

Príloha č. 2 k Záverečnej monitorovacej správe projektu 09I01-03-V04-00019

InN: prielom v elektronike tuhej fázy

D2.2 (M18) Správa o Hallových parametroch optimalizovaného InN/GaN/InAlN QW.

Predpokladáme niekoľko konkrétnych mechanizmov rozptylu elektrónov v navrhovaných kvantových jamách (QW). Pohyblivosť elektrónov (μ) 2-rozmerného elektrónového plynu (2DEG) v InN bude ovplyvnená poruchami zliatiny nárazníkovej vrstvy InAlN, ako aj vzdialenými donormi Coulombovým rozptylom až do vzdialenosti cca 5 nm. Kvalita rozhrania kanál/nárazníková vrstva bude určovať rozptyl na drsnosti rozhrania, zatiaľ čo samotný kanál InN bude prispievať nabitými dislokáciami, ionizovanými nečistotami a rozptylom na optických fonónoch. Je zaujímavé, že optické fonóny môžu byť spojené aj s predčasnou saturáciou rýchlosti elektrónov, najmä v prípade vysokej 2DEG hustoty prostredníctvom akumulácie horúcich fonónov. Poznamenávame, že metóda nukleácie substrátu môže tiež ovplyvniť 2DEG transportné vlastnosti zmenou kvality rastu vrstiev. Už skôr sme ukázali, že nitridácia zafíru pri 1010 °C počas 300 s kombinovaná s nukleáciou AlN pri 730 °C počas 30 s viedla k N-polárnemu rastu. Na druhej strane, disociácia tenkej nukleačnej vrstvy AlON na Al-polárnych AlN ostrovočkách môže byť zodpovedná za tvorbu inverzných domén. Berúc toto do úvahy a aby sme získali prístup ku všetkým uvedeným javom rozptylu, v našom projekte sme pripravili InN (20nm)/In_{0.61}Al_{0.39}N(Mg) QW pri mierne zníženej teplote nitridácie a nukleácie s voliteľnou < 1 nm tenkou AlN medzivrstvou medzi nárazníkovou vrstvou a kanálom. Pripravila sa aj ďalšia štruktúra QW bez kroku nukleácie AlN. Ak naše pokusné štruktúry overia očakávania týkajúce sa jedinečných vlastností transportu elektrónov v InN, mohlo by to otvoriť cestu k novej generácii rýchlej elektroniky.

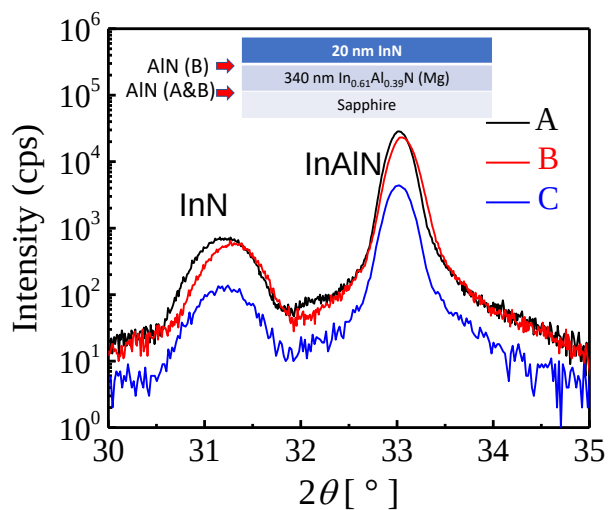
Na rast MOCVD sme použili AIXTRON 3 × 2" reaktor so sprchovou hlavou, trimetylindium (TMIn), trimetylalumínium (TMAI) a amoniak (NH₃) sa použili ako prekursori In, Al a N, ako nosný plyn sa použil N₂. Zafírové substráty boli vystavené toku NH₃ počas 300 s pri 990 °C, po čom nasledoval nukleačný AlN rastený počas 35 s pri 710 °C ako súčasť zafírovej nukleácie. 340 nm hrubý InAlN dopovaný Mg bol rastený pri rovnakej teplote s použitím prietoku prekursora Cp₂Mg 30 nmol/min a in-situ žihaného počas 20 minút. Nakoniec 20 nm hrubý InN kanál bol rastený pri 600 °C. Ako alternatívny prístup k opísanej vzorke A bol tenký AlN tiež rastený ako medzivrstva medzi nárazníkovú vrstvu a kanál (vzorka B) alebo bol úplne vynechaný (vzorka C), viď vložená schéma na obrázku 1. Hallove transportné parametre boli

merané v teplotnom rozsahu (T) medzi izbovou teplotou (RT) a 4 K v štandardnej Van der Pauw konfigurácii. Energetický pásový diagram a profil koncentrácie voľných elektrónov študovaných heteroštruktúr boli vypočítané pomocou Schrödinger-Poissonovej rovnice.

