

Príloha č. 4 k Záverečnej monitorovacej správe projektu 09I01-03-V04-00019**InN: prielom v elektronike tuhej fázy****D3.2 (M32) Záverečná správa.****Kvantifikované ciele projektu.**

V pôvodnom návrhu projektu sme v Tabuľke 1 kvantifikovali nasledujúce ciele:

	Súčasnosc'	Cieľ projektu
Nano-vrstva (10-nm) InN		
μ (cm^2/Vs)	700 (20-nm InN)	2000
v (10^7 cm/s)	2.5 (500-nm InN)	5

Tabuľka 1 Porovnanie súčasného stavu a cieľov InBreaku.

Výsledky získané za celé obdobie riešenia projektu.

V ukončenom projekte sme plánovali štúdium a odvodené pracovné balíky v nasledujúcich oblastiach:

- i/ pripraviť a optimalizovať InN/InAlN heteroštruktúry,**
- ii/ vyšetrovať materiálové charakteristiky takto pripravených heteroštruktúr,**
- iii/ študovať a pripraviť MOS tranzistory na heteroštruktúrach s InN kanálom,**

A. Optimalizácia InN/InAlN heteroštruktúry s N-polaritou.

InN je materiál s najvyššou driftovou rýchlosťou elektrónov a to nám ako prvým na svete otvorilo možnosť študovať unikátne tranzistory s potenciálne najrýchlejším spínaním. V úvodnej fáze riešenia projektu sme študovali InAlN(Mg) vrstvy, kde Mg dotácia InAlN viedla k nárastu odporu vrstvy, zatiaľ čo N polarita a vysoký molárny obsah In ~ 0.6 umožňovali následný rast čiastočne napnutej kanálovej vrstvy InN. Mg-dotované InAlN vrstvy boli rastené priamo na zaříre. Prítomnosť iónov Mg bola potvrdená analýzou SIMS, odpor vrstiev drasticky rástol so zvyšovaním Cp_2Mg prietoku. Následne sme rástli InN/InAlN(Mg) heteroštruktúry, hrúbka InN kanála bola 20 nm, prietok Cp_2Mg bol 30-80 nmol/min, variovali sme AlN nukleáciu zaříru, resp. AlN medzivrstvu medzi InAlN a InN. XRD a TEM analýzy indikovali vysokú kvalitu tenkých, čiastočne napnutých InN vrstiev. V tomto prípade,

koncentrácia skrutkových a hranových dislokácií čiastočne napnutej InN vrstvy bola $6.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ a $38 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$. Na druhej strane, vynechaním AlN nukleačnej vrstvy, kryštalografická kvalita InAlN buffer vrstvy sa zhoršila, avšak jej odpor dosiahol hodnotu $1.7 \text{ k}\Omega/\square$.

B. Vyšetrovanie transportných vlastností elektrónov v InN vrstvách.

Elektrické vlastnosti kvantových jám sme analyzovali Hall experimentom. Zistili sme, že vloženie AlN oddeľovacej vrstvy medzi InAlN buffer vrstvu a InN kanál vedie k potlačeniu rozptylu InN elektrónov na vzdialených donoroch a neusporiadanosti InAlN zlúčeniny, čím sme pri izbovej teplote dosiahli hodnoty pohyblivosti a koncentrácie elektrónov $620 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ a $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Pripravili sme testovacie InN rezistory na ktoré sme aplikovali 10 ns dlhé napäťové pulzy. Následne sme extrahovali driftovú rýchlosť elektrónov. Dosiahnutú hodnotu minimálne $2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ považujeme za veľmi sľubnú pre novú generáciu ultra-rýchlej elektroniky. Hodnoty prúdovej hustoty $\sim 12\text{-}16 \text{ A/mm}$ a intenzity poľa elektrického prierazu $\sim 75 \text{ kV/cm}$ možno tak isto považovať za veľmi sľubné. V záverečnej fáze projektu sme vhodnosť InN/InAlN heteroštruktúr demonštrovali prípravou testovacích tranzistorov typu HEMT, s čiastočným ovládaním pomocou MOS hradla.

