-0-471-14323-9
- Vobecký, J.; Záhlava, V.: **Elektronika : součástky a obvody, principy a příklady.**GradaPublishing, 2005, ISBN 80-247-1241-5
- Bin Wu, Mehdi Narimani: **High-Power Converters and AC Drives.** Wiley-IEEE Press, 2017, ISBN: 978-1-119-15603-1
- https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/faq/diode_sic-sbd/sic-sbd001.html
- https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/837/product/0/sic_schottky_diode_device_design_characterizing_performance_reliability.pdf
- https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Article_Advantages_of_the_1200V_SiC_Schottky_Diode_with_MPS_Design-Article-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46250cc1fdf0151674981861d76
- https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CoolSiC_Trench_MOSFET_Combining_SiC_Performance_With_Silicon_Ruggedness-Article-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4625d5945ed015d7f3fefec08c2
- https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A3775&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
- https://www.danfoss.com/en/campaigns/dds/automotive-exhibition-space/
- https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8767734
- https://www.systemplus.fr/wp-content/uploads/2018/01/SP18375_Infineon_double_side_cooling_IGBT_sample.pdf