Obrázok 1 znázorňuje XRD 0002 $2\theta/\omega$ difrakcie skúmaných vzoriek. Tabuľka I sumarizuje materiálové parametre určené aj doplnkovými XRD skenmi, kde x_{InN} predstavuje obsah InN, ϵ_1 napätie v rovine, s polšírkami (FWHM) zodpovedajúcich difrakcií a s vypočítanými hustotami dislokácií (N_{dis}). Hodnota x_{InN} nárazníkovej vrstvy InAlN bola zistená medzi 60 % and 61 %, x_{InN} kanála InN medzi 98 % and 99 %, čo môže odrážať určitú nejednoznačnosť extrakčnej metódy a/alebo možnú kontamináciu vrstvy.

Na základe údajov v Tab. 1 usudzujeme, že vložení medzivrstvy AlN medzi nárazníkovú vrstvu a kanál vzorky B sa kryštalografická kvalita InN zlepšila v porovnaní so vzorkou A. To sa odrazilo v menšej FWHM difrakčného píku InN a v nižšej N_{dis} , ktorá konkrétne klesla na približne $6,5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ pre skrutkové (N_{disS}) a $38 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ pre hranové (N_{disE}) komponenty. Súčasne sa ϵ_1 InN znížilo na -0,5 %, čo predstavuje relaxáciu nad 90 %. To je dokumentované aj na Obrázku 1 posunom difrakčných maxím InN vzorky B bližšie k InAlN v porovnaní so vzorkou A. Na druhej strane, vo vzorke C sa kryštalografická kvalita vrstiev InN aj InAlN zhoršila, ak bol vynechaný nukleačný krok AlN. To sa odráža v zníženom difrakčnom signáli zobrazenom na Obrázku 1 a v až 65 % náraste N_{dis} uvedenom v Tab. 1 v porovnaní so vzorkami A a B. Tabuľka 1 napriek tomu naznačuje, že AlN vrstva použitá či už ako medzivrstva medzi nárazníkovú vrstvu a kanálom, alebo ako súčasť nukleácie, nemá žiadny vplyv na x_{InN} , ktorý je približne 61 % v nárazníkovej vrstve a približne 99 % v kanáli.

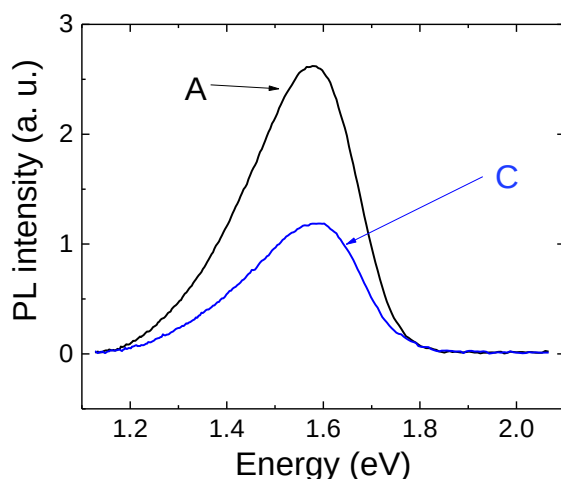
Vyššia úroveň kryštalografickej neusporiadanosti vzorky C je dokázaná aj fotoluminiscenciou (PL) znázornenou na Obrázku 2, ktorá vykazuje širšiu FWHM približne 279 meV a zníženú intenzitu PL žiarenia, pravdepodobne v dôsledku dodatočných neradiačných defektov v porovnaní so vzorkou A. Poznamenávame nezmenenú polohu maxím PL signálu pri 1,58 eV, čo je v súlade s určeným $x_{InN} \sim 61$ % a očakávaným prehnutím zakázaného pásma (bandgap bowing).



Obrázok 1. XRD $2\theta/\omega$ difrakčné krivky InN(20 nm)/In_{0.61}Al_{0.39}N (Mg) vzoriek A-C.