C. MOS kontakty na heteroštruktúrach s N-polaritou.

V záverečnej časti štúdia unikátnych tranzistorov na báze InN/InAlN(Mg) heteroštruktúr sme optimalizovali úpravu povrchu (suché leptanie) a prípravu MOS kontaktov. Použili sme techniku tzv. digitálneho leptania, kde sme 5 x opakovali sekvenciu samo-limitujúcej plazmatickej oxidácie a chemického leptania v roztoku HCl. Predpokladáme, že sme odobrali cca 5 monovrstiev InN, čo malo eliminovať tzv. povrchové obohatenie InN a napomôcť tvorbe kontaktov typu MOS. Následne sme deponovali 10 nm HfO_2 , ale len do oblasti hradla, čo malo eliminovať povrchové zvody. Takýmto spôsobom sa nám podarilo výrazným spôsobom vylepšiť CV charakteristiku hradlového kontaktu MOS, kde pokles z 800 na $\sim 200 \text{ nF/cm}^2$ odpovedalo rozšíreniu priestorového náboja resp. kapacity medzi hradlovou metalizáciou a InAlN buffer vrstvou. Napriek zrejme ešte stále neúplnému vyprázdneniu InN/InAlN kvantovej jamy a vysokému zvyškovému prúdu sme týmto postupom vylepšili charakter výstupných charakteristík unikátnych tranzistorov.

Porovnanie výsledkov projektu s pôvodnými cieľmi.

Kvantifikované hodnoty v Tabuľke 1 odrážali „state-of-the-art“ technológie InN/InAlN heteroštruktúr začiatkom roka 2023. To znamená, že hodnoty pohyblivosti elektrónov 700

cm^2/Vs odpovedali nanovrstve InN pripravenú na nedotovanej nárazníkovej vrstve InAlN, hodnoty driftovej rýchlosti $2.5 \times 10^7 \text{ cm/s}$ sme dosiahli v objeme 700 nm hrubého InN. Tieto podmienky však definujú odlišnosti oproti tranzistorom, kde InN kanál musí byť nanovrstva narastená na dotovanej semi-izolačnej InAlN vrstve. Dôležitosť týchto rozdielov sa ukázala byť rozhodujúca až v priebehu realizácie projektu. Po zavedení Mg dotácie InAlN vrstiev, hodnoty pohyblivosti elektrónov v InN/InAlN(Mg) štruktúrach klesli pod úroveň $400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, rýchlosti na hodnotu $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$, čo zadefinovalo nový východzí stav, viď. monitorovacie správy. A teda hodnoty dosiahnuté na konci projektu na optimalizovaných InN/InAlN(Mg) štruktúrach, pohyblivosť $620 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ a rýchlosť $> 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ reprezentujú cca 100 % nárast oproti stavu k skutočne relevantným tranzistorovým štruktúram v úvode projektu.

V závere správy môžeme sumarizovať, že sme úspešne demonštrovali i/unikátnu heteroštruktúru In/(AlN)/InAlN s dusíkovou polaritou vhodnú pre vývoj novej generácie ultra-rýchlej elektroniky, ii/ vzácnu kombináciu vysokej driftovej rýchlosti elektrónov a vysokej elektrickej pevnosti v takto pripravenej In/(AlN)/InAlN kvantovej jame, iii/ vylepšený MOS kontakt s rozhraním InN/HfO₂ pripraveným kombináciou plazmatickej oxidácie a mokrého leptania, **Vytýčené ciele projektu boli týmto pádom splnené.**

Dopad ukončeného projektu. Koncept tranzistorov na báze InN//InAlN má perspektívu pre novú generáciu veľmi rýchlej elektroniky, napr. v 6G sieťach a v telekomunikáciách pre prenos veľkej hustoty dát (koncept IoT). Tranzistory pracujúce v (sub)THz oblasti majú potenciál vymazať súčasnú THz frekvenčnú medzeru ktorá existuje medzi elektronickými a optickými súčiastkami. Tým pádom by bolo možné napr. nahradiť kryto zdroje infračerveného žiarenia ako sú kvantové kaskádové lasery tranzistormi pracujúcimi pri izbovej teplote.