Vzorka	Vrstva	X_{InN}	ϵ_I (%)	FWHM (°)			N_{dis} (10^9 cm^{-2})	
		(%)		0002	$10\bar{1}1$	$10\bar{1}0$	N_{disS}	N_{disE}
A	InAlN	61(±1)	-0.03	0.28	0.79	0.88	2.0(±0.1)	50(±1)
	InN	99(±1)	-0.8	0.59	0.91	0.98	7.5(±0.2)	54(±1)
B	InAlN	61(±1)	0.04	0.28	0.80	0.90	2.0(±0.1)	50(±1)
	InN	99(±1)	-0.5	0.55	0.77	0.82	6.5(±0.2)	38(±1)
C	InAlN	60(±1)	-0.2	0.35	0.82	0.91	3.0(±0.2)	51(±1)
	InN	98(±1)	-0.7	0.65	0.97	1.05	9.0(±0.3)	62(±1)

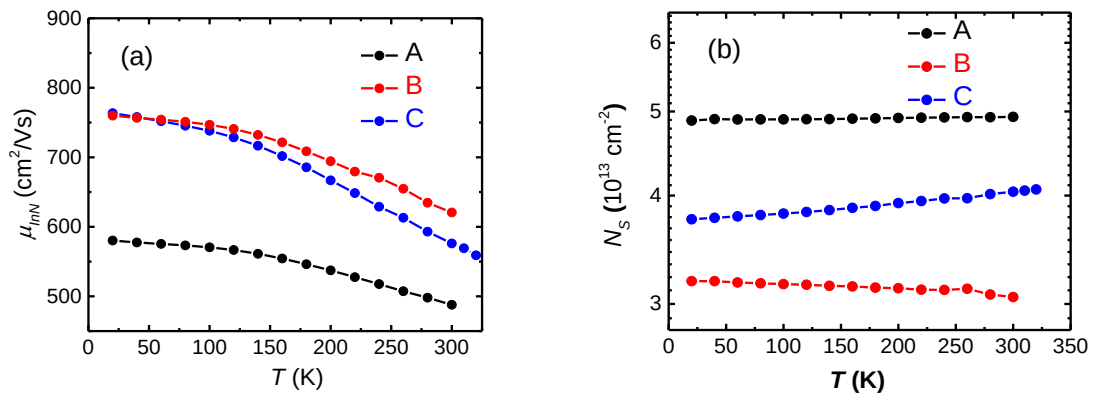
Tabuľka 1. Materiálové parametre vzoriek A-C extrahované z XRD experimentov.



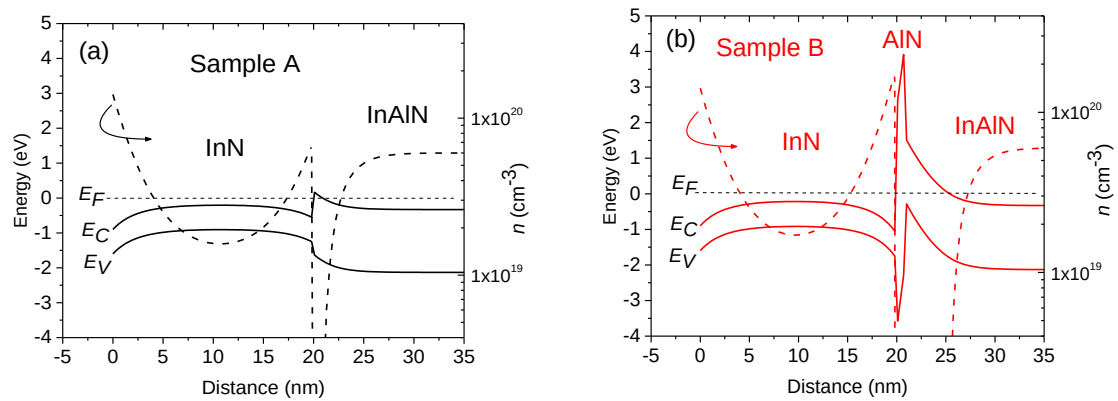
Obrázok 2. PL signál z nárazníkovej InAlN vrstvy vzoriek A a C s/bez AlN nukleácie pri 6.5 K.

Aby sme študovali úlohu všetkých vyššie uvedených štruktúrnych zvláštností vo vlastnostiach prenosu elektrónov InN/InAlN QW, pokračovali sme analýzou Hallovho javu. Poznamenávame, že aj keď súčasný experiment používa odporové Mg-dopované InAlN vrstvy, niektoré parazitné vedenie nemožno úplne vylúčiť. Preto na určenie vodivosti cez samotný kanál InN môže byť potrebná počiatočná charakterizácia InAlN nárazníkových vrstiev nasledované paralelnou analýzou vodivosti celého QW, podobne ako inde pre QW s nedopovanými InAlN vrstvami. Čo sa týka nárazníkovej vrstvy vzoriek A a B, tu používame naše skoršie údaje, t. j. pohyblivosť elektrónov $\mu \sim 5.6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ a objemovú koncentráciu (n) $\sim 6.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pri RT, až po $\mu \sim 4.7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ a $n \sim 6.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ pri 4 K. Analýza nárazníkovej vrstvy rastenej bez nukleácie AlN (vzorka C) odhaľuje ďalšie $\sim 15 \%$ zníženie μ a $\sim 50 \%$ zníženie n (nezobrazené). To poskytlo zvýšenie odporu InAlN nárazníkovej vrstvy z približne $0,7 \text{ k}\Omega$ vzoriek A a B na $1,7 \text{ k}\Omega$ vzorky C. Ak to vezmeme do úvahy a po dokončení vyššie uvedenej analýzy paralelnej vodivosti, mohli sme extrahovať InN/InAlN QW hodnoty μ a 2DEG koncentrácie (N_s) všetkých vzoriek, ako je znázornené na obrázku 3. S T vidíme pokles týchto hodnôt, s tendenciou saturovať pri $T < 100 \text{ K}$. To naznačuje ionizované nečistoty, náboj na dislokáciach a rozptyl na drsnosti rozhrania pri nízkej T , s postupným prispením rozptylu na polárnych optických fonónoch pri vyššej T . Z druhej strany, pri porovnaní vzoriek A a B sme zaznamenali podstatné ($\sim 30 \%$) zlepšenie μ , ak bol InN kanál oddelený od nárazníkovej vrstvy použitím AlN medzivrstvy. Preto konkrétne pre náš prípad ternárnej nárazníkovej vrstvy InAlN s vysokým neúmyselným dopingom môžeme medzi ďalšie dôležité aspekty navrhovaných QW uviesť poruchu zliatiny InAlN a vzdialený rozptyl donorov. Je zaujímavé, že pre vzorku C zostáva μ vysoká, aj keď kryštalografická kvalita trpela

chýbajúcim nukleačným krokom, dokumentovaným najvyšším N_{dis} , pozri Tab.1 a degradovaným PL, znázorneným na obrázku 2. Na druhej strane, dislokácie môžu pôsobiť aj ako akceptorové stavy. Ak toto predpokladáme, dislokácie vo vzorke C môžu kompenzovať neúmyselné dopovanie InAlN, ako naznačuje vyššie spomenutý 50 % pokles n . V dôsledku toho môže znížený rozptyl vzdialených donorov vysvetliť aj vysoké μ vzorky C. Všimli sme si takmer T -nezávislé hodnoty N_S , znázornené na obrázku 3, ktoré boli ~ 4 až $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ pre vzorky A a C bez medzivrstvy AlN. N_S prekvapivo klesol na $\sim 3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ pre vzorku B, aj keď s vložením medzivrstvy by sa malo zabezpečiť kvalitnejší rast InN. Ďalej, pre lepšie pochopenie všetkých javov, sme vypočítali diagramy energetických pásiem a profily koncentrácie elektrónov navrhovaných QW, znázornené na obrázku 4. Poznamenávame, že výpočty vzorky C tu nie sú zobrazené ako takmer identické so vzorkou A. Na povrchu všetkých vzoriek náš model odráža očakávanú Fermiho hladinu (E_F) prichytenú $\sim 1,6 \text{ eV}$ nad valenčným pásom (E_V) a s tým súvisiacu akumuláciu elektrónov. Silne ohraničené, ale od nárazníkovej vrstvy oddelené 2DEG je znázornené na obrázku 4(b) pre vzorku B. To je v zhode a vysvetľuje to naše skoršie komentáre o zníženom rozptyle elektrónov od vzdialených donorov a porúch InAlN zliatiny v tomto prípade. Ďalším zaujímavým aspektom vzorky B je, že medzivrstva AlN poskytuje silné zdvíhanie E_C nad E_F blízko rozhrania kanála, pozri obrázok 4 (b). To môže na jednej strane poskytnúť prospešnú $\sim 5 \text{ nm}$ hrubú energetickú bariéru proti injekciám elektrónov z kanála InN do InAlN, ale aj nejednoznačnosť pri zdôvodňovaní aplikovanej analýzy paralelného vedenia. V dôsledku toho môžu byť hodnoty N_S vzorky B znázornené na obrázku 3(b) podhodnotené.



Obrázok 3. Hall efekt analýza vzoriek A-C s (a) μ a (b) N_S hodnotami do 4 K.



Obrázok 4 Vyrátané energetické pásové diagramy a koncentrácie voľných elektrónov (a) vzorky A a (b) vzorky B.